

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T004 Strojírenská technologie - technologie
obrábění

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Akademický rok: 2011/2012

Bc. Richard Silovský

ZAPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 **Strojní inženýrství**
Studijní obor: 2303T004 **Strojírenská technologie – technologie
obrábění**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Stanovení nejistot měření při kalibraci dílenských měřidel

Autor: **Bc. Richard Silovský**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. František Zvoneček, Ph.D.**

Akademický rok 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Richard SILOVSKÝ**
Osobní číslo: **S09N0018K**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Název tématu: **Stanovení nejistot měření při kalibraci dílenských měřidel**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :


1. Úvod do metrologie, cíle práce
2. Základní pojmy a definice nejistot měření
3. Stanovení nejistot měření pro kalibrace dílenských měřidel
4. Stanovení nejistot pro měření rovinnosti průměrných desek
5. Vypracování kalibračních postupů
6. Vyhodnocení a závěr

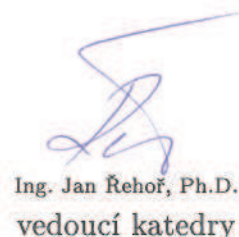
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **50 - 70 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**
Seznam odborné literatury:

Zákon o metrologii č. 505/1990 Sb. ve znění pozdějších předpisů
ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 Posuzování shody - Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří
ČSN EN ISO 10012 Systémy managementu měření - Požadavky na procesy měření a měřicí vybavení
Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 1993
Statistika pro techniky, František Egermayer, Milan Boháč, 1984
Sbírka úloh ze statistiky, Josef Křepela, 2001
ČSN 01 0115 Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii
Česká společnost pro jakost, o.s.
Česká metrologická společnost

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. František Zvoneček, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Konzultant diplomové práce: **Doc. Ing. František Zvoneček, Ph.D.**
Katedra technologie obrábění
Datum zadání diplomové práce: **20. listopadu 2011**
Termín odevzdání diplomové práce: **25. května 2012**




Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.
děkan


Ing. Jan Řehoř, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 12. prosince 2011

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 nedílnou součástí této diplomové práce.

V Plzni dne 24.5.2012

.....

AUTORSKÁ PRÁVA

Podle Zákona o právu autorském. č.35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR) § 17 a Zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků bakalářské/diplomové práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat všem, kteří mi pomáhali psychickou podporou či materiálně jak při studiu na vysoké škole, tak především při tvorbě této Diplomové práce. Rád bych poděkoval vedoucímu této práce, panu Doc. Ing. Františku Zvonečkovi, Ph.D. za vedení diplomové práce a čas strávený při konzultacích. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Vladislavu Bařkovi za jeho četné připomínky a komentáře z praxe k mojí práci.

V Plzni 2012

Bc. Richard Silovský

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Silovský	Jméno Richard	
STUDIJNÍ OBOR	2303T004 - Strojírenská technologie - technologie obrábění		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Ing. Zvoneček, Ph.D.	Jméno František	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Stanovení nejistot měření při kalibraci dílenských měřidel		

FAKULTA	Strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2012
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	104	TEXTOVÁ ČÁST	84	GRAFICKÁ ČÁST	20
---------------	-----	---------------------	----	--------------------------	----

STRUČNÝ POPIS	Diplomová práce pojednává o problematice kalibrace měřidel a vyjadřování jejich výsledků měření. Cílem této diplomové práce je návrh optimálního kalibračního postupu pro měření rovinnosti průměrné desky včetně stanovení nejistoty měření pro zajištění podmínky správného a přesného měření.
KLÍČOVÁ SLOVA	přesnost měření, chyba měření, kalibrace, etalon, návaznost měřidel kalibrace, průměrné desky, nejistota měření

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Silovský	Name Richard
FIELD OF STUDY	2303T004 - Manufacturing Processes - Technology of Metal Cutting	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Zvoneček, Ph.D.	Name František
INSTITUTION	ZCU - FST - KTO	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Determination of measurement uncertainties in the calibration of workshop gauges	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2012
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	104	TEXT PART	84	GRAPHICAL PART	20
----------------	-----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION	<p>The following diploma thesis concerns the issue of calibration and expression of its results.</p> <p>The aim of this diploma thesis is obtain an optimal calibration process in order to ensure proper and accurate measurement of surface plate including the establishment of measurement uncertainties.</p>
KEY WORDS	accuracy of measurement, measurement error, calibration, etalon, continuity of calibration measurement, measurement, surface plates, uncertainties

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK	9
1 ÚVOD	11
CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	12
2 ZÁKLADNÍ POJMY A DEFINICE NEJISTOT MĚŘENÍ	13
2.1 VŠEOBECNÉ TERMÍNY METROLOGIE	13
2.2 ZÁKLADY MĚŘENÍ	19
2.3 DEFINICE NEJISTOT MĚŘENÍ	22
3 STANOVENÍ NEJISTOT MĚŘENÍ PRO KALIBRACE DÍLENSKÝCH MĚŘIDEL	33
3.1 BILANČNÍ TABULKA NEJISTOTY MĚŘENÍ	33
3.2 STANOVENÍ NEJISTOTY KALIBRACE MĚŘIDEL DÉLKY	34
3.3 DÍLENSKÁ MĚŘIDLA, POSUVNÉ MĚŘÍTKO A TRMENOVÝ MIKROMETR	35
4 STANOVENÍ NEJISTOTY PRO MĚŘENÍ ROVINNOSTI DESKY	37
5 KALIBRAČNÍ POSTUPY	39
5.1 KALIBRAČNÍ POSTUP PRO MĚŘENÍ PŘÍMĚRNÉ DESKY KROKOVOU METODOU	39
5.2 METODY VYHODNOCOVÁNÍ ROVINNOSTI PŘÍMĚRNÝCH DESEK	56
6 VYHODNOCENÍ A ZÁVĚR	81
SEZNAM POŽITÉ LITERATURY	82
SEZNAM PŘÍLOH	84

Seznam obrázků

Obrázek 1 Metrologická návaznost měřidel na státní - primární etalon	15
Obrázek 2 Grafické znázornění chyb měření	20
Obrázek 3 Opakovatelnost měření	21
Obrázek 4 Reprodukovatelnost měření	21
Obrázek 5 Znázornění vztahu mezi výsledky opakovaných měření a nejistotou měření	22
Obrázek 6 Praktický význam nejistoty při určování shody	23
Obrázek 7 Normální - Gaussovo rozdělení	26
Obrázek 8 Rovnoměrné - pravoúhlé rozdělení	26
Obrázek 9 Trojúhelníkové - Simpsonovo rozdělení	27
Obrázek 10 Lichoběžníkové rozdělení	27
Obrázek 11 Bimodární - trojúhelníkové rozdělení	27
Obrázek 12 Gaussovo normální rozdělení pravděpodobnosti	32
Obrázek 13 Kalibrace digitálního posuvného měřítka	36
Obrázek 14 Kalibrace digitálního třmenového mikrometru	36
Obrázek 15 Příměrná deska litinová nebo granitová	39
Obrázek 16 Umístění podpěrných bodů u průměrné granitové desky	41
Obrázek 17 Ustavení průměrné desky na univerzálních podpěrkách s hrotem	42
Obrázek 18 Univerzální podpěrka s hrotem dle ČSN 255548	42
Obrázek 19 Stůl pro ustavení průměrné litinové desky	42
Obrázek 20 Stůl pro ustavení průměrné granitové desky	42
Obrázek 21 Stanovení měřicí sítě	43
Obrázek 22 Orýsovaná litinová průměrná deska s měřicí libelou	45
Obrázek 23 Orýsovaná granitová průměrná deska s měřicí libelou	45
Obrázek 24 Kroková metoda měření přímosti podélného řezu	46
Obrázek 25 Přepočtené výškové souřadnice přímosti podélného řezu	46
Obrázek 26 Měření relativní výškové polohy na zvolené rozteči 100 mm	47
Obrázek 27 Nastavitelný měřicí můstek s válcovými odlehčenými doteky	49
Obrázek 28 Sestava elektronické libely s měřicím nastavitelným můstkem pro 100 mm	49
Obrázek 29 Výběr navázaný modelů měřené plochy	51
Obrázek 30 Výsledný tvar změřené plochy	51
Obrázek 31 Výsledný tvar změřené plochy	55
Obrázek 32 Vydutý (konkávní) tvar plochy	59
Obrázek 33 Vypouklý (konvexní) tvar plochy	60
Obrázek 34 Sedlový tvar plochy	60
Obrázek 35 Vyhodnocování odchylky rovinnosti od střední roviny	61
Obrázek 36 Graf výšek ideálně rovné modelové desky	68
Obrázek 37 Graf výšek modelové konvexní desky	71
Obrázek 38 Graf výšek modelové konkávní desky	74
Obrázek 39 Graf výšek modelové vzorové desky 1000x800	79

Seznam tabulek

Tabulka 1 Činitelé bezpečnosti pro n počet měření ≤ 9	24
Tabulka 2 Koeficienty rozšíření pro normální rozdělení	31
Tabulka 3 Obecná podoba bilanční tabulky	33
Tabulka 4 Bilanční součet nejistoty při měření délky	35
Tabulka 5 Odhad nejistoty měřicí schopnosti kalibrace průměrné desky.....	37
Tabulka 6 Odhad nejistoty kalibrace rovinnosti průměrné desky.....	38
Tabulka 7 Doporučené rozteče t_x ; t_y měřených bodů podélných a příčných řezů.....	44
Tabulka 8 Doporučený počet podélných a příčných řezů.....	44
Tabulka 9 Měřené hodnoty relativních výšek sklonu dvou bodů v podélných řezech	50
Tabulka 10 Měřené hodnoty relativních výšek sklonu dvou bodů v příčných řezech	50
Tabulka 11 Velikost vybraných mezních úchylek rovinnost plochy	52
Tabulka 12 Velikost vybraných mezních úchylek rovinnost plochy	53
Tabulka 13 Výpočet nejistoty měření u vzorové desky	54
Tabulka 14 Výsledek kalibrace uvedený na kalibračním listu.....	55
Tabulka 15 Matice sčítání podélných řezů na první příčný řez	56
Tabulka 16 Matice sčítání podélných řezů na i -tý příčný řez	57
Tabulka 17 Matice sčítání příčných řezů na první podélný řez	57
Tabulka 18 Matice sčítání příčných řezů na i -tý podélný řez	58
Tabulka 19 Příklad navázání všech podélných na první příčný řez.....	58
Tabulka 20 Ideální hodnoty rovných podélných řezů.....	67
Tabulka 21 Ideální hodnoty rovných příčných řezů.....	67
Tabulka 22 Vstupní matice hodnot 1. navázané ideálně rovné plochy	67
Tabulka 23 Matice vypočtených úchylek rovinnosti od střední roviny	68
Tabulka 24 Výpočet nejistoty pro ideálně rovnou plochu	69
Tabulka 25 Ideální hodnoty konvexních podélných řezů	70
Tabulka 26 Ideální hodnoty konvexních příčných řezů	70
Tabulka 27 Vstupní matice hodnot 1. navázané ideálně konvexní plochy	70
Tabulka 28 Matice vypočtených úchylek rovinnosti od střední roviny	71
Tabulka 29 Výpočet nejistoty pro ideální konvexní plochu	72
Tabulka 30 Ideální hodnoty konkávních podélných řezů	73
Tabulka 31 Ideální hodnoty konkávních příčných řezů	73
Tabulka 32 Vstupní matice hodnot 1. navázané ideální konkávní plochy	73
Tabulka 33 Matice vypočtených úchylek rovinnosti od střední roviny	74
Tabulka 34 Výpočet nejistoty pro ideální konkávní plochu	75
Tabulka 35 Změřené hodnoty podélných řezů vzorové desky.....	76
Tabulka 36 Ideální hodnoty příčných řezů vzorové desky	76
Tabulka 37 Vstupní matice hodnot z 1. příčně navázaného modelu vzorové desky	77
Tabulka 38 Vstupní matice hodnot z 2. příčně navázaného modelu vzorové desky ...	77
Tabulka 39 Vstupní matice hodnot z 10. příčně navázaného modelu vzorové desky	77
Tabulka 40 Vstupní matice hodnot z 1. podélně navázaného modelu vzorové desky.....	78

Tabulka 41 Vstupní matice hodnot z 2. podélně navázaného modelu vzorové desky	78
Tabulka 42 Vstupní matice hodnot z 8. podélně navázaného modelu vzorové desky.....	78
Tabulka 43 Matice vypočtených průměrných úchylek rovinnosti od střední roviny.....	79
Tabulka 44 Výpočet nejistoty měření u vzorové desky	80

1 Úvod

Metrologie se na povrchu představuje zdánlivě chladnou tváří, skrývajícím hluboké poznatky, které zná jen málo lidí, avšak které většina lidí využívá v jistotě, že všichni stejným způsobem vnímají takové pojmy, jako metr, litr, watt, atd. Důvěra je důležitá k tomu, aby metrologie mohla propojit lidské činnosti navzájem napříč zeměpisnými a profesními hranicemi. Tato důvěra se zvyšuje se širším využíváním spolupráce, společných jednotek míry, společných měřicích postupů, a také s uznáváním akreditací a vzájemným zkoušením měřicích etalonů a laboratoří v různých zemích. Lidstvo má tisícileté zkušenosti potvrzující, že život se skutečně stává snadnější, jestliže spolupracují v oblasti metrologie. [4]

Trest smrti hrozil tomu, kdo zapomněl nebo zanedbal svoji povinnost zkalibrovat své měřidlo délky při každém úplňku. Takové bylo riziko královských architektů odpovědných za budování chrámů a pyramid pro faraony ve starém Egyptě tři tisíce let před naším letopočtem. [4]

Může nám sice připadat, že jsme prostorově i časově velice vzdáleni od těchto prvopočátků, nicméně lidé od té doby vždy kladli velký důraz na správné měření. [4] K prvnímu pokusu o sjednocení měř v Čechách došlo za Přemysla Otakara II. v roce 1268, kdy byl za takzvanou královskou míru, jednotnou v celém království, stanoven pražský (český) loket, který měřil 0,59 metru. Loket se rovnal třem pídím. Píď se rovnala deseti prstům položeným vedle sebe a jeden prst byla šíře čtyř ječných zrn. [8]

Výrazněji se snahy o sjednocování měrových soustav v Evropě projevují od sklonku 18. století s rozvojem vědy a techniky. Na území rakouské monarchie byl v té době několikrát učiněn pokus o sjednocení měř a vah, zejména v letech 1756-1765 a v roce 1777. I když příslušná nařízení z uvedených let značně přispěla k postupnému zavedení pořádku v mírách a váhách, k úplnému sjednocení nedošlo zejména z důvodů silných místních tradic a zvyklostí a nedostatečně silných ekonomických tlaků. [8]

Ve Francii došlo k uzákonění jednotné měrové soustavy 23. září 1795. Jejímí hlavními cíly bylo důsledné zavedení desetinné soustavy a metru jako délkové jednotky. Tím byl položen základ metrické soustavy v takové podobě, jak ji známe dnes. Její přednosti se postupně prokázaly, takže 20. května 1875 podepsali v Paříži zástupci 18 států včetně Rakousko-Uherska tzv. metrickou konvenci - mezinárodní dohodu o používání metrických jednotek nebo také metrický systém. [8] Po rozpadu Rakousko-Uherska se v roce 1922 Československá republika stala členem Metrické konvence, Česká republika pak po svém vzniku v roce 1993.

V současnosti náklady na měření a vážení v dnešní Evropě představují plných 6% celkového hrubého domácího produktu. Metrologie se stala přirozenou součástí našeho každodenního života. Nakupujeme podle velikosti a váhy; měříme odběr vody, elektřiny a tepla. Důsledky toho pociťujeme na našich peněženkách. [4] Existuje mnoho odvětví, kde se setkáváme s nutností přesného měření například: v obchodním styku, v souvislosti s ochranou zdraví a ve výrobním podniku.

Výrobní procesy jsou regulovány a popluchy se vyhledávají na základě přesného měření a vyhodnocení. Systematické měření se známou nejistotou je jedním ze základů řízení kvality v průmyslu. Ve větší části moderního průmyslu představují náklady spojené s měřením 10 až 15 % výrobních nákladů. Správné měření však zvyšuje hodnotu, kvalitu a efektivnost produkce.

Existence měřidel a schopnost používat je má zásadní význam pro to, aby se vědci mohli objektivně dokumentovat dosažené výsledky. Věda o měření – metrologie – je patrně nejstarší vědou na světě a znalost toho, jak jí využívat, je základní nutností prakticky u všech vědních oborů.

Cíle diplomové práce

Cílem diplomové práce je vypracování kalibračního postupu vybraného měřidla. Kalibrace se provádí podle předem stanovených podmínek. Takovými podmínkami je soubor informací, metod a pokynů, které jsou zahrnuty v kalibračním postupu. V kalibračním postupu je popsán celý proces měření provedené kalibrace. Výsledkem kalibrace je měřidlo způsobilé k uvažovanému používání. Dokladem je kalibrační list obsahující výsledek měření spolu s naměřenou nejistotou. Uživatel má potom právo se rozhodnout, zdali měřidlo vyhovuje podmínce bezpečného měření.

Diplomová práce je zaměřena na vytvoření nového kalibračního postupu pro průměrné desky, vyhodnocení rovinnosti od střední roviny a stanovení nejistot při měření elektronickou libelou s nastavitelným měřicím můstkem. Potřeby nových i stávajících zákazníků nutí kalibrační laboratoře vyvíjet nové metody a obory kalibrací. Průměrné desky se staly nedílnou součástí metrologických pracovišť, příslušenství měřicích přístrojů a je nutné provádět kalibraci v pravidelných intervalech. Rozšíření nabízených kalibračních činností pro obor délky, zvětší portfolio nabízených služeb a zvýší konkurenční výhodu akreditované kalibrační laboratoře.

Při interním auditu budou v rámci diplomové práce přezkoumány stávající kalibrační postupy v oboru délka, drsnost povrchu a úhel. Interní audity provádím samostatně dle plánu auditů. Audity probíhají ve shodě s normou ČSN EN ISO/IEC 17025:2005.

Kalibrační úkony budou prováděny v Akreditované kalibrační laboratoři č 2246 ve firmě Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. se 100% vlastnickým podílem ÚJV Řež a.s.

2 Základní pojmy a definice nejistot měření

2.1 Všeobecné termíny metrologie

2.1.1 Metrologie

Metrologie je vědní disciplína, která se zabývá měřením a poznatky z oblasti měření. Metrologie zahrnuje veškeré aspekty jak teoretické, tak i praktické ve vztahu k měření bez ohledu na to, jaká je nejistota měření a bez ohledu na to, v jaké oblasti vědy se tato měření vyskytují. [4]

Metrologie plní tyto tři hlavní úkoly:

1. Definování mezinárodně uznávaných jednotek měření, jako je například metr.
2. Realizace jednotek měření pomocí vědeckých metod, například realizace metru s využitím laserových paprsků.
3. Vytváření řetězců návaznosti cestou stanovení a dokumentování hodnoty a přesnosti měření a přenosu těchto údajů, například dokumentovatelný vztah mezi mikrometrickým šroubem v provozu přesného strojírenství a primární laboratoří metrologie optické délky.

2.1.2 Kategorie metrologie

Metrologie se člení do tří kategorií s různým stupněm složitosti a požadavků na přesnost:

1. **Primární vědecká metrologie** se zabývá přenosem jednotek z národních etalonů na etalony nižších řádů, organizací, zdokonalováním a vývojem etalonů a jejich udržováním.
2. **Legální metrologie** se zabývá správností měření tam, kde tato měření mají vliv na ochranu zdraví, bezpečnosti a průhlednost ekonomických transakcí a zvláště tam, kde je potřeba předepsaného ověřování měřidel.
3. **Průmyslová metrologie** zajišťuje náležité fungování měřidel používaných v průmyslu, zabezpečuje jednotnost a správnost měření ve výrobních a zkušebních procesech pro zajištění kvality života obyvatel a pro akademický výzkum. [4]

2.1.3 Měřicí princip

Vědecký základ měření založený na fyzikálních, chemických a elektrických jevech. Jevy mohou být i biologické povahy. [3]

2.1.4 Metoda měření

Metoda měření je logický sled po sobě následujících, genericky posloupně popsanych činností, které jsou používány při měřeních. Metody mohou být kvalifikovány různými způsoby měření:

- substituční metoda měření,
- diferenciální metoda měření,
- nulová metoda měření,
nebo
- přímá metoda měření,
- nepřímá metoda měření. [3]

2.1.5 Postup měření

Postup měření je soubor specificky popsanych činností, které jsou používány při blíže určených měřeních podle dané metody měření. Podrobný popis měření podle jednoho nebo více měřících principů a dané metody měření založený na modelu měření a zahrnující jakýkoliv výpočet k získání výsledku měření. Postup měření je obvykle dostatečně podrobně dokumentován, aby umožnil obslužnému personálu provést měření. [3]

2.1.6 Metrologická confirmace

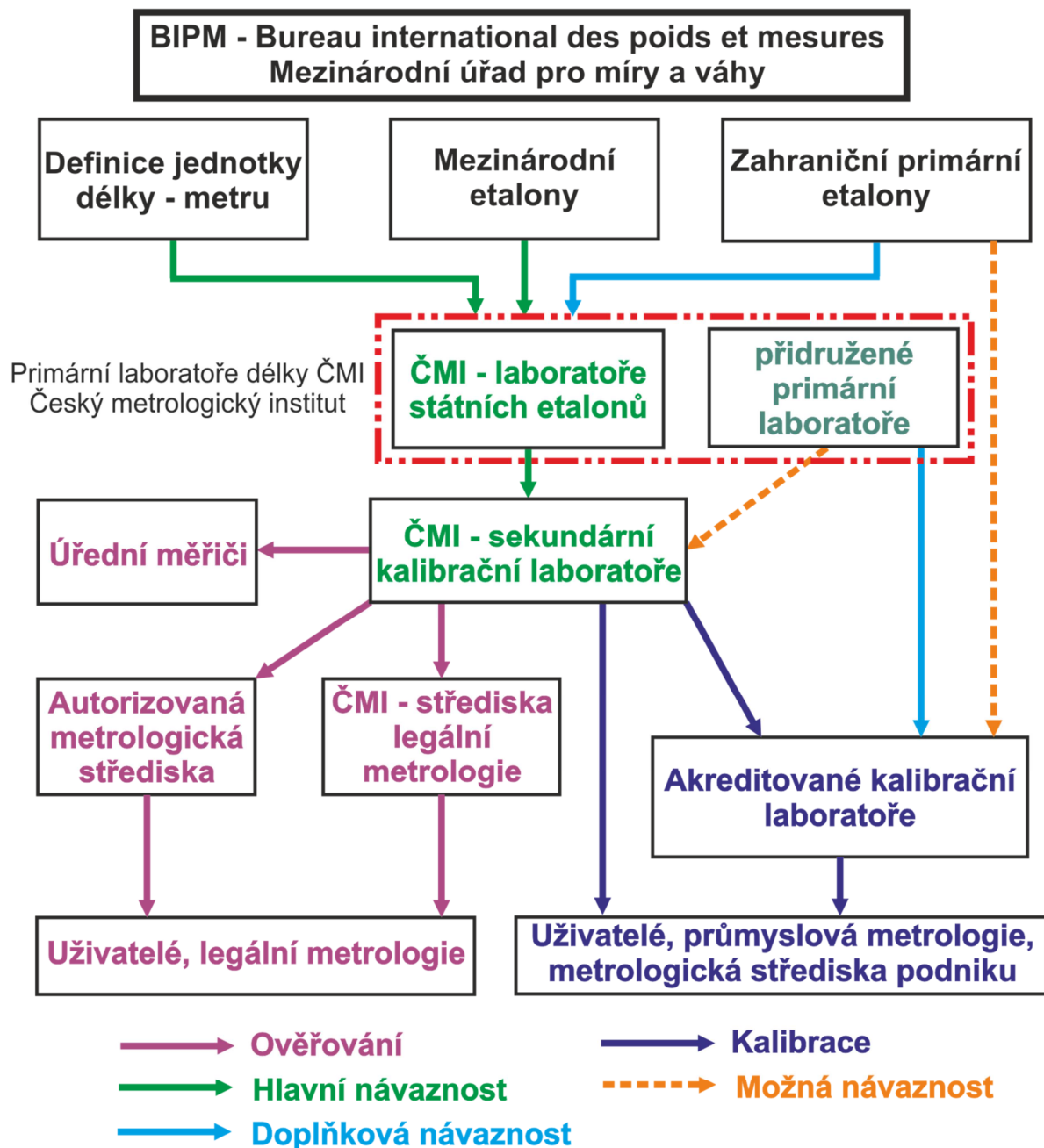
Tvoří soubor činností požadovaných pro zajištění toho, aby měřící vybavení bylo ve shodě s požadavky na jeho zamýšlené použití. Metrologickou confirmaci rozumíme úkony prováděné s měřidly, jako jsou kalibrace, ověřování, nezbytné seřízení nebo oprava a následnou rekalibraci, porovnání s metrologickými požadavky, identifikační označování.

2.1.7 Etalon

Pomocí etalonu se realizuje definice dané veličiny, se stanovenou hodnotou veličiny a přidruženou nejistotou měření, používaná jako reference. Příkladem může být etalon délky kde koncová měřka délky 1000 má vyčíslenou kombinovanou nejistotu měření $\pm 1,5 \mu\text{m}$ pro 4. Etalonový řád. [3] Etalony se používají ke kalibraci hlavních nebo pracovních etalonů, případně ke kalibraci zařízení a pracovních měřidel.

2.1.8 Metrologická návaznost

Vlastnost výsledku měření, pomocí níž může být výsledek vztažen ke stanovené referenci přes dokumentovatelný nepřerušovaný řetězec kalibrací. Každá kalibrace se podílí svým příspěvkem na stanovené nejistotě měření. [3] Řetězcem je potom sled etalonů „standardů“ a kalibrací, který je použit ke vztažení výsledku měření k referenci.



Obrázek 1 Metrologická návaznost měřidel na státní - primární etalon

2.1.9 Měřidlo

Měřidlo nebo měřicí přístroj je zařízení používané k měření buď samostatně, nebo ve spojení s jedním nebo více přídavnými zařízeními. Měřidlo, které může být používané samostatně, je měřicí systém. [3] Měřidla mohou být nastavitelná, pevná „míry“ (koncová měrka) nebo různé šablony a kalibry.

2.1.10 Rozdělení měřidel

Rozdělení měřidel určuje zákon o metrologii č. 505/1990 Sb. ve znění pozdějších předpisů. V § 3, odstavci 1 kategorizuje měřidla k určení hodnoty měřené veličiny. Měřidla slouží k určení hodnoty měřené veličiny. Spolu s nezbytnými pomocnými měřicími zařízeními se pro účely tohoto zákona člení:

- a) etalony;
- b) pracovní měřidla stanovená (dále jen "stanovená měřidla");
- c) pracovní měřidla nestanovená (dále jen "pracovní měřidla");
- d) certifikované referenční materiály a ostatní referenční materiály, pokud jsou určeny k funkci etalonu nebo stanoveného nebo pracovního měřidla. [6]

Etalony anebo stupnice určité veličiny je měřidlo, sloužící k realizaci a uchování této jednotky nebo stupnice a k jejímu přenosu na měřidla nižší přesnosti. Nejvyšší metrologickou kvalitu ve státě tzv. „Státní etalon“ uchovává ČMI nebo oprávněné subjekty, které ÚNMZ pověřil k této činnosti. Za jejich tvorbu, rozvoj a udržování odpovídá stát. Podskupinou kategorie etalonů je **hlavní etalon**. Tento etalon tvoří základ návaznosti měřidel u subjektů, které podléhají povinné kalibraci prováděné v ČMI, nebo akreditované kalibrační laboratoři. [7]

Stanovená měřidla jsou měřidla, která Ministerstvo průmyslu a obchodu (dále jen „ministerstvo“) stanoví vyhláškou k povinnému ověřování s ohledem na jejich význam:

- a) v závazkových vztazích, například při prodeji, nájmu nebo darování věci, při poskytování služeb, nebo při určení výše náhrady škody, popř. jiné majetkové újmy,
- b) pro stanovení sankcí, poplatků, tarifů a daní,
- c) pro ochranu zdraví,
- d) pro ochranu životního prostředí,
- e) pro bezpečnost při práci, nebo
- f) při ochraně jiných veřejných zájmů. [6]

Seznam druhů měřidel, která jsou podle tohoto zákona stanovenými a některá ustanovení s tím související naleznete ve vyhlášce č. 345/2002 Sb. ve znění pozdějších novel, t.j. vyhlášky č. 65/2006 Sb., vyhlášky 259/2007 Sb. a vyhlášky č. 204/2010 Sb. [7]

Pracovní měřidla jsou měřidla, která nejsou etalonem ani stanoveným měřidlem. Kalibraci pracovních měřidel zajišťuje jejich uživatel pomocí pracovních etalonů. Kalibrace také provádějí akreditované kalibrační laboratoře nebo Český metrologický institut.

Certifikované referenční materiály a ostatní referenční materiály jsou materiály nebo látky přesně stanoveného složení nebo vlastností, používané zejména pro ověřování nebo kalibraci přístrojů, vyhodnocování měřicích metod a kvantitativní určování vlastností materiálů. [7]

2.1.11 Základní jednotka délky – metr a její definice

Nejnovější definice z roku 1983 svázala délku metru s rychlostí světla ve vakuu. Z toho vyplývá, že zpřesňováním měření času se zpřesňuje také velikost metru, hodnota rychlosti světla ve vakuu je nadále neměnná konstanta. Metr je tedy definován jako vzdálenost, kterou proběhne světlo ve vakuu za $1/299792\,458$ sekundy. [6]

Metr je realizován na primární úrovni pomocí vlnové délky helium-neonového jódem stabilizovaného laseru. Na nižších úrovních se používají ztělesněné míry, jako jsou koncové měrky a návaznost je zajištěna použitím optické interferometrie ke stanovení délky koncových měrek s návaznosti na výše uvedenou vlnovou délku laserového světla. [4]

2.1.12 Kalibrace měřidel

Kalibrace etalonů a měřidel je základním prostředkem při zajišťování návaznosti výsledků měření. Porovnáním s etalony se zjišťují metrologické charakteristiky měřidla. Kalibrační měřidla se dosahuje toho, že jsou buď přiřčeny hodnoty měřených veličin k indikovaným hodnotám, nebo se stanoví korekce vůči indikovaným hodnotám. Výsledek kalibrace je zaznamenán v kalibračním listu. [7]

2.1.13 Ověřování měřidel

Ověřením stanoveného měřidla se potvrzuje, že stanovené měřidlo má požadované metrologické vlastnosti. Tento požadavek se považuje za splněný, pokud je měřidlo v souladu s požadavkem stanoveným opatřením obecné povahy. Ověřovat stanovená měřidla jsou oprávněni laboratoře ČMI, nebo v rozsahu své autorizace (specifikovaném v rozhodnutí ÚNMZ o autorizaci) autorizované metrologické středisko (AMS). Ověřené stanovené měřidlo opatří ČMI nebo AMS úřední značkou nebo vydá ověřovací list anebo použije obou způsobů.

2.1.14 Kalibrační postupy

K provádění kalibrací je potřeba metodický postup měření známý jako kalibrační. V kalibračním postupu jsou stanovené metody měření a nezbytné úkony pro provedení kalibrace. Kalibrační postup obsahuje:

- předmět kalibrace,
- odkazy na normy a navazující předpisy,
- kvalifikace pracovníků provádějící kalibraci,
- názvosloví a definice,
- kalibrační zařízení a pomůcky potřebné ke kalibraci
- obecné podmínky kalibrace a rozsah kalibrace,
- metodický postup kalibrace,
- vyhodnocení a rozhodnutí o výsledku kalibrace,
- stanovení nejistoty měření,
- vytvoření kalibračního listu, označení měřidla,
- validace kalibračního postupu.

2.1.15 Kalibrační list

Kalibrační list obsahuje výsledky provedené kalibrace. Záznam kalibrace je součástí kalibračního listu a obsahuje naměřené hodnoty. Výsledky kalibrace jsou uváděny správně, jasně, nerozporně, objektivně a v souladu se všemi specifickými návody uvedenými v kalibračních postupech.

Kalibrační list musí obsahovat alespoň následující informace dle normy ČSN EN ISO/IEC 17025:2005 :

- a) název „Kalibrační list“;
- b) název a adresu laboratoře;
- c) jednoznačnou identifikaci kalibračního listu, číslo listu a celkový počet listů;
- d) název a adresu zákazníka;
- e) identifikaci použité metody kalibrace;
- f) popis, podmínky a jasnou identifikaci předmětu kalibrace;
- g) datum přijetí předmětu ke kalibraci, datum provedení kalibrace a datum vystavení kalibračního listu;
- h) popis volby kalibračních bodů, pokud je odlišné od kalibračního postupu;
- i) výsledky kalibrace včetně uvedení jednotek a údajů o nejistotě výsledku kalibrace;
- j) jméno, funkci a podpis oprávněné osoby, která kalibrační list potvrdila;
- k) prohlášení, že se výsledek kalibrace vztahuje jen k předmětu kalibrace, a prohlášení o tom, že bez souhlasu laboratoře se nesmí kalibrační list reprodukovat jinak, než celý.

2.2 Základy měření

2.2.1 Přesnost měření

Pojmem přesnost měření rozumíme těsnost shody mezi naměřenou hodnotou veličiny a pravou hodnotou měřené veličiny. Přesnost je kvalitativní pojem, není dána číselnou hodnotou veličiny. Měření je prohlášeno za přesnější, čím je chyba měření menší. K pojmu přesnost měření se vztahují další pojmy, jako jsou pravdivost měření a preciznost měření. [3]

2.2.2 Pravdivost měření

Pojem, který se dá chápat jako správnost měření. Pravdivost měření je těsnost shody mezi aritmetickým průměrem nekonečného počtu opakovaných naměřených hodnot veličiny a referenční hodnotou veličiny. [3] Ani pravdivost měření není veličinou a tudíž nemůže být vyjádřena číselně a nesmí se zaměňovat s pojmem přesnost měření nebo preciznost měření.

2.2.3 Preciznost měření

Je to těsnost shody mezi indikacemi nebo naměřenými hodnotami veličiny získanými z opakovaných měření na stejném objektu nebo na podobných objektech za specifikovaných podmínek. Specifikovatelnými podmínkami mohou být, například podmínky opakovatelnosti měření, podmínky mezilehlé preciznosti nebo podmínky reprodukovatelnosti. Preciznost měření je vyjádřena číselně mírami nepřeciznosti, jako například směrodatnou odchylkou, rozptylem nebo variačním koeficientem za specifikovaných podmínek měření. Preciznost měření je používána k definování opakovatelnosti měření, mezilehlé preciznosti měření a reprodukovatelnosti. [3]

2.2.4 Mezilehlá preciznost měření

Pokud splníme podmínky mezilehlé preciznosti měření, dostaneme mezilehlou preciznost měření. Podmínky mezilehlé preciznosti jsou:

- stejný postup měření,
- stejné místo a opakování měření na stejném nebo podobných objektech v rozšířeném časovém úseku,
- další podmínky zahrnující změny jako nové kalibrace, kalibrátory, obslužný personál a měřicí systémy. [3]

2.2.5 Chyba měření

Chyba měření je rozdíl mezi naměřenou hodnotou veličiny a referenční konvenčně pravou hodnotou veličiny. Chyby měření se dají rozdělit na chyby subjektivního charakteru, (takovými chybami jsou omyly případně únava pozorovatele, nepozornost a hrubé chyby), a chyby objektivního charakteru (systematické a náhodné). [3]

$$\Delta_c = \Delta + \delta \quad (2-1)$$

kde:

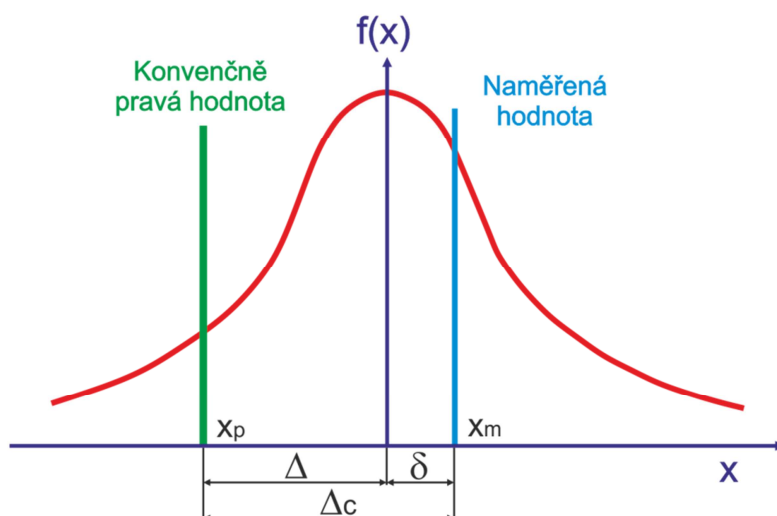
- Δ_c celková chyba
- δ náhodná chyba
- Δ systematická chyba

2.2.6 Náhodná chyba

Náhodná chyba je složka chyby měření, která se v opakovaných měřeních mění nepředvídatelným způsobem. Hodnota náhodné chyby měření se rovná chybě měření minus systematická chyba měření. [3] Vícenásobným změřením eliminujeme vliv náhodných chyb.

2.2.7 Systematická chyba

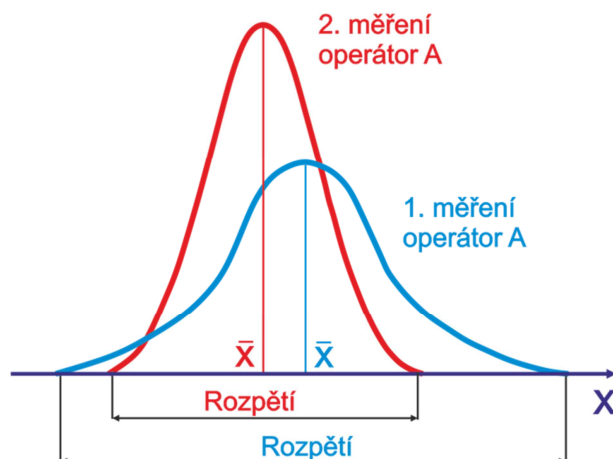
Systematická chyba je složka chyby měření, která v opakovaných měřeních zůstává konstantní nebo se mění předvídatelným způsobem. Vypočítává se jako střední hodnota, která by vznikla z nekonečného počtu měření minus pravá hodnota měřené veličiny. Systematická chyba měření a její příčiny mohou být známé i neznámé. Ke kompenzaci známé systematické chyby měření může být aplikována korekce, která má hodnotu systematické chyby opačného znaménka. [3]



Obrázek 2 Grafické znázornění chyb měření

2.2.8 Opakovatelnost měření

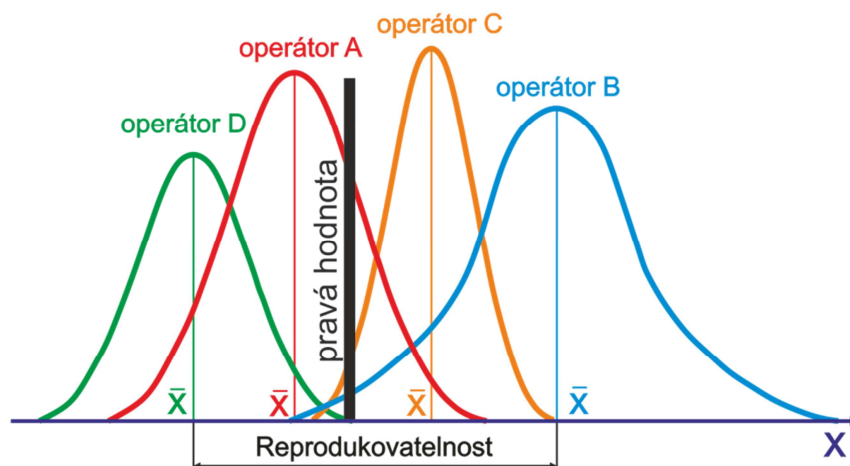
Termínem opakovatelnost měření se rozumí preciznost měření za souboru podmínek opakovatelnosti měření. Do souboru podmínek opakovatelnosti měření patří stejný postup měření, stejný operátor nebo obslužný personál, stejný měřicí systém, stejné pracovní podmínky a stejné místo v krátkém časovém úseku. [3] Opakovatelnost je také definována jako těsnost shody mezi výsledky měření téže měřené veličiny, téhož objektu nebo jevu za podmínek opakovatelnosti.



Obrázek 3 Opakovatelnost měření

2.2.9 Reprodukovatelnost měření

Reprodukovatelnost měření je těsnost shody mezi výsledky měření téže měřené veličiny v případech, že jednotlivá měření jsou prováděna při změně některé z následujících podmínek: měřická metoda, různí operátoři nebo pozorovatelé, měřicí systém, místa nebo objekt, pracovní podmínky, časový odstup. [3]



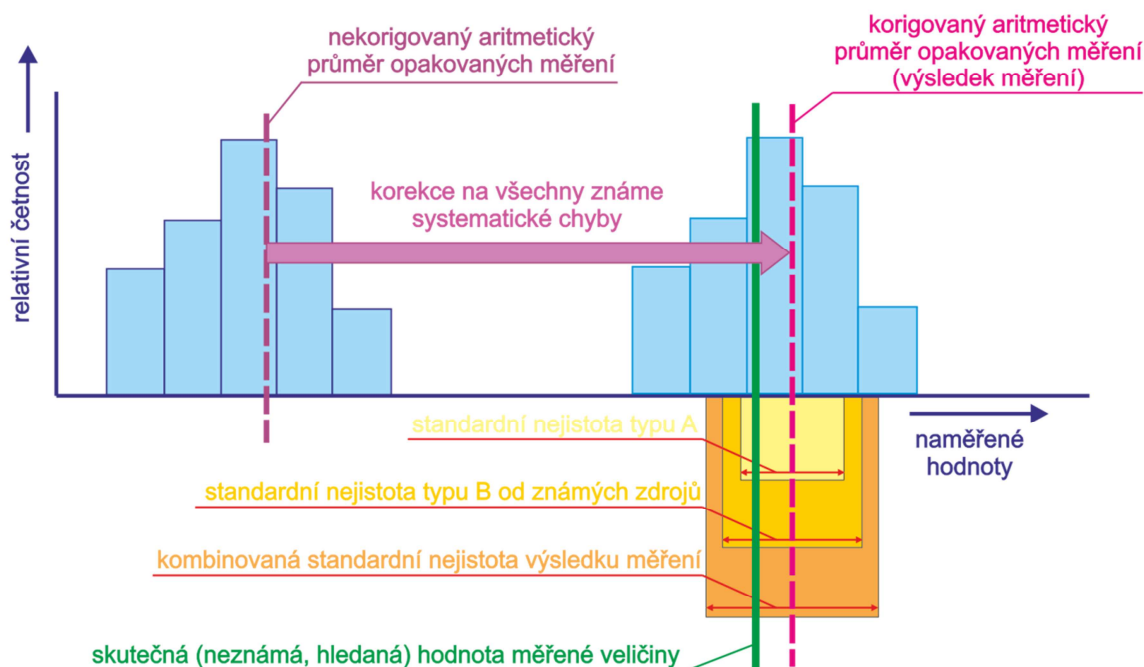
Obrázek 4 Reprodukovatelnost měření

2.3 Definice nejistot měření

2.3.1 Zdroje možných nejistot

Jako zdroje nejistot lze označit veškeré jevy, které nějakým způsobem mohou ovlivnit neurčitost jednoznačného stanovení výsledku měření a tím vzdalují naměřenou hodnotu od hodnoty skutečné. Značnou roli zde sehrává také skutečnost, zda jde o měřicí metody přímé nebo nepřímé. Na nejistoty působí výběr měřicích přístrojů analogových nebo číslicových, použití různých filtrů, vzorkovačů a dalších prostředků v celé trase přenosu a úpravy signálu. K nejistotám také velmi výrazně přispívají rušivé vlivy prostředí v tom nejširším slova smyslu. [13] Nejčastějšími zdroji nejistot jsou:

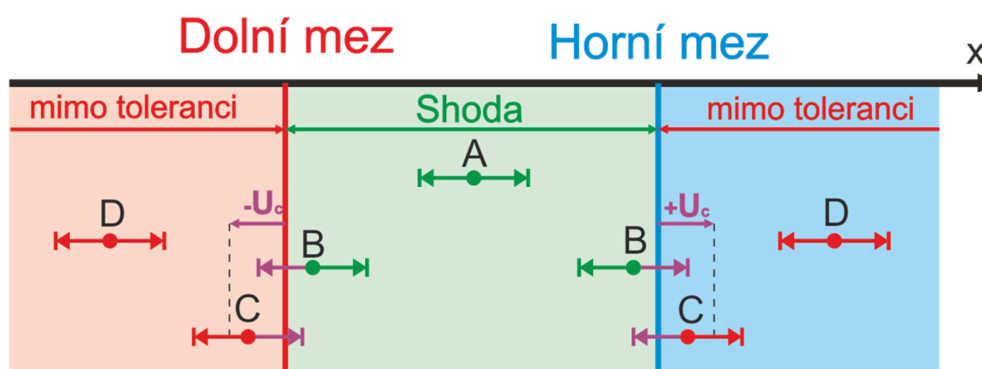
- nedokonalá či neúplná definice měřené veličiny nebo její realizace,
- nevhodný výběr přístroje (rozlišovací schopnost a jiné),
- nevhodný (nerepresentativní) výběr vzorků měření,
- nevhodný postup při měření,
- zjednodušené zaokrouhlení konstant a převzatých hodnot,
- linearizace, aproximace, interpolace anebo extrapolace při vyhodnocení,
- neznámé nebo nekompenzované vlivy prostředí,
- nedodržení shodných podmínek při opakovaných měřeních,
- subjektivní vlivy obsluhy,
- nepřesnost etalonů a referenčních materiálů. [13]



Obrázek 5 Znáornění vztahu mezi výsledky opakovaných měření a nejistotou měření

2.3.2 Nejistota měření

Nejistota měření je definovaná jako kvalitativní parametr či charakteristika přidružená k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které by mohly být důvodně prisuzovány k měřené veličině. Vymezuje interval, v němž lze s určitou pravděpodobností předpokládat výskyt skutečné hodnoty měřené veličiny, viz obrázek. Nejistota měření se obecně skládá z různých složek, které jsou rozdělené do dvou skupin označované A, B. Souhrnem těchto nejistot dostáváme kombinovanou nejistotu. Po vynásobení koeficientem rozšíření získáme takzvanou rozšířenou nejistotu měření U , která pokrývá možné výsledky měření s 95% pravděpodobností.



Obrázek 6 Praktický význam nejistoty při určování shody

- Bod A **Vyhovuje specifikaci** hodnota i nejistota leží v tolerančním pásmu. Lze prokázat shodu se specifikací.
- Body B **Vyhovují s podmínkou** hodnota leží v tolerančním pásmu, nejistota však hranice tolerančního pásma překračuje. Nelze prokázat shodu se specifikací.
- Body C **Nevyhovují s podmínkou** hodnota leží mimo toleranční pásmo, nejistota do tolerančního pásma zasahuje. Nelze prokázat neshodu se specifikací.
- Body D **Nevyhovují specifikaci** hodnota i nejistota jsou mimo toleranční pásmo. Lze prokázat neshodu se specifikací.

2.3.3 Nejistota měření typu A – u_A

Vyhodnocení standardní nejistoty typu A je založeno na statistické analýze naměřených údajů. Statistická složka nejistoty z opakované série měření předpokládá, že měření jsou navzájem nezávislá a uskutečněná za stejných podmínek. Charakterizuje převážně metrologické vlastnosti měřených objektů. Příkladem může být opakované měření průměru válečku, hřídele ve stejném místě (průřezu), stejným měřidlem a toutéž osobou za nezměněných podmínek. [2]

Průměrná hodnota \bar{x} pro n naměřených hodnot ze souboru $x_1; x_2; \dots; x_i; \dots; x_n$.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2-2)$$

Směrodatná odchylka rozdělení výběru založená na n hodnotách měření. s_x je odhad směrodatné odchylky rozdělení σ .

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - X_i)^2} \quad (2-3)$$

Směrodatná odchylka průměrné hodnoty $s_{\bar{x}}$ výběru je rovna výběrové směrodatné odchylce dělené druhou odmocninou počtu měření n .

$$u_A = s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - X_i)^2} = \frac{s_x}{\sqrt{n}} \quad (2-4)$$

Pokud je průměrná hodnota nebo směrodatná odchylka založena na velmi malém počtu opakovaných měření pro $n \leq 9$, mohou být odhadované hodnoty směrodatné odchylky chybné a možná příliš malé. Z tohoto důvodu se používá koeficient „bezpečnosti“ h . [2]

$$u_A = \frac{s_x}{\sqrt{n}} \cdot h \quad (2-5)$$

kde

- u_A složka nejistoty typu A
- s_x směrodatná odchylka
- n počet měření
- h koeficient bezpečnosti

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1

Tabulka 1 Činitelé bezpečnosti pro n počet měření ≤ 9

2.3.4 Nejistota měření typu B – u_B

Nejistoty zjišťované metodou B jsou vázány na známé, identifikovatelné a kvantifikovatelné zdroje. Výpočet nejistot typu B vychází z kvalifikovatelného úsudku založeného na všech dostupných informacích o měřené veličině a jejich možných změnách jako zdroje informací k určení nejistoty typu B mohou sloužit:

- údaje a zkušenosti z dříve provedených měření,
- zkušenosti a všeobecné znalosti o chování měřeného objektu, měřicích metodách, měřicích prostředcích a podmínkách měření,
- Informace od výrobce měřicí techniky
- Údaje uváděné v kalibračních listech, certifikátech a ověřovacích listech,
- Nejistoty referenčních údajů převzatých z příruček a jiných pramenů. [5]

Do jaké míry budou tyto informace oceněny a využity, závisí zvláště na zkušenosti obsluhy, na hloubce všeobecných znalostí i rutíně a praxi experimentátora, protože charakter problému neumožňuje detailně specifikovat jednotný postup. Při určování nejistoty stanovované způsobem B se vychází z dílčích nejistot jednotlivých zdrojů $u_B(z_j)$. Jeli známa maximální úchylka j-tého zdroje nejistoty $z_{j \max}$, jejíž překročení je málo pravděpodobné, určí se nejistota $u_B(z_j)$ podle následujícího vztahu:

$$u_B(z_j) = \frac{z_{j \max}}{\kappa} \quad (2-6)$$

kde

- $u_B(z_j)$ složka nejistoty typu B,
- $z_{j \max}$ známa maximální odchylka,
- κ koeficient rozdělení dle typu rozdělení.

V případech, kdy je známa rozšířená nejistota U a koeficient rozšíření k z certifikátů dokumentace výrobců nebo z jiných pramenů, se stanoví standardní nejistota $u_B(z_j)$ vlivem daného zdroje z_j podle následujícího vztahu:

$$u_B(z_j) = \frac{U}{k} \quad (2-7)$$

kde

- $u_B(z_j)$ složka nejistoty typu B,
- U rozšířená nejistota U (z certifikátů, dokumentace výrobců),
- k koeficient rozšíření, hodnoty viz tabulka č. X. [12]

Výsledná nejistota se určí metodou B pro p zdrojů $z_1, z_2, \dots, z_j, z_p$ dle následujícího zdroje:

$$u_B(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^n A_j^2 u_B^2(z_j)} \quad (2-8)$$

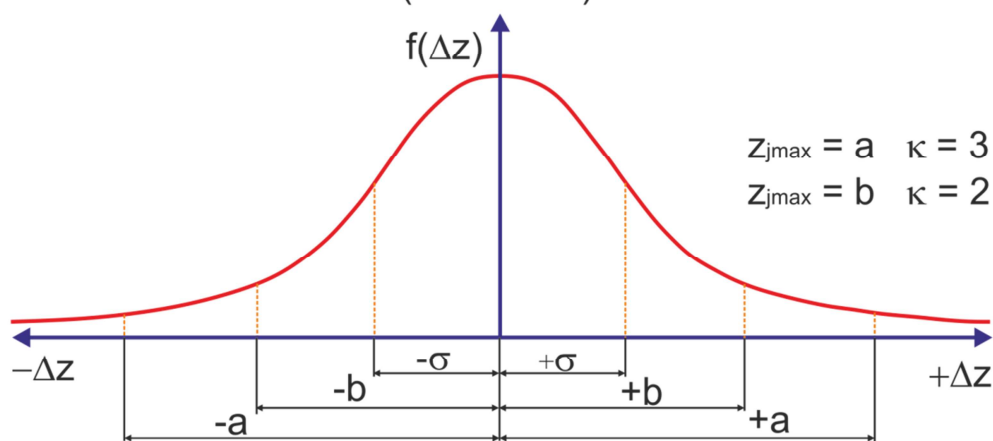
kde

$u_B(z_j)$ nejistoty zdrojů jednotlivých nejistot

A_j činitelé citlivosti

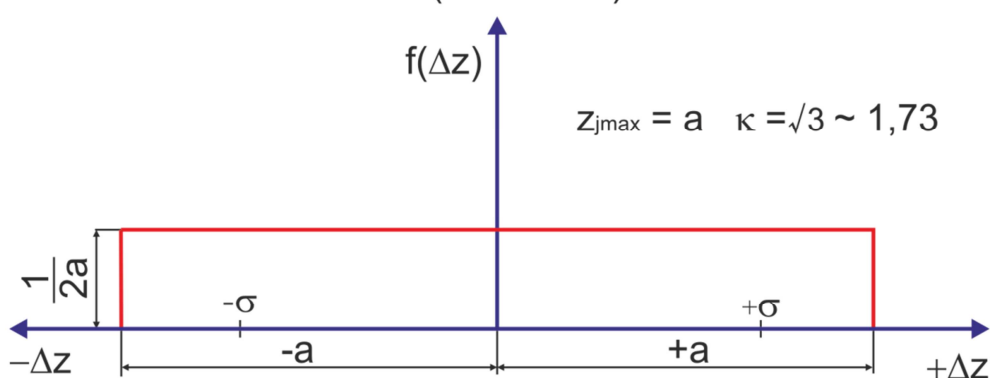
Typy rozdělení pro složky nejistoty typu B

Normální (Gaussovo) rozdělení



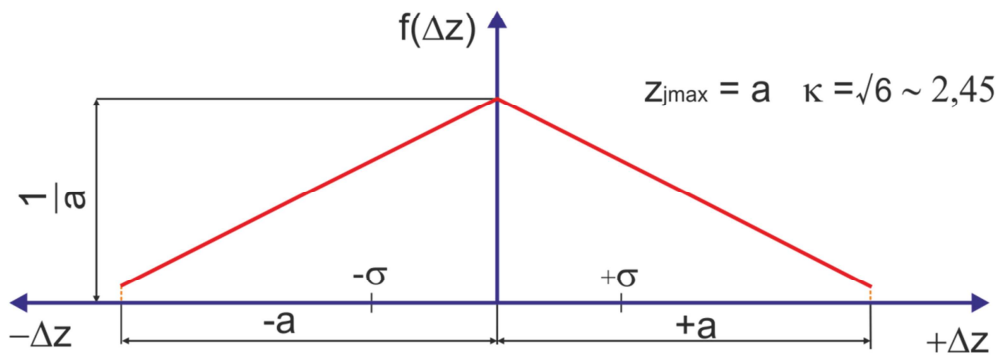
Obrázek 7 Normální - Gaussovo rozdělení

Rovnoměrné (Pravouhlé) rozdělení



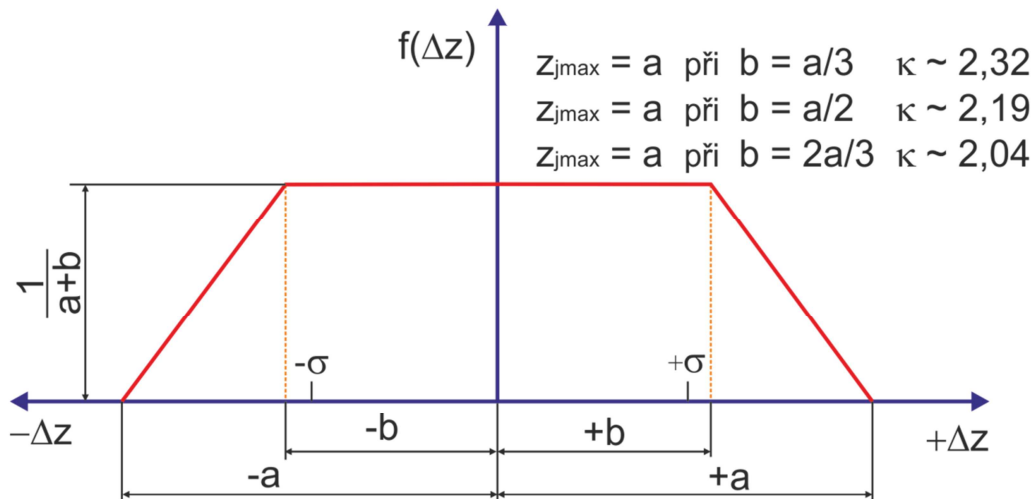
Obrázek 8 Rovnoměrné - pravouhlé rozdělení

Trojúhelníkové (Simpsonovo) rozdělení



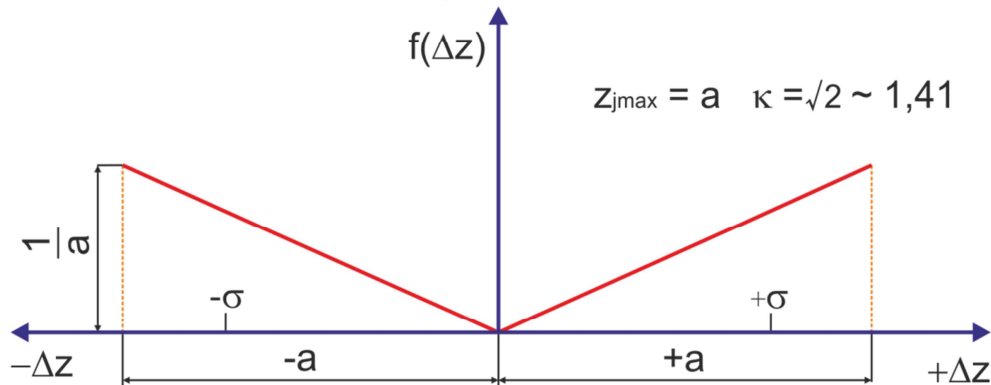
Obrázek 9 Trojúhelníkové - Simpsonovo rozdělení

Lichoběžníkové rozdělení



Obrázek 10 Lichoběžníkové rozdělení

Bimodární - trojúhelníkové rozdělení



Obrázek 11 Bimodární - trojúhelníkové rozdělení

Pro úplnost všech typů možných rozdělení existuje Bimodální – Diracovo rozdělení.

2.3.5 Sčítání složek nejistoty do kombinované standardní nejistoty – u_c

Nejistota pro stejný proces měření může být v mnoha případech vyhodnocena použitím různých modelů, úrovní detailu nebo oboje. Dva extrémní případy jsou metoda černé skříňky a metoda transparentní skříňky

V metodě černé skříňky je celkový proces měření modelován jako černá skříňka s neznámým obsahem. Rozpočet nejistoty a složek nejistoty popisují pouze celkový vliv na proces měření. V této volbě modelu může být velmi obtížné určit funkční vztah mezi složkami nejistoty a jednotlivými složkami k chybě.

K dosažení všech výhod rozpočtu nejistoty může být nezbytné otevřít černou skříňku a provést podrobnější rozpočet nejistot. Ten může být založen na několika menších černých skříňkách nebo na chování všech detailů v procesu měření, modelu transparentní skříňky odhadu nejistoty. Černá skříňka může být také charakterizována jako metoda s nízkou rozlišitelností a metoda transparentní skříňky jako model s velkou rozlišitelností.

V modelu černé skříňky pro odhad nejistoty jsou vstupní a výstupní jednotky stejné a složky nejistoty jsou považovány za aditivní a součet složek nejistoty má očekávanou hodnotu nula. Pro účely modelu černé skříňky jsou všechny ovlivňující veličiny převedeny na jednotku měřené veličiny. Proto jsou v modelu černé skříňky činitelé citlivosti jednotlivých složek nejistoty rovny jedné.

V modelu transparentní skříňky pro odhad nejistoty nejsou platné tyto restriktce složek nejistoty (aditivní složky nejistoty, vstupní jednotka je stejná jako výstupní jednotka a činitel citlivosti je roven jedné). [2]

Metoda černé skříňky odhadu nejistoty

V metodě černé skříňky odhadu nejistoty je výsledek měření odečtená hodnota korigovaná o eventuálně známou korekci:

$$Y = X + C \quad (2-9)$$

Kde X je odečtená hodnota z měřicího přístroje a $C = \sum C_i$ je součet odpovídajících aditivních korekcí známých z například kalibrace, teplotní korekce, deformační korekce, atd.

Kombinovaná standardní nejistota měření je pak dána rovnicí:

$$u_c = \sqrt{u_r^2 + \sum_1^p u_i^2} \quad (2-10)$$

kde

- p počet nekorelovaných složek nejistoty
- u_r součet silně korelovaných ($\rho = 1; -1$) složek nejistoty, vypočtené rovnicí:

$$u_r = \sum_1^r u_i \quad (2-11)$$

kde

- r počet silně korelovaných složek nejistoty

Při měření Y je celkem $p + r$ složek nejistoty. Nekorelované složky nejistoty je nutné přičíst geometricky (druhou odmocninou součtu čtverců). Silně korelované složky nejistoty je nutné přičíst aritmeticky. Konzervativní odhad znamená uvažovat všechny známé složky nejistoty, u nichž je známe, že jsou plně nekorelované, jako silně korelované. [2]

Metoda transparentní skřínky odhadu nejistoty

V metodě transparentní skřínky odhadu nejistoty je hodnota měřené veličiny modelována jako funkce několika naměřených hodnot X_i , které by také mohly být funkce (modely transparentní skřínky) nebo modely černé skřínky nebo oboje:

$$Y = G(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_{p+r}) \quad (2-12)$$

Kombinovaná standardní nejistota měření je pak dána rovnicí:

$$u_c = \sqrt{u_r^2 + \sum_{i=1}^p \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} \cdot u_{X_i} \right)^2} \quad (2-13)$$

kde

- p počet nekorelovaných složek nejistoty
- u_{X_i} kombinovaná standardní nejistota měření i -té měřené hodnoty nebo funkce
- u_r součet silně korelovaných složek nejistoty, vypočtené rovnicí:

$$u_r = \sum_{i=1}^r \frac{\partial Y}{\partial X_i} \cdot u_{X_i} \quad (2-14)$$

kde

u_{X_i} může být výsledek kombinované standardní nejistoty buď černé skříňky, nebo jiné metody transparentní skříňky odhadu nejistoty pro měření Y .

Nekorelované ($\rho = 0$) složky nejistoty měření je nutné přičíst geometricky (druhou odmocninou součtu čtverců). Silně korelované složky nejistoty je nutné přičíst aritmeticky, přičemž počet silně korelovaných složek nejistoty je r). Konzervativní odhad je nutno brát jako silně korelované všechny složky, u kterých není známo, že jsou plně nekorelované. Počet nekorelovaných složek nejistoty je p . [2]

2.3.6 Kombinovaná standardní nejistota měření – $u_c(x)$

Máme-li měřenou veličinu popsanou modelem $X = f(X_1; X_2; \dots; X_n)$, pak standardní nejistota pro x , kde x je odhad měřené veličiny X a výsledek měření se stanovuje příslušnou kombinací standardních nejistot odhadů vstupů $x_1; x_2; \dots; x_n$. [12]

Tato kombinovaná standardní nejistota odhadu x je označena $u_c(x)$ a je to kladná hodnota druhé mocniny kombinovaného rozptylu, který pro nekorelované vstupní veličiny získá ze vztahu:

$$u_c^2(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \cdot u^2(x) \quad (2-15)$$

Tato rovnice se spolu s jejím tvarem pro korelované veličiny nazývá Gaussův zákon šíření nejistot. Výsledná kombinovaná standardní nejistota výsledku měření (veličiny x) může být také geometrickým součtem standardních nejistot typu A a typu B dle následujícího vztahu. [12] V případě korelací vstupních veličin modelu měření musí být při výpočtu kombinované standardní nejistoty měření brány v úvahu také kovariance. [3]

$$u_c^2(x) = u_A^2(x) + u_B^2(x) \quad (2-16)$$

$$u_c(x) = \sqrt{u_A^2(x) + u_B^2(x)} \quad (2-17)$$

Kombinovaná standardní nejistota měření u_c je určena s pravděpodobností $P = 68,3 \%$, tj. pro koeficient rozšíření $k = 1$. Pro jinou pravděpodobnost se nejistota měření upravuje vynásobením koeficientem rozšíření vhodného rozdělení ale o tom až v další kapitole. [12]

Tento zjednodušený postup se v praxi užívá pro mnohá měření v širokém rozsahu oblastí použití, jsou-li však splněny následující podmínky předpokladu normálního rozdělení standardní nejistoty:

- odhad x měřené veličiny X je získán z odhadů vstupů $x_1; x_2; \dots; x_n$, které jsou dobře popsatelné vhodnými typy rozdělení (normální, obdélníkové);
- nejistoty $u(x_i)$ těchto odhadů, které mohou být získány z vyhodnocení nejistoty buď typu A nebo B, přispívají srovnatelnými hodnotami ke kombinované standardní nejistotě $u_c(x)$ – pokud některé vlivy s rovnoměrným rozdělením jsou dominantní pak se postupuje dle příkladů v EA 4/02;
- lineární aproximace použitá dle zákona šíření nejistot je dostatečná;
- nejistota $u_c(x)$ je dostatečně malá, protože její efektivní stupně volnosti jsou významné (větší než 10). [14]

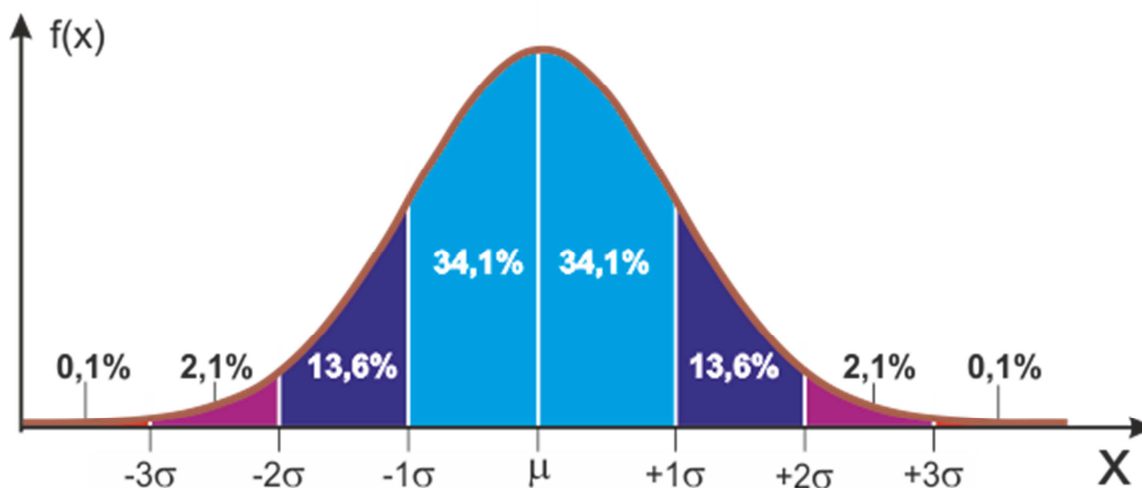
2.3.7 Rozšířená nejistota měření – U

Použití kombinované standardní nejistoty u_c pro kvalitativní posouzení nejistoty měření ve výsledku měření je nedostačující v obchodní, průmyslové činnosti, ve zdravotnictví a bezpečnosti apod. Z metrologického hlediska je taková situace nepřijatelná, proto přistupujeme k vynásobení standardní nejistoty měření koeficientem rozšíření, který nám umožní získat pokrytí možných výsledků s vyšší pravděpodobností. V praxi se nejčastěji používá zjednodušený postup určení koeficientu rozšíření dle dokumentu EA 4/02 pro určitou odhadovanou pravděpodobnost pokrytí výsledku měření. Z paralely s normálním rozdělením jsou vžité tyto základní koeficienty uvedené v následující tabulce. [12]

Koeficient rozšíření k	Pravděpodobnost pokrytí P
1	68,3 %
2	95 %
2,58	99 %
3	99,7 %

Tabulka 2 Koeficienty rozšíření pro normální rozdělení

$$U = k \cdot u_c(x) \text{ nebo } U = k \cdot u_c(y) \quad (2-18)$$



Obrázek 12 Gaussovo normální rozdělení pravděpodobnosti

2.3.8 Uvádění rozšířené nejistoty měření k výsledku měření

V kalibračních listech je nutné celkový výsledek měření, skládající se z odhadu y a tomu náležící rozšířené nejistoty U , uvádět ve tvaru $(y \pm U)$. K tomuto vyjádření musí být v běžných případech připojena vysvětlující poznámka ve tvaru:

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k=2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95%. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EAL R2.

Tam, kde je nutné odvození koeficientu rozšíření z efektivního počtu stupňů volnosti, musí mít dodatečná poznámka tvar:

Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k=XX$, což pro t -rozdělení s $v_{eff}=YY$ efektivními stupni volnosti odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95%. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EAL R2.

Číselná hodnota nejistoty měření musí být uváděna na nejvýše dvě platné cifry. Číselná hodnota výsledku měření se při závěrečném vyjádření standardně zaokrouhluje na pozici nejméně platné cifry nejistoty vztahující se k tomuto výsledku. Při zaokrouhlování je třeba používat běžných pravidel pro zaokrouhlování. Ovšem pokud by zaokrouhlování vedlo ke snížení hodnoty nejistoty o více než 5%, je třeba použít zaokrouhlení nahoru. [14]

Uváděné výsledky hodnot rozšířených nejistot měření jsou v Akreditované kalibrační laboratoři zaokrouhlovány na jedno až dvě platná čísla a přednostně se provádí zaokrouhlování směrem nahoru.

3 Stanovení nejistot měření pro kalibrace dílenských měřidel

3.1 Bilanční tabulka nejistoty měření

Analýza nejistot pro určité měření (někdy nazývaná přehledem nejistot měření) musí obsahovat seznam všech zdrojů nejistot spolu s jejich standardními nejistotami měření a způsoby jejich výpočtu nebo odhadu. Pro opakovaná měření musí být zároveň uveden i počet pozorování n . Aby byla zajištěna přehlednost a jasnost údajů, uvádějí se všechny údaje vztahující se k této analýze v bilanční tabulce. V tabulce je třeba všechny veličiny buď fyzikálním symbolem označovat X_q nebo krátkým identifikátorem a pro všechny musí být uvedený odhad jejich hodnoty x_q , a jemu odpovídající nejistota měření $u_q(x)$, koeficient citlivosti A_q a různě velký příspěvek ke standardní nejistotě $u_q(y)$. Při číselném vyjádření nejistoty hodnotou musí být uvedený i příslušný rozměr. [14]

Příklad formálního uspořádání bilanční tabulky použitelný pro případ nekorelovaných vstupních veličin. Standardní nejistota výsledku kalibrace $u(y)$ uvedená v pravém dolním rohu následující tabulky je dána druhou odmocninou součtu druhých mocnin příspěvků k nejistotě uvedených v tomto sloupci. [14] Přičemž platí následující vztahy (3-1); (3-2).

$$u_q(y) = A_q \cdot u_q(x) \quad (3-1)$$

$$u(y) = \sqrt{\sum_{q=1}^m u_q^2(y)} \quad (3-2)$$

Veličina $X_q; Y$	Odhad $x_q; y$	Standardní nejistota $u_q(x)$	Typ rozdělení	Koeficient citlivosti A_q	Příspěvek ke standardní nejistotě $u_q(y)$; nejistota $u(y)$
X_1	x_1	$u_1(x)$	podle situace	A_1	$u_1(y)$
X_2	x_2	$u_2(x)$		A_2	$u_2(y)$
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮
X_q	x_q	$u_q(x)$		A_q	$u_q(y)$
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮
X_m	x_m	$u_m(x)$		A_m	$u_m(y)$
Y	y	-	-	-	u(y)

Tabulka 3 Obecná podoba bilanční tabulky

3.2 Stanovení nejistoty kalibrace měřidel délky

Kalibrace délkových měřidel můžeme obecně chápat jako porovnání měřidla na etalonové míry. Na této úvaze můžeme založit obecný postup výpočtu nejistoty délkových měření. Výpočet nejistoty měření se provede bilanční tabulkou. Tato bilanční tabulka je obdobou těch tabulek, které uvádí dokument EA-4/02, pouze pořadí sloupců je uzpůsobené pro dělení a násobení v řádcích.

Příkladem může být kalibrace měřidla délky L porovnáním s etalonem. Teplota etalonu a měřidla je blízko teplotě normální a je vyrovnaná v mezích Δt . Materiál etalonu i měřidla je stejný, součinitel délkové teplotní roztažnosti je $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} \pm 1 K^{-1}$.

Výchozí rovnice má tento zjednodušený tvar:

$$l_x = l_n + l_d + l_c + \Delta t \cdot \alpha \cdot L \quad (3-3)$$

l_x	měřená délka
l_n	délka etalonu
l_d	naměřený rozdíl délek
l_c	chyby odečítání
Δt	nevyrovnání teploty mezi etalonem a měřidlem
α	součinitel délkové teplotní roztažnosti měřidla i etalonu
L	jmenovitá délka, na které se kalibrace provádí

Standardní nejistota u_c se určí jako odmocnina součtu kvadrátů parciálních derivací podle všech proměnných násobených příslušnou nejistotou:

$$u_c^2(x) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \cdot u^2(x) \quad (3-4)$$

Věta o lineárním sčítání chyb. Veličiny se postupně nahradí jejich nejistotami a násobící konstanty zůstanou (provede se parciální derivace). Člen rovnice, který obsahuje dvě proměnné Δt ; α se rozpadne na dva členy.

$$u_{l_x}^2 = u_{l_n}^2 + u_{l_d}^2 + u_{l_c}^2 + u_{\Delta t}^2 \cdot \alpha \cdot L + u_{\alpha}^2 \cdot \Delta t \cdot L \quad (3-5)$$

Pro provádění výpočtů v tabulce se provede zjednodušení ve značení v tom smyslu, že dílčí nejistota je označena stejně jako její veličina a součet kvadrátů se provede jako poslední.

$$l_x = l_n + l_d + l_c + \Delta t \cdot L + \alpha \cdot L \quad (3-6)$$

Zdroje nejistoty		Meze nejistot	Typ rozdělení	Dílčí nejistota	Koeficient citlivosti	Příspěvek k nejistotě
Délka etalonu	l_n	Nejistota z kalibračního listu etalonu	normální $k = 2$		1	
Naměřené rozdíly délek	l_d	Nejistota typu A ze směrodatné odchylky	normální $k = 1$		1	
Chyby odečítání	l_c	Odhad čtení části dílku stupnice	normální $k = 3$		1	
Teplotní rozdíl mezi měřidlem a etalonem	Δt	Odhad oteplení při manipulaci	rovnoměrné $k = \sqrt{3}$		$\alpha \cdot L$	
Vliv rozdílu teplotní roztažnosti	α	Součet α měřidla a etalonu se liší o $1 K^{-1}$	rovnoměrné $k = \sqrt{3}$		$\Delta t \cdot L$	
Výsledná délka	l_x	Standardní nejistota kalibrace $u(y)$ pro $k = 1$				

Tabulka 4 Bilanční součet nejistoty při měření délky

3.3 Dílenská měřidla, posuvné měřítko a třmenový mikrometr

Posuvná měřítka a třmenové mikrometry patří mezi nejběžněji používaná měřidla ve výrobních podnicích se strojírenskou výrobou. Posuvná měřítka s noniem patří mezi nejstarší a nejpoužívanější měřidla. V současné době se nahrazují za dostupnější s digitálním čtením měřené hodnoty. Tím urychlují čtení a zrychlují tím proces měření s možnostmi připojení na interface počítače nebo do vyhodnocovací jednotky. I když se v zemích EU používá metrická soustava jednotek SI, výroba je někdy nucena měřit v palcích. Moderní posuvná měřidla jsou schopná přepínat měřicí jednotky dle potřeby a jejich rozlišení dílku je 0,01 mm. I přes zlepšující se rozlišení čtení měřené hodnoty u posuvných měříttek, nelze překonat nedostatky konstrukce a možného vyloučení Abbeho chyby kdy měření neprobíhá v ose čtení měřené hodnoty.

Třmenové mikrometry se jako posuvná měřidla staly nedílnou součástí strojírenských podniků. I klasické třmenové mikrometry se nahrazují digitálními, rozlišitelnost měření je 0,001 mm oproti klasickým třmenovým mikrometrům, kde dělení bubínku dovoluje pouze 0,01 mm. Osa měření je shodná s osou čtení. Hlavní chyby jsou způsobovány vlivem nerovnoběžností měřících kontaktů, měřicí síly, tuhostí třmene a teplotním ovlivněním obsluhy.

Z hlediska praxe v kalibrační laboratoři je zajímavé, respektive vhodné uvést některé typy měřidel délky jmenovitě mikrometr a posuvné měřítko. Tyto měřidla nejsou cílem této diplomové práce. Měřidla jsou zpravidla kalibrována na koncové měřky 4. etalonového řádu.



Obrázek 13 Kalibrace digitálního posuvného měřítka



Obrázek 14 Kalibrace digitálního třmenového mikrometru

4 Stanovení nejistoty pro měření rovinnosti desky

Příměrná deska má důležitou funkci v kalibračních laboratořích i v metrologický středících výrobních podnicích. Příměrné desky slouží jako referenční rovina a základna pro kontrolní, montážní a laboratorní účely. Moderní výškoměry odměřují od referenční roviny, dále se používá ke kalibraci k orýsování, je tedy potřeba znát hodnotu rovinnosti a její nejistotu pro přesné měření.

Stanovením nejistoty měření zpřesňujeme naměřenou hodnotu rovinnosti příměrné desky a uživatel může následně rozhodnout jaká je její výsledná přesnost. Stanovení nejistoty provedeme opět bilanční tabulkou, která je následující:

Zdroje nejistoty	Meze nejistot	Typ rozdělení	Dílčí nejistota	Koefic. citlivosti	Příspěvek k nejistotě
Chyba libely měřicí krok 0,1 m; N kroků	$\pm 5 \mu\text{m/m}$ $10 \mu\text{m/m}$ krok $1 \mu\text{m}$	normální $k = 2$	$0,5 \mu\text{m/m}$	N	$0,5 \cdot N \mu\text{m}$
Chyba z navázání max. rozdílů	Max. rozdíl $10 \mu\text{m}$ výškové souřadnice	normální $k = 3$	$3,3 \mu\text{m}$	1	$3,3 \mu\text{m}$
Ostatní vlivy chvění, vychýlení bodu, vychýlení směru	Odhad $3 \mu\text{m}$	normální $k = 2$	$1,5 \mu\text{m}$	1	$1,5 \mu\text{m}$
Standardní nejistota kalibrace $u(y)$ pro $k = 1$ pro pravděpodobnost 68%, kde N počet kroků					$3,63 + 0,5 \cdot N$
Rozšířená nejistota kalibrace U pro $k = 2$ pro pravděpodobnost 95%, kde N počet kroků					$7,4 + 1 \cdot N$

Tabulka 5 Odhad nejistoty měřicí schopnosti kalibrace příměrné desky

U dílčích měření jednotlivých kroků se projevuje chyba libely vztažená na rozteč měřicího můstku. Chyba čtení měřené digitální hodnoty se projevuje indikací digitálního displeje ± 1 dílek. Násobením počtem kroků N, dostaneme dílčí nejistotu chyby libely na libovolném řezu.

Výškové souřadnice měřené desky se získají navázáním podélných řezů na vybraný příčný řez nebo příčné řezy na vybraný podélný řez. Navázání všech možných matematických modelů získáváme pro každý bod souřadné sítě několik hodnot rovných počtu navázaných matematických modelů. Nejistota chyb z navázání je pak největší rozdíl maxima a minima bodu ze všech zkoumaných bodů souřadné sítě.

Při měření průměrné desky se projevují i ostatní vlivy, které nelze vyloučit. Mezi ostatní vlivy lze zahrnout chvění, nevyrovnaní průměrné desky, vychýlení směru a vychýlení bodu. Chvění při měření způsobuje neodizolovaná podlaha. Zdrojem chvění bývají výrobní stroje, přejezdy halových jeřábů a v laboratorních podmínkách pohyb jednotlivých pracovníků. Před kalibrací se průměrná deska ustaví do ideální roviny, viz kalibrační postup, tím minimalizujeme chybu vychýlení bodu. Poslední chybou je vychýlení směru. Dochází k němu při vychýlení od ideální přímky měření podélného nebo příčného řezů. Chybu lze omezit přiložením vodícího měřítka.

Odhad nejistoty měřicí schopnosti laboratoře je za normálních podmínek k dispozici zákazníků, tato nejistota se označuje výrazem CMC - Calibration and Measurement Capabilities (kalibrační a měřicí schopnosti), dříve označovanou jako BMC - Best Measurement Capabilities (nejlepší měřicí schopnost), uvedenou v příloze osvědčení. Měření a kalibrace s CMC jsou prováděny podle dokumentovatelného postupu se stanovenou bilancí nejistot v rámci systému managementu laboratoře, prováděné na pravidelném základě a přístupné všem zákazníkům.

Kalibrace u zákazníka musí zohlednit všechny vnější zdroje nejistot a stálost měření, proto výsledná bilanční tabulka je rozšířená o statistickou analýzu z vyhodnocených matematických modelů z navázaných podélných a příčných řezů.

Zdroje nejistoty	Meze nejistot	Typ rozdělení	Dílčí nejistota	Koefic. citlivosti	Příspěvek k nejistotě
Chyba libely měřicí krok 0,1 m; N kroků	$\pm 5 \mu\text{m/m}$ $10 \mu\text{m/m}$ krok $1 \mu\text{m}$	normální $k = 2$	$0,5 \mu\text{m/m}$	N	$0,5 \cdot N \mu\text{m}$
Naměřené rozdíly rovinnosti modelů	Nejistota typu A ze směrodatné odchylky	normální $k = 1$	$u_A(x)$	1	$u_A(y)$
Chyba z navázání max. rozdílu	Max. rozdíl $10 \mu\text{m}$ výškové souřadnice	normální $k = 3$	$3,3 \mu\text{m}$	1	$3,3 \mu\text{m}$
Ostatní vlivy chvění, vychýlení bodu, vychýlení směru	Odhad $3 \mu\text{m}$	normální $k = 2$	$1,5 \mu\text{m}$	1	$1,5 \mu\text{m}$
Standardní nejistota kalibrace $u(y)$ pro $k = 1$ pro pravděpodobnost 68%, kde N počet kroků; L délka v [m]				$\sqrt{13,14 + u_A(y)^2} + 0,5 \cdot N$	
Rozšířená nejistota kalibrace U pro $k = 2$ pro pravděpodobnost 95%, kde N počet kroků; L délka v [m]				$2 \cdot \sqrt{13,14 + u_A(y)^2} + 1 \cdot N$	

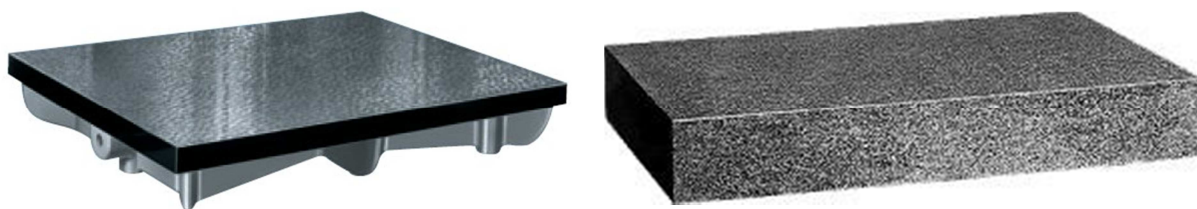
Tabulka 6 Odhad nejistoty kalibrace rovinnosti průměrné desky

5 Kalibrační postupy

5.1 Kalibrační postup pro měření průměrné desky krokovou metodou

5.1.1 Předmět kalibrace

Kalibrační postup se vztahuje na kalibraci průměrných desek dle specifikace ČSN 25 5502 nebo DIN 876. Materiály průměrných desek mohou být různé dle rozsahu jejich požití. Průměrné desky slouží jako měřicí základna pro měřicí a kontrolní úlohy. Patří k základnímu vybavení pracovišť pro rýsování, slouží jako základna pro tři souřadnicové měřicí stroje a v měřicích kalibračních laboratořích. Materiály měřicích desek jsou šedá litina nebo granit.



Obrázek 15 Průměrná deska litinová nebo granitová

Kalibrace popsaná v tomto kalibračním postupu se týká jak prvotní kalibrace v dané organizaci, tak i rekalibraci během používání průměrné desky.

5.1.2 Související normy a metrologické předpisy

ČSN 25 5502	Kontrolní a rýsovací nářadí. Přesnost průměrných ploch desek a hranolů
DIN 876 Teil 1	Prüfplatten aus Naturhartgestein Anforderungen Prüfung
DIN 876 Teil 2	Prüfplatten aus Gußeisernen Anforderungen Prüfung
ČSN 01 4421 Návrh	Měření úchylek přímosti
ČSN 01 4422 Návrh	Měření úchylek rovinnosti
ČSN EN ISO/IEC 17025:2005	Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří
ČSN EN ISO 10012	Systémy managementu měření – Požadavky na procesy měření a měřicího vybavení
EA 4/02	Vyjadřování nejistot měření při kalibracích
EA 4/07	Návaznost měřicího a zkušebního zařízení na státní etalony
TNI 01 0115	Mezinárodní metrologický slovník – Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny

5.1.3 Kvalifikace pracovníků provádějící kalibraci

Kvalifikace pracovníků provádějící kalibraci měřidel je dána v příslušném předpisu organizace. Dále musí být příslušní pracovníci seznámeni s tímto kalibračním postupem.

5.1.4 Názvosloví a definice

Příměrná deska je dílenské měřidlo, slouží jako základní rovina pro přesné měření, k rýsování obrobků, výrobků a jako základna pro výškoměry, kontrolní příměrné válce a třísořadnicové měřicí stroje. Kalibrací rozumíme soubor úkonů prováděných za účelem rozhodnout, zda příměrná deska bude nadále užívaná nebo vyřazena. Opotřebené desky lze opravit přebroušením nebo zaškrabáním. Úchylka rovinnosti je největší vzdálenost bodů skutečné plochy od obalový rovin v rozsahu vztažného úseku.

5.1.5 Kalibrační zařízení a pomůcky potřebné ke kalibraci

Kalibrační zařízení je závislé na možnostech příslušné kalibrační laboratoře a metrologické střediska organizace. Na kalibraci příměrných desek je nutné toto měřicí zařízení a potřebné vybavení:

- digitální elektronická vodováha,
- nastavitelný měřicí můstek s příslušenstvím,
- kalibrované metrové ocelové měřítko,
- psací potřeby: lihový popisovač; měkká grafitová tužka,
- skleněný dotkový teploměr s měřicím rozsahem (16 až 26) °C, s dělením 0,2 °C,
- lapovací papír, brusný kámen o vhodné zrnitosti,
- bílé látkové rukavice,
- čisticí prostředky: lékařský benzin, lněná utěrka;
- 3x podpěrka univerzální s hrotem pro ustavení desky pro rozměry do 630 mm,
- univerzální montážní klíč.

5.1.6 Obecné podmínky kalibrace

Kalibrace příměrných desek se provádí za těchto referenčních podmínek:

- teplota prostředí: 20 °C ± 3 °C
- vlhkost vzduchu: max. 70%

Dovolený teplotní rozdíl mezi elektronickou libelou s nastavovacím měřicím můstkem a příměrnou deskou musí být maximálně 0,5 °C. Toho se dosáhne umístěním libely na měřenou příměrnou desku po dobu minimálně 1 hodiny.

Teplota kalibrované desky a měřicí libely tak i teplota prostředí se měří před zahájením kalibrace a po jejím skončení, popř. se kontroluje průběžně.

Relativní vlhkost vzduchu se měří vlhkoměrem před zahájením kalibrace.

5.1.7 Příprava kalibrace, funkční kontrola

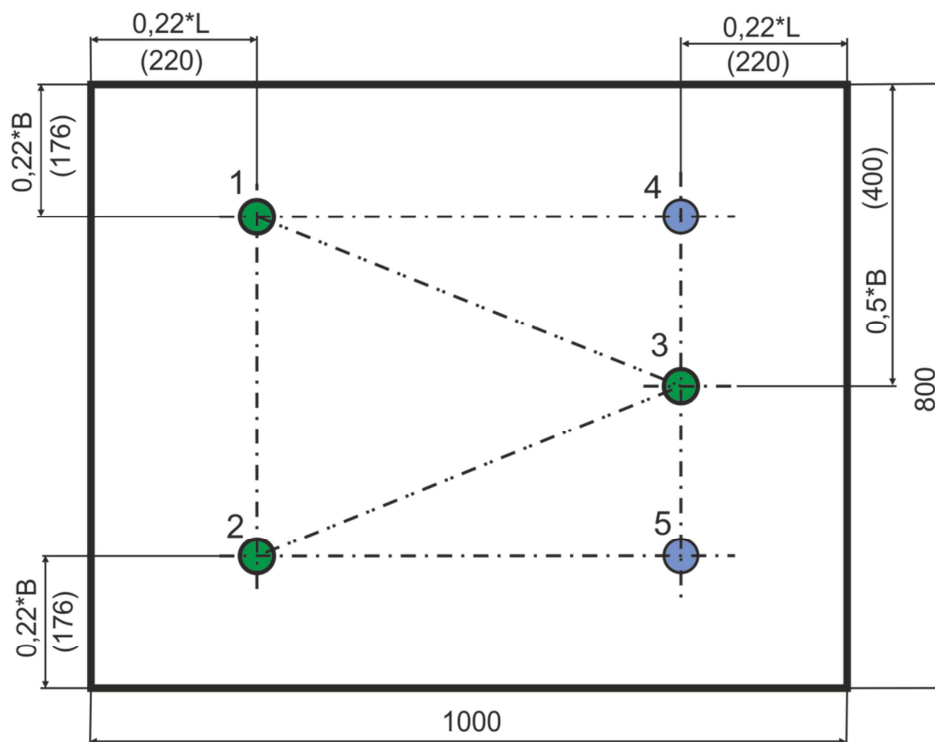
Při kalibraci je provedena kontrola značení průměrné desky zvláště pak evidenčního čísla, případně výrobního čísla a výrobce průměrné desky, nutné pro jednoznačnou identifikaci měřidla. Odstranění značek, kterými bylo měřidlo opatřeno při předchozí kalibraci.

Očištění průměrných desek se provádí pomocí lněné utěrky a lékařského benzínu. Kontrolou plynulosti pohybu měřicího můstku s elektronickou libelou zjistíme hrubé nerovnosti průměrné desky, které by mohly způsobovat chybu měření.

Nerovnosti průměrných desek ze šedé litiny poškozené hrubými vrypy od měřených součástí zahradíme brusným kamenem a začistíme lapovacím papírem. Místa zasažená rží začistíme pomocí lapovacího papíru. Kamenné a granitové desky se pouze očistí lněnou utěrkou.

5.1.8 Kontrola ustavení průměrné desky

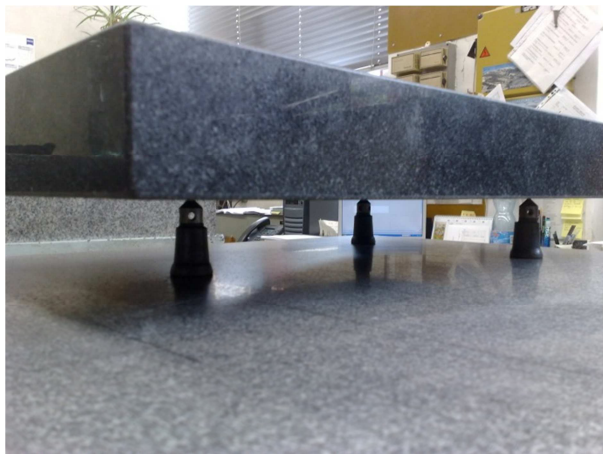
Průměrné desky se podkládají v místech, které jsou blízké takzvaným Besselovým bodům, tj. 0,2203% od hrany příslušného rozměru což vychází z praxe. Jsou vypočteny jako vzdálenosti uložení nosníku (součásti), zatíženého spojitým zatížením (vlastní vahou) pro podmínku minimálního průhybu. Podložení ve třech bodech zaručuje nejmenší chybu průhybu desky. U průměrných desek od 800 mm se provádí dodatečné podložení v bodech 4, 5, a to z důvodu stability průměrné desky.



Obrázek 16 Umístění podpěrných bodů u průměrné granitové desky

Vyrovnání příměrné desky se provede zkalibrovanou elektronickou libelou. Příměrná deska se rovná na ideální rovinu s minimálním nakloněním v podélném, příčném a úhlopříčném směru. Naklání desky se děje pomocí třech univerzálních podpěrek s hrotem dle ČSN 25 5548 umístěných pod příměrnou deskou v bodech 1; 2; 3 viz předchozí obrázek. Nejprve překontrolujeme elektronickou libelu na nulovou chybu. Na příměrné desce se vyznačí místo, kde bude prováděna kontrola vodováhy. Obvykle se volí takové místo, kde rovinnost příměrné plochy vykazuje nejmenší chyby. Přečte se hodnota polohy libely s ohledem na orientaci vychýlení. Vodováha se otočí o 180° a přečte se znovu hodnota polohy.

Poloviční rozdíl obou odečtů udává chybu, se kterou je příměrná deska ustavena do vodorovné roviny, poloviční součet obou odečtů udává nesprávné seřízení vodováhy, kterou je nutno následně seřídit.



Obrázek 17 Ustavení příměrné desky na univerzálních podpěrkách s hrotem



Obrázek 18 Univerzální podpěrka s hrotem dle ČSN 255548



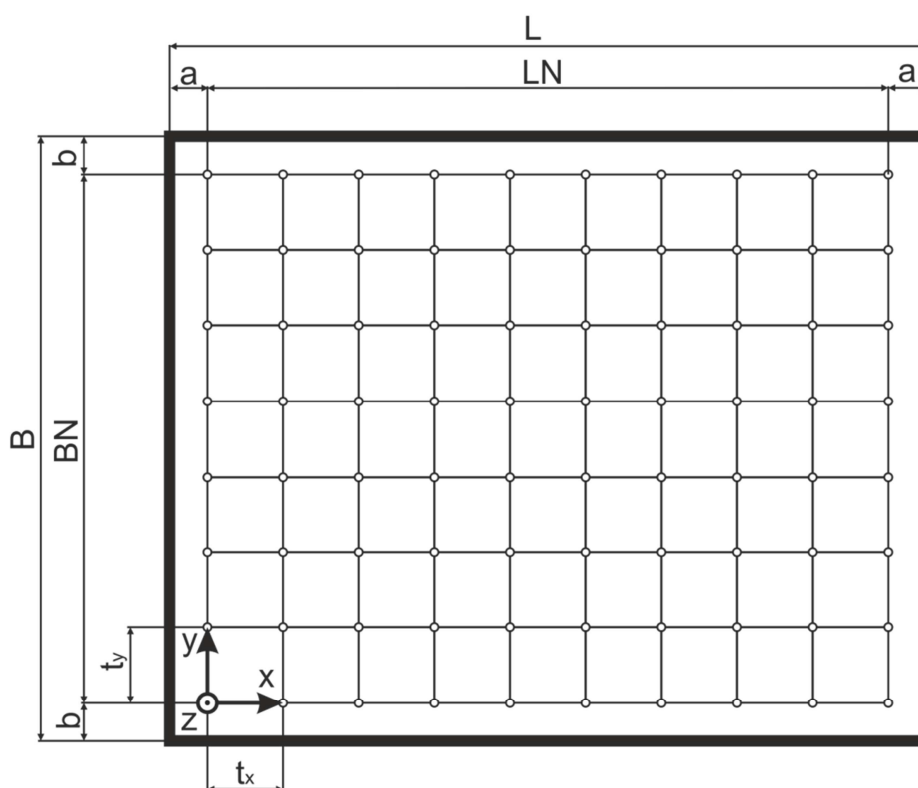
Obrázek 19 Stůl pro ustavení příměrné litinové desky



Obrázek 20 Stůl pro ustavení příměrné granitové desky

5.1.9 Stanovení měřicí sítě

U krokových metod měření úchylek rovinnosti se volí počet a polohy měřených bodů podle funkce ploch (je-li stanovena předpisem tolerance rovinnosti), délky L a šířky B měřené plochy v některých případech podle použité měřicí metody. [9] Hustota souřadné sítě a tedy i rozteče jednotlivých bodů se volí v závislosti na požadované přesnosti průměrné desky a účelu použití. Různé druhy průměrných desek svou kvalitou povrchu a typem konečného opracování nespĺňují požadavky nejvyšších přesností a tudíž by bylo zbytečně nákladné podrobnější měření. Přesné měření znamená více peněz za kalibraci a dnes kdy je požadavek na co nejmenší náklady, má konečné slovo o volbě měřicí sítě zákazník. Doporučené rozteče měřicí sítě a volby okrajových pásem jsou uvedeny v následujících tabulkách.



Obrázek 21 Stanovení měřicí sítě

kde

- L Délka desky
- B Šířka desky
- LN Délka měřené plochy
- BN Šířka měřené plochy
- t_x Rozteč měřených bodů v podélném směru
- t_y Rozteč měřených bodů v příčném směru
- $a; b$ Šířky okrajových pásem

Předběžně se navrhnou šířky okrajových pásem a a b a vypočtou se délky měřených úseků LN a BN . Platí tyto podmínky, že délky měřených úseků LN a BN musí být dělitelné beze zbytku navrženým podélných nebo příčných řezem a rozteč měřicího můstku je stejná pro t_x ; t_y . Okrajová pásma vnášejí do následného měření chyby, proto musejí být dostatečně velká. Volba šířky okrajových pásem se volí v rozmezí 50÷100 mm s ohledem na velikost průměrné desky.

Volba rozteče měřicího můstku t_x ; t_y

Délka desky L	Jemná síť mm	Střední síť mm	Hrubá síť mm
do 400 mm	-	-	100
do 630 mm	-	100	150
do 1500 mm	100	150	200
do 2000 mm	150	200	250
do 3000 mm	200(150)	250	300
do 4000 mm	250	300	-
do 5000 mm	300	-	-

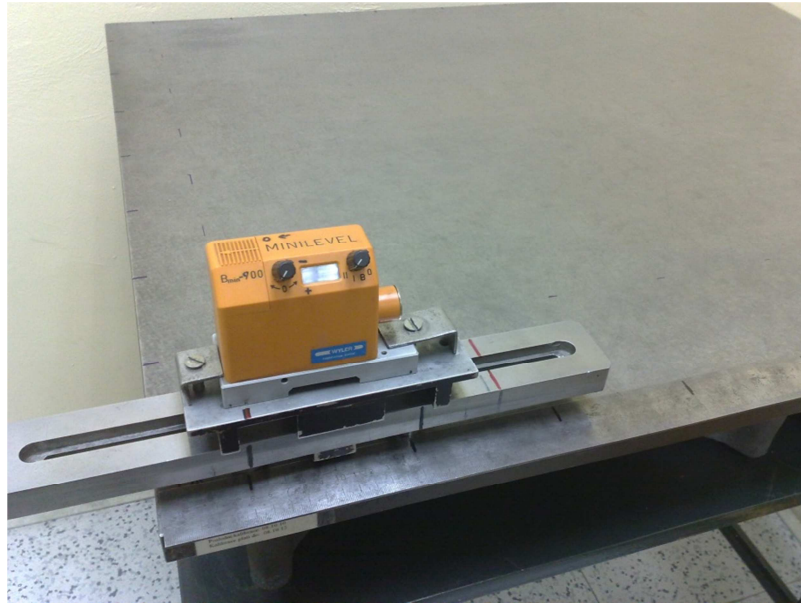
Tabulka 7 Doporučené rozteče t_x ; t_y měřených bodů podélných a příčných řezů

Rozměry desky LxD	Jemná síť podélné/příčné	Střední síť podélné/příčné	Hrubá síť podélné/příčné
400x300 mm	-	-	3/4
630x400 mm	-	4/7	3/5
800x600 mm	6/8	4/6	3/4
1000x800 mm	8/10	6/7	4/5
1000x1000 mm	10/10	7/7	5/5
1200x1000 mm	8/12	6/8	4/6
1500x1000 mm	10/15	7/10	5/8
2000x1000 mm	7/14	5/10	4/8
2000x1500 mm	10/14	8/10	6/8
2500x1500 mm	8/13 (10/17)	6/10	5/9
3000x1500 mm	8/15	6/12	5/10
3000x2000 mm	10/15	8/12	7/10
4000x2000 mm	8/16	7/14	-
5000x2000 mm	7/17	-	-
5000x3000 mm	10/17	-	-

Tabulka 8 Doporučený počet podélný a příčných řezů

5.1.10 Orýsování průměrné desky

Zakreslení měřicí sítě se zvolenou roztečí jednotlivých bodů na měřenou průměrnou desku se provádí, u litinových desek, lihovým fixem v okrajových pásmech a, b. Kamenné (granitové) průměrné desky lze orýsovat měkkou grafitovou tuhou po celé ploše. Orýsování měkkou grafitovou tuhou zanechá na granitové desce minimální výšku vrstvy, která neovlivňuje měření. Nakreslená nebo naznačená souřadná síť má funkci vodících linek pro měření podélných a příčných řezů při měření jejich jednotlivých přímostí.



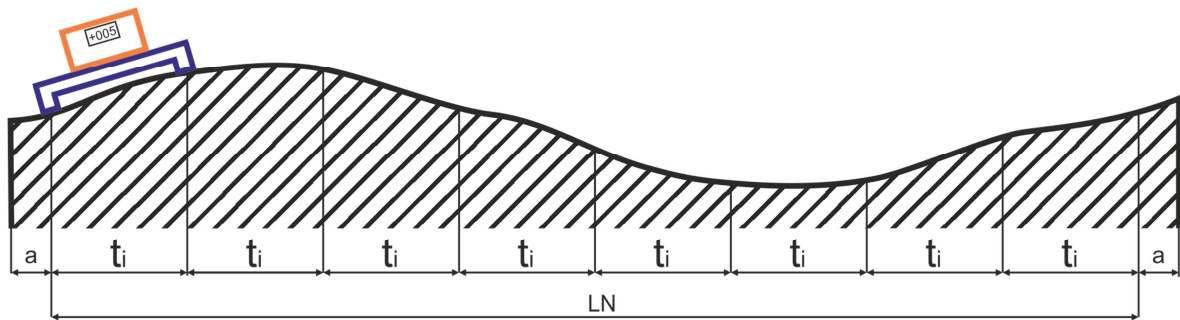
Obrázek 22 Orýsovaná litinová průměrná deska s měřicí libelou



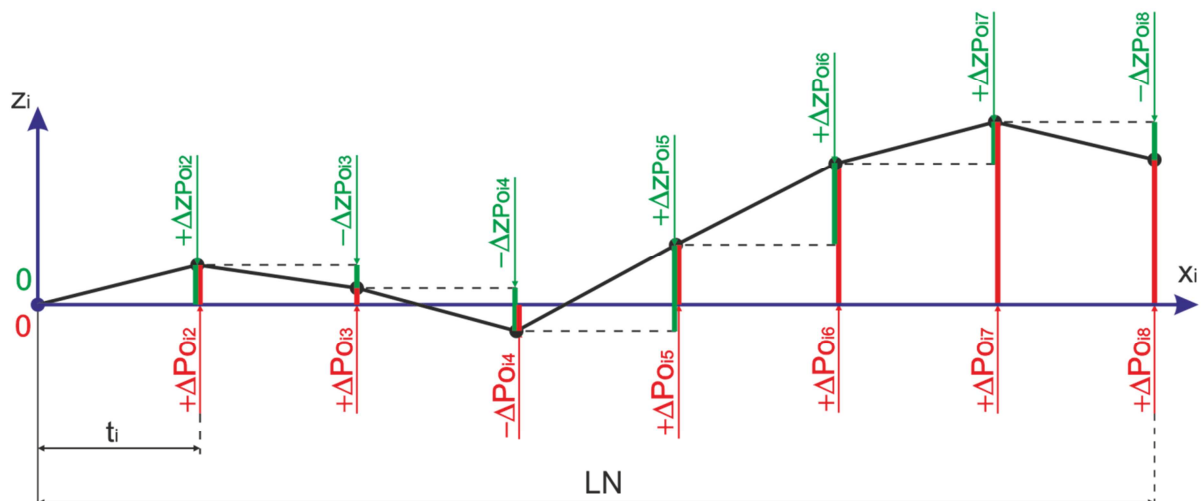
Obrázek 23 Orýsovaná granitová průměrná deska s měřicí libelou

5.1.11 Kroková metoda měření přímosti

Při určování tvaru přímosti jednotlivých podélných a příčných řezů krokovou metodou měření relativních změn sklonu sousedních úseků se připevňuje libela na měřicí můstek, který dosedá na měřenou průměrnou desku ve zvoleném směru jen na dvou opěrných plochách kruhového průřezu o zvolené rozteči t_i pro $i = \langle x, y \rangle$. [10]



Obrázek 24 Kroková metoda měření přímosti podélného řezu



Obrázek 25 Přepočtené výškové souřadnice přímosti podélného řezu

Při měření relativních změn sklonu spojnice dvou sousedních bodů podélných nebo příčných řezů krokovou metodou se vypočítávají jejich relevantní rozdíly výškové polohy pro podélné $\Delta z_{P_{O_{ij}}}$ a pro příčné $\Delta z_{P_{\check{r}_{ij}}}$ podle následujícího přepočtu sklonu libely na měřenou rozteč. [10]

Aritmetický součet $\Delta z_{P_{O_{ij}}}$ nebo $\Delta z_{P_{\check{r}_{ij}}}$ od prvního nulového bodu zvoleného měřeného řezu udává absolutní výškové rozdíly dalších bodů $\Delta P_{O_{ij}}$ nebo $\Delta P_{\check{r}_{ij}}$ od zvolené základny pro měření, přičemž hodnota prvního bodu je rovna nule, dále platí že osa x je pro podélná a osa y pro příčná měření. [10]

$$\Delta P_{O_{ij}} = \sum_{j=2}^{n_{př}} \Delta z_{P_{O_{ij}}} \quad \text{pro } i = \langle 1; n_{po} \rangle \quad (5-1)$$

$$\Delta P_{ř_{ij}} = \sum_{j=2}^{n_{po}} \Delta z_{P_{ř_{ij}}} \quad \text{pro } i = \langle 1; n_{př} \rangle \quad (5-2)$$

kde

n_{po} počet příčných řezů

$n_{př}$ počet podélných řezů

$\Delta z_{P_{O_{ij}}}$ rozdíl výškové polohy podélného bodu

$\Delta z_{P_{ř_{ij}}}$ rozdíl výškové polohy příčného bodu

$\Delta P_{O_{ij}}$ absolutní výškový rozdíl od zvolené základny v podélném směru

$\Delta P_{ř_{ij}}$ absolutní výškový rozdíl od zvolené základny v příčném směru



Obrázek 26 Měření relativní výškové polohy na zvolené rozteči 100 mm

5.1.12 Přepočet sklonu libely na měřenou rozteč

Vyjadřujeme-li při měření elektronickou libelou jeden dílek na displeji sklonem v digit/metr, vypočítávají se relativní výškové rozdíly sousedních bodů zvoleného řezu ze vztahů (5-3), (5-4).

$$\Delta z_{po_{ij}} = dp_{o_{ij}} \cdot c \cdot t_x \quad \text{pro } i = \langle 1; n_{po} \rangle; j = \langle 2; n_{př} \rangle \quad (5-3)$$

$$\Delta z_{př_{ij}} = dp_{ř_{ij}} \cdot c \cdot t_y \quad \text{pro } i = \langle 1; n_{př} \rangle; j = \langle 2; n_{po} \rangle \quad (5-4)$$

kde

$\Delta z_{po_{ij}}$ rozdíl výškové polohy podélného bodu v [μm]

$\Delta z_{př_{ij}}$ rozdíl výškové polohy příčného bodu v [μm]

t_i rozteč měřicího můstku; pro $i = \langle x, y \rangle$ v [m]

d_{ij} počet dílků libely (sklon spojnice dvou sousedních bodů) v [digit/m]

c citlivost elektronické libely [$\mu\text{m}/\text{digit}$]

n_{po} počet příčných řezů

$n_{př}$ počet podélných řezů

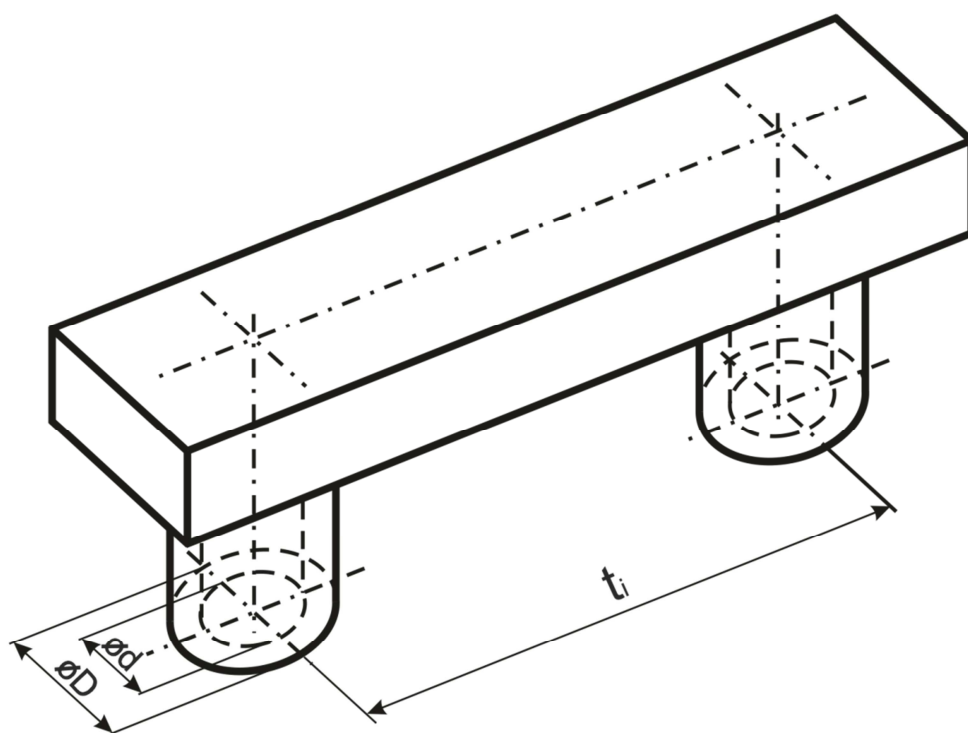
5.1.13 Měření přímostí podélných a příčných řezů

Postupně se měří přímosti jednotlivých rovnoběžných řezů v podélném a příčném směru dvoubodovým měřicím můstkem s připevněnou elektronickou libelou. Při měření úchylek přímosti soustavy rovnoběžných řezů (podélných nebo příčných) dvoubodovým měřicím můstkem s elektronickou libelou se nesmí měnit nastavení relativní nuly libely. Protože jsou v tomto případě základny pro měření úchylek přímosti soustavy rovnoběžných řezů vodorovné, nemusí se měřit úchytky přímosti úhlopříčných řezů měřené plochy.

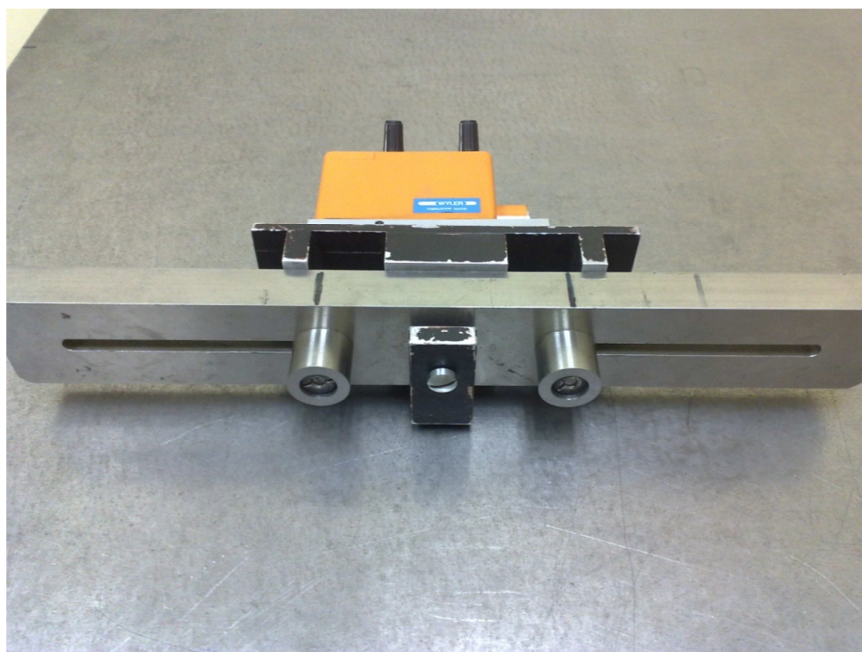
Měření úchylek přímosti dvoubodovým měřicím můstkem s libelou se začíná obvykle v jednom rohu zvolené sítě podélných a příčných řezů. U všech dalších rovnoběžných řezů se postupuje ve stejném směru. První bod každého řezu má tudíž nulovou hodnotu.

Velmi dobrá opakovatelnost výsledků měření se dosahuje měřicím můstkem s pevnými doteky, které mají kruhový tvar dosedacích ploch o průměru nejvýše 1/10 rozteče t_i daného směru. [9], [10]

Při měření týchž míst plochy v různých směrech dosedá u nich kruhová základna opěrných patek měřicího můstku na tutéž plochu se stejnými nerovnostmi povrchu. Kruhové doteky mají odlehčené středy (ve tvaru mezikružjí), které omezuje možné chyby měření vlivem ulpívání nečistot. [9]



Obrázek 27 Nastavitelný měřicí můstek s válcovými odlehčenými doteky



Obrázek 28 Sestava elektronické libely s měřicím nastavitelným můstkem pro 100 mm

5.1.14 Zázpis měřených hodnot výškových souřadnic

Změřené relativní rozdíly sklonu sousedních úseků se zapisují do tabulek v záznamu o kalibraci pro podélný a příčný směr samostatně. Pro zrychlení a zjednodušení měření se odčítá hodnota sklonu libely v jednotkách digit na metr. Přepočtené výškových souřadnic dle vzorců (5-3), (5-4) se provádí automaticky v kalibračním listu.

$$dpo_{ij} \text{ pro } i = \langle 1; n_{po} \rangle; j = \langle 2; n_{př} \rangle$$

n_{po}	0	$dpo_{n_{po};2}$	...	$dpo_{n_{po};j}$	...	$dpo_{n_{po};n_{př}}$
...	0	...	...	...	...	...
i	0	$dpo_{i;2}$	...	$dpo_{i;j}$	...	$dpo_{i;n_{př}}$
...	0	...	...	...	...	...
2	0	$dpo_{2;2}$	...	$dpo_{2;j}$	...	$dpo_{2;n_{př}}$
1	0	$dpo_{1;2}$	...	$dpo_{1;j}$	...	$dpo_{1;n_{př}}$
→ směr podélný	1	2	...	j	...	$n_{př}$

Tabulka 9 Měřené hodnoty relativních výšek sklonu dvou bodů v podélných řezech

$$dpř_{ij} \text{ pro } i = \langle 1; n_{př} \rangle; j = \langle 2; n_{po} \rangle$$

n_{po}	$dpř_{1;n_{po}}$	$dpř_{2;n_{po}}$	...	$dpř_{i;n_{po}}$	...	$dpř_{n_{př};n_{po}}$
...
j	$dpř_{1;j}$	$dpř_{2;j}$	...	$dpř_{i;j}$	...	$dpř_{n_{př};j}$
...
2	$dpř_{1;2}$	$dpř_{2;2}$	...	$dpř_{i;2}$	...	$dpř_{n_{př};2}$
1	0	0	0	0	0	0
↑ směr příčný	1	2	...	i	...	$n_{př}$

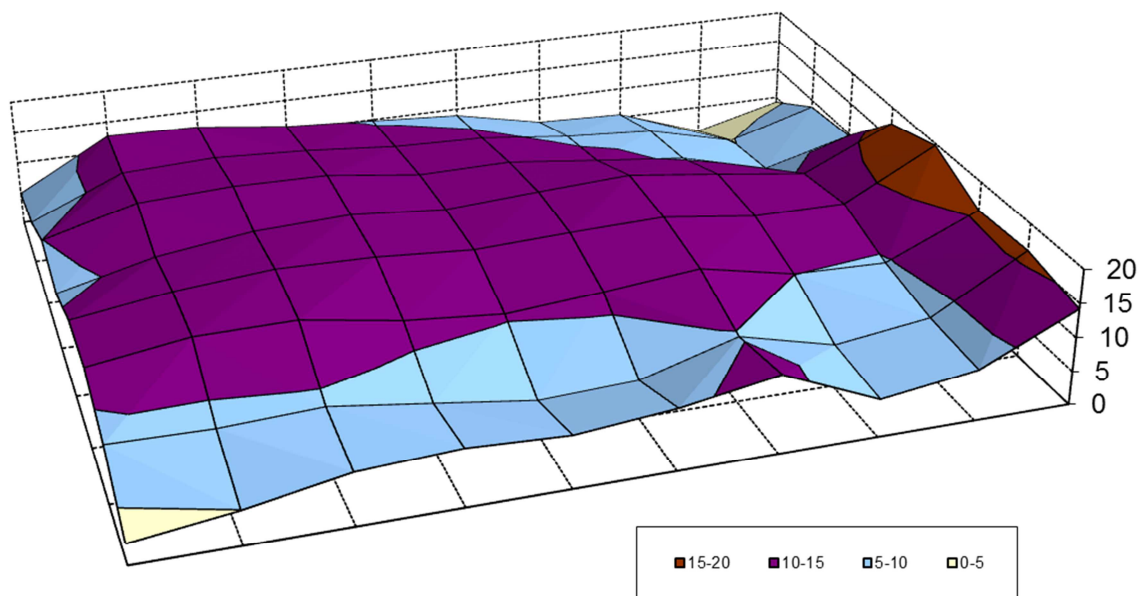
Tabulka 10 Měřené hodnoty relativních výšek sklonu dvou bodů v příčných řezech

5.1.15 Vyhodnocení průměrné desky

Hodnocení průměrné desky se provádí po změření všech podélných a příčných řezech. Obsluha překontroluje kalibrační list, zvolí matematické modely navázání všech podélných na vybrané příčné řezy a všech příčných na vybrané podélné řezy, z propočtených rovinností program automaticky vypočítá průměrnou hodnotu, rozšířenou nejistotu. Vybere data pro graf odchylek výsledného tvaru měřené průměrné desky a srovnáním s normou výrobce nalezne shodu s dovolenou hodnotou rovinnosti průměrné desky.

<input checked="" type="checkbox"/> 1. příčná	26,856	21,738	<input checked="" type="checkbox"/> 1. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 2. příčná	24,803	21,896	<input checked="" type="checkbox"/> 2. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 3. příčná	24,231	20,326	<input checked="" type="checkbox"/> 3. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 4. příčná	23,571	20,623	<input checked="" type="checkbox"/> 4. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 5. příčná	20,053	22,605	<input checked="" type="checkbox"/> 5. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 6. příčná	20,077	17,587	<input checked="" type="checkbox"/> 6. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 7. příčná	18,648	16,273	<input checked="" type="checkbox"/> 7. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 8. příčná	19,029	16,533	<input checked="" type="checkbox"/> 8. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 9. příčná	16,690		
<input checked="" type="checkbox"/> 10. příčná	20,672		

Obrázek 29 Výběr navázaný modelů měřené plochy



Obrázek 30 Výsledný tvar změřené plochy

5.1.16 Tabulka dovolených hodnot rovinností průměrných desek

Přesnost obrobených průměrných ploch je určena mezními úchytkami. Úchytky rovinnosti u průměrných ploch jsou určeny čtyřmi stupni přesnosti, označených od nejpřesnějšího k nejhrubšímu 0; I; II; III. Úchytky jsou stanoveny podle následujících vzorců pro třídy přesnosti dle ČSN 25 5502. Kde L je délka měřené plochy v milimetrech.

$$0 \quad u = 2 \cdot \left(0,0025 + \frac{L}{400\,000} \right) \quad (5-5)$$

$$I \quad u = 2 \cdot \left(0,005 + \frac{L}{200\,000} \right) \quad (5-6)$$

$$II \quad u = 2 \cdot \left(0,010 + \frac{L}{100\,000} \right) \quad (5-7)$$

$$III \quad u = 2 \cdot \left(0,020 + \frac{L}{50\,000} \right) \quad (5-8)$$

Délka plochy L v mm	Stupeň přesnosti průměrných ploch dle ČSN 25 5502			
	0 v μm	I v μm	II v μm	III v μm
200	6	12	24	48
300	6,5	13	26	52
400	7	14	28	56
500	7,5	15	30	60
600	8	16	32	64
630	8,15	16,3	32,6	65,2
800	9	18	36	72
1000	10	20	40	80
1200	11	22	44	88
1250	11,25	22,5	45	90
1500	12,5	25	50	100
2000	15	30	60	120
2500	17,5	35	70	140
3000	20	40	80	160
4000	25	50	100	200
5000	30	60	120	240

Tabulka 11 Velikost vybraných mezních úchytek rovinnost plochy

Pro desky vyrobené dle normy DIN 876 Teil 1 (granitová) a DIN 876 Teil 2 (litinová) platí následující výpočet úchylek rovinnosti. U granitových průměrných ploch platí čtyři stupně přesnosti, označených od nejpřesnějšího k nejhrubšímu 00; 0; I; II. Pro litinové se rozšiřuje o třídu přesnosti III.

$$00 \quad u = 2 \cdot \left(1 + \frac{L}{1\,000}\right) \quad (5-9)$$

$$0 \quad u = 4 \cdot \left(1 + \frac{L}{1\,000}\right) \quad (5-10)$$

$$I \quad u = 10 \cdot \left(1 + \frac{L}{1\,000}\right) \quad (5-11)$$

$$II \quad u = 20 \cdot \left(1 + \frac{L}{1\,000}\right) \quad (5-1)$$

$$III \quad u = 40 \cdot \left(1 + \frac{L}{1\,000}\right) \quad (5-13)$$

Délka plochy L v mm	Stupeň přesnosti průměrných ploch dle DIN 876 Teil 1, 2				Teil 2
	00 v μm	0 v μm	I v μm	II v μm	III v μm
200	2,4	4,8	12	24	48
300	2,6	5,2	13	26	52
400	2,8	5,6	14	28	56
500	3	6	15	30	60
600	3,2	6,4	16	32	64
630	3,26	6,52	16,3	32,6	65,2
800	3,6	7,2	18	36	72
1000	4	8	20	40	80
1200	4,4	8,8	22	44	88
1250	4,5	9	22,5	45	90
1500	5	10	25	50	100
2000	6	12	30	60	120
2500	7	14	35	70	140
3000	8	16	40	80	160
4000	10	20	50	100	200
5000	12	24	60	120	240

Tabulka 12 Velikost vybraných mezních úchylek rovinnost plochy

5.1.17 Výsledek kalibrace

Pro hodnocení rovinnosti průměrné desky je využíván kancelářský program MS Excel. Tato aplikace mi dovolila naprogramovat samočinné automatické výpočty, které pracují na pozadí. Obsluha během měření zadává hodnoty dílčích nerovností, indikované elektronickou libelou na měřicím můstku se zvolenou roztečí pevných měřicích doteků, do záznamu o kalibraci. Program z příčných a podélných řezů samočinně navazuje matematické modely, které hodnotí metodou střední roviny nejmenších čtverců. Z každého modelu vypočítává dílčí úchylku rovinnosti. Počet modelů je součtem počtu podélných a příčných řezů. Aplikace dokáže vyhodnotit rozšířenou nejistotu, která je ve shodě s dokumentem EA 4/02.

Nejistota kalibrace se počítá bilanční tabulkou, kdy jednotlivé dílčí složky nejistoty se sčítají goniometricky. Po vynásobení koeficientem rozšíření $k = 2$, pro pravděpodobnost 95%, získáme rozšířenou nejistota výsledku kalibrace uváděnou na kalibračním listu.

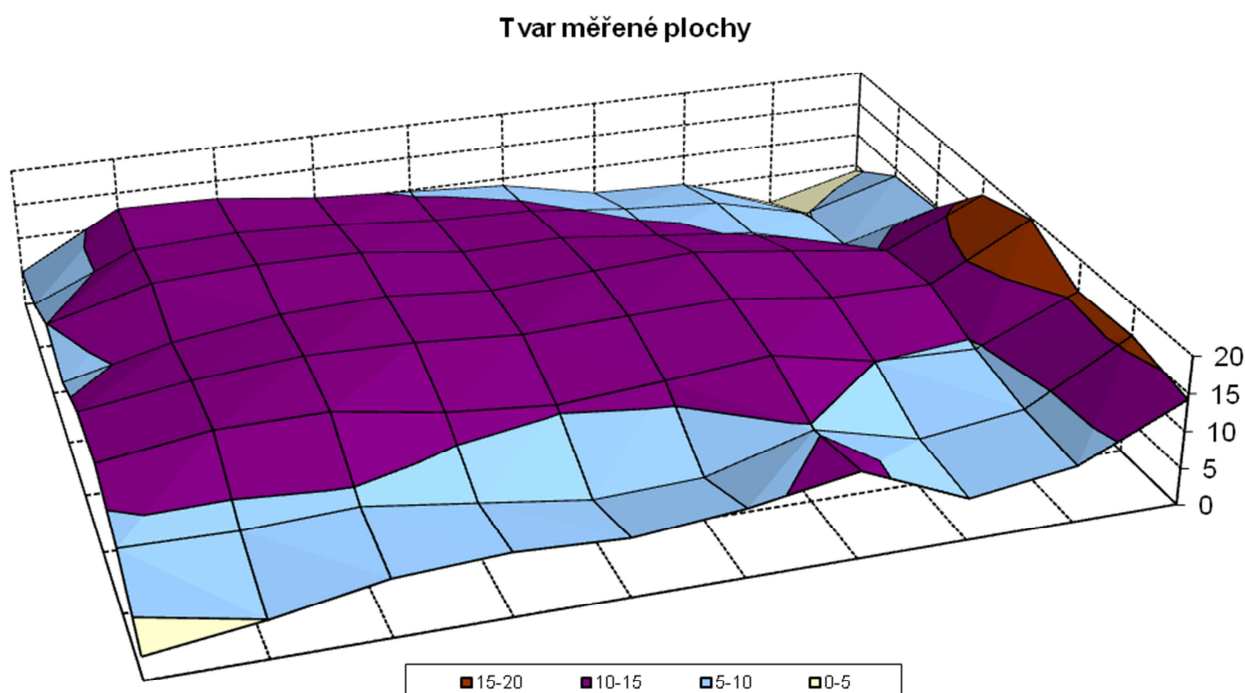
Zdroje nejistoty	Meze nejistot	Typ rozdělení	Dílčí nejistota	Koefic. citlivosti	Příspěvek k nejistotě
Chyba libely měřicí krok 0,1 m; 9 kroků	$\pm 5 \mu\text{m/m}$ $10 \mu\text{m/m}$ krok $1 \mu\text{m}$	normální $k = 2$	$0,5 \mu\text{m/m}$	9	$4,5 \mu\text{m}$
Naměřené rozdíly rovinností modelů	Nejistota typu A ze směrodatné odchylky	normální $k = 1$	$3 \mu\text{m}$	1	$3 \mu\text{m}$
Chyba z navázání max. rozdlů	Max. rozdl $9,3 \mu\text{m}$ výškové souřadnice	normální $k = 3$	$3,1 \mu\text{m}$	1	$3,1 \mu\text{m}$
Ostatní vlivy chvění, vychýlení bodu, vychýlení směru	Odhad $3 \mu\text{m}$	normální $k = 2$	$1,5 \mu\text{m}$	1	$1,5 \mu\text{m}$
Standardní nejistota kalibrace $u(y)$ pro $k = 1$ pro pravděpodobnost 68%					$6,42 \mu\text{m}$
Rozšířená nejistota kalibrace U pro $k = 2$ pro pravděpodobnost 95%					$12,9 \mu\text{m}$

Tabulka 13 Výpočet nejistoty měření u vzorové desky

Na kalibračním listu se uvádí tabulka výsledků porovnaných s dovolenými úchytkami rovinnosti průměrných desek dle předpisu výrobce společně s grafickým vyjádřením výškových nerovností měřené průměrné desky od referenční nulové roviny. Úplný kalibrační list i se záznamem o kalibraci je uveden v příloze č. 2 diplomové práce.

Měřený parametr	Tolerance podle ČSN 25 5502 pro třídu přesnosti II	Naměřená hodnota	Nejistota měření
Odchylka rovinnosti	20 μm	19,2 μm	$\pm 12,9 \mu\text{m}$

Tabulka 14 Výsledek kalibrace uvedený na kalibračním listu



Obrázek 31 Výsledný tvar změřené plochy

5.1.18 Validace kalibračního postupu

Kalibrační postup popisuje běžně ožívané laboratorní postupy, které vycházejí z norem. Vhodnost metod i použitých prostředků je doložena výpočtem nejistoty kalibrace. Kalibrační list s výpočtem rovinnosti průměrné desky byl kontrolován modelovými deskami konkávní a konvexní, pro úplnost byla také provedena zkouška na ideálně rovnou desku s vyhovujícím výsledkem. Pro akreditování metody je potřeba, aby se laboratoř účastnila mezilaboratorního porovnávání kalibrace průměrných desek s vyhovujícím výsledkem.

5.2 Metody vyhodnocování rovinnosti průměrných desek

Vyhodnocování úchylek rovinnosti průměrných desek z matematických modelů se provádí grafickou metodou převedením zjištěných úchylek měřených bodů k jedné zvolené společné rovině nebo metodou výpočtu odchylky rovinnosti metodou nejmenších čtverců. Typy jednotlivých metod jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

5.2.1 Vytváření matematických modelů plochy pro krokovou měřicí metodu

Jelikož při měření úchylek rovinnosti dvoubodovým měřicím můstkem s elektronickou libelou jsou výchozí základny pro měření úchylek přímosti soustav podélných a příčných řezů rovnoběžné, zjednodušuje se stanovení matematického modelu plochy na pouhé aritmetické sečtení naměřených absolutních rozdílů výšek polohy podélných bodů výškami prvního příčného řezu. [9] Sečtením získáme matematický model plochy s úchytkami rovinnosti obecně uloženou v systému souřadnic x, y, z . Za základní rovinu matematického modelu se zvolí základna nulové přímky jednoho podélného a jednoho příčného řezu plochy, které vycházejí z jednoho bodu který je zároveň počátkem měření první podélné a první příčné.

n_{po}	$\Delta P\check{r}_{1;n_{po}}$	n_{po}	0	$\Delta P o_{n_{po};2}$	...	$\Delta P o_{n_{po};j}$	...	$\Delta P o_{n_{po};n_{p\check{r}}}$
...		...	0	...	...	...	...	...
j	$\Delta P\check{r}_{1;j}$	i	0	$\Delta P o_{i;2}$	...	$\Delta P o_{i;j}$	...	$\Delta P o_{i;n_{p\check{r}}}$
...		...	0	...	...	...	...	...
2	$\Delta P\check{r}_{1;2}$	2	0	$\Delta P o_{2;2}$	...	$\Delta P o_{2;j}$	...	$\Delta P o_{2;n_{p\check{r}}}$
1	0	1	0	$\Delta P o_{1;2}$	...	$\Delta P o_{1;j}$	...	$\Delta P o_{1;n_{p\check{r}}}$
↑	1	→	1	2	...	j	...	$n_{p\check{r}}$

Tabulka 15 Matice sčítání podélných řezů na první příčný řez

$$\Delta P\check{r}_{ij} \text{ pro } i = \langle 1; n_{p\check{r}} \rangle; j = \langle 2; n_{po} \rangle$$

$$\Delta P o_{ij} \text{ pro } i = \langle 1; n_{po} \rangle; j = \langle 2; n_{p\check{r}} \rangle$$

Obdobným součtem navážeme všechny podélné na ostatní příčné, kdy počítáme počátek měření. Postup aplikujeme obráceně pro vytvoření modelů kdy navazujeme příčné na podélné řezy. Následně uvádím navazování jednotlivých řezů pro vytváření modelů výškových souřadnic z_i .

n_{po}	$\Delta P\check{r}_{i,n_{po}}$	n_{po}	$-\Delta P o'_{n_{po};2}$	...	$-\Delta P o'_{n_{po};j}$	0	...	$\Delta P o_{n_{po};n_{p\check{r}}}$
...	...	...	...	...	...	0	...	...
j	$\Delta P\check{r}_{i;j}$	i	$-\Delta P o'_{i;2}$	...	$-\Delta P o'_{i;j}$	0	...	$\Delta P o_{i;n_{p\check{r}}}$
...	...	...	...	...	...	0	...	...
2	$\Delta P\check{r}_{i;2}$	2	$-\Delta P o'_{2;2}$	...	$-\Delta P o'_{2;j}$	0	...	$\Delta P o_{2;n_{p\check{r}}}$
1	0	1	$-\Delta P o'_{1;2}$	...	$-\Delta P o'_{1;j}$	0	...	$\Delta P o_{1;n_{p\check{r}}}$
↑	i	→	1	...	$j-1$	j	...	$n_{p\check{r}}$

Tabulka 16 Matice sčítání podélných řezů na i-tý příčný řez

$$\Delta P\check{r}_{ij} \text{ pro } i = \langle 1; n_{p\check{r}} \rangle; j = \langle 2; n_{po} \rangle$$

$$\Delta P o_{ij} \text{ pro } i = \langle 1; n_{po} \rangle; j = \langle 2; n_{p\check{r}} \rangle$$

n_{po}	$\Delta P\check{r}_{1,n_{po}}$	$\Delta P\check{r}_{2,n_{po}}$	...	$\Delta P\check{r}_{i,n_{po}}$	...	$\Delta P\check{r}_{n_{p\check{r}},n_{po}}$
...
j	$\Delta P\check{r}_{1;j}$	$\Delta P\check{r}_{2;j}$	...	$\Delta P\check{r}_{i;j}$	...	$\Delta P\check{r}_{n_{p\check{r}};j}$
...
2	$\Delta P\check{r}_{1;2}$	$\Delta P\check{r}_{2;2}$	...	$\Delta P\check{r}_{i;2}$	...	$\Delta P\check{r}_{n_{p\check{r}};2}$
1	0	0	0	0	0	0
↑	1	2	...	i	...	$n_{p\check{r}}$

1	0	$\Delta P o_{1;2}$	...	$\Delta P o_{1;j}$	...	$\Delta P o_{1;n_{p\check{r}}}$
→	1	2	...	j	...	$n_{p\check{r}}$

Tabulka 17 Matice sčítání příčných řezů na první podélný řez

$$\Delta P o_{ij} \text{ pro } i = \langle 1; n_{po} \rangle; j = \langle 2; n_{p\check{r}} \rangle$$

$$\Delta P\check{r}_{ij} \text{ pro } i = \langle 1; n_{p\check{r}} \rangle; j = \langle 2; n_{po} \rangle$$

n_{po}	$\Delta P\check{r}'_{1;n_{po}}$	$\Delta P\check{r}'_{2;n_{po}}$	...	$\Delta P\check{r}'_{i;n_{po}}$	...	$\Delta P\check{r}'_{n_{p\check{r}};n_{po}}$
...	
j	0	0	0	0	0	0
j-1	$-\Delta P\check{r}'_{1;j}$	$-\Delta P\check{r}'_{2;j}$	...	$-\Delta P\check{r}'_{i;j}$	...	$-\Delta P\check{r}'_{n_{p\check{r}};j}$
...
1	$-\Delta P\check{r}'_{1;2}$	$-\Delta P\check{r}'_{2;2}$	...	$-\Delta P\check{r}'_{i;2}$	...	$-\Delta P\check{r}'_{n_{p\check{r}};2}$
\uparrow	1	2	...	i	...	$n_{p\check{r}}$

i	0	$\Delta P o_{i;2}$	...	$\Delta P o_{i;j}$	...	$\Delta P o_{i;n_{p\check{r}}}$
\rightarrow	1	2	...	j	...	$n_{p\check{r}}$

Tabulka 18 Matice sčítání příčných řezů na i-tý podélný řez

$$\Delta P o_{ij} \text{ pro } i = \langle 1; n_{po} \rangle; j = \langle 2; n_{p\check{r}} \rangle$$

$$\Delta P\check{r}_{ij} \text{ pro } i = \langle 1; n_{p\check{r}} \rangle; j = \langle 2; n_{po} \rangle$$

1. příčná

4 Po.	+9
3 Po.	+5
2 Po.	+3
1 Po.	0
$\uparrow \mu\text{m}$	1 Př.

Všechny podélné

4 Po.	0	-4	+5	0	5
3 Po.	0	-1	-2	+7	-1
2 Po.	0	-5	+0	-2	-5
1 Po.	0	+5	+4	-4	+5
$\rightarrow \mu\text{m}$	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.

Navázání podélných na první příčný řez, hodnoty v μm

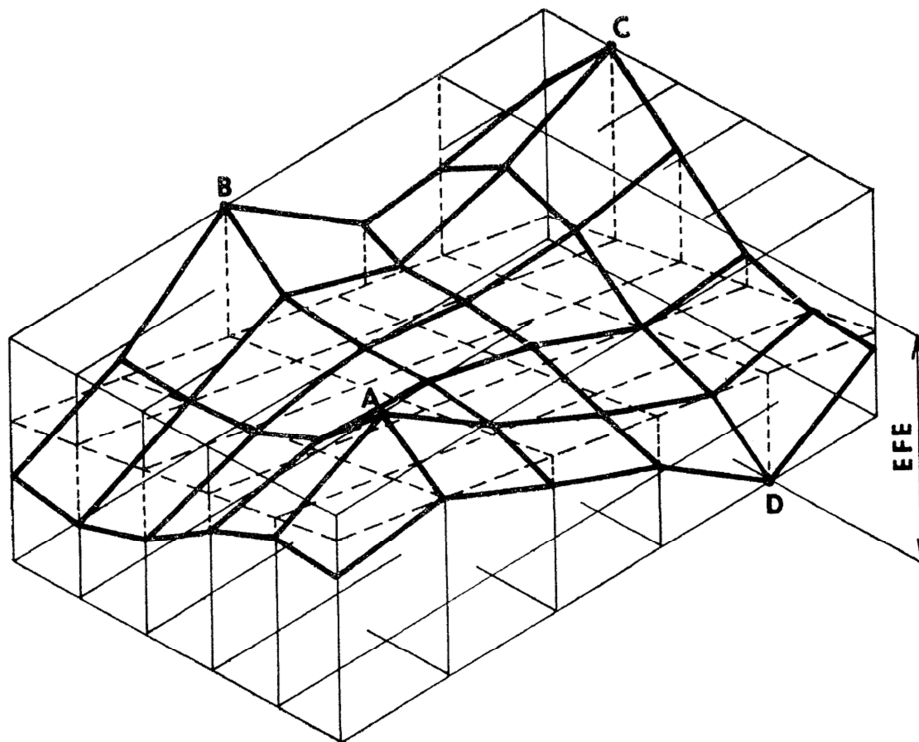
4 Po.	+9	+5	+14	+9	+14
3 Po.	+5	+4	+3	+12	+4
2 Po.	+3	-2	+3	+1	-2
1 Po.	0	+5	+4	-4	+5
$\uparrow \rightarrow$	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.

Tabulka 19 Příklad navázání všech podélných na první příčný řez

5.2.2 Grafické metody vyhodnocování rovinnosti

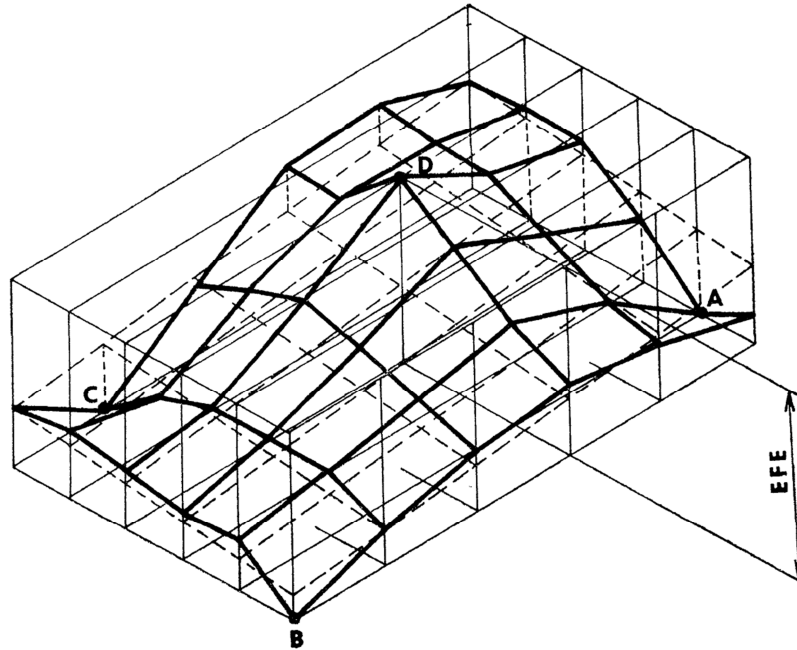
Pokud není výsledkem měření matematický model plochy, musí se zjištěné úchytky měřených bodů převést k jedné zvolené společné rovině. Obalová rovina se dotýká skutečného reliéfu zjištěné plochy, která leží vně materiálu tak, aby vzdálenost nejnižšího bodu zjištěné plochy měla v rozsahu měřeného úseku plochy nejmenší hodnotu. Této podmínce odpovídá vždy jen jeden z následujících tří možných případů [9]:

- obalová rovina se dotýká zjištěného reliéfu plochy ve třech nejvyšších bodech A, B, C a má vydutý (konkávní) tvar plochy [9];



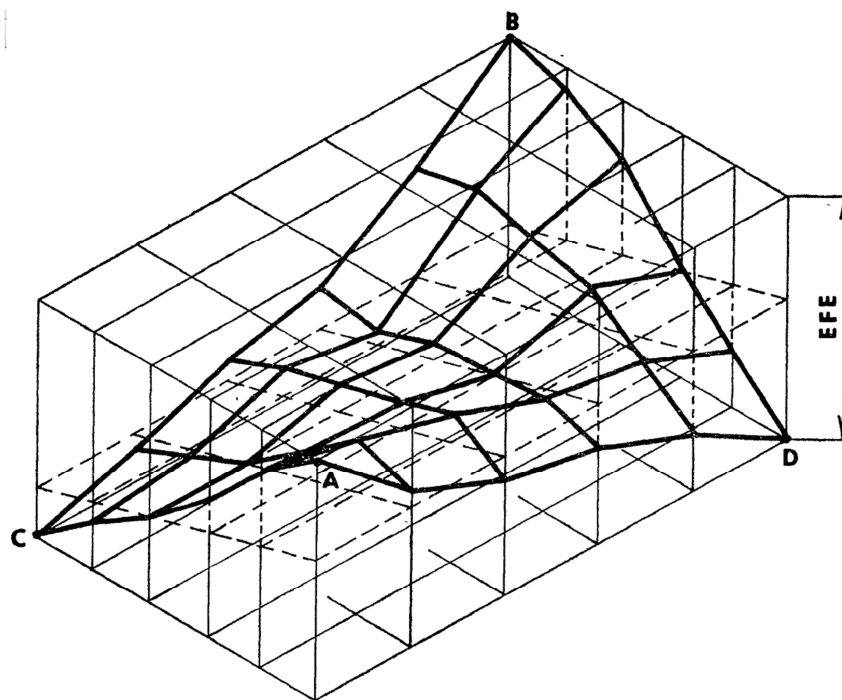
Obrázek 32 Vydutý (konkávní) tvar plochy

- obalová rovina se dotýká zjištěného reliéfu plochy v jednom nejvyšším bodu D a je rovnoběžná s rovinou procházející třemi nejnižšími body A, B, C zjištěného reliéfu plochy a má vypuklý (konvexní) tvar plochy [9];



Obrázek 33 Vypuklý (konvexní) tvar plochy

- obalová rovina se dotýká zjištěného reliéfu plochy ve dvou nejvyšších bodech A, B a je rovnoběžná se spojnici dvou nejnižších bodů C, D a má sedlový tvar plochy. [9]

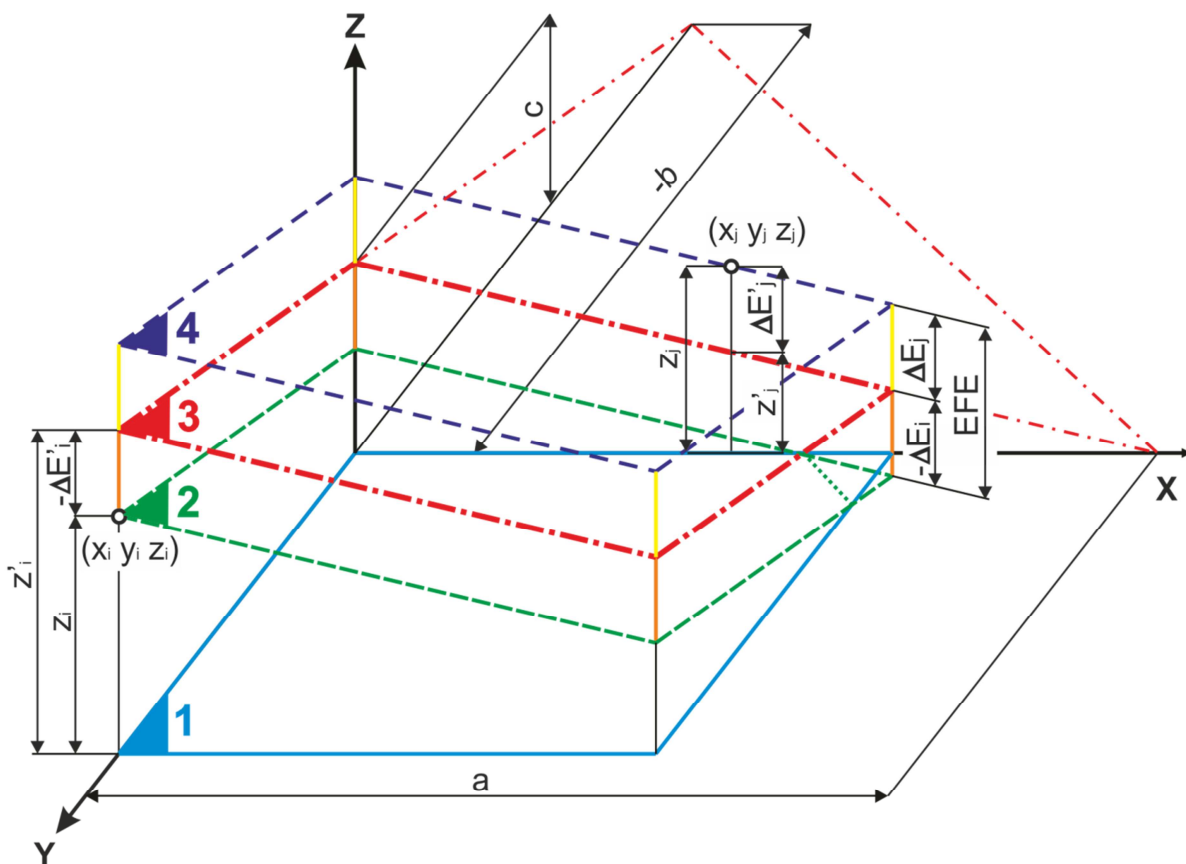


Obrázek 34 Sedlový tvar plochy

5.2.3 Systém vyhodnocení rovinnosti desky metodou střední roviny

Počet získaných matematických modelů je součet počtu podélných společně s příčnými. Například u nejběžnější průměrné desky 1000x800 mm získáme počet matematických modelů ploch n_{mod} součtem počtu podélných řezů $n_{po} = 8$ a počtem příčných řezů $n_{př} = 10$, viz. tabulka č. 8. Celkem tedy získáme $n_{mod} = 18$ modelů.

Všechny matematické modely se řeší samostatně metodou stanovení úchylek rovinnosti od střední roviny. Odchylka rovinnosti matematického modelu měřené průměrné desky je absolutní součet kolmé vzdálenosti nejvyššího a nejnižšího bodu modelu od střední roviny (nejvyšší kladná a nejnižší záporná).



Obrázek 35 Vyhodnocování odchylky rovinnosti od střední roviny

- 1 základní rovina (X-Y) matematického modelu
- 2 dolní tečná rovina množiny bodů změřené plochy navázaného modelu
- 3 střední rovina množiny bodů změřené plochy navázaného modelu
- 4 horní tečná rovina množiny bodů změřené plochy navázaného modelu
- $x_i; y_i; z_i$ souřadnice změřených bodů od základní roviny (1), tj. hodnoty matematického modelu plochy
- z'_i pořadnice bodů střední roviny od základní roviny (1)

- $a; b; c$ úseky průsečíků střední roviny s osami $X; Y; Z$ souřadného systému matematického modelu
 $\Delta E'_i$ úchylky rovinnosti změřených bodů plochy od střední roviny
 ΔE úchylka rovinnosti obalové roviny od střední roviny
 EFE úchylka rovinnosti změřené plochy matematického modelu

Základem pro výpočet úchylek rovinnosti změřené plochy je matematický model plochy, tj. tabulka souřadnic změřených bodů plochy x_i, y_i, z_i kde $i = \langle 1; n_{mod} \rangle$.

Obecná rovnice roviny

$$a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z + d = 0 \quad (5-14)$$

Pořadnice z bodů roviny od základní roviny

$$z = -\frac{a}{c} \cdot x - \frac{b}{c} \cdot y - \frac{d}{c} \quad (5-15)$$

Pro substituci

$$A = -\frac{a}{c} \quad B = -\frac{b}{c} \quad C = -\frac{d}{c}$$

Po substituci

$$z = A \cdot x + B \cdot y + C \quad (5-16)$$

Pořadnice z'_i bodů střední roviny od základní roviny matematického modelu plochy X, Y stanovené ve směru osy Z :

$$z'_i = A \cdot x_i + B \cdot y_i + C \quad (5-17)$$

Úchylka rovinnosti EFE změřených bodů matematického modelu plochy od střední roviny:

$$\Delta E'_i = z_i - z'_i \quad (5-18)$$

Podle definice střední roviny musí součet čtverců vzdálenosti bodů změřené plochy od střední roviny splňovat podmínky rovnice (5-18).

$$\sum_{i=1}^n (z_i - z'_i)^2 = \sum_{i=1}^n [z_i - (A \cdot x_i + B \cdot y_i + C)]^2 = \min = 0 \quad (5-19)$$

Derivací rovnice (5-19) se získá soustava rovnic (5-20), (5-21) a (5-22)

$$\sum_{i=1}^n [z_i - (A \cdot x_i + B \cdot y_i + C)] \cdot x_i = 0 \quad (5-20)$$

$$\sum_{i=1}^n [z_i - (A \cdot x_i + B \cdot y_i + C)] \cdot y_i = 0 \quad (5-21)$$

$$\sum_{i=1}^n [z_i - (A \cdot x_i + B \cdot y_i + C)] \cdot 1 = 0 \quad (5-22)$$

Úpravou rovnic (5-20), (5-21) a (5-22) se získá soustava rovnic (5-23), (5-24), (5-25) pro výpočet konstant (A), (B), (C) z rovnice (5-17) střední roviny.

$$\sum_{i=1}^n z_i \cdot x_i = A \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 + B \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i + C \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (5-23)$$

$$\sum_{i=1}^n z_i \cdot y_i = A \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i + B \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 + C \cdot \sum_{i=1}^n y_i \quad (5-24)$$

$$\sum_{i=1}^n z_i = A \cdot \sum_{i=1}^n x_i + B \cdot \sum_{i=1}^n y_i + C \cdot n \quad (5-25)$$

Soustavy rovnic (5-23), (5-24) a (5-25) lze řešit maticovým počtem determinanty následujícím postupem.

Determinant soustavy (D):

$$D = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{vmatrix} \quad (5-26)$$

Subdeterminanty:

Subdeterminant D_A

$$D_A = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n z_i \cdot x_i & \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n z_i \cdot y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n z_i & \sum_{i=1}^n y_i & n \end{vmatrix} \quad (5-27)$$

Subdeterminant D_B

$$D_B = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n z_i \cdot x_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i & \sum_{i=1}^n z_i \cdot y_i & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n z_i & n \end{vmatrix} \quad (5-28)$$

Subdeterminant D_C

$$D_C = \begin{vmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i & \sum_{i=1}^n z_i \cdot x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n z_i \cdot y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n z_i \end{vmatrix} \quad (5-29)$$

Výpočet konstant (A), (B) a (C) pro rovnici (5-17) se určí z rovnic (5-30), (5-31) a (5-32)

$$A = \frac{D_A}{D} \quad (5-30)$$

$$B = \frac{D_B}{D} \quad (5-31)$$

$$C = \frac{D_C}{D} \quad (5-32)$$

Úchylka rovinnosti měřené plochy (*EFE*) je od střední roviny stanovena ve směru osy Z souřadného systému matematického modelu. Je součtem absolutních hodnot největší kladné úchylky a největší záporné úchylky.

$$EFE = |\Delta E'_{j_{max}}| + |\Delta E'_{i_{min}}| \quad (5-33)$$

5.2.4 Validace metody vyhodnocení rovinnosti od střední roviny modelovými deskami

Validaci můžeme definovat jako proceduru, jejímž cílem je demonstrovat a dokumentovat kvalitu analytické metody ustanovením definovaných kritérií a měřením hodnot těchto kritérií. Validace je zjednodušeně řečeno ověření platnosti zvoleného analytického postupu (metody). Vlastnost, která je předmětem validace se nazývá validovaná. Validace se používá vždy při validaci nové metody, při převodu (transferu) validované, při kontrole způsobilosti systému a při revalidaci metody, kdy podmínky revalidace jsou striktně stanoveny.

Validace metody tedy slouží k prokázání spolehlivosti analytické metody včetně celého obslužného analytického systému (proces určení vhodnosti měření a získávání dat v celém analytickém systému), kdy proces získávání a zpracování experimentálních dat má významný vliv na konečný analytický výsledek.

Pro kontrolu programu jsem zvolil následující vstupní hodnoty vybraných typů průměrných desek ideálně rovná, konkávní, konvexní. Deska je ideálně rovná, když jsou jednotlivé podélné a příčné řezy jsou ideálně rovné. Pro ideální konvexní tvar průměrné desky platí, že musí být všechny řezy ideálně konkávní. Posledním tvarem modelové desky je tvar konkávní. I zde platí, že musí být všechny řezy konkávní.

Pro znázornění uvádím pouze tabulku vstupních hodnot ideálně změřených bodů z jednotlivých řezů v jednotkách [digit/m]. Tyto hodnoty se odčítají z elektronické libely, a program si sám již přepočítá výšku na mikrometry. Matice navázaných podélných řezů na 1. příčný řez. Výsledný tvar změřené plochy s vypočtenou úchylnou rovinnosti. Výsledek s vyčíslenou nejistotou.

Ideálně rovná – jednotková plocha

700	8 Po.	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
600	7 Po.	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
500	6 Po.	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
400	5 Po.	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
300	4 Po.	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
200	3 Po.	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100	2 Po.	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1 Po.	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
y	digit	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 20 Ideální hodnoty rovných podélných řezů

700	8 Po.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
600	7 Po.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
500	6 Po.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
400	5 Po.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
300	4 Po.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
200	3 Po.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100	2 Po.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1 Po.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y	digit	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 21 Ideální hodnoty rovných příčných řezů

700	8 Po.	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0
600	7 Po.	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5
500	6 Po.	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
400	5 Po.	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
300	4 Po.	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0
200	3 Po.	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
100	2 Po.	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
0	1 Po.	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
y	v μm	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 22 Vstupní matice hodnot 1. navázané ideálně rovné plochy

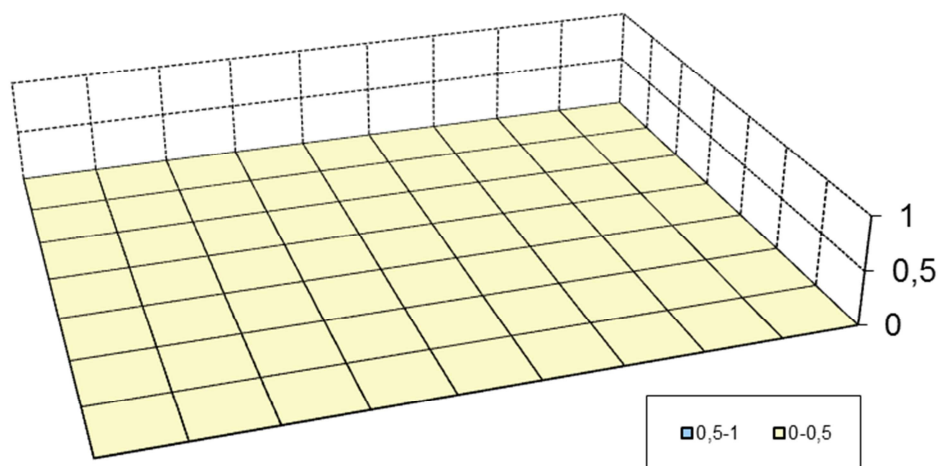
700	8 Po.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
600	7 Po.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
500	6 Po.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
400	5 Po.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
300	4 Po.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	3 Po.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	2 Po.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1 Po.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y	v μm	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 23 Matice vypočtených úchylek rovinnosti od střední roviny

Maximální odchylka	Minimální odchylka	Odchylka rovinnosti
0,00	0,00	0,00 μm

Výsledek kalibrace

Měřený parametr	Tolerance podle DIN 876 pro třídu přesnosti 00	Naměřená hodnota	Nejistota měření
Odchylka rovinnosti	2 μm	0,0 μm	$\pm 9,1 \mu\text{m}$



Obrázek 36 Graf výšek ideálně rovné modelové desky

Hodnoty všech matematických modelů z navázaných příčných a podélných řezů.

<input checked="" type="checkbox"/> 1. příčná	0,000	0,000	<input checked="" type="checkbox"/> 1. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 2. příčná	0,000	0,000	<input checked="" type="checkbox"/> 2. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 3. příčná	0,000	0,000	<input checked="" type="checkbox"/> 3. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 4. příčná	0,000	0,000	<input checked="" type="checkbox"/> 4. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 5. příčná	0,000	0,000	<input checked="" type="checkbox"/> 5. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 6. příčná	0,000	0,000	<input checked="" type="checkbox"/> 6. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 7. příčná	0,000	0,000	<input checked="" type="checkbox"/> 7. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 8. příčná	0,000	0,000	<input checked="" type="checkbox"/> 8. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 9. příčná	0,000		
<input checked="" type="checkbox"/> 10. příčná	0,000		

Zdroje nejistoty	Meze nejistot	Typ rozdělení	Dílčí nejistota	Koefic. citlivosti	Příspěvek k nejistotě
Chyba libely měřicí krok 0,1 m; 9 kroků	±5 μm/m 10 μm/m krok 1 μm	normální k = 2	0,5 μm/m	9	4,5 μm
Naměřené rozdíly rovinností modelů	Nejistota typu A ze směrodatné odchylky	normální k = 1	0 μm	1	0 μm
Chyba z navázání max. rozdílu	Max. rozdíl výškové souřadnice 0 μm	normální k = 3	0 μm	1	0 μm
Ostatní vlivy chvění, vychýlení bodu, vychýlení směru	Odhad 1 μm	normální k = 2	0,5 μm	1	0,5 μm
Standardní nejistota kalibrace $u(y)$ pro k = 1 pro pravděpodobnost 68%					4,53 μm
Rozšířená nejistota kalibrace U pro k = 2 pro pravděpodobnost 95%					9,1 μm

Tabulka 24 Výpočet nejistoty pro ideálně rovnou plochu

Ideálně konvexní plocha

700	8 Po.	0	8	4	0	-4	-8	-12	-16	-20	-24
600	7 Po.	0	8	4	0	-4	-8	-12	-16	-20	-24
500	6 Po.	0	8	4	0	-4	-8	-12	-16	-20	-24
400	5 Po.	0	8	4	0	-4	-8	-12	-16	-20	-24
300	4 Po.	0	8	4	0	-4	-8	-12	-16	-20	-24
200	3 Po.	0	8	4	0	-4	-8	-12	-16	-20	-24
100	2 Po.	0	8	4	0	-4	-8	-12	-16	-20	-24
0	1 Po.	0	8	4	0	-4	-8	-12	-16	-20	-24
y	digit	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 25 Ideální hodnoty konvexních podélných řezů

700	8 Po.	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16	-16
600	7 Po.	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12	-12
500	6 Po.	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8	-8
400	5 Po.	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4	-4
300	4 Po.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	3 Po.	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
100	2 Po.	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
0	1 Po.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y	digit	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 26 Ideální hodnoty konvexních příčných řezů

700	8 Po.	-14,0	-10,0	-8,0	-8,0	-10,0	-14,0	-20,0	-28,0	-38,0	-50,0
600	7 Po.	-6,0	-2,0	0,0	0,0	-2,0	-6,0	-12,0	-20,0	-30,0	-42,0
500	6 Po.	0,0	4,0	6,0	6,0	4,0	0,0	-6,0	-14,0	-24,0	-36,0
400	5 Po.	4,0	8,0	10,0	10,0	8,0	4,0	-2,0	-10,0	-20,0	-32,0
300	4 Po.	6,0	10,0	12,0	12,0	10,0	6,0	0,0	-8,0	-18,0	-30,0
200	3 Po.	6,0	10,0	12,0	12,0	10,0	6,0	0,0	-8,0	-18,0	-30,0
100	2 Po.	4,0	8,0	10,0	10,0	8,0	4,0	-2,0	-10,0	-20,0	-32,0
0	1 Po.	0,0	4,0	6,0	6,0	4,0	0,0	-6,0	-14,0	-24,0	-36,0
y	v μm	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 27 Vstupní matice hodnot 1. navázané ideálně konvexní plochy

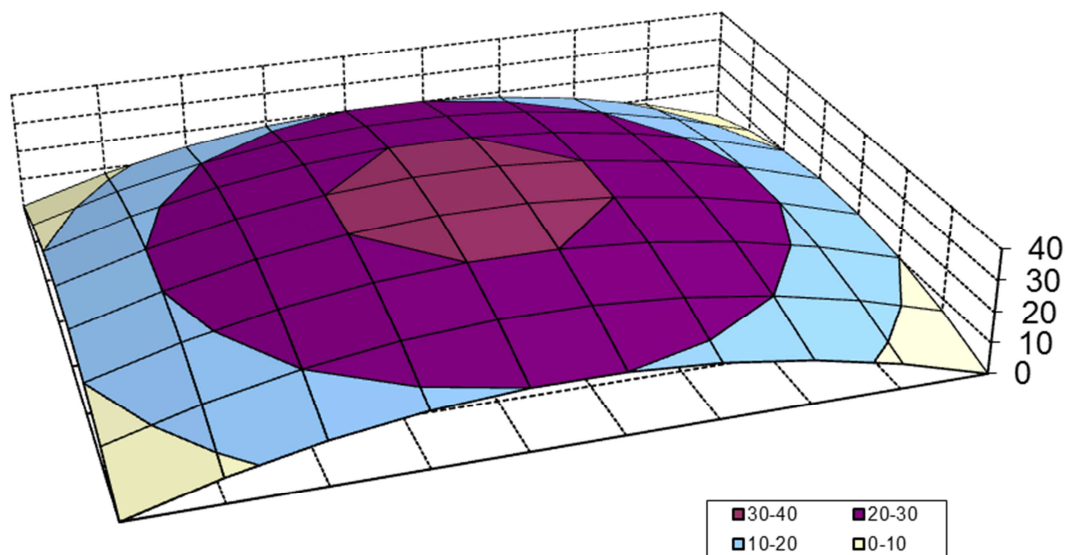
700	8 Po.	-19,0	-11,0	-5,0	-1,0	1,0	1,0	-1,0	-5,0	-11,0	-19,0
600	7 Po.	-13,0	-5,0	1,0	5,0	7,0	7,0	5,0	1,0	-5,0	-13,0
500	6 Po.	-9,0	-1,0	5,0	9,0	11,0	11,0	9,0	5,0	-1,0	-9,0
400	5 Po.	-7,0	1,0	7,0	11,0	13,0	13,0	11,0	7,0	1,0	-7,0
300	4 Po.	-7,0	1,0	7,0	11,0	13,0	13,0	11,0	7,0	1,0	-7,0
200	3 Po.	-9,0	-1,0	5,0	9,0	11,0	11,0	9,0	5,0	-1,0	-9,0
100	2 Po.	-13,0	-5,0	1,0	5,0	7,0	7,0	5,0	1,0	-5,0	-13,0
0	1 Po.	-19,0	-11,0	-5,0	-1,0	1,0	1,0	-1,0	-5,0	-11,0	-19,0
y	v μm	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 28 Matice vypočtených úchylek rovinnosti od střední roviny

Maximální odchylka	Minimální odchylka	Odchylka rovinnosti
13,00	-19,00	32,00 μm

Výsledek kalibrace

Měřený parametr	Tolerance podle ČSN 25 5502 pro třídu přesnosti III	Naměřená hodnota	Nejistota měření
Odchylka rovinnosti	40 μm	32,0 μm	$\pm 9,1 \mu\text{m}$



Obrázek 37 Graf výšek modelové konvexní desky

Hodnoty všech matematických modelů z navázaných příčných a podélných řezů.

<input checked="" type="checkbox"/> 1. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 1. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 2. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 2. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 3. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 3. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 4. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 4. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 5. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 5. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 6. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 6. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 7. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 7. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 8. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 8. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 9. příčná	32,000		
<input checked="" type="checkbox"/> 10. příčná	32,000		

Zdroje nejistoty	Meze nejistot	Typ rozdělení	Dílčí nejistota	Koefic. citlivosti	Příspěvek k nejistotě
Chyba libely měřicí krok 0,1 m; 9 kroků	±5 μm/m 10 μm/m krok 1 μm	normální k = 2	0,5 μm/m	9	4,5 μm
Naměřené rozdíly rovinností modelů	Nejistota typu A ze směrodatné odchylky	normální k = 1	0 μm	1	0 μm
Chyba z navázání max. rozdílu	Max. rozdíl výškové souřadnice 0 μm	normální k = 3	0 μm	1	0 μm
Ostatní vlivy chvění, vychýlení bodu, vychýlení směru	Odhad 1 μm	normální k = 2	0,5 μm	1	0,5 μm
Standardní nejistota kalibrace $u(y)$ pro k = 1 pro pravděpodobnost 68%					4,53 μm
Rozšířená nejistota kalibrace U pro k = 2 pro pravděpodobnost 95%					9,1 μm

Tabulka 29 Výpočet nejistoty pro ideální konvexní plochu

Ideálně konkávní plocha

700	8 Po.	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
600	7 Po.	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
500	6 Po.	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
400	5 Po.	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
300	4 Po.	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
200	3 Po.	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
100	2 Po.	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
0	1 Po.	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36
y	digit	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 30 Ideální hodnoty konkávních podélných řezů

700	8 Po.	28	28	28	28	28	28	28	28	28	28
600	7 Po.	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
500	6 Po.	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
400	5 Po.	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
300	4 Po.	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
200	3 Po.	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
100	2 Po.	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
0	1 Po.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y	digit	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 31 Ideální hodnoty konkávních příčných řezů

700	8 Po.	56,0	58,0	62,0	68,0	76,0	86,0	98,0	112,0	128,0	146,0
600	7 Po.	42,0	44,0	48,0	54,0	62,0	72,0	84,0	98,0	114,0	132,0
500	6 Po.	30,0	32,0	36,0	42,0	50,0	60,0	72,0	86,0	102,0	120,0
400	5 Po.	20,0	22,0	26,0	32,0	40,0	50,0	62,0	76,0	92,0	110,0
300	4 Po.	12,0	14,0	18,0	24,0	32,0	42,0	54,0	68,0	84,0	102,0
200	3 Po.	6,0	8,0	12,0	18,0	26,0	36,0	48,0	62,0	78,0	96,0
100	2 Po.	2,0	4,0	8,0	14,0	22,0	32,0	44,0	58,0	74,0	92,0
0	1 Po.	0,0	2,0	6,0	12,0	20,0	30,0	42,0	56,0	72,0	90,0
y	v μm	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 32 Vstupní matice hodnot 1. navázané ideální konkávní plochy

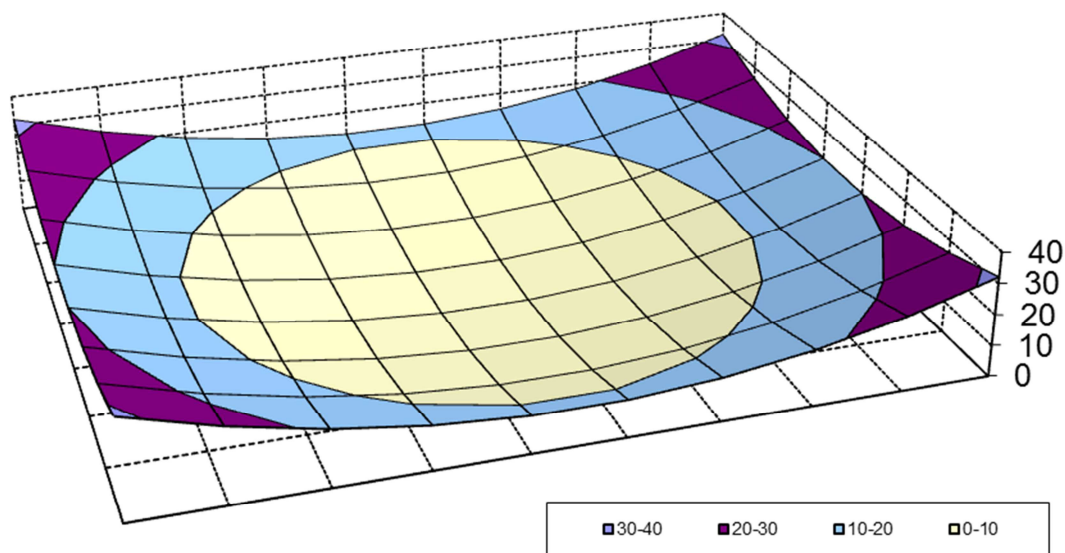
700	8 Po.	19,0	11,0	5,0	1,0	-1,0	-1,0	1,0	5,0	11,0	19,0
600	7 Po.	13,0	5,0	-1,0	-5,0	-7,0	-7,0	-5,0	-1,0	5,0	13,0
500	6 Po.	9,0	1,0	-5,0	-9,0	-11,0	-11,0	-9,0	-5,0	1,0	9,0
400	5 Po.	7,0	-1,0	-7,0	-11,0	-13,0	-13,0	-11,0	-7,0	-1,0	7,0
300	4 Po.	7,0	-1,0	-7,0	-11,0	-13,0	-13,0	-11,0	-7,0	-1,0	7,0
200	3 Po.	9,0	1,0	-5,0	-9,0	-11,0	-11,0	-9,0	-5,0	1,0	9,0
100	2 Po.	13,0	5,0	-1,0	-5,0	-7,0	-7,0	-5,0	-1,0	5,0	13,0
0	1 Po.	19,0	11,0	5,0	1,0	-1,0	-1,0	1,0	5,0	11,0	19,0
y	v μm	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 33 Matice vypočtených úchylek rovinnosti od střední roviny

Maximální odchyłka	Minimální odchyłka	Odchyłka rovinnosti
19,00	-13,00	32,00 μm

Výsledek kalibrace

Měřený parametr	Tolerance podle ČSN 25 5502 pro třídu přesnosti III	Naměřená hodnota	Nejistota měření
Odchyłka rovinnosti	40 μm	32,0 μm	± 9,1 μm



Obrázek 38 Graf výšek modelové konkávní desky

Hodnoty všech matematických modelů z navázaných příčných a podélných řezů.

<input checked="" type="checkbox"/> 1. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 1. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 2. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 2. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 3. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 3. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 4. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 4. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 5. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 5. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 6. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 6. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 7. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 7. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 8. příčná	32,000	32,000	<input checked="" type="checkbox"/> 8. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 9. příčná	32,000		
<input checked="" type="checkbox"/> 10. příčná	32,000		

Zdroje nejistoty	Meze nejistot	Typ rozdělení	Dílčí nejistota	Koefic. citlivosti	Příspěvek k nejistotě
Chyba libely měřicí krok 0,1 m; 9 kroků	±5 μm/m 10 μm/m krok 1 μm	normální k = 2	0,5 μm/m	9	4,5 μm
Naměřené rozdíly rovinností modelů	Nejistota typu A ze směrodatné odchylky	normální k = 1	0 μm	1	0 μm
Chyba z navázání max. rozdílu	Max. rozdíl výškové souřadnice 0 μm	normální k = 3	0 μm	1	0 μm
Ostatní vlivy chvění, vychýlení bodu, vychýlení směru	Odhad 1 μm	normální k = 2	0,5 μm	1	0,5 μm
Standardní nejistota kalibrace $u(y)$ pro k = 1 pro pravděpodobnost 68%					4,53 μm
Rozšířená nejistota kalibrace U pro k = 2 pro pravděpodobnost 95% pro					9,1 μm

Tabulka 34 Výpočet nejistoty pro ideální konkávní plochu

5.2.5 Vyhodnocení měřené vzorové průměrné desky 1000x800 mm

Všechny modely matematických ploch vyhověli, program je validován a připraven k použití. Příklad měření průměrné desky s jejím vyhodnocení. Zjednodušeně uvádím tabulku vstupních hodnot změřených bodů z jednotlivých měřených řezů v jednotkách [digit/m]. Tyto hodnoty se přímo odčítají z elektronické libely, program si automaticky sám přepočítává výšku na mikrometry. Matice navázaných podélných řezů na 1.; 2.; ... 10. příčný řez. Matice navázaných příčných řezů na 1.; 2.; ... 8. podélný řez. Výsledný tvar změřené plochy s vypočtenou úchylnou rovinnosti. Výsledek s vyčíslenou nejistotou.

700	8 Po.	0	31	17	16	14	12	14	14	10	17
600	7 Po.	0	29	19	17	15	14	17	14	12	23
500	6 Po.	0	24	18	18	14	17	15	13	9	23
400	5 Po.	0	24	21	19	16	19	21	13	13	34
300	4 Po.	0	20	19	16	15	18	17	13	19	33
200	3 Po.	0	21	16	9	14	20	17	11	14	29
100	2 Po.	0	15	17	11	12	19	21	11	18	34
0	1 Po.	0	20	22	17	15	22	18	6	19	32
y	digit	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 35 Změřené hodnoty podélných řezů vzorové desky

700	8 Po.	24	29	27	24	27	27	25	27	23	29
600	7 Po.	25	30	29	27	28	29	26	27	25	27
500	6 Po.	30	31	29	28	28	28	25	26	22	23
400	5 Po.	30	32	32	32	30	30	27	27	27	22
300	4 Po.	35	35	35	36	36	37	33	35	30	31
200	3 Po.	38	41	41	42	42	43	35	37	33	31
100	2 Po.	38	35	32	27	24	25	28	34	34	37
0	1 Po.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
y	digit	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 36 Ideální hodnoty příčných řezů vzorové desky

700	8 Po.	110,0	125,5	134,0	142,0	149,0	155,0	162,0	169,0	174,0	182,5
600	7 Po.	98,0	112,5	122,0	130,5	138,0	145,0	153,5	160,5	166,5	178,0
500	6 Po.	85,5	97,5	106,5	115,5	122,5	131,0	138,5	145,0	149,5	161,0
400	5 Po.	70,5	82,5	93,0	102,5	110,5	120,0	130,5	137,0	143,5	160,5
300	4 Po.	55,5	65,5	75,0	83,0	90,5	99,5	108,0	114,5	124,0	140,5
200	3 Po.	38,0	48,5	56,5	61,0	68,0	78,0	86,5	92,0	99,0	113,5
100	2 Po.	19,0	26,5	35,0	40,5	46,5	56,0	66,5	72,0	81,0	98,0
0	1 Po.	0,0	10,0	21,0	29,5	37,0	48,0	57,0	60,0	69,5	85,5
y	v μm	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 37 Vstupní matice hodnot z 1. příčně navázaného modelu vzorové desky

700	8 Po.	101,0	116,5	125,0	133,0	140,0	146,0	153,0	160,0	165,0	173,5
600	7 Po.	87,5	102,0	111,5	120,0	127,5	134,5	143,0	150,0	156,0	167,5
500	6 Po.	75,0	87,0	96,0	105,0	112,0	120,5	128,0	134,5	139,0	150,5
400	5 Po.	59,5	71,5	82,0	91,5	99,5	109,0	119,5	126,0	132,5	149,5
300	4 Po.	45,5	55,5	65,0	73,0	80,5	89,5	98,0	104,5	114,0	130,5
200	3 Po.	27,5	38,0	46,0	50,5	57,5	67,5	76,0	81,5	88,5	103,0
100	2 Po.	10,0	17,5	26,0	31,5	37,5	47,0	57,5	63,0	72,0	89,0
0	1 Po.	-10,0	0,0	11,0	19,5	27,0	38,0	47,0	50,0	59,5	75,5
y	v μm	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 38 Vstupní matice hodnot z 2. příčně navázaného modelu vzorové desky

...

...

700	8 Po.	27,5	43,0	51,5	59,5	66,5	72,5	79,5	86,5	91,5	100,0
600	7 Po.	5,5	20,0	29,5	38,0	45,5	52,5	61,0	68,0	74,0	85,5
500	6 Po.	-3,5	8,5	17,5	26,5	33,5	42,0	49,5	56,0	60,5	72,0
400	5 Po.	-29,5	-17,5	-7,0	2,5	10,5	20,0	30,5	37,0	43,5	60,5
300	4 Po.	-35,5	-25,5	-16,0	-8,0	-0,5	8,5	17,0	23,5	33,0	49,5
200	3 Po.	-41,5	-31,0	-23,0	-18,5	-11,5	-1,5	7,0	12,5	19,5	34,0
100	2 Po.	-60,5	-53,0	-44,5	-39,0	-33,0	-23,5	-13,0	-7,5	1,5	18,5
0	1 Po.	-85,5	-75,5	-64,5	-56,0	-48,5	-37,5	-28,5	-25,5	-16,0	0,0
y	v μm	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 39 Vstupní matice hodnot z 10. příčně navázaného modelu vzorové desky

700	8 Po.	110,0	126,5	133,5	137,5	144,5	157,5	156,5	166,5	166,5	185,5
600	7 Po.	98,0	112,0	120,0	125,5	131,0	144,0	144,0	153,0	155,0	171,0
500	6 Po.	85,5	97,0	105,5	112,0	117,0	129,5	131,0	139,5	142,5	157,5
400	5 Po.	70,5	81,5	91,0	98,0	103,0	115,5	118,5	126,5	131,5	146,0
300	4 Po.	55,5	65,5	75,0	82,0	88,0	100,5	105,0	113,0	118,0	135,0
200	3 Po.	38,0	48,0	57,5	64,0	70,0	82,0	88,5	95,5	103,0	119,5
100	2 Po.	19,0	27,5	37,0	43,0	49,0	60,5	71,0	77,0	86,5	104,0
0	1 Po.	0,0	10,0	21,0	29,5	37,0	48,0	57,0	60,0	69,5	85,5
y	v μm	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 40 Vstupní matice hodnot z 1. podélně navázaného modelu vzorové desky

700	8 Po.	91,0	106,5	112,5	116,0	123,0	134,0	133,0	142,5	142,0	160,5
600	7 Po.	79,0	92,0	99,0	104,0	109,5	120,5	120,5	129,0	130,5	146,0
500	6 Po.	66,5	77,0	84,5	90,5	95,5	106,0	107,5	115,5	118,0	132,5
400	5 Po.	51,5	61,5	70,0	76,5	81,5	92,0	95,0	102,5	107,0	121,0
300	4 Po.	36,5	45,5	54,0	60,5	66,5	77,0	81,5	89,0	93,5	110,0
200	3 Po.	19,0	28,0	36,5	42,5	48,5	58,5	65,0	71,5	78,5	94,5
100	2 Po.	0,0	7,5	16,0	21,5	27,5	37,0	47,5	53,0	62,0	79,0
0	1 Po.	-19,0	-10,0	0,0	8,0	15,5	24,5	33,5	36,0	45,0	60,5
y	v μm	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 41 Vstupní matice hodnot z 2. podélně navázaného modelu vzorové desky

...

...

700	8 Po.	0,0	15,5	24,0	32,0	39,0	45,0	52,0	59,0	64,0	72,5
600	7 Po.	-12,0	1,0	10,5	20,0	25,5	31,5	39,5	45,5	52,5	58,0
500	6 Po.	-24,5	-14,0	-4,0	6,5	11,5	17,0	26,5	32,0	40,0	44,5
400	5 Po.	-39,5	-29,5	-18,5	-7,5	-2,5	3,0	14,0	19,0	29,0	33,0
300	4 Po.	-54,5	-45,5	-34,5	-23,5	-17,5	-12,0	0,5	5,5	15,5	22,0
200	3 Po.	-72,0	-63,0	-52,0	-41,5	-35,5	-30,5	-16,0	-12,0	0,5	6,5
100	2 Po.	-91,0	-83,5	-72,5	-62,5	-56,5	-52,0	-33,5	-30,5	-16,0	-9,0
0	1 Po.	-110,0	-101,0	-88,5	-76,0	-68,5	-64,5	-47,5	-47,5	-33,0	-27,5
y	v μm	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 42 Vstupní matice hodnot z 8. podélně navázaného modelu vzorové desky

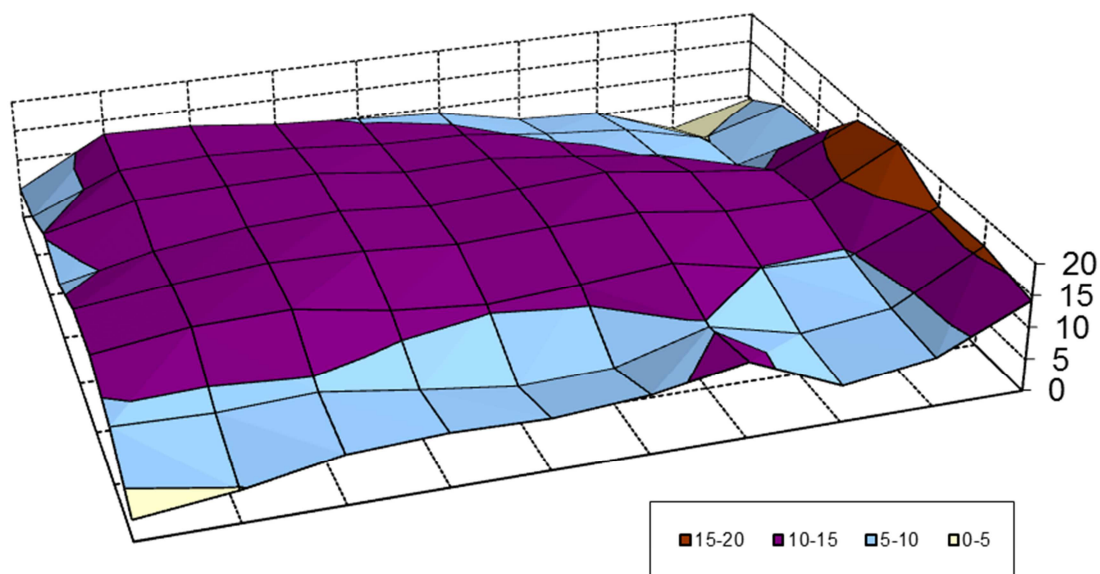
700	8 Po.	4,98	12,58	12,14	10,57	9,73	8,93	6,00	5,29	0,56	4,29
600	7 Po.	6,48	12,41	12,98	12,36	11,12	10,88	9,23	8,08	4,78	8,85
500	6 Po.	10,16	13,59	14,10	14,20	12,46	12,83	11,29	9,64	5,96	9,58
400	5 Po.	8,64	11,84	13,63	14,23	13,05	13,98	14,77	12,89	11,21	17,67
300	4 Po.	11,72	13,38	14,61	14,37	13,36	14,01	14,36	12,48	12,47	19,76
200	3 Po.	11,95	13,88	14,28	11,88	10,59	11,57	12,81	9,93	9,64	15,60
100	2 Po.	8,74	8,33	9,01	6,94	5,09	5,58	9,70	6,38	8,09	15,88
0	1 Po.	3,19	4,84	7,57	8,28	7,93	9,03	11,65	5,61	7,60	14,17
y	v μm	1 Př.	2 Př.	3 Př.	4 Př.	5 Př.	6 Př.	7 Př.	8 Př.	9 Př.	10 Př.
v mm	x	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900

Tabulka 43 Matice vypočtených průměrných úchylek rovinnosti od střední roviny

Maximální odchylka	Minimální odchylka	Odchylka rovinnosti
19,76	0,55	19,21 μm

Výsledek kalibrace

Měřený parametr	Tolerance podle ČSN 25 5502 pro třídu přesnosti I	Naměřená hodnota	Nejistota měření
Odchylka rovinnosti	20 μm	19,2 μm	$\pm 12,9 \mu\text{m}$



Obrázek 39 Graf výšek modelové vzorové desky 1000x800

Hodnoty všech matematických modelů z navázaných příčných a podélných řezů.

<input checked="" type="checkbox"/> 1. příčná	26,856	21,738	<input checked="" type="checkbox"/> 1. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 2. příčná	24,803	21,896	<input checked="" type="checkbox"/> 2. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 3. příčná	24,231	20,326	<input checked="" type="checkbox"/> 3. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 4. příčná	23,571	20,623	<input checked="" type="checkbox"/> 4. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 5. příčná	20,053	22,605	<input checked="" type="checkbox"/> 5. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 6. příčná	20,077	17,587	<input checked="" type="checkbox"/> 6. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 7. příčná	18,648	16,273	<input checked="" type="checkbox"/> 7. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 8. příčná	19,029	16,533	<input checked="" type="checkbox"/> 8. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 9. příčná	16,690		
<input checked="" type="checkbox"/> 10. příčná	20,672		

Zdroje nejistoty	Meze nejistot	Typ rozdělení	Dílčí nejistota	Koefic. citlivosti	Příspěvek k nejistotě
Chyba libely měřicí krok 0,1 m; 9 kroků	±5 μm/m 10 μm/m krok 1 μm/m	normální k = 2	0,5 μm/m	9	4,5 μm
Naměřené rozdíly rovinností modelů	Nejistota typu A ze směrodatné odchylky	normální k = 1	3 μm	1	3 μm
Chyba z navázání max. rozdílů	Max. rozdíl 9,3 μm výškové souřadnice	normální k = 3	3,1 μm	1	3,1 μm
Ostatní vlivy chvění, vychýlení bodu, vychýlení směru	Odhad 3 μm	normální k = 2	1,5 μm	1	1,5 μm
Standardní nejistota kalibrace $u(y)$ pro k = 1 pro pravděpodobnost 68%					6,42 μm
Rozšířená nejistota kalibrace U pro k = 2 pro pravděpodobnost 95%					12,9 μm

Tabulka 44 Výpočet nejistoty měření u vzorové desky

6 Vyhodnocení a závěr

V rámci diplomové práce byla vyvinuta metoda měření rovinnosti průměrných desek a kalibrační list s vyhodnocením výsledků počítaných MS EXCEL. K měření rovinnosti krokovou metodou se používá elektronická libela, která je připevněna na dvoubodovém nastavitelném měřicím můstku. Tím byly splněny cíle diplomové práce.

V Kalibračním postupu je zpracovaný doporučený způsob měření, volby souřadné sítě a metody vyhodnocování výsledku. Metody jak počítat rozšířenou nejistotu měření bilanční tabulkou. Matematické vyhodnocení rovinnosti metodou střední roviny dává lepší opakovatelnost a spolehlivost výsledků nežli obalové metody hodnocení rovinnosti. Při výpočtech lze použít standardních výpočetních prostředků například MS EXCEL.

Během zpracovávání diplomové práce byly ověřeny vlastnosti měřicích můstků s pevnými i výkyvnými doteky. Lepších výsledků bylo dosahováno použitím pevných doteků. Použitím můstku s pevnými doteky byl výsledek měření přesnější a nejistota menší.

Návrh kalibrační metody umožňuje použít běžně dostupné jednoduché prostředky kalibrace. Kalibrační list vytvořený v MS EXCEL umožňuje řešit složité výpočetní operace a vytváří grafickou podobu výsledku měření průměrné desky. V dnešní době vzrůstá význam měření od referenční roviny moderními výškoměry. Průměrné desky jsou tedy důležitou součástí strojírenského měření všeho druhu.

Litinové průměrné desky se dnes nahrazují přesnějšími granitovými nebo keramickými průměrnými deskami. Ostatní materiály průměrných desek jako je umělý kámen a keramika, jsou odolnější vůči vnějším vlivům prostředí.

Do budoucna je nutnost zdokonalovat měřicí metodu a zkoumat vliv rozložení teploty na vlastnosti průměrné desky.

Seznam použité literatury

- [1] ČSN 01 0115. *Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů v metrologii*. Říjen 1996.
- [2] ČSN EN ISO 14253-2. *Geometrické specifikace produktu (GPS) - Kontrola obrobků a měřicího vybavení měřením: Část 2: Návod pro odhad nejistoty měření v GPS, při kalibraci měřicího vybavení a při ověřování výrobku*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Prosinec 2011.
- [3] TNI 01 0115. *Mezinárodní metrologický slovník - Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny (VIM)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Únor 2009.
- [4] *Metrologie v kostce: Třetí upravené a doplněné vydání* [online]. 3. vydání. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) ve spolupráci s Českým metrologickým institutem (ČMI), 2009. Sborníky technické harmonizace ÚNMZ. Dostupné z: <http://www.cmi.cz/download.php?wdc=1637>
- [5] PALENČÁR, Rudolf, František VDOLEČEK a Martin HALAJ. *Automa 2001/10, str. 52 - 56: Nejistoty měření II: vyjadřování nejistot* [online]. 2001. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100152.pdf>
- [6] Česká Republika. Zákon o metrologii č. 505/1990 Sb.: ve znění pozdějších předpisů. In: 16. listopad 1990.
- [7] Český metrologický institut: *Legislativní rámec metrologického systému ČR*. [online]. Dostupné z: <http://www.cmi.cz/index.php?wdc=876&lang=1>
- [8] *Internetový časopis OKO: Historie měření a měřicích jednotek* [online]. Dostupné z: <http://oko.yin.cz/36/historie-mereni-a-mericich-jednotek/>
- [9] ČSN 01 4422 Návrh. *Měření úchylek rovinnosti*. Praha 10 - Hostivař: Vydavatelství ÚNM, 1983.
- [10] ČSN 01 4421 Návrh. *Měření úchylek přímosti*. Praha 10 - Hostivař: Vydavatelství ÚNM, 1983.
- [11] ČSN 01 4420. *Měření úchylek tvaru a polohy. Společná ustanovení*. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1982.

- [12] *Metrologie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ) ve spolupráci s Českým metrologickým institutem, 2011, roč. 2011, č. 4. ISSN 1210-3543
- [13] PALEŇČÁR, Rudolf, František VDOLEČEK a Martin HALAJ. *Automa 2001 č.7-8, str. 52 - 56: Nejistoty měření I: vyjadřování nejistot* [online]. 2001. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/au070150.pdf>
- [14] EA 4/02. *Vyjadřování nejistot měření při kalibracích*. Praha: Český institut pro akreditaci, o.p.s., leden 2001. Dostupné z: http://www.cai.cz/files/01_08-P001%20EA%2004_02_20061023.pdf
- [15] ČSN EN ISO 10012:2003. *Systémy managementu řízení - Požadavky na procesy měření a měřicí vybavení*. Praha: Český normalizační institut, Listopad 2003.
- [16] ČSN EN ISO/IEC 17025:2005. *Posuzování shody - Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

Vlastní publikace:

SILOVSKÝ, Richard. *Tabulky mezních metrických a trubkových závitových kalibrů*. Praha, Česká metrologická společnost: Tiskárna Petra Dvořáka, Dobříš, 2009. 200 ks.

Seznam příloh

Příloha č.1 Vypracovaný kalibrační postup pro průměrné desky (vyjímatelný)

Příloha č.2 Kalibrační list vzorové průměrné desky 1000x800 mm

PŘÍLOHA č. 1

**Vypracovaný kalibrační postup pro průměrné desky
(vyjímatelný)**

KALP - 1.10**Příměrné desky**

ČSN EN ISO/IEC 17025:2005

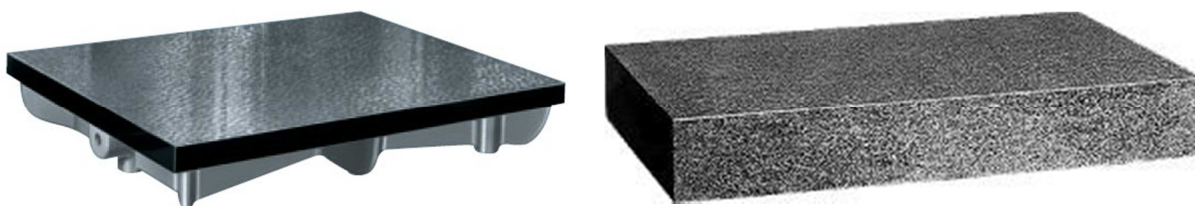
Tento postup je duševním majetkem společnosti Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.
Jakékoliv šíření a postupování dalším osobám lze pouze se souhlasem majitele.

Záznam o revizích a změnách

Číslo revize	Datum Podpis	Strana č. a index změny
Podpisový blok - platí i pro změny		
Vypracoval:	Bc. Richard Silovský	Schválil: Ing. Vladislav Batěk
Funkce:	Zástupce vedoucího laboratoře	Funkce: Vedoucí laboratoře
Datum:	1.5.2012	Datum: 1.5.2012
Podpis:		Podpis:
Platnost od:	1.5.2012	

1. Předmět kalibrace

Kalibrační postup se vztahuje na kalibraci průměrných desek dle specifikace ČSN 25 5502 nebo DIN 876. Materiály průměrných desek mohou být různé dle rozsahu jejich požití. Průměrné desky slouží jako měřicí základna pro měřicí a kontrolní úlohy. Patří k základnímu vybavení pracovišť pro rýsování, slouží jako základna pro tří souřadnicové měřicí stroje a v měřicích kalibračních laboratořích. Materiály měřicích desek jsou šedá litina nebo granit.



Obrázek 1 Průměrná deska litinová nebo granitová

Kalibrace popsaná v tomto kalibračním postupu se týká jak prvotní kalibrace v dané organizaci, tak i rekalibraci během používání průměrné desky.

2. Použité etalony

E 2	Koncové měrky do 500 mm
KZ 7	Kalibrátor libel
PE 13	Libela elektronická Minilevel
PE 7	Úchylkoměr tisícinový 1/0,001 mm

3. Související normy a metrologické předpisy

ČSN 25 5502	Kontrolní a rýsovací nářadí. Přesnost průměrných ploch desek a hranolů
DIN 876 Teil 1	Prüfplatten aus Naturhartgestein Anforderungen Prüfung
DIN 876 Teil 2	Prüfplatten aus Gußeiserne Anforderungen Prüfung
ČSN 01 4421 Návrh	Měření úchylek přímosti
ČSN 01 4422 Návrh	Měření úchylek rovinnosti
ČSN EN ISO/IEC 17025:2005	Posuzování shody – Všeobecné požadavky na způsobilost zkušebních a kalibračních laboratoří
ČSN EN ISO 10012	Systémy managementu měření – Požadavky na procesy měření a měřicího vybavení
EA 4/02	Vyjadřování nejistot měření při kalibracích
EA 4/07	Návaznost měřicího a zkušebního zařízení na státní etalony
TNI 01 0115	Mezinárodní metrologický slovník – Základní a všeobecné pojmy a přidružené termíny

4. Kvalifikace pracovníků provádějící kalibraci

Kvalifikace pracovníků provádějící kalibraci měřidel je dána v příslušném předpisu organizace. Dále musí být příslušní pracovníci seznámeni s tímto kalibračním postupem. Dle příručky kvality.

5. Názvosloví a definice

Příměrná deska je dílenské měřidlo, slouží jako základní rovina pro přesné měření, k rýsování obrobků, výrobků a jako základna pro výškoměry, kontrolní příměrné válce a třísouřadnicové měřicí stroje. Kalibrační rozumíme soubor úkonů prováděných za účelem rozhodnout, zda příměrná deska bude nadále užívána nebo vyřazena. Opotřebené desky lze opravit přebroušením nebo zaškrabáním. Úchylka rovinnosti je největší vzdálenost bodů skutečné plochy od obalový rovin v rozsahu vztažného úseku.

6. Kalibrační zařízení a pomůcky potřebné ke kalibraci

Kalibrační zařízení je závislé na možnostech příslušné kalibrační laboratoře a metrologické střediska organizace. Na kalibraci příměrných desek je nutné toto měřicí zařízení a potřebné vybavení:

- digitální elektronická vodováha,
- nastavitelný měřicí můstek s příslušenstvím,
- kalibrované metrové ocelové měřítko,
- psací potřeby: lihový popisovač; měkká grafitová tužka,
- skleněný dotykový teploměr s měřicím rozsahem (16 až 26) °C, s dělením 0,2 °C,
- lapovací papír, brusný kámen o vhodné zrnitosti,
- bílé látkové rukavice,
- čisticí prostředky: lékařský benzin, lněná utěrka;
- 3x podpěrka univerzální s hrotem pro ustavení desky pro rozměry do 630 mm,
- univerzální montážní klíč.

7. Obecné podmínky kalibrace

Kalibrace příměrných desek se provádí za těchto referenčních podmínek:

- teplota prostředí: 20 °C ± 3 °C
- vlhkost vzduchu: max. 70%

Dovolený teplotní rozdíl mezi elektronickou libelou s nastavovacím měřicím můstkem a příměrnou deskou musí být maximálně 0,5 °C. Toho se dosáhne umístěním libely na měřenou příměrnou desku po dobu minimálně 1 hodiny.

Teplota kalibrované desky a měřicí libely tak i teplota prostředí se měří před zahájením kalibrace a po jejím skončení, popř. se kontroluje průběžně.

Relativní vlhkost vzduchu se měří vlhkoměrem před zahájením kalibrace.

8. Příprava kalibrace, funkční kontrola

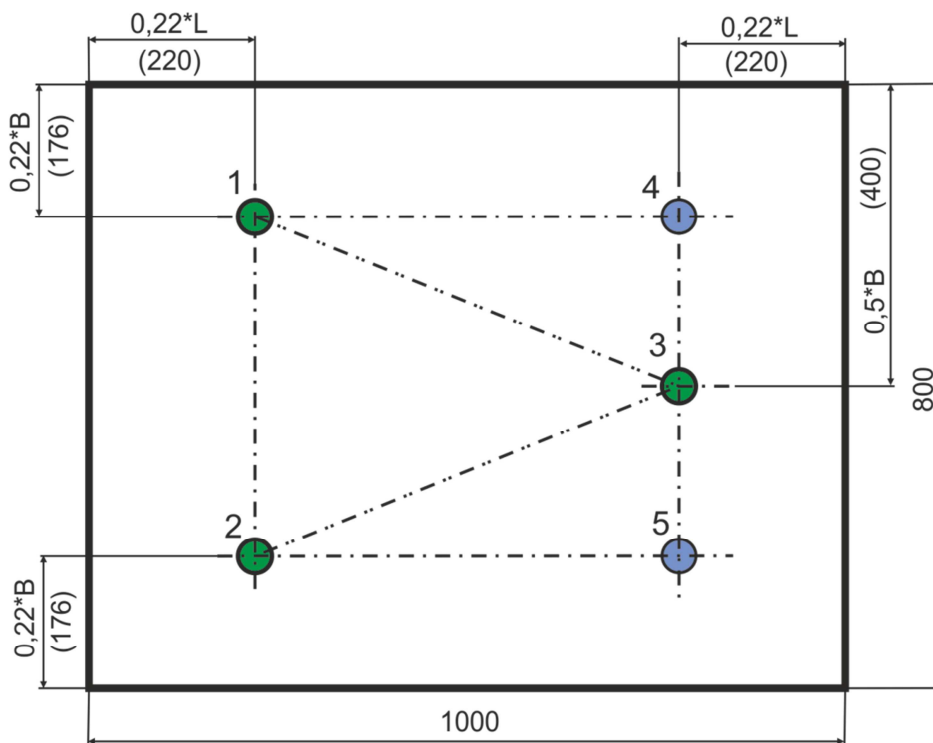
Při kalibraci je provedena kontrola značení příměrné desky zvláště pak evidenčního čísla, případně výrobního čísla a výrobce příměrné desky, nutné pro jednoznačnou identifikaci měřidla. Odstranění značek, kterými bylo měřidlo opatřeno při předchozí kalibraci.

Očištění příměrných desek se provádí pomocí lněné utěrky a lékárenského benzínu. Kontrolou plynulosti pohybu měřicího můstku s elektronickou libelou zjistíme hrubé nerovnosti příměrné desky, které by mohly způsobovat chybu měření.

Nerovnosti příměrných desek ze šedé litiny poškozené hrubými vrypy od měřených součástí zahladíme brusným kamenem a začistíme lapovacím papírem. Místa zasažená rzí začistíme pomocí lapovacího papíru. Kamenné a granitové desky se pouze očistí lněnou utěrkou.

9. Kontrola ustavení příměrné desky

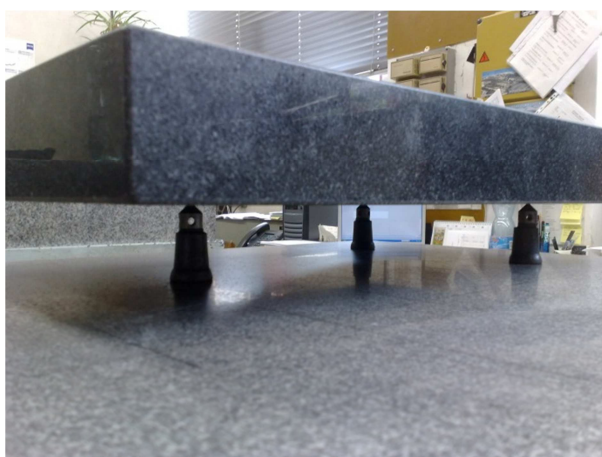
Příměrné desky se podkládají v místech, které jsou blízké takzvaným Besselovým bodům, tj. 0,2203% od hrany příslušného rozměru což vychází z praxe. Jsou vypočteny jako vzdálenosti uložení nosníku (součásti), zatíženého spojitým zatížením (vlastní vahou) pro podmínku minimálního průhybu. Podložení ve třech bodech zaručuje nejmenší chybu průhybu desky. U příměrných desek od 800 mm se provádí dodatečné podložení v bodech 4, 5, a to z důvodu stability příměrné desky.



Obrázek 2 Umístění podpěrných bodů u příměrné granitové desky

Vyrovnaní příměrné desky se provede zkalibrovanou elektronickou libelou. Příměrná deska se rovná na ideální rovinu s minimálním nakloněním v podélném, příčném a úhlopříčném směru. Naklání desky se děje pomocí třech univerzálních podpěrek s hrotem dle ČSN 25 5548 umístěných pod příměrnou deskou v bodech 1; 2; 3 viz předchozí obrázek. Nejprve překontrolujeme elektronickou libelou na nulovou chybu. Na příměrné desce se vyznačí místo, kde bude prováděna kontrola vodováhy. Obvykle se volí takové místo, kde rovinnost příměrné plochy vykazuje nejmenší chyby. Přečte se hodnota polohy libely s ohledem na orientaci vychýlení. Vodováha se otočí o 180° a přečte se znovu hodnota polohy.

Poloviční rozdíl obou odečtů udává chybu, se kterou je příměrná deska ustavena do vodorovné roviny, poloviční součet obou odečtů udává nesprávné seřízení vodováhy, kterou je nutno následně seřídit.



Obrázek 3 Ustavení příměrné desky na univerzálních podpěrkách s hrotem



Obrázek 4 Univerzální podpěrka s hrotem dle ČSN 255548



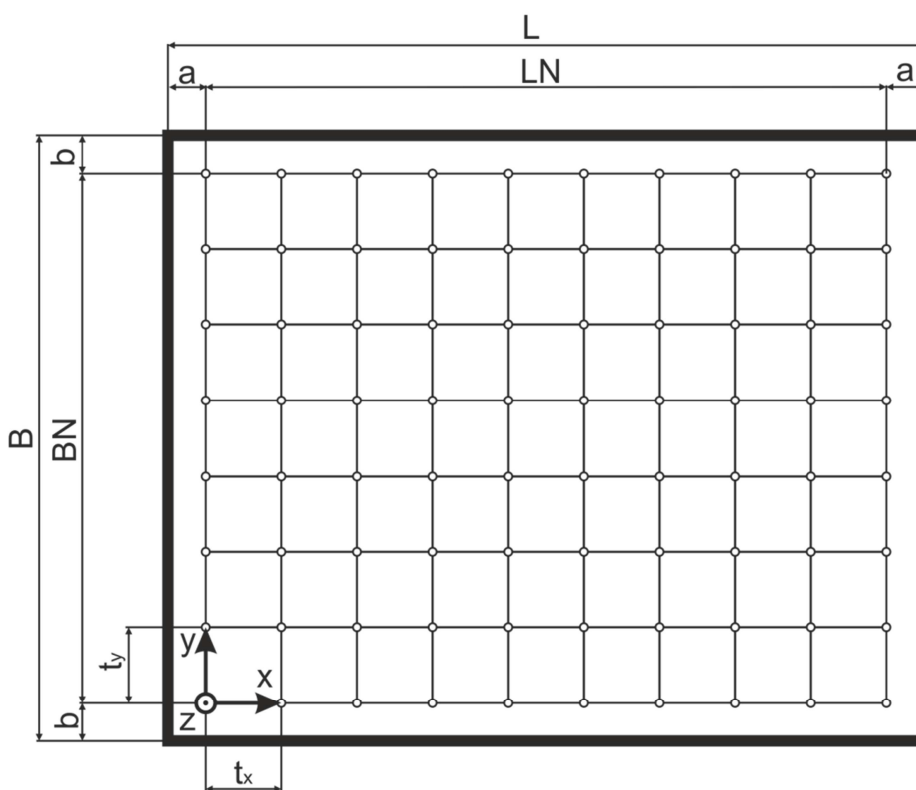
Obrázek 5 Stůl pro ustavení příměrné litinové desky



Obrázek 6 Stůl pro ustavení příměrné granitové desky

10. Stanovení měřicí sítě

U krokových metod měření úchylek rovinnosti se volí počet a polohy měřených bodů podle funkce ploch (je-li stanovena předpisem tolerance rovinnosti), délky L a šířky B měřené plochy v některých případech podle použité měřicí metody. [9] Hustota souřadné sítě a tedy i rozteče jednotlivých bodů se volí v závislosti na požadované přesnosti průměrné desky a účelu použití. Různé druhy průměrných desek svou kvalitou povrchu a typem konečného opracování nespĺňují požadavky nejvyšších přesností a tudíž by bylo zbytečně nákladné podrobnější měření. Přesné měření znamená více peněz za kalibraci a dnes kdy je požadavek na co nejmenší náklady, má konečné slovo o volbě měřicí sítě zákazník. Doporučené rozteče měřicí sítě a volby okrajových pásem jsou uvedeny v následujících tabulkách.



Obrázek 7 Stanovení měřicí sítě

kde

- L Délka desky
- B Šířka desky
- LN Délka měřené plochy
- BN Šířka měřené plochy
- t_x Rozteč měřených bodů v podélném směru
- t_y Rozteč měřených bodů v příčném směru
- $a; b$ Šířky okrajových pasem

Předběžně se navrhnou šířky okrajových pásem a a b a vypočtou se délky měřených úseků LN a BN . Platí tyto podmínky, že délky měřených úseků LN a BN musí být dělitelné beze zbytku navrženým podélným nebo příčným řezem a rozteč měřicího můstku je stejná pro t_x ; t_y . Okrajová pásma vnášejí do následného měření chyby, proto musejí být dostatečně velká. Volba šířky okrajových pásem se volí v rozmezí 50÷100 mm s ohledem na velikost průměrné desky.

Volba rozteče měřicího můstku t_x ; t_y

Délka desky L	Jemná síť mm	Střední síť mm	Hrubá síť mm
do 400 mm	-	-	100
do 630 mm	-	100	150
do 1500 mm	100	150	200
do 2000 mm	150	200	250
do 3000 mm	200(150)	250	300
do 4000 mm	250	300	-
do 5000 mm	300	-	-

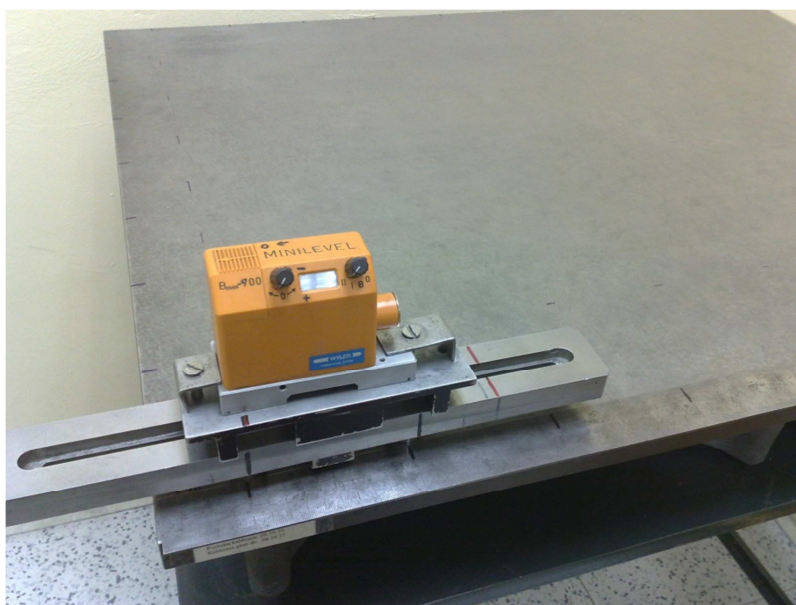
Tabulka 1 Doporučené rozteče t_x ; t_y měřených bodů podélných a příčných řezů

Rozměry desky LxD	Jemná síť podélné/příčné	Střední síť podélné/příčné	Hrubá síť podélné/příčné
400x300 mm	-	-	3/4
630x400 mm	-	4/7	3/5
800x600 mm	6/8	4/6	3/4
1000x800 mm	8/10	6/7	4/5
1000x1000 mm	10/10	7/7	5/5
1200x1000 mm	8/12	6/8	4/6
1500x1000 mm	10/15	7/10	5/8
2000x1000 mm	7/14	5/10	4/8
2000x1500 mm	10/14	8/10	6/8
2500x1500 mm	8/13 (10/17)	6/10	5/9
3000x1500 mm	8/15	6/12	5/10
3000x2000 mm	10/15	8/12	7/10
4000x2000 mm	8/16	7/14	-
5000x2000 mm	7/17	-	-
5000x3000 mm	10/17	-	-

Tabulka 2 Doporučený počet podélný a příčných řezů

11. Orýsování průměrné desky

Zakreslení měřicí sítě se zvolenou roztečí jednotlivých bodů na měřenou průměrnou desku se provádí, u litinových desek, lihovým fixem v okrajových pásmech a, b. Kamenné (granitové) průměrné desky lze orýsovat měkkou grafitovou tuhou po celé ploše. Orýsování měkkou grafitovou tuhou zanechá na granitové desce minimální výšku vrstvy, která neovlivňuje měření. Nakreslená nebo naznačená souřadná síť má funkci vodících linek pro měření podélných a příčných řezů při měření jejich jednotlivých přímostí.



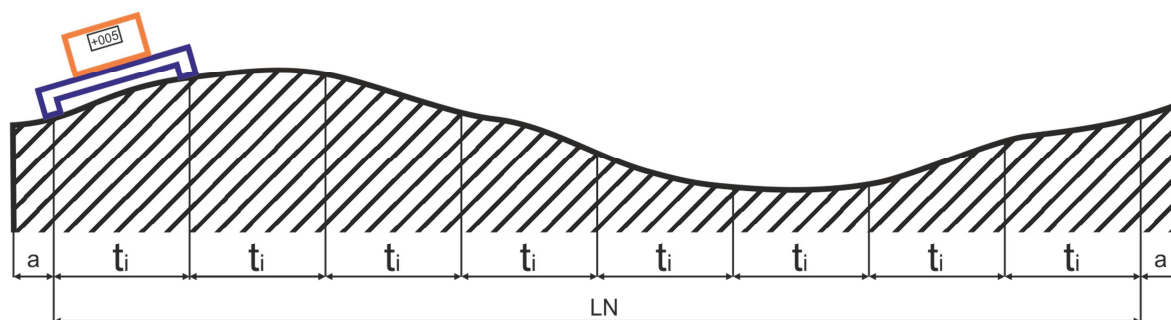
Obrázek 8 Orýsovaná litinová průměrná deska s měřicí libelou



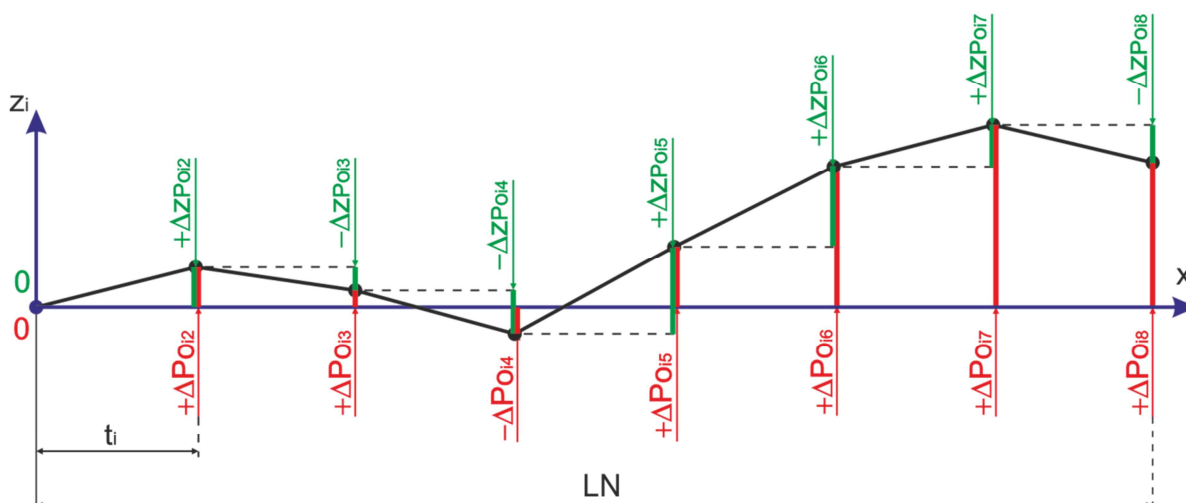
Obrázek 9 Orýsovaná granitová průměrná deska s měřicí libelou

12. Kroková metoda měření přímosti

Při určování tvaru přímosti jednotlivých podélných a příčných řezů krokovou metodou měření relativních změn sklonu sousedních úseků se připevňuje libela na měřicí můstek, který dosedá na měřenou průměrnou desku ve zvoleném směru jen na dvou opěrných plochách kruhového průřezu o zvolené rozteči t_i pro $i = \langle x, y \rangle$.



Obrázek 10 Kroková metoda měření přímosti podélného řezu



Obrázek 11 Přepočtené výškové souřadnice přímosti podélného řezu

Při měření relativních změn sklonu spojnice dvou sousedních bodů podélných nebo příčných řezů krokovou metodou se vypočítávají jejich relevantní rozdíly výškové polohy pro podélné $\Delta z_{P_{O_{ij}}}$ a pro příčné $\Delta z_{P_{\check{r}_{ij}}}$ podle následujícího přepočtu sklonu libely na měřenou rozteč.

Aritmetický součet $\Delta z_{P_{O_{ij}}}$ nebo $\Delta z_{P_{\check{r}_{ij}}}$ od prvního nulového bodu zvoleného měřeného řezu udává absolutní výškové rozdíly dalších bodů $\Delta P_{O_{ij}}$ nebo $\Delta P_{\check{r}_{ij}}$ od zvolené základny pro měření, přičemž hodnota prvního bodu je rovna nule, dále platí že osa x je pro podélná a osa y pro příčná měření.

$$\Delta P_{o_{ij}} = \sum_{j=2}^{n_{př}} \Delta Z_{P_{o_{ij}}} \quad \text{pro } i = \langle 1; n_{po} \rangle \quad (1)$$

$$\Delta P_{ř_{ij}} = \sum_{j=2}^{n_{po}} \Delta Z_{P_{ř_{ij}}} \quad \text{pro } i = \langle 1; n_{př} \rangle \quad (2)$$

kde

n_{po} počet příčných řezů

$n_{př}$ počet podélných řezů

$\Delta Z_{P_{o_{ij}}}$ rozdíl výškové polohy podélného bodu

$\Delta Z_{P_{ř_{ij}}}$ rozdíl výškové polohy příčného bodu

$\Delta P_{o_{ij}}$ absolutní výškový rozdíl od zvolené základny v podélném směru

$\Delta P_{ř_{ij}}$ absolutní výškový rozdíl od zvolené základny v příčném směru



Obrázek 12 Měření relativní výškové polohy na zvolené rozteči 100 mm

13. Přepočítání sklonu libely na měřenou rozteč

Vyjadřujeme-li při měření elektronickou libelou jeden dílek na displeji sklonem v digit/metr, vypočítávají se relativní výškové rozdíly sousedních bodů zvoleného řezu ze vztahů (3), (4).

$$\Delta z_{p_{oij}} = dp_{oij} \cdot c \cdot t_x \quad \text{pro } i = \langle 1; n_{po} \rangle; j = \langle 2; n_{př} \rangle \quad (3)$$

$$\Delta z_{p_{řij}} = dp_{řij} \cdot c \cdot t_y \quad \text{pro } i = \langle 1; n_{př} \rangle; j = \langle 2; n_{po} \rangle \quad (4)$$

kde

$\Delta z_{p_{oij}}$ rozdíl výškové polohy podélného bodu v [μm]

$\Delta z_{p_{řij}}$ rozdíl výškové polohy příčného bodu v [μm]

t_i rozteč měřicího můstku; pro $i = \langle x, y \rangle$ v [m]

d_{ij} počet dílků libely (sklon spojnice dvou sousedních bodů) v [digit/m]

c citlivost elektronické libely [$\mu\text{m}/\text{digit}$]

n_{po} počet příčných řezů

$n_{př}$ počet podélných řezů

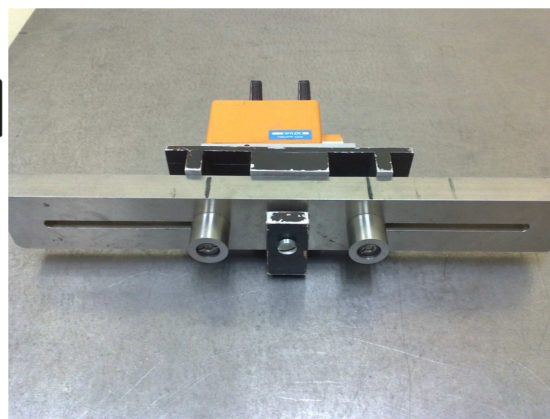
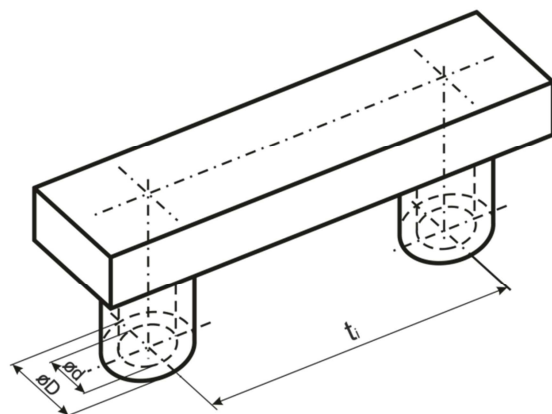
14. Měření přímostí podélných a příčných řezů

Postupně se měří přímosti jednotlivých rovnoběžných řezů v podélném a příčném směru dvoubodovým měřicím můstkem s připevněnou elektronickou libelou. Při měření úchylek přímosti soustavy rovnoběžných řezů (podélných nebo příčných) dvoubodovým měřicím můstkem s elektronickou libelou se nesmí měnit nastavení relativní nuly libely. Protože jsou v tomto případě základny pro měření úchylek přímosti soustavy rovnoběžných řezů vodorovné, nemusí se měřit úchylky přímosti úhlopříčných řezů měřené plochy.

Měření úchylek přímosti dvoubodovým měřicím můstkem s libelou se začíná obvykle v jednom rohu zvolené sítě podélných a příčných řezů. U všech dalších rovnoběžných řezů se postupuje ve stejném směru. První bod každého řezu má tudíž nulovou hodnotu.

Velmi dobrá opakovatelnost výsledků měření se dosahuje měřicím můstkem s pevnými doteky, které mají kruhový tvar dosedacích ploch o průměru nejvýše 1/10 rozteče t_i daného směru.

Při měření týchž míst plochy v různých směrech dosedá u nich kruhová základna opěrných patek měřicího můstku na tutéž plochu se stejnými nerovnostmi povrchu. Kruhové doteky mají odlehčené středy (ve tvaru mezikružší), které omezují možné chyby měření vlivem ulpívání nečistot.



Obrázek 13 Nastavitelný měřicí můstek s válcovými odlehčenými doteky

Obrázek 14 Sestava elektronické libely s měřicím nastavitelným můstkem pro 100 mm

15. Zápis měřených hodnot výškových souřadnic

Změřené relativní rozdíly sklonu sousedních úseků se zapisují do tabulek v záznamu o kalibraci pro podélný a příčný směr samostatně. Pro zrychlení a zjednodušení měření se odčítá hodnota sklonu libely v jednotkách digit na metr. Přepočtení výškových souřadnic dle vzorců (**Chyba! V dokumentu není žádný text v zadaném stylu.-3**), (**Chyba! V dokumentu není žádný text v zadaném stylu.-4**) se provádí automaticky v kalibračním listu.

$$dpo_{ij} \text{ pro } i = \langle 1; n_{po} \rangle; j = \langle 2; n_{př} \rangle$$

n_{po}	0	$dpo_{n_{po};2}$	...	$dpo_{n_{po};j}$	...	$dpo_{n_{po};n_{př}}$
...	0	...	...	...	...	...
i	0	$dpo_{i;2}$	...	$dpo_{i;j}$	...	$dpo_{i;n_{př}}$
...	0	...	...	...	...	...
2	0	$dpo_{2;2}$	...	$dpo_{2;j}$	...	$dpo_{2;n_{př}}$
1	0	$dpo_{1;2}$	...	$dpo_{1;j}$	...	$dpo_{1;n_{př}}$
→ směr podélný	1	2	...	j	...	$n_{př}$

Tabulka 3 Měřené hodnoty relativních výšek sklonu dvou bodů v podélných řezech

$$dpř_{ij} \text{ pro } i = \langle 1; n_{př} \rangle; j = \langle 2; n_{po} \rangle$$

n_{po}	$dpř_{1;n_{po}}$	$dpř_{2;n_{po}}$	...	$dpř_{i;n_{po}}$	...	$dpř_{n_{př};n_{po}}$
...
j	$dpř_{1;j}$	$dpř_{2;j}$	...	$dpř_{i;j}$	...	$dpř_{n_{př};j}$
...
2	$dpř_{1;2}$	$dpř_{2;2}$	...	$dpř_{i;2}$	...	$dpř_{n_{př};2}$
1	0	0	0	0	0	0
↑ směr příčný	1	2	...	i	...	$n_{př}$

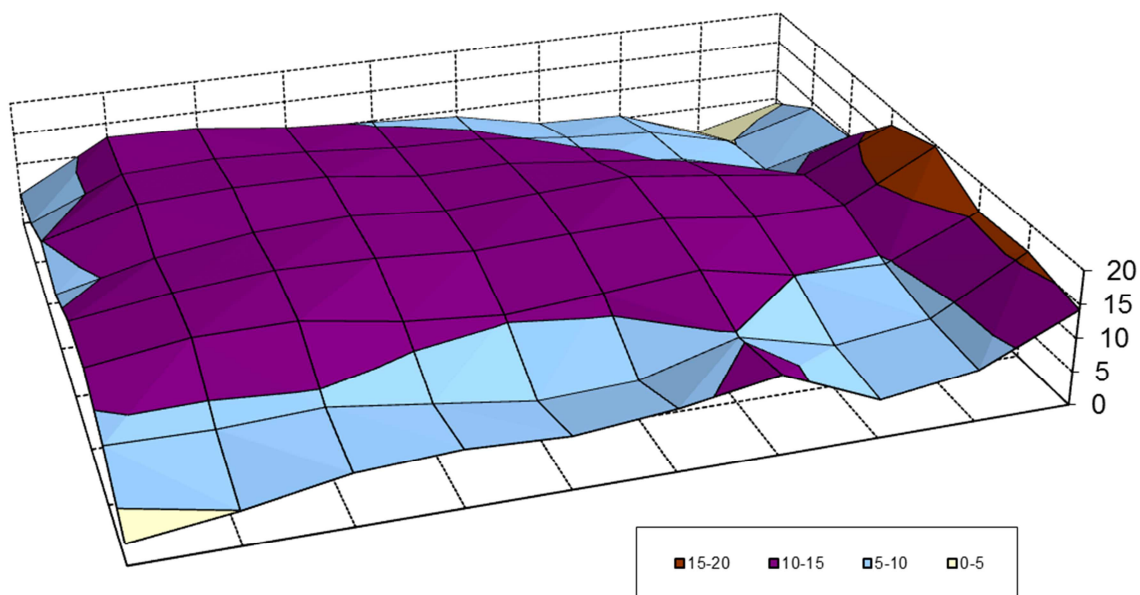
Tabulka 4 Měřené hodnoty relativních výšek sklonu dvou bodů v příčných řezech

16. Vyhodnocení průměrné desky

Hodnocení průměrné desky se provádí po změření všech podélných a příčných řezech. Obsluha překontroluje kalibrační list, zvolí matematické modely navázání všech podélných na vybrané příčné řezy a všech příčných na vybrané podélné řezy, z propočtených rovinností program automaticky vypočítá průměrnou hodnotu, rozšířenou nejistotu. Vybere data pro graf odchylek výsledného tvaru měřené průměrné desky a srovnáním s normou výrobce nalezne shodu s dovolenou hodnotou rovinnosti průměrné desky.

<input checked="" type="checkbox"/> 1. příčná	26,856	21,738	<input checked="" type="checkbox"/> 1. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 2. příčná	24,803	21,896	<input checked="" type="checkbox"/> 2. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 3. příčná	24,231	20,326	<input checked="" type="checkbox"/> 3. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 4. příčná	23,571	20,623	<input checked="" type="checkbox"/> 4. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 5. příčná	20,053	22,605	<input checked="" type="checkbox"/> 5. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 6. příčná	20,077	17,587	<input checked="" type="checkbox"/> 6. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 7. příčná	18,648	16,273	<input checked="" type="checkbox"/> 7. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 8. příčná	19,029	16,533	<input checked="" type="checkbox"/> 8. podélná
<input checked="" type="checkbox"/> 9. příčná	16,690		
<input checked="" type="checkbox"/> 10. příčná	20,672		

Obrázek 15 Výběr navázaný modelů měřené plochy



Obrázek 16 Výsledný tvar změřené plochy

17. Tabulka dovolených hodnot rovinností průměrných desek

Přesnost obrobených průměrných ploch je určena mezními úchylkami. Úchylky rovinnosti u průměrných ploch jsou určeny čtyřmi stupni přesnosti, označených od nejpřesnějšího k nejhrubšímu 0; I; II; III. Úchylky jsou stanoveny podle následujících vzorců pro třídy přesnosti dle ČSN 25 5502. Kde L je délka měřené plochy v milimetrech.

$$0 \quad u = 2 \cdot \left(0,0025 + \frac{L}{400\,000} \right) \quad (5)$$

$$I \quad u = 2 \cdot \left(0,005 + \frac{L}{200\,000} \right) \quad (6)$$

$$II \quad u = 2 \cdot \left(0,010 + \frac{L}{100\,000} \right) \quad (7)$$

$$III \quad u = 2 \cdot \left(0,020 + \frac{L}{50\,000} \right) \quad (8)$$

Délka plochy L v mm	Stupeň přesnosti průměrných ploch dle ČSN 25 5502			
	0 v μm	I v μm	II v μm	III v μm
200	6	12	24	48
300	6,5	13	26	52
400	7	14	28	56
500	7,5	15	30	60
600	8	16	32	64
630	8,15	16,3	32,6	65,2
800	9	18	36	72
1000	10	20	40	80
1200	11	22	44	88
1250	11,25	22,5	45	90
1500	12,5	25	50	100
2000	15	30	60	120
2500	17,5	35	70	140
3000	20	40	80	160
4000	25	50	100	200
5000	30	60	120	240

Tabulka 5 Velikost vybraných mezních úchylek rovinnost plochy

Pro desky vyrobené dle normy DIN 876 Teil 1 (granitová) a DIN 876 Teil 2 (litinová) platí následující výpočet úchylek rovinnosti. U granitových průměrných ploch platí čtyři stupně přesnosti, označených od nejpřesnějšího k nejhrubšímu 00; 0; I; II. Pro litinové se rozšiřuje o třídu přesnosti III.

$$00 \quad u = 2 \cdot \left(1 + \frac{L}{1\,000} \right) \quad (9)$$

$$0 \quad u = 4 \cdot \left(1 + \frac{L}{1\,000} \right) \quad (10)$$

$$I \quad u = 10 \cdot \left(1 + \frac{L}{1\,000} \right) \quad (11)$$

$$II \quad u = 20 \cdot \left(1 + \frac{L}{1\,000} \right) \quad (12)$$

$$III \quad u = 40 \cdot \left(1 + \frac{L}{1\,000} \right) \quad (13)$$

Délka plochy L v mm	Stupeň přesnosti průměrných ploch dle DIN 876 Teil 1, 2				Teil 2
	00 v μm	0 v μm	I v μm	II v μm	III v μm
200	2,4	4,8	12	24	48
300	2,6	5,2	13	26	52
400	2,8	5,6	14	28	56
500	3	6	15	30	60
600	3,2	6,4	16	32	64
630	3,26	6,52	16,3	32,6	65,2
800	3,6	7,2	18	36	72
1000	4	8	20	40	80
1200	4,4	8,8	22	44	88
1250	4,5	9	22,5	45	90
1500	5	10	25	50	100
2000	6	12	30	60	120
2500	7	14	35	70	140
3000	8	16	40	80	160
4000	10	20	50	100	200
5000	12	24	60	120	240

Tabulka 6 Velikost vybraných mezních úchylek rovinnost plochy

18. Výsledek kalibrace

Pro hodnocení rovinnosti průměrné desky je využíván kancelářský program MS Excel. Tato aplikace mi dovolila naprogramovat samočinné automatické výpočty, které pracují na pozadí. Obsluha během měření zadává hodnoty dílčích nerovností, indikované elektronickou libelou na měřicím můstku se zvolenou roztečí pevných měřicích doteků, do záznamu o kalibraci. Program z příčných a podélných řezů samočinně navazuje matematické modely, které hodnotí metodou střední roviny nejmenších čtverců. Z každého modelu vypočítává dílčí úchylku rovinnosti. Počet modelů je součtem počtu podélných a příčných řezů. Aplikace dokáže vyhodnotit rozšířenou nejistotu, která je ve shodě s dokumentem EA 4/02.

Nejistota kalibrace se počítá bilanční tabulkou, kdy jednotlivé dílčí složky nejistoty se sčítají goniometricky. Po vynásobení koeficientem rozšíření $k = 2$, pro pravděpodobnost 95%, získáme rozšířenou nejistotu výsledku kalibrace uváděnou na kalibračním listu.

Zdroje nejistoty	Meze nejistot	Typ rozdělení	Dílčí nejistota	Koefic. citlivosti	Příspěvek k nejistotě
Chyba libely měřicí krok 0,1 m; 9 kroků	$\pm 5 \mu\text{m/m}$ $10 \mu\text{m/m}$ krok $1 \mu\text{m}$	normální $k = 2$	$0,5 \mu\text{m/m}$	9	$4,5 \mu\text{m}$
Naměřené rozdíly rovinností modelů	Nejistota typu A ze směrodatné odchylky	normální $k = 1$	$3 \mu\text{m}$	1	$3 \mu\text{m}$
Chyba z navázání max. rozdílů	Max. rozdíl $9,3 \mu\text{m}$ výškové souřadnice	normální $k = 3$	$3,1 \mu\text{m}$	1	$3,1 \mu\text{m}$
Ostatní vlivy chvění, vychýlení bodu, vychýlení směru	Odhad $3 \mu\text{m}$	normální $k = 2$	$1,5 \mu\text{m}$	1	$1,5 \mu\text{m}$
Standardní nejistota kalibrace $u(y)$ pro $k = 1$ pro pravděpodobnost 68%					$6,42 \mu\text{m}$
Rozšířená nejistota kalibrace U pro $k = 2$ pro pravděpodobnost 95%					$12,9 \mu\text{m}$

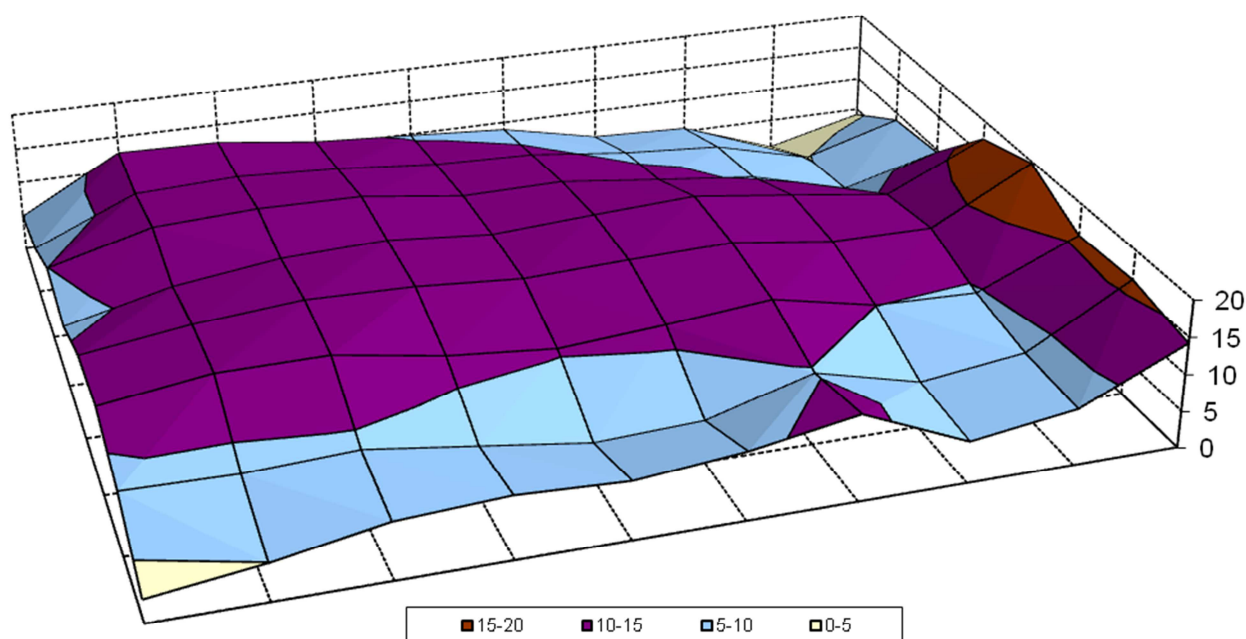
Tabulka 7 Výpočet nejistoty měření u vzorové desky

Na kalibračním listu se uvádí tabulka výsledků porovnaných s dovolenými úchytkami rovinnosti průměrných desek dle předpisu výrobce společně s grafickým vyjádřením výškových nerovností měřené průměrné desky od referenční nulové roviny. Úplný kalibrační list i se záznamem o kalibraci je uveden v příloze č. 2 diplomové práce.

Měřený parametr	Tolerance podle ČSN 25 5502 pro třídu přesnosti II	Naměřená hodnota	Nejistota měření
Odchylka rovinnosti	20 μm	19,2 μm	$\pm 12,9 \mu\text{m}$

Tabulka 8 Výsledek kalibrace uvedený na kalibračním listu

Tvar měřené plochy



Obrázek 17 Výsledný tvar změřené plochy

19. Validace kalibračního postupu

Kalibrační postup popisuje běžně ožívané laboratorní postupy, které vycházejí z norem. Vhodnost metod i použitých prostředků je doložena výpočtem nejistoty kalibrace. Kalibrační list s výpočtem rovinnosti průměrné desky byl kontrolován modelovými deskami konkávní a konvexní, pro úplnost byla také provedena zkouška na ideálně rovnou desku s vyhovujícím výsledkem. Pro akreditování metody je potřeba, aby se laboratoř účastnila mezilaboratorního porovnávání kalibrace průměrných desek s vyhovujícím výsledkem.

PŘÍLOHA č. 2

Kalibrační list vzorové průměrné desky 1000x800 mm

Kalibrační list

Kalibrační laboratoř pro geometrické veličiny

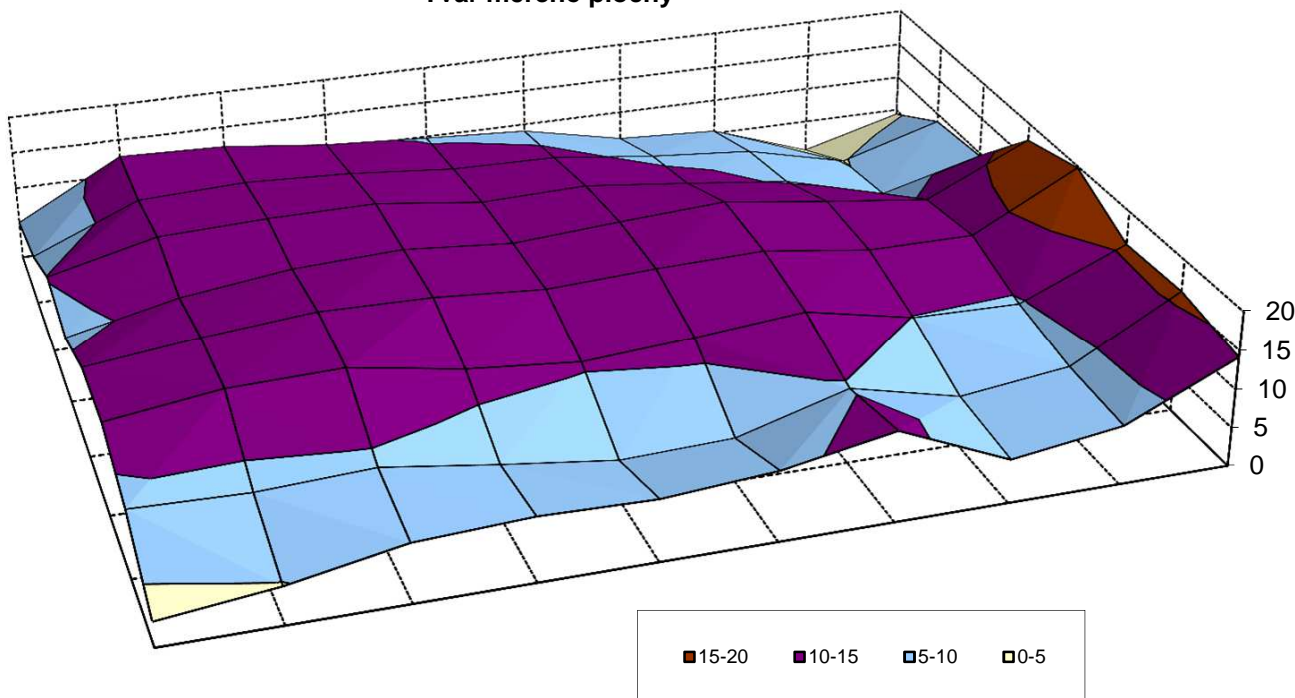
č.: VYZ-1255-0XXX-YYN

List číslo / Počet listů: 1/1

Zákazník:	<i>Jméno:</i>	Richard Silovský		
	<i>Adresa:</i>	ZČU - Diplomová práce		
Předmět kalibrace:	<i>Název:</i>	Příměrná deska 1000x800 mm		
	<i>Evidenční číslo:</i>	DESKA vzor 1	<i>Typ:</i>	litina
	<i>Výrobní číslo:</i>	-	<i>Výrobce:</i>	Škoda
Datum přijetí předmětu kalibrace:		10.5.2012	Kalibroval:	Bc. Richard Silovský
Datum provedení kalibrace:		11.5.2012		
Způsob kalibrace:	<i>Metodický předpis:</i>	KALP - 1.10; ČSN 01 4422:1982 (návrh) - metoda střední roviny		
	<i>Kalibrační zařízení:</i>	PE 13 libela WYLER Niveltronic		
	<i>Navazující etalon:</i>	E2 č. 3996 koncové měrky		
	<i>Teplota:</i>	(20 ± 2)°C		

Výsledek kalibrace:

Měřený parametr	Tolerance podle ČSN 25 5502 pro třídu přesnosti I	Naměřená hodnota	Nejistota měření
Odchylka rovinnosti	20 μm	19,2 μm	± 12,9 μm

Tvar měřené plochy


Uvedená rozšířená nejistota měření je součinem standardní nejistoty měření a koeficientu rozšíření $k=2$, což pro normální rozdělení odpovídá pravděpodobnosti pokrytí asi 95%. Standardní nejistota měření byla určena v souladu s dokumentem EA 4/02.



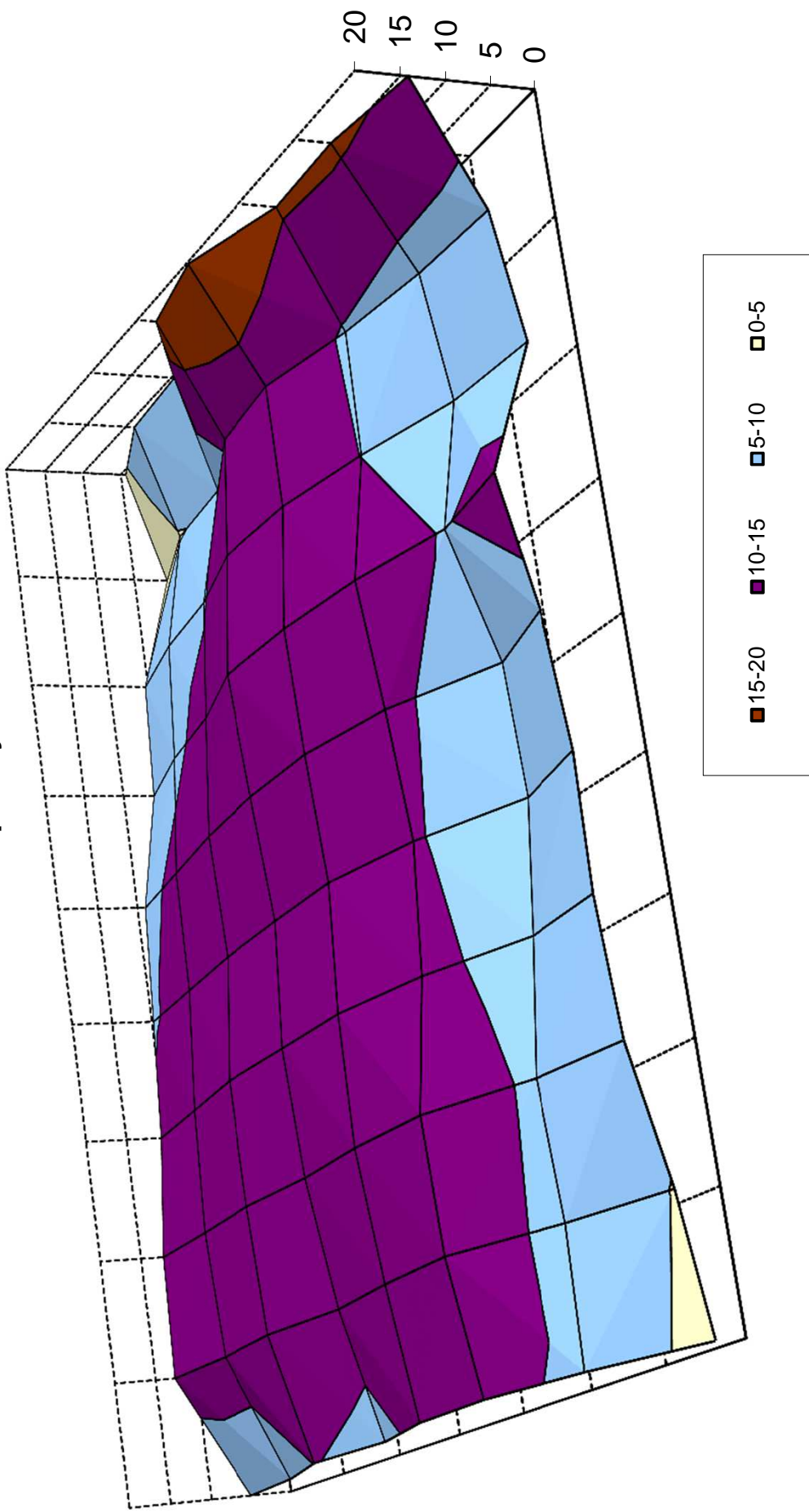

V Plzni 11.5.2012

 Bc. Richard Silovský
zástupce vedoucího kalibrační laboratoře

Uvedené výsledky se vztahují jen ke kalibrovanému předmětu. Bez svolení kalibrační laboratoře lze kalibrační list reprodukovat výhradně jen jako celek.

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. – Kalibrační laboratoř pro geometrické veličiny, Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň, Česká republika
tel.: +420 379 852 294, fax: +420 378 134 293, e-mail: batek@vzuplzen.cz, www.vzuplzen.cz

Tvar měřené plochy



Záznam o kalibraci

Kalibrační laboratoř pro geometrické veličiny

 č.: **VYZ-1255-0 XXX - YY N**

List číslo / Počet listů: 1/1

Zákazník: *Jméno:* **Richard Silovský**
Adresa: ZČU - Diplomová práce
Objednatel:

Předmět kalibrace: *Název:* **Příměrná deska 1000 x 800 mm**
Evidenční číslo: DESKA vzor 1 *Typ:* litina
Výrobní číslo: - *Výrobce:* Škoda

Datum přijetí předmětu kalibrace: 10.5.2012 **Kalibroval:** Bc. Richard Silovský ▼
Datum provedení kalibrace: 11.5.2012

Způsob kalibrace: *Metodický předpis:* KALP - 1.10; ČSN 01 4422:1982 (návrh) - metoda střední roviny
Kalibrační zařízení: PE 13 libela WYLER Niveltronic
Navazující etalon: E2 č. 3996 koncové měrky
Teplota: 20,8 °C

Záznam o kalibraci:

100 ▼

Citlivost libely:

 počet podél X (max.11) 8
 počet napříč Y (max.16) 10

 Krok podél X: 100 mm
 Krok napříč Y: 100 mm

 5 µm/m 50 µm/m

Citlivost jemná

Měření podélných

8	0	31	17	16	14	12	14	14	10	17
7	0	29	19	17	15	14	17	14	12	23
6	0	24	18	18	14	17	15	13	9	23
5	0	24	21	19	16	19	21	13	13	34
4	0	20	19	16	15	18	17	13	19	33
3	0	21	16	9	14	20	17	11	14	29
2	0	15	17	11	12	19	21	11	18	34
1	0	20	22	17	15	22	18	6	19	32
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

↑ osa y

Měření příčných

8	24	29	27	24	27	27	25	27	23	29
7	25	30	29	27	28	29	26	27	25	27
6	30	31	29	28	28	28	25	26	22	23
5	30	32	32	32	30	30	27	27	27	22
4	35	35	35	36	36	37	33	35	30	31
3	38	41	41	42	42	43	35	37	33	31
2	38	35	32	27	24	25	28	34	34	37
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

↑ osa y



V Plzni 11.5.2012

Podpis

Uvedené výsledky se vztahují jen ke kalibrovanému předmětu. Bez svolení kalibrační laboratoře lze kalibrační list reprodukovat výhradně jen jako celek.

Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o. – Kalibrační laboratoř pro geometrické veličiny, Tylova 1581/46, 301 00 Plzeň, Česká republika

tel.: +420 379 852 294, fax: +420 378 134 293, e-mail: batek@vzuplzen.cz, www.vzuplzen.cz