



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA RADIOTECHNIKY

Akustika nových typů výukových prostor

Acoustics of new types of learning spaces

Bakalářská práce

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika
Studijní obor: Multimediální technika

Vedoucí práce: Ing. Vojtěch Jandák, Ph.D.

Michal Macko
Praha 2018



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Macko** Jméno: **Michal** Osobní číslo: **457104**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Multimediální technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Akustika nových typů výukových prostorů

Název bakalářské práce anglicky:

Acoustics of New Types of Learning Spaces

Pokyny pro vypracování:

Provedte rešerši současného stavu problematiky prostorové akustiky výukových prostorů se zaměřením na základní školy. Navrhněte metodiku hodnocení akustických vlastností nových typů výukových prostorů. Na základě navržené metodiky realizujte a vyhodnoťte měření ve vybraných prostorech základní školy.

Seznam doporučené literatury:

- [1] PÄÄKKÖNEN, Rauno, Tommi VEHVILÄINEN, Jaana JOKITULPPO, Olli NIEMI, Suvi NENONEN and Juha VINHA. Acoustics and new learning environment - A case study. Applied Acoustics. 2015, 2015(100), 74-78.
- [2] KUTTRUFF, Heinrich: Room Acoustics.
- [3] ČSN EN ISO 3382-3, Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky, Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 3: Otevřené kanceláře.
- [4] ČSN EN ISO 3382-1, Akustika - Měření parametrů prostorové akustiky - Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vojtěch Jandák, Ph.D., katedra fyziky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **05.02.2018**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2019**

Ing. Vojtěch Jandák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

_____ podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

_____ Datum převzetí zadání

_____ Podpis studenta

Prohlášení autora

„Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze, 21.5.2018

Podpis autora práce

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Vojtěchu Jandákovi, Ph.D., za odborné vedení práce, věcné rady, vstřícnost, trpělivost a pomoc při jejím zpracování

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce pojednává o problematice výukových prostor z hlediska jejich akustických vlastností, zejména pak z celkové doby dozvuku a srozumitelnosti. V první části se práce zabývá rešerší týkající se těchto nových výukových prostor a kritérií jenž určují akustické vlastnosti daného prostoru, které se musí přizpůsobit vznikajícímu trendu ve školství v podobě interaktivní skupinové výuky. Druhou a třetí část pak tvoří návrh, realizace a vyhodnocení měření doby dozvuku a srozumitelnosti ve třídách fakultní základní školy při ČVUT.

KLÍČOVÁ SLOVA

nové typy výukových prostorů, prostorová akustika, doba dozvuku, srozumitelnost

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the issue of the teaching spaces from an acoustic point of view especially from the reverberation time and intelligibility. In the first part the thesis deals with the research on these new learning spaces and the criteria that determine the acoustic properties of this space, which must adapt to the emerging trend in education in the form of interactive group teaching. The second and third part of the thesis create design, realization and evaluation of the reverberation time and intelligibility in the classes of elementary school belonging to CTU.

KEYWORDS

New types of learning spaces, room acoustics, reverberation time, intelligibility

Obsah

ÚVOD	1
1. SOUČASNÝ STAV	3
1.1. NOVÉ TYPY VÝUKOVÝCH PROSTOR	3
1.2. REŠERŠE OBJEKTIVNÍCH AKUSTICKÝCH PARAMETRŮ PROSTORU	5
1.2.1. Hluk pozadí	6
1.2.2. Objem a tvar prostoru	7
1.2.3. Doba dozvuku	9
1.2.4. Srozumitelnost řeči	12
2. NÁVRH METODIKY MĚŘENÍ	14
2.1. MĚŘENÍ IMPULZOVÉ ODEZVY	14
2.1.1. TSP (Time Stretched Pulse)	15
2.2. MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU	15
2.2.1. Přístrojové vybavení	16
2.2.2. Místa měření	17
2.2.3. Metoda integrované impulzové odezvy	18
2.2.4. Vyhodnocení křivek poklesu	19
2.2.5. Prostorové průměrování	19
2.3. MĚŘENÍ SROZUMITELNOSTI ŘEČI	19
3. OVĚŘENÍ METODIKY MĚŘENÍ NA KONKRÉTNÍCH PROSTORECH	22
3.1. MĚŘENÉ PROSTORY	22
3.2. MĚŘICÍ APARATURA	28
3.3. POSTUP MĚŘENÍ	29
3.4. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ DOBY DOZVUKU	29
3.4.1. Doba dozvuku v jednotlivých neobsazených třídách	30
3.4.2. Vliv obsazenosti učebny na dobu dozvuku	32
3.4.3. Vliv rozmístění žaluzií na dobu dozvuku	33
3.4.4. Vliv typu a umístění zdroje zvuku na dobu dozvuku	36
3.4.5. Odchylka naměřených hodnot doby dozvuku	38
3.4.6. Porovnání naměřených výsledků s požadavky norem	39
3.5. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ SROZUMITELNOSTI ŘEČI	40
3.5.1. POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH VÝSLEDKŮ S POŽADAVKY NORMY	42
ZÁVĚR	43
ZDROJE	44
SEZNAM TABULEK	45
SEZNAM OBRÁZKŮ	45
SEZNAM GRAFŮ	46

Úvod

Na prostory využívané pro výuku je kladeno mnoho požadavků, jejichž splnění je velmi důležité pro kvalitu výuky. Primárně by tyto prostory měly svými vlastnostmi podporovat proces učení. Tím hlavním požadavkem je, aby nám v takovém prostoru bylo příjemně, aby nás nic nerozptylovalo a my se tak mohli plně soustředit. Kritérii, kterými se při hodnocení učebny zabýváme je mnoho, avšak můžeme je rozdělit do tří hlavních kategorií. První kategorií jsou světelné podmínky, kdy je potřeba zajistit správnou intenzitu a barvu osvětlení. Druhou kategorií jsou akustické vlastnosti, kde je kladen důraz především na dobu dozvuku a z ní vycházející srozumitelnost řeči a třetí kategorií je kvalita ovzduší, kde je potřeba zajistit ideální teplotu a cirkulaci vzduchu ve třídě. Naneštěstí jsou tyto kategorie spolu úzce spjaty a navzájem se ovlivňují. Jako příklad můžeme uvést postavení třídy s mnoha okny, což přispěje ke zlepšení světelných podmínek, ale na druhou stranu nám v létě v učebně vzroste teplota. Vybavíme ji tedy klimatizací, která sice udrží požadovanou teplotu, ale naopak zvýší hladinu hluku, který se nám negativně projeví na srozumitelnosti řeči. Z toho plyne, že projektování prostor určených pro výuku je především o kompromisu. Všechna tato kritéria by však měla být na takové úrovni, aby na žáka, učitele, či na kteroukoliv jinou osobu nacházející se ve třídě působila pozitivně ve smyslu jeho psychické pohody, podporovala jeho soustředění a aby podmínky v daném prostoru ani při opakovaném a dlouhodobém pobytu nezpůsobovali jakékoliv zdravotní komplikace.

K této, již nyní značně rozsáhlé problematice akustiky výukových prostorů, se navíc v dnešní době přidává komplikace v podobě nově vznikajících metod výuky, které v sobě zahrnují především větší míru interakce mezi žáky a vyučujícím, využívání multimediální techniky a práci ve skupinách. Na výukové prostory jsou tak kladeny další náročné požadavky jak z hlediska stavebních úprav, tak i z hlediska akustických vlastností. Navíc je potřeba zajistit i variabilitu všech úprav, neboť se předpokládá, že učebna bude používána více způsoby a je nutné zajistit, aby akustické vlastnosti prostoru, v němž výuka probíhá, splňovaly všechny požadavky, jenž na ně dané konkrétní využití klade.

Problematice nových typů výukových prostor se v současné době věnuje pozornost v řadě zemí na celém světě. Mezi hlavní charakteristiky tohoto současného trendu patří, že výukový prostor sestává ze dvou více či méně oddělených místností. První místnost se vnitřním uspořádáním blíží klasické třídě (lavice, tabule), zatímco místnost druhá nabízí většinou několik účelově odlišných zón pro skupinovou výuku. Specifika takovýchto prostorů jsou blíže popsána například v publikacích [1] a [2]. Zatímco první místnost je z akustického hlediska klasická

učebna, druhá místnost má z hlediska akustických požadavků blíže k tzv. otevřeným kancelářím.

Tato práce se konkrétněji zaměřuje na oblast prostorové akustiky a není zde tak řešena například problematika neprůzvučnosti, která spadá do oblasti stavební akustiky. Z oboru prostorové akustiky se pak práce zaměřuje hlavně na učební prostory, nikoliv už tak na tělocvičny, chodby a šatny, i když je vliv akustiky těchto prostor na vzdělávací proces dětí také předmětem mnoha výzkumů.

Cílem práce je provést rešerši současného stavu problematiky prostorové akustiky nových výukových prostorů a na základě této rešerše navrhnout metodiku měření. Záměrem praktické části práce je potom aplikovat navrženou metodiku na učební prostory, ve kterých se učí podle současných trendů, ale které k tomu nejsou stavebně plně přizpůsobeny.

Práce je rozdělena do pěti kapitol. Ve druhé kapitole práce, která navazuje na tento úvod, jsou popsány typické příklady nové generace výukových prostorů a shrnuty objektivní akustické parametry a jejich doporučené hodnoty, které se pro hodnocení takovýchto učebních prostorů využívají. Ve třetí kapitole je navržena metodika pro měření a hodnocení těchto prostor a v kapitole čtvrté je pak tato metodika aplikována na konkrétní učební prostory. Pátou kapitolu poté tvoří závěr s celkovým zhodnocením práce.

1. Současný stav

1.1. Nové typy výukových prostor

Žijeme v době neustálých změn a překotného pokroku. Z důvodu technologických inovací se neustále mění požadavky, které jsou na lidi v jejich zaměstnáních kladeny. Zaměstnavatelé od svých zaměstnanců očekávají spolupráci a kooperaci se svými kolegy, dobré znalosti moderních technologií a schopnost intuitivně řešit nově vzniklé neočekávané problémy. Stejně tak jako se vyvíjí dnešní pracovní trh, vyvíjí se i školství, které musí mladé lidi dostatečně připravit na jejich budoucí pracovní nasazení.

Výuka na školách proto prochází značnými změnami. Učitelé a žáci v mnohem větší míře využívají při výuce moderní technologie. Tabuli a křidu nyní doplňují a v budoucnu možná zcela nahradí projektory a interaktivní tabule. I tablety a notebooky nachází ve škole čím dál tím větší uplatnění. Mnohem více se také ve školách využívá kolektivní práce ve skupinkách, či diskuzí mezi žáky ve třídě. Frontální systém výuky, kdy vyučující stojí před celou třídou a vykládá probíranou látku, tak pomalu přechází do ústraní. S tím, jak se mění styl výuky, a tudíž i způsob využívání výukových prostor by se i tyto prostory měly měnit a přizpůsobovat novým požadavkům, které jsou na ně kladeny.

Příkladem učebních prostorů nové generace je Future Classroom Lab (FCL) [1], která byla postavena roku 2012 v Bruselu. Tyto prostory, které jsou zobrazeny na obrázku 1, byly vytvořeny za účelem dalšího výzkumu této problematiky a také jako inspirace pro mnoho dalších učeben po celém světě. V dnešní době je ve světě trendem rozdělovat učební prostory do více místností a v případě FCL tomu není jinak. První místnost je určena pro frontální styl výuky, který je i v dnešním školství stále důležitým nástrojem. V této místnosti nalezneme uspořádání vnitřního vybavení víceméně totožné s tím, jak ho známe z klasických tříd. Přední stěně dominuje tabule někde případně doplněná či zcela nahrazená promítací plochou. Před tabulí je prostor vyhrazený pro vyučujícího, který zde má možnost přednášet žákům probíranou látku. Žáci pak sedí v lavicích uspořádaných do řad. Jednotlivé lavice je možné v řadě oddělit uličkou, či je nechat spojené do jedné dlouhé řady. Více možností uspořádání nabízejí lavice ve tvaru rovnoramenných lichoběžníků. Druhá místnost, ze které se dnešní nové výukové prostory skládají, slouží především k novému interaktivnímu stylu výuky. Tato místnost je typicky rozdělena do několika zón určených a vybavených pro jednotlivé konkrétní aktivity.

Future Classroom Lab se přesně drží více popsaného schématu rozdělení prostoru na jednotlivé místnosti. Vlevo na obrázku 1 je umístěná místnost, označená jako „interact“. Tato místnost je určena pro klasický frontální styl výuky. Je zde vidět důraz kladený na zachování tradičního rozmístění vnitřního vybavení. Tato místnost je pak stavebně příčkou oddělena od druhé místnosti určené pro nové styly výuky. Druhá místnost je pomyslně rozdělena do 5 zón. Každá zóna je vytvořena speciálně pro určitý druh činnosti, který má pomoci rozvíjet různé aspekty intelektu dítěte.

S víceméně podobným návrhem učebních prostor je pak uvažováno i v případě finské studie [2]. Zde je však vidět drobná odlišnost od FCL a to v tom, že krom společných prostor určených k odpočinku a k hromadnějším akcím, jsou jednotlivé místnosti či spíše učebny navzájem stavebně odděleny. Každou z nich pak lze s jistým kompromisem rozdělit do zón zmiňovaných u FCL. Celková myšlenka ale zůstává nezměněna a je zde vidět nový, rychle se prosazující trend v projektování prostor určených pro výuku.



Obrázek 1- Model Future Classroom Lab (přavzato z [1])



Obrázek 2 - Finský model nových výukových prostor (přavzato z [2])

1.2. Rešerše objektivních akustických parametrů prostoru

Z akustického hlediska lze novou generaci učebních prostorů popsat jako dva prostory – tradiční třídu a otevřený učební prostor (open plan). Pokud nejsou stavebně oddělené, ale propojené, jedná se o akusticky vázané prostory. Jak při samotném projektování nově vznikající učebny, tak případně i při její pozdější akustické úpravě je žádoucí vycházet z příslušných státních technických norem, ve kterých jsou základní kritéria specifikována. V případě České republiky se konkrétně jedná o normu ČSN 73 0527 – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory pro kulturní účely – Prostory ve školách – Prostory pro veřejné účely [3] a vzhledem k tomu, že z části jsou prostory nové generace definovány jako otevřený prostor – normu ČSN EN ISO 3382-3: Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 3: Otevřené kanceláře [4]. Základním kritériem, které je specifikováno ve všech dokumentech týkajících se akustiky učeben je doba dozvuku. Není to však jediné kritérium, které je v rámci projektování, měření a následném upravování místnosti zohledňováno. Jako další velice důležité parametry ovlivňující celkovou kvalitu akustiky v daném prostoru se jeví především srozumitelnost a hluk pozadí. Tato kritéria jsou dále v práci více popsána.

Neméně důležitá jsou i stavební kritéria, např. neprůzvučnost, objem a tvar prostoru. Tyto vlastnosti, pokud nemáme možnost prostor od začátku projektovat, je ve většině případů velice těžké, či zcela nemožné upravovat.

Text následující kapitoly vychází z parametrů a kritérií uvedených v normě [3], které se snaží porovnat a doplnit o parametry získané v rámci rešerše přístupů v zahraničí. V rešerši jsme se zaměřili především na literaturu týkající se učebních prostorů ve Finsku [2], neboť Finové patří v evropském i světovém měřítku již dlouho dobu mezi leadery v oblasti školství. Problematika nové generace učebních prostorů je hodně diskutována také v rámci australského vzdělávacího systému [5] a v neposlední řadě k významným změnám došlo v rámci revize normy [6] v Německu.

1.2.1. Hluk pozadí

Prvním kritériem je ochrana proti hluku. Na tento požadavek je potřeba myslet již při samotném navrhování, či před předpokládanou rekonstrukcí místnosti, určené pro výuku, potažmo celého objektu (školy), neboť se zde posuzuje již samotné umístění tohoto objektu a celá jeho zvuková izolace od okolí. Jak již bylo výše zmíněno na toto kritérium je potřeba myslet především v samotném začátku projektování učeben. Navíc je velmi úzce spojeno se stavební akustikou a v této práci se jím nebudeme dále zabývat. Tato problematika ochrany proti hluku je řešena v normě – ČSN 73 0532. V případě opatření proti vnitřnímu hluku v objektu pak se jedná o normu ČSN 73 0525.

Hluk pozadí nepříznivě ovlivňuje poslechové podmínky a srozumitelnost řeči, což se týká jak hluku pronikajícího do dané místnosti od zdrojů uvnitř budovy (například od vzduchotechnického zařízení), tak hluku z venkovního prostoru (například z dopravy). V České republice jsou hygienické limity hluku ve vnitřním chráněném prostoru staveb stanoveny v Nařízení vlády č. 272/2011 Sb. – Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací [7]. Dále pak česká norma [3] definuje konkrétní hodnoty ekvivalentní hladiny akustického tlaku A pozadí pro jednotlivé typy prostor. Nejpodobnější s naším typem učebny se jeví prostory normou nazvané jako přednáškové síně. Pro ně je doporučená hodnota L_{pAeq} 30 až 35 dB [3]. Pokud toto doporučení naší normy porovnáme s normou finskou, která udává hodnotu $L_{pAeq} = 28$ dB pro třídy typu A a B a $L_{pAeq} = 33$ dB pro třídu typu C¹ [2], dojdeme k závěru, že naše norma je v tomto ohledu benevolentnější,

¹ Jedním z rozdílů mezi Českou a Finskou normou je rozdělení učebních prostor do několika kvalitativních skupin. Na rozdíl od české normy, která uvažuje pouze jeden typ učebny z hlediska kvalitativních požadavků, finská norma rozlišuje učebny na

nicméně rozdíl není nikterak výrazný. Pro lepší představu o řešení dané problematiky si zde můžeme prezentovat doporučené hodnoty Australské studie *New generation learning environments* [5], ve které je uvedena hodnota ekvivalentní hladiny akustického tlaku A pozadí $L_{pAeq} = 30$ dB. Jak je tedy zřejmé, i hodnoty jinde ve světě korelují se standardem doporučovaným v České republice.

Nejvyšší přípustné hodnoty hluku pozadí se vztahují k míře jeho rušivosti pro daný účel využívání prostoru. Rušivost hluku při přednesu řeči vždy závisí na druhu a délce trvání hluku, nárocích na kvalitu a dalších okolnostech, proto lze optimální hodnotu doporučit pouze orientačně. V otevřených kancelářích je např. určitý hluk pozadí žádoucí, neboť přispívá ke kvalitě soukromí. Toho by se pak mohlo využít i v učebnách při samostatných pracích ve skupinách, kde by určitý hluk pozadí eliminoval rušení jedné skupiny prací skupiny druhé.

1.2.2. Objem a tvar prostoru

Dalším podstatným parametrem prostorů určených pro výuku je jejich objem. Tento parametr je víceméně neměnný a je dán stavebními dispozicemi místnosti. Objem projektovaných uzavřených prostorů závisí na provozních, hygienických a akustických požadavcích. Z hlediska akustiky je objem určen účelem daného prostoru a počtem osob v něm se nacházejících. Zde již norma specifikuje požadovaný objem pro jednotlivé typy výukových prostor. Hodnoty jsou pro přehlednost uvedeny v tabulce 1.

typy A, B a C. S tím, že A je označením pro nejvyšší kvalitativní stupeň, vhodným například pro výuku žáků se sluchovým, či jiným postižením

prostor	objem [m³] (orientačně)
Učebna a posluchárna	do 250
Posluchárna	přes 250
Jazyková učebna (laboratoř)	130 až 180
Audiovizuální učebna	200
Učebna hudební výchovy	200
Učebna hudební výchovy při reprodukované hudbě	200
Učebna hry na individuální nástroje a sólového zpěvu	80 až 120
Učebna orchestrální hry hudebních škol	-
Tělocvična a plavecká hala všech typů škol	-
Sborovna nebo konferenční místnost	-
učebna pracovní výuky	-
Učebna gymnastiky a tance	-
Místnost pro hry v mateřských školách a školních družinách	130 až 200
Denní místnost jeslí	-
Školní jídelna, menza	-

Tabulka 1 - Doporučené objemy prostor (převzato z [3])

V tabulce 1 je uvedeno, že učebny a posluchárny by měly mít objem do 250 m³. Pokud bychom údaj o požadovaném objemu chtěli zpřesnit, mohli bychom s jistým zjednodušením využít požadavek na objem přednáškového sálu určeného pro kulturní účely. Pro tento typ prostoru norma doporučuje objem vztáhnout k objemu na jednoho posluchače, který víceméně koresponduje s minimální plochou na jednoho žáka specifikovanou ve vyhlášce č. 410/2005 [8]. Konkrétní doporučená hodnota pro přednáškový sál je 4 až 5 m³ na jednu osobu. Pokud budeme uvažovat typickou obsazenost učebny okolo 25 žáků a 1 vyučujícího dojdeme k doporučené minimální hodnotě objemu učebny přibližně 130 m³.

Tvar prostoru je dalším parametrem uvedeným v české státní normě. Stejně jako objem místnosti je i její tvar hlavně otázkou stavebních dispozic a důraz by na něj měl být kladen již při samotném projektování učebny. Námí podrobněji zkoumaná norma nás odkazuje na další normu ČSN 73 0525, která se této problematice věnuje. Nicméně alespoň pro základní orientaci uvedme, že vhodným tvarem prostoru pro školní účely, jenž je upřednostňován napříč normami a doporučeními po celém světě, je pravoúhlý rovnoběžnostěn. Doporučený tvar a objem

prostoru stanovený přímo pro učebny nové generace vycházející z principů otevřených kanceláří není definován.

1.2.3. Doba dozvuku

Doba dozvuku je základním parametrem při hodnocení akustických vlastností prostoru. Doporučené doby dozvuku pro jednotlivé typy prostorů jsou shrnuty v normě ČSN 73 0527 [3] a jsou uvedené v tabulce 2.

prostor	doba dozvuku T_0 [s]
Učebna a posluchárna	0,7
Posluchárna	specifikováno dle objemu
Jazyková učebna (laboratoř)	0,45
Audiovizuální učebna	0,6
Učebna hudební výchovy	0,9
Učebna hudební výchovy při reprodukováné hudbě	0,5
Učebna hry na individuální nástroje a sólového zpěvu	0,7

Tabulka 2 - Doporučené doby dozvuku (převzato z [3])

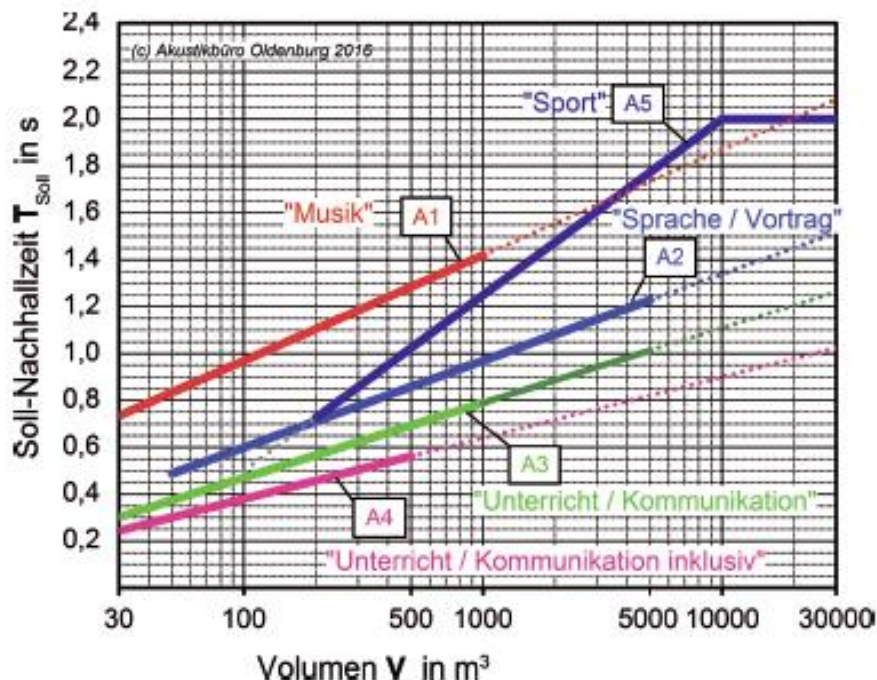
Pokud se konkrétněji zaměříme na učebny a posluchárny, tudíž na první řádek naší tabulky, zjistíme, že doporučená hodnota doby dozvuku pro tyto prostory je 0,7 s. Tuto hodnotu se opět nabízí porovnat s doporučovanými hodnotami v ostatních zemích. Jak již bylo zmíněno, finská norma rozlišuje tři kvalitativní typy výukových prostor, kdy pro třídy typu A a B je doporučovaná doba dozvuku v rozmezí 0,5 až 0,6 s a pro typ C pak 0,6 až 0,8 s. Australská studie je pak na hodnotu doby dozvuku ještě přísnější, když v ní doporučované hodnoty jsou v rozmezí od 0,4 do 0,5 s. Z tohoto porovnání tak vychází, že učebna projektovaná podle české normy by australským požadavkům nevyhověla a dle finské normy by byla zařazena pouze do poslední kvalitativní třídy C.

prostor	ČSN 73 0527	SFS 5907	Australská studie	DIN 18041
doporučená doba dozvuku T_0 [s]	0,7	0,5 – 0,6 (A, B) 0,6 – 0,8 (C)	0,4 – 0,5	0,4 – 0,5

Tabulka 3 - Porovnání doporučených hodnot doby dozvuku mezi normami

Je však dobré si všimnout, že jak finská norma, tak australská studie specifikuje pouze jeden interval hodnot doporučené doby dozvuku, který je vztažen k referenčnímu objemu místnosti a

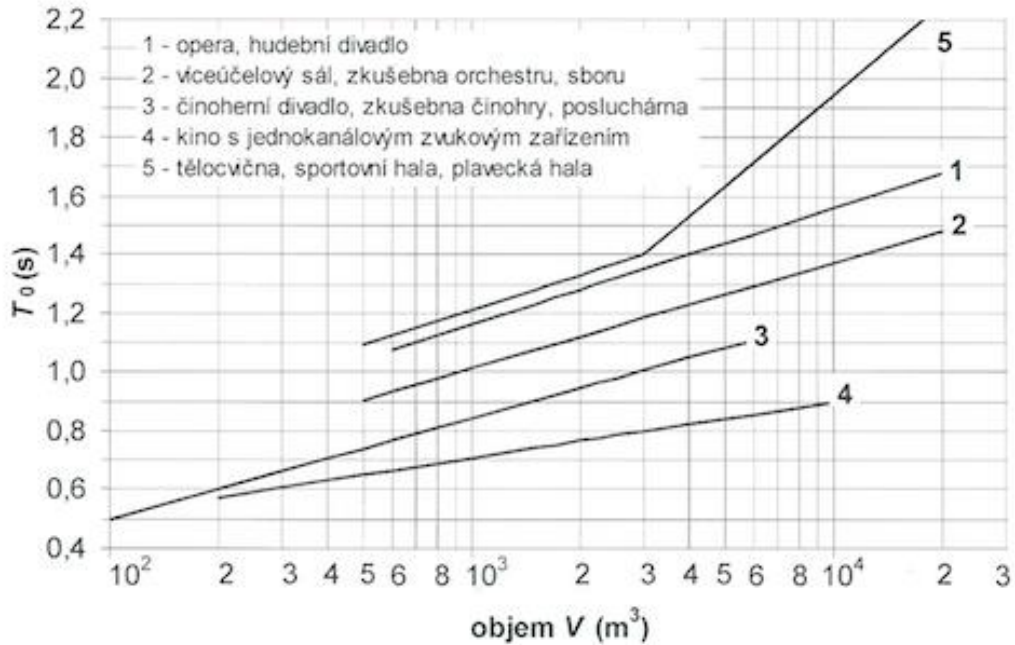
neuvažuje se zde tak změna doporučených hodnot v závislosti na různých objemech učeben. Toto zpřesnění však nalezneme například v normě německé [6], ve které jsou doporučené hodnoty doby dozvuku vyjádřené v následujícím grafu 1.



Graf 1 - Doporučené doby dozvuku v závislosti na objemu - Německo (převzato z [6])

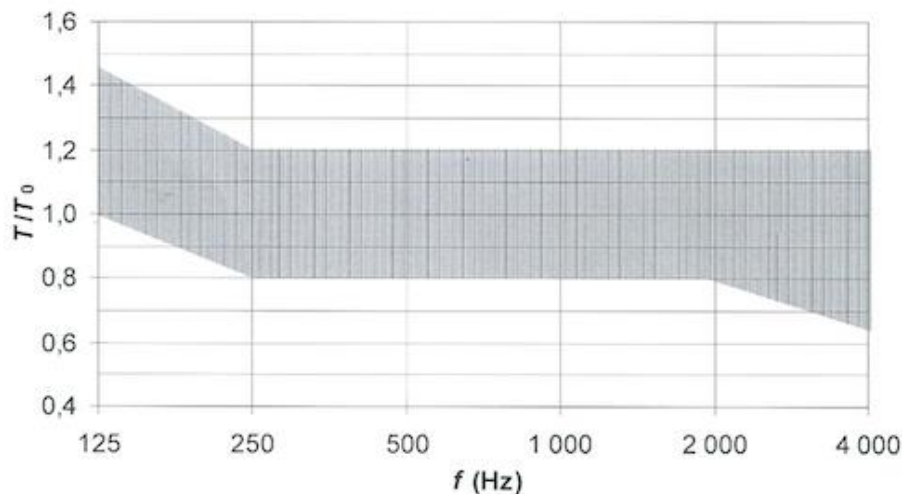
Na tomto grafu se této práci týká nejvíce zelená křivka označená jako A3, která udává, jak by doporučená hodnota doby dozvuku měla růst společně s objemem místnosti. Pokud se zaměříme na objem přibližně 200 m³ dojdeme k hodnotě 0,55 s, což odpovídá hodnotám doporučovaným pro učebny třídy A ve finském dokumentu [2].

V české normě [3] není doporučená hodnota doby dozvuku vztahena k objemu pro učebny, ale pouze pro posluchárny. Menší posluchárny mají blízko k učebnám určených pro frontální styl výuky a tak tyto hodnoty můžeme využít. Doporučená doba dozvuku pro posluchárny v závislosti na objemu místnosti je uvedena na obrázku 4. Pro objem posluchárny 200 m³ je doporučená hodnota doby dozvuku 0,6 s. Tato hodnota se sice liší od doporučené hodnoty pro učebny, nicméně více odpovídá hodnotám doporučovaných v zahraničních normách.



Graf 2 - Doporučené doby dozvuku v závislosti na objemu – ČR (převzato z [3])

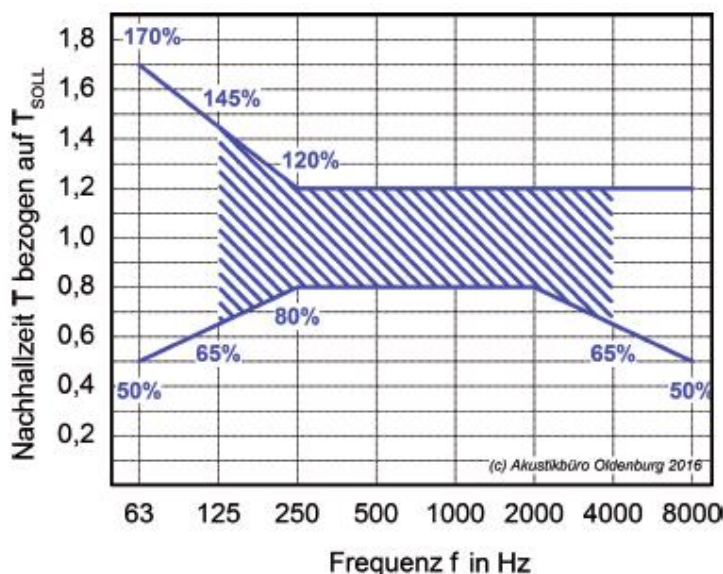
Doba dozvuku je veličina kmitočtově závislá, obecně lze tedy říci, že cílem je, aby její frekvenční charakteristika byla pokud možno co nejvíce vyrovnaná. Toho se však v reálných podmínkách velice těžko dosahuje a bylo tak zavedeno toleranční rozmezí, ve kterém se hodnoty doby dozvuku pro jednotlivé frekvence musí pohybovat.



Graf 3 - Toleranční pásmo hodnot doby dozvuku - ČR (převzato z [3])

Graf 3 nám znázorňuje povolenou odchylku doby dozvuku na jednotlivých frekvencích od doby doporučené. Tato odchylka se stanoví jako poměr mezi dobou dozvuku změřenou a doporučenou a neměla by přesáhnout 20 %. Výjimkou jsou hodnoty doby dozvuku na frekvencích do 250 Hz a poté od 4 kHz, kde vzhledem k větší náročnosti akustických úprav je dovolena odchylka i více než 40 %. Německá norma je v tomto případě ještě podrobnější, jak

je patrné z grafu 4, neboť je zde pro doporučenou dobu dozvuku definováno širší frekvenční pásmo již od 63 Hz do 8 kHz. Na obou koncích frekvenčního rozsahu je však co se týče povolené odchylky benevolentnější.



Graf 4 - Toleranční pásmo hodnot doby dozvuku - Německo (převzato z [9])

1.2.4. Srozumitelnost řeči

Srozumitelnost vyjádřená pomocí indexu přenosu řeči (STI) popisuje kvalitu přenosu řeči od zdroje zvuku směrem k posluchači. Index přenosu řeči může nabývat hodnot od 0 do 1 s tím, že 1 značí nejlepší možnou srozumitelnost a 0 naopak nejhorší. Měření indexu přenosu řeči je zavedeno normou ČSN EN 60268-16 [9], ve které jsou uvedeny i dvě možné metody měření této veličiny, a to metoda přímá a nepřímá. Bohužel v normě ČSN 73 0527 [3], pojednávající o projektování v oboru prostorové akustiky, kterou se v této práci více zabýváme, žádná doporučení ohledně indexu přenosu řeči nenalezneme, a to i přes to, že tento parametr je úzce spojen s celkovou dobou dozvuku a stejně jako doba dozvuku má i velký vliv na celkovou akustickou kvalitu měřeného prostoru. Pokud ale opět nahlédneme do finské normy, či do australské studie zjistíme, že zde již doporučenou hodnotu indexu přenosu řeči nalezneme. Doporučené hodnoty se ovšem mezi jednotlivými publikacemi liší. Zatímco v případě doby dozvuku byla australská norma striktnější a dovoľovala pouze malé rozpětí hodnot, které navíc byly oproti ostatním doporučením poměrně nízké u indexu přenosu řeči je tomu naopak. Australská studie doporučuje, že hodnota indexu přenosu řeči v učebních prostorech by měla dosahovat minimálně 0,6. Finská norma se i u tohoto parametru drží rozdělení učeben do kvalitativních kategorií a udává pro třídy typu A a B hodnotu STI alespoň 0,8, pro typ C pak minimálně 0,7.

	ČSN 73 0527	SFS 5907	Australská studie
doporučená hodnota STI	neuvádí	$\geq 0,8$ (A, B) $\geq 0,7$ (C)	> 0,6

Tabulka 4 - Porovnání doporučených hodnot indexu přenosu řeči

2. Návrh metodiky měření

Z provedené rešerše vyplývá, že se dnes pro hodnocení výukových prostor ve světě standardně používá doba dozvuku, srozumitelnost řeči a přihlíží se k hluku pozadí.

U tradičních učeben je v posledních letech ve světě patrná jasná tendence snižovat doporučenou dobu dozvuku. Z prostudovaných materiálů však vyplývá, že v České republice je v současné době doporučená doba dozvuku pro učebny poměrně vysoká.

Z akustického hlediska je nová generace učebních prostor kombinací dvou typů prostorů – tradiční učebny a otevřeného prostoru. Tyto dva prostory mohou být samostatné, ale častěji se dnes navrhují tak, že je nelze např. dveřmi plně oddělit. Z pohledu akustiky se v takovém případě jedná o akusticky vázané prostory. V základním přiblížení nebudeme akusticky vázané prostory uvažovat a při návrhu metodiky vyjdeme z norem řady ČSN ISO 3382 a ČSN EN 60268-16 [9]. V této kapitole se budeme konkrétněji věnovat parametrům uvedeným v úvodu tohoto odstavce a rozebereme postup měření těchto parametrů včetně potřebného teoretického minima.

2.1. Měření impulzové odezvy

Impulzová odezva je veličina dle teorie definována jako odezva systému (prostoru) na Diracův impuls. Impulzová odezva je základní charakteristikou prostoru a lze z ní vypočítat jak dobu dozvuku, tak index přenosu řeči. Tuto veličinu lze pořídit rozličnými způsoby, které však musí vést a vedou ke stejnému výsledku.

Metody měření impulzové odezvy prostoru jsou následující

- a) Výstřel
- b) MLS (Maximum Length Sequence)
- c) TSP (Time Stretched Pulse)

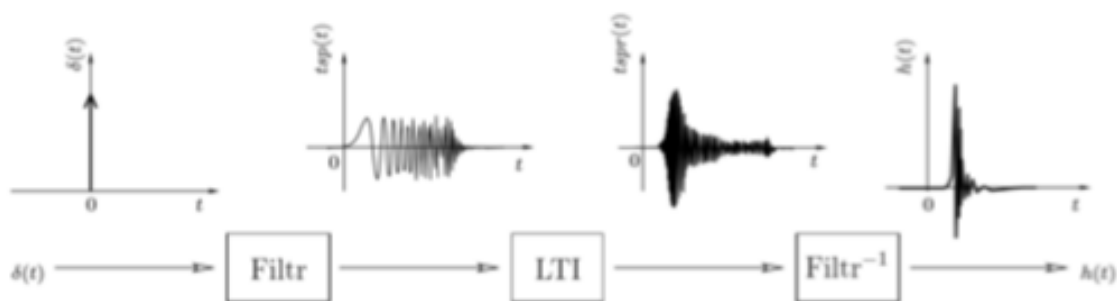
Kdy *výstřel* znamená výstřel například ze startovací pistole, který jakožto silný a krátký zvukový impuls simuluje Diracův impuls. Tato metoda se nazývá takzvanou přímou, neboť mikrofony v měřené místnosti zaznamenaná odezva je přímo odezvou impulzovou. U této metody je důležité zajistit, aby výstřel byl schopný v měřeném prostoru vybudit takovou špičkovou hladinu akustického tlaku, aby bylo zajištěno, že křivka poklesu bude začínat alespoň 45 dB nad hlukem pozadí v příslušném kmitočtovém pásmu pro měření T_{30} . Pro T_{20} pak stačí vybudit hladinu alespoň 35 dB nad hlukem pozadí [10].

Další možností, jak získat impulzovou odezvu je metoda MLS, která je založena na buzení prostoru periodickým pseudonáhodným signálem. Tato metoda patří mezi nepřímé a je tedy zapotřebí měřicími mikrofony zaznamenaný signál dále zpracovat.

Mezi další nepřímé metody patří i metoda TSP. Té bylo pro zjištění doby dozvuku využito v této práci.

2.1.1. TSP (Time Stretched Pulse)

Metoda TSP, v překladu puls roztažený v čase, je založena na filtraci Diracova impulsu, jehož energie se postupně rozloží v čase podle kmitočtu. Odezva systému na tento signál je pak filtrována filtrem opačným, pomocí kterého je získána impulzová odezva. Princip metody TSP je zobrazen na obrázku 3.



Obrázek 3 - Princip metody TSP (převzato z [11])

Při využití metody TSP nezískáme impulzovou odezvu přímo a je potřeba speciálního zpracování zaznamenaného mikrofonního signálu. To ovšem může přinést zlepšený odstup signálu od šumu. TSP lze využít, jsou-li splněny požadavky na spektrum a směrovou charakteristiku zdroje. Díky odstup signálu od šumu mohou být dynamické požadavky na zdroj podstatně nižší než ty, které jsou potřeba například při střelbě z pistole.

Dále je zde nutné zajistit, aby šířka pásma signálu byla větší než jedna oktáva. Spektrum musí být dostatečně ploché v oktávovém pásmu, v němž se má měřit [10].

2.2. Měření doby dozvuku

Při buzení prostoru zdrojem zvuku dochází k pohlcování zvukové energie stěnami a objekty, které se v něm nacházejí. Po vypnutí zdroje zvuku začne hustota zvukové energie klesat až na její minimum. Tento pokles nazýváme dozvukem. Doba dozvuku je definována jako doba, za kterou poklesne hladina akustického tlaku po vypnutí zdroje, který vybudil místnost na 10^{-6} původní hodnoty čili o 60 dB. Doba dozvuku charakterizuje daný uzavřený prostor a její optimální hodnota je důležitá z hlediska srozumitelnosti. Příliš dlouhá doba dozvuku zapříčiní promíchávání emitovaného zvuku s odraženým, naopak při příliš krátké době dozvuku vysílaný

zvuk vyznívá krátce a úsečně. Z hlediska psychické pohody posluchače je však nutné, aby doba dozvuku odpovídala velikosti prostoru a typu poslouchaného zvuku.

Při měření doby dozvuku zjišťujeme, za jak dlouho dojde k poklesu hladiny akustického tlaku o 60dB. V praxi se však nevyužívá měření poklesu o 60 dB, a to především z důvodu, že při poklesu intenzity zvuku o 60dB se už vlastní měřený signál těžko rozeznává od šumu. Postupuje se tedy tak, že se změří doba potřebná pro pokles intenzity zvuku o 30 (respektive 20) dB. Výsledná doba je tak $T_{30} = T/2$ (respektive $T_{20} = T/3$) doby dozvuku.

Metody měření doby dozvuku jsou v podstatě dvě: metoda přerušovaného šumu a metoda integrované impulsové odezvy. Obě metody dávají stejnou očekávanou hodnotu. Kmitočtový rozsah závisí na účelu měření. V našem případě, kdy nebyl požadavek na měření určitých kmitočtových pásem je u obou typů měření pro inženýrskou a přesnou metodu doporučován kmitočtový rozsah od 125 Hz do 4000 Hz v oktávových pásmech [10].

Metoda přerušovaného šumu je měřicí metoda, při které se prostor budí signálem odvozeným z širokopásmového náhodného nebo pseudonáhodného šumu. Měří se pak odezva místnosti na tento signál. Tato metoda však při našem měření nebyla využita, a proto se jí dále nebudeme zabývat, je zde však blíže popsána metoda integrované impulsové odezvy, které bylo při měření využito.

2.2.1 Přístrojové vybavení

Jakákoliv měření je potřeba provádět s měřicí technikou tomu určenou a s parametry vyhovujícími všem nařízením a doporučením shrnutých převážně v konkrétní státní normě popisující danou problematiku. Ani měření doby dozvuku v tomto není výjimkou. Požadavky na přístrojové vybavení jsou uvedeny v normě ČSN 3382 [10].

Zdroj zvuku by měl být především co nejvíc všesměrový. V případě měření orientačního a inženýrského, což je náš případ, neklade norma žádné specifické požadavky na směrovost zdroje. Je však nutné, aby byl zdroj schopen vybudit dostatečnou hladinu akustického tlaku pro pořízení křivek poklesu s požadovaným minimálním dynamickým rozsahem bez narušení hlukem pozadí.

Ke snímání akustické odezvy prostoru musí být použity všesměrové mikrofony. Mikrofon by měl být, pokud možno co nejmenší a mít průměr membrány maximálně 14 mm. V případě, že pro měření využíváme tlakové mikrofony je dovolen průměr membrány až 27 mm. Stejná výjimka platí i pro typy mikrofonů určených pro volné pole, avšak tyto musí být opatřeny korektorem náhodných dopadů. Mikrofonní výstup pak může být veden dvojnásobem.

Tím prvním je vedení signálu z výstupu mikrofonu přímo do zesilovače, filtru a systému pro zobrazení křivek poklesu nebo do analyzátoru pro odvození impulzových odezev. Druhou možností je pak signál převést pouze do nahrávacího zařízení a zde uchovat pro pozdější analýzu, což byl případ našeho měření.

2.2.2 Místa měření

Pro to, abychom dostali přesnější informaci o hodnotě doby dozvuku napříč celým měřeným prostorem, je potřeba provést více měření s různým rozmístěním měřicí aparatury. Jako místa zdroje se volí obvyklá místa, kde se při běžném způsobu využívání měřeného prostoru, vyskytuje mluvčí, či jiný zdroj zvuku. Rozmístění mikrofonů by mělo odpovídat pozicím posluchačů. Navíc by od sebe mikrofonní místa měla být rozmístěna alespoň na vzdálenost poloviny vlnové délky, tj. na minimální vzdálenost kolem 2 m pro obvyklý kmitočtový rozsah. Vzdálenost kteréhokoliv místa mikrofonu k nejbližšímu odražejícímu povrchu, včetně podlahy, by měla být alespoň čtvrtina vlnové délky, tj. okolo 1 m.

Místa mikrofonu nesmí být příliš blízko sebe. Jinak je počet nezávislých míst menší než skutečný počet míst měření.

Žádný z mikrofonů nesmí být umístěn příliš blízko kteréhokoliv zdroje, aby se zabránilo silnému vlivu přímého zvuku. Minimální vzdálenost d_{\min} v metrech se stanoví z rovnice [10]:

$$d_{\min} = 2 \sqrt{\frac{V}{cT}} \quad (1)$$

kde V je objem v metrech krychlových

c je rychlost šíření zvuku v metrech za sekundu

T je odhad očekávané doby dozvuku v sekundách

2.2.3 Metoda integrované impulzové odezvy

Následující text vychází především z ČSN ISO 3382-1 [12] a jejího staršího vydání a je z těchto norem víceméně převzat.

Pro každé frekvenční pásmo (oktávové, případně třetinooktávové pásmo) se křivka poklesu vytvoří zpětnou integrací kvadrátu impulzové odezvy. V ideální situaci, při absenci hluku pozadí, by integrace měla začínat na konci impulzové odezvy ($t \rightarrow \infty$) a postupovat k počátku kvadrátu impulzové odezvy. Pokles jako funkce času je tedy

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d(-\tau) \quad (2)$$

kde p je impulzová odezva.

Tento integrál v obráceném čase se často nahrazuje dvěma následujícími integracemi

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d(-\tau) = \int_0^{\infty} p^2(\tau) d\tau - \int_0^t p^2(\tau) d\tau \quad (3)$$

aby se minimalizoval vliv hluku pozadí na pozdější část impulzové odezvy, použije se pro implementaci jeden ze dvou následujících postupů.

- a) Není-li hladina akustického tlaku pozadí známa, provede se zpětná integrace kvadrátu impulzové odezvy s použitím klouzavé pevné integrační doby T_0 , jejíž velikost je kompromisem

$$E(t) = \int_{t-T_0}^t p^2(\tau) d(-\tau) \quad (4)$$

Optimální hodnotou T_0 je 1/5 doby dozvuku. Odhadne se doba dozvuku. Ukáže-li se, že změřená doba dozvuku se liší o více jak 25 % od odhadnuté hodnoty, změní se podle toho integrační doba a zopakuje se integrace. Začáteční čas t_1 zpětné klouzavé integrace není kritický, ale nesmí být kratší než doba dozvuku. Integrovaný hluk pozadí se objeví na křivce poklesu jako horizontální průběh, úsek hluku. Hladina úseku hluku musí být nejméně 10 dB pod dolní hodnotou vyhodnocovacího rozpětí.

- b) Je-li hladina akustického tlaku pozadí známa, určí se začáteční bod integrace t_1 jako průsečík horizontální přímky proložené hlukem pozadí a šikmé přímky proložené sklonem reprezentativní části kvadrátu impulzové odezvy a vypočítá se křivka poklesu z rovnice

$$E(t) = \int_{t_1}^t p^2(\tau) d(-\tau) + C \quad (5)$$

kde ($t < t_1$) a C je volitelná korekce pro integrovaný kvadrát impulzové odezvy mezi t_1 a nekonečnem. Postup označený písmen a) již není uveden v aktuálním vydání norem, nicméně je implementován v řadě programů pro výpočet doby dozvuku, proto je zde uveden.

2.2.4 Vyhodnocení křivek poklesu

U měření metodou integrované impulzové odezvy musí být záznam vyhodnocen z rozmezí mezi hladinou 5 dB pod celkovou integrovanou hladinou a hladinou nejméně 25 dB pod celkovou integrovanou hladinou. To dává pro měření minimální dynamický rozsah 20 dB, ale kdykoli je to možné, měl by být použit rozsah 30 dB. K určení sklonu pro zjištění doby dozvuku musí být použita regresní přímka, nalezená metodou nejmenších čtverců [12].

2.2.5 Prostorové průměrování

Výsledky změřené pro řadu poloh zdroje a mikrofonu, mohou být při určování prostorových průměrů kombinovány pro význačně oddělené oblasti, nebo pro místnost jako celek. Tohoto prostorového průměru se dosáhne aritmetickým průměrováním dob dozvuku. Prostorový průměr je dán střední hodnotou jednotlivých dob dozvuku pro všechny příslušné polohy zdroje a mikrofonu.

2.3. Měření srozumitelnosti řeči

Metoda měření parametru indexu přenosu řeči je objektivní metoda, která se používá pro zjištění kvality přenosu řeči. Měření indexu přenosu řeči (*STI*) může probíhat dvojí metodou, a to přímou a nepřímou. Přímou metodou měření indexu přenosu řeči je jeho výpočet z modulační přenosové funkce. Modulační přenosová funkce popisuje, jaký má daný přenosový kanál vliv na obálku intenzity signálu řeči. Druhou metodou, využitou v případě této práce je metoda nepřímá. U této metody se modulační přenosová funkce $m_k(f_m)$ spočítá z impulzní odezvy přenosového kanálu. Při zpracovávání této části práce bylo čerpáno především z literatury [13], ze které jsou převzaty i všechny následující vztahy. Modulační přenosová funkce $m_{f,k}$ o modulační frekvenci f_m v oktávovém pásmu k se vypočte dle vztahu.

$$m_k(f_m) = \frac{|\int_0^\infty h_k(t)^2 e^{-j2\pi f_m t} dt|}{\int_0^\infty h_k(t)^2 dt} \cdot \left(1 + 10^{\frac{-SNR_k}{10}}\right)^{-1} \quad (6)$$

kde $h_k(t)$ je impulzní odezva v oktávovém pásmu k

f_m je modulační frekvence

SNR_k je poměr signál – šum v dB

Z této funkce se vypočítá efektivní poměr signál šum $SNR_{\text{eff } k, f_m}$ jako

$$SNR_{\text{eff } k, f_m} = 10 \log \frac{m_{k, f_m}}{1 - m_{k, f_m}} \quad (7)$$

Kde m_{k, f_m} je modulační přenosová funkce pro dané oktávové pásmo (k) a modulační frekvenci (f_m). Další potřebnou věcí pro určení STI je vypočítání indexu přenosu (TI), který je definován vztahem

$$TI_{k, f_m} = \frac{SNR_{\text{eff } k, f_m} + 15}{30} \quad (8)$$

Odvozené indexy přenosu se zprůměrují přes modulační frekvence pro získání MTI_k indexu modulace přenosu, pro dané frekvenční pásmo k použitím vzorce

$$MTI_k = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n TI_{k, f_m} \quad (9)$$

kde m je index modulační frekvence a n je počet modulačních frekvencí v oktávovém pásmu.

Parametr STI se za použití indexu modulace přenosu spočítá jako

$$STI = \sum_{k=1}^7 \alpha_k \cdot MTI_k - \sum_{k=1}^6 \beta_k \cdot \sqrt{MTI_k \cdot MTI_{k+1}} \quad (10)$$

kde α_k je váhovací faktor pro oktávové pásmo k

β_k je faktor redundance mezi oktávovými pásmy k a $(k+1)$

$$m_k(f_m) = \frac{|\int_0^\infty h_k(t)^2 e^{-j2\pi f_m t} dt|}{\int_0^\infty h_k(t)^2 dt} \cdot \left(1 + 10^{\frac{-SNR_k}{10}}\right)^{-1} \quad (11)$$

Vzhledem k tomu, že pro výpočet modulační přenosové funkce je při přímé úplné metodě měření *STI* zapotřebí 14 modulačních frekvencí pro každé ze 7 oktávových pásem, což dohromady dává 98 měření, byla vyvinuta metoda STIPA (Speech Transmission Index for Public Address Systems) neboli index přenosu řeči pro ozvučovací systémy). Ta využívá pouze dvou modulačních frekvencí v sedmi oktávových pásmech, takže počet měření je zredukován na 14. Tato metoda může být využita na téměř všechny analogové, elektroakustické a akustické přenosové kanály. Oproti metodě využívající všech 98 měření (FULL STI) se čas měření touto metodou zkrátí z přibližně 15 minut na 15 až 20 sekund.

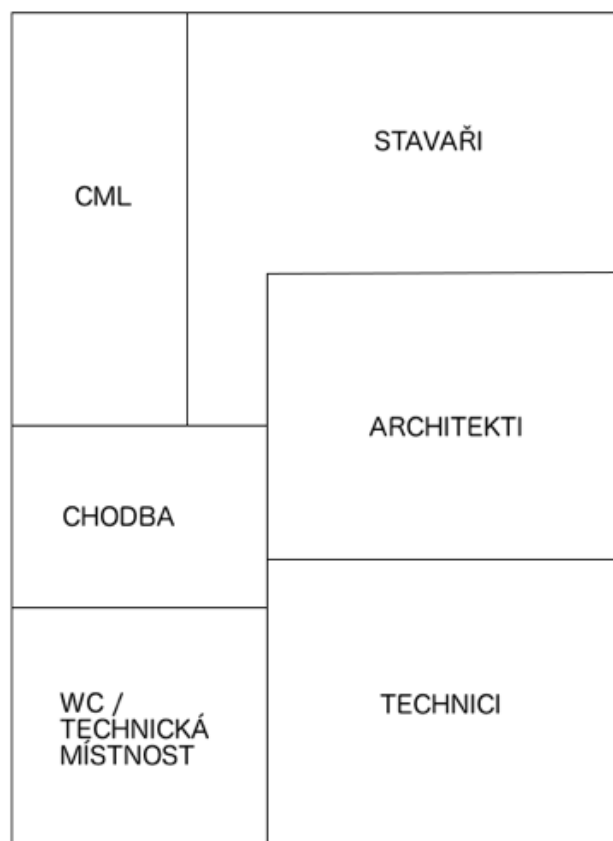
3. Ověření metodiky měření na konkrétních prostorech

Poslední částí této práce bylo provedení měření akustických parametrů za pomoci výše uvedené a navržené metodiky. Navíc je zde vyhrazen prostor i pro porovnání zjištěných hodnot s doporučeními českými i zahraničními. Měření probíhalo na fakultní základní škole při ČVUT.

3.1. Měřené prostory

Měřenými prostory byly učebny výše zmíněné základní školy.

Tyto prostory vznikly ještě jako klasické učebny, nicméně postupnými úpravami ovlivněnými právě novými trendy výuky se pomalu přibližují finskému a belgickému konceptu. Je nutno podotknout, že tyto někdy atypicky tvarované prostory mají k těmto novým typům výuky jisté predispozice.



Obrázek 4 - Schématický náčrt školy

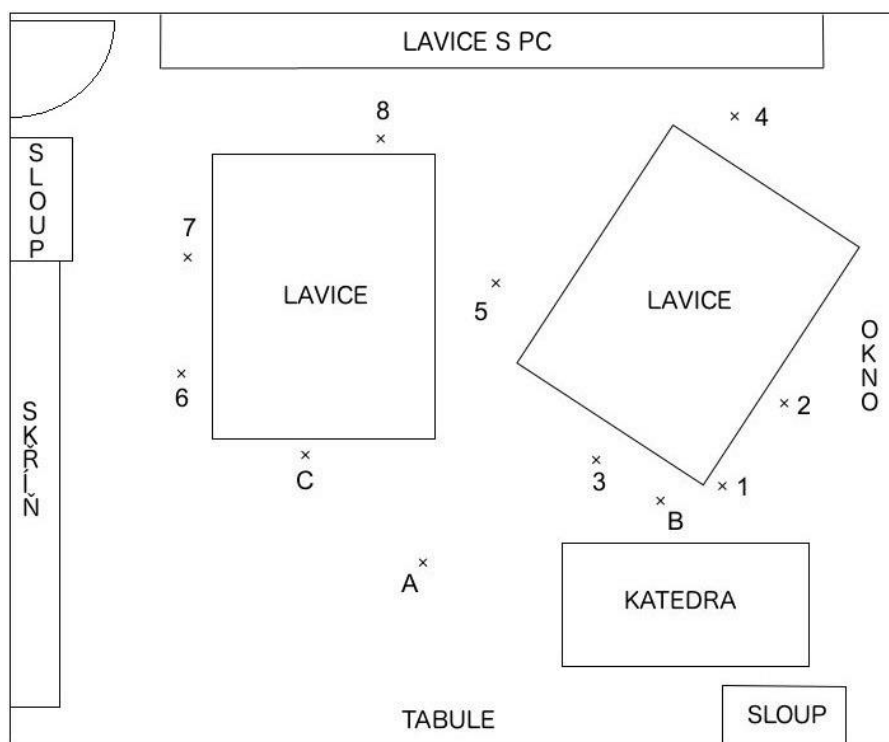
Učební prostory této školy jsou rozděleny do čtyř tříd, chodby, šatny a technických místností. Třídy techniků, architektů a stavařů si jsou podobné a daly by se připodobnit místnosti “interact“ z FCL. Ve třídě techniků jsou lavice navíc situovány do podoby velkých čtverců s lehkým natočením vyhraňujícím prostor pro vyučujícího. V zadní části místnosti se pak nachází prostor pro výuku na PC a díky tomu pak tato třída odpovídá i rozvržení zobrazenému ve Finské studii.

Čtvrtá třída pojmenovaná CML (Centrální Mozek Lidstva) pak slouží jako učebna i jako kabinet pro vyučující. Tento prostor připomínající konferenční místnost s jedním velkým stolem okolo něž se nacházejí židle pro žáky, potažmo pro vyučující, je krásným příkladem zóny „develop“ z FCL.

Všechny měřené třídy měly povrch podlahy z PVC, sádkartonové stěny s běžnou omítkou a strop kompletně pokrytý akustickým podhledem hlubokým 90 cm s prázdnou (akusticky neupravenou) mezerou. Okna byla hliníková s dvojitým sklem a překrývaly je látkové žaluzie zavěšené u stropu. Co se týče vnitřního vybavení, všechny třídy byly vybaveny identickým nábytkem, sestávajícím se z typických školních lavic a katedry (dřevěná deska, kovové nohy), dřevěných skříní, moderní tabule s dataprojektorem a umyvadlem, v CML byla navíc umístěna menší kuchyňka.

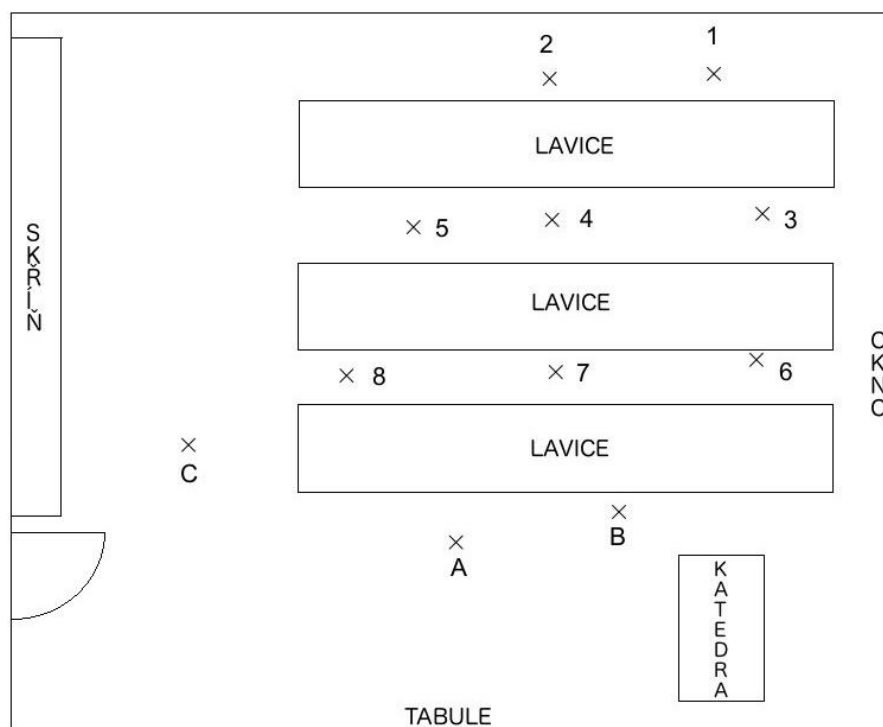
První měřenou učebnou byla ta s názvem technici. Její rozměry byly $7,25 \times 5,94 \times 3$ metrů. Celkový objem činil 129 m^3 . Učebna měla tři sádkartonové stěny a jednu stěnu tvořenou okny do soukromého areálu. Byla vybavena veškerým vybavením typickým pro výuku, šestící lavic pro žáky uspořádaných do dvou bloků a katedrou pro vyučující. Přesné rozmístění vybavení společně s umístěním měřicí aparatury je znázorněno na obrázku 5.

U všech schématických nákrešů znázorňují pozice označené A až C umístění zdroje budicího signálu a pozice 1 až 8 rozmístění jednotlivých mikrofونů. Mikrofony byly ve výšce 1,1 m nad podlahou, zdroj zvuku 1,6 m nad podlahou. Ve všech učebnách rozmístění měřicí aparatury simulovalo běžnou výuku, kdy byl zdroj zvuku umístěován do pozic typických pro učitele při výkladu a mikrofony byly na pozicích studentů.



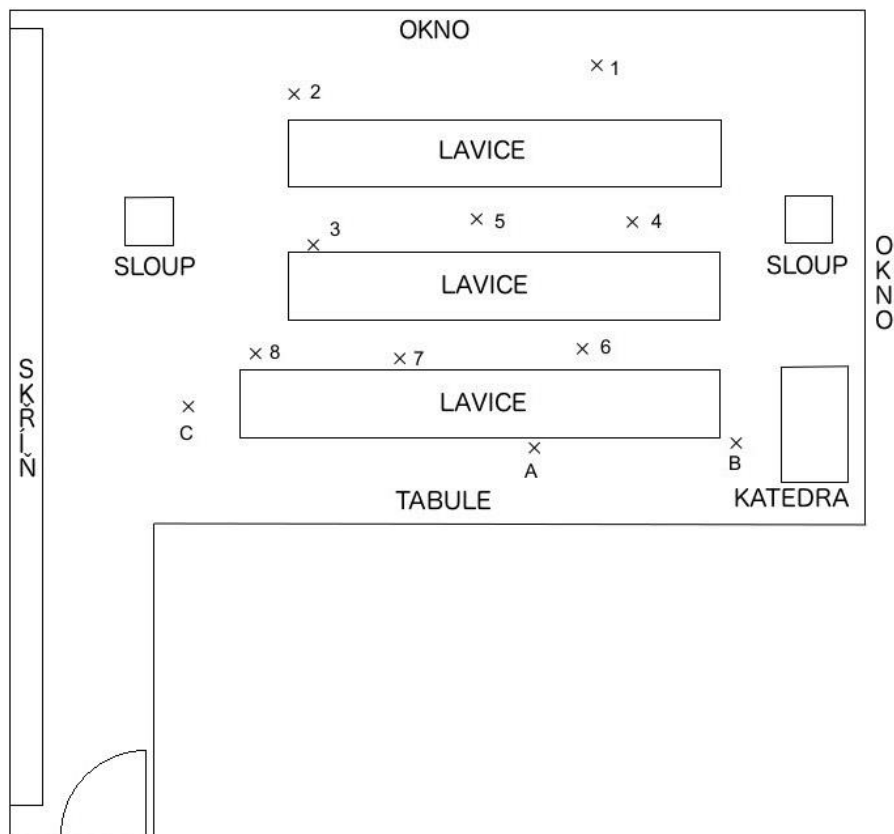
Obrázek 5 - Schématický náčrt místnosti (technici)

Druhou měřenou učebnou byla učebna architektů. Její rozměry byly $7,27 \times 5,9 \times 3$ metrů. Celkový objem byl shodný s předchozí třídou, tedy 129 m^3 . I tato místnost byla tvořena třemi sádkartonovými stěnami a jednou stěnou celou tvořenou okny se zatažitelnými žaluziemi. Vybavení této učebny se nelišilo od vybavení třídy techniků, pouze zde byly lavice uspořádány do řad místo čtverců.



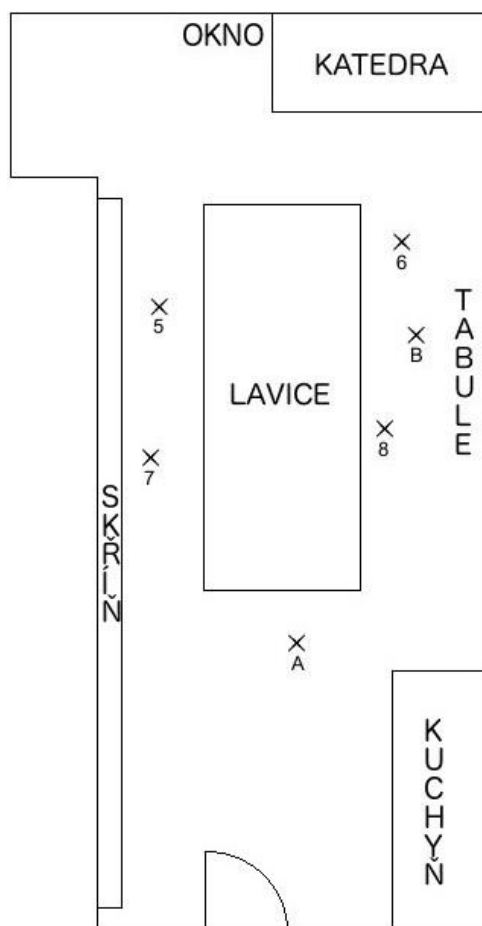
Obrázek 6 - Schématický náčrt místnosti (architekti)

Třetí měřenou třídou byla třída stavařů. Tato učebna se od dvou předchozích lišila, a to především tím, že její součástí byla úzká chodba a okna byla na dvou stěnách na rozdíl od pouze jedné, jak tomu bylo u předchozích tříd. Rozměry tohoto prostoru byly $8,9 \times 5,35 \times 3$ metrů a jeho objem byl 143 m^3 . Chodba byla o rozměrech $3,25 \times 1,5 \times 3$ metrů a přímo navazovala na místnost. Objem chodby byl $14,6 \text{ m}^3$. Vybavení učebny se nikterak nelišilo od vybavení tříd techniků a architektů s tím, že i zde, stejně jako u architektů, byly lavice situovány do řad.



Obrázek 7 - Schématický nákres místnosti (stavaři)

Čtvrtým měřeným prostorem byla učebna CML (centrální mozek lidstva). Tato místnost o rozměrech $4,4 \times 8,47 \times 3$ metrů a s celkovým objemem 112 m^3 slouží jako třída určená pro výuku i jako kabinet pro vyučující. Součástí této místnosti je i malá kuchyňka umístěná v rohu. Vnitřní uspořádání učebny připomíná spíše zasedací místnost než klasickou třídu a je to tedy ideální prostor k porovnání naměřených hodnot a hodnot doporučených finskou normou pro nové typy výukových prostor.



Obrázek 8 - Schématický náčrt místnosti (CML)

Rozměry a objemy jednotlivých prostorů jsou shrnuty v tabulce 5.

	technici	architekti	stavaři	CML
rozměry (š×d×v) [m]	7,25 × 5,94 × 3	7,27 × 5,9 × 3	8,9 × 5,35 × 3 (chodba: 3,25 × 1,5 × 3)	4,4 × 8,47 × 3
objem [m ³]	129	129	143 (chodba: 14,6)	112

Tabulka 5 - Porovnání doporučených hodnot srozumitelnosti mezi normami

3.2. Měřicí aparatura

Při měření bylo pro zjišťování impulsové odezvy učebny využito její vybuzení signálem TSP. Měření probíhalo v dvojí konfiguraci, kdy při první byl využit jako zdroj signálu všesměrový reproduktor, tzv. *dvanáctistěn* a při druhé pak směrový reproduktor v podobě *modelové hlavy*, určený pro přesnější napodobení situace, kdy je prostor buzen řečí mluvčího. Využití směrového reproduktoru je navíc doporučeno v normě ČSN 3382-3: *Otevřené kanceláře* [4] a vzhledem k povaze měřených prostorů, které svým využitím v rámci nových výukových metod, tyto otevřené kanceláře připomínají, je vhodné se tímto doporučením řídit.

Odezva místnosti pak byla snímána pomocí řady mikrofonů rozmístěných v místech typického výskytu posluchačů.

Pro měření bylo využito následující měřicí techniky.

- 8 kanálový rekordér, analyzátor a zdroj měřicího signálu Soft dB Tenor, vzorkovací frekvence 48 828 Hz
- Měřicí mikrofony BSWA MPA 416
- Modelová hlava a všesměrový zdroj ve tvaru dvanáctistěnu splňující doporučení příslušných norem
- Koncový zesilovač QSC RMX 1450 (pro všesměrový zdroj)
- Koncový zesilovač Vincent SP-997 (pro modelovou hlavu)
- Předzesilovač Mackie 802 vlz4

3.3. Postup měření

Měření probíhalo mimo běžnou výuku, avšak uspořádání vybavení učeben a rozmístění měřicí aparatury mělo za cíl simulovat typické podmínky při výuce. Pro zdroj budicího signálu (všesměrový a směrový reproduktor) byla zvolena místa, kde se běžně vyskytuje učitel hovořící na třídu. Mikrofony byly postupně rozmíst'ovány do míst, kde žáci v hodinách sedí. Pro každou místnost bylo provedeno několik sad měření, kdy se mezi každou sadou změnilo uspořádání vybavení. Vzhledem k předpokladu, že na celkový výsledek budou mít, kvůli značnému povrchu, který zabírají, velký vliv žaluzie umístěné na oknech, bylo měření provedeno vždy primárně s jejich typickým částečně zataženým stavem, který je pro danou třídu v popisu měření vždy blíže specifikován, a v úplně roztaženém a zataženém stavu.

V učebně techniků proběhla navíc jedna sada měření za přítomnosti žáků sedících v lavicích. Pro měření byl použit signál TSP s logaritmickým přeladěním omezený na kmitočtový rozsah 20 Hz až 20 kHz o délce přibližně 10 s. Tímto signálem byly postupně buzeny oba zdroje měřicího signálu - všesměrový zdroj a modelová hlava. Signál z měřicích mikrofonů byl zaznamenán ve formátu wav k dalšímu zpracování.

3.4. Vyhodnocení výsledků měření doby dozvuku

Pro zpracování měření bylo využito programového prostředí Matlab. Do připraveného scriptu se nahrál soubor obsahující nahrávku pořízenou při měření. Každá tato nahrávka obsahovala 8 kanálů, kdy každý kanál reprezentoval jeden mikrofon. Zpracování v připraveném skriptu sestávalo z třetinoktávové filtrace, metody zpětné integrace popsané v článku 3.2.3 této práce a výpočtu doby dozvuku T_{30} .

Program zpracoval samostatně každý z osmi kanálů a na konci tyto výsledky zprůměroval do jedné matice obsahující celkovou dobu dozvuku pro konkrétní měření. Výsledné doby dozvuku, které jsou prezentované dále v práci a není-li uvedeno jinak, jsou vypočtené zprůměrováním hodnot ze všech pozic zdroje budicího signálu a měřicích mikrofonů.

Doba dozvuku, jakožto jedno z kritérií, které má majoritní vliv na celkovou akustickou kvalitu prostoru, je hlavním parametrem, který byl v této práci zkoumán a měřen. V této části se zaměříme na jeho vyhodnocení při různých konfiguracích měřicí aparatury a měřeného prostoru. Jednotlivá měření byla provedena při jiném uspořádání prostoru, tak aby ve výsledku

bylo možné porovnat vlivy jednotlivých uspořádání na celkovou dobu dozvuku a zohlednit tak různé možnosti využívání učebny.

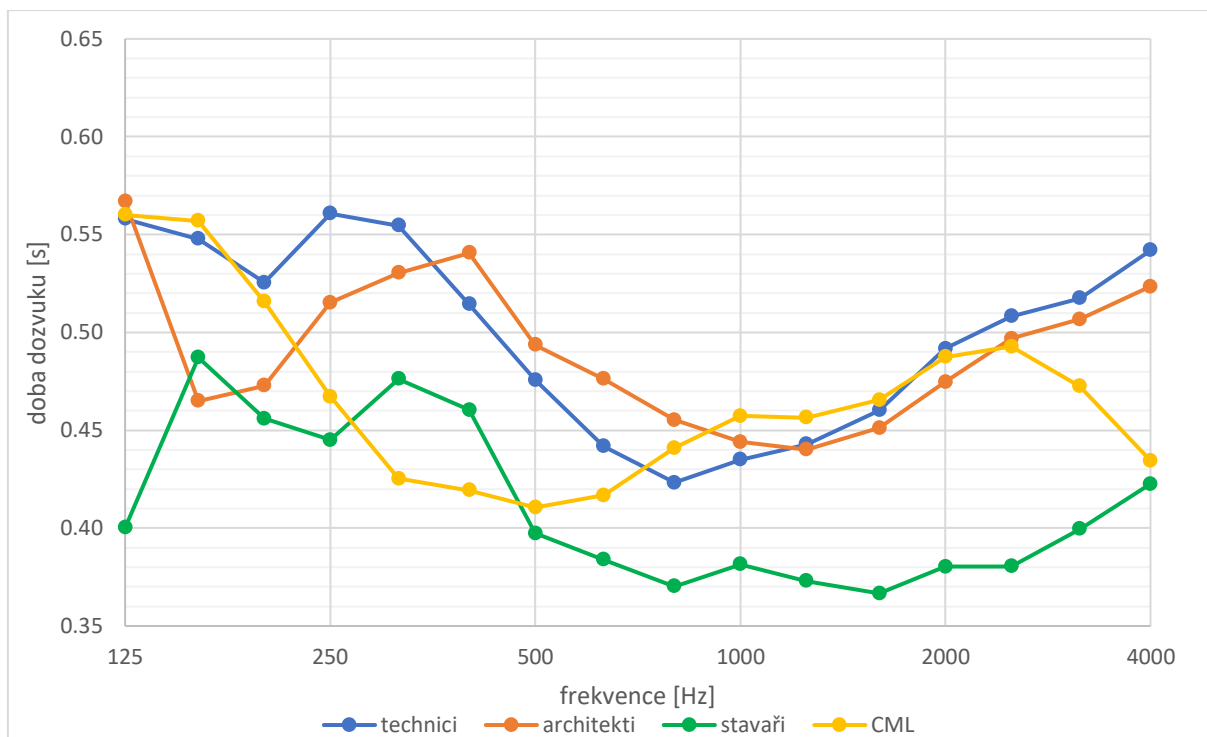
Dle teoretických předpokladů by na změnu doby dozvuku měly mít největší vliv především změny v rozmístění žaluzií zakrývajících okna a přítomnost žáků ve třídě.

3.4.1. Doba dozvuku v jednotlivých neobsazených třídách

Měření doby dozvuku proběhlo ve všech učebnách, vždy ve stejné konfiguraci čili zdroj zvuku simuloval typické pozice vyučujícího a měřicí mikrofony byly umístěny na pozicích žáků. Měření bylo provedeno se všesměrovým zdrojem. Výsledky těchto měření jsou uvedeny v tabulce 6, respektive na grafu 5.

frekvence [Hz]	doba dozvuku [s]			
	technici	architekti	stavaři	CML
125	0,56	0,57	0,40	0,56
160	0,55	0,47	0,49	0,56
200	0,53	0,47	0,46	0,52
250	0,56	0,52	0,44	0,47
315	0,55	0,53	0,48	0,43
400	0,51	0,54	0,46	0,42
500	0,48	0,49	0,40	0,41
630	0,44	0,48	0,38	0,42
800	0,42	0,46	0,37	0,44
1000	0,43	0,44	0,38	0,46
1250	0,44	0,44	0,37	0,46
1600	0,46	0,45	0,37	0,47
2000	0,49	0,47	0,38	0,49
2500	0,51	0,50	0,38	0,49
3150	0,52	0,51	0,40	0,47
4000	0,54	0,52	0,42	0,43

Tabulka 6 - Naměřené hodnoty doby dozvuku



Graf 5 – Doby dozvuku v jednotlivých učebnách

Učebny techniků a architektů si jsou, co se týče stavebních dispozic i rozmístěním vnitřního vybavení velice podobné, jejich velikost, potažmo objem jsou pak takřka identické. Z tohoto důvodu se předpokládalo, že hodnoty doby dozvuku u těchto učeben budou téměř shodné. Tento teoretický předpoklad naše měření potvrdilo a od přibližně 350 Hz lze sledovat u obou učeben velice dobrou shodu. Mírně rozdílné výsledky u nižších frekvencí lze přisuzovat lehce odlišnému rozmístění vnitřního vybavení (lavice uspořádány do řad, místo do bloků, jinde umístěné skříně), či například většímu zaplnění skříní a polic v případě učebny architektů. Co se týče učebny stavařů, tak zde byly naměřené hodnoty výrazně nižší než u předchozích tříd. Tento jev byl s největší pravděpodobností zapříčiněn mnohem větším povrchem zakrytým závěsnými žaluziemi.

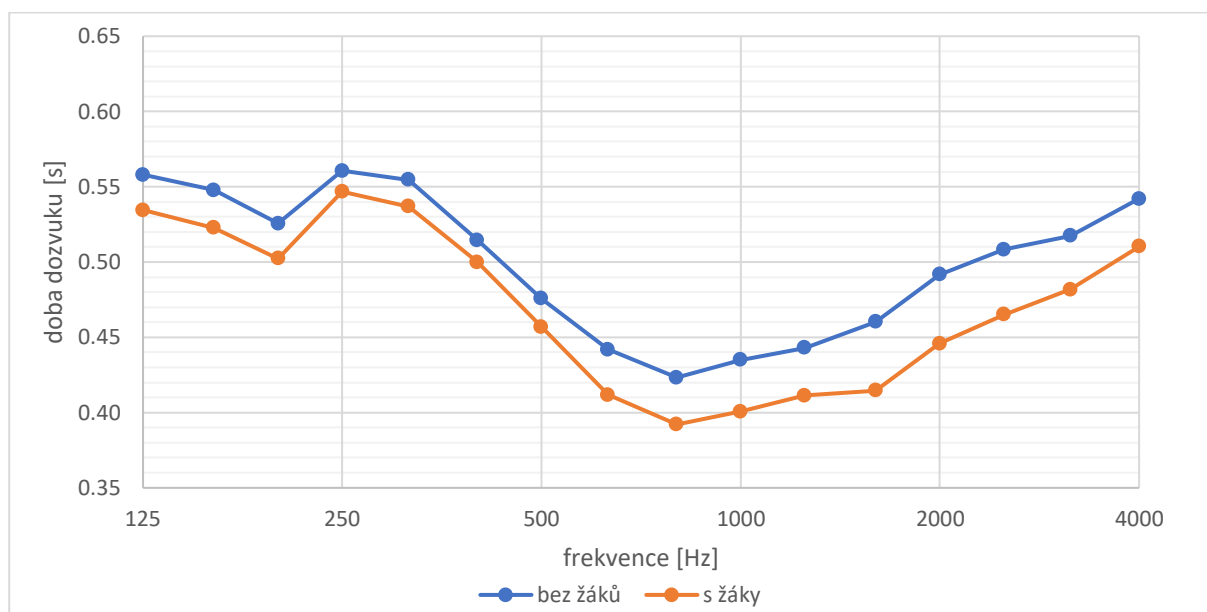
Učebna CML využívaná jako třída i jako kabinet, byla svými výsledky doby dozvuku mezi výsledky ostatních měřených tříd. Od přibližně 700 Hz jsou její hodnoty podobné těm u techniků a architektů, avšak na nižších frekvencích jsou hodnoty doby dozvuku jedny z nejnižších. To, stejně jako pokles na frekvencích od 3150 Hz může být způsobeno značnou různorodostí tohoto prostoru a jeho poměrně velkému zaplnění vnitřním vybavením.

Dále je z měření a z výsledného grafu patrný pokles hodnot doby dozvuku okolo frekvence 1000 Hz. Tento propad je poměrně výrazný a je přítomen ve všech měřených prostorech. U doby dozvuku je požadována, pokud možno co největší vyrovnanost hodnot napříč

frekvenčním spektrem, tudíž má tento propad negativní vliv na celkovou akustickou kvalitu místností. Nejpravděpodobnějším viníkem tohoto poklesu jsou akustické podhledy umístěné na stopě ve všech místnostech. Tyto podhledy jsou z jednoho materiálu a z naměřených výsledků lze předpokládat, že tento materiál má největší činitel pohltivosti právě na frekvencích okolo 1000 Hz. Vzhledem k tomu, že podhledy pokrývají celou plochu stropu, jejich vlastnosti se výrazně projeví na celkové době dozvuku

3.4.2. Vliv obsazenosti učebny na dobu dozvuku

V této části práce bylo měření zaměřeno na zjištění a porovnání doby dozvuku v místnosti prázdné a v místnosti obsazené žáky. Toto měření proběhlo ve třídě techniků. V prvním případě byla měření provedena ve třídě za stavu, v jakém se běžně využívá pro výuku, ale nebyli zde přítomni žáci. Při druhém měření pak byla třída obsazena deseti žáky, rozsazenými do lavic, jako při běžné výuce. V případě obou měření bylo využito všesměrového zdroje zvuku. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 7, potažmo v grafu 6.



Graf 6 - Závislost doby dozvuku na obsazenosti učebny (techniky)

frekvence [Hz]	doba dozvuku [s]	
	bez žáků	s žáky
125	0,56	0,53
160	0,55	0,52
200	0,53	0,50
250	0,56	0,55
315	0,55	0,54
400	0,51	0,50
500	0,48	0,46
630	0,44	0,41
800	0,42	0,39
1000	0,43	0,40
1250	0,44	0,41
1600	0,46	0,41
2000	0,49	0,45
2500	0,51	0,47
3150	0,52	0,48
4000	0,54	0,51

Tabulka 7 – Změna doby dozvuku v závislosti na obsazenosti učebny (technici)

Z měření jasně vyplývá, že doba dozvuku je přítomností žáků ovlivněna. Pokud jsou žáci ve třídě přítomni doba dozvuku je nižší, než v případě kdy je učebna prázdná. To přesně odpovídá našim teoretickým předpokladům, neboť se s přítomností žáků zvyšuje plocha, jenž pohlcuje energii emitovaného signálu doba dozvuku se tak sníží.

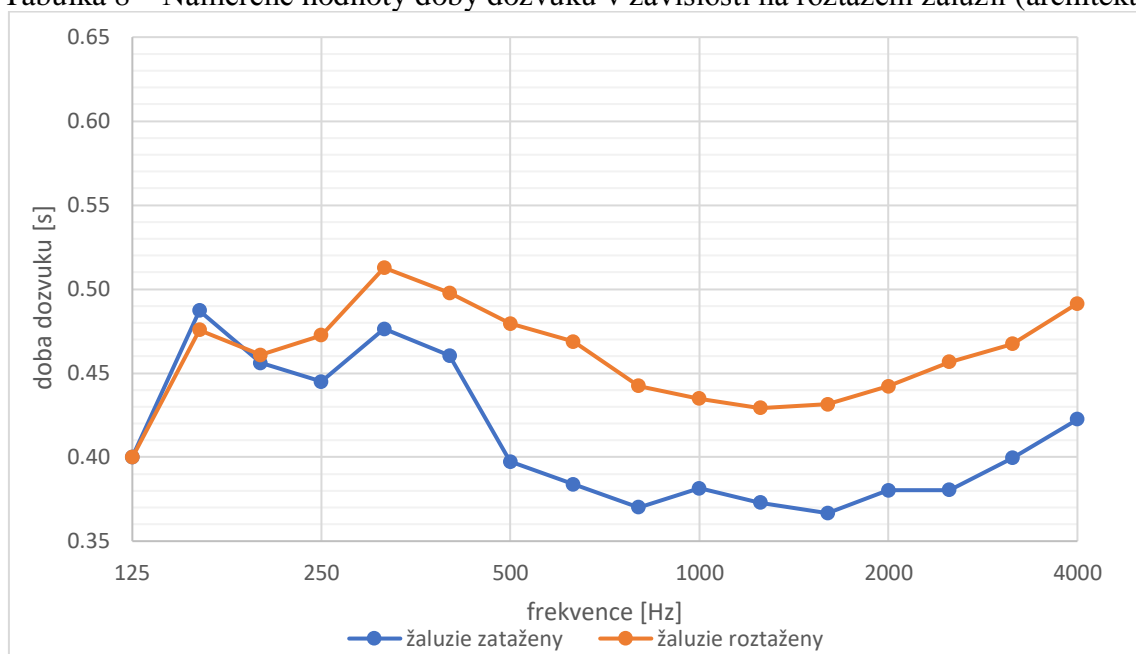
3.4.3. Vliv rozmístění žaluzií na dobu dozvuku

Jak již bylo zjištěno výše, doba dozvuku je závislá na vnitřním vybavení a jeho uspořádání. Například pokud jsme do prostoru přidali nové objekty, v našem případě žáky, hodnota doby dozvuku klesla. Další část měření měla za cíl, zjistit jaký vliv na celkovou dobu dozvuku mají textilní závěsné žaluzie, kterými byly vybaveny všechny učebny. Tyto žaluzie bylo možné zcela roztáhnout do stavu, kdy byla jejich plocha naprosto zanedbatelná, či zcela zatáhnout. V případě úplného zatažení, pak žaluzie zakrývaly téměř celou stěnu (okno). Měření proběhlo v učebně stavařů, neboť zde jsou okna umístěna ve dvou stěnách namísto pouze jedné, jak je tomu u ostatních tříd, a tak je plocha, kterou žaluzie zakrývají největší. Díky tomu je zde předpokládán největší rozdíl ve výsledných hodnotách mezi roztaženými a zataženými závěsy.

Pro vybudění třídy bylo využito všesměrového zdroje zvuku. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce 8. Grafické znázornění je pak reprezentováno grafem 7.

frekvence [Hz]	doba dozvuku při zatažených žaluziích [s]	doba dozvuku při roztažených žaluziích [s]
125	0,40	0,40
160	0,49	0,48
200	0,46	0,46
250	0,44	0,47
315	0,48	0,51
400	0,46	0,50
500	0,40	0,48
630	0,38	0,47
800	0,37	0,44
1000	0,38	0,43
1250	0,37	0,43
1600	0,37	0,43
2000	0,38	0,44
2500	0,38	0,46
3150	0,40	0,47
4000	0,42	0,49

Tabulka 8 – Naměřené hodnoty doby dozvuku v závislosti na roztažení žaluzií (architekti)



Graf 7 – Závislost doby dozvuku na poloze žaluzií (stavaři)

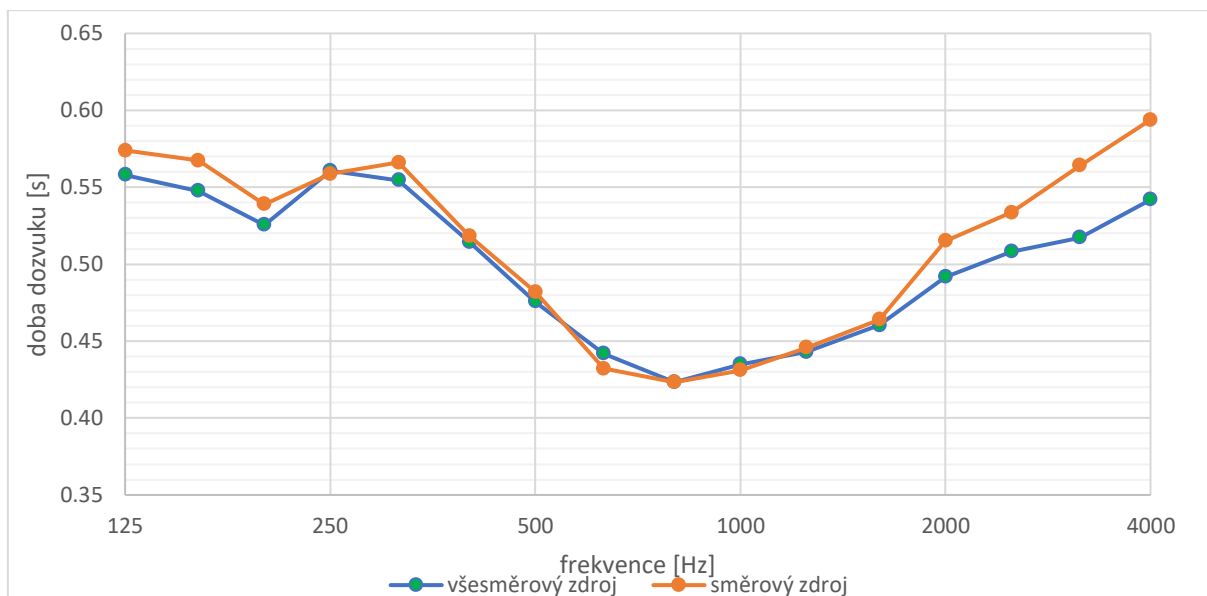
Po zpracování výsledků měření doby dozvuku učebny při roztažených a zatažených závěsech se potvrdili teoretické předpoklady ohledně vlivu žaluzií na celkový činitel pohltivosti, respektive na dobu dozvuku. Výsledek byl tedy takový, že v případě zatažených závěsů celkový činitel pohltivosti vzrostl a tím se naopak snížila hodnota doby dozvuku. Při roztažených závěsech byla situace přesně opačná. Navíc v případě třídy stavařů je tento jev mnohem výraznější, neboť žaluzie v zataženém stavu zabírají mnohem více plochy než v případě ostatních tříd. Z výsledků měření dále vyplývá, že žaluzie na nižších frekvencích přibližně do 400 Hz pohlcují zvuk výrazně méně než na frekvencích vyšších.

3.4.4. Vliv typu a umístění zdroje zvuku na dobu dozvuku

Dalším zkoumaným jevem byl vliv typu a umístění zdroje zvuku na celkovou dobu dozvuku. Jak již bylo uvedeno, měření probíhala s dvěma typy zdroje zvuku. Se všesměrovým zdrojem, a navíc dle doporučení normy ČSN 3382-3 [4] i se zdrojem směrovým, tzv. *modelovou hlavou*. Zdroje zvuku byly pro lepší simulaci reálného využívání měřených prostor rozmístřovány do různých poloh, tak aby napodobily vyučujícího, který může látku přednášet z více míst. Cílem této části měření bylo zjistit, zda-li má na celkovou dobu dozvuku vliv umístění zdroje zvuku a jestli se tato její hodnota změní v případě využití všesměrového a směrového zdroje. Pro toto měření bylo opět využito třídy techniků. Výsledky tohoto měření jsou uvedeny v tabulce 9.

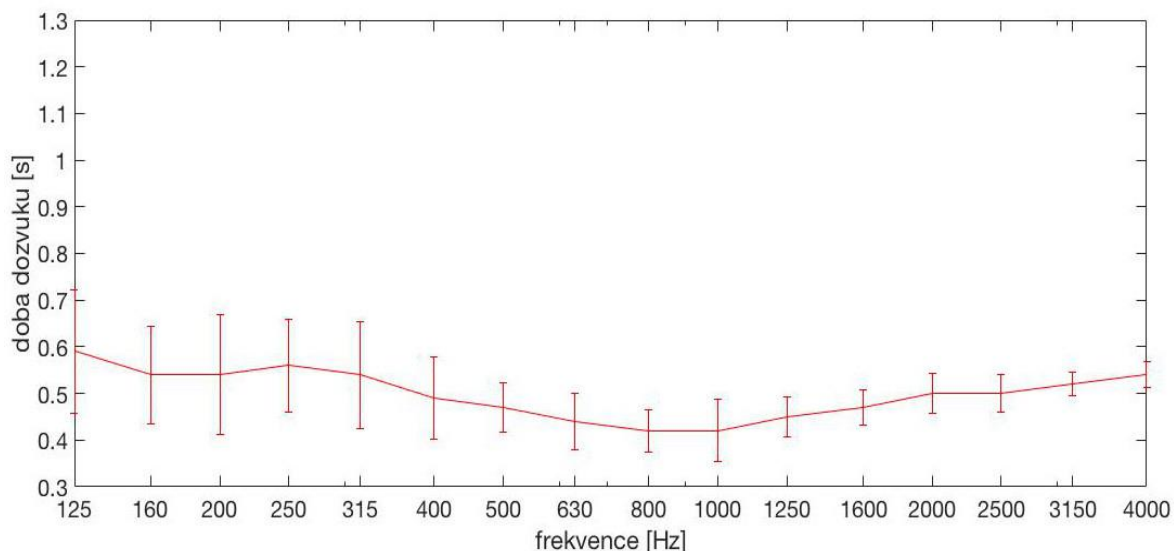
frekvence [Hz]	doba dozvuku [s]							
	všesměrový zdroj				směrový zdroj			
	průměr	max. hodnota	min. hodnota	rozptyl	průměr	max. hodnota	min. hodnota	rozptyl
125	0,56	0,73	0,46	0,00379	0,57	0,85	0,46	0,00498
160	0,55	0,65	0,44	0,00383	0,57	0,68	0,45	0,00398
200	0,53	0,66	0,41	0,00302	0,54	0,67	0,39	0,00456
250	0,56	0,66	0,46	0,00268	0,56	0,65	0,47	0,00211
315	0,55	0,65	0,42	0,00235	0,57	0,69	0,40	0,00373
400	0,51	0,58	0,40	0,00172	0,52	0,60	0,43	0,00107
500	0,48	0,52	0,41	0,00072	0,48	0,53	0,43	0,00065
630	0,44	0,50	0,38	0,00090	0,43	0,48	0,38	0,00065
800	0,42	0,47	0,38	0,00054	0,42	0,48	0,37	0,00070
1000	0,44	0,49	0,35	0,00086	0,43	0,48	0,36	0,00075
1250	0,44	0,50	0,41	0,00038	0,45	0,47	0,39	0,00031
1600	0,46	0,51	0,43	0,00023	0,46	0,50	0,42	0,00036
2000	0,49	0,54	0,46	0,00032	0,51	0,84	0,46	0,00267
2500	0,51	0,54	0,46	0,00027	0,53	0,58	0,49	0,00039
3150	0,52	0,55	0,49	0,00018	0,56	1,18	0,50	0,00883
4000	0,54	0,56	0,51	0,00014	0,59	1,00	0,56	0,00390

Tabulka 9 - Naměřené hodnoty doby dozvuku v závislosti na typu a umístění zdroje (technici)

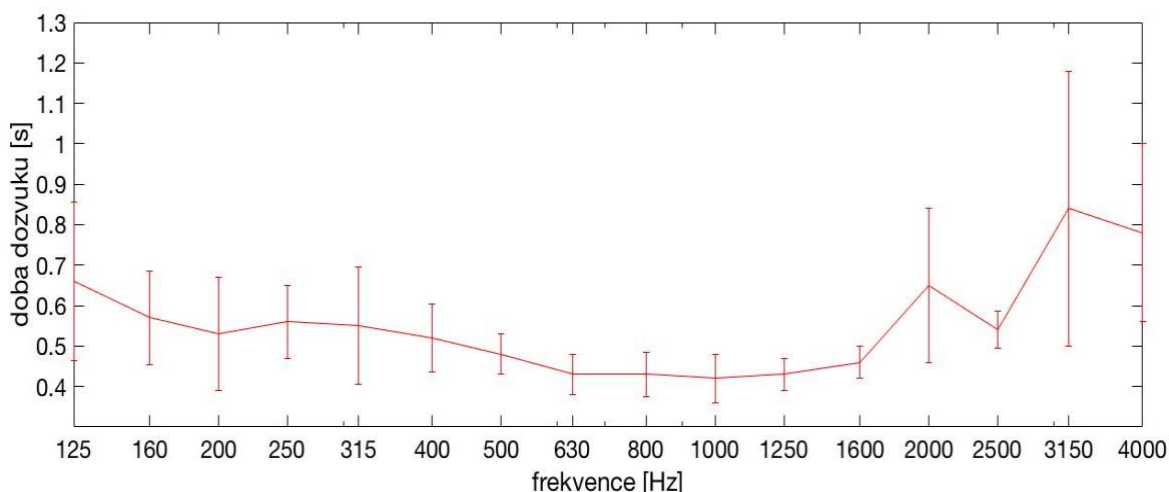


Graf 8 – Doby dozvuku pro různé zdroje zvuku (technici)

Při měření doby dozvuku se využívalo celkem osmi mikrofonů umístěných na různých místech s tím, že výsledné hodnoty se docílilo zprůměrováním všech výsledků z těchto jednotlivých měřicích pozic. Dá se předpokládat, že hodnoty doby dozvuku se budou napříč prostorem měnit, a zatímco v některých částech učebny se budou blížit těm ideálním, v jiných můžou být hodnoty naopak naprosto nevyhovující. Abychom získali přehled o tom, jak moc hodnoty doby dozvuku kolísají, je potřeba se podívat na jejich rozptyl napříč frekvenčním spektrem. Tato odchylka změřených hodnot byla zjišťována u třídu techniků, ve které byla provedena většina podrobnějších měření, znázorněna je pro všesměrový zdroj na grafu 9 a pro zdroj směrový na grafu 10.



Graf 9 - Minimální a maximální naměřené hodnoty doby dozvuku pro všesměrový zdroj (technici)



Graf 10 - Minimální a maximální naměřené hodnoty doby dozvuku pro směrový zdroj (technici)

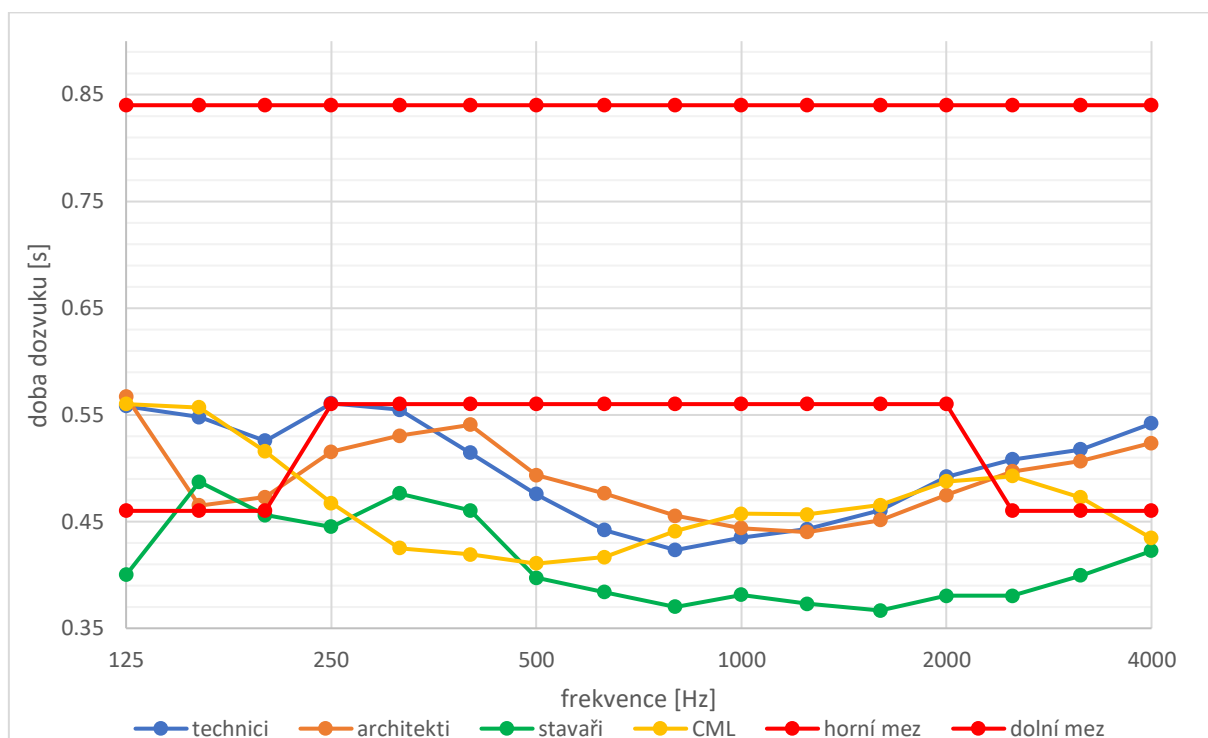
Z grafu 9 je patrné, že při měření se všesměrovým zdrojem jsou rozdíly mezi maximem a minimem naměřených hodnot napříč frekvenčním spektrem poměrně vyrovnané. Větší nárůst tohoto rozdílu je na frekvencích okolo 250 Hz. V případě měření se směrovým zdrojem zvuku (graf 10) jsou rozdíly mezi maximy a minimy naměřených hodnot již větší, jejich velikost navíc ve frekvenčním spektru kolísá. Obzvláště velké rozdíly mezi maximy a minimy jsou na vyšších frekvencích od přibližně 2000 Hz. Zde je již patrná závislost umístění zdroje zvuku a měřicího mikrofonu na době dozvuku v daném místě.

3.4.5. Porovnání naměřených výsledků s požadavky norem

Tato kapitola je zaměřena na porovnání výsledků měření ve všech učebnách s požadavky normy české i norem zahraničních.

Česká norma ČSN 73 0527 [3] uvádí jako doporučenou hodnotu doby dozvuku pro učebny 0,7 s, s tím, že připouští určitý interval v okolí této hodnoty, který je zobrazen na grafu 11..

Porovnání naměřených výsledků s doporučením české normy je znázorněno v grafu 11.



Graf 11 - Porovnání naměřených a požadovaných hodnot doby dozvuku - ČSN (technici)

Zde je patrné, že dle české normy je současný stav místnosti z hlediska doby dozvuku nevyhovující a bylo by potřeba hodnoty zvýšit. Pokud se však budeme řídit současnými trendy a požadavky v zahraničí dojdeme k závěru, že česká norma je v tomto ohledu již zastaralá a že v případě porovnání naměřených výsledků se zahraničními požadavky, můžeme dojít k mnohem lepší shodě.

Například odchylka našich změřených hodnot od hodnot doporučených ve finské normě [2] je výrazně menší než od hodnot uvedených v normě české a v případě porovnání s australskou studií [5] jsou výsledky ještě příznivější. Toto porovnání jen potvrzuje výše zmíněný fakt o přílišné stručnosti české normy, kdy jí doporučené hodnoty nekorrespondují se současným trendem zkracování doby dozvuku.

3.5. Vyhodnocení výsledků měření srozumitelnosti řeči

Dalším měřeným a zkoumaným parametrem byla srozumitelnost. Hodnotu srozumitelnosti lze získat nepřímou metodou, která je popsána v článku 3.3 této práce, z naměřených impulzních odezev, a proto nebylo potřeba žádného dalšího specifického měření. Umístění zdroje zvuku i mikrofونů tak zůstalo identické. I v tomto případě bylo využito měření jak se všesměrovým, tak směrovým zdrojem zvuku. Vyhodnocovalo se tak celkem 6 měření, vždy pro každý typ zdroje tři různá rozmístění.

Jak již bylo v této práci uvedeno, srozumitelnost je reprezentována jedním číslem – indexem přenosu řeči nabývajícím hodnoty od 0 do 1.

Po zpracování měření nám pro třídu techniků vyšla průměrná hodnota indexu přenosu řeči 0,77, stejný výsledek byl dosažen, jak pro všesměrový zdroj, tak modelovou hlavu. Pokud se podíváme na konkrétní hodnoty indexu přenosu řeči pro jednotlivé polohy a typy zdroje (tabulka 10) nezjistíme žádný výrazný rozdíl. Lze tedy konstatovat, že pozice mluvčího ani směr jeho natočení, nijak výrazně neovlivňuje průměrnou srozumitelnost ve třídě.

	všesměrový zdroj A	všesměrový zdroj B	všesměrový zdroj C	směrový zdroj A	směrový zdroj B	směrový zdroj C
hodnota STI [-]	0,748	0,784	0,766	0,759	0,782	0,765
	všesměrový zdroj - průměr			směrový zdroj - průměr		
hodnota STI [-]	0,766			0,769		

Tabulka 10 - Naměřené hodnoty srozumitelnosti (technici)

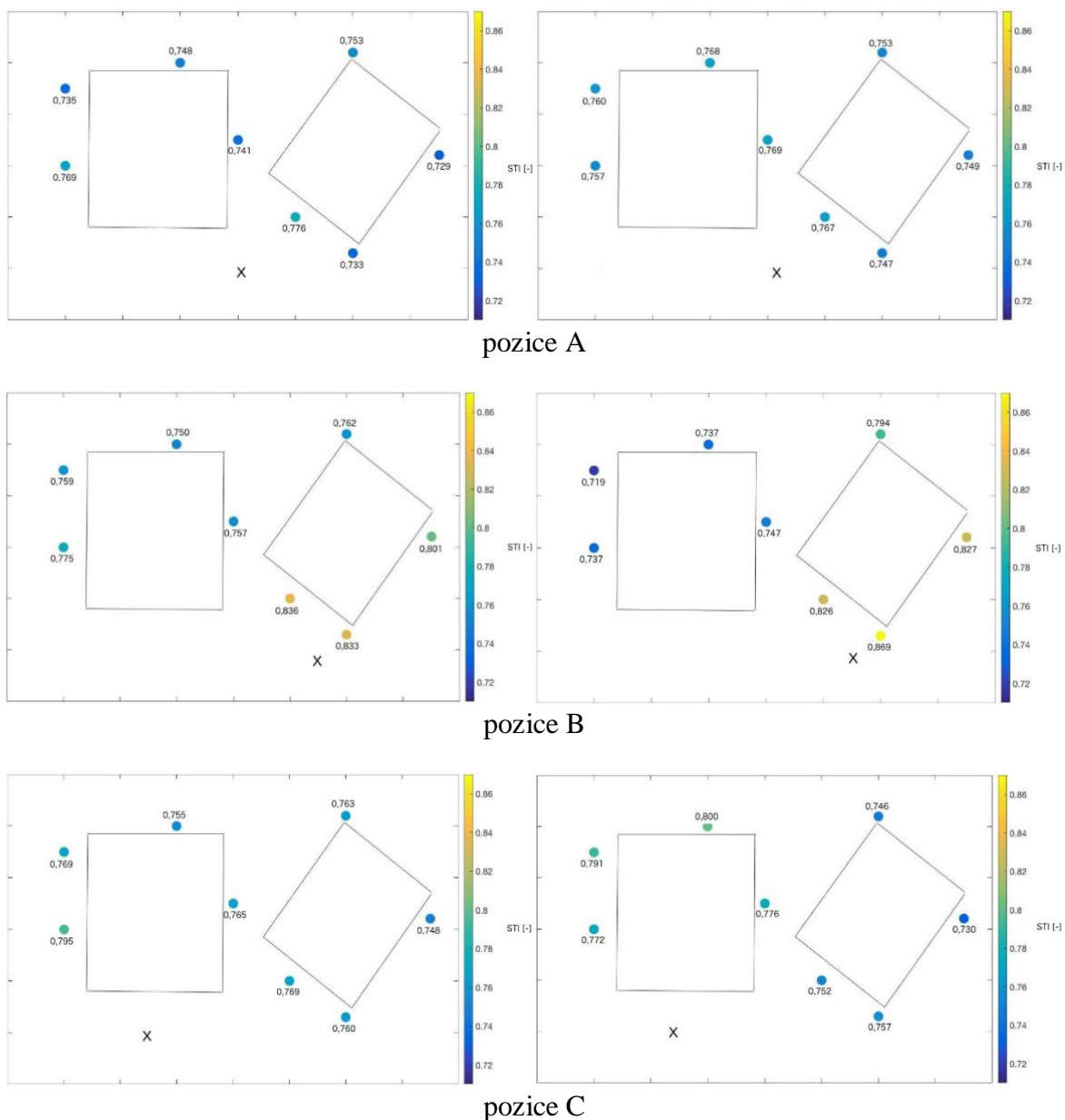
Dané měření nám však přineslo i další zajímavou informaci v podobě rozložení kvality srozumitelnosti napříč celým měřeným prostorem. Z logiky a zkušeností každého posluchače vyplývá, že srozumitelnost není ve všech místech prostoru stejná a obzvláště s narůstající vzdáleností od zdroje zvuku by se její hodnota měla snižovat.

Tento předpoklad potvrzuje i naše měření, jehož výsledky jsou zobrazeny na grafu 12. Graf zobrazuje zjednodušený půdorys třídy s, pro lepší orientaci, zakreslenými lavicemi.

Křížek označuje polohu zdroje zvuku, barevné body označují jednotlivá měřicí místa a jejich barva pak konkrétní hodnotu srozumitelnosti. Z obrázku je patrné, že v místech neblíže zdroji zvuku je srozumitelnost nejlepší a s rostoucí vzdáleností hodnota srozumitelnosti klesá. Průměrná hodnota srozumitelnosti v jednotlivých lavicích, při různých umístěních zdroje zvuku je uvedena v tabulce 11.

všesměrový zdroj

směrový zdroj (modelová hlava)



Graf 12 - Rozložení srozumitelnosti (technici)

	STI [-]					
	všesměrový zdroj			směrový zdroj		
	A	B	C	A	B	C
lavice vlevo	0,748	0,760	0,771	0,764	0,735	0,785
lavice vpravo	0,748	0,808	0,760	0,754	0,829	0,746

Tabulka 11 - Rozložení srozumitelnosti (technici)

3.5.1. Porovnání naměřených výsledků s požadavky normy

Pokud bychom chtěli porovnat a zhodnotit námi změřené výsledky s konkrétními doporučeními zjistili bychom následující. V českých normách a doporučeních není srozumitelnost ve třídě řešena, a tak nám ani neposkytuje žádnou doporučenou hodnotu. Náš výsledek však můžeme porovnat s doporučením Finské normy a Australské studie. Finská norma uvádí jako potřebnou minimální hodnotu srozumitelnosti pro třídy kategorie A a B 0,8. Pro kategorii C pak alespoň 0,7. Australská studie je v tomto ohledu mírnější a definuje minimální hodnotu srozumitelnosti 0,6. Je tak patrné, že třída techniků splňuje z hlediska srozumitelnosti požadavky australské studie, nicméně v případě porovnání s finskou normou ji lze zařadit pouze do nejnižší kategorie C.

Závěr

Tato práce předkládá rešerši současného stavu problematiky akustiky nové generace výukových prostor a navrhuje metodiku hodnocení jejich akustických vlastností. Na základě navržené metodiky byla provedena studie současného stavu místností určených pro výuku v univerzitní základní škole ČVUT. Byly tak plně splněny všechny body zadání této práce.

Hlavními parametry používanými pro hodnocení učebních prostor jsou dnes ve světě doba dozvuku, srozumitelnost řeči s tím, že se přihlíží k hluku pozadí. V práci bylo zjištěno, že ve světě panuje tendence snižovat doporučenou dobu dozvuku v učebnách, v tomto ohledu je norma ČSN 73 0527 [3] již zastaralá a byla by vhodná její aktualizace. Zahraniční dokumenty častěji specifikují dobu dozvuku pro neobsazený prostor. Standardně se pro hodnocení prostor používá i srozumitelnost řeči v podobě doporučených hodnot parametru – indexu přenosu řeči. Detailním měření bylo zjištěno, že hodnoty doby dozvuku zkoumaných učeben korespondují se současným světovým trendem a jsou nižší než rozsah hodnot, které vymezuje doporučený interval v normě [3]. Při měření byl zjištěn nedostatek ve vyrovnanosti hodnot doby dozvuku napříč frekvenčním spektrem. Tento jev byl s největší pravděpodobností způsoben podhledy umístěnými po celé ploše stropu, kdy dle měření mají tyto podhledy na frekvencích okolo 1000 Hz největší činitel pohltivosti. Učebny jsou tak v tomto frekvenčním pásmu přetlumeny. Této situaci nijak neprospívá ani fakt, že dalším výrazným tlumícím prvkem jsou závěsy před okny. Dále bylo zjištěno, že přítomnost žáků snížila dobu dozvuku přibližně o 0,05s, což představuje snížení přibližně o 10 %.

Průměrná hodnota indexu přenosu řeči (0,77) splňuje zahraniční doporučení. Kromě zjištění celkové hodnoty srozumitelnosti bylo změřeno i její rozložení napříč celým prostorem. Toto měření prokázalo, že hodnoty srozumitelnosti jsou v celé učebně přibližně vyrovnané a nedochází zde k výraznějším odchylkám. Obecně při práci žáků ve skupinkách může vyšší srozumitelnost naopak působit negativně, protože se jednotlivé skupiny budou mezi sebou rušit. V této práci bylo zjištěna řada poznatků, které se vztahují na novou generaci učebních prostorů a bylo by vhodné na ni dále navázat, např. podrobnějším studiem srozumitelnosti řeči a vlivem hluku pozadí na ni např. při formě výuky ve skupinách..

Zdroje

- [1]. European Schoolnet: The Future Classroom Lab. *European Schoolnet* [online]. [cit. 2018-03-26]. Dostupné z:
<http://fcl.eun.org/documents/10180/13526/FCL+learning+zones+Dec+2016/a091a761-7a63-443e-afe0-d1870e430686>
- [2]. PÄÄKKÖNEN, Rauno, Tommi VEHVILÄINEN, Jaana JOKITULPPO, Olli NIEMI, Suvu NENONEN and Juha VINHA. Acoustics and new learning environment - A case study. *Applied Acoustics*. 2015, 2015(100), 74-78
- [3]. ČSN EN ISO 73 0527: *Akustika – Projektování v oboru prostorové akustiky – Prostory ve školách*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2005
- [4]. ČSN EN ISO 3382-3: *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 3: Otevřené kanceláře*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012
- [5]. ROBINSON, Amanda, ROSE MUNRO, Leanne. *New generation learning environments: creating good acoustic environments – policy to implementation*. Melbourne, Inter-noise, 2014
- [6]. DIN 18041: *Hörsamkeit in Räumen*. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH & Co.
- [7]. Nařízení vlády č. 272/2011 Sb.: *Nařízení vlády o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací*
- [8]. Vyhláška č.410/2005 Sb.: *Vyhláška o hygienických požadavcích na prostory a provoz zařízení a provozoven pro výchovu a vzdělávání dětí a mladistvých*.
- [9]. ČSN EN ISO 60268-16: *Elektroakustická zařízení – část 16: Objektivní hodnocení srozumitelnosti řeči indexem přenosu řeči*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012
- [10]. ČSN EN ISO 3382-2: *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 2: Doba dozvuku v běžných prostorech*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012
- [11]. TUČEK, J.: *Měření impulsové odezvy v akustice*, Diplomová práce, ČVUT, Fakulta elektrotechnická, Katedra fyziky.
- [12]. ČSN EN ISO 3382-1: *Akustika – Měření parametrů prostorové akustiky – Část 1: Prostory pro přednes hudby a řeči*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [13]. IEC 60268-16:2011: *Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*, 4.vydání

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Doporučené objemy prostor	8
Tabulka 2 - Doporučené doby dozvuku	9
Tabulka 3 - Porovnání doporučených hodnot doby dozvuku mezi normami	9
Tabulka 4 - Porovnání doporučených hodnot indexu přenosu řeči	13
Tabulka 5 - Porovnání doporučených hodnot srozumitelnosti mezi normami	28
Tabulka 6 - Naměřené hodnoty doby dozvuku	30
Tabulka 7 - Změna doby dozvuku v závislosti na obsazenosti učebny (technici)	33
Tabulka 8 - Naměřené hodnoty doby dozvuku v závislosti na roztažení žaluzií (architekti)	34
Tabulka 9 - Naměřené hodnoty doby dozvuku v závislosti na typu a umístění zdroje (technici)	36
Tabulka 10 - Naměřené hodnoty srozumitelnosti (technici)	40
Tabulka 11 - Rozložení srozumitelnosti (technici)	41

Seznam obrázků

Obrázek 1- Model Future Classroom Lab	4
Obrázek 2 - Finský model nových výukových prostor	5
Obrázek 3 - Princip metody TSP	15
Obrázek 4 - Schématický náčrt školy	22
Obrázek 5 - Schématický náčrt místnosti (technici)	24
Obrázek 6 - Schématický náčrt místnosti (architekti)	25
Obrázek 7 - Schématický náčrt místnosti (stavaři)	26
Obrázek 8 - Schématický náčrt místnosti (CML)	27

Seznam grafů

Graf 1 - Doporučené doby dozvuku v závislosti na objemu - Německo	10
Graf 2 - Doporučené doby dozvuku v závislosti na objemu – ČR	11
Graf 3 - Toleranční pásmo hodnot doby dozvuku - ČR	11
Graf 4 - Toleranční pásmo hodnot doby dozvuku - Německo	12
Graf 5 - Doby dozvuku v jednotlivých učebnách	31
Graf 6 - Závislost doby dozvuku na obsazenosti učebny (technici)	32
Graf 7 - Závislost doby dozvuku na poloze žaluzií (stavaři)	34
Graf 8 - Doby dozvuku pro různé zdroje zvuku (technici)	37
Graf 9 - Minimální a maximální naměřené hodnoty doby dozvuku pro všesměrový zdroj (technici)	38
Graf 10 - Minimální a maximální naměřené hodnoty doby dozvuku pro směrový zdroj (technici)	38
Graf 11 - Porovnání naměřených a požadovaných hodnot doby dozvuku - ČSN (technici)	39
Graf 12 - Rozložení srozumitelnosti (technici)	41

Seznam příloh

Fotografie 1 – Rozmístění měřicí aparatury (technici)	48
Fotografie 2 – Třída architektů	49
Fotografie 3 – Třída stavařů	50
Fotografie 4 – CML	51

Přílohy



Fotografie 1 - Rozmístění měřicí aparatury (technici)



Fotografie 2 – Třída architektů



Fotografie 3 – Třída stavařů



Fotografie 4 – CML