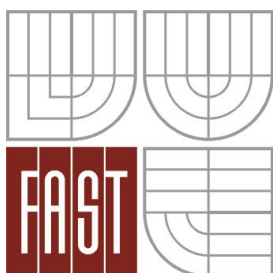


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

MODUL PRUŽNOSTI PŘÍRODNÍHO KAMENE

MODULUS OF ELASTICITY OF NATURAL STONE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MICHAELA HODULÁKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. DALIBOR KOCÁB

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Michaela Hoduláková
Název	Modul pružnosti přírodního kamene
Vedoucí bakalářské práce	Ing. Dalibor Kocáb
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2014
Datum odevzdání bakalářské práce	29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

.....
prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Velflík, A., V.: Nauka o stavebních hmotách, zvláště o horninách technicky významných, o jejich zkoumání a zpracování.
Schmidt, P. a kol.: Základy zkušebnictví.
Pytlík, P.: Technologie betonu.
Aïtcin, P.-C.: Vysokohodnotný beton.
Collepari, M.: Moderní beton.
Neville, A.M.: Properties of concrete.
Newman, J.: Advanced concrete technology – Processes.
Newman, J.: Advanced concrete technology – Concrete Properties.
Odborné články pojednávající o zadané problematice.
Všechny tč. platné normy, zejména s přihlédnutím k ČSN EN 14580, ČSN 73 3251, ČSN EN 206, ČSN EN 12504-4, ČSN 73 1371, ČSN 73 1372, ČSN ISO 6784, ČSN EN 1992-1, ČSN EN 12390-13.

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Teoretická část: Rešerše pramenů – horniny používané pro výrobu hrubého kameniva do betonu a jejich vlastnosti, především modul pružnosti v tlaku/tahu. Beton a jeho vlastnosti, vlivy na výslednou hodnotu modulu pružnosti betonu, zejména s přihlédnutím k použitému kamenivu. Popis metod, pomocí nichž se zjišťuje modul pružnosti betonu či kamene.

Praktická část: Zpracování plánu experimentu – ověření dynamické i statické hodnoty modulu pružnosti různých druhů přírodního kamene. Zkušební tělesa budou získána ze vzorků hornin a také z mostní konstrukce. Provedení nedestruktivního měření pomocí ultrazvukové a rezonanční metody a určení statického modulu pružnosti kamene v tlaku. Tabelární a grafické zpracování výsledků zkoušek, vyhodnocení výsledků zkoušek. Provedení teoretického výpočtu průhybu ŽB trámu v závislosti na hodnotě modulu pružnosti betonu. Na základě zjištěných výsledků učinit adekvátní závěr. Práci se zkušebními lisy provede osoba k tomu oprávněná.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....
Ing. Dalibor Kocáb
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Hodnota modulu pružnosti betonu závisí na jeho složení (zejména na použitém kamenivu). Jelikož v současném stavebnictví neexistuje žádná ucelená literatura týkající se modulů pružnosti jednotlivých typů kameniva, je tato práce zaměřená na zkoušky a porovnání modulů pružnosti vybraných druhů hornin používaných pro výrobu drceného hrubého kameniva do betonu. Moduly pružnosti se zjišťují statickou a dynamickou metodou. Práce se také věnuje modulu pružnosti žuly v rozdílném stádiu zvětrání.

Klíčová slova

Beton, horniny, kamenivo, modul pružnosti, pevnost v tlaku, statická zatěžovací zkouška, rezonanční metoda, ultrazvuková metoda, zvětrávání

Abstract

The value of the modulus of elasticity of concrete depends on the concrete composition (particularly on the aggregate used). The contemporary construction industry literature lacks comprehensive studies of the modulus of elasticity for each type of the rock stone. Therefore, this study focuses on testing and comparing the modulus of elasticity of selected types of rock stones used for the production of crushed coarse aggregates into the concrete. The modulus of elasticity are determined by static and dynamic methods. The work also deals with the modulus of elasticity of granite in different stages of weathering.

Keywords

Concrete, rock stones, aggregates , modulus of elasticity, compressive strength, static load test, resonance method, ultrasonic pulse method, weathering

...

Bibliografická citace VŠKP

Michaela Hoduláková *Modul pružnosti přírodního kamene*. Brno, 2015. 60 s., 15 s. příl.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního
zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Dalibor Kocáb.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 5. 2015

.....
podpis autora
Michaela Hoduláková

Poděkování

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce Ing. Daliboru Kocábovi za metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a cenné rady. Dále bych ráda poděkovala Ing. Janu Kryštofovi z firmy Mostní a silniční vývoj, s.r.o. za poskytnutí zkušebních těles pro účely zkoušení a Ing. Jiřímu Pavlíkovi, CSc., za jeho odbornou konzultaci. V neposlední řadě děkuji svým rodičům, za jejich podporu a důvěru po celou dobu mého studia.

Tato bakalářská práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

V Brně dne 27. 5. 2015

.....
podpis autora
Michaela Hoduláková

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlášení:

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27.5.2015

.....
podpis autora
Michaela Hoduláková

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	CÍL PRÁCE	11
3	TEORETICKÁ ČÁST	12
3.1	Všeobecné informace o horninách	12
3.1.1	USAZENÉ HORNINY	13
3.1.2	VYVŘELÉ HORNINY	13
3.1.3	PŘEMĚNĚNÉ HORNINY	14
3.2	Přehled vybraných hornin	14
3.2.1	Pískovec	14
3.2.2	Čedič (bazalt)	15
3.2.3	Krystalický vápenec (mramor)	16
3.2.4	Žula (Granit)	16
3.2.5	Moravská droba	17
3.3	Zvětrávání hornin	18
3.4	Kamenivo	19
3.5	Beton	20
3.6	Pevnost	20
3.7	Modul pružnosti	22
3.7.1	Statický modul pružnosti	25
3.7.2	Dynamický modul pružnosti	28
4	PRAKTICKÁ ČÁST	35
4.1	Obecný popis zkušebních vzorků hornin	35
4.2	Zkoušky a výsledky zkoušek	38
4.2.1	Ultrazvuková impulsová metoda	38
4.2.2	Statická zkouška	39
4.2.3	Rezonanční metoda	43
4.3	Porovnání statických a dynamických modulů pružnosti (diskuze výsledků)	44
4.4	Zvětrání	46
5	VÝPOČET	49
6	ZÁVĚR	53
7	SEZNAMY	55
7.1	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	55
7.2	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	58
7.3	SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK	58
7.3.1	Seznam obrázků	58
7.3.2	Seznam grafů	59
7.3.3	Seznam tabulek	59
7.4	SEZNAM PŘÍLOH	60
8	PŘÍLOHY	61
8.1	Příloha 1 – Fotografické přílohy	61
8.2	Příloha 2 – Tabulkové přílohy	72

1 ÚVOD

Modul pružnosti je jednou ze základních materiálových charakteristik betonu, která vypovídá o jeho tuhosti [1]. Modulem pružnosti jsou ovlivňovány nejen deformační vlastnosti betonu, ale i deformace konstrukcí z tohoto betonu vyrobených. Existuje všeobecné pravidlo, které říká, že čím vyšší bude modul pružnosti betonu, tím nižší budou jeho deformace a opačně [2].

Tématika modulu pružnosti se v současnosti stále více dostává do popředí zájmu stavebních odborníků. Jedním z důvodů je, že dříve postačovalo do statického výpočtu (při návrhu nových konstrukcí) použít modul pružnosti z normových (tabulkových) hodnot, dnes však změny v technologii výroby betonu způsobují relativně vysokou variabilitu modulu pružnosti v rámci jedné pevnostní třídy betonu [3, 4]. Závislost modulu pružnosti na pevnosti betonu v tlaku může být zavádějící a nepostačuje brát do úvahy pouze normové hodnoty modulu pružnosti odvozené pro jednotlivé třídy betonu, protože betony jich často při praktických aplikacích nedosahují [3, 5].

Na základě zkoušení betonu z hlediska jeho modulu pružnosti, není pro stavební odborníky novinkou, že modul pružnosti je ovlivněn celou řadou vlivů a velkou měrou závisí na modulech pružnosti jeho složek, zejména na modulu pružnosti hrubého kameniva [5, 6]. Zapátrá-li však člověk v literatuře, aby se o modulech pružnosti hornin (určených k výrobě hrubého kameniva do betonu) dozvěděl více, nezjistí, bohužel, mnoho informací. V české literatuře je jedním z mála zdrojů, kde je zmínka o několika horninách, např. již neplatná verze normy ČSN 73 3251 [7] z roku 1986, v zahraniční literatuře jsou spíše jen charakteristiky kamenů těžených mimo oblast České republiky [8].

2 CÍL PRÁCE

Na základě zadání bakalářské práce bude hlavním cílem částečné osvětlení problematiky modulu pružnosti kamene, a to zejména zjištěním a porovnáním modulů pružnosti vybraných druhů přírodních kamenů používaných pro výrobu drceného hrubého kameniva do betonu a dále pak posouzením modulu pružnosti žuly na základě rozdílného stádia zvětrání.

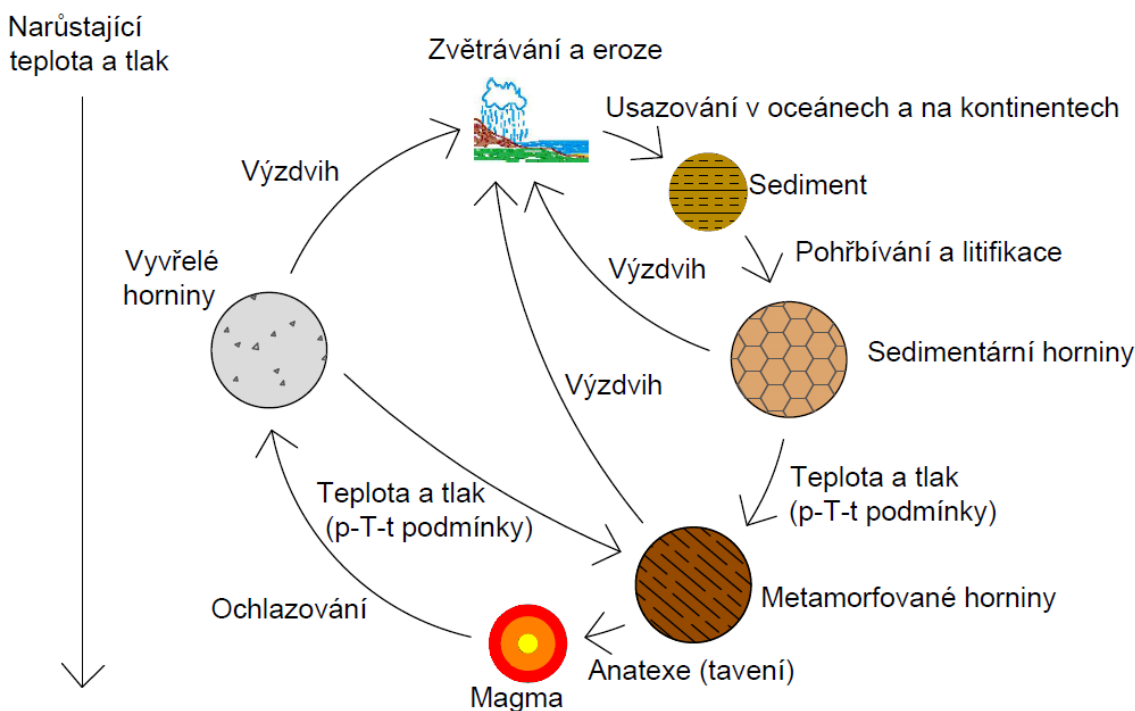
V teoretické části se provede rešerše literatury, která se bude zabývat horninami a jejich zvětráním, betonem, pevností v tlaku a problematikou modulu pružnosti, kde budou mimo jiné popsány dva typy zkoušek. Zkouška statická, což je destruktivní metoda pro získání modulu pružnosti a zkouška dynamická (metoda nedestruktivní). V provedeném experimentu bude pro měření dynamického modulu pružnosti využita jak metoda ultrazvuková, tak i metoda rezonanční. Po těchto nedestruktivních zkouškách budou následovat zkoušky statické, na jejichž základě se stanoví statický modul pružnosti v tlaku. Porovnání naměřených výsledků povede k získání představy o modulech pružnosti vybraných kamenů.

3 TEORETICKÁ ČÁST

3.1 Všeobecné informace o horninách

Na Zemi existuje tisíce různých druhů hornin, které vznikají rozmanitými geologickými procesy a v podobě různých horninových těles vytvářejí zemskou kůru. Hornina je seskupení minerálních zrn nebo pevné látky nebo seskupení minerálních zrn a pevné látky. Pevná látka může vznikat přírodně nebo uměle a je tvořena krystaly, sklem, přeměněnou organickou hmotou, či kombinací těchto komponent. Po chemické stránce se horniny (na rozdíl od minerálů) nedají vyjádřit chemickým vzorcem [9].

Neustálý vznik a zánik hornin je ovlivňován vzájemným působením endogenních a exogenních procesů, které tvoří tzv. horninový (geologický) cyklus (viz Obr. 3-1) [10].



Obr. 3-1 Horninový cyklus [11].

Endogenní procesy jsou geologické děje, které probíhají v litosféře pod povrchem Země a exogenní procesy probíhají naopak na povrchu litosféry, a to obvykle za přispění vlivu atmosféry, hydrosféry a biosféry [10].

Horniny se podle svého vzniku dělí do 3 skupin:

- **usazené** (sedimentární) horniny,
- **vyvřelé** (magmatické) horniny,
- **přeměněné** (metamorfované) horniny [12].

3.1.1 USAZENÉ HORNINY

Sedimentární či usazená hornina vzniká převážně na zemském povrchu a na dně moří působením povrchových vod, větru, ledu a gravitace, ale i činností živočichů. Tyto horniny vznikají za běžných teplot a mezi základní procesy vzniku sedimentárních hornin jsou tedy považovány děje jako je zvětrávání, transport materiálů, usazování a diagenese, která mimo jiné zahrnuje zpevňování sedimentu. Pro vznik tohoto typu hornin je zapotřebí zdrojový materiál, kterým mohou být úlomky hornin a minerálů, části odumřelých těl organismů či minerály vysrážené z vody [12].

Podle způsobu vzniku se usazené horniny dělí na 2 skupiny:

- **klastické** (tj. úlomkovité), vzniklé hromaděním zrn minerálů a jiných hornin,
- **biochemické**, vzniklé činností organismů nebo vysrážením z roztoků [12].

3.1.2 VYVŘELÉ HORNINY

Vyvřelé či magmatické horniny vznikají krystalizací z magmatu. Magma je horká roztavená horninová hmota, která putuje z místa svého vzniku na místo, kde utuhne a zkrystalizuje. Pocházejí-li horniny ze stejné matečné taveniny, která však utuhne v jiné hloubce, budou se vyvřelé horniny výrazně lišit svým vzhledem [12].

Podle místa utuhnutí se magmatické horniny dělí na 3 skupiny:

- **hlubinné** (plutonické, intruzivní), vzniklé utuhnutím magmatu hluboko pod povrchem,
- **žilné**, vzniklé utuhnutím magmatu během jeho výstupu puklinami,
- **výlevné** (vulkanické, extruzivní), vzniklé utuhnutím magmatu na zemském povrchu [12].

3.1.3 PŘEMĚNĚNÉ HORNINY

Pokud hornina následkem působení tektonických procesů změní svoji pozici v zemské kůře nebo plášti, bude s největší pravděpodobností vystavena jiné teplotě a tlaku než byla doposud a v důsledku toho se začne přeměňovat. Přeměna horniny může nastat i působením horkých plynů nebo kapalin bohatých na rozpuštěné minerály. Přeměněné či metamorfované horniny vznikají přeměnou hornin v pevném stavu. Přeměna hornin se projeví změnou minerálního složení, vnitřní stavby, chemického složení nebo kombinací těchto změn [12].

Podle oblasti rozsahu přeměny se metamorfované horniny dělí do 2 skupin:

- **kontaktně nebo šokově** metamorfované, kdy dochází k lokální přeměně,
- **regionálně** metamorfované, kdy přeměna hornin postihuje oblasti velkého rozsahu [12].

3.2 Přehled vybraných hornin

Horniny (zpevněné i nezpevněné) mají značný význam pro stavebnictví. Používají se zejména jako stavební či dekorační kámen, stavební materiál a také k výrobě některých stavebních hmot. Základní znalosti petrologie (vědní disciplíny zabývající se horninovým prostředím) a z toho správně vyvozené závěry ovlivňují náklady na zakládání staveb i výrobu stavebních materiálů. Popisem složení a vlastností hornin se zabývá vědní obor zvaný petrografie [9].

Následující odstavce jsou věnované stručnému popisu hornin, na kterých bude zjišťován (v experimentální části této bakalářské práce) modul pružnosti.

3.2.1 Pískovec

Pískovec (Obr. 3-2) je zpevněný klastický sediment, který obsahuje převážně zrna křemene, malý podíl jílového matrixu a pojivo. Na základně pojiva se pískovce liší barvou, která může být bělavá, šedo zelená, hnědočervená, žlutošedá i rezavá, a dělí se na pískovce křemenné, hematitové, glaukonitové, vápnité a limonitové. Některé pískovce lze použít jako kamenivo k dlažbě rigolů a svahů horských bystřin. Tato hornina se u nás vyskytuje například v Beskydech nebo České tabuli [9].



Obr. 3-2 Pískovcový útvar *The Wave*, Arizóna, USA [13].

3.2.2 Čedič (bazalt)

Čedič (Obr. 3-3) patří mezi nejčastěji se vyskytující výlevné horniny na Zemi. Skládá se převážně z plagioklasů a pyroxenu, někdy může obsahovat i amfibol, biotit či další minerály. U některých čedičů je typické, že obsahují olivín. Barva čediče je nejčastěji šedočerná. Pro některé čediče je typický tzv. bobovitý rozpad. Protože čediče vynikají vysokou pevností a houževnatostí, jsou ve stavebnictví považovány za kvalitní štěrk. Jejich nevýhodou je však snadná ohladitelnost. U nás se vyskytují například v Českém středohoří či v Doupovských horách [9].



Obr. 3-3 Čedičový útvar *Giant's Causeway*, Severní Irsko, Velká Británie [13].

3.2.3 *Krystalický vápenec (mramor)*

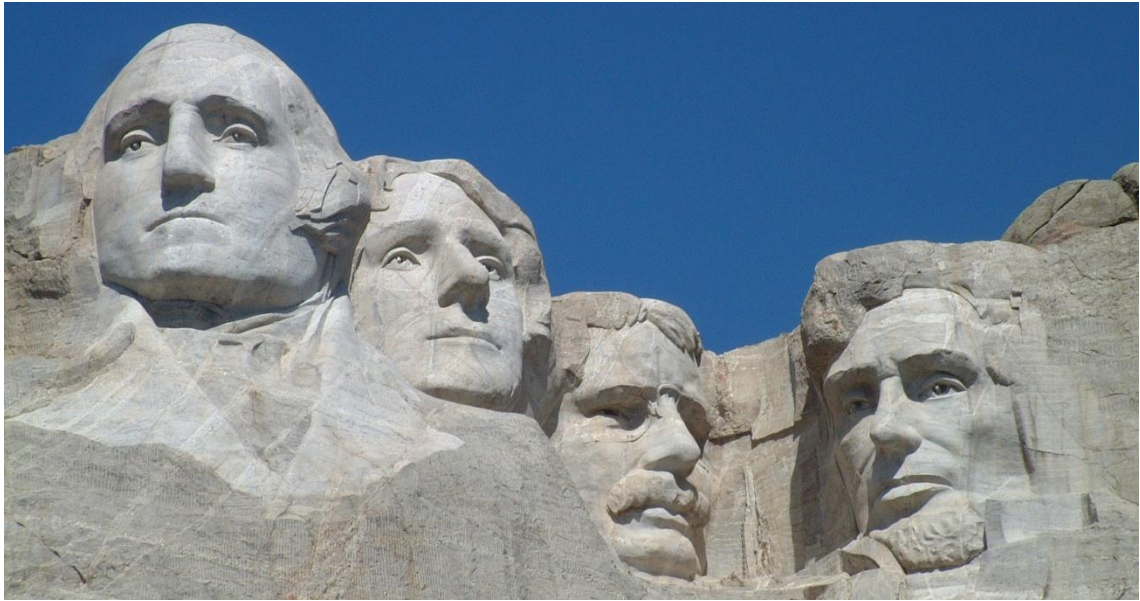
Vápence (Obr. 3-3) jsou biochemické karbonátové sedimenty, které obsahují především kalcit. Jejich barva může být bílá, světle až tmavě šedá. Některé vápence jsou zabarveny do červena, žluta nebo zelena. Vápence se mohou používat k výrobě vápna či cementu, jako kamenivo pro stavební účely nebo jako stavební kámen. Výskyt těchto hornin je u nás například v okolí Berouna, Brna, Hranic na Moravě či v Nížkém Jeseníku [9].



Obr. 3-4 Ložisko krystalického vápence, Bohdíkov, Česká republika [14].

3.2.4 *Žula (Granit)*

Žula patří do skupiny granitoidů (magmatických plutonických hornin, které obsahují křemen). Kromě křemene obsahuje tato hornina i K-živec a plagioklas (K-živec převažuje nad plagioklasem). Z tmavých minerálů mohou být v žule přítomny slídy, amfibol, turmalín či granát a další. Žula je vhodná pro kamenické zpracování (viz Obr. 3-5). U nás je velmi rozšířenou horninou v Krušných horách, Jizerských horách, v Krkonoších nebo na Českomoravské vrchovině [9].



Obr. 3-5 *Mount Rushmore National Memorial, Jižní Dakota, USA [15].*

3.2.5 Moravská droba

Droba (Obr. 3-6) je zpevněná psamitická sedimentární hornina. Tato hornina obsahuje převážně křemen a horninové úlomky, v menší míře je zde (kromě jiných) zastoupen i živec. Barva této horniny je tmavě šedá, nazelenale šedá nebo šedočerná. U nás se tyto horniny nacházejí například v Železných horách, Jesenících, Dražanské vysočině a Oderských vrších. Protože mají vysokou pevnost v tlaku, jsou používány na výrobu drceného kameniva, dlažebních kostek a na hrubé kamenické práce [16].



Obr. 3-6 *Záliv tvořený drobou, Back Bay, Velká Británie [17].*

O běžných deformačních vlastnostech výše zmíněných hornin (podle lokality v ČR) pojednává tabulka (viz Tab. 3-1) vytvořená na základě telefonické konzultace s Ing. Jiřím Pavlíkem, CSc., pracujícího v GEOtestu a.s. v Brně. V této tabulce jsou uvedeny údaje týkající se zdravých (nezvětralých) hornin (kromě mrákotínské žuly, která je zvětralá) [18].

Tab. 3-1 Informativní hodnoty deformačních vlastností hornin v ČR podle [18].

Druh horniny:	Poissonův součinitel	Modul pružnosti (na tělese)
	[-]	[GPa]
Čedič (Bílčice)	0,15	>100
Moravská droba (Luleč)	0,22	50-80
K. vápenec (Ondřejovice)	0,2	50
Pískovec (Ostroměř)	0,25	5-20
Žula (Litice)	0,18	30-60
Žula (Mrákotín)	0,22	15-25

3.3 Zvětrávání hornin

Zvětrávání hornin je jedním z exogenních geologických procesů, který je velice významný z hlediska stavební činnosti. Mezi takto významné procesy se řadí i sufóze a vyplavování, eroze, krasové procesy, prosedavost a svahové pohyby [19].

Pojem zvětrávání představuje změny ve složení minerálů a hornin působením povrchových činitelů za vzniku produktu zvětrávání. Činitelem zvětrávání může být voda, led, teplota, atmosféra nebo organizmy. Pokud dojde vlivem zvětrávání k celkovému rozložení skalní horniny, nazýváme ji zeminou [19].

Zvětrávání se dá rozdělit do 3 skupin:

- **mechanické,**
- **chemické,**
- **biologické** [19].

Chemické zvětrávání je z pohledu stavební praxe dále děleno na zvětrávání:

- **destruktivní** – dochází k rozpadu hornin bez tvorby nových minerálů,
- **konstruktivní** – po rozpadu hornin vznikají nové minerály, zvláště pak jílového charakteru, které ovlivňují fyzikální, mechanické i hydraulické a deformační vlastnosti hornin [19].

Při hodnocení kvality stavebního kamene je jedním z hodnotících kritérií i stupeň zvětrávání, neboť má vliv na pevnost horniny. Kvalita hornin se může při zvětrávání měnit velice rychle (dny). Hodnocení zvětrání se většinou řeší makroskopickou klasifikací, kde se stupeň zvětrání určí podle obsahu čerstvých minerálních zrn a podle toho, zda se zrna vzájemně dotýkají [19].

Stupeň zvětrání lze vyjádřit indexem zvětrání (IZ):

$$IZ = \frac{H_z - H_v}{H_v} \quad (1)$$

kde H_z je vlastnost zdravé horniny,

H_v je vlastnost zvětralé horniny [19].

Stupeň zvětrání se popisuje podle normy ČSN EN ISO 14689-1 (721005) [20] z roku 2004 (viz Tab. 3-2).

Tab. 3-2 Popis zvětrání a alterace hornin (ČSN EN ISO 14689-1) [20].

NÁZEV	POPIS
ZDRAVÁ	Horninový materiál bez zjevných stop zvětrání/alterace.
ODBARVENÁ	Barva původního zdravého materiálu je změněna a je evidentní zvětrání/alterace. Má být uváděn stupeň změny z původní barvy. Zároveň má být uvedeno, pokud je změna barvy vázána na konkrétní minerální složku.
ROZMĚLNĚNÁ	Horninový materiál je porušen fyzikálním zvětráním, spojení mezi zrna neexistuje a hornina je zvětrána/alterována na zeminu, ve které je původní uspořádání materiálu doposud neporušeno. Horninový materiál je drobný, zrnka minerálu však nejsou rozložena.
ROZLOŽENÁ	Horninový materiál je zvětrán chemickou alterací minerálních zrn do stavu zeminy, u které je původní uspořádání minerálů doposud intaktní. Některá nebo všechna zrna minerálů jsou rozložena.

3.4 Kamenivo

Horniny se používají jako stavební suroviny ve formě kamene či kameniva. Kamenivo je zrnitý anorganický materiál. Rozděluje se na kamenivo **přírodní**, **umělé** nebo **recyklované** [21]. V betonářské praxi se pro výrobu hutných betonů používají především přírodní kameniva, která se vzhledem ke svému původu dělí na:

- **drcená**,
- **těžená** [22].

Zrna těžného kameniva, které vzniklo přirozeným rozpadem hornin, jsou zakulacená a hladká. Naopak drcené kamenivo má zrna většinou protáhlého tvaru, s drsnějším povrchem, který umožňuje větší adhezi cementového tmele, na základě čehož se hodí pro výrobu betonu o vyšších pevnostech [22].

Kamenivo zaujímá ve struktuře hutného betonu asi 75 až 80 % objemu a jeho hlavní funkcí je vytvoření pevné kostry v betonu s minimální mezerovitostí, které se dosáhne vhodným smícháním různě velikých zrn. Podle velikosti zrn je kamenivo děleno na tzv. frakce, které jsou dány rozmezím minimálního a maximálního zrna. Běžně se v praxi vyrábí frakce kameniva: 0/4, 4/8, 8/16, 16/22 a 22/32,5 mm [22]. Množství použitého kameniva má vliv na hodnotu modul pružnosti betonu, která je tím větší, čím vyšší objem kameniva se v betonu nachází [23].

3.5 Beton

Beton je materiál složený ze směsi cementu, hrubého a drobného kameniva a vody, s přísadami nebo příměsemi nebo bez nich, který získá své vlastnosti hydratací cementu [24]. Kamenivo používané do betonu se řídí normou ČSN EN 12620 [25], která stanovuje požadavky na vlastnosti přírodního, umělého i recyklovaného kameniva do betonu [26].

3.6 Pevnost

Pevnost je hlavním kritériem při posuzování vlastností betonu a definuje se jako schopnost materiálu vzdorovat vzniklým napětím. Za pevnost betonu se považuje mezní napětí v betonu, při kterém dojde ke zlomu (globálnímu porušení soudržnosti) [26].

Podle statického působení zatížení se pevnosti betonu dělí:

- **pevnost v tlaku** (prostém, v sevřeném stavu, v soustředném),
- **pevnost v tahu** (prostém, ohybem, příčném),
- **pevnost ve smyku** (stříhu, propichování) a v kroucení [26].

Beton všeobecně lépe vzdoruje tlakovým zatížením než zatížením v tahu či ve smyku [26].

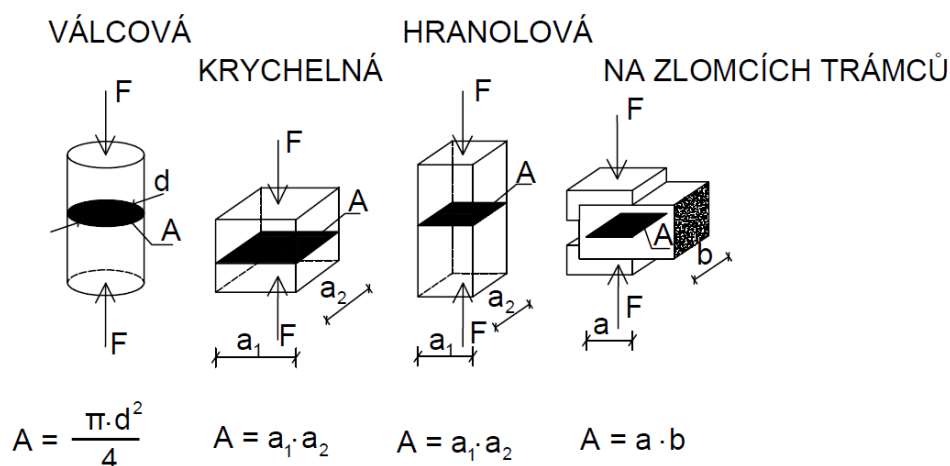
Pevnost v tlaku

Pevnost betonu v tlaku (f_c) je daná maximální silou, která působí na danou plochu (viz Obr. 3-7) a způsobí tím zkušebnímu tělesu tlakové porušení [22]. Vzorec pro zjištění této pevnosti vypadá následovně:

$$f_c = \frac{F}{A} \quad (2)$$

kde F je síla při porušení zkušebního tělesa [N],
 A je průřezová plocha vzorku [mm^2] [27].

Při zkoušení pevnosti betonu při tlakové zkoušce se (z důvodu příčných napětí) nezjistí skutečná pevnost v tlaku, ale stanoví se takto pevnost v tlaku, která je považovaná za smluvní pevnost [24].



Obr. 3-7 Určení plochy pro stanovení pevnosti v tlaku [24].

Pevnosti betonů v tlaku jsou v normě ČSN EN 1992-1-1 [28] klasifikovány pomocí pevnostních tříd betonu v tlaku, které odpovídají charakteristické (5%) válcové pevnosti f_{ck} nebo krychelné pevnosti $f_{ck,cube}$ [28]. Válcové a krychelné pevnosti byly stanoveny na standardních zkušebních tělesech (válců o rozměru 150 mm x 300 mm, krychle o rozměru 150 mm x 150 mm) ve stáří 28 dnů [24]. Krychelná pevnost je vždy vyšší než pevnost zjištěná na hranolech nebo válcích, protože při zatěžování působí mezi tlačnými deskami stroje a tlačnými plochami zkušebního vzorku značné tření, které zabraňuje příčnému roztahování tlačného tělesa, a tím dochází k sevření tělesa na obou stranách vzorku, které zvyšuje jeho únosnost [24].

Zkoušky pro zjištění pevnosti v prostém tlaku u kamenů se řídí normou ČSN EN 1926 [29]. Princip těchto zkoušek a následného zjištění pevnosti je vesměs stejný jako u zkoušek na betonových tělesech.

3.7 Modul pružnosti

Další a jednou z hlavních materiálových charakteristik každého betonu (a materiálu) je modul pružnosti (dále v textu též MP). Tato charakteristika popisuje schopnost materiálu chovat se pod určitým zatížením do jisté míry pružně. Ovlivňuje také deformační vlastnosti betonu, a tedy i konstrukce z něj vyrobené [1]. Obecně platí, že u materiálů s vyšším modulem pružnosti se projevují menší deformace. Modul pružnosti se značí velkým písmenem E a udává se v MPa [30]. Hodnota modulu pružnosti do jisté míry závisí na tom, jak je definován [31].

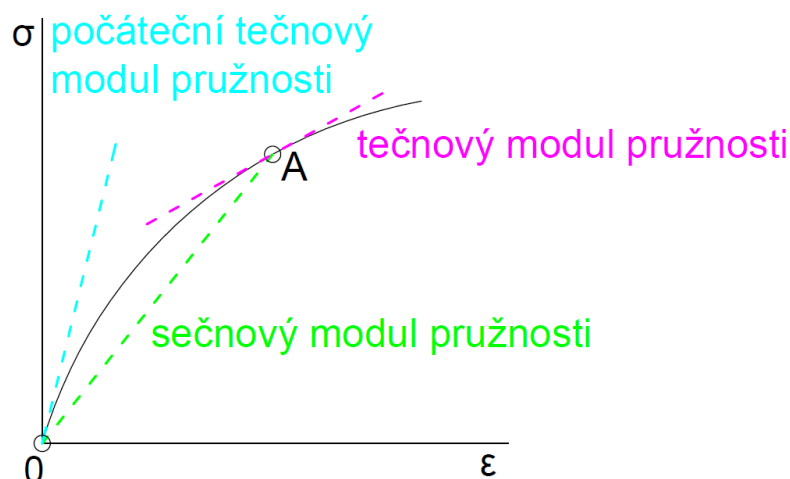
Obecně je modul pružnosti určen jako poměr napětí σ k poměrné deformaci ε , což je možné vyjádřit vztahem:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

kde E je modul pružnosti [MPa],
 σ je napětí [MPa],
 ε je poměrné přetvoření [-] [30].

Tento vztah vychází z Hookova zákona, který říká, že napětí je přímo úměrné poměrnému přetvoření. Tento zákon platí v oboru pružných deformací [24].

Modul pružnosti stanovený ze závislosti mezi napětím a poměrným přetvořením se označuje jako statický modul pružnosti. Jelikož závislost mezi napětím a poměrným přetvořením betonu není lineární, modul pružnosti betonu závisí na napětí, ze kterého se stanovuje. Modul pružnosti se podle zjištění z grafu závislosti napětí na poměrném přetvoření dělí na sečnový a tečnový (viz Obr. 3-8) [30].

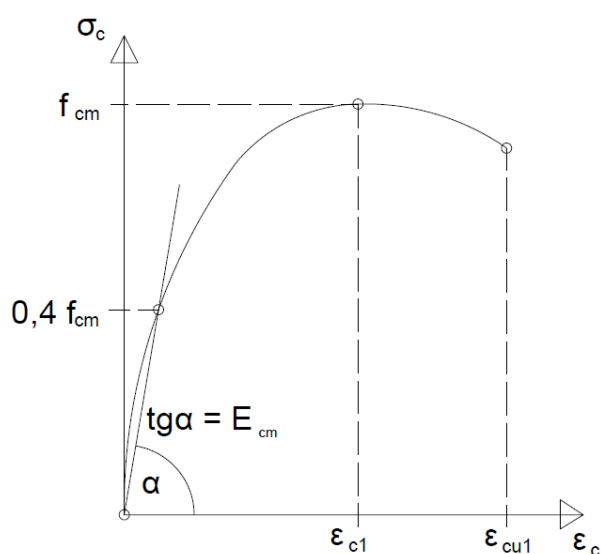


Obr. 3-8 Závislost mezi napětím a poměrným přetvořením betonu a znázornění různých druhů modulů pružnosti [30].

V normě ČSN EN 1992-1-1 (Eurokód 2) [28] je modul pružnosti E_{cm} definován sečnovou hodnotou mezi napětím $\sigma_c = 0$ a $0,4 f_{cm}$, kde f_{cm} je tlaková pevnost betonu (viz idealizovaný pracovní diagram betonu na Obr. 3-9). E_{cm} a f_{cm} jsou hodnoty definované ve stáří betonu 28 dní. Hodnoty uvedené v normě se mají požadovat za směrné pro obecné použití, ovšem u konstrukcí citlivých na odchylky (mezi takové konstrukce patří např. velkorozponové stropní či střešní konstrukce průmyslových nebo sportovních hal, složité inženýrské konstrukce, mosty či estakády) se mají moduly pružnosti stanovit přesněji [28, 30]. Normové hodnoty E_{cm} vycházejí ze vztahu:

$$E_{cm} = 22(f_{cm}/10)^{0,3} \quad (4)$$

kde f_{cm} je hodnota charakteristické válcové pevnosti v tlaku zvýšená o 8 MPa [31].



Obr. 3-9 Schéma pracovního diagramu betonu [28].

Na hodnoty modulů pružnosti betonu může mít vliv řada faktorů, které se obecně dělí do dvou skupin:

- **technologické vlivy,**
- **zkušební vlivy [32].**

Za technologické vlivy se považuje:

- složení betonové směsi (druh, velikost a množství kameniva; druh a množství cementu, přísad a příměsí; provzdušnění, vodní součinitel),
- technologie výroby a zpracování betonové směsi (míra zhutnění, teplota, vlhkost a doba ošetřování během tuhnutí a tvrdnutí),
- kvalita tranzitní zóny [33].

Zkušebními vlivy může být:

- použitá zkušební metoda (statický MP betonu, dynamický MP betonu),
- použitý výpočetní vztah, zatěžovací úroveň,
- tvar a velikost zkušebního tělesa (poměr h/d, směr zhutnění a zatěžování),
- způsob získání zkušebního tělesa (reálná konstrukce, zhotovení v laboratoři), stáří zkušebního tělesa,
- prostředí v laboratoři během zkoušky,
- typ použitého snímače (přesnost, konstrukce snímače),
- vliv zkušebního lisu,
- excentricita uložení zkušebního tělesa,
- excentricita zkušební síly,
- rychlost a typ zatěžování (cyklické),
- způsob koncování tělesa,
- kvalita použitých forem pro tělesa vyrobená v laboratoři [33].

Podle ČSN EN 1992-1-1 [28] pružné deformace betonu závisí převážně na jeho složení a na modulech pružnosti těchto složek. Norma se zmiňuje zejména o kamenivu. Křivka hodnot E_{cm} (znázorněna na Obr. 3-9) a přibližné hodnoty E_{cm} (uvedené v Tab. 3-3) platí pro běžné silikátové kamenivo. Použijeme-li však kamenivo vápencové či pískovcové, mají se směrné hodnoty modulů pružnosti snížit o 10 %, resp. až o 30 % a naopak při použití čedičového kameniva se modul pružnosti zvyšuje o 20 % [28].

Tab. 3-3 Pevnostní a deformační charakteristiky betonu [28].

Pevnostní třídy betonu														
f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck, cube}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
E_{cm} [GPa]	27	29	30	31	33	34	35	36	37	38	39	41	42	44

Určování modulů pružnosti se provádí buď jeho odečtem z tabulek, popř. využitím teoretických výpočetních vztahů, ale všeobecně nejuznávanější a nejdoporučovanější je fyzická zkouška na konstrukci, nebo na zkušebních tělesech [23].

Podle způsobu měření se modul pružnosti dělí na statický a dynamický. Pro zjištění prvního z nich se využívá destruktivních metod měření a ke zjištění dynamického modulu pružnosti slouží tzv. nedestruktivní měřicí metody. V odborné literatuře jsou uváděny různé empirické vztahy mezi dynamickými a statickými moduly pružnosti, avšak všeobecně definovat jednoznačný vztah mezi nimi není možné vzhledem k heterogenní struktuře betonu a rozdílným principům stanovení těchto dvou modulů [30].

3.7.1 Statický modul pružnosti

Statické moduly pružnosti se zjišťují z deformací, které nastávají při známém zatížení.

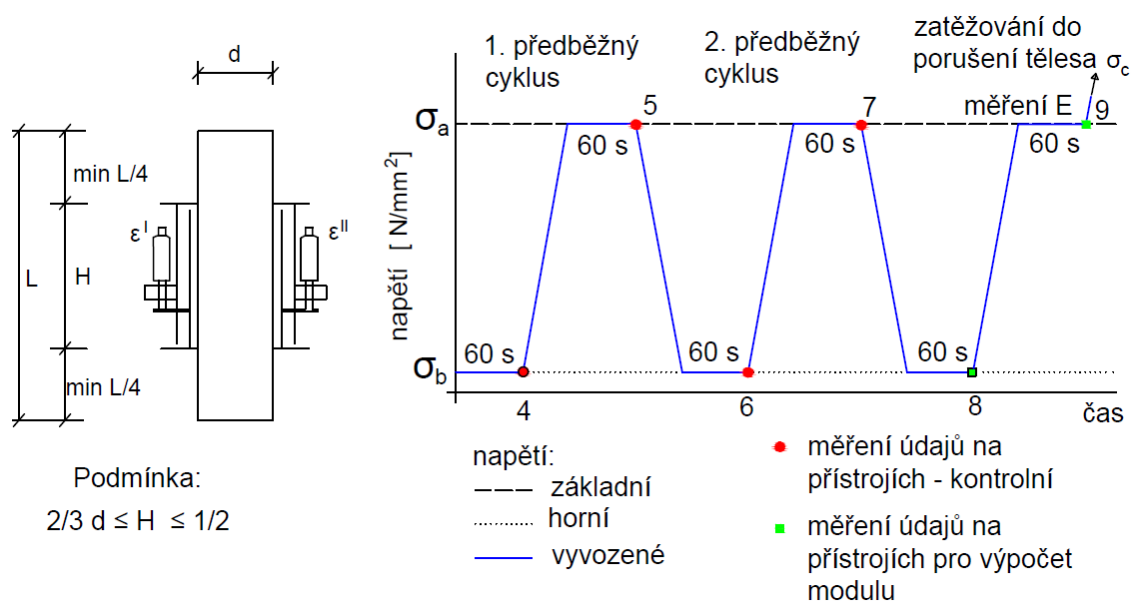
Statické moduly pružnosti betonu

Statické moduly pružnosti betonu se dají získat například ze zkoušky v tlaku podle normy ČSN ISO 1920-10 [34] a ČSN EN 12390-13 [35], nebo ze zkoušky v tahu ohybem, který se řídí normou ČSN 73 6174 [36].

Statický modul pružnosti betonu v tlaku je, jak již bylo zmíněno výše, poměr změny napětí (mezi základním napětím, které je vždy $0,5 \text{ [N/mm}^2\text{]}$ a horním napětím v třetinové hodnotě pevnosti betonu v tlaku) a odpovídající změny pružného poměrného přetvoření [27].

Při vlastní zkoušce se zkušební těleso s osazenými přístroji pro měření deformací (viz Obr. 3-10 vlevo) vloží do zkušebního lisu a zatíží se počátečním

napětím. Zaznamenají se údaje naměřené na přístrojích. Následuje zvyšování zatížení do hodnoty horního napětí, které se udržuje po dobu 60 s, a potom se opět odečtou údaje na všech přístrojích. Pokud se jednotlivá poměrná přetvoření ϵ neliší o více jak 20 % od své průměrné hodnoty, vzorek se odtíží na hodnotu základního zatížení. Výše zmíněný postup se opakuje a provedou se minimálně dva další předběžné cykly, po nichž následuje další odtížení a zatížení za současného měření údajů pro výpočet E (viz Obr. 3-10 vpravo). Po dokončení měření se zjištěná pevnost zkušební tělesa srovná s pevností na srovnávacích tělesech, a pokud se liší o více jak 20 %, tato okolnost se uvede do protokolu [27].



Obr. 3-10 (vlevo) Umístění měřícího zařízení na zkušebním tělese, (vpravo) grafické znázornění průběhu zatěžování zkušební tělesa [27].

Pro výpočet statického modulu pružnosti v tlaku E_c v N/mm^2 se použije vzorec:

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (5)$$

kde $\Delta\sigma$ je rozdíl napětí při zatěžování v N/mm^2 ,
 $\Delta\epsilon$ je průměrná změna poměrného přetvoření mezi horním a základním napětím [27].

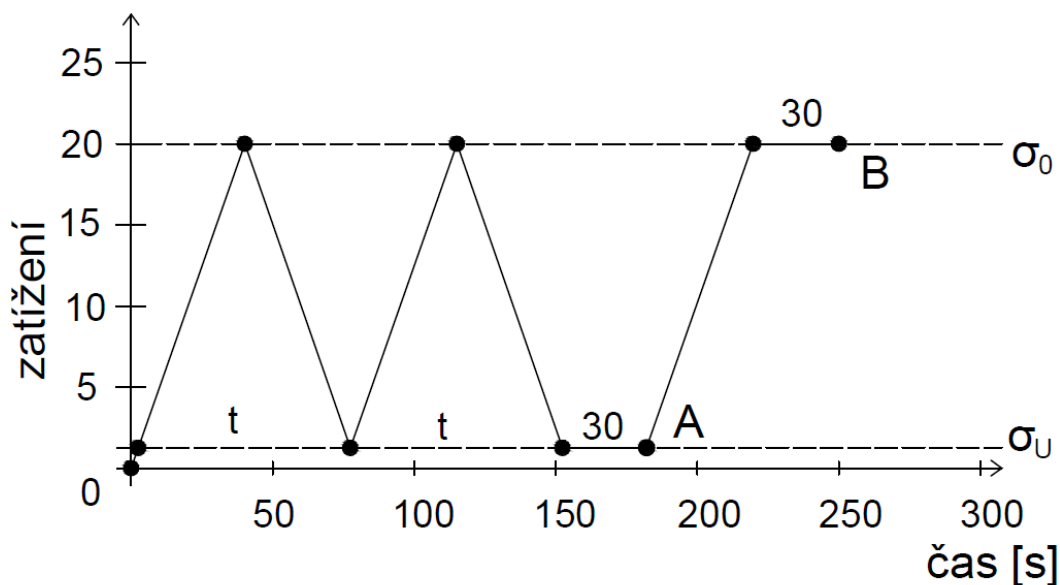
Při zjišťování **modulu pružnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem** platí jiný zkušební postup, jehož principem je, že se vzorek betonu zatěžuje dle čtyřbodového ohybu a modul pružnosti betonu namáhaného v tahu ohybem se stanoví výpočtem (podle odlišných vzorců) z naměřených průhybů trámce [27].

Statické moduly pružnosti kamene

Statický modul pružnosti přírodního kamene se zkouší podle nové normy ČSN EN 14580 [37].

Zkoušky se moc se neliší od zkoušek modulů pružnosti na betonu. Podstatou měření je přetvoření zkušební tělesa při jednoosém tlakovém namáhání, přičemž se cykluje mezi základním napětím a napětím odpovídající přibližně 2 % a 33 % průměrné pevnosti v tlaku [8]. Tato pevnost se stanoví podle ČSN EN 1926 [29] před zatěžovací zkouškou.

Zkušební tělesa musí být válce nebo hranoly s půdorysným rozměrem minimálně 50 mm. Štíhlostní poměr těchto těles musí být mezi 2 a 4. Plochy (na něž je přenášeno zatížení) musí být ploché a nesmějí se odchýlit od kolmosti vůči svislé ose zkušební tělesa. Na takovéto zkušební těleso se potom připevní přinejmenším dvě délková (nebo tensometrická) měřící zařízení rovnoběžně s jeho osou. Umístění těchto zařízení musí být symetricky kolem středu tělesa a rovnoměrně vzdálené, přičemž nesmějí být blíže jakémukoliv okraji zkušební tělesa, než je vzdálenost rovná polovině průměru pro válcová a polovině delšího půdorysného rozměru hranolovitých zkušebních těles. Po vystředění tělesa ve zkušebním zařízení se zkušební těleso podrobuje zatěžovacím a odlehčovacím cyklům při konstantní rychlosti zatěžování ($0,5 \pm 0,2$) MPa/s. Měření zatížení a odpovídajícího přetvoření se provádí před třetím zatěžovacím cyklem a během třetího zatěžovacího cyklu. Na obrázku (viz Obr. 3-11) značí bod A čtení základního zatížení (σ_U) a odpovídajícího přetvoření (ϵ_U) před třetím zatěžovacím cyklem, bod B značí čtení horního zatížení (σ_0) a odpovídajícího přetvoření (ϵ_0) během třetího zatěžovacího cyklu a písmeno t označuje čas vycházející pro zatěžovací a odlehčovací cyklus z dané rychlosti zatížení. Po dokončení měření se zkušební těleso zatěžuje až do porušení. Stejně jako u zkoušek statického modulu pružnosti v tlaku u betonu i zde platí, že pokud se pevnost v tlaku zkušební tělesa liší od průměrné hodnoty o více než 20 %, musí se to uvést do protokolu o zkoušce [37].



Obr. 3-11 Zatěžovací – časový diagram pro stanovení statického modulu pružnosti (příklad horniny s pevností 60MPa) [37].

Pro výpočet statického modulu pružnosti se následně využije vztah:

$$E_b = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_0 - \sigma_U}{\varepsilon_0 - \varepsilon_U} \quad (6)$$

- kde E_b je statický modul pružnosti [MPa],
 σ_U je základní zatížení rovnající se přibližně 2 % ze střední hodnoty zjištěné pevnosti v tlaku před třetím zatěžovacím cyklem [MPa],
 σ_0 je horní zatížení rovnající se přibližně 33 % ze střední hodnoty zjištěné pevnosti v tlaku během třetího zatěžovacího cyklu [MPa],
 ε_U je střední jednotkové přetvoření při základním zatížení v bodě A [-],
 ε_0 je střední jednotkové přetvoření při horním zatížení v bodě B [-] [37].

Výsledky se musí vyjádřit v MPa a na to nejméně na tři platná čísla [37].

3.7.2 Dynamický modul pružnosti

Ke zjištění dynamických modulů pružnosti jsou využívány metody ultrazvuku a rezonance [6].

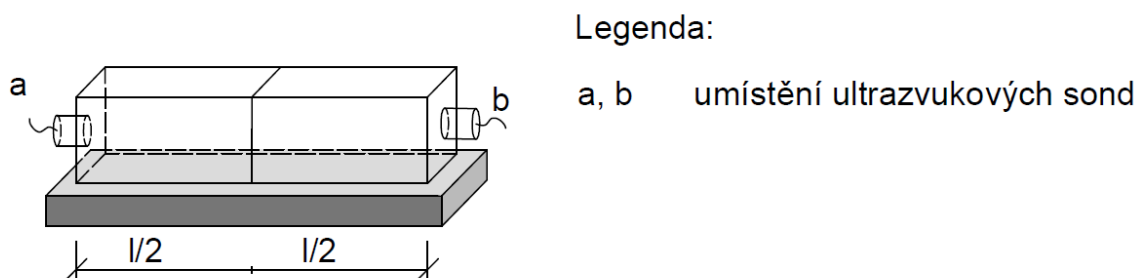
Dynamický modul pružnosti bývá znatelně vyšší (o 15 až 30 %) než modul statický (sečnový modul pružnosti), protože dynamický modul pružnosti se stanovuje nedestruktivně (nedochází k zatížení zkoušeného vzorku) [38, 39]. Díky tomu ve

vzorku nevznikají žádné deformace ani napětí a dynamický modul pružnosti betonu odpovídá počátečnímu tečnovému modulu pružnosti ze statické zkoušky [30].

3.7.2.1 Ultrazvuková metoda

Ultrazvuková metoda (dále v textu též UZ) slouží pro stanovení vlastností materiálů (např. dynamické hodnoty modulu pružnosti) nebo k jejich defektoskopii [38]. Je to dobrá metoda pro zkoušení materiálů (např. betonu) nejen v laboratořích, ale i přímo na konstrukci. Mezi hlavní výhody této metody patří čistě nedestruktivní charakter zkoušení, takže je možné na stejném vzorku, dílci nebo konstrukci měření opakovat [40].

Existuje několik druhů ultrazvukových metod. Jednou z nich je **impulzová odrazová metoda (Echolot)**, která pracuje s jednou sondou plnící jak funkci budiče, tak i snímače impulzů. Tato metoda se však ve stavebnictví (betonovém) moc nepoužívá, protože se nehodí pro heterogenní materiály a pro materiály s velkým útlumem. Jinou metodou, která (oproti odrazové metodě) pracuje se dvěma sondami (viz Obr. 3-12), budičem a snímačem, je **impulzová průchodová metoda**, která se v oboru betonových konstrukcí využívá často [38].



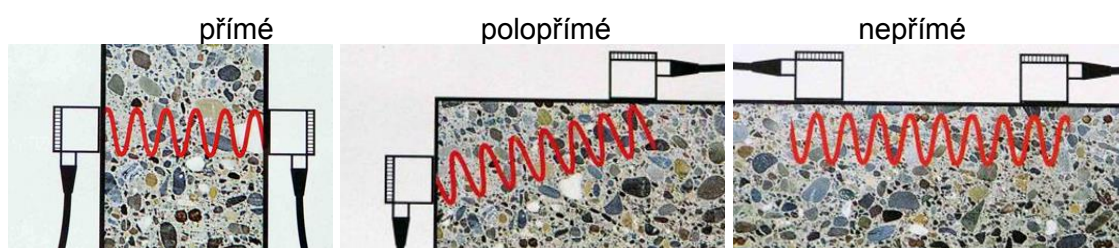
Obr. 3-12 Ukázka možného uspořádání UZ sond při zkoušce trámci [31].

Průchodová metoda je založena na principu měření doby průchodu impulsů ultrazvukového vlnění materiálem [40]. Ultrazvukový přístroj se skládá z budiče, snímače a vyhodnocovacích zařízení [31]. Postup měření spočívá v tom, že jsou do zkušebního tělesa vysílány pravidelně se opakující mechanické tlumené vlny (impulsy), které vyvozuje magnetostrikční nebo piezoelektrický budič [38]. Pracovní kmitočet budiče se volí v závislosti na nejmenším bočním rozměru tělesa, délce měřicí základny a pevnosti materiálu [41]. Ve stavebnictví se frekvence budiče běžně pohybují od 20

kHz do 150 kHz (výjimečně i 500 kHz). Budičem vysílané vlnění pak putuje materiálem měřeného prvku po dráze L do piezoelektrického snímače, které mění přicházející mechanické vlnění na jeho elektrický obraz. Doba průchodu t je zachycena časoměrným zařízením. Na základě znalosti dráhy a doby průchodu se počítá rychlost šíření UZ impulzu [38].

Způsob prozvučování (viz Obr. 3-13) u této metody závisí na přístupnosti povrchů zkoušeného objektu a na umístění sond na tomto objektu [38]. Uspořádání sond má vliv na čas šíření čela impulzů UZ vln. Prozvučování může být:

- **přímé** (budič a snímač jsou umístěny na protilehlých stranách proti sobě),
- **polopřímé** (budič a snímač jsou umístěny na protilehlých stranách ne přímo proti sobě, anebo na sousedních stranách),
- **nepřímé** (budič a sonda jsou na stejné straně) – měří se povrchové vlny [41].



Obr. 3-13 Způsoby prozvučování konstrukce [42].

Pro přímé a polopřímé prozvučování se rychlost šíření impulzu počítá ze vztahu:

$$v_L = \frac{L}{T} \quad (7)$$

kde v_L je rychlost impulzu [$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$],
 L je délka měřicí základny [mm],
 T je čas včetně t_{kor} , který uplyne při průběhu impulzu měřicí základnou [μs], tj.

$$T = T_L \pm t_{\text{kor}} \quad (8)$$

t_{kor} je korekce, která se skládá z tzv. mrtvého času přístroje a z rozdílu času šíření impulzů UZ vln, který se případně zjistí při kalibraci přístroje [μs] [41].

Pro zjištění rychlosti šíření impulzu a po vypočítání hodnoty koeficientu rozměrnosti prostředí (k), který je závislý na hodnotě Poissonova poměru se hodnota dynamického modulu pružnosti v tlaku nebo v tahu E_{cu} v MPa vypočítá z následujícího vztahu:

$$E_{cu} = \rho \cdot v_L^2 \cdot \frac{1}{k^2} \quad (9)$$

kde ρ je objemová hmotnost betonu [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$],
 v_L je impulzová rychlost podélného UZ vlnění [$\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$],
 k je součinitel rozměrnosti prostředí [-] [41].

Zkoušení betonu se provádí podle norem ČSN 73 1371 [41] a ČSN EN 12504-4 [43], přičemž moduly pružnosti kamene se mohou podle této normy také zjišťovat.

3.7.2.2 Rezonanční metoda

Rezonanční metoda je vhodná pro laboratorní zkoušení (menších) prvků, které nejsou nikde zabudované a jsou pokud možno stejnorodé. Tato metoda slouží ke stanovení dynamických hodnot materiálů jako je modul pružnosti v tahu, tlaku nebo ve smyku, a tím i dynamické hodnoty Poissonova koeficientu (poměr pružné deformace kolmo k zatížení a pružné deformace ve směru zatížení) [38]. Je schopná poskytnout informace o změnách ve vnitřní struktuře materiálů. Rezonanční metoda vychází z poznatku, že každý předmět z tuhého materiálu se po mechanickém impulsu rozkmitá. Tohoto kmitání je možné dosáhnout mnoha způsoby. U pravidelných těles se k vyhodnocení dynamických materiálových charakteristik používá vlastní frekvence podélného, kroutivého a příčného kmitání. Jev zvaný rezonance (vlastní kmitočet) nastává v okamžiku, kdy je kmitočet vnější budící síly roven vlastnímu (rezonančnímu) kmitočtu tělesa a amplituda vynucených kmitů zkoušeného tělesa tak výrazně roste na maximum [31].

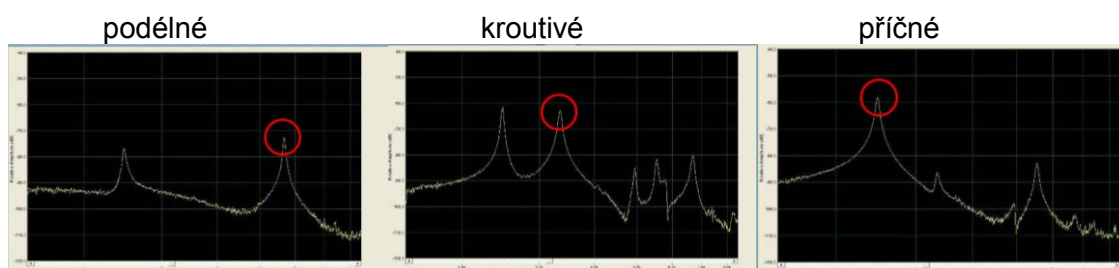
Podle kmitání zkušební tělesa se rozlišují dvě odlišné metody pro určení základní rezonanční frekvence. Tyto metody jsou založené na:

- **nepřerušované (spojité) kmitání** – původní metoda,
- **přerušované (impulsní) kmitání** – nová metoda [31].

Původní metoda se neobejde bez rezonančního přístroje, který vysílá do materiálu zkušebního tělesa spojitě mechanické kmitání, které je laditelné (frekvenční rozsah je obvykle od 30 Hz do minimálně 20 kHz). Princip spočívá v plynulém měnění frekvence buzení a hledání maximální amplitudy. Oproti tomuto novější metoda využívá mnohem jednodušší zařízení, které se skládá z Fourierova analyzátoru, což je v podstatě software v libovolném počítači, impulsního kladívka a snímače zrychlení. Postup měření impulsní metodou spočívá v tom, že se zkušební těleso umístí na pružnou podložku (třeba z molitanu), aby nedošlo k ovlivnění vlastní frekvence materiálu. Potom se přilepí snímač na povrch tělesa do jedné z poloh pro zjišťování vlastní frekvence (k umístění snímače na těleso se používá přilnavý materiál, jehož úkolem je také zajištění dobrého akustického kontaktu). Nakonec je pomocí kladívka vyvolán impakt, kdy se zkoušené těleso rozkmitá na svých rezonančních frekvencích a příslušná hodnota vlastní frekvence je zaznamenána s přesností 10 Hz. Zkouška se opakuje nejméně třikrát za účelem získání průměrné hodnoty a směrodatné odchylky max. 100 Hz [31].

Prostřednictvím nové metody je možné vyobrazit celé spektrum rezonančních frekvencí současně. Výstupem měření je diagram (viz Obr. 3-14), na jehož vodorovné ose je zvolené frekvenční spektrum a na jeho svislé ose je vidět relativní amplituda kmitání. Tato metoda je jednodušší s výrazně sníženým rizikem hrubých chyb [31].

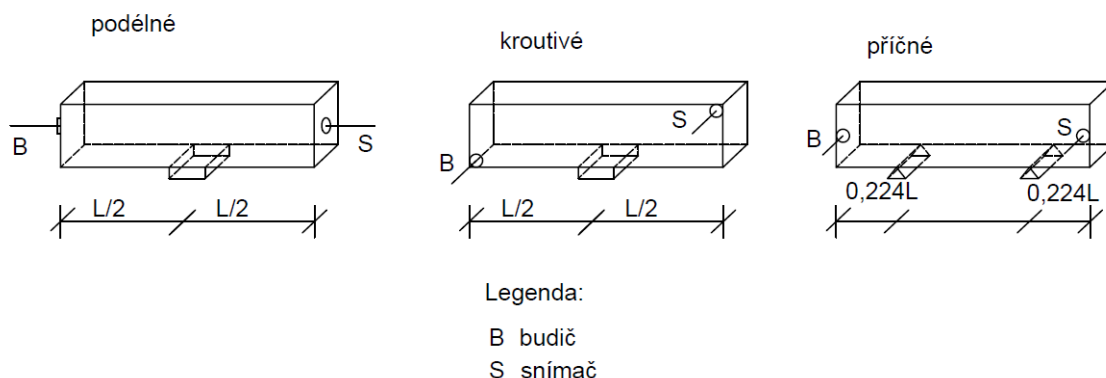
Hodnota vlastní frekvence svědčí o kvalitě materiálu (např. betonu), u kterého platí, že čím bude lepší z hlediska modulu pružnosti, tím vyšší budou jeho vlastní frekvence kmitání. Poruchy ve struktuře materiálu sniží vlastní frekvence kmitání tělesa a v diagramu dojde k zaoblení vrcholů u měřených křivek [31]. Měření touto metodou je však často i neuskutečnitelné, pokud se ve zkušebním tělese objeví např. nespojitosti či rozdílné hutnosti oblastí [38].



Obr. 3-14 Výstup z měření (při impulsním kmitání podélném, kroutovém a příčném) [39]

Dynamický modul pružnosti v tahu – tlaku E_{cr} se zjišťuje z podélné (E_{crL}) a příčné (E_{crF}) rezonanční frekvence. Z kroutové rezonanční frekvence se počítá

dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr} . Způsob podepření hranolů při měření prvního vlastního kmitočtu podélného, kroutivého a příčného kmitání je znázorněn na Obr. 3-15 [27].



Obr. 3-15 Způsob podepření hranolů při měření prvního vlastního kmitočtu podélného, kroutivého a příčného kmitání [27].

Dynamický modul pružnosti E_{crL} zjištěný z podélné rezonanční frekvence je dán vztahem:

$$E_{crL} = 4 \cdot L^2 \cdot f_L^2 \cdot \rho \quad (10)$$

Dynamický modul pružnosti E_{crF} z příčné rezonanční frekvence se vypočte ze vztahu:

$$E_{crf} = \frac{0,0789 \cdot c_1 \cdot f_f^2 \cdot L^4 \cdot \rho}{i^2} \quad (11)$$

Dynamický modul pružnosti ve smyku G_{cr} z kroutivé rezonanční frekvence se vypočte ze vztahu:

$$G_{cr} = 4 \cdot k \cdot L^2 \cdot f_t^2 \cdot \rho \quad (12)$$

kde E_{crL} , E_{crf} jsou dynamické moduly pružnosti v tahu a v tlaku [MPa],
 G_{cr} je dynamický modul pružnosti ve smyku [MPa],
 f_l , f_f jsou naměřené vlastní frekvence podélného nebo příčného kmitání [kHz],
 L je délka vzorku [m],
 ρ je objemová hmotnost [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 k je součinitel, závislý na tvaru průřezu vzorku [-],
 c_1 je korekční součinitel, zahrnující vliv smyku a setrvačnosti [-],

- i je poloměr setrvačnosti příčného řezu vzorku k ose kolmé na rovinu kmitání [m],
- k je součinitel závislý na tvaru průřezu vzorku [-] [27].

Z těchto modulů je možné potom vypočítat dynamický Poissonův poměr ν_{cr} :

$$\nu_{cr} = \frac{E_{crL}}{2 \cdot G_{cr}} - 1 \quad (13)$$

Poissonův poměr ν nabývá hodnot v intervalu (0; 0,5) [27].

Při znalosti dynamických modulů pružnosti a vzájemného poměru mezi hodnotami dynamických a statických modulů pružnosti můžeme provést přepočítání na statický modul pružnosti. Zmenšovací koeficienty je možné převzít například z normy ČSN 73 2011 [44] z roku 2012, ale vzhledem k tomu, že jsou v této normě jejich hodnoty stanoveny pro tradiční betony, je tedy lepší tyto koeficienty pro konkrétní materiál (beton) přímo stanovit [6].

Vztahy pro přepočítání vypadají následovně:

$$E_c = \kappa_u \cdot E_{cu} \quad (14)$$

$$E_c = \kappa_r \cdot E_{cr} \quad (15)$$

- kde κ_u je orientační zmenšovací součinitel pro přepočítání dynamických modulů ultrazvukových [-],
- κ_r je orientační zmenšovací součinitel pro přepočítání dynamických modulů rezonančních [-] [6].

4 PRAKTICKÁ ČÁST

4.1 Obecný popis zkušebních vzorků hornin

Experiment navazuje na výše stanovené cíle, kterými je zjištění a porovnání modulů pružnosti vybraných druhů přírodních kamenů používaných pro výrobu drceného hrubého kameniva do betonu a dále pak posouzení modulu pružnosti žuly na základě rozdílného stádia zvětrání.

Vzorky pro tuto práci byly dovezeny ze šesti lokalit:

- Bílčice (Moravskoslezský kraj) – čedič
- Luleč (Drahanská vysočina) – moravská droba
- Ondřejovice (Nízký Jeseník) – krystalický vápenec
- Ostroměř (Bělohradská pahorkatina) – pískovec
- Litice (Podorlická pahorkatina) – žula
- Mrákotín (Českomoravská vrchovina) – žula

Všechny vzorky kamenů z Mrákotína byly získány při průzkumu na Vysočině, kde se dělaly průvrty opěrami mostu, které byly vyžděny z žulového kamene. Tyto tělesa pro účely bakalářské práce dodal Ing. Jan Kryštof z firmy Mostní a silniční vývoj, s.r.o. Na základě normy (ČSN EN ISO 14689-1) [20] jsou tyto horniny zdravé, tzn. bez zjevných stop zvětrání/alterace, ale vzhledem k tomu, že most, ze kterého byly odebrány, je starý okolo 60 až 70 let, můžeme usuzovat, že určitým stupněm zvětrání tyto horniny prošly, a proto budou dále v této práci označovány jako zvětralé. Kameny z ostatních lokalit pochází z jádrových vývrtů z větších bloků horniny, které byly získány z kamenolomů. Na základě informací z kamenolomů a na základě normy ČSN EN ISO 14689-1 [20] jsou velmi pravděpodobně nezvětralé (dále v textu budou označeny za zdravé).

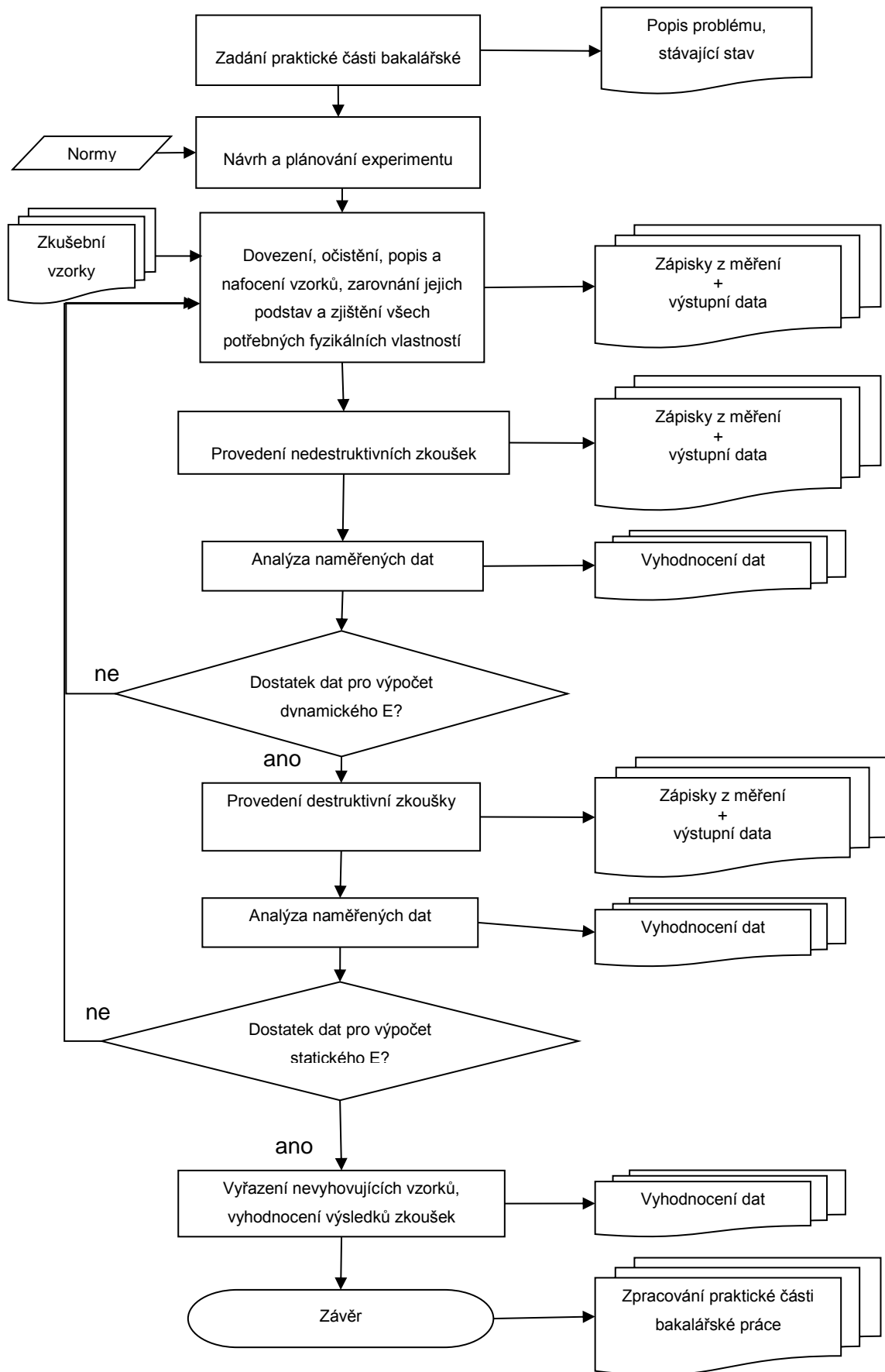
Celkový počet vzorků je 42, z čehož největší počet zaujímá žula z Mrákotína (23), následuje pískovec (6), moravská droba (4), krystalický vápenec (3), žula z Litic (3) a čedič (3). Většina zkušebních těles vybraných hornin má tvar válce, výjimkou jsou všechny pískovce a žuly z Litic, které jsou hranolovitého tvaru (kvádr). Váha zkušebních těles se pohybuje v rozmezí od 0,2 do 6,7 kg. Největším zkoušeným

prvkem je jedna ze žul z Mrákotína, jejíž průměrná výška je 302 mm, a nejmenší vzorek je z pískovce (51 mm).

Tato tělesa (viz Obr. 4-1) byla očištěna, popsána, nafocena a korundovým práškem byl zarovnán jejich povrch u horní a dolní podstavy (z důvodu docílení korektních výsledků u zkoušek). Následovalo vážení a měření těles, a poté se u nich provedly statické a dynamické zkoušky. Na základě vyhodnocení a následného porovnání výsledků fyzikálně mechanických vlastností kamene byla provedena diskuze (viz Obr. 4-2).



Obr. 4-1 Zkušební tělesa připravená pro experiment.



Obr. 4-2 Grafické zobrazení postupu práce.

4.2 Zkoušky a výsledky zkoušek

4.2.1 Ultrazuková impulsová metoda

Stanovení dynamického modulu pružnosti zkušebních těles bylo provedeno podle norem ČSN 73 1371 [41] a ČSN EN 12504-4 [43] s využitím ultrazukového přístroje TICO od firmy Proceq (viz Obr. 4-3). Frekvence sond f byla 150 kHz a tyto sondy byly k vzorkům hornin připevněny pomocí vrstvy plastelíny, jež sloužila jako vazebný akustický prostředek. Všechna zkušební tělesa byla prozvučena přímo. K zjištění přesnosti měření se provedla kontrolní zkouška na etanolu (56 μ s) před měřením každého zkušebního tělesa. Pokud doba průchodu UZ vlnění etanolem byla jiná než 56 μ s, provedla se kalibrace přístroje a mrtvý čas t_0 byl nulový.



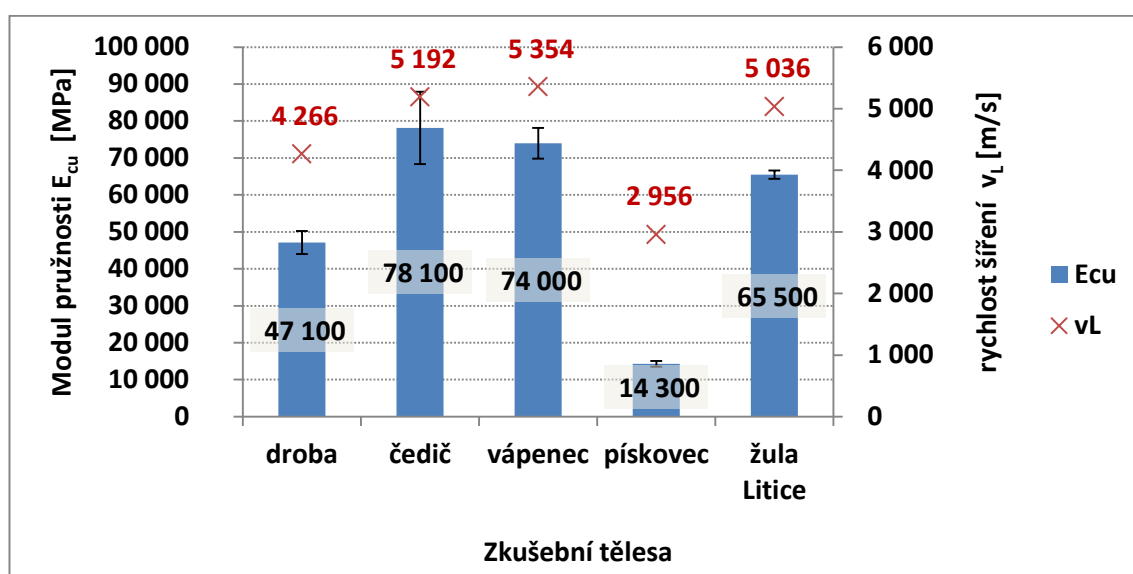
Obr. 4-3 Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazukovou zkouškou.

V následující tabulce (Tab. 4-1) jsou uvedeny průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti a rychlosti šíření UZ vln jednotlivých typů hornin. Žula byla hodnocena zvlášť pro lokalitu Litice a Mrákotín z důvodu rozdílných lokalit a míry zvětrání zkušebních vzorků.

Tab. 4-1 Hodnoty modulu pružnosti stanovené UZ metodou a rychlost šíření UZ vln tělesem.

Typ horniny		droba	čedič	vápenec	pískovec	žula Litice	žula Mrákotín
Modul pružnosti [MPa]	E_{cu}	47 100	78 100	74 000	14 300	65 500	26 400
Rychlost šíření [m/s]	v_L	4 270	5 190	5 350	2 960	5 040	3 260

V grafu (viz Graf. 4-1) jsou zobrazeny jednotlivé moduly pružnosti zdravých hornin a rychlosti šíření UZ vln. Nejvyšší modul pružnosti vychází u zkušebních vzorků čediče, jejichž průměrná hodnota je 78,1 GPa, a nejnižší průměrná hodnota byla naměřena u zkušebních vzorků z pískovce, jejichž hodnota je více než pětinásobně menší než u čediče a vychází 14,3 GPa. V tomto grafu je vidět, že u prvků s vyšším modulem pružnosti je i šíření UZ vln rychlejší, což ostatně vyplývá již ze vzorce pro stanovení tohoto modulu pružnosti, kde jsou hodnoty rychlosti v druhé mocnině. Výjimkou jsou hodnoty v_L u vápenců, které vychází o něco vyšší než hodnoty u čediče i přesto, že modul pružnosti vápence je nižší než modul pružnosti čediče. Hodnota modulu pružnosti čediče je ve výpočtu ovlivněna zejména objemovou hmotností této horniny.



Graf. 4-1 Porovnání dynamických modulů pružnosti a rychlostí šíření UZ vln u různých typů hornin dovezených z kamenolomu.

4.2.2 Statická zkouška

Stanovení statického modulu pružnosti zatěžovací zkouškou bylo provedeno dle normy ČSN EN 14580 [37]. Na srovnávacích tělesech bylo nutné nejprve stanovit pevnosti v tlaku (pro tuto zkoušku byla zvolena většinou nižší tělesa), a poté se na základě pevnosti již rozdrcených vzorků a z výsledků nedestruktivních UZ zkoušek (provedených na všech tělesech) odhadly zatěžovací meze pro statickou zkoušku zkušebních těles (viz Příloha 5). U některých vzorků bylo poté provedeno zatěžování s měřením deformací až do úplného rozdrcení kamene, u některých se pouze zatěžovalo. U zkušebního vzorku s označením DR-1A došlo při zkoušce k podélnému

prasknutí tělesa a vzorek byl vyřazen z hodnocení statického modulu pružnosti. Ke zkouškám byl použit lis s názvem FORM+TEST ALPHA 3-3000 a elektronický tenzometr LD-DD1-2, jež je příslušenstvím lisu FORM+TEST. Zatěžovací lis automaticky provedl centraci vzorku a celý proces zatěžování včetně vyhodnocení statického modulu pružnosti (ukázka z výstupu z lisu je na Obr. 4-6 a 4-7). Po provedené zkoušce byly srovnány pevnosti v tlaku zkušebních těles s průměrnou hodnotou a zjistilo se, že se tyto pevnosti v tlaku liší o více než 20 % u vzorků s označením P1, P2 a 13. V případě vzorků P1 a P2 šlo při stanovení zatěžovacích mezí o nadhodnocení pevnosti v tlaku zkušebního tělesa (výsledná hodnota modulu pružnosti těchto těles mohla být z tohoto důvodu mírně ovlivněna). Vzorek s označením 13 byl naopak vzhledem k pevnosti v tlaku podhodnocen a jeho modul pružnosti mohl být opět mírně ovlivněn. Rozdíl mezi skutečnou a předpokládanou pevností nebyl však natolik výrazný (také zjištěná hodnota MP u těchto těles se od ostatních výsledků výrazně neliší), aby musel být výsledek MP z vyhodnocení vyřazen.

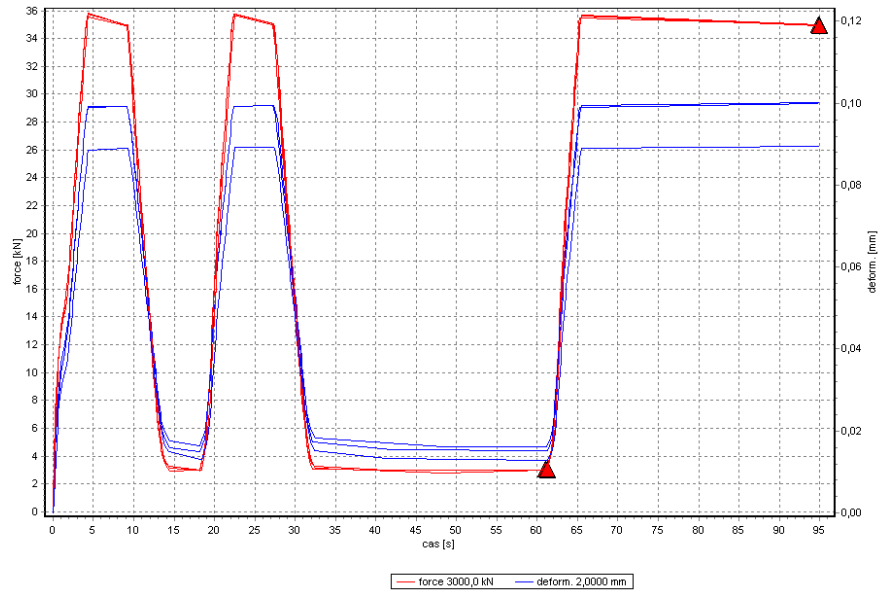
Na fotografiích pořízených v rámci experimentální části práce je zobrazeno osazení tělesa v lisu (viz Obr. 4-4) a vzorek po provedené zkoušce pevnosti v tlaku (viz Obr. 4-5), který má tvar přesýpacích hodin.



Obr. 4-4 Zkušební těleso uložené v lisu s osazenými měřicími přístroji.



Obr. 4-5 Zkušební těleso P6 po pevnostní zkoušce.



Obr. 4-6 Časový průběh zatěžování sady vzorků pískovce (s označením P1, P2 a P3) s vyznačením odečítání hodnot při zkoušce modulu pružnosti kamene.

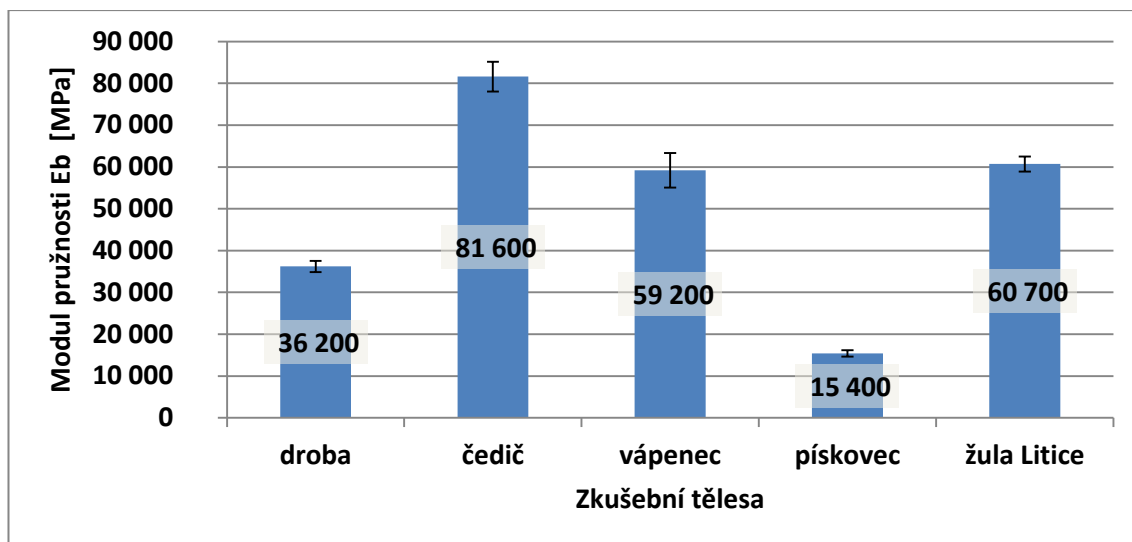
popis		P1	P2	P3		
Vyska	mm	49,8	49,8	49,8	Prum.	stand. odch.
Sirka	mm	50,7	50,7	51,2		
delka	mm	200,0	200,0	200,0		
E-Modul	N/mm ²	14900	15100	16300	15448,1	784,3
napeti u	N/mm ²	1,2	1,2	1,2		
napeti o	N/mm ²	13,9	13,9	13,7		
protazeni u	%	0,02	0,02	0,01		
protazeni o	%	0,10	0,10	0,09		

Obr. 4-7 Výstup z lisu (sada vzorků pískovce s označením P1, P2 a P3) – tabulka.

Výsledky zkoušek všech hornin jsou zprůměrované a zpracované v tabulce Tab. 4-2, grafické znázornění velikosti modulů pružnosti je v grafu Graf. 4-2, kde je vidět, že nejvyšší hodnoty modulu pružnosti dosáhly čedičová zkušební tělesa (81,6 GPa), druhou nejvyšší hodnotu měly vzorky ze žuly z Litic (60,7 GPa), o něco málo nižší hodnotu měly vápence (59,2 GPa), hodnota u zkušebních těles z droby (36,2 GPa) byla druhá nejnižší a nejnižší hodnoty modulu pružnosti měly pískovce (15,4 GPa).

Tab. 4-2 Průměrné hodnoty statických modulů pružnosti a pevností v tlaku zkoumaných hornin.

Typ horniny		droba	čedič	vápenec	pískovec	žula Litice	žula Mrákotín
Modul pružnosti	E_b [MPa]	36 200	81 600	59 200	15 400	60 700	31 200
pevnost v tlaku	f_c [MPa]	175	-	-	40	-	134



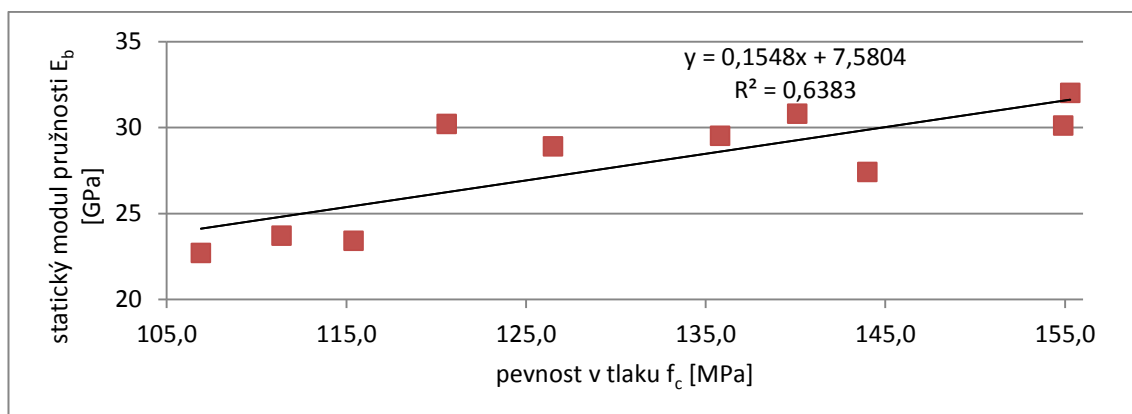
Graf. 4-2 Porovnání statických modulů pružnosti kamenů (dovezených z lomu).

V následující tabulce (Tab. 4-3) jsou uvedeny moduly pružnosti a pevnosti v tlaku zkušebních těles z mrákotínské žuly, které byly ve zkušebním lisu zatěžovány až do porušení prvku. Graf (Graf. 4-3) znázorňuje „závislost“ modulu pružnosti na pevnosti v tlaku, která je pro názornost proložena lineární přímkou.

U většiny betonů platí, že čím vyšší je jeho pevnost v tlaku, tím vyšší je i modul pružnosti. Obecně však závislost těchto charakteristik betonu neexistuje, o čemž podrobně pojednává mnoho odborné literatury [3, 45]. U hornin je velmi pravděpodobné, že stejně jako u betonu exaktní závislost neexistuje. Na základě znalosti pevnosti v tlaku je možné MP pouze odhadnout, o čemž svědčí graf (viz Graf. 4-3), z kterého je patrné, že vyšší pevnosti v tlaku zákonitě neznamenají vyšší dosažené hodnoty modulu pružnosti.

Tab. 4-3 Výsledky zkoušek modulů pružnosti a pevnost v tlaku (žula z Mrákotína).

		žula Mrákotín									
Označení vzorku		1A	1B	7B	14B	12	11B	4A	13	5	4B
Modul pružnosti	E_b [GPa]	22,7	23,7	23,4	30,2	28,9	29,5	30,8	27,4	30,1	32,0
Pevnost v tlaku	f_c [MPa]	106,9	111,4	115,4	120,6	126,5	135,8	140,1	144	154,9	155,3



Graf. 4-3 Závislost statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (žula z Mrákotína).

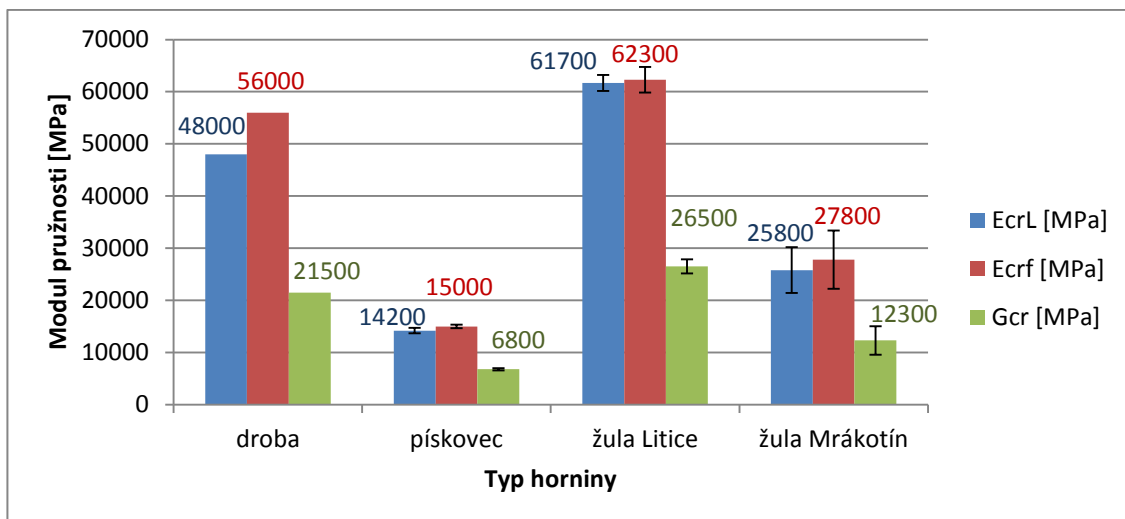
4.2.3 Rezonanční metoda

Stanovení dynamického modulu pružnosti zkušebních těles bylo provedeno před statickou zkouškou dle normy pro beton ČSN 73 1372 [46]. Pro měření byl použit Fourierův analyzátor, impulsní kladívko, pružná podložka a snímač zrychlení (viz. Obr. 4-8). Měření bylo pouze orientační. Touto metodou se nezkoušela všechna tělesa, neboť u některých vzorků (zejména u malých štíhlých vzorků) by bylo měření neprůkazné.

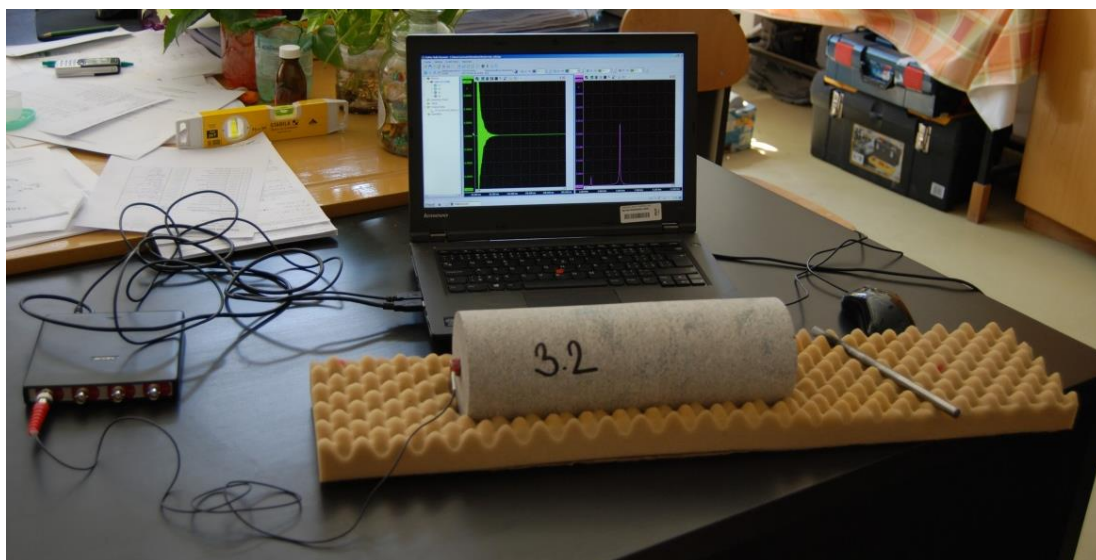
V následující tabulce (Tab. 4-4) jsou uvedeny průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti zjištěné z podélné (E_{crL}), příčné (E_{crF}) a kroutové (modul pružnosti ve smyku G_{cr}) rezonanční frekvence u měřených hornin, které jsou graficky porovnány v Graf. 4-4.

Tab. 4-4 Průměrné hodnoty dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda) u některých hornin.

Typ horniny		droba	čedič	k. vápenec	pískovec	žula Litice	žula Mrákotín
Modul pružnosti [MPa]	E_{crL}	48000	-	-	14200	61700	25800
	E_{crF}	56000	-	-	15000	62300	27800
	G_{cr}	21500	-	-	6800	26500	12300



Graf. 4-4 Porovnání dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda) některých hornin.



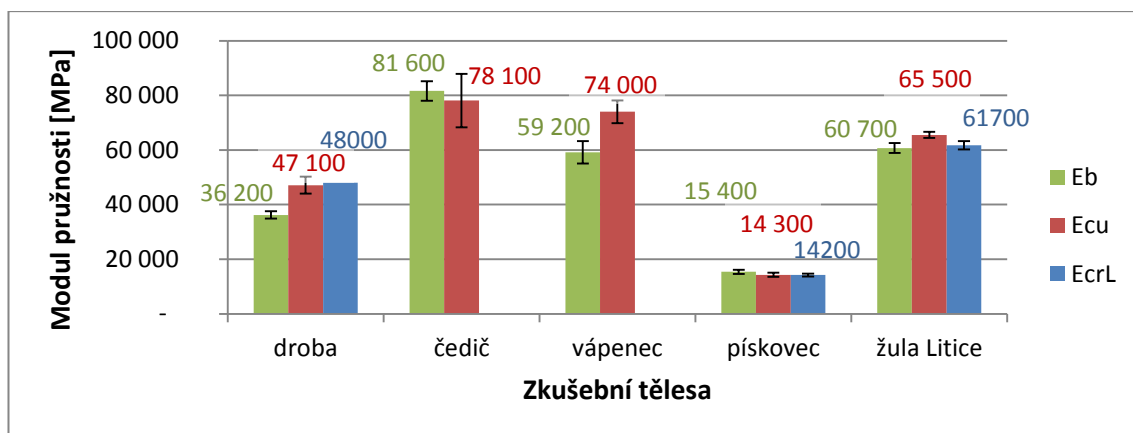
Obr. 4-8 Rezonanční zkouška.

4.3 Porovnání statických a dynamických modulů pružnosti (diskuze výsledků)

Při porovnání všech provedených metod u vzorků hornin dovezených z kamenolomu (viz Graf. 4-5) je zřejmé, že u těles z droby, vápence a litické žuly vychází dynamický modul pružnosti vyšší než ten statický. U čediče a pískovce jsou dynamické moduly nižší.

Nejvyšší dynamický (78,1 GPa) a statický (81,6 GPa) modul pružnosti vychází u čediče. Nejnižší moduly pružnosti má pískovec, jehož statický modul pružnosti je 15,4

GPa, dynamický modul pružnosti z ultrazvukové zkoušky je 14,3 GPa a dynamický modul pružnosti z rezonanční metody je 14,2 GPa.



Graf. 4-5 Srovnání statických a dynamických modulů pružnosti kamenů (dovezených z lomu).

Koeficienty pro přepočítání dynamického modulu pružnosti na statický u jednotlivých typů hornin jsou zobrazeny v následující tabulce (viz Tab. 4-5). Tyto koeficienty jsou zmenšovací (droba, vápenec, litická žula) a zvětšovací (čedič, pískovec, mrákotínská žula). Koeficienty byly vypočteny na základě vztahů (14) a (15) uvedených v teoretické části práce.

Tab. 4-5 Hodnoty koeficientů pro přepočítání dynamických modulů ultrazvukových κ_u a rezonančních κ_r na moduly na statické.

Typ horniny	droba	čedič	vápenec	pískovec	žula Litice	žula Mrákotín
κ_u	0,77	1,04	0,80	1,08	0,93	1,18
κ_r	0,75	-	-	1,08	0,98	1,21

V případě betonů platí, že dynamické moduly pružnosti jsou vyšší než statické (přepočítací koeficienty jsou jen zmenšovací). Pro ukázkou je zde uvedena následující tabulka (Tab. 4-6) z normy ČSN 73 2011 [44].

Tab. 4-6 Hodnoty zmenšovacích koeficientů pro přepočet dynamických modulů ultrazvukových κ_u a rezonančních κ_r na moduly na statické [44].

Třída betonu	Zmenšovací koeficient κ_u	Zmenšovací koeficient κ_r
C 8/10	0,62	0,81
C 12/15	0,71	0,86
C 16/20	0,76	0,88
C 25/30	0,81	0,90
C 30/37	0,83	0,91
C 35/45	0,86	0,93
C 40/50	0,88	0,94
C 45/55	0,90	0,95

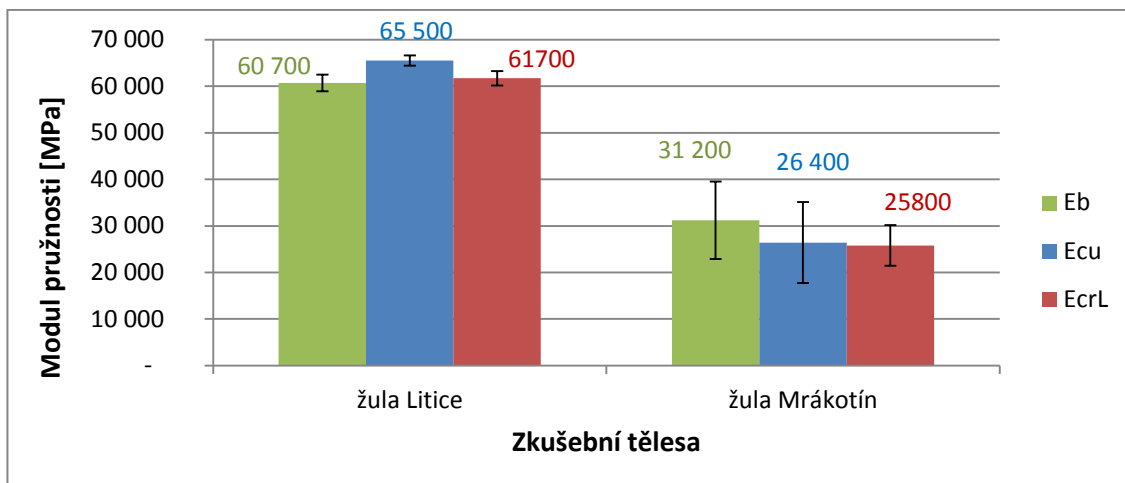
4.4 Zvětrání

Na základě dostatečného množství výsledků z provedených zkoušek u různých žul je možné porovnat moduly pružnosti žuly v rozdílném stádiu zvětrání. V následující tabulce (Tab. 4-7) jsou uvedeny průměrné hodnoty modulů pružnosti žul z Litic (zdravé horniny dovezené z kamenolomu) a z Mrákotína (zvětralé horniny odebrané z mostních opěr).

Tab. 4-7 Výsledky zkoušek modulů pružnosti žuly z různých lokalit.

Modul pružnosti [MPa]	Typ horniny			žula Litice	žula Mrákotín
	statický	statická zkouška	E_b	60 700	31 200
	dynamický	ultrazvuková metoda	E_{cu}	65 500	26 400
		rezonanční metoda	E_{crL}	61700	25800
			E_{crf}	62300	27800
			G_{cr}	26500	12300

U zkušebních vzorků žul z Litic vychází všechny získané moduly pružnosti zhruba dvakrát vyšší než moduly pružnosti u žul z Mrákotína (viz Graf. 4-6). Nejvyšší modul pružnosti (65,5 GPa) byl dosažen u žuly z Litic pomocí UZ metody.



Graf. 4-6 Porovnání modulů pružnosti žuly z Litice a žuly z Mrákotína.

Míra zvětrání byla porovnána i u vzorků žul z Mrákotína (v rozdílném stádiu zvětrání) na základě výsledků ze zkoušek a vizuálního srovnání (viz Obr. 4-9).

Byla vybrána zkušební tělesa s označením 4B a 1B, protože jejich hodnoty hmotnosti, průměru prvku a výšky byly podobné. Zkušební těleso 4B (na Obr. 4-9 vpravo) je méně zvětralé. Statický modul pružnosti tohoto tělesa je vyšší (32 GPa) než u vzorku 1B (na Obr. 4-9 vlevo), u kterého byl modul pružnosti 23,7 GPa. Hornina zkušební vzorku 4B je kvalitnější, s větším zbarvením do modra. Hornina zkušební vzorku 1B je zbarvená do žluta. Rychlost průchodu UZ vln u zkušební tělesa 4B byla naměřena 3369 m/s, což je vyšší hodnota než u zkušební vzorku 1B, kde se rychlost rovnala 3147 m/s. Další charakteristiky materiálu jsou uvedeny v následující tabulce (viz Tab. 4-8).

Tab. 4-8 Výsledné hodnoty zkušebních vzorků s označením 1B a 4B.

Zkušební těleso	Modul pružnosti [MPa]					Rychlost šíření [m/s]	Pevnost v tlaku [MPa]
	E _b	E _{crL}	E _{crf}	G _{cr}	E _{cu}	v _L	f _c
1B	23700	18800	18700	8400	23700	3147	111,4
4B	32000	24500	26700	11800	27400	3369	155,3



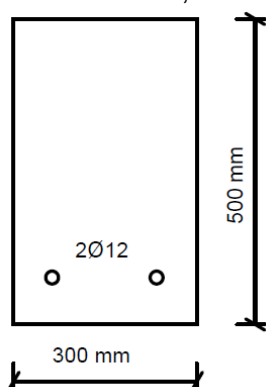
Obr. 4-9 Více (vlevo) a méně (vpravo) zvětralé vzorky žuly z Mrákotína.

Závěrem je nutné podotknout, že výsledky nemusí z několika důvodů přesně odpovídat reálným hodnotám (odchyly by však neměly být nijak výrazné, řádově maximálně do několika procent, spíše však desetin procenta). Průměrné hodnoty MP by mohly vycházet přesněji při větším počtu zkušebních těles. Dalším důvodem, proč mohou být hodnoty MP mírně ovlivněny, je skutečnost, že u některých zkušebních těles nebyla (z důvodu dalších experimentů na těchto kamenech) ověřena správnost volby horního zatěžovacího napětí, která má na hodnoty MP částečný vliv. Jelikož se zkušební tělesa kamene obtížně získávají, nebyla všechna tělesa pro zkoušení stejného tvaru a měla rozdílné štíhlosti. Vliv tvaru zkušebních těles na hodnoty MP není u zkoušení kamene nikde popsán, ale protože se u zkoušení betonu jedná o prokázaný vliv, můžeme se domnívat, že u hornin bude mít pravděpodobně také vliv. Při posuzování modulu pružnosti na základě zvětrání, je MP částečně ovlivněn i lokalitou, odkud byly horniny dovezeny, protože zdravá žula z Mrákotína bude mít pravděpodobně jinou hodnotu MP než zdravá žula z Litic.

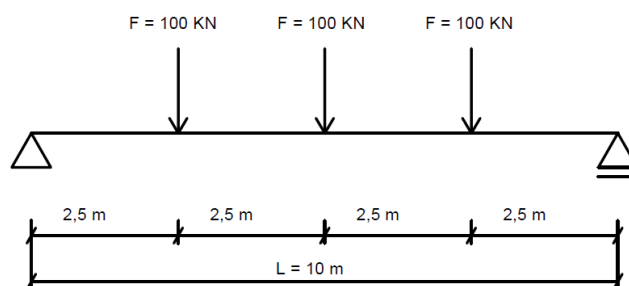
5 VÝPOČET

Vybraný příklad, na kterém je poukázáno, že modul pružnosti ovlivňuje průhyb, je prostý betonový nosník délky $L = 10$ m, který je zatížen 3 silami F velikosti 100 kN působící na nosník v místech vyznačených na Obr. 5-2. Beton je pevnostní třídy C16/20. Průřez nosníku (Obr. 5-1) má obdélníkový tvar, jehož šířka b je 300 mm a výška h je 500 mm. Tento průřez je vyztužen 2 profily oceli B500B průměru 12 mm. Třída konstrukce byla zvolena S4 a stupeň prostředí XC1.

Beton: C16/20, Ocel: B500B



Obr. 5-1 Příčný řez nosné konstrukce.



Obr. 5-2 Statický model.

Charakteristiky materiálů:

BETON

charakteristická pevnost v tlaku f_{ck}

návrhová pevnost v tlaku $f_{cd} = 1 \cdot \frac{16}{1,5}$

střední hodnota pevnosti v tahu f_{ctm}

charakteristická pevnost v tahu $f_{ck;0,05}$

modul pružnosti E_{cm}

mezní přetvoření ϵ_{cu3}

C16/20

16 MPa

10,67 MPa

1,9 MPa

1,3 MPa

29 GPa

3,5 ‰

BETONÁŘSKÁ VÝZTUŽ

charakteristická pevnost v tahu f_{yk}

návrhová pevnost v tahu $f_{yd} = \frac{500}{1,15}$

modul pružnosti E_s

B500B

500 MPa

434,78 MPa

200 GPa

$$A_S(2 \phi_{12}) = 2,26 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2$$

$$\alpha_c = \frac{E_s}{E_{cm}}$$

$$\alpha_c = \frac{200}{29} = 6,897$$

$$A_i = A_c + \alpha_c \cdot A_s$$

$$A_i = 0,3 \cdot 0,5 + 6,897 \cdot 2,26 \cdot 10^{-4} = 0,1516 \text{ m}^2$$

Návrh krycí vrstvy výztuže:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

$$c_{min} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur}; 10 \text{ mm}\} = \max\{12; 15; 10 \text{ mm}\} = 15 \text{ mm}$$

$$c_{min,b} \geq \emptyset = 15 \text{ mm}$$

$$c_{min,dur} = 15 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dev} = \langle 5; 10 \rangle \text{ mm}$$

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} = 15 + 10 = 25 \text{ mm}$$

Silová podmínka:

$$A_c \cdot f_{cd} = A_s \cdot f_{yd} \rightarrow A_c = A_s \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}}$$

$$A_c = 2,26 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{435}{10,67} = 0,0092 \text{ m}^2$$

$$A_c = \lambda \cdot x \cdot b \rightarrow x = \frac{A_c}{\lambda \cdot b}$$

$$x = \frac{0,0092}{0,8 \cdot 0,3} = 0,0384 \text{ m}$$

Moment setrvačnosti:

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot h \cdot b^3 + A_i \cdot (b/2)^2$$

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot 0,5 \cdot 0,3^3 + 0,1516 \cdot 0,15^2 = 4,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$I_x = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + A_i \cdot (h/2)^2$$

$$I_x = \frac{1}{12} \cdot 0,3 \cdot 0,5^3 + 0,1516 \cdot 0,25^2 = 12,60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^4$$

Průhyb:

$$w_x = \frac{19}{384} \cdot \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I_x}$$

$$w_x = \frac{19}{384} \cdot \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{29 \cdot 10^9 \cdot 12,60 \cdot 10^{-3}} = 13,54 \cdot 10^{-3} \text{ m} = 13,54 \text{ mm}$$

Podmínka průhybu:

$$w_x \leq \frac{L}{250}$$

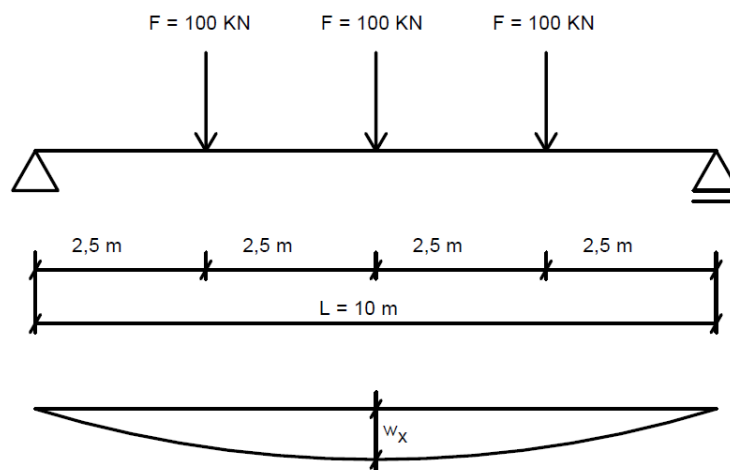
$$13,54 \text{ mm} \leq \frac{10}{250} = 0,04 \text{ m} = 40 \text{ mm}$$

po zabudování prvku:

$$w_x \leq \frac{L}{500}$$

$$13,54 \text{ mm} \leq \frac{10}{500} = 0,02 \text{ m} = 20 \text{ mm}$$

Průhyb nosníku (viz Obr. 5-3) bude 13,54 mm a vyhoví stanoveným podmínkám.



Obr. 5-3 Průhyb od zatížení.

Na základě vzorce pro výpočet průhybu konstrukce, můžeme konstatovat, že modul pružnosti má vliv na velikost průhybu. Nepřímá úměra mezi těmito veličinami znamená, že čím větší bude hodnota modulu pružnosti, tím menší bude hodnota průhybu a opačně. Tuto skutečnost dokazuje následující tabulka (viz Tab. 5-1), jejíž hodnoty vychází ze zcela totožného zadání příkladu (viz výše), u něhož byla

provedena (celkem pětkrát) změna u hodnoty modulu pružnosti. Výpočet probíhal stejným způsobem a za použití stejných vzorců.

Tab. 5-1 *Vliv rozdílných modulů pružnosti na průhyb.*

Modul pružnosti E_c [GPa]	Průhyb w [mm]
23	17,04
25	15,69
27	14,54
29	13,54
31	12,67
33	11,91

6 ZÁVĚR

Cíle bakalářské práce byly splněny. Na základě zadání bakalářské práce byla částečně osvětlena problematika modulu pružnosti kamene. V teoretické části byla provedena rešerše literatury, v praktické části byly zjištěny a porovnány moduly pružnosti vybraných druhů přírodních kamenů používaných pro výrobu drceného hrubého kameniva do betonu na základě statických a dynamických zkoušek. Dále pak byl posouzen modul pružnosti žuly na základě rozdílného stádia zvětrání.

Po porovnání výsledků s již existujícími poznatky (viz Tab. 6-1) je možné říci, že výsledky průměrných hodnot statických modulů pružnosti hornin zkoumaných v této bakalářské práci přibližně odpovídají informativním hodnotám z normy ČSN 73 3251 [7] (z roku 1986, která je již neplatná, přičemž verze z roku 2012 [47] tyto informace již neobsahuje), výsledným hodnotám uvedených v příspěvku z konference zkoušení a jakost ve stavebnictví z roku 2010 [8] a telefonické konzultaci s Ing. Jiřím Pavlíkem, CSc. [18].

Podle očekávání vyšly nejvyšší průměrné statické moduly pružnosti u čediče (81,6 GPa) a nejnižší u pískovce (15,4 GPa). U žul z Litic vyšel podobný statický modul pružnosti (60,7 GPa) jako u krystalických vápenců (59,2 GPa). Moravská droba měla průměrný statický modul pružnosti 36,2 GPa, přičemž je zajímavé, že norma ČSN 73 3251 [7] uvádí nižší hodnotu (23 GPa) a odborníci se v praxi setkávají i s hodnotami o více jak polovinu vyššími (50-80 GPa). Na základě porovnání výsledných hodnot u žul bylo v této bakalářské práci ověřeno, že zdravé horniny mají vyšší modul pružnosti než horniny zvětralé a čím větší je míra zvětrání, tím nižší je modul pružnosti hornin a naopak.

Tab. 6-1 Porovnání výsledných modulů pružnosti s normou ČSN 73 3251 [7], odbornou konzultací [18] a příspěvkem z konference [8].

Druh horniny	Modul pružnosti [GPa]			
	praktická část práce	norma ČSN 73 3251 [7]	telefonická konzultace [18]	příspěvek z konference [8]
Čedič	81,6	-	>100	81,5
Moravská droba	36,2	23	50-80	36,5
K. vápenec	59,2	60	50	61
Pískovec	15,4	20	5-20	-
Žula	60,7	70	30-60	56
Žula - zvětralá	31,2	-	15-25	-

Jelikož existuje mnoho lokalit (odkud jsou odebírány různé druhy hornin používané pro výrobu drceného hrubého kameniva do betonu), ve kterých se dosud nezjišťovaly moduly pružnosti hornin, zůstává problematika MP kamene stále otevřena.

7 SEZNAMY

7.1 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] HUŇKA, Petr, Karel KOLÁŘ, Petr BOUŠKA a Stanislav ŘEHÁČEK. Vliv způsobu zakoncování tlačných ploch zkušebního tělesa na hodnotu statického modulu pružnosti v tlaku. 2011. In: *Sborník recenzovaných příspěvků konference: Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2011*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, s. 103-112. ISBN 978-80-214-3438-9.
- [2] BRODŇAN, Miroslav, František BAHLEDA, Jozef JOŠT a Petr KOTEŠ. Vplyv pôsobenia nízkej teploty na hodnotu modulu pružnosti betónu. 2013. In: *Sborník recenzovaných příspěvků konference: Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2013*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, s. 17-24. ISBN 978-80-214-4777-6.
- [3] MISÁK, Petr a Tomáš VYMAZAL. Modul pružnosti vs. pevnost v tlaku. 2009. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, **devátý**(2/2009). ISSN 1213-3116.
- [4] CIKRLÉ, Petr, Vlastimil Bílek a Eva JUŘINOVÁ. Zkoušení modulu pružnosti betonu pro prefabrikaci. 2009. In: *Sborník recenzovaných příspěvků konference: Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2009*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, s. 61-66. ISBN 978-80-214-3951-1.
- [5] CIKRLÉ, Petr a Vlastimil BÍLEK. Modul pružnosti vysokopevných betonů různého složení. 2010. *Beton*. Praha: Česká betonářská společnost, (5/2010).
- [6] CIKRLÉ, Petr a Dalibor KOCÁB. Dynamické a statické moduly pružnosti betonu. 2013. In: *Sborník recenzovaných příspěvků konference: Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2013*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, s. 156-166. ISBN 978-80-214-4777-6.
- [7] ČSN 73 3251 (733251). *Navrhování konstrukcí z kamene*. Český normalizační institut, 1986. Již neplatná.
- [8] CIKRLÉ, Petr, Dalibor KOCÁB a Petr MITRENGA. Modul pružnosti hornin určených pro výrobu hrubého kameniva. 2010. In: *Sborník recenzovaných příspěvků konference: Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2010*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, s. 273-278. ISBN 978-80-214-4144-6.
- [9] POSPÍŠIL, Pavel. *Geologie*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2004, 57 s.
- [10] Horninový cyklus. *Petrologie* [online]. [2013] [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <http://petrologie.1sin.cz/horninovy-cyklus.php>
- [11] Geologický cyklus a čas. *Institut geologického inženýrství, VŠB-TU Ostrava; Geologie, Studium, Mineralogie, Geology, Mineralogy* [online]. 2009 [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/jelinek/tc-geol-cyklus.htm>
- [12] Horniny. *Geofyzikální ústav Akademie věd ČR, v.v.i.* [online]. [2003] [cit. 2015-04-24]. Dostupné z: <https://www.ig.cas.cz/popularizace/geopark-sporilov/horniny>

- [13] Nejoriginálnější krásy a divy přírody na světě, které vám vyrazí dech. *Novinky.cz* [online]. 2012 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.novinky.cz/cestovani/279873-nejoriginalnejsi-krasy-a-divy-prirody-na-svete-ktere-vam-vyrazi-dech.html>
- [14] Lom Bohdík. *EKOZIS s.r.o.* [online]. [2009] [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.ekozis.cz/stavby-prodej-vyroba/drcene_kamenivo-bohdikov/
- [15] Mount Rushmore. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2015 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Mount_Rushmore
- [16] Mineralogie a petrografie. *Institut geologického inženýrství, VŠB-TU Ostrava; Geologie, Studium, Mineralogie, Geology, Mineralogy* [online]. [2009] [cit. 2015-04-25]. Dostupné z: <http://geologie.vsb.cz/MINERALOGIE/texty/kap3/kap3-2-2.htm>
- [17] Greywacke Rocks. *Geograph Britain and Ireland* [online]. 2011 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.geograph.org.uk/photo/2417989>
- [18] PAVLÍK, Jiří. GEOTest, a.s., Šmahova 1244/112, Brno, 11. 3. 2014
- [19] POSPÍŠIL, Pavel. *Geologie*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2004, 47 s.
- [20] ČSN EN ISO 14689-1 (721005). *Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zatřídování hornin - Část 1: Pojmenování a popis*. Český normalizační institut, 2004.
- [21] ČSN EN 206 (732403). *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Český normalizační institut, 2014.
- [22] HELA, Rudolf a Radomír SOKOLÁŘ. *Zkušebnictví a technologie*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005, 64 s.
- [23] PROCHÁZKA, David, Klára KŘÍŽOVÁ a Rudolf HELA. Problematika modulů pružnosti u vysokopevnostních betonů. 2010. In: *17. Betonářské dny 2010*. Hradec Králové: Česká betonářská společnost ČSSI (ČBS), s. 417-420.
- [24] ADÁMEK, Jiří. *Stavební látky*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, [2006]., 49 s.
- [25] ČSN EN 12620+A1 (721502). *Kamenivo do betonu*. Český normalizační institut, 2008.
- [26] HELA, Rudolf. *Technologie betonu*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005, 110 s.
- [27] HEŘMÁNKOVÁ, Věra. *Zkušebnictví a technologie - cvičebnice*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 100 s. ISBN 978-80-7204-758-1.
- [28] ČSN EN 1992-1-1 ed. 2 (731201). *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Český normalizační institut, 2011.
- [29] ČSN EN 1926 (721142). *Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení pevnosti v prostém tlaku*. Český normalizační institut, 2007.
- [30] UNČÍK, Stanislav a Patrik ŠEVČÍK. *Modul pružnosti betonu* [online]. Trnava, 2008 [cit. 2015-05-15]. ISBN 978-80-969182-3-2. Dostupné z: http://www.betonracion.sk/betonracion/downloads/modul_pruznosti.pdf

- [31] CIKRLE, Petr a Ondřej POSPÍCHAL. Nový způsob stanovení mrazuvzdornosti betonu s využitím metod pro sledování poruch struktury. 2011. *Beton*. Praha: Česká betonářská společnost, (3/2011).
- [32] REITERMAN, Pavel, Petr HUŇKA a Karel KOLÁŘ. Vliv způsobu ošetřování na dlouhodobý vývoj modulu pružnosti. 2010. In: *17. Betonářské dny 2010*. Hradec Králové: Česká betonářská společnost ČSSI (ČBS), s. 425-428.
- [33] *Zkoušky modulu pružnosti betonu* [online]. 2012. Beroun [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.betotech.cz/stahnout-soubor?id=201>. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Hana Hanzlová, CSc.
- [34] ČSN ISO 1920-10 (731319). *Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Český normalizační institut, 2014.
- [35] ČSN EN 12390-13 (731302). *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. Český normalizační institut, 2014.
- [36] ČSN 73 6174 (736174). *Stanovení modulu pružnosti a přetvárnosti betonu ze zkoušky v tahu ohybem*. Český normalizační institut, 1994.
- [37] ČSN EN 14580 (721165). *Zkušební metody přírodního kamene - Stanovení statického modulu pružnosti*. Český normalizační institut, 2005.
- [38] SCHMID, Pavel. *Zkušebnictví a technologie*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, [2006]., 47 s.
- [39] CIKRLE, Petr. Rezonanční metoda, Moduly pružnosti [Internet]. [Brno]: Vysoké učení technické v Brně; [2010] [cit. 2015-05-15]. [36 s.] Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2550723>
- [40] CIKRLE, Petr, Dalibor KOCÁB a Ondřej Pospíchal. Zkoušení betonu ultrazvukovou impulsovou metodou. 2013. *Beton*. Praha: Česká betonářská společnost, (3/2013).
- [41] ČSN 73 1371 (731371). *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Český normalizační institut, 2011.
- [42] HOBST, Leonard, Jiří ADÁMEK, Petr CIKRLE a Pavel SCHMID. *Diagnostika stavebních konstrukcí: přednášky*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005, 124 s.
- [43] ČSN EN 12504-4 (731303). *Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. Český normalizační institut, 2005.
- [44] ČSN 73 2011 (732011). *Nedestruktivní zkoušení betonových konstrukcí*. Český normalizační institut, 2012.
- [45] HUŇKA, Petr, Karel KOLÁŘ a Jiří KOLÍSKO. Porovnání výsledků statického modulu pružnosti v tlaku různých receptur s hodnotami uvedenými v ČSN 1992-1-1. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, 2013, (6). ISSN 1213-3116.
- [46] ČSN 73 1372 (731372). *Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Český normalizační institut, 2012.
- [47] ČSN 73 3251 (733251). *Navrhování konstrukcí z kamene*. Český normalizační institut, 2012.

7.2 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Seznam použitých symbolů není úplný, některé veličiny či symboly jsou vysvětleny přímo v textu.

VUT	Vysoké učení technické v Brně
FAST	Fakulta stavební
IZ	Index zvětrání
f_c	Pevnost betonu v tlaku
F	Síla
A	Průřezová plocha vzorku
MP, E	Modul pružnosti
ε	Poměrné přetvoření
σ	Napětí
E_c, E_b	Statický modul pružnosti betonu a kamene
UZ	Ultrazvuk
v_L	Rychlost šíření impulzu
E_{cu}	Dynamický modul pružnosti betonu stanovený ultrazvukem
P	Objemová hmotnost
E_{crL}	Dynamický modul pružnosti betonu stanovený vyhodnocením kmitočtů z rezonančních frekvencí podélného kmitání
E_{crf}	Dynamický modul pružnosti betonu stanovený vyhodnocením kmitočtů z rezonančních frekvencí příčného kmitání
G_{cr}	Dynamický modul pružnosti betonu ve smyku
ν_{cr}	Poissonův součinitel
κ_u	Orientační zmenšovací součinitel pro přepočítání dynamických modulů ultrazvukových
κ_r	Orientační zmenšovací součinitel pro přepočítání dynamických modulů rezonančních
w	průhyb

7.3 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK

7.3.1 Seznam obrázků

Obr. 3-1	Horninový cyklus [11].
Obr. 3-2	Pískovcový útvar The Wave, Arizóna, USA [13].
Obr. 3-3	Čedičový útvar Giant's Causeway, Severní Irsko, Velká Británie [13].
Obr. 3-4	Ložisko krystalického vápence, Bohdík, Česká republika [14].
Obr. 3-5	Mount Rushmore National Memorial, Jižní Dakota, USA [15].
Obr. 3-6	Záliv tvořený drobou, Back Bay, Velká Británie [17].
Obr. 3-7	Určení plochy pro stanovení pevnosti v tlaku [24].
Obr. 3-8	Závislost mezi napětím a poměrným přetvořením betonu a znázornění různých druhů modulů pružnosti [30].
Obr. 3-9	Schéma pracovního diagramu betonu [28].

- Obr. 3-10 (vlevo) Umístění měřícího zařízení na zkušební tělese, (vpravo) grafické znázornění průběhu zatěžování zkušební tělesa [27].
- Obr. 3-11 Zatěžovací – časový diagram pro stanovení statického modulu pružnosti (příklad horniny s pevností 60MPa) [37].
- Obr. 3-12 Ukázka možného uspořádání UZ sond při zkoušce trámci [31].
- Obr. 3-13 Způsoby prozvučování konstrukce [42].
- Obr. 3-14 Výstup z měření (při impulsním kmitání podélném, kroutivém a příčném) [39].
- Obr. 3-15 Způsob podepření hranolů při měření prvního vlastního kmitočtu podélného, kroutivého a příčného kmitání [27].
- Obr. 4-1 Zkušební tělesa připravená pro experiment.
- Obr. 4-2 Grafické zobrazení postupu práce.
- Obr. 4-3 Stanovení dynamického modulu pružnosti ultrazvukovou zkouškou.
- Obr. 4-4 Zkušební těleso uložené v lisu s osazenými měřicími přístroji.
- Obr. 4-5 Zkušební těleso P6 po pevnostní zkoušce.
- Obr. 4-6 Časový průběh zatěžování sady vzorků pískovce (s označením P1, P2 a P3) s vyznačením odečítání hodnot při zkoušce modulu pružnosti kamene.
- Obr. 4-7 Výstup z lisu (sada vzorků pískovce s označením P1, P2 a P3) – tabulka.
- Obr. 4-8 Rezonanční zkouška.
- Obr. 4-9 Více (vlevo) a méně (vpravo) zvětřené vzorky žuly z Mrákotína.
- Obr. 5-1 Příčný řez nosné konstrukce.
- Obr. 5-2 Statický model.
- Obr. 5-3 Průhyb od zatížení.

7.3.2 Seznam grafů

- Graf. 4-1 Porovnání dynamických modulů pružnosti a rychlostí šíření UZ vln u různých typů hornin dovezených z kamenolomu.
- Graf. 4-2 Porovnání statických modulů pružnosti kamenů (dovezených z lomu).
- Graf. 4-3 Závislost statického modulu pružnosti na pevnosti v tlaku (žula z Mrákotína).
- Graf. 4-4 Porovnání dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda) některých hornin.
- Graf. 4-5 Srovnání statických a dynamických modulů pružnosti kamenů (dovezených z lomu).
- Graf. 4-6 Porovnání modulů pružnosti žuly z Litic a žuly z Mrákotína.

7.3.3 Seznam tabulek

- Tab. 3-1 Informativní hodnoty deformačních vlastností hornin v ČR podle [18].
- Tab. 3-2 Popis zvětřání a alterace hornin (ČSN EN ISO 14689-1) [20].
- Tab. 3-3 Pevnostní a deformační charakteristiky betonu [28].
- Tab. 4-1 Hodnoty modulu pružnosti stanovené UZ metodou a rychlost šíření UZ vln tělesem.
- Tab. 4-2 Průměrné hodnoty statických modulů pružnosti a pevností v tlaku zkoumaných hornin.

Tab. 4-3	Výsledky zkoušek modulů pružnosti a pevnost v tlaku (žula z Mrákotína).
Tab. 4-4	Průměrné hodnoty dynamických modulů pružnosti (rezonanční metoda) u některých hornin.
Tab. 4-5	Hodnoty koeficientů pro přepočítání dynamických modulů ultrazvukových κ_u a rezonančních κ_r na moduly na statické.
Tab. 4-6	Hodnoty zmenšovací koeficientů pro přepočítání dynamických modulů ultrazvukových κ_u a rezonančních κ_r na moduly na statické [44].
Tab. 4-7	Výsledky zkoušek modulů pružnosti žuly z různých lokalit.
Tab. 4-8	Výsledné hodnoty zkušebních vzorků s označením 1B a 4B.
Tab. 5-1	Vliv rozdílných modulů pružnosti na průhyb.
Tab. 6-1	Porovnání výsledných modulů pružnosti s normou ČSN 73 3251 [7], odbornou konzultací [18] a příspěvkem z konference [8].

7.4 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Fotografické přílohy.
Příloha 2	Tabulkové přílohy.

8 PŘÍLOHY

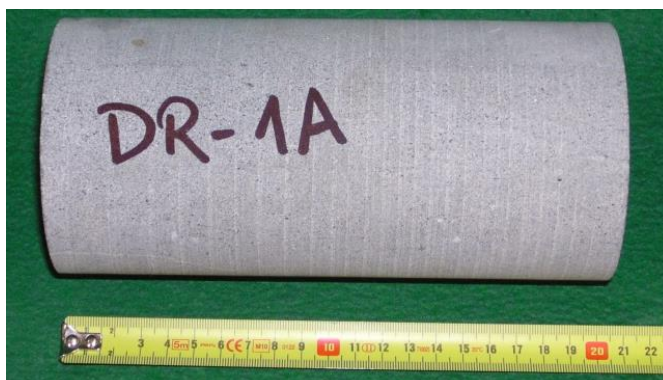
8.1 Příloha 1 – Fotografické přílohy



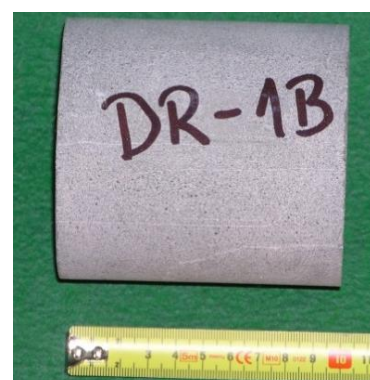
Obr. 8-1 Droba D1, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-2 Droba D2, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-3 (vlevo) Droba DR-1A, zk. těleso určené pro stanovení MP (při zkoušce došlo k podélnému prasknutí tělesa)



Obr. 8-4 (vpravo) Droba DR-1B, zk. těleso určené pro zkoušku pevnosti v tlaku



Obr. 8-5 Čedič Č1, zk. těleso určené pro stanovení MP (zjevné vady tělesa, která však pravděpodobně neměly vliv na výsledek MP)



Obr. 8-6 Čedič Č2, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-7 Čedič Č3, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-8 K. vápenec OE1, zk. těleso určené pro stanovení MP



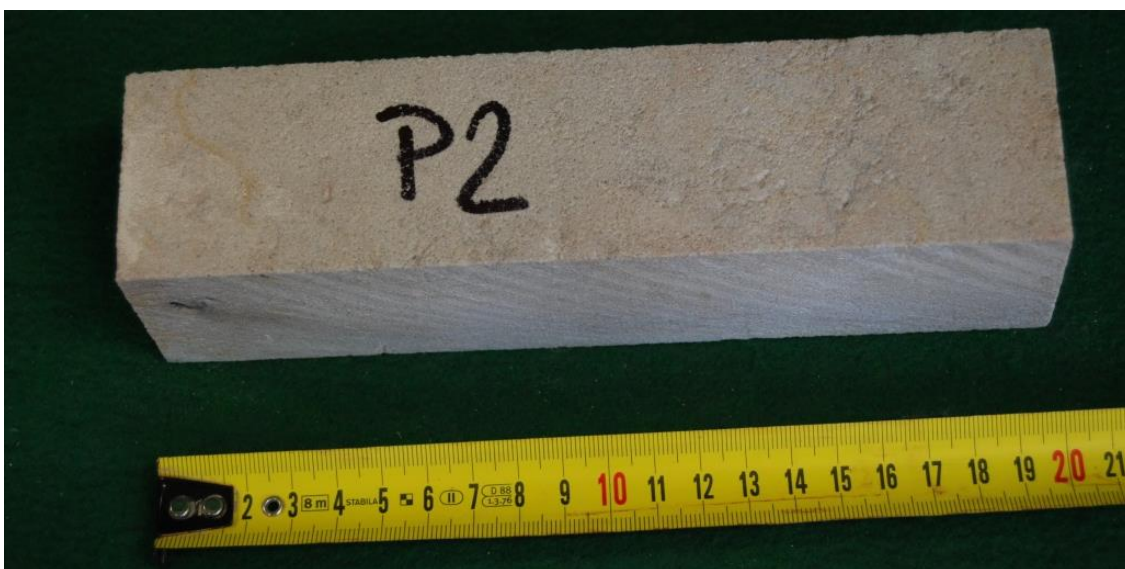
Obr. 8-9 K. vápenec OE2, zk. těleso určené pro stanovení MP



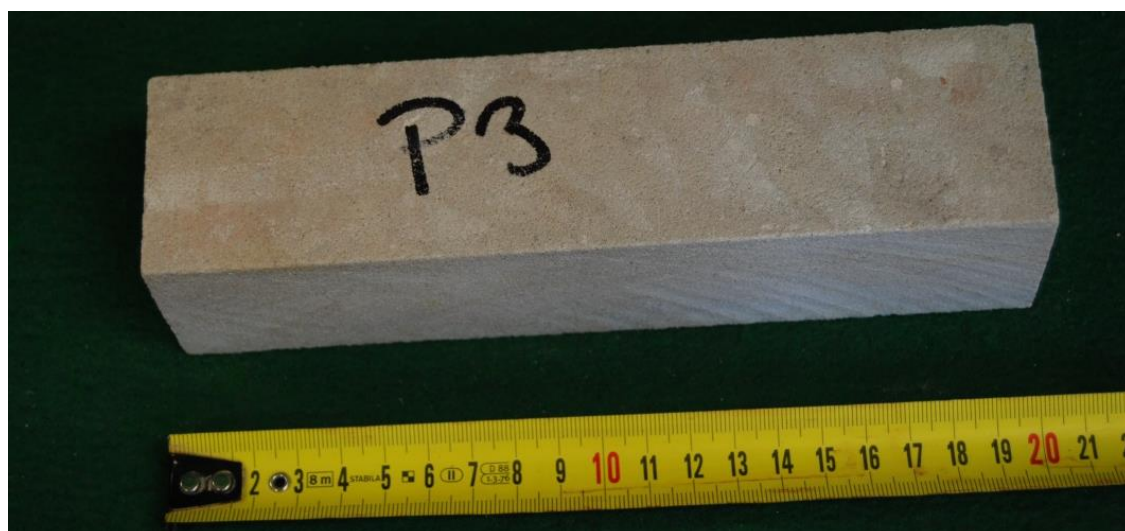
Obr. 8-10 K. vápenec OE3, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-11 Pískovec P1, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-12 Pískovec P2, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-13 Pískovec P3, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-14 (vlevo) Pískovec P4, zk. těleso určené pro zkoušku pevnosti v tlaku



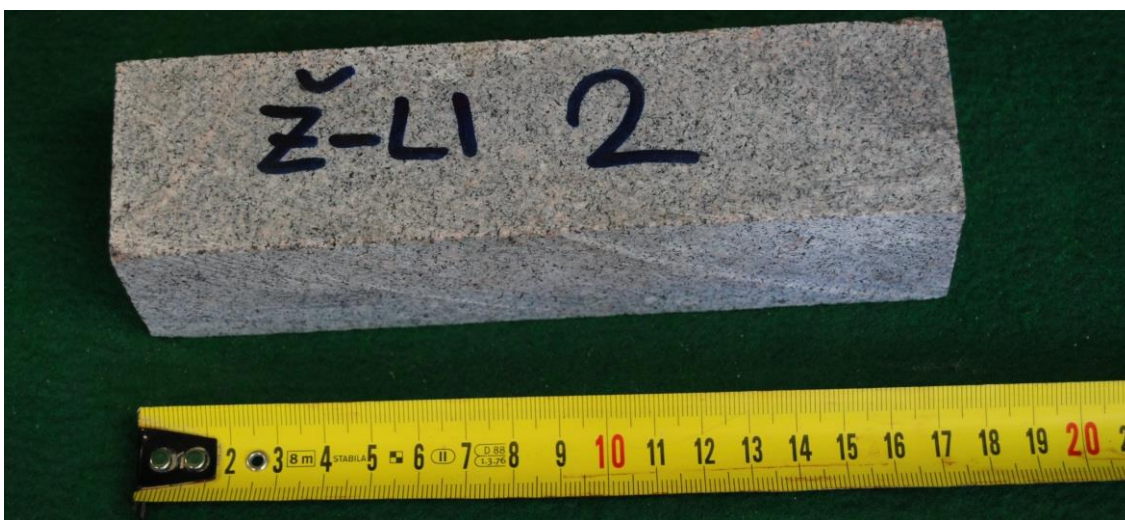
Obr. 8-15 (uprostřed) Pískovec P5, zk. těleso určené pro zkoušku pevnosti v tlaku



Obr. 8-16 (vpravo) Pískovec P6, zk. těleso určené pro zkoušku pevnosti v tlaku



Obr. 8-17 Žula (Litice) Ž-L11, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-18 Žula (Litice) Ž-L12, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-19 Žula (Litice) Ž-L13, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-20 Žula (Mrákotín) 1A, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-21 Žula (Mrákotín) 1B, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-22 (vlevo) Žula (Mrákotín) 2A, zk. těleso určené pro zkoušku pevnosti v tlaku

Obr. 8-23 (uprostřed) Žula (Mrákotín) 2A, zk. těleso určené pro zkoušku pevnosti v tlaku

Obr. 8-24 (vpravo) Žula (Mrákotín) 3A, zk. těleso určené pro zkoušku pevnosti v tlaku



Obr. 8-25 (vlevo) Žula (Mrákotín) 3B, zk. těleso určené pro zkoušku pevnosti v tlaku

Obr. 8-26 (vpravo) Žula (Mrákotín) 4A, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-27 Žula (Mrákotín) 4B, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-28 (vlevo) Žula (Mrákotín) 5A, zk. těleso určené pro zkoušku pevnosti v tlaku
 Obr. 8-29 (vpravo) Žula (Mrákotín) 5B, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-30 (vlevo) Žula (Mrákotín) 7A, zk. těleso určené pro zkoušku pevnosti v tlaku
 Obr. 8-31 (vpravo) Žula (Mrákotín) 7B, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-32 (vlevo) Žula (Mrákotín) 11A, zk. těleso určené pro zkoušku pevnosti v tlaku
 Obr. 8-33 (vpravo) Žula (Mrákotín) 11B, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-34 Žula (Mrákotín) 12, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-35 Žula (Mrákotín) 13, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-36 Žula (Mrákotín) 14B, zk. těleso určené pro stanovení MP



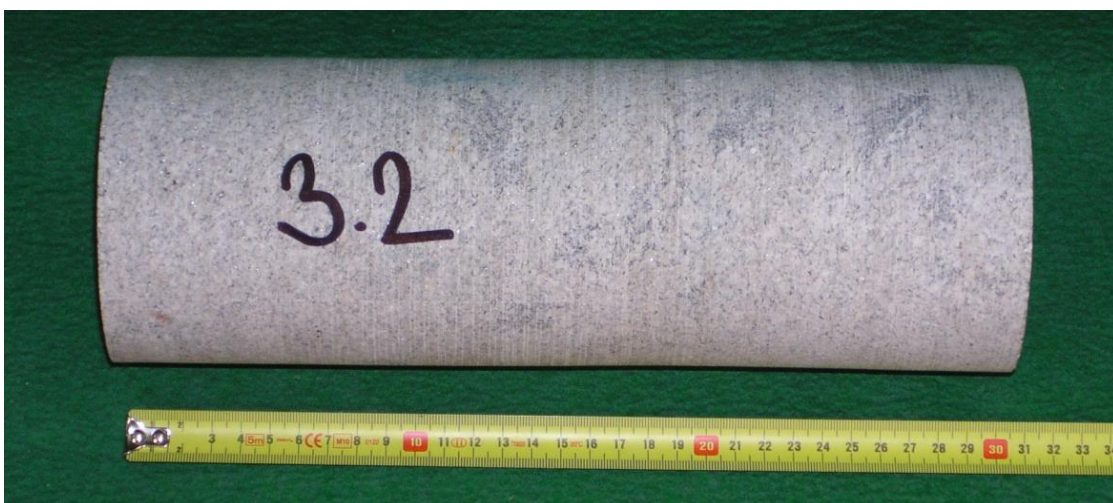
Obr. 8-37 (vlevo) Žula (Mrákotín) 14A, zk. těleso určené pro zkoušku pevnosti v tlaku

Obr. 8-38 (uprostřed) Žula (Mrákotín) 15, zk. těleso určené pro zkoušku pevnosti v tlaku

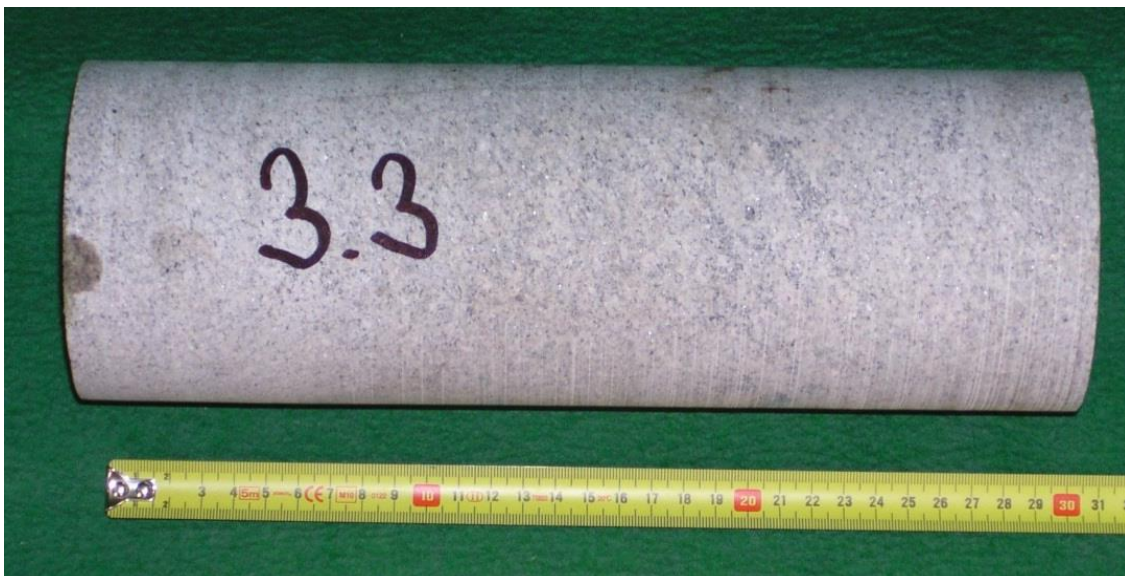
Obr. 8-39 (vpravo) Žula (Mrákotín) 17, zk. těleso určené pro zkoušku pevnosti v tlaku



Obr. 8-40 Žula (Mrákotín) 3.1B, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-41 Žula (Mrákotín) 3.2, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-42 Žula (Mrákotín) 3.3, zk. těleso určené pro stanovení MP



Obr. 8-43 Ilustrativní fotografie sady zkušebních těles ze žuly (z Mrákotína) připravených ke statické zkoušce

8.2 Příloha 2 – Tabulkové přílohy

Tab. 8-1 Naměřená a vypočítaná data (hmotnost, rozměry, zat. plocha, objem, obj. hmotnost)

druh horniny	zkušební těleso	hmotnost m [g]	průměrná délka L [mm]	průměrné hodnoty příčných rozměrů (válce: d, kvádry: a, b) [mm]	zatěžovací plocha A [m ²]	objem V [m ³]	objemová hmotnost ρ [kg/m ³]
droba	D1	989,45	201,98	48,89	0,001877	0,000379	2610
	D2	749,21	152,61	48,76	0,001867	0,000285	2629
	DR-1A	3627,78	200,55	86,68	0,005900	0,001183	3066
	DR-1B	1835,08	101,42	86,63	0,005894	0,000598	3070
čedič	Č1	1041,84	188,63	48,82	0,001872	0,000353	2951
	Č2	815,72	147,42	48,86	0,001875	0,000276	2952
	Č3	753,97	135,94	48,77	0,001868	0,000254	2970
vápenec	OE1	804,06	149,16	50,57	0,002008	0,000300	2684
	OE2	720,87	134,15	50,41	0,001995	0,000268	2693
	OE3	822,16	152,32	50,54	0,002006	0,000306	2691
pískovec	P1	1002,95	200,62	50,25	0,002525	0,000507	1980
	P2	995,70	200,98	50,26	0,002526	0,000508	1961
	P3	1010,95	200,86	50,52	0,002552	0,000513	1972
	P4	250,80	50,80	50,20	0,002518	0,000128	1960
	P5	254,07	50,82	50,36	0,002535	0,000129	1972
	P6	246,82	50,82	49,99	0,002499	0,000127	1944
žula	Ž-LI1	1117,28	173,36	49,93	0,002491	0,000432	2588
	Ž-LI2	956,98	174,61	46,21	0,002135	0,000373	2567
	Ž-LI3	1105,04	163,56	51,09	0,002610	0,000427	2589
	1A	1560,26	192,97	63,03	0,003120	0,000602	2592
	1B	1556,08	191,64	63,12	0,003129	0,000600	2595
	2A	518,30	64,89	63,53	0,003169	0,000206	2520
	2B	516,24	64,06	63,13	0,003130	0,000200	2575
	3A	524,46	64,21	63,06	0,003123	0,000201	2615
	3B	523,78	64,42	63,06	0,003123	0,000201	2604
	4A	1560,72	191,60	62,90	0,003107	0,000595	2622
	4B	1554,91	191,02	62,88	0,003105	0,000593	2622
	5A	521,31	64,39	63,04	0,003121	0,000201	2594
	5B	1567,35	191,92	63,06	0,003123	0,000599	2615
	7B	1557,51	192,70	63,00	0,003117	0,000601	2593
	7A	514,11	63,94	63,01	0,003118	0,000199	2579
	11B	996,76	163,54	54,45	0,002328	0,000381	2618
	11A	322,38	52,90	54,42	0,002326	0,000123	2620
	12	993,59	162,67	54,37	0,002321	0,000378	2631
	13	920,68	150,93	54,43	0,002326	0,000351	2622
	14B	991,40	163,16	54,27	0,002313	0,000377	2627
	14A	324,07	53,51	54,36	0,002321	0,000124	2609
	15	322,02	53,13	54,41	0,002325	0,000124	2607
	17	313,08	53,48	54,36	0,002321	0,000124	2522
3.1B	5190,42	282,89	94,70	0,007044	0,001993	2605	
3.2	6652,20	300,32	101,58	0,008103	0,002434	2733	
3.3	6632,60	301,80	103,41	0,008398	0,002534	2617	

Tab. 8-2 Naměřená a vypočítaná data (z ultrazukové zkoušky)

Druh horniny	Zkušební těleso	Doby průchodu UZ [μs]			Rychlost šíření [m/s]	Poissonův součinitel (odhad) [-]	Modul pružnosti z UZ [MPa]
		t _{L1}	t _{L2}	t _{L3}	v	ν	E _{cu}
droba	D1	46,2	45,7	46,3	4384	0,22	47700
	D2	33,9	33,8	33,7	4515	0,22	51000
	DR-1A	49,5	49,7	50,0	4032	0,22	43700
	DR-1B	24,3	24,9	24,4	4134	0,22	46000
čedič	Č1	37,1	37,2	37,3	5071	0,15	74200
	Č2	26,9	26,2	26,4	5563	0,15	89300
	Č3	27,5	27,7	27,3	4943	0,15	70900
vápenec	OE1	28,4	28,3	28,6	5246	0,20	70900
	OE2	24,3	24,2	24,4	5520	0,20	78800
	OE3	28,8	28,6	28,9	5295	0,20	72400
pískovec	P1	69	69,2	69,1	2903	0,25	13900
	P2	71,1	71,5	71,2	2820	0,25	13000
	P3	67,5	67,5	67,4	2977	0,25	14600
	P4	17,1	16,8	16,8	3006	0,25	14800
	P5	16,6	16,7	16,7	3049	0,25	15300
	P6	17	17	17,1	2983	0,25	14400
žula	Ž-LI1	34,3	34,3	33,9	5074	0,18	66600
	Ž-LI2	34,5	34,6	34,7	5046	0,18	65400
	Ž-LI3	32,9	32,8	32,7	4986	0,18	64400
	1A	66,4	66,2	66,5	2908	0,18	20200
	1B	60,8	60,8	61,1	3147	0,18	23700
	2A	23,6	23,5	23,4	2761	0,18	17700
	2B	25,5	25,8	25,4	2505	0,18	14900
	3A	17,7	17,7	17,6	3634	0,18	31800
	3B	19	19	19	3390	0,18	27600
	4A	58,1	58,3	57,9	3298	0,18	26300
	4B	56,7	56,8	56,6	3369	0,18	27400
	5A	20,4	20,4	20,5	3151	0,18	23700
	5B	57,7	57,8	57,5	3328	0,18	26700
	7B	62,8	62,8	62,9	3067	0,18	22500
	7A	21,2	21,2	21,4	3006	0,18	21500
	11B	45,9	46,3	46	3550	0,18	30400
	11A	14,8	14,5	14,7	3606	0,18	31400
	12	44,9	45,1	45,2	3610	0,18	31600
	13	49,7	49,8	49,6	3037	0,18	22300
	14B	49,8	50,2	49,7	3270	0,18	25900
	14A	15,2	15,3	15,2	3512	0,18	29600
	15	14,4	14,1	14,2	3732	0,18	33400
	17	36,2	36,2	36,1	1479	0,18	5100
3.1B	60,8	59,9	60,1	4694	0,18	52900	
3.2	85,4	85,7	85,6	3510	0,18	31000	
3.3	86,8	86,9	86,7	3477	0,18	29100	

Tab. 8-3 Naměřená a vypočítaná data (z rezonanční zkoušky)

Zkušební těleso	Naměřené kmitočty [Hz]			Modul pružnosti [MPa]		
	podélný f_L	příčný f_f	krouživý f_t	E_{crL}	E_{crf}	G_{cr}
DR-1A	9908	5925	6603	48400	56000	21500
p1	6582	2949	4214	13800	15100	6700
p2	6661	2914	4239	14100	14600	6700
p3	6822	2984	4341	14800	15300	7100
ž-li1	14 240	6 814	8 366	63100	63800	25800
ž-li2	13847	6188	8712	60000	59500	28100
ž-li3	14958	7593	8862	62000	63500	25700
1a	6568	3052	4362	16700	16200	7300
1b	7025	3319	4694	18800	18700	8400
4A	7993	3926	5527	24600	26600	11800
4b	8010	3956	5565	24500	26700	11800
5B	7949	3878	5521	24300	25900	11700
7B	7057	3433	4680	19200	20500	8400
11B	9491	x	x	25200	x	x
12	9673	x	x	26100	x	x
13	9081	x	x	19700	x	x
14B	9328	x	x	24300	x	x
3.1B	7869	3821	5199	51600	53200	22500
3.2	5582	2738	3828	30700	31800	14500
3.3	5612	2750	3878	30000	30500	14300

Tab. 8-4 Naměřená a vypočítaná data (ze statické zkoušky)

druh horniny	zkušební těleso	síla F_{max} [kN]	pevnost v tlaku f_c [MPa]	délka měřící základny l_0 [mm]	zatěžovací meze [kN]		statický modul pružnosti E_b [GPa]
					$F_{dolní}$	$F_{horní}$	
droba	D1	x	x	100	6	90	35,2
	D2	x	x	70	6	90	37,1
	DR-1A	x	x	100	20	330	*)
	DR-1B	1029,4	174,7	x	x	x	x
čedič	Č1	x	x	90	10	170	82,0
	Č2	x	x	70	10	170	85,0
	Č3	x	x	60	10	170	77,9
vápenec	OE1	x	x	70	4	60	54,6
	OE2	x	x	60	4	60	62,5
	OE3	x	x	70	4	60	60,5
pískovec	P1	72	28,5	100	3	35	14,9
	P2	67,3	26,6	100	3	35	15,1
	P3	93,2	36,5	100	3	35	16,3
	P4	119,5	47,4	x	x	x	x
	P5	130,2	51,4	x	x	x	x
	P6	125,4	50,2	x	x	x	x
žula	Ž-LI1	x	x	80	9	150	62,1
	Ž-LI2	x	x	80	8	130	58,7
	Ž-LI3	x	x	80	9	150	61,4
	1A	333,6	106,9	100	7	115	22,7
	1B	348,6	111,4	100	7	115	23,7
	2A	367,5	116,0	x	x	x	x
	2B	312,3	99,8	x	x	x	x
	3A	512,9	164,2	x	x	x	x
	3B	518,9	166,2	x	x	x	x
	4A	435,3	140,1	100	9	140	30,8
	4B	482,2	155,3	100	9	140	32,0
	5A	465,7	149,2	x	x	x	x
	5B	483,7	154,9	100	9	140	30,1
	7B	359,6	115,4	100	7	115	23,4
	7A	427,1	137,0	x	x	x	x
	11B	316,1	135,8	70	7	105	29,5
	11A	368,8	158,6	x	x	x	x
	12	293,7	126,5	70	7	105	28,9
	13	335,1	144,0	70	6	90	27,4
	14B	279	120,6	70	7	105	30,2
	14A	351,3	151,4	x	x	x	x
	15	296,6	127,6	x	x	x	x
	17	206,4	88,9	x	x	x	x
3.1B	x	x	140	24	400	54,8	
3.2	x	x	150	23	375	36,7	
3.3	x	x	150	22	360	36,6	

Poznámka: *) Při zkoušce došlo k podélnému prasknutí zkušebního tělesa