



České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky

Bakalářská práce

Metody klasifikace stavebního odpadu

Lukáš Javorský

Obor:

Elektronika a komunikace

Vedoucí:

Doc. Ing. Stanislav Vitek, PhD.

Praha, Květen 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Javorský** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **498882**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Elektronika a komunikace**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Metody klasifikace stavebního odpadu

Název bakalářské práce anglicky:

Methods of Demolition Waste Classification

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je návrh a implementace jednoduchého zařízení pro identifikaci druhu stavebního odpadu, založeného na měření zvukové pohltivosti materiálu.

Při vypracování se řiďte následujícími pokyny:

- 1) navrhnete a implementujete zařízení pro orientační měření vlastností materiálů s využitím ultrazvukových měničů
- 2) navrhnete algoritmus, který na základě naměřených experimentálních dat umožní jednotlivé materiály rozeznat
- 3) diskutujte možnosti reálného nasazení zařízení

Seznam doporučené literatury:

- [1] NAKASHIMA, Shota, et al. Application of ultrasonic sensors in road surface condition distinction methods. Sensors, 2016, 16.10: 1678.
[2] OHTANI, Kozo; BABA, Mitsuru. An identification approach for object shapes and materials using an ultrasonic sensor array. In: 2006 SICE-ICASE International Joint Conference. IEEE, 2006. p. 1676-1681.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D. katedra radioelektroniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **09.02.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: _____

Platnost zadání bakalářské práce: **22.09.2024**

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
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

ANOTACE

Práce se zabývá problematikou stavebních a demoličních odpadů a možnostmi jejich klasifikace. V rámci práce bylo sestrojeno ultrazvukové zařízení, které slouží k rozpoznání jednotlivých SDO. Byla provedena série měření, při které úspěšnost správné klasifikace pomocí tohoto zařezení dosahovala 91 %. Při klasifikaci bylo využito strojového učení.

KLÍČOVÁ SLOVA

klasifikace stavebního demoličního odpadu; ultrazvukový senzor; stavební a demoliční odpad; akustická pohltivost; strojové učení

ABSTRACT

This thesis deals with the issue of construction and demolition waste and the possibilities of its classification. An ultrasonic device was constructed to recognize various construction and demolition waste. A series of measurements were taken in which the success rate of correct classification using this device was 91 %. Machine learning was applied in the classification.

KEYWORDS

classification of construction and demolition waste; ultrasonic sensor; construction and demolition waste; acoustic absorption; machine learning

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych zde poděkoval panu doc. Ing. Stanislavu Vítkovi, Ph.D. za jeho ochotu, čas i cenné rady, které mi poskytl při vedení této bakalářské práce.

PROHLÁŠENÍ

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.

HOW TO CITE

JAVORSKÝ, Lukáš. *Metody klasifikace stavebního odpadu*: bakalářská práce. Praha: České Vysoké Učení Technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra Radioelektroniky, 2023. 25 s. Vedoucí práce byl Doc. Ing. Stanislav Vítek, PhD.

Obsah

Seznam obrázků	xv
Seznam tabulek	xvii
Seznam zkratk	xix
1 Úvod	1
2 Teoretický rozbor	3
2.1 Typy stavebního odpadu	3
2.2 Standardní metody třídění stavebního odpadu	3
2.3 Možnosti automatizace klasifikace	6
3 Návrh senzoru pro klasifikaci SDO	7
3.1 Ultrazvuk a jeho vlastnosti	7
3.2 Ultrazvukový senzor	8
3.3 Způsoby měření utrazvukem	9
3.4 Ultrazvukový měřič vzdálenosti HC-SR04	10
3.5 Návrh zařízení	11
4 Měření	13
4.1 Měřené vzorky	13
4.2 Uspořádání měřicího pracoviště	14
4.3 Předzpracování dat	15
4.4 Extrakce příznaků	16
4.5 Klasifikace	17
4.5.1 Algoritmus k-nejbližších sousedů	19
4.5.2 SVM	19
4.5.3 Rozhodovací strom	19
4.5.4 Výsledky klasifikace	20
5 Závěr	21
Literatura	21

Seznam obrázků

1.1	Struktura odpadů v EU v roce 2020	1
2.1	Příklady stavebního a demoličního odpadu	3
2.2	Schéma typického procesu recyklace SDO. [10]	5
2.3	Recyklační linky na stavební a demoliční odpad	5
2.4	Struktura třídícího systému s 3D kamerou a laserem [14]	6
3.1	Řez piezo měničem	8
3.2	Způsoby uspořádání měničů při měření ultrazvukem [29]	9
3.3	Ultrazvukový senzor HC-SR04 [33]	10
3.4	Měřicí souprava a držák na senzory	11
4.1	Měřené vzorky I.	13
4.2	Měřené vzorky II.	14
4.3	Schéma měřicího pracoviště a držák osazený ultrazvukovými senzory	15
4.4	Změřené odrazy od jednotlivých materiálů	16
4.5	Znázornění časových oken na odrazu od dřeva	17
4.6	Výsledek analýzy	18
4.7	Matice záměn modelu rozhodovací strom	20

Seznam tabulek

2.1	Dělení SDO dle Katalogu odpadů [6]	4
3.1	Parametry ultrazvukového senzoru HC-SR04 [33]	10
4.1	Tabulka přesnosti vyzkoušených modelů	20

Seznam zkratek

3D trojdimenzionální. 6

DT Rozhodovací strom (anglicky Decision tree). 19

k-NN Algoritmus k-nejbližších sousedů. 18

PCB Polychlorované bifenyle. 4

POPs Perzistentní organické polutanty. 4

RGB Barevný model (z angličtiny red, green, blue). 6

SDO Stavební a demoliční odpad. xv, xvii, 1–6, 13, 14, 21

STFT Krátkodobá Fourierova transformace (anglicky Short-time Fourier transform). 10

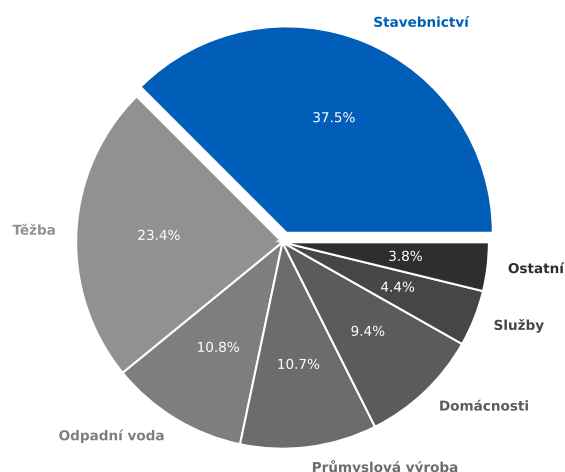
SVM Metoda podpůrných vektorů (anglicky Support vector machine). 19

SWIR Infračervené záření krátké vlnnové délky (anglicky Shortwave infrared). 7

1 Úvod

Stavebnictví je hlavním spotřebitelem minerálních a neobnovitelných zdrojů [1]. Stavební a demoliční odpad (SDO) představuje více než jednu třetinu veškerého odpadu vyprodukovaného v Evropské unii, podle dat které poskytl Eurostat [2] v roce 2020 konkrétně 37,5 %. Zahrnuje veškerý odpad produkovaný při výstavbě a demolici budov a infrastruktury. SDO obashuje širokou škálu materiálů, například beton, cihly, dřevo, sklo, kovy, plasty a další. Některé složky SDO mohou být hodnotné a znovu použitelné [3]. I přes snahy zvládnout problém s SDO, skladování na skládkách a downcycling stále převažuje.¹

Existují dvě hlavní příčiny současné neuspokojivé situace ohledně SDO: nízká poptávka po opětovně použitelných nebo recyklovaných materiálech a velmi malá míra návratnosti. Obecně je nedostatek důvěry koncových zákazníků v kvalitu recyklovaného SDO způsoben nedostatečným tříděním, kontaminací a nedostatečnou kontrolou nad kvalitou a stejnorodostí materiálu. Důvěryhodnost recyklovaných stavebních materiálů by bylo možné zvýšit následujícími způsoby: (1) lepší organizací SDO na staveništi, aby bylo zabráněno kontaminaci recyklovatelného odpadu při výstavbě a demolici a (2) dokonalejším tříděním stavebního a demoličního odpadu mimo stavenišť. Obou cílů lze dosáhnout automatickou klasifikací SDO, kterou se tato bakalářská práce zabývá.



Obř. 1.1: Struktura odpadů v EU v roce 2020

Stavební firmy se v posledních letech potýkají se zvyšujícím se nedostatkem stavebních surovin, jako je například stavební kámen a štěrkopísky. Přestože v geologických vrstvách je těchto surovin dostatek, obyvatelé evropských států jsou proti rozvoji jejich těžby. Stavebnictví je nedílnou součástí ekonomiky. Současná situace je z pohledu cirkulární ekonomiky dlouhodobě neudržitelná a jedním z možných řešení je opětovné používání stavebních materiálů. Recyklace stavebních odpadů zásadně snižuje spotřebu primárních nerostných surovin [1]. Metoda uvedená v této práci by tedy mohla být použita k podpoře cirkulární ekonomiky, ta je definována jako stav, při kterém je zachována hodnota produktu, materiálu či zdroje co nejdelší dobu a je minimalizována produkce odpadu [4]. Jedná se o jednu ze strategií udr-

¹Downcycling je proces, při kterém se materiály nebo výrobky recyklují nebo upravují na nižší úroveň kvality než měly původně.

žitelného rozvoje.

Cílem práce je navrhnout a implementovat zařízení, pomocí kterého lze spolehlivě rozpoznat druh stavebního odpadu. Z možných řešení jsem vybral metodu, která pracuje na principu měření zvukové pohltivosti. Vzhledem k tomu, že se hrubost povrchu a tvrdost materiálu pro různé materiály liší, mělo by být možné rozpoznat typ materiálu na základě útlumu odražené ultrazvukové vlny od daného materiálu [5].

Práce je strukturována následovně: v Kapitole 2 je teoretický rozbor, který je věnován převážně stavebnímu a demoličnímu odpadu a tomu, jak je s ním nakládáno, v Kapitole 3 se zabývám ultrazvukem, ultrazvukovými senzory, měřením ultrazvukem a je zde popsán návrh senzoru pro klasifikaci SDO, Kapitola 4 je věnována experimentu, způsobu zpracování dat a na konci této kapitoly jsou předneseny výsledky měření a úspěšnost klasifikace a poslední Kapitola 5 obsahuje závěr.

2 Teoretický rozbor

Obsahem této kapitoly je rozdělení stavebních odpadů, krátké pojednání o metodách třídění stavebního odpadu a v poslední podkapitole jsou shrnuty možnosti automatizace klasifikace.

2.1 Typy stavebního odpadu

V České republice vychází kategorizace SDO z Vyhlášky č. 93/2016 Sb o Katalogu odpadů [6], která kromě samotné kategorizace odpadů zavádí právní rámec pro vznik a nakládání s odpady a harmonizuje legislativu s Evropskou Unií. V Katalogu odpadů jsou stavební a demoliční odpady děleny do 8 skupin podle jejich chemického složení, fyzikálních vlastností a dalších parametrů. Tyto skupiny jsou označeny čtyřmístným číslem a dále se dělí na podskupiny, kterým je přiřazeno číslo šestimístné či osmimístné, pokud je za číslem hvězdička jedná se o podskupinu odpadů obsahující nebezpečné látky. Kompletní dělení SDO podle Katalogu odpadů je uvedeno v tabulce 2.1.



(a) Směs betonu, cihel a kameniva [7]



(b) Dřevěné palety [8]

Obr. 2.1: Příklady stavebního a demoličního odpadu

2.2 Standardní metody třídění stavebního odpadu

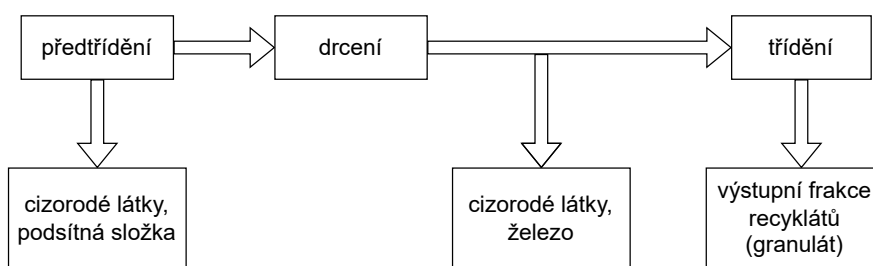
Nejvíce recyklovaným materiálem na světě je ocel (recyklováno asi 90% odpadu), následovaná obalovým sklem (recyklováno asi 74% odpadu) [9]. Ocel je pro recyklaci vhodná proto, že s časem nemění svoji kvalitu. Zatímco třeba papír, další z často recyklovaným materi-

Tab. 2.1: Dělení SDO dle Katalogu odpadů [6]

17	Stavební a demoliční odpady (včetně vytěžené zeminy)
17 01	Beton, cihly, tašky a keramika
17 01 01	Beton
17 01 02	Cihly
17 01 03	Tašky a keramické výrobky
17 01 06*	Směsi nebo oddělené frakce betonu, cihel, tašek a keramických výrobků obsahující nebezpečné látky
17 01 07	Směsi nebo oddělené frakce betonu, cihel, tašek a keramických výrobků neuvedené pod číslem 17 01 06
17 02	Dřevo, sklo a plasty
17 02 01	Dřevo
17 02 02	Sklo
17 02 03	Plasty
17 02 04*	Sklo, plasty a dřevo obsahující nebezpečné látky nebo nebezpečnými látkami znečištěné
17 03	Asfaltové směsi, dehet a výrobky z dehtu
17 03 01*	Asfaltové směsi obsahující dehet
17 03 02	Asfaltové směsi neuvedené pod číslem 17 03 01
17 03 03*	Uhelný dehet a výrobky z dehtu
17 04	Kovy (včetně jejich slitin)
17 04 01	Měď, bronz, mosaz
17 04 02	Hliník
17 04 03	Olovo
17 04 04	Zinek
17 04 05	Železo a ocel
17 04 06	Cín
17 04 07	Směsné kovy
17 04 09*	Kovový odpad znečištěný nebezpečnými látkami
17 04 10*	Kabely obsahující ropné látky, uhelný dehet a jiné nebezpečné látky
17 04 11	Kabely neuvedené pod číslem 17 04 10
17 05	Zemina, kamení, vytěžená jalová hornina a hlušina
17 05 03*	Zemina a kamení obsahující nebezpečné látky
17 05 04	Zemina a kamení neuvedené pod číslem 17 05 03
17 05 04 01	Sedimenty vytěžené z koryt vodních toků a vodních nádrží
17 05 05*	Vytěžená jalová hornina a hlušina obsahující nebezpečné látky
17 05 06	Vytěžená jalová hornina a hlušina neuvedená pod číslem 17 05 05
17 05 07*	Štěrky ze železničního svršku obsahující nebezpečné látky
17 05 08	Štěrky ze železničního svršku neuvedené pod číslem 17 05 07
17 06	Izolační materiály a stavební materiály s obsahem azbestu
17 06 01*	Izolační materiály s obsahem azbestu
17 06 03*	Jiné izolační materiály, které jsou nebo obsahují nebezpečné látky
17 06 03 01*	Izolační materiály na bázi polystyrenu obsahující nebezpečné látky
17 06 04	Izolační materiály neuvedené pod čísly 17 06 01 a 17 06 03
17 06 04 01	Izolační materiály na bázi polystyrenu s obsahem POPs
17 06 04 02	Izolační materiály na bázi polystyrenu
17 06 05*	Stavební materiály obsahující azbest
17 08	Stavební materiál na bázi sádky
17 08 01*	Stavební materiály na bázi sádky znečištěné nebezpečnými látkami
17 08 02	Stavební materiály na bázi sádky neuvedené pod číslem 17 08 01
17 09	Jiné stavební a demoliční odpady
17 09 01*	Stavební a demoliční odpady obsahující rtuť
17 09 02*	Stavební a demoliční odpady obsahující PCB
17 09 03*	Jiné stavební a demoliční odpady obsahující nebezpečné látky
17 09 04	Směsné stavební a demoliční odpady neuvedené pod čísly 17 09 01, 17 09 02 a 17 09 03

álů, je možné recyklovat asi pětkrát, počet recyklací oceli je prakticky neomezený. Navíc ocel zůstává po recyklaci stabilní, na rozdíl o materiálů vyrobených z recyklovaných PET lahví, které uvolňují do životního prostředí mikročástice.

Nejčastěji recyklovanými materiály SDO jsou beton a keramika používané především na násypy, zásypy, výplně nebo podklady pod základovými deskami nebo dlažbou. Méně často se recyklované částice používají jako kamenivo ve výrobě nových betonových směsí nebo nejjemnější frakce jako mikroplniva. Hlavním omezením pro aplikace, jako je výroba betonu (použitelného např. pro stále více populární 3D tisk), je nesprávné třídění, které může vést k pozdější degradaci staveb. Na obrázku 2.2 je znázorněno schéma typické recyklace SDO.



Obr. 2.2: Schéma typického procesu recyklace SDO. [10]

Proces recyklace SDO začíná už na staveništi při demoličních pracích, kdy je třeba jednotlivé složky SDO předtřídit. Oddělit kontaminované látky, oddělit minerální suť od cizorodých materiálů. Minerální suť je třeba dále třídít na betonovou suť, cihelnou suť, živočišné suť a zeminu. Stejně tak je nutné separovat i jednotlivé cizorodé materiály na kovy, organické materiály (převážně dřevo), některé minerální látky (malta, kamenivo) a další odpady (např. azbesty, nátěrové hmoty). Právě kvalita demoliční práce rozhoduje o kvalitě výsledného recyklovaného produktu [10]. Minerální suť dále pokračuje na recyklační linky, ať už mobilní (viz obr. 2.3b) nebo technologicky dokonalejší stacionární (viz obr. 2.3a). V recyklační lince je minerální suť systematicky drcena a tříděna.



(a) Stacionární [11]



(b) Mobilní [12]

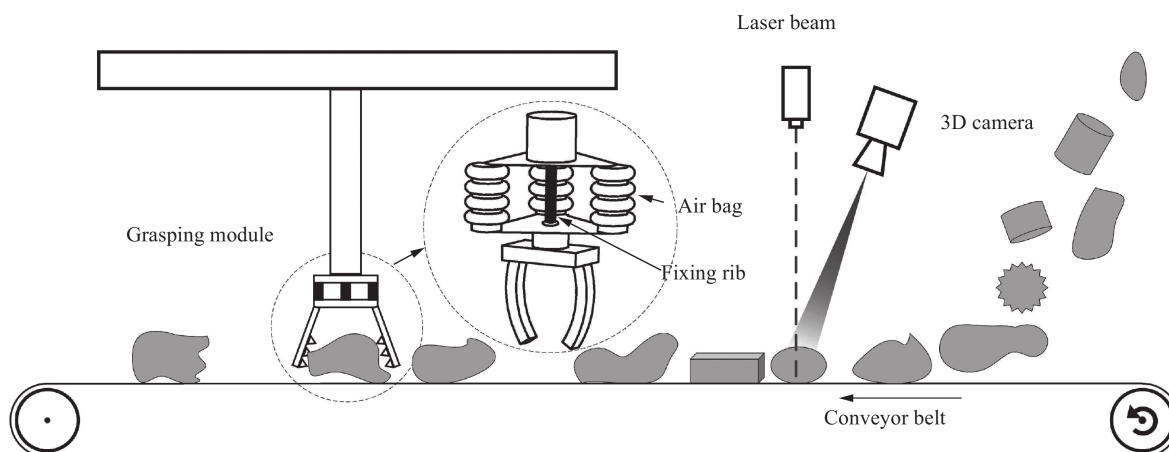
Obr. 2.3: Recyklační linky na stavební a demoliční odpad

Typická stacionární třídící linka sestává z čelistového primárního drtiče, kde jsou rozdr-

ceny největší kusy minerální suti. Za ním obvykle bývá odlučovač železa a magnetický separátor, úkolem těchto dvou přístrojů je odstranit zbylé kovy, které nebyly odděleny při předtřídění. Za magnetickým separátorem často následuje vibrační drtič, ten zbaví nadrcenou suť zbylé zeminy a ostatních nečistot. Následuje sekundární drtič, který suť rozmělní na granulát, který prochází naposledy magnetickým separátorem (aby bylo zajištěno, že se v granulátu nevyskytují žádné kovy). Některé linky disponují vodním separátorem, pomocí něj je granulát vyčištěn od prachu a příměsí. Výsledným produktem takového recyklačního systému je vysoce kvalitní praný granulát, který se většinou ještě za použití vibračního třídíče dělí podle velikosti [13]. Mobilní recyklační linka se narozdíl od té stacionární může nacházet v místě staveniště nebo demolic. Mobilní recyklační linky jsou o něco jednodušší než stacionární, nicméně funkční princip je velice podobný. V České republice je pomocí mobilních recyklačních linek zpracováno přibližně 35 % stavebního a demoličního odpadu [13].

2.3 Možnosti automatizace klasifikace

Je možné automatizovat linku, ale je třeba mít metody jak rozpoznávat jednotlivé druhy SDO. Klasicky se používá Lidar, 3D kamera, klasické RGB kamery, detekce magnetických kovů + alternativní metody. Například tým čínských vědců pod vedením Yue-Dong Ku ve své práci [14] vyvinul systém, který využívá 3D kameru a laserový paprsek pro rozpoznání SDO v pohybu na dopravním pásu, po identifikaci je odpad na dopravním pásu tříděn robotickou rukou (na obrázku 2.4 je struktura jejich třídícího systému). Obdobný třídící systém byl před-



Obr. 2.4: Struktura třídícího systému s 3D kamerou a laserem [14]

staven v článku [15], tento systém se však zaměřuje na klasifikaci veškerých odpadů s použitím RGB-D kamery a konvolučních neuronových sítí. Další klasifikační systém na recyklovatelný odpad je předložen ve studii [16], pro rozpoznání odpadů využívá počítačového vidění (computer vision) a hlubokého učení (deep learning), v rámci studie byl proveden experiment, při kterém systém vykazoval úspěšnost klasifikace 95.87 %. V roce 2019 jiný tým čínských vědců publikoval článek, zabývající se vývojem zařízení disponujícího infračervenou a průmyslovou kamerou, které klasifikuje stavební odpad pomocí algoritmu extreme learning machine [17].

3 Návrh senzoru pro klasifikaci SDO

V kapitole 2.3 byla představena různá řešení automatizace klasifikace SDO. Jedná se téměř výhradně o bezkontaktní senzory založené na principu zpracování obrazové informace v pásmu viditelného záření, případně rozšířeného o SWIR pásmo.

Při výběru senzoru, který by byl vhodný pro měření v podmínkách třídící linky, se můžeme řídit několika hlavními kritérii:

Odolnost - protože linky pro třídění SDO jsou téměř výhradně ve venkovním prostředí, veškeré elektrické a elektronické vybavení včetně senzorů je nutně vystaveno všem možným povětrnostním vlivům. Je proto třeba, aby bylo možné senzory umístit do pouzder a samotná konstrukce senzorů by měla být dostatečně robustní.

Jednoduchost - zejména s ohledem na předchozí kritérium musí být jednoduché senzory připojit do systému a to jak elektricky, tak mechanicky. Předností jsou drátová spojení.

Rychlost - klasifikace SDO může být limitujícím faktorem pro celkovou rychlost třídění na lince. Komplexní systémy počítačového vidění v tomto ohledu mohou být značně nevýhodné.

Cena - senzory by měly být co nejlevnější.

Kromě výše uvedených kritérií by bylo vhodné, aby informace získané pomocí dalšího senzoru vhodně doplňovaly informace ze senzorů stávajících. V systémech založených na principu počítačového vidění není kromě barvy a textury možné získat další informace o materiálu, jako je pružnost, pohltivost, drsnost nebo obecně struktura povrchu. Pro takovou charakterizaci materiálů se v praxi často využívá měření pomocí ultrazvuku, kterému bude věnována následující kapitola.

3.1 Ultrazvuk a jeho vlastnosti

Ultrazvuk je zvukové vlnění o kmitočtu nad hranicemi lidského vnímání, pro člověka s průměrným sluchem je neslyšitelné zvukové vlnění o kmitočtech vyšších než 16 kHz, nicméně někteří zejména mladší lidé jsou schopni běžně slyšet i zvuky o kmitočtech až 20 kHz [18]. V důsledku vysokého kmitočtu má ultrazvukové vlnění kratší vlnovou délku.

V současnosti má ultrazvuk nespočet uplatnění jak je uvedeno v [19] například při měření výšky hladiny kapaliny v nepřístupných prostorech (frekvence od 20 kHz do 60 kHz [20]), měření rychlosti proudění (frekvence obvykle 0,5 MHz - 1,2 MHz [21]), chemického složení a viskozity kapalin a plynů, testování materiálů, měření jakosti a modulu pružnosti betonu na stavebních konstrukcích. Mezi další zásadní aplikace patří defektoskopie ultrazvukem (frekvence od 0,5 MHz do 25 MHz [22]), některé kovy a plastické látky je možné svářet pomocí

ultrazvukových měničů (frekvence 20 kHz – 40 kHz [23]), pomocí intenzivního ultrazvukového pole lze urychlit chemické reakce a vytvořit stabilní emulze, toto pole se také využívá při pájení (frekvence 20 kHz - 60 kHz [24]). Jedno z nejvýznamějších uplatnění nachází ultrazvuk v medicíně především při diagnostice a terapii (frekvence 2 MHz - 30 MHz), ale zasahuje i do biologických dějů.

3.2 Ultrazvukový senzor

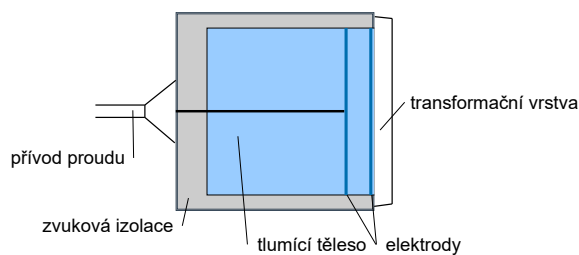
Ultrazvukový senzor je typ elektroakustického měniče, který je schopen detekovat nebo emitovat akustickou energii na širokém rozsahu kmitočtů přesahující 20 kHz. Ultrazvukové senzory můžeme dělit na aktivní a pasivní. Pomocí pasivních ultrazvukových senzorů je možné ultrazvukové vlny pouze přijímat, zatímco aktivní ultrazvukové senzory umožňují ultrazvukové vlny přijímat i generovat [25]. Základem ultrazvukového senzoru je měnič, který převádí akustickou energii na elektrickou či naopak.

Existují elektrostatické, elektromagnetické, magnetostrikční, kapacitní a piezoelektrické měniče. Nejčastěji se používají měniče piezoelektrické, pracují na principu piezoelektrického jevu. V [26] je piezoelektrický jev vysvětlen jako děj, při kterém dochází k oddělení elektrického náboje od piezoelektrického krystalu vlivem mechanického namáhání a obráceně.

Přivedeme-li na měnič, jehož průřez je naznačen na obr. 3.1, napětí, piezoelektrický krystal se deformuje, rozkmitá membránu a tím vysílá ultrazvukové vlny. Naopak dopadají-li ultrazvukové vlny na membránu, piezoelektrický krystal se deformuje a přeměňuje mechanickou energii na elektrickou. Piezoelektrický krystal je broušen na polovinu požadované vlnové délky. Pro získání maxima energie z měniče je třeba provést impedanční přizpůsobení mezi aktivním prvkem a čelem snímače. Piezoelektrické materiály se vyskytují v přírodě, ale umíme je i syntetizovat [27].

Magnetostrikční měniče pracují na principu magnetostrikce. Magnetostrikce je pojem zavedený pro změnu rozměrů feromagnetických materiálů v přítomnosti magnetického pole, tento jev poprvé popsal James Perscott Joule v roce 1847 [28]. Fungují velice podobně jako piezoelektrické měniče, pouze membránu uvádí do pohybu deformace feromagnetického materiálu, kterou zapříčinilo působení magnetického pole. Kolem feromagnetického materiálu je vinutí, magnetické pole vzniká, prochází-li vinutím elektrický proud. Magnetostrikční měniče obvykle generují ultrazvukové vlny o nižších kmitočtech cca 20 kHz - 40 kHz [27].

Ultrazvukové vlny s větší amplitudou je možné generovat pomocí elektrostatického měniče. V podstatě se jedná o kondenzátor, který má dvě paralelní desky jako elektrody, přivedeme-li napětí na elektrody, začnou se vzájemně přitahovat [27]. Jedna z elektrod obvykle bývá tenká lehká membrána.

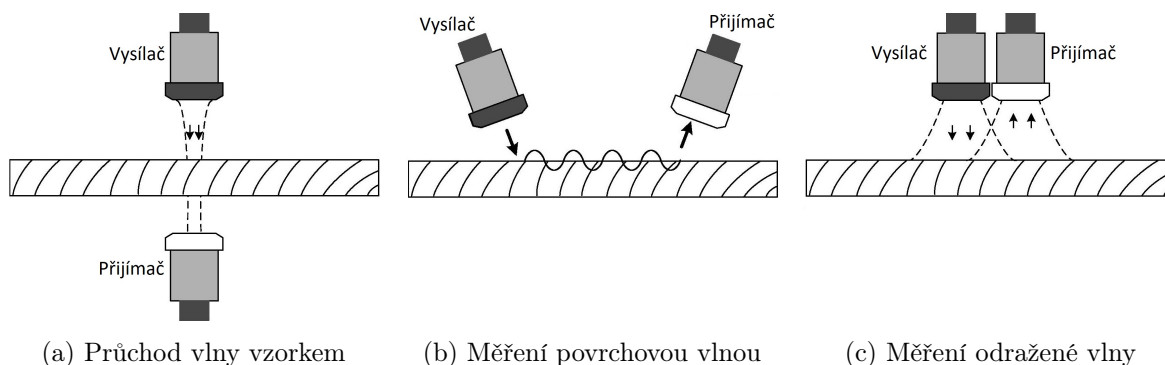


Obr. 3.1: Řez piezo měničem

3.3 Způsoby měření ultrazvukem

Při měření ultrazvukem se obvykle využívají kontaktní metody, při kterých je vysílač přímo přiložen na měřený objekt a zpravidla je zapotřebí kapalná vazba (voda, olej či gel), díky které můžou být ultrazvukové vlny přeneseny s dostatečnou energií k přijímači [29]. Kontaktní metoda je ovšem pro měření stavebních a demoličních odpadů nevhodná, jelikož by byla velmi časově náročná a měřené materiály by mohly být kontaminovány vazebním médiem. V této práci je tedy aplikována bezkontaktní metoda, která nevyžaduje kapalnou vazební médium a ultrazvukové vlny jsou k měřenému vzorku přenášeny vzduchem. Hlavní nevýhodou této metody jsou vysoké ztráty při odrazu vlny způsobené velkým rozdílem akustické impedance vzduchu a měřených materiálů, mezi její výhody patří absence vazebního média, vysoká efektivita a možnost různého uspořádání ultrazvukových měničů [29].

Při bezkontaktním měření ultrazvukem se běžně používají tři způsoby uspořádání měničů: měření útlumu akustické vlny procházející zkoumaný vzorek (viz obr. 3.2a), měření povrchovou vlnou (viz obr. 3.2b) a měření vlny odražené od vzorku (pulse-echo, viz obr. 3.2c). Při měření průchodu akustické vlny vzorkem směřuje vysílač na měřený vzorek a přijímač je umístěn rovnoběžně se směrem šíření akustické vlny materiálem. Při způsobu měření povrchovou vlnou je vysílač vzdálen od přijímače, jsou umístěny ve stejné výšce a pod mírným úhlem míří na měřený vzorek. Očekává se, že vysílač vyšle vlnění na vzorek, na vzorku se vlnění bude šířit povrchovou vlnou do hloubky jedné vlnové délky a nakonec se odrazí směrem k přijímači.



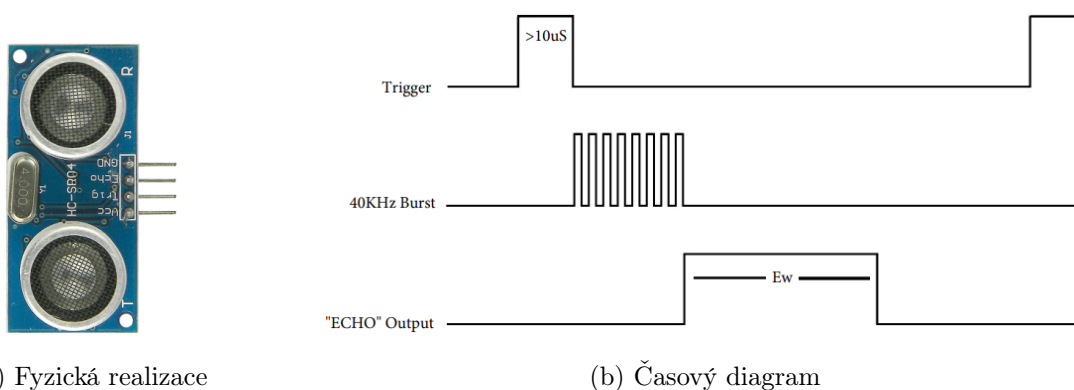
Obr. 3.2: Způsoby uspořádání měničů při měření ultrazvukem [29]

Metody měření útlumu a povrchovou vlnou nejsou pro účely z důvodu nižší flexibility pro terénní měření příliš vhodné. Jako vhodnější metoda se jeví měření odražené vlny, při němž jsou měniče co nejbliž k sobě a směřují na měřený vzorek. Vysílač vyšle akustickou vlnu v pulsu, ten se odrazí od vzorku zpět k přijímači. V dostupné literatuře se nejčastěji pro klasifikaci materiálu uvažovaným způsobem využívá měření doby, za kterou se odražená akustická vlna dostane zpět do přijímače. Tato doba závisí mimo jiné na akustické impedanci zkoumaného materiálu. Ohtani a Baba reportují klasifikaci čtyř různých materiálů (měď, hliník, akrylátové sklo a karton) ze vzdálenosti 290 mm s úspěšností větší než 90% [30]. Iwasaki et al.

použili 40 kHz ultrazvukový měnič k rozpoznání povrchu (asfalt, tráva, hlína, ...) měřením doby odrazu a to ze vzdálenosti 70 cm [5]. Podobný experiment provedli i Nakashima et. al., kteří ovšem dosáhli uspokojivých výsledků ve vzdálenosti až 170 cm nad zkoumaným povrchem [31]. Kim, Park a Choi zkoumali tvar odražené vlny a používali kombinaci STFT (krátkodobá Fourierova transformace) a natrénované konvoluční neuronové sítě [32].

3.4 Ultrazvukový měřič vzdálenosti HC-SR04

V navrhovaném zařízení jsem se rozhodl použít aktivní ultrazvukový senzor HC-SR04 (výrobce Elegoo Technology), určený primárně pro měření vzdálenosti. Tento senzor sestává ze dvou piezoelektrických měničů, jeden slouží jako vysílač a jeden jako přijímač. Uspořádání senzoru je patrné z obr. 3.3a.



Obr. 3.3: Ultrazvukový senzor HC-SR04 [33]

Během činnosti senzoru vysílač vysílá 8 pulsů ultrazvukového vlnění o frekvenci 40 kHz (viz obr. 3.3b), vlny se odrazí od překážky směrem k senzoru, kde jsou přijímačem převedeny na elektrický signál. Z časového rozdílu mezi vysláním a přijmutím ultrazvukových vln lze vypočítat vzdálenost mezi senzorem a bodem odrazu.

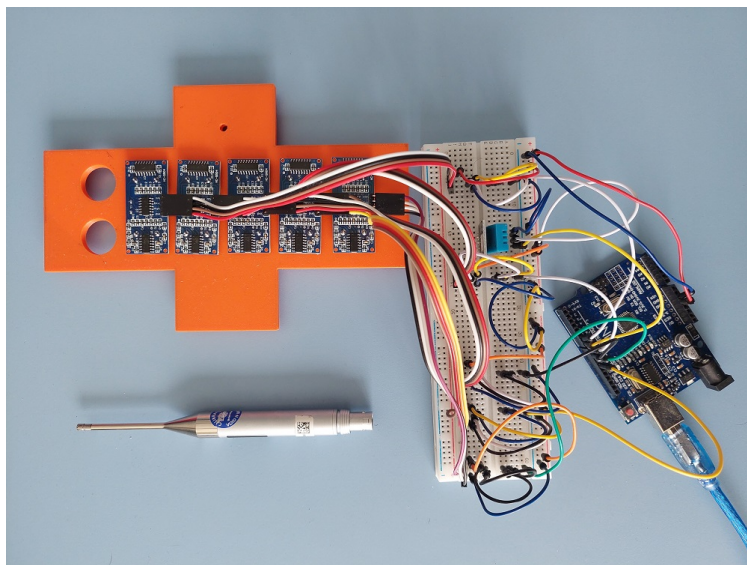
Tab. 3.1: Parametry ultrazvukového senzoru HC-SR04 [33]

Provozní napětí	5 V
Provozní proud	15 mA
Frekvence	40 kHz
Maximální dosah	4 m
Minimální dosah	2 cm
Měřicí úhel	15°

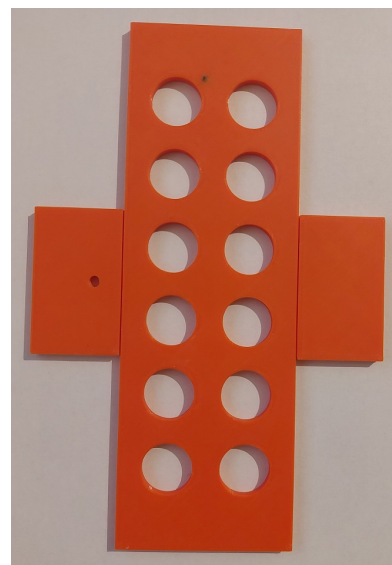
V tabulce 3.1 jsou uvedeny parametry senzoru HC-SR04. Technická realizace senzoru, zaměřená pouze na účel měření vzdálenosti, bohužel neumožňuje získat signál odražené vlny. V navrhovaném zařízení proto bude pro příjem odražených vln použit externí mikrofon.

3.5 Návrh zařízení

V této podkapitole popíšeme navrhované zařízení. Toto jednoduché zařízení sestává z 5 ultrazvukových senzorů HC-SR04, mikrokontroleru Arduino UNO a měřicího mikrofónu značky Brüel & Kjær 4138-C-006. Ultrazvukové senzory jsou připevněny k drážku vytisklému na 3D tiskárně viz obr. 3.4a, pro návrh držáku byl použit volně dostupný software FreeCAD.



(a) Měřicí souprava



(b) Produkt z 3D tiskárny

Obr. 3.4: Měřicí souprava a držák na senzory

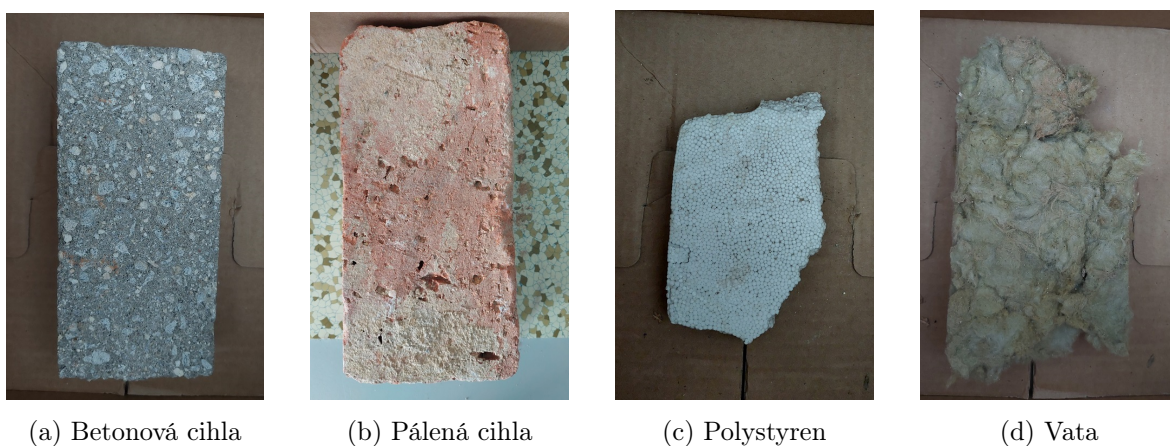
Pro obsluhu mikrokontroleru byl implementován jednoduchý program, který umožňuje zvolit, jaký z pěti ultrazvukových senzorů bude zrovna aktivní a jak dlouhý bude interval mezi vysláním pulsů.

4 Měření

V rámci této bakalářské práce byl v laboratorních podmínkách proveden experiment s cílem ověřit, zda je možné provést klasifikaci SDO s použitím ultrazvukových měničů. Tato kapitola je věnována popisu vzorků SDO použitých při experimentálním měření, charakteristice měřicího pracoviště a způsobu zpracování a analýzy dat, která byla při měření pořízena. Aby bylo možné výsledky měření prakticky využít, byla navržena metoda extrakce příznaků, které pak slouží jako vstupní data pro metody strojového učení. V závěru kapitoly následuje krátké shrnutí a vyhodnocení výsledků tohoto měření.

4.1 Měřené vzorky

Vzorky stavebního odpadu byly zapůjčeny kolegy z katedry fyziky Fakulty stavební ČVUT. Pro měření jsem ze sady vybral 8 vzorků, které jsou na obrázcích 4.1 a 4.2. Jedná se o dva druhy cihel zbavených malty (betonová cihla na obrázku 4.1a a pálená cihla na obrázku 4.1b), izolační materiál na bázi polystyrenu (obrázek 4.1c), minerální zateplovací vata (obrázek 4.1d), dlaždice bez glazury (obrázek 4.2a), dřevotříska s laminátovým povrchem (obrázek 4.2b), fragment smrkového hranolu (obrázek 4.2c) a ulomený kus betonové cihly (obrázek 4.2d).



Obr. 4.1: Měřené vzorky I.

Ze snímků měřených vzorků je zřejmé, že automatické rozpoznání jednotlivých materiálů na základě obrazové informace nemusí být úplně jednoduché. Řada materiálů je vizuálně velmi podobná a bez hlubší analýzy textury a povrchu může být obtížné je rozlišit. Lze také očekávat, že v reálných podmínkách budou vzorky SDO pokryty prachem a rozhodně nebude

možné zaručit světelné podmínky. Pro tyto případy by bylo pochopitelně více než žádoucí disponovat doplňkovou metodou pro nezávislou analýzu.



Obr. 4.2: Měřené vzorky II.

Vybrané vzorky jsou různorodé a dobře reprezentují nejčastěji se vyskytující SDO. V případě, že bych se rozhodl na práci navázat, by bylo vhodné vzorky rozšířit o skleněné či kovové materiály, nicméně pro účely této práce jsou vybrané vzorky dostatečné.

4.2 Uspořádání měřicího pracoviště

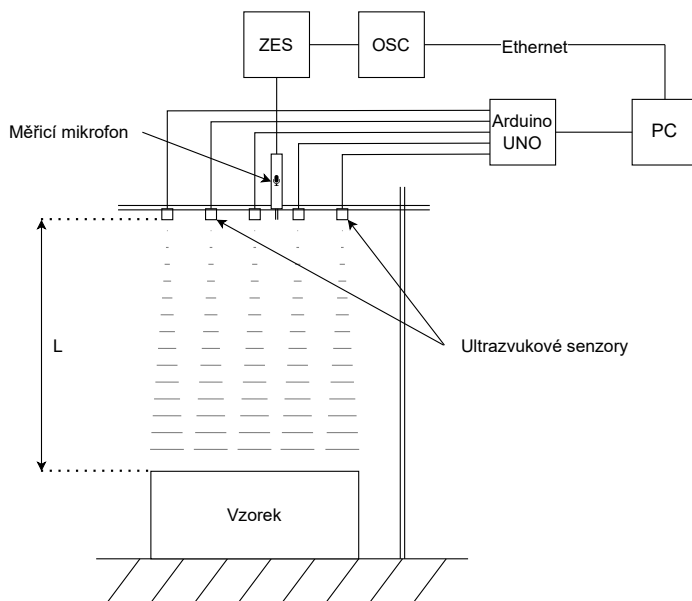
Uspořádání měřicího pracoviště je zřejmé z obrázku 4.3a. Dálkoměrné ultrazvukové senzory HC-SR04 jsou připevněné k držáku (viz obrázek 4.3b) ve výšce L nad měřeným vzorkem. Jednotlivé měniče jsou orientovány tak, že maximum vyzařovací charakteriky měničů směřuje k měřenému vzorku. Senzory jsou obsluhovány pomocí mikrokontroléru Arduino UNO, který je připojený k PC.

Vedle senzorů je k držáku také přichycen měřicí 1/8" mikrofon Brüel & Kjær, který přijímá signál odražený od povrchu měřeného vzorku. Signál je dále upraven pomocí měřicího zesilovače Brüel & Kjær Nexus. Pro účely měření byl na zesilovači nastaven převod 100 mV/Pa.

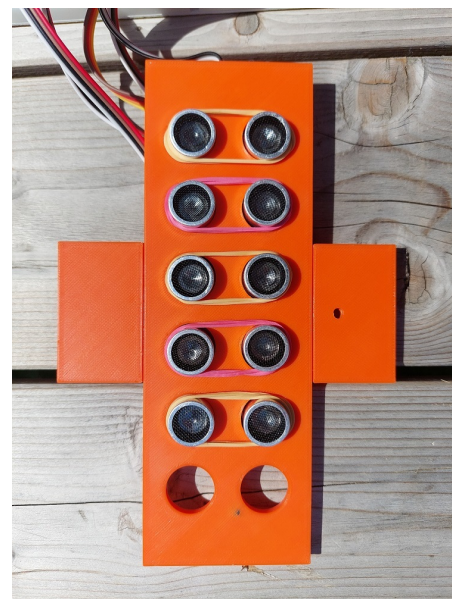
Po zesílení je přijatý signál zobrazen na digitálním osciloskopu Rigol MSO5074. Tento osciloskop je možné ovládat pomocí SCPI protokolu [34] prostřednictvím ethernetového rozhraní. V rámci IoT laboratoře¹ na katedře radioelektroniky ČVUT FEL byl vytvořen pro tento účel jednoduchý SW balík², díky kterému je možná značná automatizace a zrychlení celého procesu měření a zejména ukládání dat.

¹<https://iot.fel.cvut.cz/cz/>

²<https://gitlab.fel.cvut.cz/iot-lab/automated-measurement>



(a) Uspořádání měřicího pracoviště



(b) Držák osazený senzory

Obr. 4.3: Schéma měřicího pracoviště a držák osazený ultrazvukovými senzory

4.3 Předzpracování dat

Měřením byla vytvořena sada záznamů odrazů ultrazvukové vlny od vzorků jednotlivých materiálů. Soubor dat se skládá z 8 sad po 20 realizacích měření, což znamená, že při správném provedení by analýza měla vytvořit osm oddělitelných shluků odpovídajících studovaným materiálům. Příklady změřených odrazů jsou na obrázku 4.4.

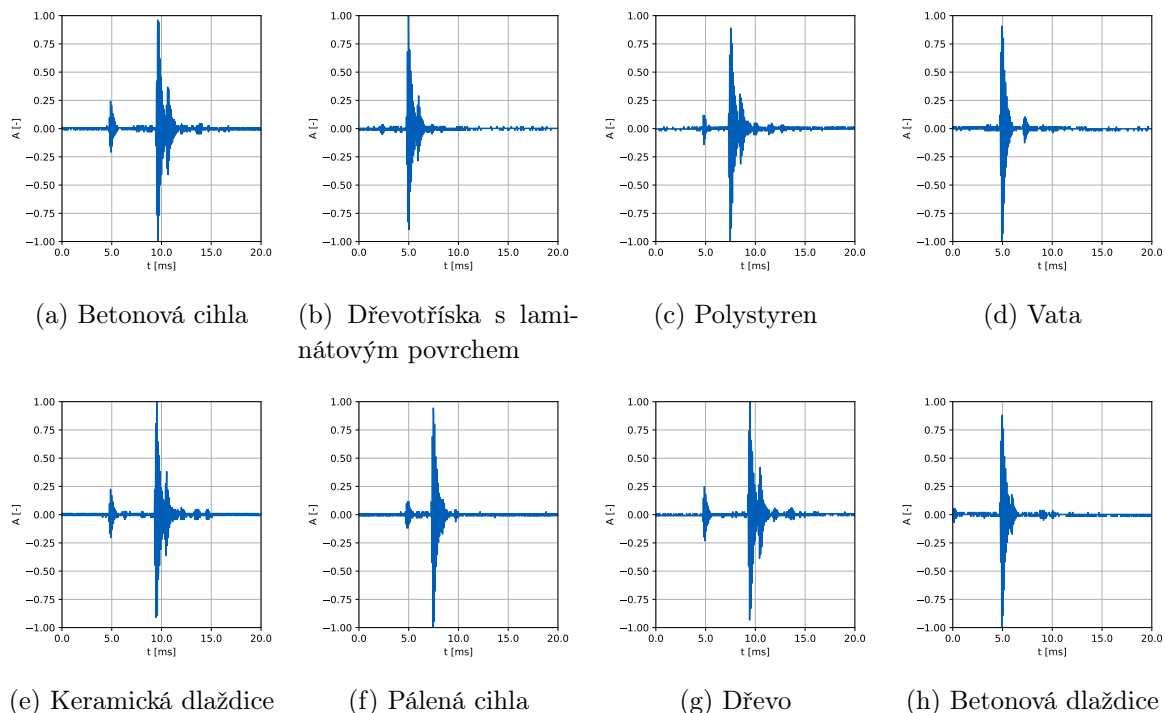
Datové soubory obsahují vždy krátký úzkopásmový signál o frekvenci přibližně 40 kHz, vzorkovaný osciloskopem Rigol MSO5074 se vzorkovací frekvencí 8 GSa/s. Pro jednodušší práci a menší výpočetní náročnost byla data převzorkována na vzorkovací frekvenci 50 kHz. Signály pak byly normalizovány a byla odečtena střední hodnota. Normalizací dat byla sice odstraněna potenciální informace o akustické absorpci materiálu, což však bylo vyhodnoceno jako přijatelné, protože klasifikace má být robustní v terénních podmínkách bez očekávané kalibrace.

Jak ukazují vizualizované datové soubory, všechny signály obsahují jedno výrazné maximum, po kterém následuje menší lokální maximum. Pro přípravu dat k další analýze byl použit průměrující filtr s Gaussovým jádrem o délce impulsní odezvy 12 a byla filtrována absolutní hodnota signálu. Funkce je uvedena ve výpisu 4.1. Poté byl zkoumán poměr dvou nejvýraznějších vrcholů této obálky, aby se zjistilo, zda pomáhá při řešení klasifikační úlohy.

```

1 def envelope (sig, klen):
2     b = klen / 2
3     s = klen / 6

```



Obr. 4.4: Změřené odrazy od jednotlivých materiálů

```

4  x = np.arange(-b, b, 1)
5  ker = norm.pdf(x, 0, s)
6  ker = ker / sum(ker)
7
8  env = np.convolve(abs(sig), ker)
9  return env

```

Kód. 4.1: Filtrace signálu

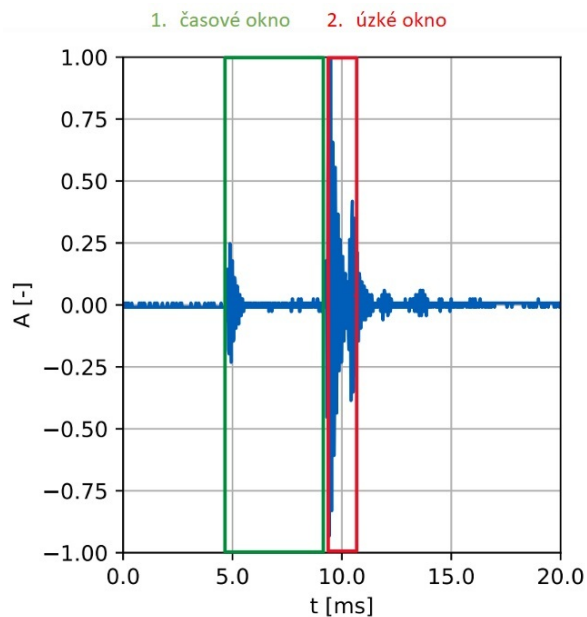
4.4 Extrakce příznaků

Ve většině naměřených dat se před prvním velkým výrazným maximem objeví menší aktivita. Proto byla pro další podrobnější analýzu vybrána dvě časová okna:

1. časové okno, které obsahuje malý zákmit před velkým maximem, pokud je tento zákmit v signálu přítomen; okno končí začátkem prvního výrazného maxima
2. úzké okno, které obsahuje dvě významná maxima v signálu

Pro lepší představu jsou časová okna znázorněná na příkladu odrazu od fragmentu smrkového hranolu (viz 4.2c) na obrázku 4.5.

Pro obě časová okna a celý signál byly vypočítány momenty. První moment, střední hodnota, byl vynechán, protože střední hodnota byla předtím odečtena. Druhý moment, rozptyl, byl vypočten pomocí funkce `numpy.var()` z knihovny NumPy. Momenty řádů vyšších než dva



Obr. 4.5: Znáznornění časových oken na odrazu od dřeva

byly vypočteny jako standardizované momenty, jak je uvedeno v použité funkci ve výpisu 4.2. Testovány byly pouze druhý, třetí a čtvrtý moment.

```

1 def moment (sig , order): # order -th moment of signal
2     nom = np. mean(sig ** order)
3     den = np. mean( sig **2) **( order /2)
4     return nom / den

```

Kód. 4.2: Funkce pro výpočet momentů řádů vyšších než dva

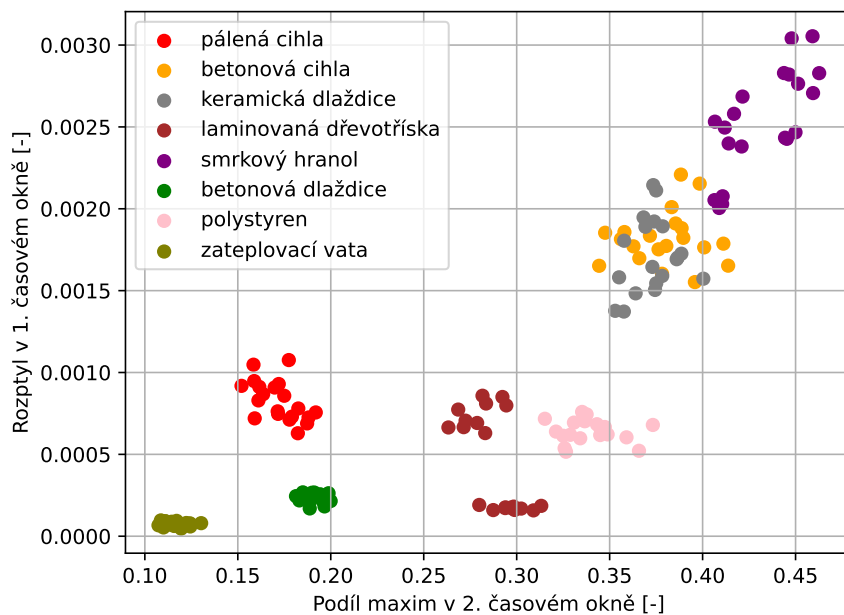
Podíl maximálních hodnot v obou časových oknech se ukázal jako užitečný pro rozdělení datových souborů do tří shluků, z nichž jeden obsahuje pouze jeden materiál (zateplovací vata). Rozptyl prvního časového okna pak pomohl rozdělit jeden ze zbývajících shluků na dva samostatné materiály (červená cihla a úlomek betonové dlaždice) a druhý shluk na dva dílčí shluky. Výsledek této analýzy je znázorněn na obrázku 4.6.

Z naměřených dat je zřejmé, že opakované měření může pomoci klasifikaci materiálu. Ostatní momenty nevykázaly žádné významné zlepšení oproti zobrazenému výsledku.

4.5 Klasifikace

Klasifikace je úloha strojového učení s učitelem, jejímž cílem je zařadit (klasifikovat) prvek množiny vstupních dat do některé z předem definovaných tříd. Ke klasifikaci se používá *model*, který je natrénován z předem známé množiny již klasifikovaných dat, tj. popsanych *příznaky* a rozdělených do příslušných tříd.

V kapitole 4.4 byla popsána metoda popisu jednotlivých měření dvěma příznaky. Tyto



Obr. 4.6: Výsledek analýzy

příznaky a třídy, které klasifikují zkoumané vzorky materiálu, byly uloženy do podoby tabulky ve formátu CSV. Veškeré zpracování probíhá v jazyce Python s využitím modulů *scikit-learn*, *numpy* a *pandas*. Načtení dat je naznačeno ve výpisu 4.3.

```

1 import pandas as pd
2 import numpy as np
3 from sklearn.model_selection import train_test_split
4
5 dataset = pd.read_csv('klasifikace.csv')
6
7 X = dataset.iloc[:, [1, 2]].values
8 y = dataset.iloc[:, [3]].values

```

Kód. 4.3: Načtení dat pomocí knihovny Pandas

Před samotným trénováním modelu jsou data škálována a dále rozdělena na trénovací a testovací podmnožinu v poměru 70:30.

```

1 X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size = 0.30,
2 random_state = 0)
3
4 from sklearn.preprocessing import StandardScaler
5 sc = StandardScaler()
6 X_train = sc.fit_transform(X_train)
7 X_test = sc.transform(X_test)

```

Kód. 4.4: Příprava trénovací množiny

Trénovací data byla použita pro trénování klasifikačních modelů algoritmů následujících metod: k-nejbližších sousedů (k-Nearest Neighbours, k-NN), metody podpůrných vektorů

(Support Vector Machines, SVM) a rozhodovací strom (Decision Tree, DT). V následujícím textu budou tyto algoritmy stručně charakterizovány.

■ 4.5.1 Algoritmus k-nejbližších sousedů

Klasifikace algoritmem k-NN funguje tak, že v N -rozměrném příznakovém prostoru, kde N je počet příznaků popisujících prvek množiny, vyhledá algoritmus k nejbližších sousedů přiřazených do známé třídy. Zkoumaný prvek je pak klasifikován do té třídy, kam patří většina z těchto nejbližších sousedů.

Pro hledání nejbližších sousedů lze využít různých metrik, nejčastější metrikou je Euklidovská vzdálenost. Ve výpisu 4.5 je ukázka vytvoření klasifikátoru, která hledá tři nejbližší sousedy (parametr `n_neighbours`) pomocí modulu `sklearn.neighbors`.

```
1 from sklearn.neighbors import KNeighborsClassifier
2 classifier = KNeighborsClassifier(n_neighbors = 3)
3 classifier.fit(X_train, np.ravel(y_train))
```

Kód. 4.5: Trénování klasifikátoru k-NN

■ 4.5.2 SVM

Při klasifikaci metodou podpůrných vektorů je cílem rozdělit data do jednotlivých tříd, toho lze dosáhnout nalezením optimální separační roviny, která třídy nejlépe odděluje, a to tak, aby se maximalizovala vzdálenost (tzv. margin) mezi nejbližšími příklady různých tříd. Na výsledek klasifikace mají největší vliv podpůrné vektory, tedy vzorky z trénovacího datasetu nacházející se nejbližže separační rovině. Jestliže není možné data separovat lineárně, lze je transformovat pomocí Kernelových funkcí.

Příklad vytvoření klasifikátoru SVM pomocí knihovny `sklearn` je představen ve výpisu 4.6. Použité parametry funkce `svm.svc()`, `gamma` a `C` určují Kernelův koeficient a regulaci.

```
1 from sklearn import svm
2 classifier = svm.SVC(gamma=5, C=10)
3 classifier.fit(X_train, np.ravel(y_train))
```

Kód. 4.6: Trénování klasifikátoru SVM

■ 4.5.3 Rozhodovací strom

Tento klasifikační *model* využívá hierarchiální stromové struktury s uzly a listy, uzly reprezentují otázky a listy určují klasifikaci. Základem algoritmu rozhodovací strom je nalezení *příznaků*, které poskytují největší přesnost separace na základě třídy. Následně se vytvoří uzel a oddělí data podle určité vlastnosti. Při nulové chybě se tvoří další uzel a data se znovu oddělí, v opačném případě nastává rekurze.

Implementace klasifikátoru rozhodovací strom v jazyce Python pomocí modulu `sklearn.tree` je ve výpisu 4.7. Jak je z výpisu patrné, tento algoritmus je neparаметrický.

```

1 from sklearn.tree import DecisionTreeClassifier
2 classifier = DecisionTreeClassifier()
3 classifier.fit(X_train, np.ravel(y_train))

```

Kód. 4.7: Trénování klasifikátoru rozhodovací strom

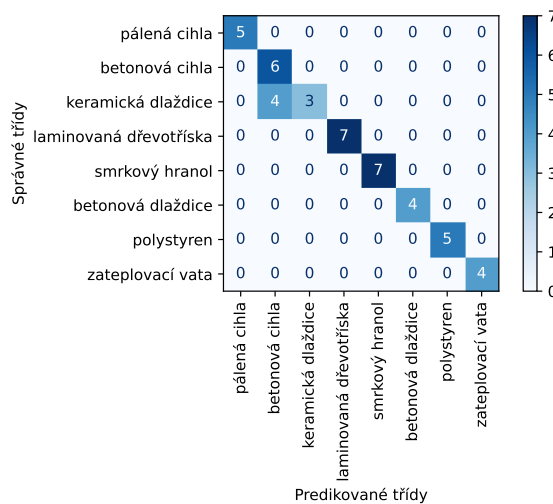
■ 4.5.4 Výsledky klasifikace

Modely byly porovnány na základě vyhodnocovací metriky accuracy (přesnosti), která udává poměr počtu správně klasifikovaných případů ku celkovému počtu případů. Všechny modely vykazovaly vysokou přesnost, kompletní výsledky jsou uvedeny v tabulce 4.1. Nejlepších výsledků bylo dosaženo pomocí rozhodovacího stromu (DT), kdy se úspěšně podařilo klasifikovat 91 % vzorků. Osvědčil se také algoritmus 3-nejbližších sousedů (3-NN), přesnost tohoto modelu byla 0.89.

Model	2-NN	3-NN	4-NN	5-NN	SVM	DT
Accuracy	0.87	0.89	0.82	0.87	0.87	0.91

Tab. 4.1: Tabulka přesnosti vyzkoušených modelů

Pro detailnější analýzu výsledků klasifikace slouží matice záměn, na hlavní diagonále jsou správně zařazené vzorky, vzorky mimo hlavní diagonálu byly klasifikovány nesprávně. Na obrázku 4.7 je matice záměn nejpřesnějšího modelu. V tomhle případě byly 4 keramické dlaždice nesprávně klasifikovány, jako betonové cihly.



Obr. 4.7: Matice záměn modelu rozhodovací strom

5 Závěr

Tato bakalářská práce se věnuje metodám klasifikace stavebního a demoličního odpadu. Zabývá se problematikou SDO a možnostmi jeho recyklace, návrhem senzoru pro klasifikaci SDO a vlastnostmi ultrazvuku.

Na základě zhodnocení kritérií bylo navrženo jednoduché, cenově dostupné, odolné, ultrazvukové zařízení pracující na principu měření akustické energie odražených ultrazvukových vln, pomocí kterého lze po analýze dat s využitím strojového učení klasifikovat stavební a demoliční odpad. Byl proveden experiment, při kterém se podařilo správně klasifikovat algoritmem rozhodovací strom 91% vzorků.

Pro zvýšení úspěšnosti klasifikace SDO by v budoucnu bylo vhodné, zařízení zdokonalit rozšířením o RGB-D kameru či 3D kameru. Také by bylo na místě měřené vzorky rozšířit o kovy a sklo.

Literatura

- [1] ŠKOPÁN, Miroslav. *Recyklované stavební a demoliční odpady jako jeden z pilířů cirkulární ekonomiky ve stavebnictví*. In: *RECYCLING 2020 - Cirkulární ekonomika ve stavebnictví, recyklace a využívání druhotných stavebních materiálů*. Brno, 2020, s. 9-16. ISBN 978-80-214-5894-9.
- [2] Eurostat. *Waste generation, 2020* [online]. [cit. 2023-4-12]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics
- [3] *Construction and demolition waste* [online]. [cit. 2023-3-19]. Dostupné z: https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/construction-and-demolition-waste_en
- [4] European Commission. *Raw materials scoreboard 2018* [online]. [cit. 2023-4-12]. Dostupné z: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/117c8d9b-e3d3-11e8-b690-01aa75ed71a1>
- [5] IWASAKI, Daisuke et al. *Ground material distinction method using reflection intensities obtained by ultrasonic sensor*. In: 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). IEEE, 2012. p. 117-120.
- [6] Vyhláška č. 8 ze dne 12. ledna 2021 o Katalogu odpadů a posuzování vlastností odpadů (Katalog odpadů). In: *Sbírka zákonů Česká republika*. 2021, částka 5, ISSN 1211-1244. Dostupné z: <https://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=z&id=49731>
- [7] *SDO - fotografie* [online]. [cit. 2023-4-25]. Dostupné z: https://www.freepik.com/premium-photo/scrap-remaining-after-demolition-building_6615411.htm
- [8] *The Construction Waste Challenge – How to Do It Green?* [online]. [cit. 2023-4-25]. Dostupné z: <https://highways.today/2020/11/12/construction-waste-challenge/>
- [9] Ocelářská unie. *Ocel je nejvíce recyklovaný materiál na světě*. [online]. [cit. 2023-5-7]. Dostupné z: <https://www.ocelarskaunie.cz/ocel-je-nejvice-recyklovany-material-na-svete/>
- [10] ARSM. *Podstata recyklace stavebních odpadů*. [online]. [cit. 2023-5-5]. Dostupné z: <http://www.arsm.cz/podstata.php>
- [11] CDE Group. *Sodextra S.A - Stacionární recyklační linka ve Francii*. [online]. [cit. 2023-5-6]. Dostupné z: <https://www.cdegroupp.com/about/case-studies/sodextra-sa>
- [12] Recyklační stroje. *INNOCRUSH 75 - mobilní recyklační linka*. [online]. [cit. 2023-5-6]. Dostupné z: <https://www.recyklaclni-stroje.eu/nase-nabidka/drtice-surovin/mobilni-drtice-kamene/odrazove-drtice/innocrush-75/>
- [13] *Jak se recyklují stavební a demoliční odpady*. [online]. [cit. 2023-5-5]. Dostupné z: <https://www.trideniodpadu.cz/jak-se-recykluje-stavebni-odpad>
- [14] KU, Yue-Dong et al. *Optimization of Grasping Efficiency of a Robot Used for Sorting Construction and Demolition Waste*. International Journal of Automation and Computing, 2020. roč. 17, č. 5, s. 691-700. 10.1007/s11633-020-1237-0.

- [15] YU, Yan et al. *A novel detection fusion network for solid waste sorting*. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020. 10.1177/1729881420941779.
- [16] ZHANG, Qiang et al. *Recyclable waste image recognition based on deep learning*. Resources, Conservation and Recycling, 2021. ISSN 0921-3449.
- [17] XIAO, Wen et al. *Development of online classification system for construction waste based on industrial camera and hyperspectral camera*. PloS one, 2019. roč. 14, č. 1. ISBN 1932-6203.
- [18] ENSMINGER, Dale a Leonard J. BOND. *Ultrasonics: fundamentals, technologies, and applications*. 3rd ed. Boca Raton: CRC, ©2012. xxv, 723 s. Mechanical engineering. ISBN 978-0-8247-5889-9.
- [19] KRACÍK, Jiří, Věra ŠANDEROVÁ a Jindřich LEGO. *Fyzika II*. Praha: ČVUT, 1979.
- [20] *Ultrazvukové hladinoměry*. [online]. [cit. 2023-5-22]. Dostupné z: http://www.jsp.cz/cz/sortiment/seznam_dle_kategoriei/snimace_hladiny/teorie-hladina/ultrazvukove-hladinomy/principy-ultrazvukovych-hladinomeru.html
- [21] KADLEC, Karel. *Ultrazvukové průtokoměry – princip, vlastnosti a použití*. AUTOMA. [online]. 7/2013. s. 14-17. [cit. 2023-5-22]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10538.pdf
- [22] Gamalux. *Defektoskopie ultrazvukem*. [online]. [cit. 2023-5-22]. Dostupné z: <https://www.gamalux.cz/pouzivane-metody/ultrazvukova-zkouska/>
- [23] Troughton, Michael J. *Handbook of Plastics Joining - A Practical Guide*. 2. vyd. Norwich: William Andrew Publishing, 2008. ISBN 978-0-8155-1581-4.
- [24] *Ultrasonic soldering technology*. [online]. [cit. 2023-3-29]. Dostupné z: <https://s-bond.com/solutions-and-service/ultrasonic-soldering/ultrasonic-soldering-technology/>
- [25] NAKASHIMA, Shota et al. *Application of ultrasonic sensors in road surface condition distinction methods* Švýcarsko: Sensors, 2016, s. 1-8.
- [26] CARNAHAN, C. W. *American institute of physics handbook* New York: Proceedings of the IEEE, 1963
- [27] KUTTRUFF, Heinrich. *Ultrasonics: Fundamentals and Applications*. 1st Ed. London: Elsevier Applied Science, 1991. 452 s. ISBN 1-85166-553-6.
- [28] Joule, James Perscott. *XVII. On the effects of magnetism upon the dimensions of iron and steel bars*. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1847, roč. 30, č. 199, s. 76-87. 10.1080/14786444708645656.
- [29] FANG, Yiming et al. *Review of the use of air-coupled ultrasonic technologies for nondestructive testing of wood and wood products*. Computers and electronics in agriculture. 2017. s. 79-87. ISSN 0168-1699.
- [30] OHTANI, Kozo a Mitsuru BABA. *An identification approach for object shapes and materials using an ultrasonic sensor array*. In: 2006 SICE-ICASE International Joint Conference. IEEE, 2006. p. 1676-1681.

- [31] NAKASHIMA, Shota et al. *Road surface condition distinction method using reflection intensities obtained by ultrasonic sensor*. In: 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C). IEEE, 2016. p. 120-123.
- [32] KIM, Min-Hyun, Jongchan PARK a Seibum CHOI. *Road type identification ahead of the tire using D-CNN and reflected ultrasonic signals*. International journal of automotive technology, 2021, 22: 47-54.
- [33] *MPJA HC-SR04 Datasheet*. [online]. [cit. 2023-3-29]. Dostupné z: <https://www.mpja.com/download/HC-SR04.pdf>
- [34] *IEC/IEEE International - Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation - Part 2: Codes, formats, protocols and common commands*. IEEE 488.2 IEC 60488-2, 2004. s. 1-264. 10.1109/IEEESTD.2004.95390.