

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie

Studijní specializace: N715A270014S00 Materiálové inženýrství a výrobní technologie

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Stanovení nejistot při vyhodnocování ultrazvukového zkoušení**

Autor: **Bc. Hynek GILÍK**

Vedoucí práce: **Ing. Petr BENEŠ, Ph.D.**

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta strojní  
Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Hynek GILÍK**  
Osobní číslo: **S20N0093P**  
Studijní program: **N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie**  
Téma práce: **Stanovení odchylek při hodnocení vad v rámci UT**  
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

## Zásady pro vypracování

1. Základy ultrazvukového zkoušení
2. Materiály používané v jaderných a konvenčních elektrárnách
3. Statistické vyhodnocování dat
4. Systematické a nahodilé chyby při stanovování velikostí necelistvostí
5. Experimentální program
6. Vytvoření kritériální tabulky
7. Diskuze
8. Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-60 stran**  
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Kopec, B., a kolektiv, Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí. Akademické nakladatelství CERM, ISBN:9788072045914, 2008.

Kopec, B., Neugebauer, J., Mazal, P. a kolektiv, Ultrazvukové zkoušení, studijní příručka, Česká společnost pro NDT, ISBN:978-80-214-5722-5, 2020.

Regazzova, M., Regazzo, R., Ultrazvuk, základy ultrazvukové defektoskopie, BEN-technická literatura, ISBN: 978-80-7300-466-8, 2013.

Kreidl, M., Šmíd, R., Matz, V., Štarman, S., Ultrazvuková defektoskopie, ISBN: 978-80-254-6606-3, 2011.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Beneš, Ph.D.**  
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jana Veselá, Ph.D.**  
Centrum výzkumu Řež s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2021**  
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Benešovi, Ph.D. a konzultantce Ing. Janě Veselé, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady v oblasti ultrazvukové defektoskopie. Děkuji Ing. Daně Kubátové, Ph.D. za poskytnutí literatury a konzultace v oblasti vyjadřování nejistot měření a RNDr. Zdeňkovi Kobedovi za vhled do problematiky neparametrických testů.

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>AUTOR</b>	<b>Příjmení</b> Gilík	<b>Jméno</b> Hynek	
<b>STUDIJNÍ PROGRAM</b>	N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie		
<b>VEDOUCÍ PRÁCE</b>	<b>Příjmení (včetně titulů)</b> Ing. Beneš, Ph.D.	<b>Jméno</b> Petr	
<b>PRACOVISŤE</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<del><b>BAKALÁŘSKÁ</b></del>	<b>Nehodící se škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Stanovení nejistot při vyhodnocování ultrazvukového zkoušení		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	79	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	67	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b>  <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	<p>Diplomová práce v rešeršní části obsahuje popis NDT metod, příklady norem pro NDT, druhy vad materiálu a základy zpracování statistických dat. Podrobnější je popis ultrazvukových metod, a detailně je pak popsána metoda phased array, kterou se zaobírá</p> <p>praktická část. Zde je též popsáno vyjadřování nejistot z měření na konkrétních tělesech, datech a způsobu postupu měření různými sondami a akustickými vazbami. Cílem diplomové práce je vyjádřit nejistoty a jejich rozdíly v různých metodách měření technikou phased array, díky čemuž je možné s těmito nejistotami pracovat pro budoucí měření.</p>
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>  <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Nejistota měření, ultrazvukové zkoušení, phased array, PAUT

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Gilík	<b>Name</b> Hynek
<b>STUDY PROGRAMME</b>	N0715A270014 Materials Science and Manufacturing Technology	
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Beneš, Ph.D.	<b>Name</b> Petr
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b> Delete when not applicable
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Evaluation of ultrasonic testing: determining uncertainties	

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Machine Design	<b>SUBMITTED IN</b>	2022
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	79	<b>TEXT PART</b>	67	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This diploma thesis research portion contains a description of NDT methods, examples of technical standards for NDT, types of material defects and basic statistical data processing. A more in-depth description of ultrasonic testing is included, as is an even more detailed description of the phased array method, which is used in the practical portion. There was also a discussion of the expression of uncertainties in measurement and the measuring process using different probes and couplants. This thesis is designed to describe the uncertainty and the differences between phased array ultrasonic testing methods. Based on that, it is possible to include the uncertainties in further calculations of measurements.
<b>KEY WORDS</b>	expression of uncertainties in measurement, ultrasonic testing, phased array, PAUT

# Obsah

1	Úvod.....	15
2	Základy NDT.....	15
2.1	Povrchové metody.....	15
2.1.1	Vizuální kontrola.....	15
2.1.2	Termografie.....	15
2.1.3	Kapilární metoda.....	15
2.2	Podpovrchové metody.....	16
2.2.1	Metoda rozptylových toků.....	16
2.2.2	Metoda vířivých proudů.....	16
2.3	Objemové metody.....	16
2.3.1	Zkoušky prozařováním.....	16
3	Ultrazvukové techniky.....	18
3.1	Princip ultrazvukového zkoušení.....	18
3.2	Základní pojmy.....	18
3.2.1	Dělení zvuku podle frekvence kmitání.....	18
3.2.2	Vlnové rovnice.....	19
3.3	Tvary a druhy vln.....	20
3.3.1	Podélné vlny (longitudinální).....	21
3.3.2	Příčné vlny (transversální).....	22
3.3.3	Povrchové vlny (Rayleighovo).....	22
3.3.4	Deskové vlny (Lambovy).....	22
3.4	Akustická vazba.....	23
3.4.1	Kontaktní vazba.....	23
3.4.2	Vazba mezerová.....	23
3.4.3	Vazba imerzní.....	23
3.5	Odraz, lom a akustické rozhraní.....	24
3.5.1	Snellův zákon.....	24
3.6	Útlum a rozptyl ultrazvuku.....	25
3.7	Ultrazvukové sondy.....	25



3.7.1	Přímé sondy .....	26
3.7.2	Úhlové sondy .....	26
3.7.3	Předsádky (klíny) .....	26
3.7.4	Dvojité sondy .....	27
3.7.5	Mrtvé pásmo a rozlišovací schopnost .....	27
3.8	Kalibrace ultrazvukových přístrojů a měřky .....	27
3.9	Dělení ultrazvukových technik .....	28
3.9.1	Průchodová technika .....	28
3.9.2	Odrazová technika .....	28
3.9.3	Technika phased array .....	29
3.10	Phased array .....	29
3.10.1	Výstupy měření a skeny z metody phased array .....	31
3.11	Zkušební zařízení pro phased array .....	33
3.11.1	Přístroj .....	33
3.11.2	Sondy .....	35
3.11.3	Software UltraVision3 .....	35
4	Metodika zjišťování vad .....	36
4.1.1	Faktory ovlivňující zkoušení .....	36
4.1.2	Požadavky na zkoušený povrch u ultrazvukových technik .....	36
4.2	Metodika zjišťování vad pro samostatné technologie výroby .....	36
4.2.1	Svařence .....	37
4.2.2	Odlitky .....	37
4.2.3	Výkovky a vývalky .....	38
5	Hodnocení vad .....	39
5.1	Obecné dělení vad .....	39
5.2	Dělení vad podle výrobní technologie .....	39
5.2.1	Tváření .....	39
5.2.2	Odlévání .....	40
5.2.3	Svařování .....	40
6	Materiály používané v jaderných a konvenčních elektrárnách .....	41
7	Přesnost a chyby měření a přístrojů .....	42
7.1	Terminologie .....	42

7.1.1	Chyba absolutní .....	43
7.1.2	Systematická chyba .....	43
7.1.3	Náhodná chyba .....	44
7.1.4	Hrubá chyba .....	44
7.2	Nejistoty měření .....	45
7.2.1	Nejistoty typu A, $u_A$ .....	45
7.2.2	Nejistoty typu B, $u_B$ .....	45
7.3	Přímé a nepřímé metody měření .....	45
7.3.1	Přímé měření .....	46
7.3.2	Nepřímé měření .....	46
7.3.3	Kombinační měření .....	46
7.4	Zdroje nejistot .....	46
8	Návrh experimentu .....	47
9	Popis těles .....	48
9.1	Popis materiálu .....	49
10	Popis průběhu měření .....	50
11	Popis naměřených dat .....	52
12	Práce s daty .....	53
12.1	Velký statistický soubor .....	54
12.1.1	Testování velkého statistického souboru .....	61
12.2	Malý statistický soubor .....	63
13	Možné faktory způsobující odchylku měření .....	69
14	Diskuse výsledků .....	71
15	Závěr .....	74
16	Seznam použitých zdrojů .....	75
17	Přílohy .....	77

## **Přehled použitých zkratk a symbolů**

Zkratka	Název
ČSN	České technické normy
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
NDT	Nedestruktivní testování
PAUT	Technika phased array
UT	Ultrazvukové testování

## Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Vliv geometrie vady na její indikaci.</i> .....	18
<i>Obr. 2 Příčné vlnění řady částic nahoře a průběh příčné vlny dole. [1]</i> .....	20
<i>Obr. 3 Podélné (longitudinální) vlnění. [1]</i> .....	21
<i>Obr. 4 Příčné (transversální) vlnění. [1]</i> .....	22
<i>Obr. 5 Povrchové vlny (Rayleighovo). [1]</i> .....	22
<i>Obr. 6 Deskové (Lambovy) vlny, nahoře dilatační, dole ohybové. [1]</i> .....	23
<i>Obr. 7 Šikmý dopad rozhraní. [1]</i> .....	25
<i>Obr. 8 Ultrazvukové sondy od společnosti Zetec a Phenix ISL. [22]</i> .....	26
<i>Obr. 9 Odrazová technika – princip zobrazování ech. [1]</i> .....	29
<i>Obr. 10 Princip postupného vytváření fokusovaného ultrazvukového paprsku technikou phased array. [1]</i> .....	30
<i>Obr. 11 Vizualizace B-skenován. [8]</i> .....	31
<i>Obr. 12 Vizualizace C-skenování. [9]</i> .....	32
<i>Obr. 13 Vizualizace S-skenování. [10]</i> .....	33
<i>Obr. 14 Přístroje DYNARAY od společnosti Zetec. [11]</i> .....	34
<i>Obr. 15 Technika zkoušení tupých svarů. [1]</i> .....	37
<i>Obr. 16 Chyby ve vývalku (1 – dutina, 2 – přeložka, 3 – osová trhлина, 4- povrchová trhлина, 5- vměstky). [1]</i> .....	40
<i>Obr. 17 Příklad vlivu změny shodnosti a správnosti výsledků na jejich přesnosti. [19]</i> .....	43
<i>Obr. 18 Grafické schéma průběhu experimentu. ....</i>	47
<i>Obr. 19 Tělesa opatřena umělou vadou vytvořenou za pomoci drátořezu. ....</i>	48
<i>Obr. 20 Průběh měření s použitím vazelinové akustické vazby. [23]</i> .....	50
<i>Obr. 21 Vyhodnocení záznamu měření tělesa NCK-12 se sondou AM 3,5 (vodní akustická vazba, měřeno zleva) v softwaru UltraVision3. [23]</i> .....	51
<i>Obr. 22 Grafické blokové schéma celkového průběhu měření vady. ....</i>	51
<i>Obr. 23 Grafické schéma propojení změřených závislostí z celkového průběhu měření vady. ....</i>	69
<i>Obr. 24 Zkrácený výčet možných vlivů na ovlivňující nejistoty měření u UT. [26]</i> .....	69

## Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Rychlost šíření zvuku v materiálech. [1]</i> .....	21
<i>Tab. 2 Parametry přístroje pro praktické měření metodou Phased Array. [12]</i> .....	34
<i>Tab. 3 Parametry sond pro praktické měření metodou phased array. [12]</i> .....	35
<i>Tab. 4 Základní třídění vad do skupin a jejich všeobecný popis. [1]</i> .....	39
<i>Tab. 5 Rozměry těles. ....</i>	48
<i>Tab. 6 Porovnání všech změřených hodnot hloubky vady [mm] napříč všemi akustickými vazbami, použitými sondami a směru měření na tělese NCK-18. ....</i>	55
<i>Tab. 7 Porovnání naměřených hodnot velikosti hloubky vady [mm] z měření tělesa NCK-18 za pomoci sondy AM3,5 a sondy AM10 v různých akustických vazbách. ....</i>	56
<i>Tab. 8 Porovnání celkových naměřených hodnot velikosti hloubky vady [mm] z měření tělesa NCK-18 za pomoci sondy AM3,5 a sondy AM10. ....</i>	57
<i>Tab. 9 Porovnání naměřených hodnot velikosti hloubky vady [mm] u tělesa NCK-18 podle způsobu akustické vazby napříč všemi měřícími technikami. ....</i>	58
<i>Tab. 10 Porovnání celkových naměřených hodnot velikosti hloubky vady [mm] z měření tělesa NCK-18 podle směru zkoušení. ....</i>	59
<i>Tab. 11 Porovnání naměřených hodnot velikosti hloubky vady [mm] sondou AM10 měřenou zleva se sondou AM3,5 měřenou zprava napříč všemi akustickými vazbami. ....</i>	60
<i>Tab. 12 Hodnoty pro konstrukci znaménkového testu pro párové hodnoty z tabulek 8, 9, 10.</i>	62
<i>Tab. 13 Porovnání všech změřených hodnot hloubky vady [mm] napříč všemi akustickými vazbami, použitými sondami a směru měření na tělesech NCK-12, NCK-13 a NCK-17. ....</i>	64
<i>Tab. 14 Porovnání hodnot hloubky vady [mm] na tělesech NCK-12 NCK-13 u jednotlivých druhů akustických vazeb a použitých sond. ....</i>	65
<i>Tab. 15 Porovnání hodnot hloubky vady [mm] danými technikami měření u těles NCK-12 a NCK-13 s okrajovými podmínkami pro druh akustické vazby a použité sondy. ....</i>	66
<i>Tab. 16 Porovnání naměřených hodnot velikosti hloubky vady [mm] u tělesa NCK-12. ....</i>	67
<i>Tab. 17 Porovnání naměřených hodnot velikosti hloubky vady [mm] u tělesa NCK-12. ....</i>	67
<i>Tab. 18 Porovnání naměřených hodnot hloubky vady [mm] sondou AM10 měřenou zleva se sondou AM3,5 měřenou zprava napříč všemi akustickými vazbami u těles NCK-12 a NCK-13. ....</i>	68
<i>Tab. 19 Průměrná hodnota hloubky vady na tělesech NCK-12, NCK-13, NCK-17 a NCK-18 vyhodnocena ze všech měření. ....</i>	71
<i>Tab. 20 Průměrná hodnota hloubky vady na tělese NCK-18. Měřená za pomoci sondy AM3,5 a sondy AM10 v různých akustických vazbách. ....</i>	71

<i>Tab. 21 Průměrná hodnota hloubky vady tělesa NCK-18 určená ze všech měření podle akustické vazby. ....</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 22 Průměrná hodnota hloubky vady na tělesech NCK-12 a NCK-13 určená ze všech měření podle akustické vazby. ....</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 23 Průměrná hodnota hloubky vady na tělese NCK-18 změřená za pomoci sondy AM3,5 a sondy AM10. Spočtená ze všech měření. ....</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 24 Průměrná hodnota hloubky vady na tělesech NCK-12 a NCK-13 určená ze všech měření podle akustické vazby. ....</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 25 Průměrná hodnota hloubky vady tělesa NCK-18 určená ze všech měření podle směru zkoušení. ....</i>	<i>73</i>

## 1 Úvod

Tato diplomová práce se zabývá stanovením nejistot při vyhodnocování ultrazvukového zkoušení. Analýzou odborné literatury a příslušných norem lze získat informaci o rozdělení nedestruktivních technik zkoušení s hlavním zaměřením na ultrazvukovou techniku phased array. V práci je dále uvedeno rozdělení a definování vad v materiálu způsobených určitou výrobní technologií. Rešeršní část je věnována vzniku chyb při měření a určování jejich stanovených odchylek. V praktické části je vysvětlen průběh měření vybraných těles s uměle utvořenou vadou. Měření se prováděla technikou phased array. V práci je popsán zjištěný vztah použití jednotlivých sond o určitých frekvencích a použité akustické vazbě na výslednou chybu a opakovatelnost jednotlivých měření. Toto téma, byť je zcela zásadní, bylo zatím zcela opomíjeno a neřešeno.

## 2 Základy NDT

Zkratka NDT je složena ze dvou slov nondestructive testing. Jedná se o širší skupinu technik, které bez poškození zkoumaného materiálu dokážou hodnotit vlastnosti materiálu, konstrukční části nebo celého funkčního systému, nalézt případnou vadu, tzn. nespojitost, netěsnost, kavitu či jiné kvalitativní odchylky od normálu, a tím předejít fatálním poruchám. [1]

### 2.1 Povrchové metody

Níže uvedené metody NDT, které dokážou zjistit přítomnost necelistvostí pouze na povrchu součásti.

#### 2.1.1 Vizuální kontrola

Jedná se o prvotní kontrolu, kde školený technik za dostatečného osvětlení hledá vady na povrchu součásti. Pro vizuální kontrolu se mohou používat zvětšovací skla, pevné i flexibilní boroskopy apod. [2]

#### 2.1.2 Termografie

Jedná se o bezkontaktní způsob zjišťování rozložení teplotního pole na povrchu součásti.

Pro tento druh měření se využívá infračervených termokamer. Existují dva způsoby měření, pasivní a aktivní. Pasivní metoda je vhodná pro zkoumání materiálů, které mají za provozu jinou teplotu, než je teplota okolí, jako jsou potrubí, stav budov, kontrola ložisek. Aktivní přístup cíleně ohřívá nebo chladí povrch součásti. V přítomnosti povrchových nebo podpovrchových vad se na daném místě mění teplota rozdílnou rychlostí než na místech bez nich. [2, 3]

#### 2.1.3 Kapilární metoda

Tato metoda je považována za nejjednodušší a nejrychlejší cestu ke zjištění přítomnosti povrchových vad konstrukčních částí. Využívá kapilárních vlastností kapalin.

Průběh zkoušky je rozdělen na několik částí. První část spočívá v důkladném očištění povrchu součásti a nanesení vysoce smáčivé kapaliny (penetrantu), který se posléze setře z povrchu strojní součásti. Penetrant může být barevný, fluorescenční. V druhé části se nanese kontrastní vývojka, do které vyzlíná penetrant, který v předchozím kroku zatekl do vad. Přítomnost vad se zjišťuje vizuálně.

Kapilární metoda zjistí pouze přítomnost nečistosti, ale neurčí její přesnou velikost. [1]

## **2.2 Podpovrchové metody**

Podpovrchové metody dokážou zjistit přítomnost vad na povrchu tak i v těsné vzdálenosti pod povrchem.

### **2.2.1 Metoda rozptylových toků**

Používá se výhradně pro zjišťování povrchových a podpovrchových vad feromagnetických materiálů. Je známá také pod názvem magnetická metoda prášková. Po zmagnetizování zkoušené strojní části magnetickým polem prochází napříč materiálem magnetický tok. Případná vada či trhlinka má jiný magnetický odpor než okolní materiál, a proto v místě trhlinky dochází ke zhuštění magnetických siločar, část z nich vystoupí na povrch nad oblastí vady. Nanesený feromagnetický prášek po zmagnetizování strojní součásti dokáže určit přítomnost a místo vady. [1, 2]

### **2.2.2 Metoda vířivých proudů**

Metoda vířivých proudů se využívá k detekci trhlin, povrchových prasklin, měření tloušťek stěn, měření naplátování jak feromagnetických, tak i neferomagnetických vrstev na vodivém, kovovém i nekovovém podkladu.

Zkoušený objekt, má určitou elektrickou vodivost a magnetickou permeabilitu. Po vystavení působení střídavého magnetického pole vytvořeného budicí cívkou, napájenou střídavým proudem se v daném místě indukují vířivé proudy, jež svým magnetickým účinkem působí zpětně na původní magnetické pole předmětu. Tato dvě magnetická pole – primární od budicí cívky a reakční od vířivých proudů, se vektorově skládají ve výsledné pole. Princip zjišťování defektů spočívá v tom, že jakákoliv změna strukturního stavu materiálu má vliv na změnu magnetických a elektrických vlastností materiálu. Přítomné defekty mohou přerušit část drah vířivých proudů, takže se jejich zpětný účinek na budicí pole změní. [1,2]

## **2.3 Objemové metody**

Objemové metody zjišťují přítomnost vady v celém objemu zkoušeného materiálu.

### **2.3.1 Zkoušky prozařováním**

Prozařovací metody mohou využívat rentgenové, neutronové nebo gama záření. Záření pronikající skrz zkoušený materiál se utlumuje v materiálu a část záření dopadne na fotografický film či jiný indikátor záření. Změna hustoty materiálu – přítomnost trhlin, kavit, vměstků způsobí ve výsledném snímku kontrastní změnu obrazu, ze kterého můžeme vyčíst



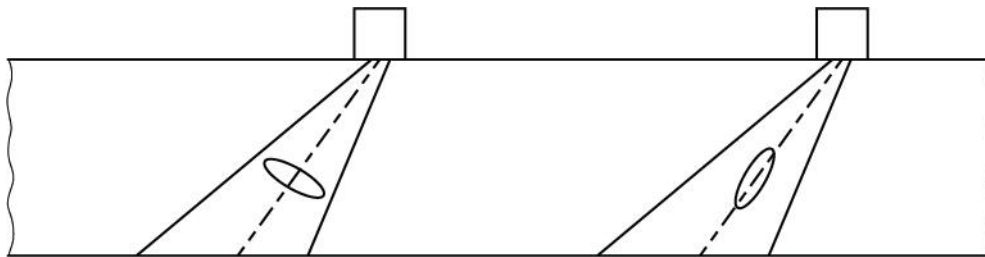
druh a místo případné závady. Prozařovací zkouška není vhodná pro velké tloušťky materiálu, kde je potřeba velkých dávek záření a dlouhých expozičních časů. [1,2]

### 3 Ultrazukové techniky

Ultrazukové techniky se taktěž zahrnují do objemových metod nedestruktivních testování a jako samotné se dělí na samostatné metody.

#### 3.1 Princip ultrazukového zkoušení

Ultrazukové vlny jsou takové vlny, které mají vyšší frekvenci, než je slyšitelný rozsah lidského vnímání zvuku. Šíří se prostředím – médiem, které je alespoň částečně elastické. Pro zkoušení je potřeba mít vysílač a přijímač ultrazukových vln. Nejčastěji se jedná o piezoelektrický element. Vysílač posílá do materiálu ultrazukové vlny, které se při překonávání různých překážek mohou vracet do přijímače. Na základě doby a energie, kterou má vracející se vlna, může zobrazovací software vyhodnotit přítomnost a přibližnou velikost a polohu vad. Velmi záleží na geometrii hledané vady. Velkoplošné vady rovnoběžné se sondou daleko lépe odrážejí signál než stejně velké vady, ale orientované kolmo k sondě. Proto se také v ultrazukové praxi říká nalezené vadě reflektor. Nejmenší detekovatelná vada musí mít příčný rozměr, který je kolmý na směr šíření vlny větší, než je poloviční vlnová délka vlny. Při vadách menších rozměrů dochází k ohybu ultrazukových vln, a tím se snižuje jejich detekovatelnost. [1,4]



Obr. 1 Vliv geometrie vady na její indikaci.

#### 3.2 Základní pojmy

Jedná se o pojmy využívané specificky v oblasti nedestruktivního ultrazukového zkoušení.

Detailní popis pojmů ke konvenčním ultrazukovým technikám je k nalezení v normě ČSN EN ISO 5577 Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazukem – Slovník. K technice ultrazukového zkoušení phased array jsou normy ČSN EN ISO 23243 Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazukem technikou phased array – Slovník, ČSN EN 16018 Nedestruktivní zkoušení – Terminologie – Termíny používané při zkoušení ultrazukem technikou phased array.

##### 3.2.1 Dělení zvuku podle frekvence kmitání

Z definic ultrazukového vlnění se jedná o takové mechanické kmitání částic prostředí, které mají vyšší frekvenci než 20 kHz. Hranice slyšitelnosti lidského ucha je

v rozmezí 20 Hz až 20 kHz, některé zdroje uvádějí hodnoty 16 Hz – 16 kHz, kdy velmi záleží na individuálním vnímání zvuku a rozlišovací schopnosti sluchu každého jednotlivce. [4]

Infrazvuk	$f < 20 \text{ Hz}$
Zvuk	$f = (20 \text{ Hz}; 20 \text{ kHz})$
Ultrazvuk	$f > 20 \text{ kHz}$
Hyperzvuk	$f > 100 \text{ MHz}$

### 3.2.2 Vlnové rovnice

Základem každého kmitu je výchylka z rovnovážné polohy. Přestože mezi částicemi působí kohezní síly, postupně se tento pohyb přenáší z jedné částice na všechny částice v okolí, což se na venek projevuje tak, že vzruchová vlna se šíří určitou rychlostí v prostředí. Matematicky tento pohyb vyjadřuje tzv. vlnová rovnice, která se dá, pro nejjednodušší případ, tj. vlnění řady částic vázaných pružnými silami a bez uvažování vlivů tlumících pohybů, upravit do tvaru: [1]

$$(1) \quad a(t) = A_0 \cdot \sin \omega \cdot \left( t - \frac{x}{c} \right)$$

$a(t)$  je výchylka částice z rovnovážné polohy v čase  $t$

$A_0$  je maximální výchylka částice, taktéž známá jako amplituda

$\omega$  kruhová frekvence

$f$  frekvence  $f = \frac{1}{T}$  kde  $T$  je perioda se kterou se děj opakuje

$x$  je vzdálenost kmitajícího bodu od počátku

$c$  je rychlost šíření vlny

Akustický tlak, který vyvolá vlnění v prostředí, je závislý na rychlosti kmitání částic a na akustické impedanci – vlnovém odporu prostředí. Akustická impedance je daná součinem hustoty „ $\rho$ “ a rychlosti šíření vlny „ $c$ “. [1]

$$(2) \quad p = z \cdot v$$

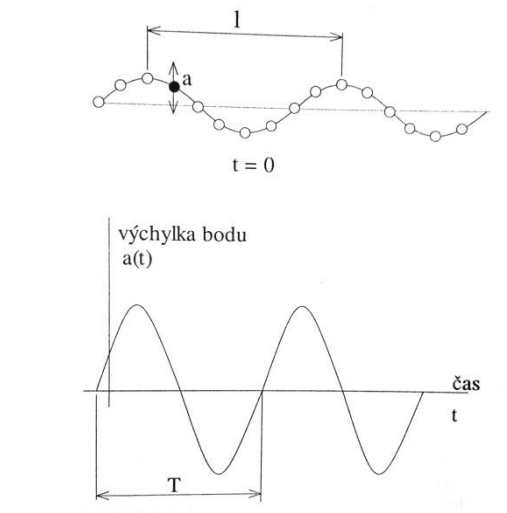
$$(3) \quad z = \rho \cdot c$$

$p$  je akustický tlak

$v$  je rychlost kmitání částic okolo rovnovážné polohy

$z$  je akustická impedance prostředí

$\rho$  je měrná hmotnost prostředí



Obr. 2 Příčné vlnění řady částic nahoře a průběh příčné vlny dole. [1]

Mezi dobou kmitu  $T$  a frekvencí  $f$  platí vztah  $T[s] = \frac{1}{f} [Hz]$ .

V ultrazvukové defektoskopii se používá vztah  $T[\mu s] = \frac{1}{f} [MHz]$ .

V době jednoho kmitu odpovídá dráha ultrazvuku rovna jedné vlnové délce  $\lambda$ , tím přecházíme ze sekund na milimetry. V praxi není důležitá doba kmitu v  $[\mu s]$ , ale vlnová délka v  $[mm]$ .

Mezi dobou kmitu  $T$  a vlnovou délkou  $\lambda$  platí vztah:

$$\lambda [mm] = c [mm/s] \cdot T [s] = c [km/s] \cdot T [\mu s],$$

nebo v ultrazvukové defektoskopii používaný vztah  $\lambda [mm] = c [km/s] / f [Mhz]$ . [4]

### 3.3 Tvary a druhy vln

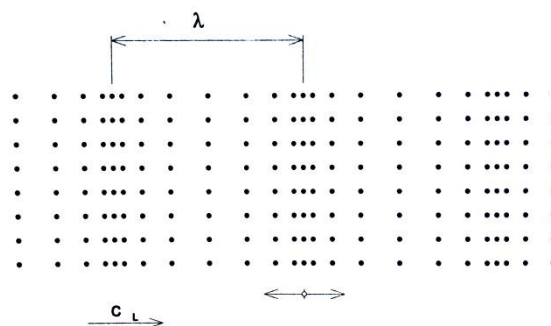
Zvuk je pouze mechanické kmitání a vlnění v materiálech, které jsou alespoň částečně elastické. Přenos zvuku je zapříčiněn kmitavým pohybem atomů a molekul v materiálu kolem své klidové polohy, a tím přenášejí svůj pohyb v podobě kmitání na sousední částice. Celý proces kmitání (vibrací) se šíří rychlostí zvuku charakteristickou pro konkrétní materiál, viz tab. 1 rychlosti šíření zvuku v materiálech. Podle geometrie a způsobu šíření můžeme rozlišovat samotné vlnoplochy a dále, podle směru kmitání částic vzhledem ke směru šíření vlny, na samostatné druhy vln. Vlnoplochy tzn. množiny bodů v prostoru kmitající v téže fázi, můžeme podle geometrie šíření dělit na rovinné, kulové a válcové. Vlny dělíme na příčné, podélné, povrchové, deskové, a jejich vzájemnou interakcí a interferencí se mohou ovlivňovat. [4]

Látka	Hustota $\rho$ [kg.m <sup>-3</sup> ]	Poissonovo číslo $\mu$	Rýchlosť pozdĺžnych vln $c_L$ [m.s <sup>-1</sup> ]	Rýchlosť priečných vln $c_T$ [m.s <sup>-1</sup> ]
<b>Kovy</b>				
hliník	2700	0,34	6320	3130
kadmium	8640	0,30	2780	1500
horčík	1730	0,30	5780	3050
liatina	7200	0,18-0,26	3500 - 5600	2200 - 3200
meď	8900	0,35	4700	2260
zinok	7100	0,25	4170	2410
molybdén	10200		6250	3350
mosadz	8100	0,35	3830	2123
nikel	8800	0,31	5630	2960
ocel feritická	7800	0,28	5920	3250
ocel austenitická	8030	0,27	5200 - 5800	3000 - 3150
ortuť	13558	-	1450	-
olovo	11400	0,44	2160	700
ceľ	7300	0,33	3320	1670
striebro	10500	0,38	3600	1590
titán Ti 150A	4540		6100	3120
wolfram	19100	0,35	5460	2620
urán	18700		3370	1980
platina	21400	0,39	3960	1670
zlato	19300	0,42	3240	1200
<b>Nekovy</b>				
sklo kremičité	2600		5570	3515
plexisklo	1180	0,17	2680 - 2740	1390
porcelán	2400	0,13	5300 - 5500	3500 - 3700
parafín	830	-	2200	-
polystyrén	1055	0,32	2340	-
polyetylén	1100	-	2480	-
guma tvrdá	1200	-	2405	-
guma mäkká	900	-	1479	-
PVC (tvrdý)	1400		2395	1060
polyamid	1100	0,33	2200 - 2600	1100 - 1200
<b>Kvapaliny</b>				
voda pri 20 °C	997		1483	-
olej motorový	870		1740	-
olej parafínový	835		1444	-
olej transform.	200		1390	-
glycerín	1261		1920	-

Tab. 1 Rychlost šíření zvuku v materiálech. [1]

### 3.3.1 Podélné vlny (longitudinální)

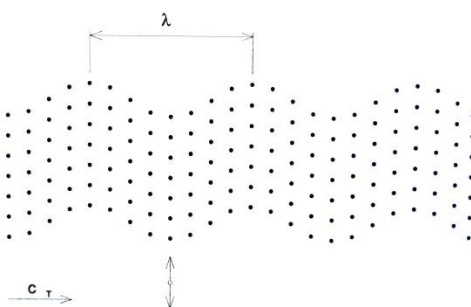
Částice prostředí kmitají po přímkové dráze ve směru šíření vlny. Tyto vlny jsou nejrychlejší a šíří se v dostatečně pružných tuhých, kapalných i plynných prostředích. V prostředí, kde se podélné vlny šíří, vznikají tahové a tlakové síly, protože částice se střídavě od sebe vzdalují a zase k sobě přibližují. Rychlost šíření podélné vlny se značí  $C_L$ . [1,4]



Obr. 3 Podélné (longitudinální) vlnění. [1]

### 3.3.2 Příčné vlny (transversální)

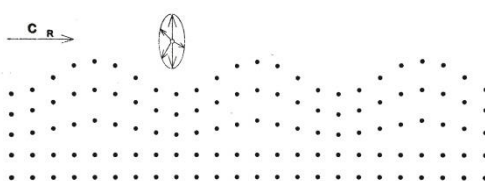
Při tomto vlnění částice kmitají kolmo na směr postupu vlny, přičemž v rovině kmitání zachovávají stále stejný směr. Příčná vlna se dokáže šířit pouze v prostředí umožňující přenášet smykové síly, tzn., musí mít modul pružnosti ve smyku  $G \neq 0$ . Proto se příčné vlnění nemůže šířit v kapalinách a plynech. Šíření příčných vln není doprovázeno zhuštěním ani zředěním částic v materiálu, ale pouze jejich vzájemným posunutím. Rychlost šíření příčné vlny je pro daný materiál vždy menší než rychlost šíření vlny podélné. Rychlost šíření příčné vlny se značí  $C_T$ . [1, 4]



Obr. 4 Příčné (transversální) vlnění. [1]

### 3.3.3 Povrchové vlny (Rayleighovo)

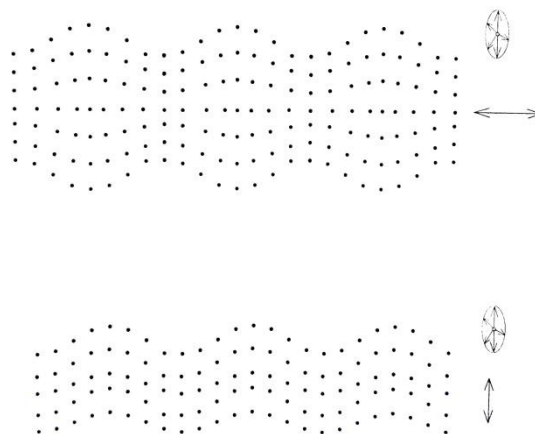
Na povrchu a těsně pod ním přibližně do hloubky jedné vlnové délky příčné vlny se mohou šířit tzv. povrchové (Rayleighovo) vlny, při kterých částice kmitají v rovině kolmé na směr šíření vlny, ale nezachovávají v ní stále stejný směr kmitání, avšak opisují v této rovině elipsu. Amplituda povrchové vlny s hloubkou velmi rychle klesá. Její rychlost se značí symbolem  $C_R$  a její rychlost je 0,8 až 0,9krát pomalejší než u rychlosti příčné vlny. [1,4]



Obr. 5 Povrchové vlny (Rayleighovo). [1]

### 3.3.4 Deskové vlny (Lambovy)

U tenkostěnných materiálů jako jsou plechy nebo dráty, kde je tloušťka materiálu porovnatelná s vlnovou délkou, mohou vzniknout tzv. deskové vlny, které se dále dělí na vlny dilatační – symetrické, a ohybové – nesymetrické. V obou případech částice na povrchu kmitají stejně jako u povrchové vlny. Částice ve středu tloušťky materiálu kmitají při dilatačních vlnách jako vlna podélná. Deskové vlny se vždy šíří celým průřezem a mají vysokou detekovatelnost. Rychlost deskových vln je závislá na součinu frekvence a tloušťky materiálu. [1,4]



Obr. 6 Deskové (Lambovy) vlny, nahoře dilatační, dole ohybové. [1]

### 3.4 Akustická vazba

Akustické rozhraní je definováno prostorem mezi zkoušeným předmětem a sondou. Podle vzdálenosti zkušební povrchu od sondy rozlišujeme zkoušení s vazbou kontaktní, mezerovou a imerzní. [4]

Pro přenos ultrazvuku ze sondy do zkoušeného materiálu je přiložení na suchý materiál nedostatečné. Na rozhraní by byl přítomný vzduch, přestože koeficient odrazu na rozhraní tuhého a plynného média je blízký číslu 1, do zkoušeného materiálu by pronikla pouze nepatrná část akustického tlaku vytvořeného měničem sondy. Pokud se na zkušební povrch nanese vrstva kapaliny, přenos akustického tlaku se výrazně zlepší. Koeficient přechodu ultrazvuku na rozhraní vody a oceli je přibližně 0,12. To znamená, že asi 12 % akustického tlaku přejde v tomto případě do materiálu. Je to přibližně tisíckrát víc než při suché vazbě. Jako vazební médium se používá voda, olej, speciální gely, vazelína či glycerin. [1]

#### 3.4.1 Kontaktní vazba

Při kontaktní vazbě je sonda s povrchem předmětu v přímém kontaktu. Vzdálenost mezi nimi je menší než vlnová délka ve vazebním prostředí ( $m < \lambda$ ). [4]

#### 3.4.2 Vazba mezerová

Mezi zkušebním povrchem a sondou je vyplněná malá mezera vazebním prostředkem (voda, olej...). Vzdálenost sondy od povrchu je přibližně rovna vlnové délce ve vazebním prostředí ( $m \sim \lambda$ ) nebo pro sondy o vyšších frekvencích je vzdálenost rovna násobku vlnové délky. [4]

#### 3.4.3 Vazba imerzní

Mezi povrchem a sondou je vzdálenost přibližně větší než 10 mm vyplněná vazebním prostředkem. Vzdálenost je výrazně větší, než je vlnová délka ve vodě nebo řídkém oleji ( $m \gg \lambda$ ). Pro měření ultrazvukem za pomoci imerzní vazby platí  $m > t / 4$ , tzn. mezera mezi povrchem a snímačem musí být větší, než je jedna čtvrtina tloušťky materiálu. [4]

### 3.5 Odraz, lom a akustické rozhraní

Akustické rozhraní je rozhraní dvou materiálů, přes které se šíří ultrazvuková vlna. Na rozhraních obecně vzniká lom, odraz a transformace. V defektoskopii se podle úhlu dopadu rozlišují rozhraní s kolmým a šikmým dopadem. Při kolmém dopadu ultrazvukové vlny nastává od rozhraní dvou prostředí odraz a průchod. Dopadající akustický tlak  $P$  se rozkládá na odražený  $P_R$  a prošlý  $P_D$ . Poměr mezi  $P$  a  $D$  je závislý na akustických vlnových odporech  $Z_1$  a  $Z_2$ , viz vzorec č. 2 a 3. [4]

Pro koeficienty odrazu  $R$  a průchodu  $D$  pro prostředí s vlnovými odpory  $Z_1$  a  $Z_2$  platí vztah:

$$(4) \quad R = P_R/P = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$$

$$(5) \quad D = P_D/P = 2 Z_2 / (Z_2 + Z_1)$$

$$(6) \quad D = 1 + R$$

Při šikmém dopadu na akustické rozhraní se ultrazvukové vlny odrazí, lámou a transformují. Vše závisí na úhlu dopadu ultrazvukové vlny a na rychlostech šíření vln v obou prostředích. Pro praxi nejvýznamnější podélné vlny se při dopadu na akustické rozhraní dvou prostředí rozdělí na čtyři vlny, a to dopadající vlnu podélnou ( $L$ ), která se odrazí zpět do prostředí 1 pod úhlem odrazu  $\alpha_{1,L}$ , jež se rovná úhlu dopadu a transformuje se na příčnou vlnu ( $T$ ) odrážející se pod úhlem  $\alpha_{1,T}$ . Dále se šíří do prostředí 2 jako podélná vlna pod úhlem průchodu  $\alpha_{2,L}$  a transformuje se na příčnou vlnu, která se šíří pod úhlem  $\alpha_{2,T}$ . Z obr. 7 vyplývá, že šíření ultrazvukových vln napříč materiálem o různých rozhraních je velmi energeticky náročné a vyvolává značné ztráty ve výsledném odraženém signálu, které mohou komplikovat vyhodnocování při měření ultrazvukem. [4]

#### 3.5.1 Snellův zákon

Podmínky pro prostředí se řídí Snellovým zákonem.

$$(7) \quad \sin \frac{\alpha_{1,L}}{c_{1,L}} = \sin \frac{\alpha_{1,T}}{c_{1,T}} = \sin \frac{\alpha_{2,L}}{c_{2,L}} = \sin \frac{\alpha_{2,T}}{c_{2,T}}$$

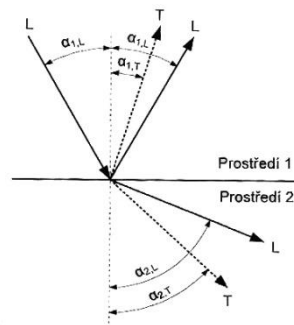
Pro praxi se nejčastěji používá zkrácený tvar.

$$(8) \quad \frac{\sin \alpha_{1,L}}{\sin \alpha_{1,T}} = \frac{c_{1,L}}{c_{1,T}}$$

Jinými slovy poměry sinů úhlů se rovnají poměru rychlostí.

Ze Snellova zákona dále vychází kritické úhly dopadu, kde určité vlny pod určitým úhlem úplně vymizí, nebo putují povrchem prostředí. [4]





Obr. 7 Šikmý dopad rozhraní. [1]

### 3.6 Útlum a rozptyl ultrazvuku

Při šíření ultrazvukové vlny prostředím klesá její akustický tlak a tím i její energie. Příčinou tohoto poklesu je útlum vznikající v důsledku pohlcování a rozptylu ultrazvuku. Útlum (absorpce) ultrazvukových vln vzniká jako důsledek vnitřního tření kmitajících částic, plastického tečení, relaxačních a tepelných jevů. Při průchodu ultrazvukových vln se mění mechanická energie kmitajících částic na energii tepelnou. Se stoupající frekvencí se zvyšují i ztráty pohlcováním, ty jsou taktéž závislé na teplotě. [21]

Rozptyl ultrazvukových vln vzniká v nehomogenních a polykrystalických prostředích, v pevných látkách i v kapalinách. Při dopadu ultrazvuku na jednotlivé nehomogenity dochází na jejich rozhraní k odrazu, lomu a ohybu ultrazvuku. V pevných látkách může jít o skupiny drobných nehomogenit v podobě vycezenin a pórů, nebo také o samostatná zrna struktury kovových materiálů. Nehomogenity jsou většinou náhodně orientované, a proto se ultrazvuková vlna rozptyluje do všech směrů. [21]

### 3.7 Ultrazvukové sondy

Ultrazvukové sondy jsou nedílnou součástí pro ultrazvukové defektoskopické zařízení. Jedná se o prvek, který vysílá vlnění do materiálu a přijímá echa – odrazy od chyb. Sonda musí umět generovat impulzy o velkých amplitudách, aby bylo možné posílat vlny do větších hloubek zkoušeného materiálu při dobrém odstupu získaného signálu od šumu. Této vlastnosti je nejvíc požadováno u materiálů s velkým akustickým útlumem, jako jsou litiny, plasty, kompozity nebo austenitická ocel. Pro dosažení dobré rozlišovací schopnosti je dále nutné, aby sonda dokázala vysílat co nejkratší impulzy, díky nimž jsou snadno rozlišitelné i dvě malé chyby v těsné blízkosti. V neposlední řadě musí být sonda dostatečně mechanicky odolná a mít řešenou konstrukci tak, aby v ní nevznikaly parazitní odrazy z vlastního vlnění. Neexistuje žádná univerzální sonda, pro každou aplikaci se hodí jiná. [1]

Sondy se mohou dělit podle způsobů generování ultrazvuku na piezoelektrické, magnetostrikční a elektrodynamické. Sondy jako takové se dále dělí podle konstrukce a geometrie, a to na sondy přímé, úhlové případně dvojité. Posledními parametry sond jsou velikost vyzářovací plochy, jmenovitá frekvence a vyzářovací charakteristika – tj., jak dobře, od jaké a do jaké hloubky dokáže sonda detekovat chyby v materiálu. [1, 2]

Většina sond slouží zároveň jako vysílače a přijímače. Ve vysílacím režimu sonda pošle krátký signál a hned na to přijímá, jaký signál se k ní vrátí. Oproti tomu dvojité sondy dokáží pracovat odděleně – jedna sonda je vysílač, druhá je přijímač. Obě konstrukce mají své výhody i nevýhody.



Obr. 8 Ultrazvukové sondy od společnosti Zetec a Phenix ISL. [22]

### 3.7.1 Přímé sondy

Přímé sondy jsou vhodné na zkoušení takových výrobků, které jsou dobře přístupné a mají dostatečně rovný povrch na přiložení sondy. Přímá sonda dokáže nejlépe identifikovat vady, které jsou s povrchem součásti více či méně rovnoběžné.

### 3.7.2 Úhlové sondy

Úhlové sondy obsahují úhlový klín z plexiskla, takže jeho dosedací plocha tvoří se zkušebním materiálem akustické rozhraní. Na tomto rozhraní nastává lom a do materiálu proniká pouze příčná vlna. Úhlové sondy se vyrábějí v úhlech pro ocel od 35°, nejčastěji pak s 45°, 60° a 70°. Úhlové sondy dokážou naleznout vady, které nejsou rovnoběžné s povrchem. Nejčastěji se úhlové sondy používají ke kontrole svarových spojů.

### 3.7.3 Předsádky (klíny)

Na ultrazvukové sondy se často používají vyměnitelné ultrazvukové předsádky. Jedná se o klíny z plexiskla, které mohou upravit přímé sondy na sondy úhlové. Předsádky mohou být rovné, i oválné pro snadnější zkoušení trubek a rádiů. Tím se zamezí bodového dotyku sondy s povrchem součásti a tím pádem i vzniku parazitních signálů.

### 3.7.4 Dvojité sondy

Dvojité přímé sondy se používají na měření tloušťek materiálu a zjišťování chyb ležících blízko pod zkoušeným materiálem. Citlivost dvojitých sond se mění s hloubkou prozařování, která je daná natočením měničů sondy k sobě.

### 3.7.5 Mrtvé pásmo a rozlišovací schopnost

Všechny sondy mají své charakteristiky a fyzikální limity. Jednou z nich je i tzv. mrtvé pásmo. Jedná se o vzdálenost – minimální hloubku v materiálu, od které je sonda schopna identifikovat chyby, označuje se písmenem „m“. Echo přicházející z materiálu ze vzdálenosti kratší než „m“ splynou s vysílacím impulzem a není možné tento signál identifikovat. Mrtvé pásmo je důsledek toho, že vysílací impuls má určitou dobu trvání a není možné, aby byl libovolně krátký. Je to jeden z nedostatků odrazové metody. Na velikost mrtvého pásma má vliv několik faktorů.

- Výkon vysílacího impulsu (vyšší výkon = větší mrtvé pásmo).
- Frekvence sondy (nižší frekvence = větší mrtvé pásmo).
- Nastavené zesílení na přístroji (větší zesílení = větší mrtvé pásmo).
- Šířka frekvenčního pásma přenášená zesilovačem přístroje (širokopásmový zesilovač má kratší impulzovou odezvu a dobu zotavení = kratší mrtvé pásmo).
- Tlumení sondy i měniče.

Jestliže se nachází defekty velmi blízko pod povrchem součásti, je nutné použít dvojité sondy, ale i u nich existují určité limity, které jsou dané úhlem sklonu sond. V praxi se ultrazvukem dají zjistit defekty od hloubky 1 mm a níž. Pro zjišťování podpovrchových vad existují vhodnější metody NDT, viz kap. 1.2.

Rozlišovací schopnost se zlepšuje se zvýšením vysílací frekvence, protože se zkracuje vlnová délka. Zvyšovat frekvenci nelze do nekonečna, protože s rostoucí frekvencí roste i útlum. Nízké frekvence se mohou přenášet do větších hloubek v materiálu, avšak mají malou rozlišující schopnost. V praxi se obecně volí kompromis mezi oběma požadavky. [1,2,4]

## 3.8 Kalibrace ultrazvukových přístrojů a měřky

Kalibrace je nedílnou součástí jakéhokoliv měření ultrazvukovými technikami. Jedná se o ověření funkčnosti a přesnosti měřícího zařízení. Kalibrace zkušebního zařízení musí být v souladu s požadavky norem stejně tak kalibrace citlivosti pro daný typ zkoušení. V první řadě musí být kalibrována elektronická část ultrazvukového zařízení. Tato operace se zpravidla provádí u výrobce. Podrobněji ji popisuje norma ČSN EN ISO 18563-1 Nedestruktivní zkoušení – charakterizace a ověřování ultrazvukového phased array zařízení – Část 1: Přístroje. Ověřuje se frekvenční rozsah přístroje, tvaru, amplitudy vysílaného pulzu apod. Dále se musí kalibrovat použité sondy, to popisuje norma ČSN EN ISO 18653-2. Pro zkoušení funkčnosti měřícího celku, tj. přístroje, sondy a připojených kabelů existuje norma ČSN EN ISO 18563-3 Nedestruktivní zkoušení – Charakterizace a ověřování ultrazvukového phased array zařízení – Část 3: Kompletní zkušební zařízení. Tato norma nepopisuje metody

k prokázání vhodnosti systému pro měření konkrétní aplikace, nýbrž k prokázání schopnosti kompletního zařízení generovat ultrazvukové svazky podle nastavených parametrů.

Další forma kalibrace je tzv. kalibrace uživatelská, kterou vykonává technik před každým měřením, po výměně jedné z komponent měřicího systému, nebo po určitých časových intervalech. Technik ověřuje linearitu zobrazení zobrazitelného dynamického rozsahu v dB apod. Kalibrace se zpravidla vykonává za pomoci měrek, jako jsou např. K1, IIW nebo ASME. Postup vykonávání kalibrace je uvedený v normách, například norma ČSN EN ISO 2400 Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Specifikace pro kalibrační měрку č. 1, nebo ČSN EN ISO 22232-1 Nedestruktivní zkoušení – Charakterizace a ověřování ultrazvukového zkušebního zařízení – Část 1: Přístroje.

Smyslem všech forem kalibrace je zabezpečit konzistenci ultrazvukového zkoušení a opakovatelnost, aby bylo možné získat porovnatelné výsledky měření při zkoušení a hodnocení chyb podle jediného zkuškového předpisu i za použití různých přístrojů v různém čase.[1]

### **3.9 Dělení ultrazvukových technik**

Ultrazvukové techniky se dělí dle způsobu průchodu ultrazvukových vln, jejich podoby a uspořádání sond. Ačkoliv ultrazvukové techniky mohou být velmi nápomocné při zjišťování přítomnosti vad, tak žádná technika ultrazvukového testování nedokáže poskytnout skutečný obraz chyby v materiálu, jejich skutečnou velikost, geometrii nebo přesné umístění. Je to dáno vlnovým charakterem ultrazvuku. [1, 2, 4]

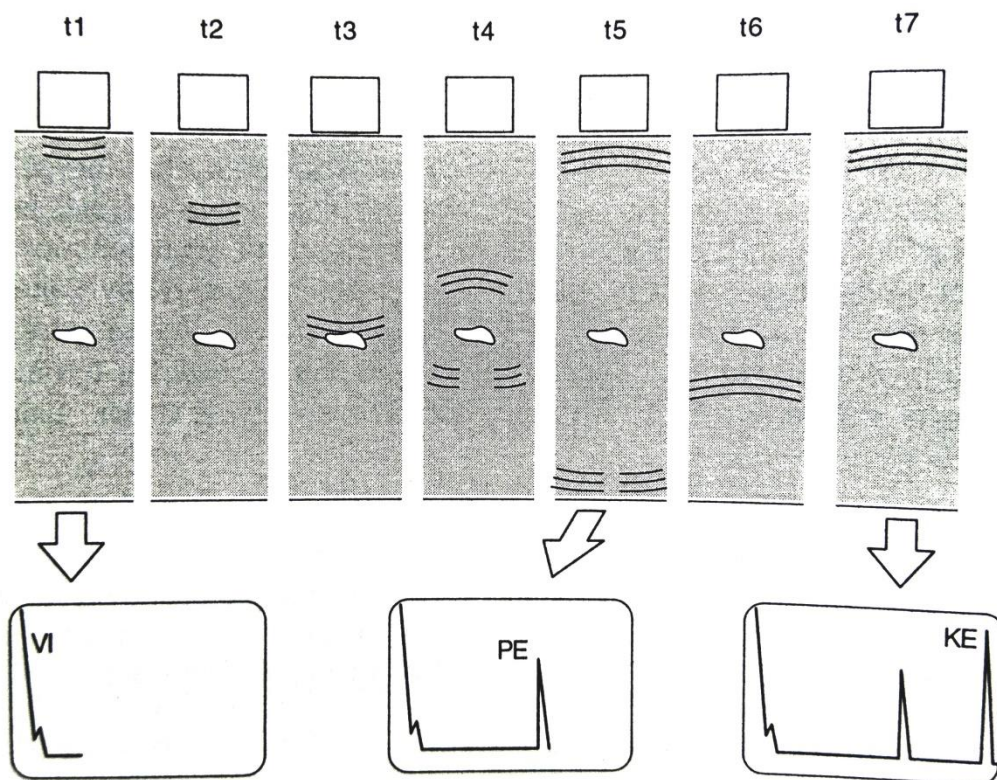
#### **3.9.1 Průchodová technika**

Průchodová metoda je založena na principu zeslabení ultrazvuku při průchodu místem s materiálovou chybou. Tato technika vyžaduje dvě sondy umístěné naproti sobě tak, že jedna jen vysílá vlnění a druhá sonda přijímá část vlnění, které přešlo skrz materiál. Průchodová metoda je vhodná pouze pro měření konstrukčních částí, které mají vhodně umístěné protilehlé povrchy. Nevýhodou této techniky je skutečnost, že jestli se chyba nachází ve větší vzdálenosti od přijímací sondy a její průměr je menší než průřez ultrazvukového svazku, potom se následkem ohybu vlnění v určité vzdálenosti za chybou uzavírá akustický stín a přijímací sonda zaznamená úplně stejný signál, jako by se v místě nenacházela žádná chyba. Další nevýhodou je, že výsledek měření průchodovou metodou je nepřímý – metoda dokáže zjistit přítomnost vady, ale nedokáže zjistit její hloubku a velikost. Na druhou stranu tato technika dokáže měřit díly, ve kterých není dobrý odraz, a materiály o velkém útlumu – dráha ultrazvukového signálu prochází materiálem pouze jednou, na rozdíl od techniky odrazové. Tato technika dokáže měřit ve velkém rozsahu a je vhodná i pro zkoušení lepených spojů. [1, 2]

#### **3.9.2 Odrazová technika**

Odrazová technika je založena na zjišťování odrazů – ech, které jsou způsobeny chybami materiálu. Na příjem ech se nejčastěji využívá přímých čelních nebo úhlových sond, které zároveň pracují jako vysílače a přijímače. Na zkoušení strojní části stačí pouze jeden

přístupný povrch. Dráha se určuje z doby příchodu echa od vyslání ultrazvukového pulzu. Při znalosti rychlosti šíření zvuku daným materiálem se může dopočítat vzdálenost chyby a z velikosti amplitudy echa se dá odhadnout její velikost. Při znalosti technologií výroby strojní části je možno z tvaru ech do určité míry odhadnout typ chyby. Nevýhoda této techniky tkví v tom, že ultrazvukový signál musí urazit dvojnásobnou dráhu, než je skutečná vzdálenost povrchu k vadě. Dále díky existenci mrtvého pásma sond není odrazová technika vhodná na zkoušení tenkých plechů. [1, 2]



Obr. 9 Odrazová technika – princip zobrazování ech. [1]

### 3.9.3 Technika phased array

Základem techniky phased array je sonda obsahující soustavu malých měničů – sond uspořádaných zpravidla lineárně. Každý z měničů je buzen samostatným generátorem a signály – echa přijaté z materiálu každým z měničů, jsou též zesilované samostatně. Šířka jednotlivých měničů je malá, takže každý z nich vysílá do materiálu elementární vlnovou vlnu. Vzájemným časováním zpoždění budících impulzů se dosáhne nasměrování výsledné vlny pod požadovaným úhlem, případně dojde i k fokusaci ultrazvukové vlny.

Tato technika je detailněji popsána v následující kapitole.

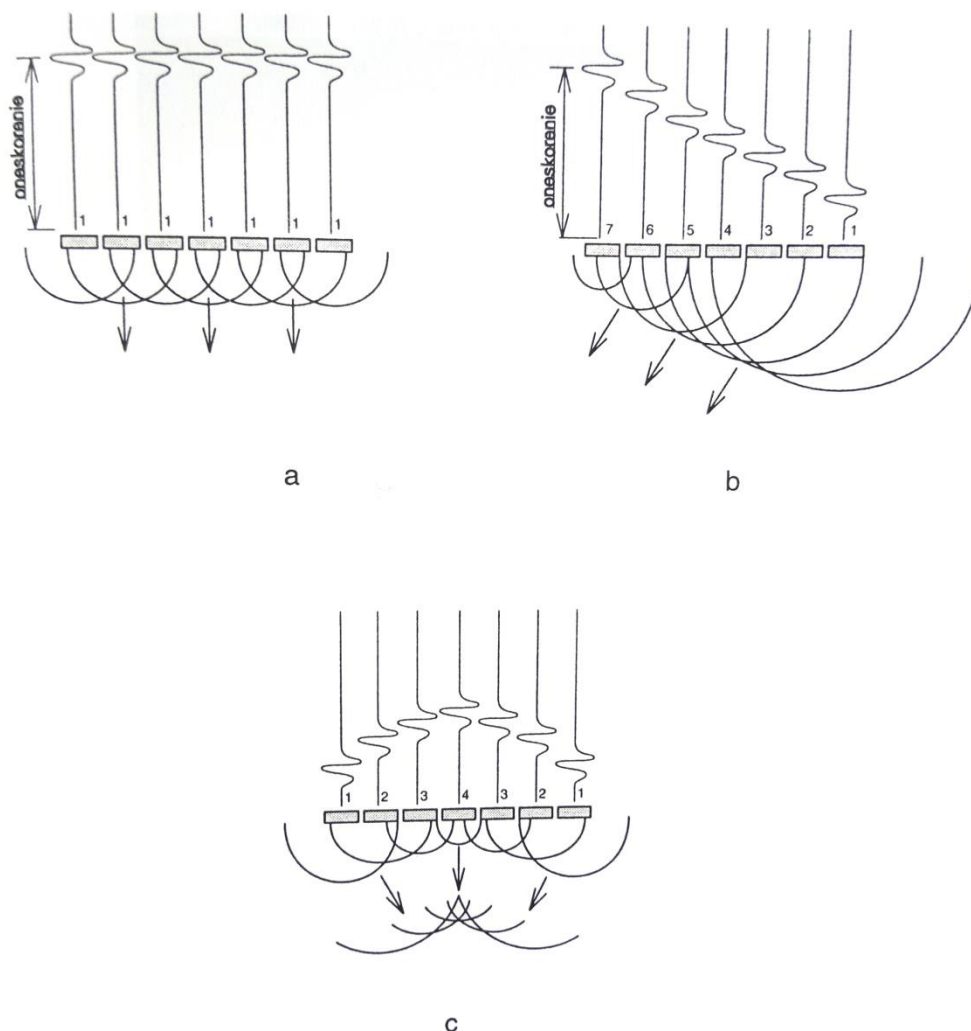
### 3.10 Phased array

Technika phased array v 90. letech dvacátého století byla převzata z oblasti medicínského ultrazvuku. Tato technika umožňuje elektronickou modifikaci ultrazvukového svazku. Jedná se o univerzální nástroj pro zjišťování vad například pro zařízení

v energetickém průmyslu, kde je potřeba zjišťovat náhodně orientované trhliny v různých hloubkách jednou sondou z jedné zkušební pozice. Zároveň zlepšuje detekci signálu v poměru k šumu při zkouškách heterogenních svarů, přesnost hodnocení velikosti defektů a možnost zjišťování malých trhlin např. v turbínových komponentech složité geometrie.

Předností této techniky je zobrazení vad z prozvučovaného průřezu v reálném čase, ve kterém je daleko snadnější orientace, zobrazení, indikace od šumu v pozadí oproti klasickým zobrazením konvenčních ultrazvukových technik. [1,5,6,7]

Nejčastější sondy obsahují 8 až 128 samostatně budících elementů o frekvenci 2 až 10 MHz a stejně jako pro konvenční sondy je možné používat různých předsádek. Velice výhodné je používat tzv. n-kodérů v průběhu měření. Jedná se o odvalující se člen, součást předsádky, který pro poloautomatické systémy dokáže automaticky zjistit odměřenou vzdálenost, jež se propisuje do výsledného záznamu o měření. Tato technologie je vhodná k přesnějšímu zpětnému dohledávání chyb při měření větších částí.

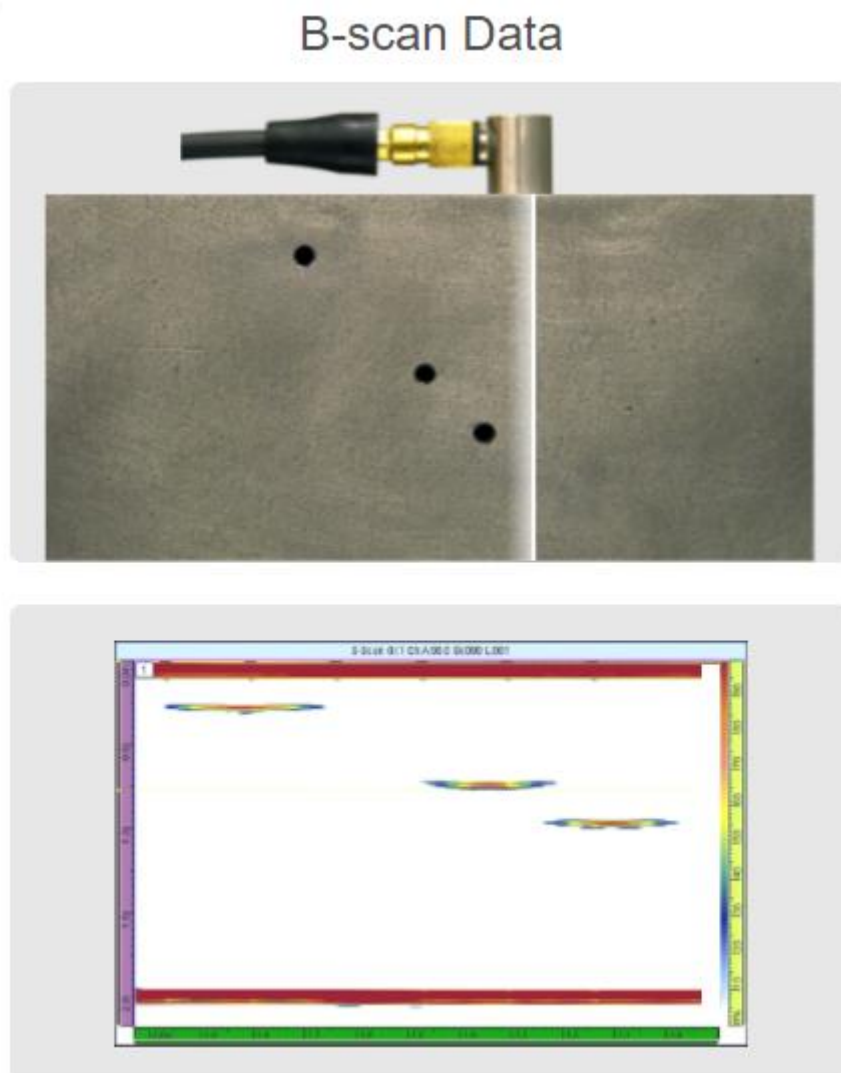


Obr. 10 Princip postupného vytváření fokusovaného ultrazvukového paprsku technikou phased array. [1]

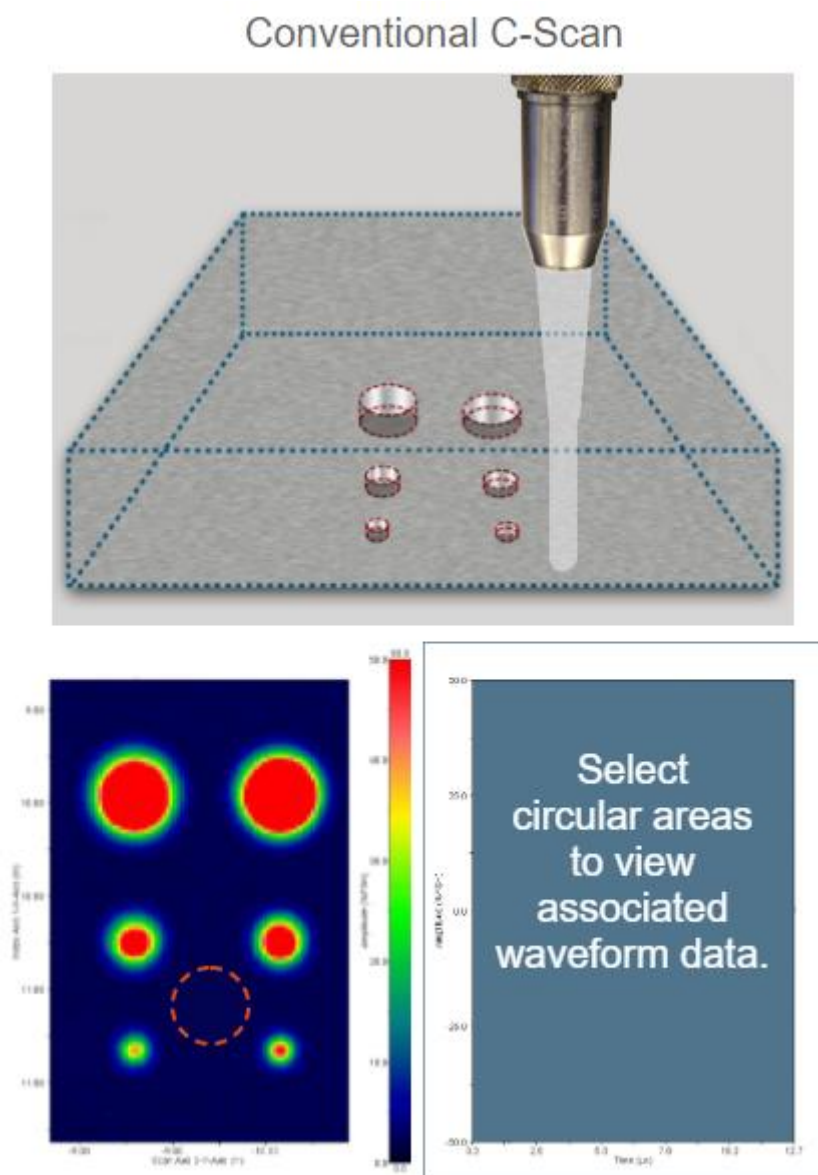
### 3.10.1 Výstupy měření a skeny z metody phased array

Přístroje zvládající techniku Phased Array dokážou vyhodnotit a zobrazit velké množství dat.

Klasický A sken, který je využíván konvenčními technikami ultrazvukového zkoušení a zobrazuje vizuální podobu ech, rychlosti, vzdálenosti a síly signálu šířící se napříč materiálem, i další vizuální interpretace šíření vln, jako jsou tzv. B, C, D, S skeny apod. mají své specifické využití. Velkou výhodou technologie Phased Array oproti jiným technikám je vizuální interpretace dat zobrazovaná v různých pohledech a řezech. Tyto skeny – řezy se dají připodobnit k pohledům v technickém kreslení (nárýs, půdorys, bokorys). Pohledy jsou stále orientační a jsou poznamenány určitou chybovostí zařízení – algoritmem vyhodnocování dat, tak i nedokonalostí sond a materiálu. Avšak pro zkoušení objemných komplikovaných částí, je tato technika nejrychlejším způsobem nalezení případné vady.

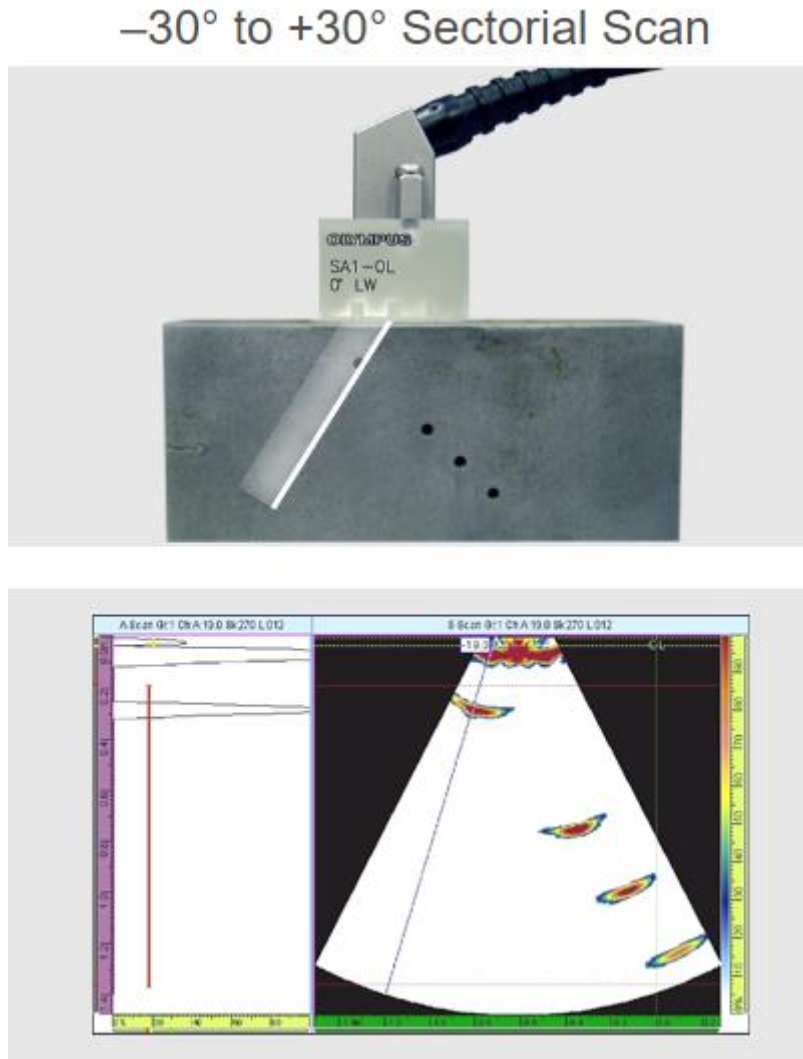


Obr. 11 Vizualizace B-skenován. [8]



Obr. 12 Vizualizace C-skenování. [9]





Obr. 13 Vizualizace S-skenování. [10]

### 3.11 Zkušební zařízení pro phased array

Níže popsané zařízení, je zároveň stejné zařízení, které bylo používáno při praktické části diplomové práce.

#### 3.11.1 Přístroj

Zařízení DYNARAY je optimalizován pro inspekce vyžadující dvoudimenzionální maticové sondy, dlouhé zvukové dráhy, nízkofrekvenční sondy a pro měření složitých geometrií. Přístroj dokáže využívat sondy v rozsahu frekvencí 0,5 – 20 MHz s pulzním napětím až do 200 voltů.

Přístroj je schopný zpracovávat soubory až do velikosti 20 GB a signály s rozlišením 16 bitů.

Zařízení – výrobce	DYNARAY – Zetec
Typ	128/128PR
Napájecí napětí	120 / 240 V
UT kanálů	16
Frekvence	50 / 60 Hz
Počet elementů (celkem/aktivních)	128/128
Rozměry	40 x 37 x 47 cm

Tab. 2 Parametry přístroje pro praktické měření metodou Phased Array. [12]



Obr. 14 Přístroje DYNARAY od společnosti Zetec. [11]

### 3.11.2 Sondy

Sonda	AM 3,5 MHz	AM 10 MHz
Výrobce	Zetec	Zetec
Frekvence	3,5 MHz	10 MHz
Rozměr měniče	9,6 x 10 mm	9,9 x 10 mm
Počet elementů měniče	16	32
Označení předsádky (klínu)	AM – 55SW	AM – 55SW
Vnější rozměry (d x š x v)	16 x 30 x 25 mm	16 x 30 x 25 mm

*Tab. 3 Parametry sond pro praktické měření metodou phased array. [12]*

### 3.11.3 Software UltraVision3

Jedná se o kompletní software určený pro zkušební ultrazvukové techniky. Software řídí sběr signálu, zobrazuje je v reálném čase, a dokáže poskytnout pozdější off-line analýzu z naměřených dat. [13]

## 4 Metodika zjišťování vad

Neexistuje univerzální a kompletní příručka metodiky zjišťování vad, ale pouze doporučení pro určité oblasti výrobních technologií. Mnoho firem má vlastní postupy na zjišťování vad a smluvní dohody mezi dodavatelem a partnerskými firmami. Ve většině výrobních firem tak i testovacích laboratořích se jedná o určité know-how, jak nejlépe a efektivně zjistit případné chyby v daném materiálu. Charakterizace vad pro konvenční ultrazvukové techniky je popsána v normě ČSN EN ISO 16827 Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Charakterizace a stanovení velikosti diskontinuit.

### 4.1.1 Faktory ovlivňující zkoušení

Na výsledek ultrazvukové zkoušky má vliv více faktorů. Mimo samotného přístroje a použité sondy jsou nejvýznamnější: akustická vazba, povrch zkoušené části, drsnost, zkoušený materiál, tvar zkoušené části a vlastnosti vady. [1]

Většina kovových materiálů má polykrystalickou strukturu. V průběhu procesů výroby může docházet k určité anizotropii materiálu. Anizotropní materiál má v jednom směru výrazně odlišné vlastnosti než v jiných směrech (velké výkovky, tvářené polotovary, vývalky). V materiálech s výraznou anizotropií bývá časté, že takové materiály jsou prozvučitelné jen v určitém směru. Na prozvučitelnost má vliv jak orientace zrn, tak i jejich velikost. Ultrazvukový signál u materiálu s velkými zrny je obvykle poznamenán velkým šumem. Samotné měření může velmi znepríjemnit, pokud jsou v materiálu odlišné velikosti zrn napříč průřezem např. u špatně ochlazovaných odlitků nebo ve střední části větších rotačních výkovků. V takovém případě velmi záleží na schopnostech technika, aby dokázal odlišit šum, signál od přítomnosti nekovových vměstků a od změny velikosti zrn. [1]

### 4.1.2 Požadavky na zkoušený povrch u ultrazvukových technik

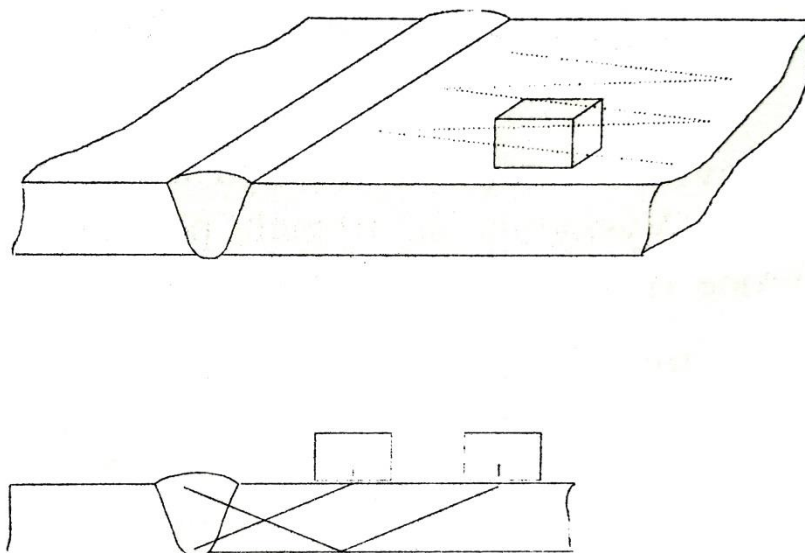
Kvalita povrchu zkoušené strojní části má podstatný vliv na přesnost hodnocení chyb. Velmi drsný povrch, povrch s okujemi nebo povrch s nepřilnutým barevným nátěrem má velký vliv na ztráty akustického tlaku při vstupu ultrazvukového pulzu do materiálu, proto není zkoušení takové součásti dovoleno. Pro přesné měření by měl být ideálně povrch rovný, zbroušený, měl by být zbaven volných částic, koroze a starých nátěrů. [1] Z normy ČSN EN ISO 16827 Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Charakterizace a stanovení velikosti diskontinuit vyplývá, že pro měření technikou phased array je maximální dovolená drsnost povrchu Ra 6,3  $\mu\text{m}$ , při použití vhodné akustické vazby a techniky lze měřit povrch až s drsností Ra 12,5  $\mu\text{m}$ .

## 4.2 Metodika zjišťování vad pro samostatné technologie výroby

U každé technologie výroby můžeme nalézt specifické druhy vad. V následujících podkapitolách jsou zmíněny vady u svařenců, odlitků a výkovků.

#### 4.2.1 Svařence

Zkoušení svarů patří k nejnáročnějším a zároveň velmi častým úlohám ultrazvukové defektoskopie. Svary mohou mít různé podoby a mohou být na těžce přístupných místech. Tupé svary se zkoušejí konvenčními úhlovými sondami z obou stran základního materiálu, přičemž sonda se pohybuje od a ke svaru, současně se sonda posouvá i stranově. Pohyb sondy po zkoušeném povrchu vytváří stopu písmene „V“. Přímým paprskem se prozvučuje oblast kořene svaru, odraženým paprskem krycí housenka. Při pohybu sondy po zkušebním povrchu se musí stopy drah částečně překrývat, aby bylo zaručené přezkoušení celé délky svaru. Úhel sondy se volí podle tloušťky základního materiálu. Pro tloušťky 6 – 25 mm se obvykle zkoušejí sondami s úhlem 70°. Na tloušťky 25 – 40 mm se používají sondy s úhlem 60° a větší tloušťky sondou s úhlem 45°. Svary tenkých tlouštěk se zkouší speciálními postupy ultrazvukového testování, nebo prozařovacími technikami. [1]



Obr. 15 Technika zkoušení tupých svarů. [1]

Normy zabývající se zkoušením svarů jsou např.: ČSN EN ISO 17640 Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení ultrazvukem – Techniky, třídy zkoušení a hodnocení, ČSN EN ISO 19285 Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení ultrazvukem technikou phased array (PAUT) - Stupně přípustnosti, ČSN EN ISO 23279 – Nedestruktivní zkoušení svarů – zkoušení ultrazvukem – charakterizace diskontinuit ve svarech., ČSN EN ISO 13588 Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení ultrazvukem – Využití automatizované techniky phased array.

#### 4.2.2 Odlitky

Odlitky se vzhledem ke své tvarové komplikovanosti zkouší ultrazvukem nesnadno. Většinou se používají přímé sondy o nízké frekvenci 1 – 2 MHz. Nejlépe prozvučitelné

odlitky jsou z nízkolegovaných ocelí po normalizačním žíhání, naopak struktura surového hrubozrného odlitku u šedé litiny je velmi těžko prozvučitelná. [1]

Normy zabývající se zkoušením odlitků jsou např. ČSN EN 12680-1 až 3.

#### **4.2.3 Výkovky a vývalky**

Výchozím materiálem pro výkovky jsou ingoty. Zkoušení ingotů je prakticky nemožné kvůli jejich hrubé lící struktuře. Dutiny v ingotech se často mohou zacelit během tvářecích operací. Proto se zkoušejí až hrubé výkovky obvykle sondou o frekvenci 1 – 2 MHz. [1]

Normy zabývající se zkoušením výkovků jsou např. ČSN EN 10228-3 pro feritické a martenzitické oceli. ČSN EN 10228-4 pro austenitické a korozivzdorné oceli.

## 5 Hodnocení vad

Hodnocení vad a posouzení jejich přípustnosti je obecně popsáno v normách pro danou výrobní technologii. Popisuje se určitá mez a odchylka od ideálního stavu materiálu, či velikost, umístění a počet přípustných a nepřípustných vad. Mnoho firem má přísnější požadavky na hodnocení vad, které jsou svázány smluvními dohodami mezi partnerskými firmami a odběratelsko-dodavatelskými vztahy. [1, 4]

Normy, které hodnotí vady, jsou např.: ČSN EN ISO 16827 – Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení ultrazvukem – Charakterizace a stanovení velikostí vad. ČSN EN ISO 11666 Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení ultrazvukem – Úrovně přípustnosti, ČSN EN ISO 19285 Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení ultrazvukem technikou phased array (PAUT) - Stupně přípustnosti.

### 5.1 Obecné dělení vad

Vady v konstrukčních částech se obecně mohou dělit podle místa přítomnosti vady na vady povrchové a objemové a vady způsobené určitou výrobní technologií.

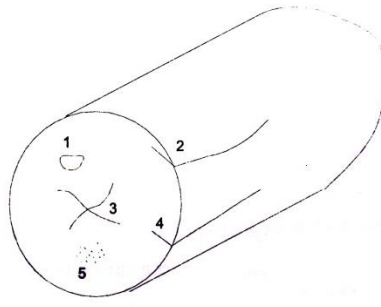
Skupina vad		Všeobecná charakteristika
číslo	název	
1	Vady rozměrů	Nedodržení požadavků na předepsané jmenovité rozměry výrobku a jejich mezí úchytky.
	Vady tvaru polohy	Nedodržení požadavku na vzdálenosti vyjadřující polohu posuzované plochy, osy, nebo roviny souměrnosti výrobku, vzhledem k její jmenovité poloze.
2	Vady povrchu	Nedodržení požadavku na předepsané provedení povrchu.
3	Necelistvosti	Necelistvost hmoty výrobku.
4	Vady zjišťované zvláštními laboratorními zkouškami	Nedodržení požadavků na předepsané hodnoty mechanických, technologických a fyzikálních vlastností výrobku, nedodržení předepsané makrostruktury, mikrostruktury apod.

Tab. 4 Základní třídění vad do skupin a jejich všeobecný popis. [1]

### 5.2 Dělení vad podle výrobní technologie

#### 5.2.1 Tváření

U kovaných strojních částí se mohou vyskytovat vady ve formě např. přeložek, nekovových vměstků, trhlin, povrchových a vnitřních dutin, staženin a vločkových trhlin. Vady obvykle vznikají nedokonalostí výroby nebo nedodržením výrobní technologie. O těchto vadách dále pojednává norma ČSN 42 0015 Vady tvářených ocelových hutních výrobků. Názvosloví a třídění vad.



Obr. 16 Chyby ve vývalku (1 – dutina, 2 – přeložka, 3 – osová trhlina, 4- povrchová trhlina, 5- vměstky). [1]

### 5.2.2 Odlévání

U odlitků se mohou vyskytovat např. vycezeniny, makroskopické vměstky, vločkové trhliny, bubliny, řediny, staženiny, trhliny za tepla, praskliny a strukturální vady. Normou pojednávající o vadách odlitků je ČSN 42 1240 Vady odlitků. Názvosloví a třídění vad.

### 5.2.3 Svařování

Vady ve svarech mohou být způsobeny nevhodnou technologií či nedodržením výrobního postupu. Vady mohou být v podobě neprovařených míst nebo studených spojů. Svar má přibližně lící strukturu, a proto se v něm také mohou vyskytovat obdobné chyby jako u odlitků např. bubliny, póry, trhliny za tepla a za studena, struskové vměstky. Pro tavné svařování se dále rozlišují trhliny podle geometrie na podélnou, příčnou, kráterovou, hvězdicovou a skupiny nespojitých a rozvětvených trhlín. Trhliny se mohou nacházet ve svarovém kovu, na hranici natavení, v tepelně ovlivněné oblasti a v základním materiálu. Podrobné rozdělení vad u svařování popisuje norma ČSN EN ISO 6520-1.



## 6 Materiály používané v jaderných a konvenčních elektrárnách

Při návrhu materiálů pro konstrukce energetických zařízení se musí vycházet z hodnot namáhání, provozních podmínek a prostředí, kterému bude konstrukce vystavena. Nejedná se jen o parametry meze pevnosti a hodnoty houževnatosti, které se zjišťují zkouškou tahem

a zkouškou rázem v ohybu. U materiálů pro energetiku je nutno zjišťovat hodnoty a vlastnosti za podmínek tečení, únavy, koroze a u jaderných zařízení i po neutronovém ozáření. Zároveň je nezbytné dokonale znát procesy degradace a změny vlastností materiálů vzhledem k dlouhé plánované životnosti energetického zařízení, včetně procesu vzniku a růstu trhlin. [14]

Příklady materiálů pro konvenční energetiku jsou např.: pro svařované konstrukce používané do teploty 575 °C se používají oceli typu CrMoV (ČSN 15 128) a typu CrMo (ČSN 15 313), pro rotory parních turbín s rozsahem pracovních teplot 400 – 520 °C se používají oceli na výkovky typu Cr12 (ČSN 17 134), pro nízkotlaké rotory parních turbín se používají oceli typu CrNiMoV. [14]

V současné době se hojně využívají oceli typu P91(X10CrMoVNb 9 - 1) a P92 (X10CrWMoVNb 9 - 2). Jsou to feritické oceli s použitím do maximální teploty 600 °C. Tyto oceli mají vynikající odolnost proti korozi, proti oxidaci a dobrou pevnost při vysokých teplotách. Teplotní odolnost těchto ocelí je výrazně lepší než u austenitických korozivzdorných ocelí. Ocel P92 oproti oceli P91 je navíc legována wolframem a borem a v současnosti se používá zejména na parovody a komory parních kotlů s vysokým výkonem. [32,33,34] Pro vysoce namáhané strojní součásti se dále využívají niklové slitiny.

Pro materiály používané v jaderných elektrárnách jsou kladené vysoké nároky na čistotu, množství a druhy legujících prvků materiálu. Kvůli kontaktu s jaderným palivem není možné používat běžné oceli. Hlavním požadavkem na materiály v jaderných elektrárnách jsou jaderné vlastnosti, které jsou různé pro jaderné palivo, pro moderátor, regulační tyče, i pro konstrukční materiály. U jaderného paliva je důležitý vysoký makroskopický průřez pro štěpení, ať už tepelnými, nebo rychlými neutrony. Pro materiály regulačních tyčí je naopak nutné, aby měly vysoký makroskopický účinný průřez pro záchyt tepelných nebo rychlých neutronů, to splňují např. materiály s bórem, kadmíem, hafniem a titanem. [15]

U výrobců ocelí pro jaderné elektrárny byl zaveden zvláštní režim třídění a skladování kovových surovin, aby bylo možné dosáhnout velmi nízkých obsahů kobaltu (0,02% hm). Kobalt se při kontaktu s jaderným palivem může stát radioaktivním, např. společnost POLDI Kladno vyráběla korozivzdorné austenitické oceli stabilizované titanem ATA SUPER (08Cr18Ni10T) pro výrobu konstrukcí v primárním okruhu jaderné elektrárny a pro výrobu parogenerátorových trubek. [16, 17]

## 7 Přesnost a chyby měření a přístrojů

V praxi nejsou žádné měřicí metody, žádné měření, ani žádný přístroj absolutně přesné.

Existuje široká řada negativních vlivů, které se v reálném měřicím procesu vyskytují a způsobí odchylku mezi naměřenou a skutečnou hodnotou sledované veličiny. Výsledné měření se proto vždy pohybuje v určitém intervalu – tolerančním poli kolem skutečné hodnoty. V praxi se téměř nikdy nestane, aby hodnoty skutečné a naměřené hodnoty byly identické. Přiblížení k nulové velikosti odchylky vytváří velké potíže i u realizace etalonů. [18]

Všechny akreditované laboratoře v Evropské Unii musí ve všech výsledcích vyjadřovat nejistoty měření dle normy ČSN EN ISO/IEC 17025 Všeobecné požadavky na kompetenci zkušebních a kalibračních laboratoří.

Chyba měření se vyjadřuje v absolutních nebo relativních hodnotách. Podle jejich působení lze chyby rozdělit na systematické, náhodné a hrubé. Podle zdroje chyby se dále rozdělují na chyby přístroje, metody pozorování a vyhodnocování.

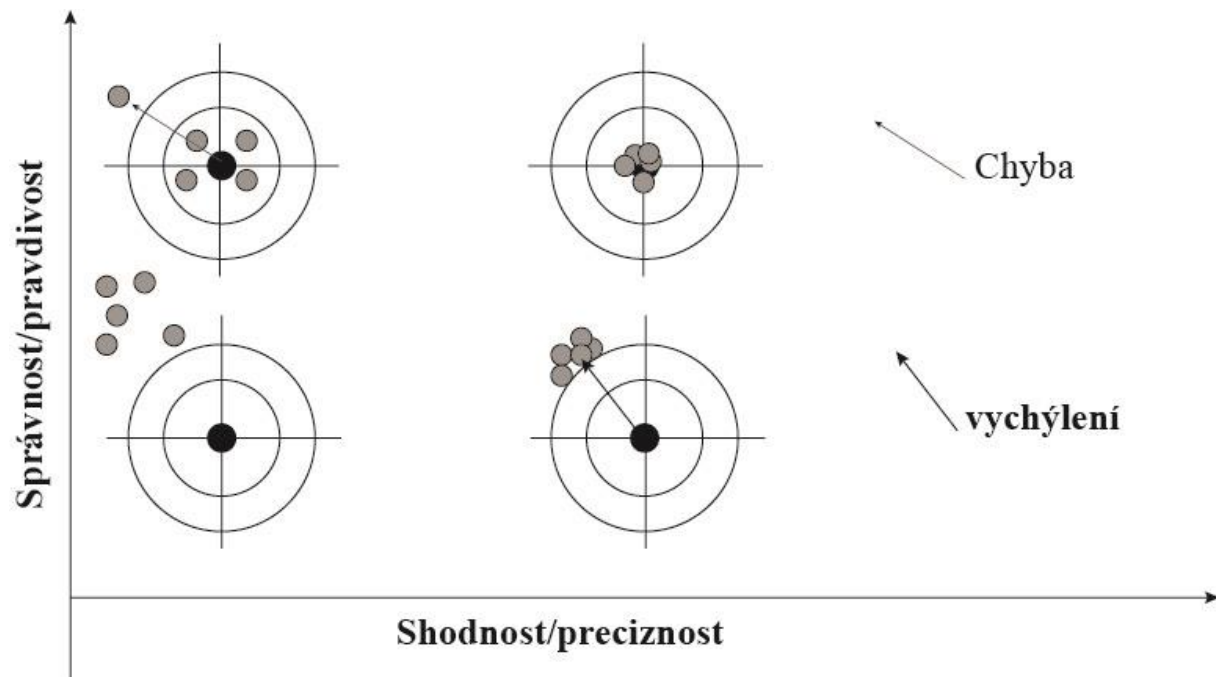
### 7.1 Terminologie

Obsluha provádějící zkušební stanovení musí ovládat související odbornou terminologii, aby mohla správně interpretovat své výsledky:

- **chyba výsledku:** rozdíl mezi výsledkem zkoušky a přijatou referenční hodnotou,
- **přesnost:** těsnost shody mezi výsledkem zkoušky a přijatou referenční hodnotou,
- **správnost/pravdivost:** těsnost shody mezi průměrnou hodnotou získanou z velké řady výsledků zkoušek a přijatou referenční hodnotou,
- **shodnost/preciznost:** těsnost shody mezi nezávislými výsledky zkoušek získanými za předem specifikovaných podmínek. Závisí pouze na rozdělení náhodných chyb. Vyjadřuje se směrodatnou odchylkou,
- **strannost/vychýlení:** rozdíl mezi střední hodnotou výsledků zkoušek a přijatou referenční hodnotou. Je to celková systematická chyba v protikladu k náhodné chybě,
- **opakovatelnost:** shodnost za podmínek opakovatelnosti,
- **podmínky opakovatelnosti:** podmínky za kterých se získají výsledky zkoušky stejnou metodou, na stejném zkušebním a měřicím zařízení, v téže laboratoři, stejnou obsluhou a během krátkého časového rozmezí,
- **mez opakovatelnosti:** hodnota, o níž se předpokládá, že pod ní bude ležet nebo se bude rovnat absolutní hodnotě rozdílu mezi dvěma výsledky zkoušek za podmínek opakovatelnosti, a to s pravděpodobností 95 %,
- **reprodukovatelnost:** shodnost za podmínek reprodukovatelnosti,
- **podmínky reprodukovatelnosti:** hodnota, o níž se předpokládá, že pod ní bude ležet, nebo se jí rovnat absolutní hodnota rozdílu mezi dvěma výsledky zkoušek za podmínek reprodukovatelnosti, a to s pravděpodobností 95 %,
- **nejistota:** číselný odhad přiřazený k výsledku zkoušky a charakterizující interval hodnot, o němž se tvrdí, že uvnitř něj leží správná hodnota. [19]

Na obr. 17 je grafické znázornění vybraných definic a to správnosti, shodnosti a přesnosti výsledků měření.

Referenční výsledek leží vždy uprostřed terče. Výsledek, na který ukazuje šipka je zjevně chybný. Výsledky na druhém terči jsou správné, shodné a přesné. Na třetím terči jsou výsledky nesprávné a nepřesné, na čtvrtém terči jsou výsledky vychýlené, ale shodné.



Obr. 17 Příklad vlivu změny shodnosti a správnosti výsledků na jejich přesnosti. [19]

### 7.1.1 Chyba absolutní

Absolutní chyba označující se písmeny  $\Delta_y$  značí rozdíl mezi hodnotou naměřenou  $y_m$  a hodnotou skutečnou  $x_s$ . Poměrem absolutní a skutečné chyby dostaneme chybu relativní  $\delta_x$ . [14]

$$(9) \quad \Delta_y = y_m - x_s$$

$$(10) \quad \delta_x = \frac{\Delta_y}{x_s} = \frac{y_m - x_s}{x_s}$$

### 7.1.2 Systematická chyba

Systematická chyba se při různých měřeních nemění, mívá obvykle stejné znaménko i stejnou hodnotu při opakovaném měření. Systematické chyby se podrobněji dělí na chyby aditivní, ty jsou způsobeny špatným nastavením nuly a chyby multiplikační – to jsou chyby, které byly způsobeny nastavením špatného měřítka nebo nevhodnou citlivostí přístroje. Systematické chyby jdou velmi snadno uživatelsky odstranit např. za pomoci korekcí, kompenzací apod. Tímto se zpravidla dá odstranit podstatná část negativního vlivu na měření, ale vždy zůstane ještě zbytek nevylučitelné systematické chyby. [18, 19]

### 7.1.3 Náhodná chyba

Náhodné chyby jsou těžko předvídatelné, nelze je vyloučit a působí zcela nahodile. Při opakovaném měření se mění jejich velikost i znaménko. Po určení jejich velikostí se vychází z opakovaných měření s použitím statistických metod odpovídajících patřičnému pravděpodobnostnímu modelu reprezentovaném zákonem rozdělené příslušné nahodilé chyby. V praxi se nejčastěji jedná o Gaussovo rozdělení, které se používá ve většině aplikací. Výsledek měření, který je stanoven ze souboru opakovaných měření realizovaných za stejných podmínek, je reprezentován aritmetickým průměrem  $\bar{y}$ , získaným při  $n$  opakování z hodnoty  $y_1, y_2 \dots y_i, \dots y_n$ .

$$(11) \quad \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$$

Samotná průměrná hodnota, nemusí mít žádnou interpretační váhu. Proto se hojně využívají další statistické funkce, jako jsou:

Náhodná odchylka/chyba shodnosti  $O_i$ .

$$(12) \quad O_i = y_i - \bar{y}$$

Rozptyl  $S^2(y_i)$ . Rozptyl udává, jak moc jsou hodnoty v našem statistickém souboru rozptýlené.

$$(13) \quad S^2(y_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

Směrodatná odchylka jednotlivého měření  $S(y_i)$ .

$$(14) \quad S(y_i) = \sqrt{S^2(y_i)}$$

Směrodatná odchylka výběrového aritmetického průměru.

$$(15) \quad S_{\bar{y}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n \cdot (n-1)}}$$

Obě směrodatné odchylky patřičným způsobem blíže charakterizují chování náhodných chyb. [15]

### 7.1.4 Hrubá chyba

Hrubé chyby jsou z předchozích pohledů zcela nevyzpytatelné. Měření zatížené hrubou chybou znehodnotí celý experiment. Hrubé chyby jsou takové chyby, které na první pohled vybočují, nebo jsou velmi odlehlé. Jejich příčinou je hrubá chyba, např. porucha zařízení nebo chyba obsluhy. Hrubé chyby silně znehodnotí výsledek, a proto musí být statisticky potvrzeny. Na vyloučení odlehlých a vybočených hodnot se využívá Cochranův

a Dean-Dixonův test. Výsledky měření dotčené hrubou chybou musí být vyloučeny z výsledného hodnocení. [18, 19]

## 7.2 Nejistoty měření

Nejistota měření charakterizuje rozsah naměřených hodnot okolo výsledku měření, který lze zdůvodněně přiřadit k hodnotě měřené veličiny. Nejistoty měření se týkají měřících přístrojů, hodnot použitých konstant, výsledků měření, korekcí apod, na kterých nejistota výsledku měření závisí. Mírou nejistoty měření je směrodatná odchylka udávané veličiny. Takto vyjádřená nejistota se označuje jako standardní nejistota „u“ a představuje rozsah hodnot okolo naměřené hodnoty. Standardní nejistoty se mohou rozdělovat na nejistoty typu A

a typu B. Nejistoty se udávají samostatně, nebo za výslednou naměřenou hodnotou se znaménkem  $\pm$ . Je třeba zdůraznit, že se nečlení nejistoty jako takové, ale metody jejich vyhodnocování. Nejistoty určené oběma metodami, pokud jsou vyhodnoceny korektně, si jsou navzájem rovnocenné. [18]

### 7.2.1 Nejistoty typu A, $u_A$

Nejistoty typu A jsou takové nejistoty, které jsou získané statistickými metodami z naměřených údajů. Jsou způsobovány náhodnými chybami, jejichž příčiny jsou všeobecně neznámé. Tento druh nejistoty se se stoupajícím počtem opakovaných měření zmenšují. Přičemž se předpokládá existence náhodných chyb s normálním rozdělením. [18, 19]

### 7.2.2 Nejistoty typu B, $u_B$

Nejistoty, které jsou získané jakýkoliv jiným způsobem, než za pomoci statistických metod se nazývají nejistoty stanovené metodou B. Identifikaci a základní hodnocení provádí experimentátor, který musí provést podrobný rozbor chyb, což vyžaduje značné zkušenosti. Nejistoty vyhodnocované metodou B se váží na známé nebo identifikované zdroje a nejsou závislé na počtu měření. Počtem měření se oproti nejistotám typu A nezmenšují. Charakter nejistot stanovených metodou B je více individuální a vyžaduje znalosti příslušného oboru měření. Nejistoty stanovené metodou B určují ve většině případů celkovou nejistotu. Opomenutí jedné významné složky zničí celou stavbu výpočtu nejistot. O tom, že počítání není tak snadné, ukazuje i mezinárodní výsledek porovnání, kde se v oblasti elektroniky na základě zadaných dat jednoduchého měření zpracovával protokol, a spočítaly se nejistoty. Osmdesát devět laboratoří z celého světa vyčíslily nejistoty a výsledky se lišily až o dva řády. [18, 19, 20]

## 7.3 Přímé a nepřímé metody měření

Podle způsobu získávání měřené veličiny se rozlišuje přímé, nepřímé a kombinační získávání hodnot z měření. [18, 20]

### 7.3.1 Přímé měření

Přímé metody měření jsou takové metody měření, u kterých se přímo odečítají veličiny na měřicím přístroji, aniž by se musel provádět výpočet podle daných závislostí veličin na veličinách jiného druhu, které by jinak nebyly měřeny. Použití grafů a tabulek, pomocí nichž se převede údaj přístroje na hodnotu určované veličiny, se také do této skupiny metod započítává. [16]

### 7.3.2 Nepřímé měření

Nepřímé metody měření potřebují k určení hodnoty zjišťované veličiny výpočtové vztahy – funkční závislosti, které jsou vázány na jednotlivé měřené veličiny. [20]

### 7.3.3 Kombinační měření

Kombinační metodou měření se stanovuje hodnota z hodnot měřených veličin z různých kombinací výsledků přímých měření a řešením příslušné soustavy rovnic. [20]

## 7.4 Zdroje nejistot

Zdroje nejistot mohou být obecně jakékoliv jevy, které nějakým způsobem ovlivňují jednoznačnost výsledku měření a tím vzdalují naměřenou hodnotu od hodnoty skutečné. Na nejistoty působí výběr měřicích přístrojů, zda jsou analogové či digitální, používá-li se různých filtrů a vzorkování, či jakýchkoliv prostředků na trase přenosu signálu, a konečná úprava měřicího signálu. K nejistotám velmi přispívají rušivé vlivy z prostředí v tom nejširším slova smyslu. Nelze vyjmenovat veškeré možné zdroje nejistot, níže jsou zmíněné ty, které se vyskytují nejčastěji.

- Nedokonalá či neúplná definice měřené veličiny.
- Nevhodný výběr přístroje nebo jeho rozlišovací schopnost.
- Nevhodný reprezentativní výběr vzorku pro měření.
- Nevhodný postup při měření.
- Zjednodušení či zaokrouhlování konstant.
- Linearizace, aproximace, interpolace či extrapolace hodnot.
- Neznámé nebo nekompenzované vlivy prostředí.
- Nedodržení shodných podmínek při opakovaných měřeních.
- Nepřesnost referenčních materiálů a etalonů.
- Subjektivní vlivy obsluhy. [18]

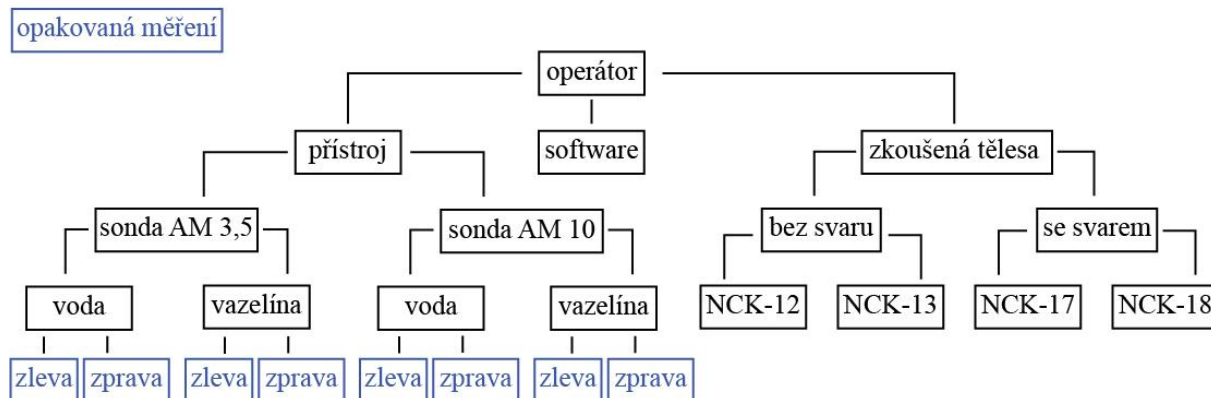
## 8 Návrh experimentu

Pro praktickou část diplomové práce byl realizován experiment skládající se z opakovaných měření předem připravených těles opatřenými umělými vadami známých velikostí. Pro měření byly použity dvě rozdílné sondy (o frekvenci 3,5 MHz a 10 MHz) a dvě rozdílné akustické vazby (vazelína a voda), měření probíhalo z levé i pravé strany vůči poloze vady.

Cílem experimentu je zjistit vliv zkoušené frekvence, typu vazby a směr zkoušení na výslednou nejistotu u ultrazvukového zkoušení technikou phased array na předem připravených ideálních vadách.

Praktické měření v rámci diplomové práce zároveň slouží jako vzor a začátek plánovaného dlouhodobého projektu k systematickému vyjadřování nejistot měření u ultrazvukového testování pro NDT laboratoře Centra výzkumu Řež, s.r.o.

Grafické schéma průběhu experimentu



Obr. 18 Grafické schéma průběhu experimentu.

## 9 Popis těles

Jak bylo výše zmíněno, pro potřeby měření byly zhotoveny čtyři kusy těles z feritické oceli ČSN 12 022.1. Všechna tělesa byla opatřena umělým vrubem, který byl zhotoven drátořezem. Tělesa NCK-12 a NCK-13 měla stěny rovnoběžné, tělesa NCK-17 a NCK-18 byla opatřena návarem nad místem vrubu – jedná se o simulování chyby ve svarovém spoji.

Těleso	Délka [mm]	Výška [mm]	Tloušťka [mm]	Výška vady [mm]	Drsnost Ra [ $\mu\text{m}$ ]
NCK-12	250	35	40	12,2	0,68
NCK-13	250	35	40	12,2	0,35
NCK-17	260	35	40	12,2	5,98
NCK-18	260	35	40	12,2	5,6

Tab. 5 Rozměry těles.

Drsnost byla změřena kontaktním drsnoměrem HOMMEL TESTER T1000.



Obr. 19 Tělesa opatřena umělou vadou vytvořenou za pomoci drátořezu.



## **9.1 Popis materiálu**

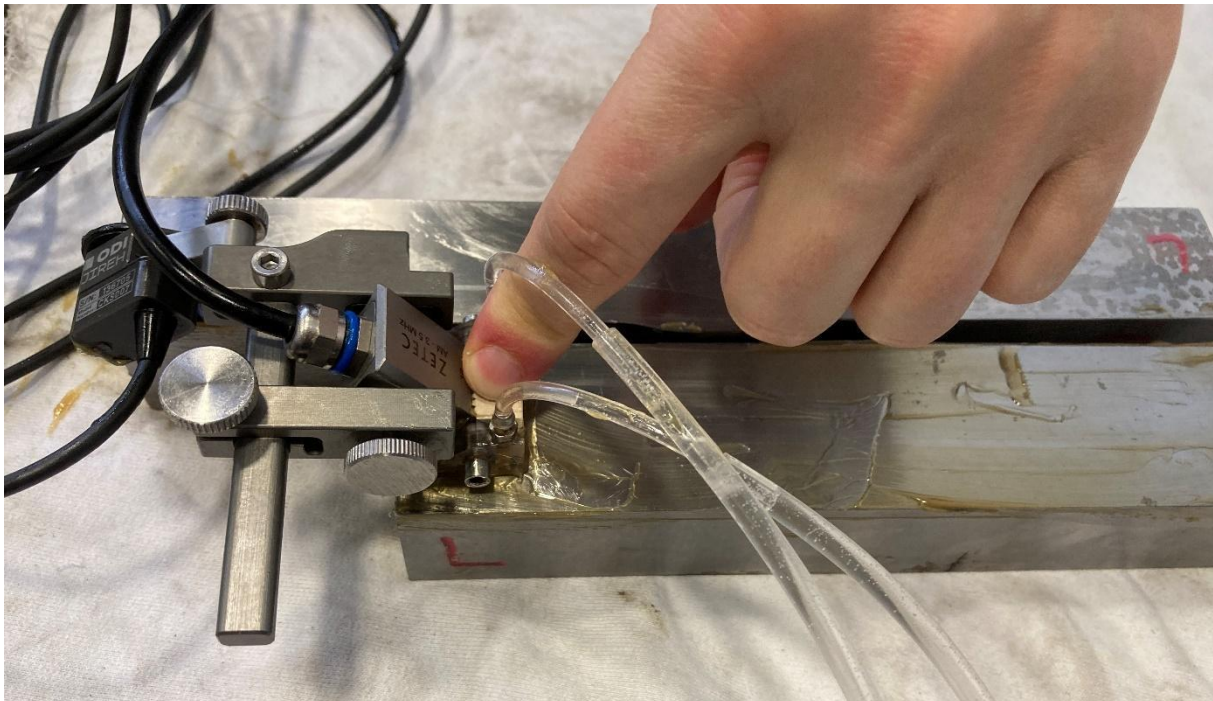
Tělesa byla zhotovena z oceli ČSN 12 022.1. Dle normy ČSN 41 2022 se jedná o ušlechtilou uhlíkovou ocel se zaručenou minimální hodnotou meze kluzu za vyšších teplot, vhodnou na potrubí součástí energetických a chemických zařízení. Ocel byla dodána ve stavu normalizačně žíhaném.

## 10 Popis průběhu měření

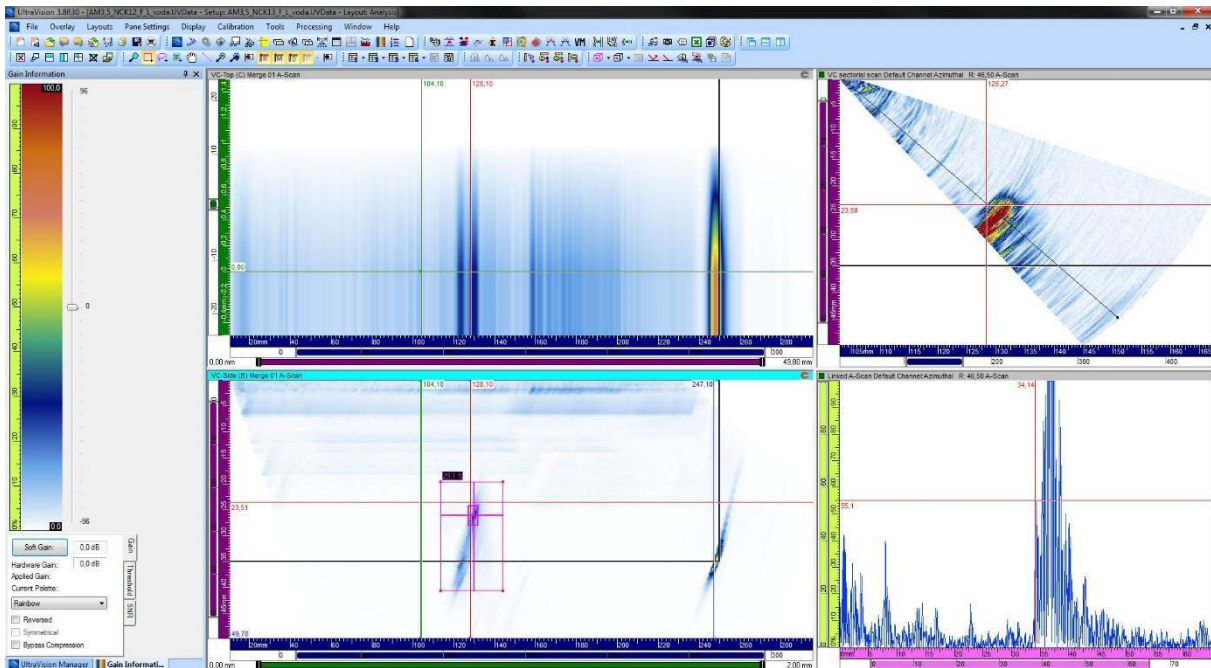
Měření bylo realizováno přístrojem Dynaray typu 128/128 PR, s phased array sondami AM 3,5 MHz a AM 10 MHz od společnosti Zetec. Pro pozdější vyhodnocování sloužil software UltraVision3, taktéž od společnosti Zetec. Stav zkoušeného povrchu splňoval požadavek na hodnotu drsnosti  $R_a \leq 6,3 \mu\text{m}$ .

Na kraj očištěného povrchu tělesa se položí sonda s n-kodérem. K sondě je pevně připevněna předsádka umožňující akustickou vazbu za pomoci vody, viz obr. 20. Sonda je připojena ke zdroji tekoucí vody, jež je kontinuálně dopravována pod měřící sondu, kde vytváří tzv. vodní polštář. Ten zajistí akustickou vazbu mezi povrchem tělesa a měřící sondou. S vynulovaným n-kodérem začne probíhat měření, kdy NDT technik ručně přejede sondou zkoumané těleso nejprve z jedné strany tělesa a veškerá data a signál z ultrazvuku je uloží do paměti měřícího zařízení. Posléze se měření opakuje z druhé strany. Celý průběh měření se opakuje napříč všemi měřenými tělesy, technik postupně vystřídá vazelínu a vodu jako akustickou vazbu, i dvě různé měřící sondy. Při měření za pomoci vazelíny se měřící postup liší jen v prvotním začátku, kde se používá vazelína a je v dostatečné míře rozetřena na povrchu očištěného tělesa, aby sloužila jako akustická vazba mezi sondou a měřeným tělesem. [23]

Po skončení měření se technik přemístí do kanceláře, kde z měřícího zařízení překopíruje data do počítače a v softwaru UltraVision3 vyhodnotí naměřená data. Technik hledá indikaci vady v objemu zkoušených těles. Tím technik potvrdí přítomnost vady. Na grafickém znázornění signálů posléze hledá největší rozpětí rozdílů kontrastů, ohraničí je digitálními pravítky a po předchozí kalibraci přístroje může určit skutečnou velikost vady, viz obr. 21. Celkem technik provedl 64 měření, kde zapsal 320 na sobě nezávislých hodnot.

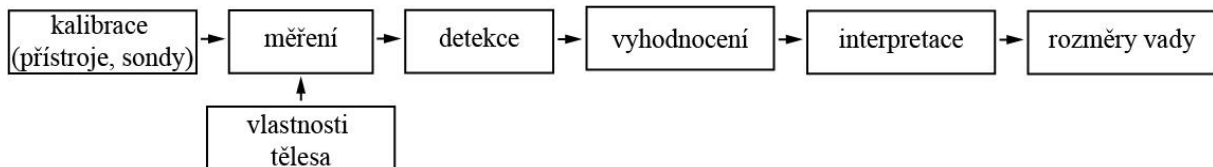


Obr. 20 Průběh měření s použitím vazelinové akustické vazby. [23]



Obr. 21 Vyhodnocení záznamu měření tělesa NCK-12 se sondou AM 3,5 (vodní akustická vazba, měřeno zleva) v softwaru UltraVision3. [23]

Na obr. 22 je graficky znázorněna posloupnost jednotlivých operací, které technik vykonává v průběhu měření. V průběhu měření je brán zřetel na vlastnosti tělesa a výběr měřícího zařízení.



Obr. 22 Grafické blokové schéma celkového průběhu měření vady.

## 11 Popis naměřených dat

Veškerá níže zmíněná data byla změřena jedním a tím samým kvalifikovaným NDT pracovníkem v plzeňské pobočce Centrum výzkumu Řež, s.r.o. Další měření probíhala na půdě Západočeské univerzity, ale kvůli jiné použité měřicí technice, softwaru i jiné obsluhy nebylo dosaženo dostatečné míry opakovatelnosti, která je pro vyjadřování nejistot stěžejní, proto byla tato data vyřazena z celkové analýzy.

Celkem proběhlo 64 měření, které zaznamenávají 5 nezávisle proměnných, viz tabulky v příloze. Zaznamenávala se hloubka vady (v ultrazvukové terminologii vykazována jako výška vadové indikace), poloha vady poloha rohu, amplituda vady a amplituda rohu. Z hodnoty hloubky vady a se znalostí velikosti tloušťky materiálu můžeme dopočítat skutečnou výšku vady. Pro výpočtové modely, které jsou rozebrány níže, byly použity pouze hodnoty hloubky vady. Jelikož přístroj Dynaray pracuje v uživatelském režimu jako „black box“, není možné přesně nahlédnout do funkcí a přepočtů, které v průběhu měření v přístroji probíhají (přepočty a odečítání napětí na piezoelektrických elementech v sondách, načasování a přepočet jednotlivých pulzů, odrazy a šíření zvukových vln, buzení jednotlivých segmentů u sond pro phased array apod.). Jedná se o know-how společnosti Zetec. Proto byly vyřazeny všechny hodnoty, až na hodnoty hloubky vady, jelikož ostatní data nenesou faktickou informaci o velikosti vady, ale jen říkají, jakým způsobem se k této hodnotě z průběhu měření došlo – fakticky tuto hodnotu, ale nelze ovlivnit. Hodnotu hloubky vady je nutné z přístroje odečítat jako hodnotu faktickou, ačkoliv se jedná o hodnotu, která je měřena nepřímou metodou a jako taková bude zatížena nejistotou. NDT technik ji získal odečtením hodnot z „gate“, kterými ohranil graficky znázorněnou vadu, výslednou hodnotu v mm zaokrouhlil na jednu platnou číslici.

## 12 Práce s daty

Jelikož se nejedná o běžné vyjadřování nejistot z většího počtu měření, ale o potenciální závislosti – rozdíly způsobené odlišnými metodami měření (souvislosti mezi menšími statistickými soubory), je interpretace naměřených dat velmi náročná. Proto by se neměly níže zmíněné výsledky měření včetně získaných dat brát v úvahu pouze pro tento typ těles a způsob měření, ale spíše jako přiblížení problematiky a poukázání na určité potenciální souvislosti. Přeci jen korelace neimplikuje kauzalitu a vyjadřování nejistot v oblasti NDT je průkopnická disciplína.

Pro zpracování změřených hodnot byl vytvořen postup přípravy a správy dat, který by byl aplikovatelný pro budoucí měření. Skládá se z několika kroků.

1. Definovat měřenou veličinu a jednotku vhodnou k porovnávání (v experimentu je zaměřeno na hodnotu hloubky vady v mm).
2. Podle počtu opakovaných měření vybrat vhodnou metodiku vyjadřování nejistot.
  - a. Počet hodnot měření  $n \geq 10$  (ideálně 30 a více).

Velikost nejistoty měření se vyjádří za pomoci Gaussova (normálního) rozdělení a násobku směrodatné odchylky podle zvolené hladiny spolehlivosti (Dle tabulkových hodnot  $\pm \sigma$  platí pro 68,3% pravděpodobnost,  $\pm 2\sigma$  pro 95,4% pravděpodobnost a  $\pm 3\sigma$  pro 99,73% pravděpodobnost). [24]

Na počátku vyhodnocování je nutná kontrola hrubé chyby „ $3\sigma$ “ (hodnoty, které se liší o více, jak třinásovek směrodatné odchylky vůči aritmetickému průměru se musí vyřadit z následných statistických operací).

Pro nalezení spojitosti mezi jednotlivými statistickými soubory z jiných měření se může využít parametrický test (např. Studentův test). Pro porovnání statistických souborů, které vznikly spojením z jiných statistických souborů např. z různých měření, se využívají neparametrické testy, jako je např. znaménkový test. [29, 30, 31]
  - b. Počet hodnot měření  $n \leq 10$ 

Výběr vhodného nástroje k vyjadřování nejistot: pro  $(4 \leq n \leq 10)$  je vhodná Hornova analýza, pro  $n \leq 3$  se využívá interval spolehlivosti střední hodnoty pro zvláště malé výběry. [19]
3. Vyjádření výsledné hodnoty a k ní velikost nejistoty v definované hladině spolehlivosti. Výsledná hodnota se zapisuje ve tvaru  $\bar{y} \pm S$ , tedy výsledná hodnota a velikost nejistoty v definované hladině spolehlivosti (aritmetický průměr  $\pm$  určitý násobek směrodatné odchylky dle zvolené hladiny spolehlivosti). Velikost nejistoty musí být formálně zapsána se stejným počtem platných číslic, jako je vyjádřena průměrná naměřená hodnota. V případě Hornovy analýzy se hodnota nejistoty spočítá jako rozdíl spodní a horní meze intervalu spolehlivosti střední hodnoty. [24]

## 12.1 Velký statistický soubor

Pro následující množinu dat byly vyjádřeny nejistoty za pomoci metody A, tzn. metody vycházející ze statistického zpracování. Byla vybrána metoda využívající normální (Gaussovo) rozdělení statistického souboru. Tato metoda je velmi běžná a vhodná pro přímé měření fyzikálních veličin zatížených náhodnou chybou. Měření UT není měření přímé, ale kvůli nemožnosti nahlédnutí do výpočtového modelu ultrazvukového přístroje, byla odečtená hodnota hloubky vady považována za veličinu přímo měřenou. Jako výsledná hodnota měření byl použit aritmetický průměr z hodnot ze statistického souboru a jako velikost nejistoty směrodatná odchylka (případný násobek směrodatné odchylky pro vyjádření rozšířené nejistoty). Výsledek byl zapsán s korektním počtem platných číslic dle pravidel vyjadřování nejistot. Dále byly vyjádřeny statistické funkce, jako jsou medián, modus. V metrologické praxi se hodnoty průměru, mediánu a módu porovnávají mezi sebou, jestli se jedná o hodnoty, které si jsou velmi blízké, může být statistický soubor považován za soubor splňující podmínky Gaussova rozdělení. Hodnoty šikmosti a špičatosti mají vesměs informativní charakter, který ukazuje geometrický tvar Gaussova rozložení statistického souboru. Tyto hodnoty mohou sloužit k vyjadřování parametrických testů, nebo upozornit na přítomnost hrubé chyby.

Jediné těleso, které bylo měřeno vícekrát, bylo těleso s označením NCK-18. Jednalo se o těleso opatřené svarem. Těleso NCK-18 bylo měřeno vždy pětkrát danou metodou (měřeno sondou AM3,5 s akustickou vazbou za pomoci vody, za pomoci vazelíny, měřeno jak z levé, tak z pravé strany, to vše se opakovalo pro použitou sondu AM10). Díky opakovanému měření, bylo dosaženo potřebného minimálního počtu dat vhodného k běžné statistické analýze a vyjádření nejistoty za pomoci normálního (Gaussova) rozložení.

Premisa pro následné porovnání dat je taková, že v NDT oblasti se jakýkoliv druh výše popsaného měření považuje za zcela správný a výstupní hodnoty by proto měly vždy platit. S výsledky tělesa NCK-18 bylo operováno, jako by všechny způsoby měření měly stejnou váhu, a všechna data tohoto tělesa změřená různými metodami (druh použité sondy, akustické vazby a směr měření) byla brána jako jeden statistický soubor. Po zpracování 40 hodnot obsahujících těleso NCK-18 je výsledkem průměrná hodnota hloubky vady 22,34 mm a směrodatná odchylka 0,6. Výsledek vyjádření nejistoty s 68,3% pravděpodobností může být zapsán jako  $22,3 \pm 0,6$  mm. Jedná se o přijatelnou míru nejistoty. Kvůli možnosti porovnání výsledků s výsledky získanými z níže popsaných malých statistických souborů, byla vyjádřena nejistota rozšířená, tzn. v podobě dvojnásobku směrodatné odchylky. Byla tím získána hodnota říkající, že velikost chyby s 95,4% pravděpodobností pokrývá maximální velikost chyby ve statistickém souboru. Výsledek může být napsán jako  $22,3 \pm 1,2$  mm, více informací v tab. 6.

<b>Průměr</b>	<b>22,34</b>
Medián	22,20
Modus	22,40
Šikmost	1,29
Špičatost	2,67
<b>Směrodatná odchylka</b>	<b>0,60</b>
Poměr směrodatné odchylky vůči průměru	2,69%

*Tab. 6 Porovnání všech změřených hodnot hloubky vady [mm] napříč všemi akustickými vazbami, použitými sondami a směru měření na tělese NCK-18.*

Dále byly porovnány jednotlivé sondy a druhy akustické vazby u tělesa NCK-18. Z tab. 7 vyplývá, že u sondy AM3,5 (s frekvencí 3,5 MHz) je směrodatná odchylka menší při použití akustické vazby za pomoci vody (0,56) oproti akustické vazbě za pomoci vazelíny (0,84). Zároveň je zobrazená průměrná hodnota velikosti chyby u vazelíny větší (22,48 mm), než u vody (22,22 mm). U sondy AM10 je tomu přesně naopak. Pokud se nejedná o chybu zápisu NDT technika, jde o velmi zajímavý fenomén, který by si zasloužil podrobnější experiment.

Sonda	AM3,5		AM10	
	voda	vazelína	voda	vazelína
Měřeno zleva	22,2	22,4	22	22,1
	22,4	22,8	22,2	22,4
	21,8	21,9	21,4	22,1
	21,7	22,6	22,4	21,9
	22	21,8	21,9	21,9
Měřeno zprava	23,5	21,9	22,9	22,1
	21,6	22	22,7	21,9
	22,4	24,5	23,1	22,4
	21,8	23,3	22,9	23
	22,8	21,6	22,8	22,6
<b>Průměr</b>	<b>22,22</b>	<b>22,48</b>	<b>22,43</b>	<b>22,24</b>
Medián	22,10	22,20	22,55	22,10
Modus	22,40	21,90	22,90	22,10
Šikmost	1,22	1,48	-0,64	1,10
Špičatost	1,35	2,20	-0,49	0,79
<b>Směrodatná odchylka</b>	<b>0,56</b>	<b>0,84</b>	<b>0,52</b>	<b>0,34</b>
Poměr směrodatné odchylky vůči průměru	2,50%	3,73%	2,31%	1,53%

Tab. 7 Porovnání naměřených hodnot velikosti hloubky vady [mm] z měření tělesa NCK-18 za pomoci sondy AM3,5 a sondy AM10 v různých akustických vazbách.

Při porovnání sond AM3,5 a sondy AM10 u tělesa NCK-18 napříč měřeními s oběma akustickými vazbami a směru měření, viz tab. 8, byla získána informace, že sonda AM3,5 má téměř dvojnásobnou směrodatnou odchylku vůči sondě AM10 při zachování téměř identických průměrných hodnot. Podle následujících dat se dá odhadnout, že pro měření umělé vady konkrétního tělesa je použití sondy s frekvencí 10MHz téměř dvojnásobně přesnější, avšak stále se hovoří o poměru směrodatné chyby vůči průměrné hodnotě v nižších jednotkách procent. Dále je možné si všimnout rozdílného statistického rozložení, které popisuje hodnota šikmosti a špičatosti. Jedná se o určení shodnosti s empirickým modelem normálního rozložení. Kladnější šikmost u sondy AM3,5 znamená, že je rozložení dat více vpravo oproti nulové šikmosti u sondy AM10, která přesně vykresluje normální rozložení dat. Kladná hodnota špičatosti u sondy AM3,5 říká, že rozložení dat je ostřejší než rozložení normální. Na druhou stranu záporná hodnota špičatosti u sondy AM10 říká, že rozložení dat je plošší než u normálního rozložení.



Akustická vazba a směr	Sonda	
	AM3,5	AM10
<b>Voda zleva</b>	22,2	22
	22,4	22,2
	21,8	21,4
	21,7	22,4
	22	21,9
<b>Voda zprava</b>	23,5	22,9
	21,6	22,7
	22,4	23,1
	21,8	22,9
	22,8	22,8
<b>Vazelína zleva</b>	22,4	22,1
	22,8	22,4
	21,9	22,1
	22,6	21,9
	21,8	21,9
<b>Vazelína zprava</b>	21,9	22,1
	22	21,9
	24,5	22,4
	23,3	23
	21,6	22,6
<b>Průměr</b>	<b>22,35</b>	<b>22,34</b>
Medián	22,10	22,30
Modus	22,40	21,90
Šikmost	1,52	0,03
Špičatost	2,48	-0,74
<b>Směrodatná odchylka</b>	<b>0,72</b>	<b>0,45</b>
Poměr směrodatné odchylky vůči průměru	3,23%	2,01%

Tab. 8 Porovnání celkových naměřených hodnot velikosti hloubky vady [mm] z měření tělesa NCK-18 za pomoci sondy AM3,5 a sondy AM10.

Při porovnání výsledků měření hloubky vadové indikace u tělesa NCK-18 u všech měření napříč všemi sondami a směry zkoušení, viz tab. 9, nebyl nalezen rozdíl v použití určité akustické vazby a jejím vlivu na výslednou velikost nejistoty měření. V tomto případě se ve stejné míře vyruší závislosti citlivosti sondy AM10 vůči vazelině a sondy AM3,5 vůči vodě a naopak, které byly popsány v tab. 7. Interpretace výsledků nejistoty nemusí být interpretována zcela správně, jak je z dat šikmosti a špičatosti zřejmé. Oba dva statistické

soubory obsahující měření za pomoci vody a vazelíny mají jiné geometrické rozložení, lišící se od normálního rozložení, stále se jedná o statistické vyjadřování z pouhých 20 hodnot.

Sonda a směr měření	Akustická vazba	
	Voda	Vazelína
AM3,5 měřeno zleva	22,2	22,4
	22,4	22,8
	21,8	21,9
	21,7	22,6
	22	21,8
AM3,5 měřeno zprava	23,5	21,9
	21,6	22
	22,4	24,5
	21,8	23,3
	22,8	21,6
AM10 měřeno zleva	22	22,1
	22,2	22,4
	21,4	22,1
	22,4	21,9
	21,9	21,9
AM10 měřeno zprava	22,9	22,1
	22,7	21,9
	23,1	22,4
	22,9	23
	22,8	22,6
<b>Průměr</b>	<b>22,33</b>	<b>22,36</b>
Medián	22,30	22,10
Modus	22,40	21,90
Šikmost	0,29	1,93
Špičatost	-0,66	4,70
<b>Směrodatná odchylka</b>	<b>0,55</b>	<b>0,65</b>
Poměr směrodatné odchylky vůči průměru	2,45%	2,91%

Tab. 9 Porovnání naměřených hodnot velikosti hloubky vady [mm] u tělesa NCK-18 podle způsobu akustické vazby napříč všemi měřicími technikami.

Pro komplexnost měření byly porovnány způsoby měření na základě směrů zprava i zleva. Původně bylo v úmyslu toto porovnání vynechat, protože technika zkoušení phased array by měla být ze své podstaty imunní na směr zkoušení a není důležité, zda UT signál směřuje na vadu pod tupým, nebo ostrým úhlem (hodnota hloubky vady je počítána kolmo

k povrchu, ignoruje skutečnou délku trhliny, která je na drátořezu uměle vytvořena pod úhlem). Avšak i po namátkovém pročitání naměřených hodnot se zjistilo, že hodnoty hloubky vady naměřené zprava jsou průměrně o 0,5 mm větší, než ty zleva, viz tab. 10. Vliv rozdílného směru zkoušení se projevil i na výsledné směrodatné odchylyce. Zde se projevuje vliv a to ten, že je v ohledu na úhel uložení vady v materiálu z pravé strany (směru zkoušení) lépe detekovatelná než z druhé strany. Jde o tzv. vliv polohy vady na detekovatelnost a přesnost sizingu vadové indikace (stanovení rozměru). U měření zprava je směrodatná odchylnka dvojnásobná než u měření zleva.

Sonda a akustická vazba	Směr měření	
	Zleva	Zprava
AM3,5 voda	22,2	23,5
	22,4	21,6
	21,8	22,4
	21,7	21,8
	22	22,8
AM3,5 vazelína	22,4	21,9
	22,8	22
	21,9	24,5
	22,6	23,3
	21,8	21,6
AM10 voda	22	22,9
	22,2	22,7
	21,4	23,1
	22,4	22,9
	21,9	22,8
AM10 vazelína	22,1	22,1
	22,4	21,9
	22,1	22,4
	21,9	23
	21,9	22,6
<b>Průměr</b>	<b>22,10</b>	<b>22,59</b>
Medián	22,05	22,65
Modus	22,40	21,60
Šikmost	0,18	0,77
Špičatost	0,06	1,07
<b>Směrodatná odchylnka</b>	<b>0,33</b>	<b>0,70</b>
Poměr směrodatné odchylnky vůči průměru	1,48%	3,11%

Tab. 10 Porovnání celkových naměřených hodnot velikosti hloubky vady [mm] z měření tělesa NCK-18 podle směru zkoušení.

Po zkoumání výše zmíněných dat je možné se dostat k extrémnímu však možnému případu, viz tab. 11, kdy se použijí navzájem extrémní okrajové podmínky pro minimální a pro maximální směrodatnou odchylku ze statistického souboru. A to měření sondou AM10 z levé strany pro nejmenší chybovost, a sondou AM3,5 měřenou zprava pro co nejvyšší chybovost. Tím byl získán rozdíl směrodatných odchylek více jak trojnásobný. Po rozšíření nejistoty na 95,4% pravděpodobnost výskytu bylo závěrem, že hodnota měřena sondou AM10 zleva je rovna  $22,03 \pm 0,55$ , pro sondu AM3,5 měřena zprava je to  $22,54 \pm 1,84$  mm. Po započítání nejistot už může být pro NDT technika kritický výsledek měření, jestli po naměření se může jednat o vadný kus nebo stále přípustnou velikost vady. Stále se ale jedná o extrémní případ, kde jsou úmyslně vyhledávány největší rozdíly. Procentuální poměr směrodatné odchylky vůči průměru je stále v řádech nižších jednotek procent, a to je pro tak komplikovanou metodu, jakou je ultrazvukové zkoušení, stále velmi nízká hodnota nejistoty měření.

Sonda	AM3,5	AM10
Směr měření	Zprava	Zleva
<b>Voda</b>	23,5	22
	21,6	22,2
	22,4	21,4
	21,8	22,4
	22,8	21,9
<b>Vazelína</b>	21,9	22,1
	22	22,4
	24,5	22,1
	23,3	21,9
	21,6	21,9
<b>Průměr</b>	<b>22,54</b>	<b>22,03</b>
Medián	22,20	22,05
Modus	21,60	21,90
Šikmost	0,98	-0,85
Špičatost	0,14	1,67
<b>Směrodatná odchylka</b>	<b>0,92</b>	<b>0,28</b>
Poměr směrodatné odchylky vůči průměru	4,08%	1,25%

Tab. 11 Porovnání naměřených hodnot velikosti hloubky vady [mm] sondou AM10 měřenou zleva se sondou AM3,5 měřenou zprava napříč všemi akustickými vazbami.

Závěrem kapitoly 12.1 lze konstatovat, že je možné nalézt určitý vztah použité akustické vazby, použité sondy i směru měření na velikost detekované vady a její chybovost. Rozšířená nejistota pokrývající 95,4% pravděpodobnost výskytu se nachází v intervalu od 3 % do 7 %, průměrná hodnota činí 5 % vůči průměrné naměřené hodnotě hloubky vady.

Pro zjištění vyšší přesnosti by se musel nastavit experiment, který by se opakovaně věnoval chybovosti jednotlivých průběhů měření a zvoleného přístrojového vybavení.

### 12.1.1 Testování velkého statistického souboru

Vzhledem k charakteru a omezenému počtu naměřených dat bylo nutné sloučit hodnoty naměřené na tělese NCK-18 do jednoho statistického souboru a rozřadit je podle specifického klíče (dle použité akustické vazby, sondy a směru měření), aby splňovaly podmínky minimálního počtu hodnot pro statistické testování. Pro takto sloučená data z opakovaných měření nelze využívat parametrických testů, které jsou závislé na předpokladu Gaussova (normálního) rozdělení. Pro zjištění statistického rozdílu mezi jednotlivými technikami měření (za pomoci různých sond, akustické vazby a směru měření) byl využit neparametrický test. Neparametrické testy nejsou omezeny předpokladem normálního rozdělení statistického souboru a nejsou citlivé na extrémní hodnoty, na druhou stranu nemají tak velkou statistickou sílu jako testy parametrické, které mohou dát větší pravděpodobnost zjištění rozdílu mezi statistickými daty, pokud skutečně existuje. Neparametrické testy jsou většinou komplikované, a výsledky se porovnávají s tabelovanými hodnotami. [29, 30, 31]

Pro potřeby praktické části diplomové práce a vzhledem k charakteru dat byl využit znaménkový test. Ten se používá pro vyhodnocení párových pokusů v případech, kdy studovanou veličinu nemůžeme přesně měřit. V testu se nepoužívají žádné naměřené hodnoty, stačí rozhodnout, zda pokusný zásah z jednoho měření zapůsobil méně či více než pokusný zásah z druhého měření. Ze své podstaty se jedná o zjednodušený Wilcoxonův test pro dva závislé výběry. Může sloužit i jako náhrada párovému t-testu (Studentův test). Pro svoji jednoduchost se nejčastěji používá k orientačnímu hodnocení předběžných pokusů. [31]

Pro konstrukci znaménkového testu je třeba vypočítat rozdíl mezi páry, stanovit počet kladných a záporných rozdílů. K zápornému rozdílu je přiřazena hodnota 0, ke kladnému rozdílu hodnota 1, nulovou hodnotu je nutno vyřadit. Protože rozdíly nabývají hodnot 0 a 1 je předpokládáno, že jsou obě nezávislé, a je možné pokládat tyto hodnoty za hodnoty náhodné veličiny s alternativním rozdělením  $\pi = 1/2$ . Pokud by neexistoval rozdíl v pokusných měřeních, polovina rozdílů by byla kladná a polovina rozdílů záporná. Při konstrukci se dále určí počet kladných a záporných rozdílů. Menší hodnota z obou součtů rozdílů párových hodnot se použije jako testovací kritérium, které se vzhledem k původnímu počtu nenulových párů porovná s tabelovanou hodnotou. Při podmínce, že testovací kritérium je menší než tabelovaná hodnota, je možné zamítnout hypotézu o shodě vlivů pokusných měření. Pokud je testovací kritérium větší než tabelovaná hodnota, nelze zamítnout hypotézu o shodě vlivů pokusných měření. [29, 30]

Data z tab.: 8				Data z tab.: 9				Data z tab.: 10			
Sonda		Rozdíl hodnot	0 v 1	Akustická vazba		Rozdíl hodnot	0 v 1	Směr měření		Rozdíl hodnot	0 v 1
AM3,5	AM10			Voda	Vazelína			Zleva	Zprava		
22,2	22	0,2	1	22,2	22,4	-0,2	0	22,2	23,5	-1,3	0
22,4	22,2	0,2	1	22,4	22,8	-0,4	0	22,4	21,6	0,8	1
21,8	21,4	0,4	1	21,8	21,9	-0,1	0	21,8	22,4	-0,6	0
21,7	22,4	-0,7	0	21,7	22,6	-0,9	0	21,7	21,8	-0,1	0
22	21,9	0,1	1	22	21,8	0,2	1	22	22,8	-0,8	0
23,5	22,9	0,6	1	23,5	21,9	1,6	1	22,4	21,9	0,5	1
21,6	22,7	-1,1	0	21,6	22	-0,4	0	22,8	22	0,8	1
22,4	23,1	-0,7	0	22,4	24,5	-2,1	0	21,9	24,5	-2,6	0
21,8	22,9	-1,1	0	21,8	23,3	-1,5	0	22,6	23,3	-0,7	0
22,8	22,8	0	-	22,8	21,6	1,2	1	21,8	21,6	0,2	1
22,4	22,1	0,3	1	22	22,1	-0,1	0	22	22,9	-0,9	0
22,8	22,4	0,4	1	22,2	22,4	-0,2	0	22,2	22,7	-0,5	0
21,9	22,1	-0,2	0	21,4	22,1	-0,7	0	21,4	23,1	-1,7	0
22,6	21,9	0,7	1	22,4	21,9	0,5	1	22,4	22,9	-0,5	0
21,8	21,9	-0,1	0	21,9	21,9	0	-	21,9	22,8	-0,9	0
21,9	22,1	-0,2	0	22,9	22,1	0,8	1	22,1	22,1	0	-
22	21,9	0,1	1	22,7	21,9	0,8	1	22,4	21,9	0,5	1
24,5	22,4	2,1	1	23,1	22,4	0,7	1	22,1	22,4	-0,3	0
23,3	23	0,3	1	22,9	23	-0,1	0	21,9	23	-1,1	0
21,6	22,6	-1	0	22,8	22,6	0,2	1	21,9	22,6	-0,7	0
<b>Počet kladných hodnot</b>			<b>11</b>	<b>Počet kladných hodnot</b>			<b>8</b>	<b>Počet kladných hodnot</b>			<b>5</b>
<b>Počet záporných hodnot</b>			<b>8</b>	<b>Počet záporných hodnot</b>			<b>11</b>	<b>Počet záporných hodnot</b>			<b>14</b>
<b>Počet nenulových rozdílů</b>			<b>19</b>	<b>Počet nenulových rozdílů</b>			<b>19</b>	<b>Počet nenulových rozdílů</b>			<b>19</b>

Tab. 12 Hodnoty pro konstrukci znaménkového testu pro párové hodnoty z tabulek 8, 9, 10.

Při porovnání párových dat z tab. 8 sloučené v tab. 12, je počítáno s hypotézou, že použití sondy o frekvenci 3,5 MHz má na změření velikosti hloubky vady stejně pravděpodobný vliv jako použití sondy o frekvenci 10 MHz.

Počet nenulových párů = 19, počet kladných hodnot = 11, počet záporných hodnot = 8.

Tabelovaná hodnota pro 19 párů pro 5% hladinu významnosti je 4. Při porovnání počtu záporných hodnot s tabelovanou hodnotou je výsledkem  $8 > 4$ , tzn., že nelze pomocí znaménkového testu na základě uvedených dat zamítnout hypotézu, že použití sondy

o frekvenci 3,5 MHz má vliv na naměřenou velikost hloubky vady stejně pravděpodobný vliv jako použití sondy s frekvencí 10 MHz.

Při porovnání párových dat z tab. 9 sloučené v tab. 12 je počítáno s hypotézou, že použití akustické vazby za pomoci vody má na změření velikosti hloubky vady stejně pravděpodobný vliv jako použití akustické vazby za pomoci vazelíny.

Počet nenulových párů = 19, počet kladných hodnot = 8, počet záporných hodnot = 11.

Tabelovaná hodnota pro 19 párů pro 5% hladinu významnosti je 4. Při porovnání počtu kladných hodnot s tabelovanou hodnotou je výsledkem  $8 > 4$ , tzn. že nelze pomocí znaménkového testu na základě uvedených dat zamítnout hypotézu, že použití akustické vazby za pomoci vody má vliv na naměřenou velikost hloubky vady stejně pravděpodobný vliv jako použití akustické vazby za pomoci vazelíny.

Při porovnání párových dat z tab. 10 sloučené v tab. 12 je počítáno s hypotézou, že směr měření zleva má na změření velikost hloubky vady stejně pravděpodobný vliv jako směr měření zprava.

Počet nenulových párů = 19, počet kladných hodnot = 5, počet záporných hodnot = 14.

Tabelovaná hodnota pro 19 párů pro 5% hladinu významnosti je 4. Při porovnání počtu kladných hodnot s tabelovanou hodnotou je výsledkem  $5 > 4$ , tzn. ačkoliv se hodnota počtu kladných hodnot blíží k tabelované hodnotě, nelze pomocí znaménkového testu na základě uvedených dat zamítnout hypotézu, že směr měření zleva má vliv na naměřenou velikost hloubky vady stejně pravděpodobný vliv jako směr měření zprava.

## 12.2 Malý statistický soubor

Jelikož tělesa NCK-12, NCK-13, NCK-17 byla změřena pouze jedenkrát pro konkrétní způsob UT zkoušení, bylo u každého vzorku získáno 8 na sobě nezávislých dat o hloubce vady (sondami AM3,5 a AM10 zleva a zprava změřeno pro vodu i vazelínu). Pro tento počet hodnot není vhodné vyjadřovat nejistoty za pomoci směrodatných odchylek, ale existuje vhodnější nástroj pro řešení malých statistických souborů, čímž je Hornova analýza. Analýza malých výběrů dle Horna je zatížena vždy značnou mírou nejistoty, ale je velmi výhodná pro analýzu malých rozsahů tam, kde není možné zvýšit počet měření. Pro výpočet Hornovy analýzy bylo vytvořeno makro v programu Excel. Kvůli zvolenému tématu diplomové práce nebude zmíněn přesný průběh výpočtů, ale v tabulce níže jsou zmíněny hodnoty 95% intervalu spolehlivosti střední hodnoty, které budou dále diskutovány.

Premisa je opět taková, že v NDT oblasti ultrazvukového zkoušení se jakýkoliv druh výše popsaného měření považuje za zcela správný a výstupní hodnoty by proto měly vždy platit. Pro konkrétní tělesa NCK-12, NCK-13 a NCK-17 bylo proto operováno s možností, že by teoreticky měly mít všechny stejnou hodnotu, a data změřená různými metodami (druh použité sondy, akustické vazby a směr měření) byla brána jako jeden statistický soubor.

Všechna data naměřená na tělesech NCK-12, NCK-13, NCK-17 byla porovnána, viz tab. 13. Zjištěním bylo, že se průměrné hodnoty i šířky intervalu spolehlivosti střední hodnoty

liší. Nejspíše se jedná o velké rozdíly výsledků u jednotlivých způsobů měření, s ohledy na vlivy typu sondy, vazby, zkoušené frekvence.

<b>Těleso</b>	<b>NCK-12</b>	<b>NCK-13</b>	<b>NCK-17</b>
AM3,5_voda_L	23,5	23	20
AM3,5_voda_R	23,7	22,9	18,5
AM3,5_vazelína_L	24,4	23	21,8
AM3,5_vazelína_R	22,3	23	20,8
AM10_voda_L	22,5	22,8	21,8
AM10_voda_R	22,9	23	20,1
AM10_vazelína_L	24,2	23,2	22,1
AM10_vazelína_R	23,7	23,5	21,8
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>23,40</b>	<b>23,05</b>	<b>20,86</b>
Dolní mez intervalu spolehlivosti střední hodnoty	22,39	22,88	18,27
Horní mez intervalu spolehlivosti střední hodnoty	24,31	23,22	22,33
<b>Rozdíl intervalů</b>	<b>1,92</b>	<b>0,34</b>	<b>4,06</b>

Tab. 13 Porovnání všech změřených hodnot hloubky vady [mm] napříč všemi akustickými vazbami, použitými sondami a směru měření na tělesech NCK-12, NCK-13 a NCK-17.

Těleso NCK-17 bylo vyřazeno z následujících průběhů měření, jelikož se jedná o těleso z malého statistického souboru, které je opatřeno svarem a tím pádem není vhodné pro komparaci se zbylými tělesy z malého statistického souboru. V tab. 14 je vidět obdobný trend v jednotlivých měřeních, který se ztotožňuje i s výsledky měření velkého statistického souboru u tělesa NCK-18. Šířka intervalu spolehlivosti – respektive velikost nejistoty je u použití vody jako akustické vazby zhruba dvakrát menší než u použití vazelíny. Použití rozdílných sond už není tak průkazné, ale stále existuje zřetelný rozdíl.



Okrajové podmínky	Jen voda		Jen vazelína		Jen AM3,5		Jen AM10	
	NCK-12	NCK-13	NCK-12	NCK-13	NCK-12	NCK-13	NCK-12	NCK-13
Těleso	23,5	23	24,4	23	23,5	23	22,5	22,8
	23,7	22,9	22,3	23	23,7	22,9	22,9	23
	22,5	22,8	24,2	23,2	24,4	23	24,2	23,2
	22,9	23	23,7	23,5	22,3	23	23,7	23,5
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>23,15</b>	<b>22,93</b>	<b>23,65</b>	<b>23,18</b>	<b>23,48</b>	<b>22,98</b>	<b>23,33</b>	<b>23,13</b>
Dolní mez intervalu spolehlivosti střední hodnoty	22,21	22,75	21,80	22,88	21,80	22,88	22,10	22,63
Horní mez intervalu spolehlivosti střední hodnoty	23,99	23,05	24,90	23,62	24,90	23,02	24,61	23,67
<b>Rozdíl intervalů</b>	<b>1,77</b>	<b>0,30</b>	<b>3,10</b>	<b>0,74</b>	<b>3,10</b>	<b>0,15</b>	<b>2,51</b>	<b>1,03</b>

Tab. 14 Porovnání hodnot hloubky vady [mm] na tělesech NCK-12 NCK-13 u jednotlivých druhů akustických vazeb a použitých sond.

Následující měření, viz tab. 15, byla zaměřena na okrajové podmínky jednotlivých měření, pro nalezení takových okrajových podmínek, které jsou zatížené největší mírou nejistoty. Jako okrajové podmínky byla definována měření: jen zleva, jen zprava, jen vazelína, jen voda, jen sonda AM3,5 a jen sonda AM10. Kvůli malému množství dat byla sloučena tělesa NCK-12 a NCK-13 do jednoho statistického souboru. Výsledkem byla informace, že velmi záleží na směru měření, stejně tak jako na použité akustické vazbě. Použití vody je dvakrát přesnější než použití vazelíny. Velikost nejistoty vlivem použití jednotlivých sond už není tak průkazná oproti jiným měřením.

Těleso	Okrajové podmínky					
	Jen zleva	Jen zprava	Jen vazelína	Jen voda	Jen AM3,5	Jen AM10
NCK-12	23,5	23,7	24,4	23,5	23,5	22,5
	24,4	22,3	22,3	23,7	23,7	22,9
	22,5	22,9	24,2	22,5	24,4	24,2
	24,2	23,7	23,7	22,9	22,3	23,7
NCK-13	23	22,9	23	23	23	22,8
	23	23	23	22,9	22,9	23
	22,8	23	23,2	22,8	23	23,2
	23,2	23,5	23,5	23	23	23,5
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>23,33</b>	<b>23,13</b>	<b>23,41</b>	<b>23,04</b>	<b>23,23</b>	<b>23,23</b>
Dolní mez intervalu spolehlivosti střední hodnoty	22,71	22,85	22,92	22,76	22,85	22,74
Horní mez intervalu spolehlivosti střední hodnoty	24,29	23,75	24,28	23,55	23,75	23,76
<b>Rozdíl intervalů</b>	<b>1,58</b>	<b>0,90</b>	<b>1,35</b>	<b>0,79</b>	<b>0,90</b>	<b>1,02</b>

Tab. 15 Porovnání hodnot hloubky vady [mm] danými technikami měření u těles NCK-12 a NCK-13 s okrajovými podmínkami pro druh akustické vazby a použité sondy.

V následujících tabulkách tab. 16 a tab. 17 byla sjednocena data z měření pro tělesa NCK-12 a NCK-13 do jednoho většího statistického souboru. Ačkoliv se nejedná o úplně korektní postup, každé těleso je opatřeno trochu jinou vadou – jak je patrné z obr. 19, ale jejich výsledná hloubka je totožná. Při porovnání použití akustických vazeb napříč všemi způsoby měření bylo závěrem, že měření za pomoci vazelíny je postiženo téměř dvojnásobnou nejistotou měření, než za použití vody, viz tab. 16. Při porovnání měřících sond AM3,5 a AM10 napříč všemi způsoby měření u těles NCK-12 a NCK-13, viz tab. 17, byla zjištěna nepatrně vyšší spolehlivost u použití sondy AM3,5 avšak rozdíl mezi intervalu 95% spolehlivosti střední hodnoty je u sond AM3,5 a AM10 velmi malý.

Těleso	Akustická vazba	
	Voda	Vazelína
NCK-12	23,5	24,4
	23,7	22,3
	22,5	24,2
	22,9	23,7
NCK-13	23	23
	22,9	23
	22,8	23,2
	23	23,5
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>23,04</b>	<b>23,41</b>
Dolní mez intervalu spolehlivosti střední hodnoty	22,76	22,92
Horní mez intervalu spolehlivosti střední hodnoty	23,55	24,28
<b>Rozdíl intervalů</b>	<b>0,79</b>	<b>1,35</b>

Tab. 16 Porovnání naměřených hodnot velikosti hloubky vady [mm] u tělesa NCK-12.

Těleso	Sonda	
	AM3,5	AM10
NCK-12	23,5	22,5
	23,7	22,9
	24,4	24,2
	22,3	23,7
NCK-13	23	22,8
	22,9	23
	23	23,2
	23	23,5
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>23,23</b>	<b>23,23</b>
Dolní mez intervalu spolehlivosti střední hodnoty	22,85	22,74
Horní mez intervalu spolehlivosti střední hodnoty	23,75	23,76
<b>Rozdíl intervalů</b>	<b>0,90</b>	<b>1,02</b>

Tab. 17 Porovnání naměřených hodnot velikosti hloubky vady [mm] u tělesa NCK-12.

Pozornost byla věnována i kritickým parametrům, které by měly dát maximální míru nejistoty z doposud naměřených dat obdobně jako v tab. 10. A to měření sondou AM10 zleva a sondou AM3,5 zprava, tab. 18. Rozdíl intervalů spolehlivosti střední hodnoty je patrný, ale kvůli malému množství dat není tak průkazný jako u tělesa NCK-18.

<b>Sonda</b>	<b>AM10</b>	<b>AM3,5</b>
<b>Směr měření</b>	<b>Zleva</b>	<b>Zprava</b>
NCK-12	22,5	23,7
	24,2	22,3
NCK-13	22,8	22,9
	23,2	23
<b>Průměrná hodnota</b>	<b>23,18</b>	<b>22,98</b>
Dolní mez intervalu spolehlivosti střední hodnoty	22,10	21,97
Horní mez intervalu spolehlivosti střední hodnoty	24,61	24,03
<b>Rozdíl intervalů</b>	<b>2,51</b>	<b>2,07</b>

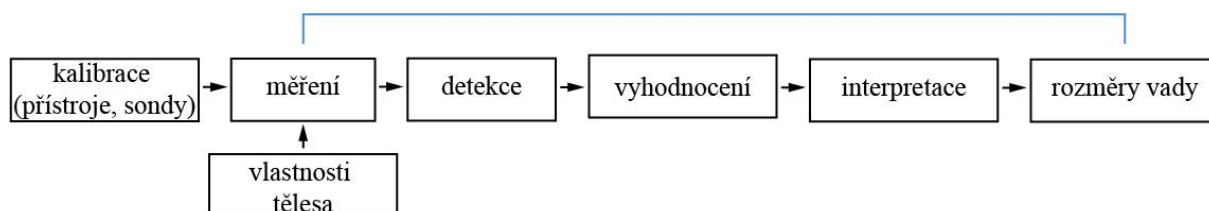
Tab. 18 Porovnání naměřených hodnot hloubky vady [mm] sondou AM10 měřenou zleva se sondou AM3,5 měřenou zprava napříč všemi akustickými vazbami u těles NCK-12 a NCK-13.

Nelze porovnávat pouze AM10 zleva a AM3,5 zprava jako u velkého statistického souboru, protože pro tělesa NCK-12 a NCK-13 bylo takové měření provedeno pouze jednou. Hornovu analýzu je nutné zpracovat s minimálním počtem 4 hodnot.

### 13 Možné faktory způsobující odchylku měření

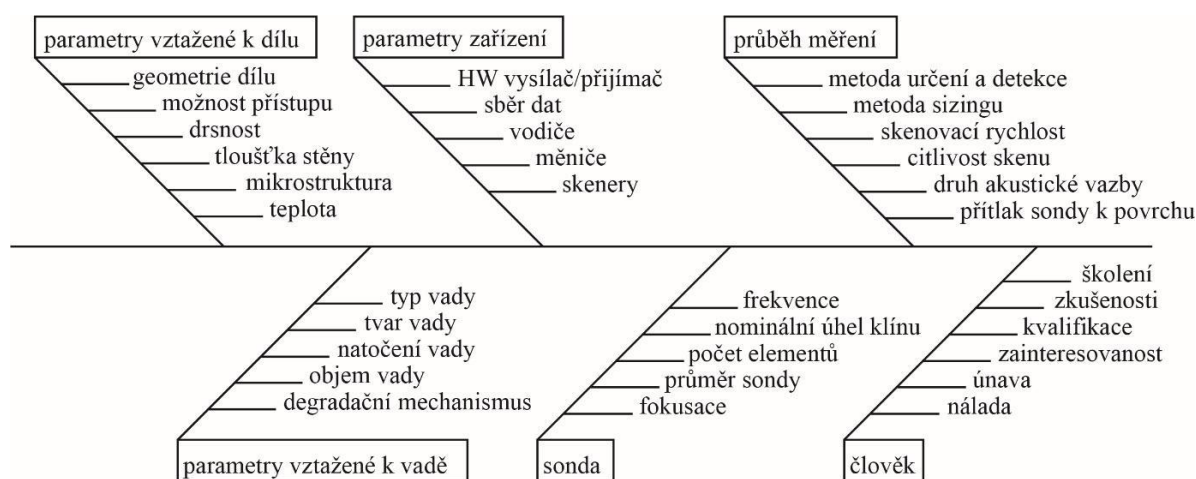
Úkolem této práce je vyjádřit nejistoty měření vzniklé při UT technikou phased array. Doposud byly vyjadřovány nejistoty metodou A – tzn. za pomoci statistického zpracování dat. Snaha byla nalézt rozdíly mezi použitím určité sondy a určité akustické vazby. Nalezené rozdíly byly minimální. To by mohlo naznačovat, že by použitá technika kvůli nahodilému výskytu vad nemusela být zdrojem nejistot ve větší míře. Výskyt nejistot by mohl být razantněji ovlivněn jinými vlivy týkajícími se měření. Proto byly podrobněji zkoumány aspekty, které mohou ovlivňovat výsledky měření.

Pokud by byl obr. 22 z desáté kapitoly graficky upraven a bylo na něm vyznačeno, z jakých oblastí byly vyhodnoceny nejistoty měření, objevem je existence dalších na sobě navazujících vlivů, zejména však, že každé měření musí provádět kvalifikovaný pracovník, tzn. člověk, který může velkou mírou ovlivnit každou samostatnou operaci z celého průběhu měření.



Obr. 23 Grafické schéma propojení změřených závislostí z celkového průběhu měření vady.

Je všeobecně známo, že jakékoliv měření je zatíženo určitou mírou nejistoty. Například v oblasti NDT je interpretace výsledků závislá na kvalitě a zkušenostech NDT pracovníka. UT je jednou z nejkomplicovanějších NDT metod, která se navíc velmi špatně interpretuje. Belgická asociace NUGENIA zmiňuje přes 70 jednotlivých vlivů, které mohou mít vliv na výsledek měření [26]. Jednotlivé vlivy mohou být taktéž propojené mezi sebou a teoreticky kombinovat nekonečné množství smíšených chyb s určitou mírou pravděpodobnosti.



Obr. 24 Zkrácený výčet možných vlivů na ovlivňující nejistoty měření u UT. [26]

Domněnkou je, že metoda určování sizingu na “gatech“, tj. ohraničení vady digitálními pravítky na základě rozdílu kontrastů a zaokrouhlena na desetiny mm, je zdrojem nezanedbatelného vlivu nejistot, které v konečném důsledku mohou být spojovány s hlavním vlivem nejistoty určené z měření, viz kap. 12. To může potvrdit nebo vyvrátit souvislost mezi jednotlivými sondami a použitím akustické vazby. Bylo by mylné vyjadřovat statisticky rozdíl hodnot měření a tím i rozdíly za použití jednotlivých druhů sond např. v tisícinách mm, když se v předchozí operaci měření velikost vady zaokrouhlila na desetiny mm.

Existuje trend, že aktuální zařízení dosahují daleko vyšší zobrazující schopnosti než zařízení staršího data výroby. Tělesa, která byla v minulosti považována za bezvadná, by v dnešní době mohla být považována za potenciálně nebezpečná. Je důležité takovou chybu adekvátně interpretovat vzhledem k charakteru provozu a použití tělesa (strojní součásti) a použitého měřicího zařízení.

Interpretace naměřené vady je daleko důležitější než přesné vyjádření nejistoty velikosti vady. Důležité je znát přesnou geometrii vady. Oblá vada nemusí nijak ovlivňovat pevnost konstrukce. Vada špičatá (např. trhлина) se může chovat jako koncentrátor napětí, díky čemuž může být ve vadě několikanásobně větší napětí, než jsou pevnostní limity pro daný materiál i za podmínky běžného provozu strojní součásti.

Je nutné vyjadřovat nejistoty a s jakou přesností, když není znám přesný geometrický charakter vady? Potvrdilo se, že i v extrémních případech se rozdíly a nejistoty měření pohybovaly v rozmezí  $\pm 5\%$ , taktéž byly v souladu se skutečnou velikostí vady, která byla změřena posuvným měřítkem. Domněnkou je, že navzdory tak komplikované metodě měření jako je UT, se jedná o velmi malou nejistotu a ze své podstaty ji nelze porovnávat s metrologickými tolerancemi, které mohou být v řádech tisícín %.

Určování nejistot metodou B, tzn. jinými než statistickými metodami, je z aktuálního průběhu měření velice komplikované, protože nebylo získáno dostatečné množství dat a není možné určit míru všech vlivů způsobujících nejistoty a provázání těchto vlivů mezi sebou, které se v celkovém procesu průběhu měření mohou vyskytovat. Vždy bude záležet největší mírou na schopnostech, zkušenostech a odpovědnosti jednotlivého kvalifikovaného pracovníka NDT.

## 14 Diskuse výsledků

V tab. 19 jsou zapsány výsledky změřených dat. U výsledků s 95% pravděpodobností výskytu chyb se nejistota měření hloubky vady ze všech opakovaných měření napříč všemi metodami u tělesa pohybuje v intervalu od 0,4 % až 4,8 % vůči průměrné hodnotě hloubky vady.

Těleso	NCK-12	NCK-13	NCK-17	NCK-18
<b>Vyjádřená hodnota včetně nejistoty [mm]</b>	<b>23,40 ± 0,96</b>	<b>23,05 ± 0,17</b>	<b>21 ± 2</b>	<b>22,3 ± 1,2</b>
Vyjádření nejistoty [%]	2	0,4	4,8	2,7

Tab. 19 Průměrná hodnota hloubky vady na tělesech NCK-12, NCK-13, NCK-17 a NCK-18 vyhodnocena ze všech měření.

Na průměrných hodnotách velikosti hloubky vady u tělesa NCK-18, viz tab. 20, může být interpretováno určité propojení sondy a akustické vazby. Z tabulky vyplývá, že by mohly existovat tendence k vyšším nejistotám při specifickém použití sondy s určitou akustickou vazbou. Je možné, že se nejedná o přímou souvislost použité akustické vazby, ale o způsob její aplikace, nebo průběh měření. Je možné, že větší efekt, než samotná akustická vazba může mít spíš tlak sondy na povrch tělesa vynaložený operátorem (přeci jen rozdíl viskozit mezi vodou a vazelínou není zanedbatelný). Když byly hodnoty zprůměrovány a vyjádřeny chyby pro každou krajní možnost (všechny hodnoty změřené jednou sondou, akustickou vazbou apod.) bylo zjištěno, že se všechny výsledky velmi podobají, viz tab. 21 a tab. 22. To může být další indikátor, že rozložení nejistot napříč všemi měřeními může být čistě náhodné.

Sonda	AM3,5		AM10	
	voda	vazelína	voda	vazelína
<b>Vyjádřená hodnota včetně nejistoty [mm]</b>	<b>22,22 ± 1,11</b>	<b>22,48 ± 1,67</b>	<b>22,24 ± 1,03</b>	<b>22,24 ± 0,68</b>
Vyjádření nejistoty [%]	2,5	3,7	2,3	1,5

Tab. 20 Průměrná hodnota hloubky vady na tělese NCK-18. Měřená za pomoci sondy AM3,5 a sondy AM10 v různých akustických vazbách.

Akustická vazba	Voda	Vazelína
<b>Vyjádřená hodnota včetně nejistoty [mm]</b>	<b>22,33 ± 1,09</b>	<b>22,36 ± 1,30</b>
Vyjádření nejistoty [%]	2,5	2,9

Tab. 21 Průměrná hodnota hloubky vady tělesa NCK-18 určená ze všech měření podle akustické vazby.

Akustická vazba	Voda	Vazelína
<b>Vyjádřená hodnota včetně nejistoty [mm]</b>	<b>23,0 ± 0,4</b>	<b>23,4 ± 0,7</b>
Vyjádření nejistoty [%]	0,9	1,5

Tab. 22 Průměrná hodnota hloubky vady na tělesech NCK-12 a NCK-13 určená ze všech měření podle akustické vazby.

Průměrná nejistota vyjádřená procentním poměrem průměrné hodnoty hloubky vady u tělesa NCK-18, viz tab. 23, je vyhodnocena ze měření obsahujících sondu AM3,5 a měření obsahujících sondu AM10. Výsledkem je, že použití sondy o vyšší frekvenci pro měření daného tělesa může být nepatrně přesnější než použití sondy o frekvenci nižší. Opět se ale, kvůli nepatrnému rozdílu, může jednat pouze o náhodnou chybu, která vychází z chyb z celého průběhu měření. Při porovnání sond ze všech měření těles NCK-12 a NCK-13 v tab. 24 z malého počtu naměřených dat nebyl nalezen rozdíl velikosti nejistot při použití jednotlivých sond. Toto může být potvrzením, že použití sondy s frekvencí 3,5 MHz a frekvencí 10 MHz pro měření výše zmíněných těles má pro daný typ vady malý vliv.

Sonda	AM3,5	AM10
<b>Vyjádřená hodnota včetně nejistoty [mm]</b>	<b>22,35 ± 1,44</b>	<b>22,34 ± 0,89</b>
Vyjádření nejistoty [%]	3,2	2

Tab. 23 Průměrná hodnota hloubky vady na tělese NCK-18 změřená za pomoci sondy AM3,5 a sondy AM10. Spočtená ze všech měření.

Sonda	AM3,5	AM10
<b>Vyjádřená hodnota včetně nejistoty [mm]</b>	<b>23,2 ± 0,5</b>	<b>23,2 ± 0,5</b>

Tab. 24 Průměrná hodnota hloubky vady na tělesech NCK-12 a NCK-13 určená ze všech měření podle akustické vazby.

Po důkladnějším zaměření na směr průběhu měření ze všech dat pořízených na tělese NCK-18, viz tab. 25, bylo závěrem, že směr měření má vliv na měření nejistot. Kvůli samotné podstatě měření technikou phased array je nutno vliv směru na výsledky zkoušky v praxi eliminovat zkoušením z obou směrů. Toto porovnání může být bráno i jako důkaz, že celé měření UT je zatíženo celou řadou náhodných vlivů a jednotlivé dílčí způsoby měření nemusí mít vliv na vyjádření nejistot měření.



Směr měření	Zleva	Zprava
<b>Vyjádřená hodnota včetně nejistoty [mm]</b>	<b>22,10 ± 0,65</b>	<b>22,6 ± 1,4</b>
Vyjádření nejistoty [%]	1,5	3,1

Tab. 25 Průměrná hodnota hloubky vady tělesa NCK-18 určená ze všech měření podle směru zkoušení.

Zároveň z dat získaných z měření tělesa NCK-18 na 5% hladině statistické významnosti nelze pomocí znaménkového testu na základě uvedených dat z měření zamítnout hypotézu, že jedna metoda je stejně pravděpodobně přesná jako metoda jiná.

## 15 Závěr

V této práci byly vysvětleny základní informace o nedestruktivních zkouškách materiálů, druhů chyb v materiálu a obecném určování nejistot měření. V rešeršní části nebylo zjištěno, jestli se v dosavadní praxi nedestruktivního testování počítají nejistoty měření, ačkoliv v mnoha oblastech např. metrologii se jedná o běžnou činnost. V této práci byl popsán průběh měření ultrazvukovou technikou phased array. Byly popsány parametry a vlivy, které mohou mít vliv na opakovatelnost měření. V práci byl znázorněn postup vyjadřování nejistot u jednotlivých způsobů měření. Vyhodnocení nejistot bylo provedeno metodou A, tzn. za pomoci statistického vyhodnocování. Hodnoty nejistot byly porovnány napříč různými způsoby měření. Nebyla vyvrácena hypotéza, že by mohl existovat rozdíl mezi jednotlivými způsoby měření.

Pro malý statistický soubor a jeho rovnoměrné variability není vyjadřování metodou A tím nejvhodnějším nástrojem k vyjadřování nejistot měření.

Existující vztah určité sondy k určité akustické vazbě je velmi malý a projevil by se v určitých specifických podmínkách (např. při měření povrchu tělesa o určité drsnosti, či typu vady) nebo při zjišťování vad ve větších hloubkách tělesa, kde by se projevila i rozlišovací schopnost sond o jednotlivých frekvencích.

Je pravděpodobně možné, že všechny výše zmíněné souvislosti jsou rozloženy z větší části rovnoměrně v rámci velkého statistického souboru a nahodile v rámci malého statistického souboru. Je nutné brát měření UT jako jeden celek se všemi dílčími náležitostmi vlivů vady. Je nutné se zaměřit na vyjadřování nejistoty jako na funkci složenou ze všech dílčích nejistot, které mohou nastat v celém průběhu měření od nejistot způsobených kalibrací až po interpretaci měření.

## 16 Seznam použitých zdrojů

- [1] KOPEC, Bernard a kolektiv. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí*. Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 9788072045914.
- [2] ASM Handbook Volume 17. *Nondestructive Evaluation and Quality Control*. 1997 ASM International
- [3] SHELL a kolektiv. *An Intro to Infrared Thermography for Mechanical Applications*. [Online] [Citace: 1. 12. 2021.] <https://www.reliableplant.com/Read/20181/infrared-thermography-mechanical>.
- [4] REGAZZOVA, M., REGAZZO, R., *Ultrazvuk, základy ultrazvukové defektoskopie*. BEN-technická literatura, 2013. ISBN 978-80-7300-466-8.
- [5] Olympus corporation. *General Introduction To Ultrasonic Testing*. [Online] [Citace: 1. 12. 2021.] <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/intro/breif-history/>.
- [6] Olympus. *Introduction to Phased Array Ultrasonic Technology Applications*. Olympus Guideline. Advanced Practical NDT Series. 2004.
- [7] Olympus. *Advances in Phased Array Ultrasonic Technology Applications: 2007*
- [8] Olympus. *Single Value B-Scan*. [Online] [Citace: 1. 12. 2021.] <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/instrumententation/bscan/>
- [9] Olympus. *Phased Array C-Scan*. [Online] [Citace: 1. 12. 2021.] <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/instrumententation/cscan/>
- [10] Olympus. *Phased Array Sectorial Scans*. [Online] [Citace: 1. 12. 2021.] <https://www.olympus-ims.com/en/ndt-tutorials/instrumententation/pa-cscan/>
- [11] Zetec. *Dynaray and dynaray lite*. [Online] [Citace: 1. 12. 2021.] <https://www.zetec.com/products/ultrasound/instrumentation/dynaray-dynaray-lite/>
- [12] Zetec. *Probes and Wedges*. [Online] [Citace: 1. 12. 2021.] [https://e2im0n5mz6-flywheel.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2016/11/2016-UT-Probe-Catalog-Content\\_R20161125.pdf](https://e2im0n5mz6-flywheel.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2016/11/2016-UT-Probe-Catalog-Content_R20161125.pdf)
- [13] Zetec. *Ultravision 3*. [Online] [Citace: 1. 12. 2021.] <https://www.zetec.com/products/ultrasound/software-ut/ultravision3/>
- [14] KOVAŘÍK Rudolf. *Materiály pro energetiku a jejich zkoušení*, Plzeň 1990, Ediční středisko VŠSE
- [15] BEČVÁŘ Josef. a kol., *Jaderné elektrárny*, 1981 Praha, SNTL – nakladatelství technické literatury
- [16] *Materiálové a technologické otázky jaderných reaktorů VVER*. 1988. Srní na Šumavě
- [17] *Svařování v energetickém strojírenství*. 1983, Srní na Šumavě
- [18] *Nejistoty měření*. Technická univerzita Ostrava. [Online] [Citace: 1. 12. 2021.] <http://352lab.vsb.cz/Podklady/AT/nejistoty1.pdf>

- [19] DVOŘÁK, Otto. *Nejistota výsledků měření při zkouškách*. UCEEB, 2019. [Online] [Citace: 1. 12. 2021.]
- [20] SVOBODOVÁ, J. *Chyby a nejistoty měření*. Masarykova univerzita, 2009. [Online] [Citace: 1. 12. 2021.] [https://is.muni.cz/el/ped/podzim2009/FY2BP\\_FM3/](https://is.muni.cz/el/ped/podzim2009/FY2BP_FM3/)
- [21] OBRAZ, Jaroslav. *Zkoušení materiálu ultrazvukem*. Praha: SNTL, 1989. Redakce strojírenské a metalurgické literatury. ISBN 80-03-00097-1.
- [22] NDTKITS, *Comparison of Ultrasonic Probe* [Online] [Citace: 20. 5. 2022] <https://ndt-kits.com/zetec-vs-phoenix-isl-ultrasonic-probe-comparison/>
- [23] VESELÁ, Jana. *osobní archiv*. 2022
- [24] TÖLG, Tomáš a kolektiv. *Fyzikální praktikum*. Západočeská univerzita v Plzni, 2002.
- [25] MIČUDOVÁ, Kateřina et al. *Základy statistiky a pravděpodobnosti*. 1. vydání. V Plzni: Západočeská univerzita, 2016, iv, ISBN 978-80-261-0660-9.
- [26] NUGENIA Association, *Strategy and Recommended Contents For Technical Justifications*. [Online][Citace: 20. 4. 2022.] [https://snetp.eu/wp-content/uploads/2020/07/ENIQ\\_RP2\\_Issue\\_3\\_v9-2.pdf](https://snetp.eu/wp-content/uploads/2020/07/ENIQ_RP2_Issue_3_v9-2.pdf)
- [27] NĚMEČEK, Pavel. *Zpracování výsledků měření*. Česká společnost pro jakost, z. s., ČSJ 2016
- [28] JCGM 100:2008 *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*. [Online] [Citace: 1. 12. 2021.] [https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6](https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf/cb0ef43f-baa5-11cf-3f85-4dcd86f77bd6)
- [29] KOŽÍŠEK, Jan a STIEBEROVÁ Barbora. *Statistika v příkladech*. Verlag Dashöfer, Praha, 2012
- [30] ANDĚL, Jiří. *Matematická statistika*, SNTL, Praha 1978
- [31] Veterinární univerzita Brno, *Znaménkový test*. [Online] [Citace: 1. 12. 2021.] <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn4/znamenko.htm>
- [32] KUBOŇ Zdeněk a MOHYLA Petr. *Hodnocení vlastností žárupevných ocelí – od 24 hodinových zkoušek po SPCT zkoušky*, Hutnické listy č. 3/2016 [Online] [Citace: 20. 5. 2022.] <https://www.hutnickelisty.cz/wp-content/uploads/2019/10/KubonHL3-2016.pdf>
- [33] U. S. Metals. *Chrome Moly Alloy A335/SA335 Grade P91* [Online] [Citace: 20. 5. 2022.] <https://www.usmetals.com/alloy-pipe-seamless-p91.html>
- [34] All for power. *Aplikační omezení žárupevné oceli P92*. 2019 [Online] [Citace: 20. 5. 2022.] <http://old.allforpower.cz/clanek/aplikacni-omezeni-zaropevne-oceli-p92/>

## 17 Přílohy

Tabulky s naměřenými hodnotami

Sonda:		AM3,5	Přístroj:		Dynaray 128/128 PR						
Akustická vazba:		Voda	Materiál:		12 022.1						
Směr měření:		Zleva	Vyhodnotil:		J. Veselá						
Vzorek/počet měření	V	hloubka [mm]	tloušťka [mm]	v - výška vady [mm]	pv [mm]	pr [mm]	pr - pv	max da	max dr	da/dr	
bez svaru	NCK-12	D	23,5	35	11,5	128,3	248,1	119,8	29,1	70,8	0,4
	NCK-13/1	D	23	35	12	125,1	247,1	122	35,5	100	0,4
se svarem	NCK-17	S	20	35	15	124,2	119,1	-5,1	25,7	23,5	1,1
	NCK-18/1	S, C	22,2	35	12,8	130,1	132,1	2	15,6	25	0,6
	NCK-18/2	S, C	22,4	35	12,6	132,3	131	-1,3	18,2	27,5	0,7
	NCK-18/3	S, C	21,8	35	13,2	129,1	132,1	3	12,5	22	0,6
	NCK-18/4	S, C	21,7	35	13,3	131,1	130	-1,1	14,3	21,4	0,7
NCK-18/5	S, C	22	35	13	132,5	133,1	0,6	12	20,8	0,6	

Sonda:		AM3,5	Přístroj:		Dynaray 128/128 PR						
Akustická vazba:		Voda	Materiál:		12 022.1						
Směr měření:		Zprava	Vyhodnotil:		J. Veselá						
Vzorek/počet měření	V	hloubka [mm]	tloušťka [mm]	v - výška vady [mm]	pv [mm]	pr [mm]	pr - pv	max da	max dr	da/dr	
bez svaru	NCK-12	D	23,7	35	11,3	116,1	244,1	128	11,8	25,5	46
	NCK-13/1	D	22,9	35	12,1	124,3	247,1	122,8	26,5	100	27
se svarem	NCK-17	S, C	18,5	35	16,5	137	141,1	4,1	6,8	27,8	24
	NCK-18/1	S, C	23,5	35	11,5	131,2	130,2	-1	9,4	23,2	41
	NCK-18/2	S, C	21,6	35	13,4	129,1	132,1	3	10,5	28	38
	NCK-18/3	S, C	22,4	35	12,6	132	130,2	-1,8	7,2	26,5	27
	NCK-18/4	S, C	21,8	35	13,2	130,6	131,2	0,6	8,8	22,3	39
NCK-18/5	S, C	22,8	35	12,2	130,2	130,1	-0,1	7,9	24,8	32	

Sonda:		AM3,5	Přístroj:		Dynaray 128/128 PR						
Akustická vazba:		Vazelína	Materiál:		12 022.1						
Směr měření:		Zleva	Vyhodnotil:		J. Veselá						
Vzorek/počet měření	V	hloubka [mm]	tloušťka [mm]	v - výška vady [mm]	pv [mm]	pr [mm]	pr - pv	max da	max dr	da/dr	
bez svaru	NCK-12	C	24,4	35	10,6	130,1	246,1	116	50,6	81	62
	NCK-13/1	D	23	35	12	124,1	245,1	121	30,3	95,4	32
se svarem	NCK-17	S	21,8	35	13,2	121,4	114,1	-7,3	10,5	26,9	39
	NCK-18/1	S, C	22,4	35	12,6	126,1	125,1	-1	9,1	17,7	51
	NCK-18/2	S, C	22,8	35	12,2	125,6	125,1	-0,5	7,8	19,2	41
	NCK-18/3	S, C	21,9	35	13,1	126,1	129,1	3	7,1	18	39
	NCK-18/4	S, C	22,6	35	12,4	127,1	128	0,9	10,1	19,5	52
NCK-18/5	S, C	21,8	35	13,2	129,1	130	0,9	6,5	17	38	

Sonda:		AM3,5	Přístroj:		Dynaray 128/128 PR						
Akustická vazba:		Vazelína	Materiál:		12 022.1						
Směr měření:		Zprava	Vyhodnotil:		J. Veselá						
Vzorek/počet měření	V	hloubka [mm]	tloušťka [mm]	v - výška vady [mm]	pv [mm]	pr [mm]	pr - pv	max da	max dr	da/dr	
bez svaru	NCK-12	C	22,3	35	12,7	118,1	248,1	130	20,9	59	35
	NCK-13/1	D	23	35	12	125	248,1	123,1	22,7	89,6	25
se svarem	NCK-17	C	20,8	35	14,2	131,2	139,1	7,9	4,6	15,5	30
	NCK-18/1	S, C	21,9	35	13,1	125	125,1	0,1	5,7	23,7	24
	NCK-18/2	S, C	22	35	13	119,5	120,1	0,6	8,2	22,7	36
	NCK-18/3	S, C	24,5	35	10,5	124,1	124	-0,1	7,7	23,9	32
	NCK-18/4	S, C	23,3	35	11,7	123,6	126,1	2,5	7,3	19,5	37
NCK-18/5	S, C	21,6	35	13,4	130	131,1	1,1	2,7	13,5	20	

Sonda:	AM10		Přístroj:	Dynaray 128/128 PR
Akustická vazba:	Voda		Materiál:	12 022.1
Směr měření:	Zleva		Vyhodnotil:	J. Veselá

Vzorek/počet měření	V	hloubka [mm]	tloušťka [mm]	v - výška vady [mm]	pv [mm]	pr [mm]	pr - pv	max da	max dr	da/dr	
bez svaru	NCK-12	D	22,5	35	12,5	126,3	247,7	121,4	35,1	80,8	0,4
	NCK-13/1	D	22,8	35	12,2	124,9	248,1	123,2	42,5	98,5	0,4
se svarem	NCK-17	S	21,8	35	13,2	124,1	125,1	1	29,7	29,5	1,0
	NCK-18/1	S, C	22	35	13	130,2	131,9	1,7	18,6	35,4	0,5
	NCK-18/2	S, C	22,2	35	12,8	131,3	131,7	0,4	21,4	37,5	0,6
	NCK-18/3	S, C	21,4	35	13,6	129,9	132,1	2,2	17,5	32	0,5
	NCK-18/4	S, C	22,4	35	12,6	131,2	131,3	0,1	19,1	34,8	0,5
NCK-18/5	S, C	21,9	35	13,1	132,1	132,3	0,2	15,6	30,8	0,5	

Sonda:	AM10		Přístroj:	Dynaray 128/128 PR
Akustická vazba:	Voda		Materiál:	12 022.1
Směr měření:	Zprava		Vyhodnotil:	J. Veselá

Vzorek/počet měření	V	hloubka [mm]	tloušťka [mm]	v - výška vady [mm]	pv [mm]	pr [mm]	pr - pv	max da	max dr	da/dr	
bez svaru	NCK-12	D	22,9	35	12,1	117,7	244,7	127	13,5	35,2	38
	NCK-13/1	D	23	35	12	125,1	247,3	122,2	28,4	95	30
se svarem	NCK-17	S, C	20,1	35	14,9	136,9	140,7	3,8	10,7	39,1	27
	NCK-18/1	S, C	22,9	35	12,1	131,1	131,3	0,2	15,7	27,9	56
	NCK-18/2	S, C	22,7	35	12,3	131,3	131,5	0,2	19,5	39	50
	NCK-18/3	S, C	23,1	35	11,9	132,1	132,1	0	15	41,2	36
	NCK-18/4	S, C	22,9	35	12,1	131,7	131,9	0,2	20,4	29,7	69
NCK-18/5	S, C	22,8	35	12,2	131,3	131,5	0,2	20,8	26,8	78	

Sonda:	AM10		Přístroj:	Dynaray 128/128 PR
Akustická vazba:	Vazelína		Materiál:	12 022.1
Směr měření:	Zleva		Vyhodnotil:	J. Veselá

Vzorek/počet měření	V	hloubka [mm]	tloušťka [mm]	v - výška vady [mm]	pv [mm]	pr [mm]	pr - pv	max da	max dr	da/dr	
bez svaru	NCK-12	C	24,2	35	10,8	131,1	246,1	115	67,2	81	83
	NCK-13/1	D	23,2	35	11,8	124,7	245,1	120,4	45,8	95,4	48
se svarem	NCK-17	S	22,1	35	12,9	121,2	118,1	-3,1	15,8	26,9	59
	NCK-18/1	S, C	22,1	35	12,9	125,9	125,1	-0,8	18,2	17,7	103
	NCK-18/2	S, C	22,4	35	12,6	125,3	125,1	-0,2	16,4	19,2	85
	NCK-18/3	S, C	22,1	35	12,9	126,1	129,1	3	14,8	18	82
	NCK-18/4	S, C	21,9	35	13,1	126,9	128	1,1	19,7	19,5	101
NCK-18/5	S, C	21,9	35	13,1	127	130	3	12,4	17	73	

Sonda:	AM10		Přístroj:	Dynaray 128/128 PR
Akustická vazba:	Vazelína		Materiál:	12 022.1
Směr měření:	Zprava		Vyhodnotil:	J. Veselá

Vzorek/počet měření	V	hloubka [mm]	tloušťka [mm]	v - výška vady [mm]	pv [mm]	pr [mm]	pr - pv	max da	max dr	da/dr	
bez svaru	NCK-12	C	23,7	35	11,3	119,1	247,9	128,8	32,8	65	50
	NCK-13/1	D	23,5	35	11,5	124,8	247,8	123	28,7	94,2	30
se svarem	NCK-17	C	21,8	35	13,2	130,9	138,9	8	10,5	22,4	47
	NCK-18/1	S, C	22,1	35	12,9	125,4	126,1	0,7	12,4	28,9	43
	NCK-18/2	S, C	21,9	35	13,1	125,5	125,9	0,4	18,9	31,5	60
	NCK-18/3	S, C	22,4	35	12,6	124,6	125,7	1,1	16,4	39,4	42
	NCK-18/4	S, C	23	35	12	123,9	124,7	0,8	18,2	38,8	47
NCK-18/5	S, C	22,6	35	12,4	125,9	126,9	1	12	32,4	37	