PARTICIPAREA LABORATORULUI INM LUNGIMI ÎN PROCESUL CIPM MRA PENTRU CALE PLAN PARALELE

THE PARTICIPATION OF THE INM LENGTHS LABORATORY IN THE CIPM MRA PROCESS FOR GAUGE BLOCKS

Alexandru DUȚĂ

INSTITUTUL NAȚIONAL DE METROLOGIE
NATIONAL INSTITUTE OF METROLOGY

Rezumat. *Suportul tehnic pentru Aranjamentul de Recunoaştere Mutuală (CIPM MRA) a etaloanelor naționale şi a certificatelor de măsurare şi etalonare emise de institutele naționale de metrologie este setul de rezultate obținute pe parcursul timpului în comparații cheie şi suplimentare organizate de Comitetele Consultative ale CIPM, BIPM şi organizațiile regionale de metrologie (RMOs) şi publicate de Biroul Internațional de Măsuri şi GREUTĂȚI (BIPM) în baza de date pentru comparații cheie. Acest articol prezintă metodele şi instalațiile utilizate de INM pentru etalonarea calelor plan paralele, estimarea incertitudinilor de măsurare şi rezultatele comparative ale INM în comparații chei şi suplimentare pentru cale plan paralele.*

Cuvinte cheie: *comparații cheie şi suplimentare, cale plan paralele, lungime.*

Abstract. *The technical basis of Mutual Recognition Arrangement (CIPM MRA) for national measurement standards and for calibration and measurement certificates issued by NMIs is the set of results obtained in the course of time through key and supplementary comparisons carried out by the Consultative Committees of the International Committee for Weights and Measures CIPM, the Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) and the regional metrology organizations (RMOs), and published by the BIPM in the key comparison database. This paper presents methods and the installations used in INM for calibration of gauge blocks, the estimation of uncertainty components and the comparative results on INM Length key and supplementary comparisons for gauge blocks.*

Key words: *key and supplementary comparisons, gauge blocks, length.*

1. INTRODUCERE

Calele plan paralele sunt etaloanele fundamentale pentru domeniul lungimi, utilizate de toate Institutele Naționale de Metrologie care au preocupări în acest domeniu.

Trasabilitatea în măsurarea lungimilor este obținută prin utilizarea calelor plan paralele ca etaloane de transfer. Pentru a compara performanțele metrologice ale acestor etaloane sunt organizate frecvent comparări cheie.

Scopul principal al acestor comparări este de a determina gradul în care rezultatele măsurării calelor plan paralele furnizate de INM-urile selectate pot fi echivalente. Gradul de echivalență rezultat într-o comparație cheie RMO are acelaşi statut ca cel rezultat într-o comparație cheie CIPM [1, 2].

1. INTRODUCTION

Gauge blocks are fundamental standards in the field of length metrology used in all National Metrology Institutes (NMIs), which are dealing with this field.

Traceability in the length measurements is carried out using the gauge blocks as transfer standards. In order to compare the metrological performances of these standards some key comparisons are usually organised.

The principal aim of these key comparisons is to determine the degree on which results of measurement of gauge blocks made by selected NMIs can be deemed to be equivalent. The degree of equivalence derived from a RMO key comparison has the same status as that derived from a CIPM key comparison [1, 2].

Procedurile utilizate de Comitetul Consultativ pentru selectarea, desfăşurarea şi evaluarea comparaţiilor cheie, incluzând protocolul tehnic detaliat şi periodicitatea comparărilor asigură următoarele [2]:

• comparările testează toate tehnicile principale din domeniu;

• rezultatele sunt clare şi fără echivoc;

• rezultatele sunt concludente;

• rezultatele sunt uşor de comparat cu corespondentele lor obţinute de organizaţiile regionale de metrologie;

• domeniul şi frecvenţa comparărilor sunt acoperitoare pentru a demonstra şi menţine echivalenţa între laboratoarele participante.

Institutele participante trebuie să raporteze rezultatele comparării institutului pilot cât mai curând posibil într-un termen de maxim şase săptămâni de la finalizarea măsurărilor. Rezultatele măsurărilor, împreună cu incertitudinile asociate şi informaţiile suplimentare cerute, vor fi raportate conform instrucţiunilor din protocol, în mod uzual prin completarea formularelor anexate la instrucţiuni.

Organizarea comparării cheie este responsabilitatea institutului pilot ajutat de doi sau trei participanţi. Prima acţiune a acestui mic grup este de a pregăti detaliile protocolului tehnic pentru comparare şi invitarea participanţilor, aşa cum a fost stabilit de Comitetul Consultativ.

În acest Comitet funcţionează permanent un Grup de Lucru sau o Secţiune responsabilă cu domeniul respectiv de activitate. Proiectul protocolului trebuie transmis şefului Grupului de Lucru sau a Secţiunii respective. Invitaţia de participare este transmisă direct, atât delegaţilor institutelor prezente la ultima întrunire a Comitetului Consultativ, cât şi membrilor absenţi. O copie a proiectului de protocol este transmisă secretarului executiv al Comitetului Consultativ BIPM.

Acest articol prezintă metodele şi instalaţiile utilizate în INM pentru etalonarea calelor plan paralele, estimarea componentelor incertitudinii şi rezultatele comparative obţinute de INM în comparări cheie sau suplimentare pentru cale plan paralele: EUROMET.L.-K1.1 „Etalonarea interferenţială a calelor plan paralele”, EUROMET.L-S12 „Etalonarea calelor plan paralele prin comparaţie mecanică” şi EUROMET.L-K2 „Etalonarea calelor plan paralele mari”.

2. DESCRIEREA ETALOANELOR ITINERANTE

Setul de etaloane itinerante pentru proiectul EUROMET.L.-K1.1 **„**Etalonarea interferenţială a

The procedures used by Consultative Committees for selecting, conducting and evaluating key comparisons, including the detailed technical protocols and periodicity of the comparisons, are designed to ensure that [2]:

• the comparisons test all the principal techniques in the field;

• the results are clear and unequivocal;

• the results are robust;

• the results are easy to compare with those of corresponding comparisons carried out by regional metrology organizations;

• the comparisons are sufficient in range and frequency to demonstrate and maintain equivalence between the participating laboratories.

The participating institutes must report the results of the comparison to the pilot institute as soon as possible and at the latest six weeks after the measurements are completed. The measurement results, together with the uncertainties and any additional information required, should be reported in the format given in the instructions as part of the protocol, usually by completing the standard forms annexed to the instruction.

Organizing a key comparison is the responsebility of the pilot institute helped by the two or three nominated participants. The first task of this small group is to draw up the detailed technical protocol for the comparison and its dispatch, inviting the participants as defined by the Consultative Committee.

This Committee have a permanent Working Groups or Sections responsible for specific areas of activity. The draft protocol must be sent to the chairman of the relevant Working Group or Section. The invitation to participate is sent directly to the delegates of institutes that are present at the last meeting of the Consultative Committee, and to absent members. Copies of the invitation and the draft protocol are also sent to the BIPM executive secretary of the Consultative Committee.

This paper presents the methods and the installations used in INM for calibration of gauge blocks, the estimation of uncertainty components and the comparative results on INM Length key and supplementary comparisons for gauge blocks: EUROMET.L-K1.1 ‘Calibration of Gauge Blocks by Interferometer’, EUROMET.L-S12 ‘Calibration of gauge blocks by mechanical comparison’ and EUROMET.L-K2 ‘Calibration of long gauge blocks’.

2. DESCRIPTION OF THE CIRCULATED ARTEFACTS

The set for EUROMET.L-K1.1 ‘Calibration of Gauge Blocks by Interferometer’ contains originally

calelor plan paralele" a fost alcătuit din 8 cale plan paralele din oțel şi 8 cale plan paralele din carbură de tungsten. După prima runda de circulație (februarie–octombrie 2002) au fost adăugate setului de cale din oțel alte două cale plan paralele de 4,5 mm şi de 6 mm. Calele plan paralele au fost de secțiune rectangulară în conformitate cu standardul internațional ISO 3650.

Coeficienții de dilatare termică ai calelor plan paralele au fost de determinați de PTB. Valoarea medie a coeficientului de dilatare termică determinat pentru două cale plan paralele mai lungi a fost adoptat şi pentru cele mici. În mod corespunzător a fost adoptată şi incertitudinea extinsă corespunzătoare.

Mărimea particulară supusă măsurării a fost lungimea centrală a calei plan paralelă, aşa cum este definită în standardul internațional ISO 3650. Cala plan paralelă a fost măsurată interferometric, aşezată în poziție verticală, pe o suprafață plană din fiecare laborator. Lungimea centrală a calei plan paralele este definită ca lungimea perpendicularei dintre punctul central ale suprafeței de măsurare liberă şi planul suprafeței plane auxiliare.

Rezultatul raportat al măsurării este abaterea lungimii centrale de la lungimea nominală :

$$\Delta l = l_{measured} - L_{nominal} \qquad (1)$$

Rezultatele măsurărilor au fost corectate pentru temperatura de referință de 20^0C folosind coeficientul de dilatare termică precizat în protocolul tehnic. Adițional au fost aplicate corecțiile stabilite prin procedurile fiecărui laborator. Incertitudinea de măsurare a fost estimată în acord cu *Ghidul ISO pentru exprimarea incertitudinii de măsurare*. În scopul unei comparabilități optime, în instrucțiunile de măsurare a fost stabilit un model matematic, care să cuprindă factorii de influență principali.

Etaloanele itinerante pentru EUROMET.L-S12 „Etalonarea calelor plan paralele prin comparație mecanică" au fost 8 cale plan paralele din oțel şi 8 cale plan paralele din carbură de tungsten. Calele plan paralele au fost de grad K cu secțiune rectangulară în acord cu standardul internațional ISO 3650.

Calele plan paralele au fost măsurate prin comparație mecanică cu calele plan paralele etalon ale fiecărui laborator participant, conform procedurii normale.

Pentru fiecare cală plan paralelă au fost cerute următoarele mărimi:

• abaterea lungimii centrale (poziția P1 din figura de mai jos) de la lungimea nominală, *d1*;

8 gauge blocks of steel and 8 gauge blocks of tungsten carbide. After the first circulation (February – October 2002), two additional steel gauge blocks, 4.5 mm and 6 mm, have been added to the steel set. The gauge blocks are of rectangular cross section, according to the international standard ISO 3650.

The thermal expansion coefficients associated with the gauge blocks has been evaluated by the PTB. The mean value of the thermal expansion coefficient for the two longest gauge blocks has been adopted for smaller gauges. The corresponding larger uncertainty has also been adopted.

The measurand was the central length of the gauge block, as defined in the International Standard ISO 3650. The gauge block had to be measured by interferometry, in their vertical position wrung to a flat plate, which was provided by each laboratory. The central length of a gauge block is defined as the perpendicular distance between the centre point of the free measuring surface and the plane surface of an auxiliary plate.

The measurement result to be reported is the deviation of central length from nominal length:

$$\Delta l = l_{measured} - L_{nominal} \qquad (1)$$

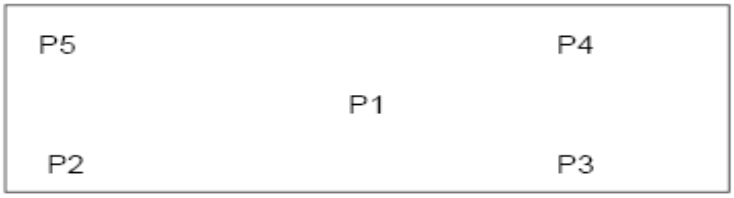
The measurement results were appropriately corrected to the reference temperature of 20°C using the thermal expansion coefficient given in the technical instruction. Additional corrections were applied, according to the usual procedure of each laboratory. The uncertainty of the measurement was estimated, according to the *ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*. In order to achieve optimum comparability, a mathematical model containing the principal influence parameters for gauge block calibration by interferometry was given in the measurement instructions.

The circulated artefacts for EUROMET.L-S12 'Calibration of gauge blocks by mechanical comparison' were 8 gauge blocks of steel and 8 gauge blocks of tungsten carbide. The gauge blocks were of grade K and of rectangular cross section, according to the international standard ISO 3650.

The gauge blocks had to be measured by mechanical comparison with the participant laboratory's reference gauge blocks, using the normal calibration procedure.

The following quantities were requested to be measured for each gauge block:

• deviation of the central length (at P1 in figure below) from the nominal length, *d1*;



• acolo unde este posibil, abaterea de la lungimea nominală a lungimii măsurată în punctele P2 la P5 (*d2* la *d5*). Aceste valori au fost utilizate de pilot pentru a calcula *fo* şi *fu*, pentru fiecare cală, conform ISO 3650.

Calele au fost măsurate în următoarele poziții:

- calele de 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 şi 10 mm – suprafața de măsurare inscripționată cu lungimea nominală în sus, astfel încât valoarea inscripționată să fie în stânga operatorului;

- calele de 20, 30, 40, 50, 75 şi 100 mm – suprafața inscripționată cu lungimea nominală verticală în fața operatorului cu cifrele în sus.

Compararea EUROMET.L-K2 Etalonarea calelor plan paralele mari a fost organizată cu două bucle, prima limitată la laboratoarele care pot măsura calele direct prin interferometrie şi a doua alcătuită din toate celelalte laboratoare.

În fiecare buclă au circulat patru cale plan paralele din oțel. Coeficientul de dilatare termică al calelor plan paralele a fost determinat înaintea comparării de laboratorul pilot (NPL) şi de un alt laborator (PTB). Media ponderată a coeficienților determinați de laboratorul pilot şi PTB (cu incertitudinile calculate) au fost transmise laboratoarelor participante în protocolul tehnic.

Mărimea măsurată a fost lungimea centrală a calelor plan paralele, aşa cum e definită în standardul internațional ISO 3650.

Rezultatele măsurărilor au fost corectate pentru temperatura de referință de 20 °C utilizând coeficientul de dilatare termică stabilit. Alte corecții (apertură, corecție de fază) au fost aplicate conform procedurilor normale ale laboratoarelor.

3. DESCRIEREA ECHIPAMENTELOR DE MĂSURARE ŞI A METODELOR FOLOSITE DE INM

În proiectul EUROMET.L-K1.1, INM a măsurat calele plan paralele prin metoda fracțiunilor de franje cu ajutorul unui interferometru Köster Carl Zeiss Jena cu lampă spectrală Cd 114, cu lungimea de undă în aer la temperatura 20 °C, presiunea 101,3 kPa, conform cu Rezoluția a 2-a a CIPM din 1983: 0,64385026 μm; 0,50858474 μm; 0,47999360 μm şi 0,46781737 μm.

• where possible, deviation from nominal length, measured at points P2 to P5 (*d2* to *d5*). These values will be used by the pilot to calculate *fo* and *fu*, for each gauge, according to ISO 3650.

The gauges had to be positioned as follows:

- 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 and 10 mm gauge blocks – the measuring face with the nominal size markings should face upwards with the nominal size mark on the left side of the gauge facing the operator;

- 20, 30, 40, 50, 75 and 100 mm gauge blocks – the side of the gauge with the nominal size marking vertically, facing the operator with the numerals running up the gauge side.

The EUROMET.L-K2 'Calibration of long gauge blocks comparison' was organized in two loops, the first being limited to the laboratories able to make direct measurement by interferometry, with the second loop consisting of all other laboratories.

Four gauge blocks made of steel were circulated in each loop. The thermal expansion coefficient of the gauge blocks was measured by the pilot laboratory (NPL) and by another laboratory (PTB) before the comparison. The weighted mean of the pilot laboratory and PTB results of expansion measurement (and their calculated uncertainties) were given to the participating laboratories in the technical protocol.

The measurement quantity was the central length of the gauge blocks, as defined in International Standard ISO 3650.

The measurement results were appropriately corrected for the reference temperature of 20 °C using the thermal expansion coefficients given above. Additional corrections (aperture, phase correction) were applied according to the usual procedure of the laboratory.

3. DESCRIPTION OF THE MEASUREMENT INSTRUMENTS AND THE METHODS USED BY INM

In the EUROMET.L-K1.1 project, the INM has measured the gauge blocks using a Köster interferometer Carl Zeiss Jena with Cd 114 spectral lamp with wave lengths defined in air at a temperature of 20 °C, a pressure of 101,3 kPa, according to Resolution 2 of CIPM 1983: 0,64385026 μm; 0,50858474 μm; 0,47999360 μm and 0,46781737 μm, applying the method of fringe fractions.

În proiectul EUROMET.L-S12 echipamentul principal selecționat de participanți a fost comparatorul pentru cale plan paralele fabricat de TESA (INM şi alți 5 participanți), Mahr (2 participanți) Cary (2 participanți) şi Kalibr (1 participant).

Etaloanele de referință utilizate de INM au fost cale plan paralele din oțel Carl Zeiss, clasă 0 şi cale plan paralele din carbură de tungsten, clasă 0.

Aproximativ un sfert din cei 23 de participanți în proiectul EUROMET.L-K2 au utilizat metoda măsurării directe cu interferometru. Jumătate din participanți au folosit tehnica măsurării prin comparație cu cale plan paralele etalon de aceiaşi lungime sau cu o măsură mai mică, cum ar fi o cală plan paralelă care să furnizeze o referință trasabilă.

INM a folosit maşina de măsurat lungimi SIP 1000 cu comparator TESA şi patru cale plan paralele cu lungimea nominală de 150 mm, 500 mm şi 900 mm, fabricație CEJ etalonate la PTB.

4. INCERTITUDINEA MĂSURĂRII

Dacă toate mărimile de care depinde rezultatul măsurării sunt variabile, atunci incertitudinea rezultatului măsurării trebuie evaluată prin metode statistice. În plus, deoarece aceasta este rareori posibilă în practică, incertitudinea rezultatului măsurării este evaluat în mod uzual utilizând un model matematic al măsurării şi legea propagării incertitudinii de măsurare [3].

Evaluarea incertitudinii standard de tip A

În cele mai multe cazuri estimația cea mai bună μ_q a mediei (teoretice) a unei mărimi q ce variază aleatoriu (*o variabilă aleatoare*), pentru care se dispune de n observații independente q_k obținute în condiții identice de măsurare, este *media aritmetică a mediei* $\bar{q}$ a celor n observații. Astfel, pentru o mărime de intrare $X_{i,j}$, media aritmetică este cea care se foloseşte drept estimație în vederea determinării rezultatului măsurării l [4, 5].

Observațiile individuale diferă între ele ca valoare, datorită variațiilor întâmplătoare ale mărimilor de influență, sau efectelor aleatoare. Variația experimentală a observațiilor, care estimează varianța distribuției de probabilitate a lui q este dată de s^2.

Această estimație a varianței şi rădăcina sa pătrată pozitivă s, numită *abatere standard experimentală*, caracterizează variabilitatea valorilor observate sau dispersia lor în jurul mediei.

Evaluarea incertitudinii standard de tip B

Pentru o estimație x_i a unei mărimi de intrare X_i care nu a fost obținută pe baza unui şir de observații repetate [4, 5], varianța $u^2(x_i)$ sau incertitudinea standard $u(x_i)$ este evaluată prin judecată ştiințifică,

In the EUROMET.L-S12 the principal equipment used by the participants were a selection of gauge block comparators manufactured by TESA (INM and 5 participants), Mahr (2 participants), Cary (2 participants) and Kalibr (1 participant).

For reference, INM used: steel gauge blocks, Carl Zeiss, grade 0 and tungsten carbide gauge blocks, grade 0.

Approximately one quarter of the 23 participants in the EUROMET.L-K2 used direct interferometry on the gauge and platen surfaces. Half of the participants used mechanical comparison techniques, either with reference gauges of a similar size, or with a smaller artefact e.g. a short gauge block used to provide the traceable reference.

INM used the coordinate machine SIP 1000 with TESA comparator and four standard gauge blocks of nominal lengths:150 mm, 500 mm and 900 mm, trade mark CEJ, with certificate issued by the PTB.

4. MEASUREMENT UNCERTAINTY

If all quantities on which the result of a measurement depends are varied, its uncertainty can be evaluated by statistical means. However, because this is rarely possible in practice, the uncertainty of a measurement result is usually evaluated using a mathematical model of the measurement and the law of propagation of measurement uncertainty [3].

Type A evaluation of standard uncertainty

In most cases, the best available estimate of the expectation or expected value μ_q of quantity q that varies randomly, and for which n independent observations q_k have been obtained under the same conditions of measurement, is the arithmetic mean or average of the n observations. Thus, for an input quantity $X_{i,j}$, the arithmetic mean is used as the input estimate x_i in equation (2) to determine the measurement result l [4, 5].

The individual observations differ in value because of random variations in the influence quantities or random effect. The experimental variance or the observations, which estimates the variance of the probability distribution of q, is given by s^2.

This estimate of variance and its positive square root s, termed the *experimental standard deviation*, characterize the variability of the observed value, or more specifically, their dispersion about their mean.

Type B evaluation of standard uncertainty

For an estimate x_i of an input quantity X_i that has not been obtained from repeated observations [4, 5], the associated estimated variance $u^2(x_i)$ or the standard uncertainty $u(x_i)$ is evaluated by scientific

bazată pe toate informațiile de care se dispune asupra posibilei variabilități a lui X_i. Ansamblul de informatii poate include:

- date măsurate anterior;
- experiență sau cunoştințe generale privitoare la comportarea şi proprietățile materialelor şi aparatelor;
- specificații ale producătorului;
- date furnizate în certificatele de etalonare sau alte certificate;
- incertitudini atribuite datelor de referință luate din manuale.

Evaluarea incertitudinii standard compuse

Abaterea standard asociată rezultatului măsurării, numită *incertitudine standard compusă* (u_c), este determinată în raport cu abaterea standard estimată asociată fiecărei estimații de intrare [4, 5], cu relația:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial K}{\partial C_i}\right)^2 u^2(C_i)} \qquad (2)$$

Evaluarea incertitudinii extinse

Cu toate că u_c poate fi utilizat în mod universal ca expresie a incertitudinii unui rezultat al măsurării, este necesar să se dea o mărime a incertitudinii care defineşte un interval, ce poate fi extins, astfel încât să cuprindă o fracție largă a distribuției valorilor, care pot fi atribuite rezonabil măsurandului.

4.1. Proiectul EUROMET.L-K1.1

O estimație a măsurandului, notat cu l, se obține din estimațiile a N mărimi de intrare. Estimația mărimii de ieşire l, care este rezultatul măsurării, este dată de:

$$l = \frac{1}{q}\sum_{i=1}^{q}(k_i + F_i)\frac{l_i}{2n} + \Delta t_g \times a \times L + \\ + dl_W + \Delta l_s + dl_A + dl_g + dl_w + \Delta l_F \qquad (3)$$

unde:

l este lungimea calei plan paralele la temperatura de referință de 20 °C;
L - lungimea nominală a calei plan paralele;
q - numărul lungimilor de undă folosite pentru determinarea lungimii prin metoda fracțiunilor de undă ($i = 1 \ldots q$);
k_i - partea întreagă a numărului de jumătăți de lungimi de undă (ordinul franjei);
F_i - partea fracționară a ordinul franjei;
λ_i - lungimea de undă în vaccum a diferitelor surse de lumină folosite;
n - ndicele de refracție al aerului;
Δt_g=(20-t_g) - diferența dintre temperatura calei plan paralele t_g în ^{0}C din timpul măsurării față de temperatura se referință de 20° C;

judgement based on all or the available information on the possible variability of X_i. The pool of information may include:

- previous measurement data;
- experience with or general knowledge of the behaviour and properties of relevant materials and instruments;
- manufacturer's specifications
- data provided in calibration and other certificates;
- uncertainties assigned to reference data taken from handbooks.

Evaluation of combined standard uncertainty

The estimated standard deviation associated with the output estimate of measurement result, termed *combined standard uncertainty* (u_c), is determined from the estimated standard deviation associated with each input estimate [4, 5], by equation:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial K}{\partial C_i}\right)^2 u^2(C_i)} \qquad (2)$$

The evaluation of the expanded uncertainty

Although u_c can be universally used to express the uncertainty of a measurement result it is necessary to give a measure of uncertainty that defines an interval about the measurement result that may be expanded to encompass a large fraction of the distribution of values that could reasonably be attributed to the measured.

4.1. EUROMET.L-K1.1 project

An estimate of the measurand, denoted by l, is obtained using input estimates for the values of the N quantities. Thus the output estimate l, which is the result of the measurement, is given by:

$$l = \frac{1}{q}\sum_{i=1}^{q}(k_i + F_i)\frac{l_i}{2n} + \Delta t_g \times a \times L + \\ + dl_W + \Delta l_s + dl_A + dl_g + dl_w + \Delta l_F \qquad (3)$$

where:

l is the length of the gauge block at the reference temperature of 20 °C;
L - nominal length of the gauge block;
q - number of wavelengths used for the determination of the length based on the method of exact fractions ($i = 1, \ldots, q$);
k_i - integer part of number of half wavelengths (fringe order);
F_i - fractional part of fringe order;
λ_i - vacuum wavelength of the different light sources used;
n - index of refraction of the air
Δt_g= (20 – t_g) - the difference of the gauge block temperature t_g, in °C, during the measurement from the reference temperature of 20° C;

α - coeficientul liniar de dilatare termică al calei plan paralele;
δl_Q - corecția pentru erorile unghiulare de aliniere ale ansamblului colimator;
Δl_S - corecția de apertură;
δl_A - corecția pentru unda parazite datorată imperfecțiunii interferometrelor optice;
δl_G - corecția pentru abaterile de la planitate şi variații în lungime ale calei plan paralele;
δl_W - corecția lungimii datorată aderării;
Δl_Φ- -corecția de fază datorată diferenței dintre lungimea optic aparentă şi lungimea mecanică.

În tabelul 1 sunt prezentate valorile numerice ale contribuțiilor pentru cala plan paralelă de100 mm din carbură de tungsten.

α - linear coefficient of thermal expansion of the gauge block;
δl_Q - correction for alignment errors of the collimating assembly;
Δl_S - aperture correction;
δl_A - corrections for wave front errors as a result of imperfect interferometer optics;
δl_G - correction accounting for flatness deviation and variation in length of the gauge block;
δl_W - length correction due to the wringing film;
Δl_Φ - phase change accounting for the difference in the apparent optical length to the mechanical length.

In Table 1, the numerical values of the 100 mm tungsten carbide gauge block contributions are given.

Tabelul 1. **Evaluarea incertitudinii la etalonarea calei plan paralelă de 100 mm din carbură de tungsten**

Table 1. ***The evaluation of calibration uncertainty for the 100 mm tungsten carbide gauge block***

x_i	$u(x_I)$	n_i	$c_i = \partial l / \partial x_i$	$u_I(l)$
λ_i	3×10^{-8}	100	$L/4\lambda_i$	$0{,}015\times10^{-6}\,L$
F_I	0,05 fr.	100	$\lambda_I/2q^*$	6,6 nm
n	$5{,}8\times10^{-8}$	65	L	$0{,}058\times10^{-6}\,L$
t_g	0,02 K	50	αL	$0{,}084\times10^{-6}\,L$
α	$0{,}006\times10^{-6}\,K^{-1}$	100	$\overline{\Delta t_g}.L = 0{,}18.L$	$0{,}001\times10^{-6}\,L$
δl_Q	$0{,}18\times10^{-6}$	100	L	$0{,}18\times10^{-6}\,L$
Δl_s	$3{,}6\times10^{-8}$	14	L	$0{,}036\times10^{-6}\,L$
δl_A	3,4 nm	14	1	3,4 nm
δl_G	3 nm	14	1	3 nm
δl_W	5 nm	14	1	5 nm
Δl_Φ	9,4 nm	99	1	9,4 nm

4.2. Proiectul EUROMET.L-S12

Etalonarea unei cale plan paralele cu lungimea nominală L mm se realizează prin metoda comparației. O cală plan paralelă de aceeaşi lungime este utilizată ca etalon de referință.

Estimația mărimii de ieşire l_x, care este rezultatul măsurării, este dată de:

$$l_x = l_s + \delta l_D + \delta l + \delta l_c - L(\alpha_{av}\cdot\delta t + \delta\alpha\cdot\Delta t_{av} + u_{at}) - \delta l_v \quad (4)$$

În tabelul 2 se prezintă estimarea incertitudinii pentru cala plan paralelă de 2 mm din carbură de tungsten şi pentru cea de 100 mm din oțel.

4.2. EUROMET.L-S12 project

The calibration of the gauges block of L mm nominal length is carried out by comparison method. A calibrated gauge blocks of the same nominal length and the same material as reference standard was used.

Thus the output estimate l_x, which is the result of the measurement, is given by:

$$l_x = l_s + \delta l_D + \delta l + \delta l_c - L(\alpha_{av}\cdot\delta t + \delta\alpha\cdot\Delta t_{av} + u_{at}) - \delta l_v \quad (4)$$

In Table 2 are given uncertainties evaluation for 2 mm tungsten carbide gauge block and for 100 mm steel gauge block.

4.3. Proiectul EUROMET.L-K2

Etalonarea unei cale plan paralele cu lungimea nominală L mm se realizează prin metoda comparației. A fost utilizată maşina universală de măsurat lungimi SIP 1000, echipată cu comparator TESA. Ca etalon de referință a fost utilizată o cală plan paralelă de aceeaşi lungime şi acelaşi material. A fost măsurată diferența dintre lungimile centrale ale celor două cale plan paralele aşezate în poziție orizontală.

4.3. EUROMET.L-K2 project

The calibration of the gauge block of L mm nominal length is carried out by comparison method. The coordinate machine SIP 1000, equipped by TESA comparator was used for these measurements. A calibrated gauge block of the same nominal length and the same material as reference standard was used. The difference in central length was determined in horizontal position.

Tabelul 2. **Evaluarea incertitudinii la etalonarea calei plan paralele de 2 mm din carbură de tungsten şi pentru cea de 100 mm din oțel**

Table 2. ***The evaluation of calibration uncertainty for the 2 mm tungsten carbide gauge block and 100 mm steel gauge block***

Mărime de intrare -Descriere/ ***Input Quantity – Description***	**Distribuție/** ***Distribution***	**Tip A sau B/** ***Type A or B***	**Incertitude standard/** ***Standard uncertainty*** **(k=1)**	
			2 mm carbură de tungsten/ ***tungsten carbide***	**100 mm oțel/** ***steel gauge block***
Lungimea calei plan paralele de referință la temperatura de referință de t_0=20 °C conform certificatului de etalonare/ *Length of the reference gauge block at the reference temperature of t_0 =20 °C according to its calibration certificate*	normal	B	$15.00\cdot10^{-6}$ mm	$20.00\cdot10^{-6}$ mm
Schimbarea lungimii calei plan paralele de referință de la etalonare datorată driftului/ *Change of the length of the reference gauge block since its last calibration due to drift*	rectangular	B	$5.77\cdot10^{-6}$ mm	$5.80\cdot10^{-6}$ mm
Diferența măsurată între cala plan paralelă necunoscută şi cea de referință/ *Observed difference in length between the unknown and the reference gauge block*	normal	A	$5.11\cdot10^{-6}$ mm	$3.2\cdot10^{-6}$ mm
Corecția pentru neliniaritatea şi offsetul comparatorului/ *Correction for non-linearity and offset of the comparator*	rectangular	B	$13.00\cdot10^{-6}$ mm	$13.00\cdot10^{-6}$ mm
Media coeficienților de dilatare termică ai calelor plan paralele/ *Average of the thermal expansion coefficients of the gauge blocks*	rectangular	B	0.0 mm	0.00 mm
Diferența de temperatură dintre cala de referință şi cea necunoscută/ *Difference of temperature between the unknown and the reference gauge block*	rectangular	B	$-98\cdot10^{-9}$ mm	$-12\cdot10^{-6}$ mm
Diferența coeficienților de dilatare termică dintre cala de referință şi cea necunoscută/ *Difference in the thermal expansion coefficients between the unknown and the reference gauge block*	triangular	B	$-200\cdot10^{-9}$ mm	$-16\cdot10^{-6}$ mm
Abaterea mediei temperaturii calei necunoscute şi a celei etalon față de temperatura de referință/ *Deviation of the average temperature of the unknown and the standard gauge block from the reference temperature*	rectangular	B	$840\cdot10^{-9}$ mm	$4.6\cdot10^{-6}$ mm
Corecții pentru termenii de ordinul doi ($\delta\alpha*\Delta t_{av}$)/ *Correction for second order terms of ($\delta\alpha*\Delta t_{av}$)*	normal	B	$-470\cdot10^{-9}$ mm	$-14\cdot10^{-6}$ mm
Corecții pentru contactul excentric pe suprafața calei plan paralele necunoscută/ *Correction for non-central contacting of the measuring faces of the unknown gauge block*	rectangular	B	$-2.10\cdot10^{-6}$ mm	$-2.1\cdot10^{-6}$ mm
Incertitudinea standard combinată/ ***Combined standard uncertainty***			**$21.2\cdot10^{-6}$ mm**	**$34.90\cdot10^{-6}$ mm**

Lungimea calei plan paralele de etalonat l_x şi incertitudinea asociată u_{lx} au fost calculate cu următoarea relație:

$$l_x=l_s+\delta l_D+\delta l+\delta l_c-L*(\alpha_{av}*\delta t+\delta\alpha*\Delta t_{av}+u_{at})-\delta l_v \quad (5)$$

unde:

l_s este lungimea calei plan paralele de referință la temperatura de referință de t_0 =20 °C în acord cu certificatul de etalonare;

δl_D - schimbarea lungimii calei plan paralele de referință de la etalonare datorată driftului;

δl - diferența măsurată între cala plan paralelă necunoscută şi cea de referință;

δl_c - corecția pentru neliniaritatea şi offsetul comparatorului;

L - lungimea nominală a calei plan paralele considerate;

α_{av} - media coeficienților de dilatare termică ai calei plan paralele necunoscută şi cea de referință;

δt - diferența temperaturii calei necunoscute față de cea a calei de referință;

δ_α - diferența dintre coeficientul de dilatare termică al calei necunoscute şi a celei de referință;

Δt_{av} - deviația de la media temperaturii calei necunoscute şi a celei de referință față de temperatura de referință;

u_{at} - corecția pentru termenii de ordinul doi $\delta\alpha*\Delta\tau_{\alpha\varpi}$);

δl_v - corecția pentru contactul excentric pe suprafața calei plan paralele de etalonat.

În tabelul 3 se prezintă evaluarea incertitudinii la etalonarea calei plan paralele de 150 mm şi a celei de 900 mm.

5. COMPARAREA REZULTATELOR CU VALORILE DE REFERINȚĂ

În proiectul EUROMET.L-K1.1 Etalonarea interferențială a calelor plan paralele valoarea de referință x_{ref} şi incertitudinea asociată acestei valori u_{ref} au fost considerate ca valori de consens ale tuturor laboratoarelor şi au fost calculate de laboratorul pilot cu ajutorul următoarei relații [4]:

$$x_{ref} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \quad (6)$$

$$u(x_{ref}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_{ref})^2} \quad (7)$$

În proiectele EUROMET.L-S12 Etalonarea calelor plan paralele prin comparație mecanică şi EUROMET.L-K2 Etalonarea calelor plan paralele mari, datorită diferențelor mari ale incertitudinilor s-a propus să se folosească media ponderată pentru determinarea valorii de referință x_{ref}.

The length of the gauge block to be calibrated l_x and its associated uncertainty u_{lx} are calculated using the following relationships:

$$l_x=l_s+\delta l_D+\delta l+\delta l_c-L*(\alpha_{av}*\delta t+\delta\alpha*\Delta t_{av}+u_{at})-\delta l_v \quad (5)$$

where:

l_s is the length of the reference gauge block at the reference temperature of t_0 =20 °C according to its calibration certificate;

δl_D - change of the length of the reference gauge block since its last calibration due to the drift;

δl - observed difference in length between the unknown and the reference gauge block;

δl_c - correction for non-linearity and offset of the comparator;

L - nominal length of the gauge blocks under consideration;

α_{av} - average of the thermal expansion coefficients of the unknown and the reference gauge;

δt - difference of temperature between the unknown and the reference gauge block;

$\delta\alpha$ - difference in the thermal expansion coefficients between the unknown and the reference gauge block;

Δt_{av} - deviation of the average temperature of the unknown and the standard gauge block from the reference temperature;

u_{at} - correction for second order terms of $\delta\alpha*\Delta\tau_{\alpha\varpi}$);

δl_v - correction for non-central contacting of the measuring faces of the unknown gauge.

In Table 3 are given uncertainties evaluation for 150 mm gauge block and for 900 mm gauge block.

5. COMPARISON OF RESULTS TO THE REFERENCE VALUES

In the Calibration of Gauge Blocks by Interferometer project, the reference value x_{ref} and its associated uncertainty u_{ref} considered as consensus value for all participating laboratories were calculated by the pilot laboratory using the following relationships [4]:

$$x_{ref} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \quad (6)$$

$$u(x_{ref}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_{ref})^2} \quad (7)$$

In the EUROMET.L-S12 Calibration of gauge blocks by mechanical comparison and EUROMET.L-K2 Calibration of long gauge blocks projects, due to the large differences in the stated uncertainties, it was proposed to use the weighted mean for determining the reference value

Tabelul 3. **Evaluarea incertitudinii pentru cala plan paralelă de 150 mm şi pentru cea de 900 mm**

Table 3. ***Uncertainty evaluation for 150 mm gauge block and for 900 mm gauge block***

x_i	$u(x_i)$	ν_i	$c_i = \partial l/\partial x_i$	$u_i(l=150\ mm)$ / nm	$u_i(l= 900\ mm)$ / nm
l_s	$17.0\cdot10^{-6}$ mm	8	1.0	$17\cdot10^{-6}$ mm	$33.5\cdot10^{-6}$ mm
δl_D	$577\cdot10^{-9}$ mm	50	1.0	$577\cdot10^{-9}$ mm	$577\cdot10^{-9}$ mm
δl	$24.3\cdot10^{-6}$ mm	11	1.0	$24.3\cdot10^{-6}$ mm	$13.7\cdot10^{-6}$ mm
δl_c	$30.0\cdot10^{-6}$ mm	8	1.0	$30\cdot10^{-6}$ mm	$30\cdot10^{-6}$ mm
α_{av}	$41.6\cdot10^{-9}$ K^{-1}		0.0	0.0 mm	0.0 mm
δt	0.0577 K	8	$-L\cdot\alpha_{av} = -1.7\cdot10^{-3}$	$-0.66\cdot10^{6}L=-99\cdot10^{-6}$ mm	$-0.32\cdot10^{-6}\cdot L = -160\cdot10^{-6}$ mm
δ_α	$408\cdot10^{-9}$ K^{-1}	50	$-L\cdot\Delta t_{av} = -90$	$-0.247\cdot10^{6}\cdot L=-37\cdot10^{6}$ mm	$-0.24\cdot10^{-6}\cdot L = -120\cdot10^{-6}$ mm
Δt_{av}	0.289 K	11	$-L\cdot\delta_\alpha = -15\cdot10^{-6}$	$-0.029\cdot10^{6}L=-4.3\cdot10^{-6}$mm	$-0.098\cdot10^{-6}\cdot L = -49\cdot10^{-6}$ mm
u_{at}	$236\cdot10^{-9}$	50	$-L = -150$	$-0.233\cdot10^{6}\cdot L=-35\cdot10^{6}$ mm	$-0.24\cdot10^{-6}\cdot L = -120\cdot10^{-6}$ mm
δl_v	$6.18\cdot10^{-6}$ mm	50	-1.0	$-6.18\cdot10^{-6}$ mm	$-6.18\cdot10^{-6}$ mm
Incertitudinea standard combinată/ *Combined standard uncertainty*				$\sqrt{42.5^2 + 0.743^2 L^2}$ **=120 nm**	$\sqrt{88,9^2 + 0.478^2 L^2}$ **=439 nm**

Aceasta a fost calculată ca media tuturor valorilor măsurate şi ponderate cu inversul rădăcinii pătrate a incertitudinilor $u(x_i)$ asociate măsurărilor [5, 7]:

$$x_{ref} = \frac{\sum_{j=1}^{m} u_j^{-2} \cdot x_j}{\sum_{j=1}^{m} u_j^{-2}} \qquad (8)$$

Incertitudinea standard $u(x_{ref})$ a valorii de referinţă se calculează combinând incertitudinile individuale [5, 7]:

$$u_{ref} = \left(\sum_{j=1}^{m} u_j^{-2} \right)^{-1/2} \qquad (9)$$

Laboratorul pilot contribuie la valoarea de referinţă doar cu primele rezultate.

În figurile de la 1 la 5 sunt prezentate abaterile (deviaţiile) de la lungimea nominală (Δx) măsurate pentru calele plan paralele din oţel şi pentru cele din carbură de tungsten. Toate rezultatele sunt în nm [4, 5, 7].

Eroarea normalizată numită şi "criteriu E_n" este determinată pentru a verifica compatibilitatea internă între un rezultat particular măsurat şi valoarea sa de referinţă [4, 5, 7]:

$$E_n = \frac{1}{k} \times \frac{x_i - x_{ref}}{\sqrt{u_i^2 - u_{ref}^2}} \qquad (10)$$

Criteriul de acceptare este $|E_n| £ 1$.

Varianţa valorilor interne ale laboratorului INM este mică.. Pentru toate rezultatele INM eroarea normalizată a fost $|E_n| £ 1$.

This is calculated by the mean of all measurement values x_i weighted by the inverse square of the standard uncertainties $u(x_i)$ associated with the measurements [5, 7]:

$$x_{ref} = \frac{\sum_{j=1}^{m} u_j^{-2} \cdot x_j}{\sum_{j=1}^{m} u_j^{-2}} \qquad (8)$$

The standard uncertainty $u(x_{ref})$ of the reference value is calculated by combining the individual uncertainties [5, 7]:

$$u_{ref} = \left(\sum_{j=1}^{m} u_j^{-2} \right)^{-1/2} \qquad (9)$$

The pilot laboratory contributed only by its first measurement to the reference values.

In Figures 1 to 5 are given the differences of measured lengths (Δx) of steel and tungsten carbide gauge block with respect to the nominal values. All results are in nm [4, 5, 7].

The normalized error so-called "E_n – criterion" is evaluated in order to check the internal consistence between the result of a particular measurement and the reference value:

$$E_n = \frac{1}{k} \times \frac{x_i - x_{ref}}{\sqrt{u_i^2 - u_{ref}^2}} \qquad (10)$$

The acceptance criteria is $|E_n| £ 1$.

The variance of values inside of a INM laboratory is small. For all INM results, normalized error was $|E_n| £ 1$.

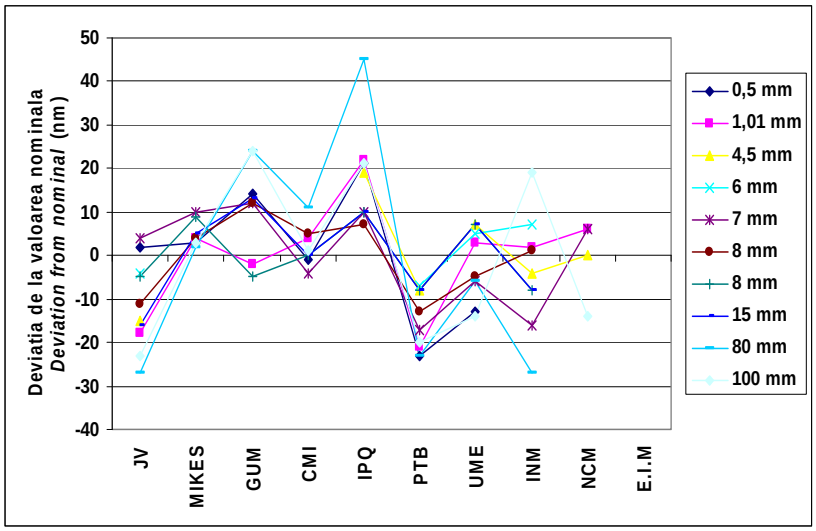


Fig. 1. EUROMET.L-K1.1 - Compararea rezultatelor pentru calele plan paralele din oțel.
Fig. 1. *EUROMET.L-K1.1 - Comparison of results of steel gauge block.*

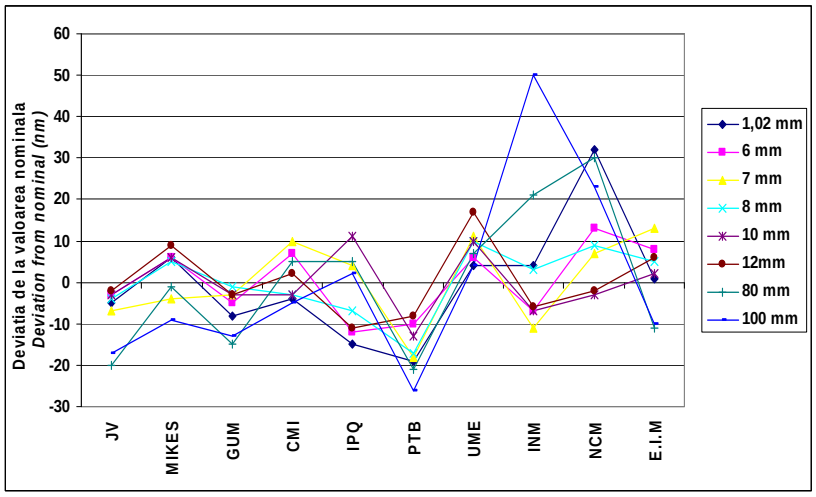


Fig. 2. EUROMET.L-K1.1 - Compararea rezultatelor pentru calele plan paralele din carbură.
Fig. 2. *EUROMET.L-K1.1 - Comparison of results of carbide gauge block.*

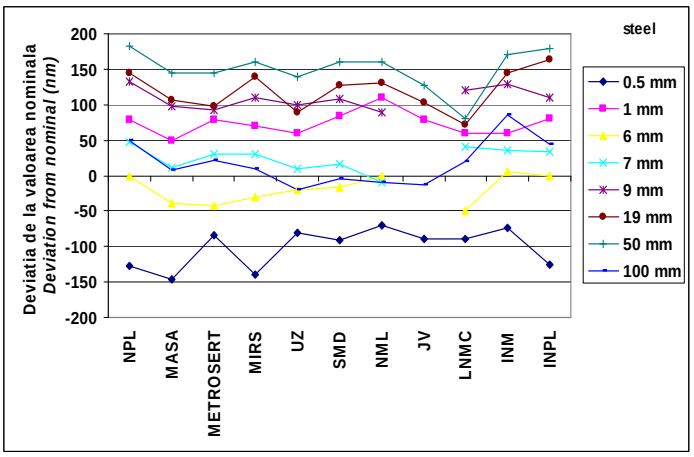


Fig. 3. EUROMET.L-K1.1 - Compararea rezultatelor pentru calele plan paralele din oțel.
Fig. 3. *EUROMET.L-S12- Comparison of results of steel gauge block.*

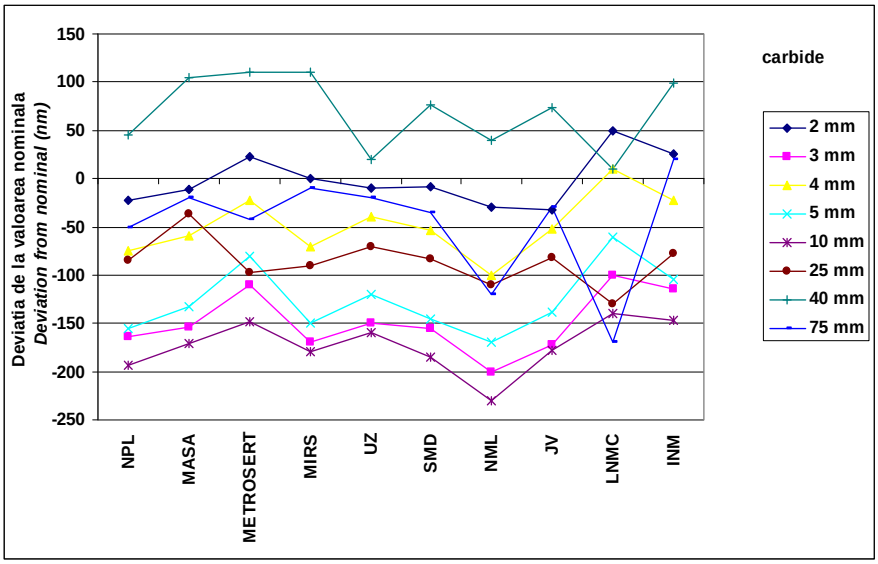


Fig. 4. EUROMET.L-K1.1 - Compararea rezultatelor pentru calele plan paralele din carbură.
Fig. 4. *EUROMET.L-S12- - Comparison of results of carbide gauge block.*

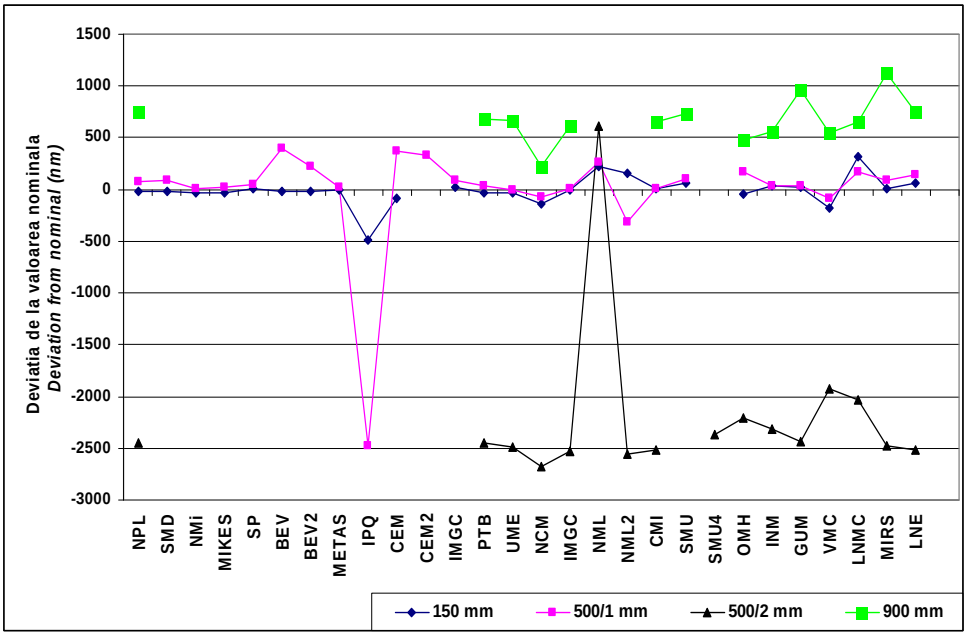


Fig. 5. EUROMET.L-K2 – Compararea rezultatelor.
Fig. 5. *EUROMET.L-K2 - Comparison of results.*

6. CONCLUZII

Principalul obiectiv al acestor comparări cheie şi suplimentare a fost de a determina gradul în care rezultatele măsurării calelor plan paralele realizate de INM-urile interesate sunt echivalente.

Astfel a rezultat un set de date, care pot fi utilizate de comunitatea metrologică, pentru a vedea gradul de echivalenţă al INM în etalonarea calelor plan paralele. Este un bun prilej ca, în lumina acestor comparări cheie, fiecare laborator participant să ana-

6. CONCLUSIONS

The principal aim of these key and supplementary comparisons were to determine the degree on which results of measurement of gauge blocks made by a selection of NMIs can be deemed to be equivalent.

This has resulted in a set of data which can be used by the metrology community to gain insight into degrees of equivalence of NMI measurements of gauge blocks. It would be useful for each par-

lizeze rezultatele sale şi procesul de măsurare şi pentru obținerea unui impact semnificativ să disemineze rezultatele sale altor laboratoare.

Metodele de etalonare prezentate în această lucrare au fost realizate şi puse în practică de laboratorul specializat al INM.

Rezultatele experimentale şi incertitudinile de măsurare asociate pentru laboratorul INM au demonstrat un grad bun de echivalență în raport cu rezultatele altor laboratoare naționale cu experiență. În consecință, capabilitățile INM de măsurare şi etalonare din acest domeniu au fost recunoscute internațional în cadrul aranjamentului de recunoaştere mutuală [6] şi aceste etalonări au fost incluse în banca de date BIPM, astfel:

ticipant to examine their results and measurement processes in the light of these key comparisons, and seek explanations for any significant offsets of their results from those of other laboratories.

Calibration measurement methods presented in this paper were used and put in practice at the INM specialised laboratory.

Experimental results and the associated measurement uncertainty of INM laboratory are in good agreement with the reported results by other experienced national laboratories. As a consequence, the measurement capabilities of INM in this field were recognised in the framework of mutual recognition arrangement at international level [6] and these kinds of calibration are included in the BIPM-database, as it follows:

România, INM (Institutul Național de Metrologie)	**Romania, INM (National Institute of Metrology)**
Etaloane de capăt. Cale plan paralele: lungimea centrală L, 0.5 mm la 100 mm Incertitudinea absolută extinsă ($k = 2$, nivel de încredere 95%) în nm: Q[30, 0.2L], L în mm Interferometric, fracțiuni de franje Aprobat în 22 Martie 2005 Numărul INM intern de identificare al serviciului: INM/2	End standard. Gauge blocks: central length L, 0.5 mm to 100 mm Absolute expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in nm: Q[30, 0.2L], L in mm Interferometry, exact fractions Approved on 22 March 2005 Internal NMI service identifier: INM/2
Etaloane de capăt. Cale plan paralele: lungimea centrală L, 0.5 mm la 100 mm Incertitudinea absolută extinsă ($k = 2$, nivel de încredere 95%) în nm: Q[50, 0.5L], L în mm Comparație mecanică Aprobat în 22 Martie 2005 Numărul INM intern de identificare al serviciului: INM/3	End standard. Gauge blocks: central length L, 0.5 mm to 100 mm Absolute expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in nm: Q[50, 0.5L], L in mm Mechanical comparison Approved on 22 March 2005 Internal NMI service identifier: INM/3
Etaloane de capăt. Cale plan paralele mari: lungimea centrală L, 100 mm la 1000 mm Incertitudinea absolută extinsă ($k = 2$, nivel de încredere 95%) în nm: Q[100, 0.9L], L în mm Comparație mecanică Aprobat în 04 Mai 2006 Orientare: orizontal Numărul INM intern de identificare al serviciului: INM/10	End standards. Long gauge block: central length L, 100 mm to 1000 mm Absolute expanded uncertainty ($k = 2$, level of confidence 95%) in nm: Q[100, 0.9L], L in mm 1000 mm Mechanical comparison Orientation: horizontal Approved on 04 May 2006 Internal NMI service identifier: INM/10

BIBLIOGRAFIE

[1] CIPM Mutual Recognition Arrangement, The BIPM key comparison database.
[2] BIPM. Guidelines for CIPM key comparisons, The BIPM key comparison database.
[3] Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organisation of Standardisation (ISO), Geneva, 1993.
[4] EUROMET.L-K1.1: Calibration of Gauge Blocks by Interferometry, Final Report, The BIPM key comparison database.
[5] EUROMET.L-K2: Calibration of long gauge blocks.
[6] Calibration and Measurement Capabilities – CMCs, The BIPM database.
[7] EUROMET.L-S16: Calibration of gauge blocks by mechanical comparison, Final Report, The BIPM key comparison database.

REFERENCES

[1] CIPM Mutual Recognition Arrangement, The BIPM key comparison database.
[2] BIPM. Guidelines for CIPM key comparisons, The BIPM key comparison database.
[3] Guide to the expression of uncertainty in measurement. International Organisation of Standardisation (ISO), Geneva, 1993.
[4] EUROMET.L-K1.1: Calibration of Gauge Blocks by Interferometry, Final Report, The BIPM key comparison database.
[5] EUROMET.L-K2: Calibration of long gauge blocks
[6] Calibration and Measurement Capabilities – CMCs, The BIPM database.
[7] EUROMET.L-S16: Calibration of gauge blocks by mechanical comparison, Final Report, The BIPM key comparison database.

Revizia ştiinţifică a articolului:
Dragoş BOICIUC, doctor, cercetător ştiinţific gradul I, director INM, e-mail: dragos.boiciuc@inm.ro

Despre autor:
Alexandru DUŢĂ – doctor inginer, cercetător ştiinţific gradul II, Şef al Laboratorului Lungimi al Institutului Naţional de Metrologie, e-mail: alexandru.duta@inm.ro

Revizia ştiinţifică a articolului:
Dragoş BOICIUC, doctor, scientific researcher Ist degree, director of INM, e-mail: dragos.boiciuc@inm.ro

About the author:
Alexandru DUŢĂ – doctor engineer, main scientific researcher 2nd degree, Head of Length Laboratory at the National Institute of Metrology, e-mail: alexandru.duta@inm.ro