A large industrial scale, likely a Kettler model, is visible in the background. It features a complex system of horizontal beams, vertical supports, and a large cylindrical base. The scale is made of metal and is mounted on a sturdy frame. The background is slightly blurred, emphasizing the text in the foreground.

# Еталони за маса. Класификация. Съхранение. Анализ. Определяне период на калибриране.

Цветомир Петков  
БИМ, ГД НЦМ, отдел МИ  
[Ts.Petkov@ bim.government.bg](mailto:Ts.Petkov@bim.government.bg)

# През 1911 г., България получава своите първи национални еталони

за маса



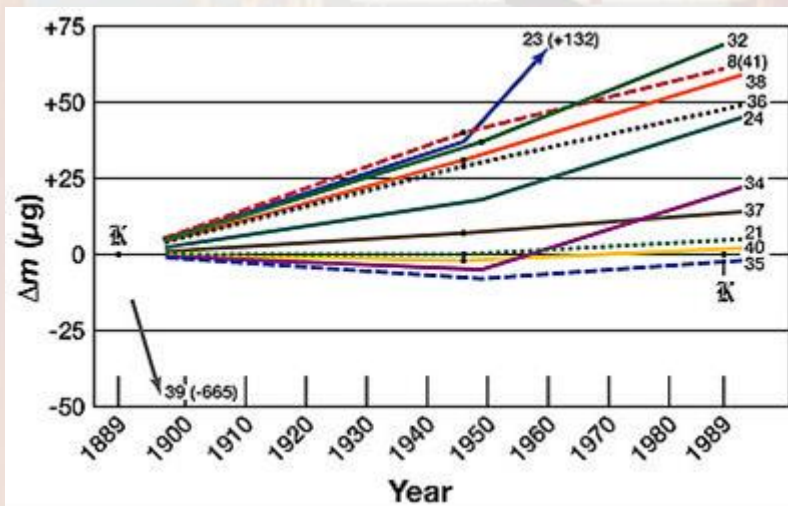
и за дължина




# Промяната на международния прототип на Килограма през годините

BIPM регулярно прави корекции на резултатите от калибриранията на националните еталони, последната такава промяна за БИМ беше през 2015 г.

Сравнение между Международния протоип на килограма и някои негови копия през годините



  
**BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES**  
Pavillon de Breteuil, F - 92312 Sèvres Cedex

No. A-S-123 26 May 2015

AMENDMENT TO CERTIFICATE No. 50  
of 24 September 2010

for 1 kg mass standard in stainless steel, designated  
No. 11116701  
belonging to the  
Bulgarian Institute for Metrology  
(BIM)  
Sofia, Bulgaria

Description

In 2014, the BIPM carried out an Extraordinary Calibration using the International Prototype of the Kilogram. This calibration brought to light the existence of an offset in the BIPM as-maintained mass unit. As a consequence, and as recommended by the CCM in February 2015, mass calibrations of national prototypes and of mass standards issued by the BIPM during the years 2003-2013 should be amended.

Revised mass value

The mass value reported in the original certificate was the following:


1 kg - 0.105 mg

with a combined standard uncertainty  $u_c$  ( $k = 1$ ) of 0.015 mg.

The amended mass value determined for standard No. 11116701 for its date of measurement from 19 to 22 July 2010 is:

1 kg - 0.137 mg

with a combined standard uncertainty  $u_c$  ( $k = 1$ ) of 0.015 mg.

  
M. Stock  
Interim Director of the Mass Department

# Нова дефиниция на килограма

The kilogram, symbol kg, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant  $h$  to be  $6.62607015 \times 10^{-34}$  when expressed in the unit J·s, which is equal to  $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , where the metre and the second are defined in terms of  $c$  and  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$

$$1\text{kg} = \frac{299792458^2}{(9192631770)6.2607015 \times 10^{-34}} \frac{h\Delta\nu_{\text{Cs}}}{c^2}$$



# Преходът

- ВІРМ ще продължи да осигурява проследимост;
- Консенсусна стойност;
- Промяна на неопределеностите, които ВІРМ декларира в своите сертификати;
- Промяна в СМС редовете на NMI.

# ПРЕХОДЪТ



# ПРЕХОДЪТ

Четири стъпки необходими за преминаването от Международен прототип на килограма към фундаментална константа - the 17<sup>th</sup> CCM meeting, 16-17 May 2019

Phase	Time scale	Description	Source of traceability	Uncertainty of BIPM mass calibrations	Role of realization experiments	Dissemination of mass from NMIs with realization experiments
0	Until 20 May 19 <sup>1</sup>	Traceability to the IPK	$m_{\text{IPK}} \equiv 1 \text{ kg}$ $u_{m_{\text{IPK}}} \equiv 0$	$u_{\text{stab}}(t)$	Measurement of $h$	Dissemination from national prototype traceable to IPK
1	20 May 19 - date 1 <sup>2</sup>	Traceability to the Planck constant via the IPK, with additional uncertainty from the (new) definition	$m_{\text{IPK}} = 1 \text{ kg}$ $u_{m_{\text{IPK}}} = 10 \mu\text{g}$	$\approx \sqrt{u_{m_{\text{IPK}}}^2 + u_{\text{stab}}^2(t)}$	Contribute to Key Comparison (KC), improve and resolve discrepancies	Dissemination from national prototype traceable to IPK, with 10 $\mu\text{g}$ added uncertainty
2	date 1 – date 2 <sup>3</sup>	Traceability to the Planck constant, dissemination from a consensus value <sup>4</sup> (CV)	Consensus value (CV)	$\approx \sqrt{u_{\text{CV}}^2 + u_{\text{stab}}^2(t)}$	contribute to CV (via KC), improve experiments and resolve discrepancies	Dissemination from consensus value with uncertainty $\approx \sqrt{u_{\text{CV}}^2 + u_{\text{stab.NMI}}^2(t)}$
3	from date 2	Traceability to the Planck constant, dissemination by individual realizations	Fixed value of $h$ $u(h) \equiv 0$	(Uncertainty of BIPM realization experiment)	Realization of the unit of mass, Participation in KCs to demonstrate equivalence	Dissemination from validated realization experiments with the uncertainty of the experiment. The terms of the CIPM MRA are applicable.

# Еталони за маса





# Еталони за маса

Nominal value*	Class E <sub>1</sub>	Class E <sub>2</sub>	Class F <sub>1</sub>	Class F <sub>2</sub>	Class M <sub>1</sub>	Class M <sub>1-2</sub>	Class M <sub>2</sub>	Class M <sub>2-3</sub>	Class M <sub>3</sub>
5 000 kg			25 000	80 000	250 000	500 000	800 000	1 600 000	2 500 000
2 000 kg			10 000	30 000	100 000	200 000	300 000	600 000	1 000 000
1 000 kg		1 600	5 000	16 000	50 000	100 000	160 000	300 000	500 000
500 kg		800	2 500	8 000	25 000	50 000	80 000	160 000	250 000
200 kg		300	1 000	3 000	10 000	20 000	30 000	60 000	100 000
100 kg		160	500	1 600	5 000	10 000	16 000	30 000	50 000
50 kg	25	80	250	800	2 500	5 000	8 000	16 000	25 000
20 kg	10	30	100	300	1 000		3 000		10 000
10 kg	5.0	16	50	160	500		1 600		5 000
5 kg	2.5	8.0	25	80	250		800		2 500
2 kg	1.0	3.0	10	30	100		300		1 000
1 kg	0.5	1.6	5.0	16	50		160		500
500 g	0.25	0.8	2.5	8.0	25		80		250
200 g	0.10	0.3	1.0	3.0	10		30		100
100 g	0.05	0.16	0.5	1.6	5.0		16		50
50 g	0.03	0.10	0.3	1.0	3.0		10		30
20 g	0.025	0.08	0.25	0.8	2.5		8.0		25
10 g	0.020	0.06	0.20	0.6	2.0		6.0		20
5 g	0.016	0.05	0.16	0.5	1.6		5.0		16
2 g	0.012	0.04	0.12	0.4	1.2		4.0		12
1 g	0.010	0.03	0.10	0.3	1.0		3.0		10
500 mg	0.008	0.025	0.08	0.25	0.8		2.5		
200 mg	0.006	0.020	0.06	0.20	0.6		2.0		
100 mg	0.005	0.016	0.05	0.16	0.5		1.6		
50 mg	0.004	0.012	0.04	0.12	0.4				
20 mg	0.003	0.010	0.03	0.10	0.3				
10 mg	0.003	0.008	0.025	0.08	0.25				
5 mg	0.003	0.006	0.020	0.06	0.20				
2 mg	0.003	0.006	0.020	0.06	0.20				
1 mg	0.003	0.006	0.020	0.06	0.20				

# Съхранение



# Съхранение



# Свидетелство за калибриране

Пряко сравнение с еталонни теглилки, по "методика за калибриране на теглилки и комплекти теглилки по метода на пряко сравнение" код: ИМОП-МК 02-01/2012-kg m  
*Direct comparison with standard weights, by "Calibration procedure of weights and weight sets by the direct comparison method" MMVD-CP 02-01/2012-kg m*

Условия, при които е извършено калибрирането:  
*Conditions under which the calibration was performed:*

	от/ from	до/ to	Разширена неопределеност <i>Expanded uncertainty</i>
Температура, °C <i>Temperature, °C</i>	21,5	21,6	0,1
Относителна влажност, %rh <i>Relative humidity, %rh</i>	36,1	36,1	2,0
Атмосферно налягане, hPa <i>Pressure, hPa</i>	962,3	962,5	0,2

Метрологична проследимост:  
*Metrological traceability:*

Работен еталон 40503310, свидетелство за калибриране № 21В-ИМОП/ 24.08.2018 г.  
*Working standard 40503310, calibration certificate № 21В-MMVD/ 24.08.2018.*

Резултати и неопределеност на измерването:  
*Results and measurement uncertainty:*

Номинална маса, <i>Nominal mass,</i> g	Конвенционална маса, <i>Conventional mass,</i> g	Разширена неопределеност, <i>Expanded uncertainty,</i> mg
100	100,000070	0,025

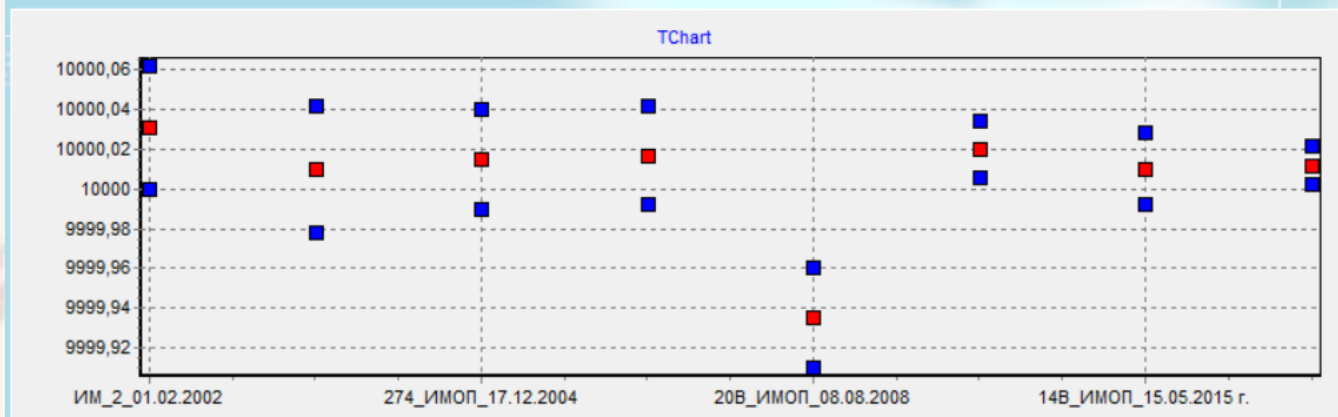
Обявената разширена неопределеност на измерване е получена като произведение на комбинираната стандартна неопределеност и множителя на покритие  $k = 2$ , което за



# Анализ на данните от Свидетелството за калибриране

Сертификат	Действителна маса	Неопределеност	Конвенционална маса	Неопределен	Разлика дейс	Разлика коне
ИМ_2_01.02.2002	0	0	10000.031	31	0.000	0.000
51_ИМОП_28.05.2003	0	0	10000.01	32	0.000	21.000
274_ИМОП_17.12.2004	0	0	10000.015	25	0.000	5.000
5В_ИМОП_05.05.2006	0	0	10000.017	25	0.000	2.000
20В_ИМОП_08.08.2008	0	0	9999.935	25	0.000	82.000
6В_ИМОП_05.01.2012 г.	10000.02	15	10000.02	14	85	85.000
14В_ИМОП_15.05.2015 г.			10000.01	18		10.000
26В_ИМОП_31.08.2018 г.			10000.012	10		2.000

40503363  
 40503304  
 40503305  
 40503306  
 40503307  
 40503308  
 40503310  
 40503309  
 40503313  
 15930  
 15889  
 15872  
 15873  
 ZJ1  
 1340206  
 15880  
 10  
 3-03  
 3-01  
 3-02  
 12  
 2  
 26  
 1330206



# Калибриране на еталони

## СЪЩНОСТ НА МЕТОДА

Клас на точност	$E_1$	$E_2$	$F_1$	$F_2$	$M_1, M_{1-2}, M_2, M_{2-3}$ и $M_3$
Процедура					
ABBA	3	2	1	1	1
ABA	5	3	2	1	1
A B <sub>1</sub> ... B <sub>n</sub> A	5	3	2	1	1

## ИЗИСКВАНИЯ КЪМ ЕТАЛОНИТЕ

## ИЗИСКВАНИЯ КЪМ СПОМАГАТЕЛНОТО ОБОРУДВАНЕ

## ИЗИСКВАНИЯ КЪМ УСЛОВИЯТА НА ЗАОБИКАЛЯЩАТА СРЕДА

Теглилки клас на точност	Температурни промени
$E_1$	$\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ с max от $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 12 h
$E_2$	$\pm 0.7\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ с max от $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 12 h
$F_1$	$\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ с max от $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 12 h
$F_2$	$\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ с max от $\pm 3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 12 h
$M_1$	$\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ с max от $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ за 12 h

Теглилки клас на точност	Относителна влажност на въздуха
$E_1$	40÷60 % с max $\pm 5\%$ за 4 h
$E_2$	40÷60 % с max $\pm 10\%$ за 4 h
F	40÷60 % с max $\pm 15\%$ за 4 h

# Сравняване на калибрираната теглилка с еталонна

$$\Delta I_i = (I_{t1i} - I_{r1i} - I_{r2i} + I_{t2i})/2 \quad - ABBA$$

$$\Delta I_i = I_{t1i} - (I_{r1i} + I_{r2i})/2 \quad -ABA$$

Средноаритметичната стойност на разликата

$$\overline{\Delta I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta I_i)$$

# Математически модел при определяне на действителната маса

$$m_t = m_r + \delta m + \delta C + \delta m_D + \delta m_k$$

където:

$m_r$  - масата на еталонната теглилка;

$\delta m$  - оценка на корекцията на масата на калибрираната теглилка дължаща се на разликата между масите на еталона и на калибрираната теглилка;

$\delta C$  - оценка на корекцията на масата на калибрираната теглилка, дължаща се на изтласкващата сила на въздуха;

$\delta m_D$  - оценка на корекцията дължаща се на промяната на стойността на масата на еталонната теглилка с времето (дрейф);

$\delta m_k$  - оценка на корекциите, дължащи се на компаратора - повтораемост, възпроизводимост, разделителна способност, линейност, магнитни взаимодействия и ефект при ексцентрично натоварване на теглилките.



# Корекция от изталаскващата сила на въздуха

$$\delta C = \rho_a (V_t - V_r)$$

където:

$V_r$  - обем на еталонната теглилка;

$V_t$  - обем на калибрираната теглилка;

$\rho_a$  - плътността на въздуха по време на калибрирането.

$$\delta C = \frac{(\rho_r - \rho_t) \cdot \rho_a}{\rho_r \cdot (\rho_t - \rho_a)}$$

където

$\rho_a$  - плътността на въздуха по време на калибрирането

$\rho_r, \rho_t$  са плътностите на еталонната и калибрираната теглилка.

## ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ПЛЪТНОСТТА НА ВЪЗДУХА

Плътността на въздуха се определя от формулата на CIPM-2007:

$$\rho_a = \frac{p \times M_a}{ZRT} \left[ 1 - \chi_v \left( 1 - \frac{M_v}{M_a} \right) \right]$$

където:

$p$  - е атмосферното налягане в Pa;

$M_a$  - е моларната маса на сухия въздух =  $28.965\ 46 \cdot 10^{-3}$  kg mol<sup>-1</sup>

$Z$  - е коефициент на свиваемост;

$R$  - е моларната газова константа =  $8.314\ 472(15)$  J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>;

$T$  - е термодинамична температура в K;

$\chi_v$  - е моларната част на водните пари;

$M_v$  - е моларната маса на водата в g.mol<sup>-1</sup>.

$$M_a = \left[ 28.96546 + 12.011 (\chi_{CO_2} - 0.0004) \right] \times 10^{-3} \quad \text{kg/mol}$$

При  $\chi_{CO_2} = 0.0004$  ( $10^{-3}$ .kg.KJ<sup>-1</sup>)

$$\chi_v = (hr) f(p, t) \frac{p_{sv}(t)}{p} = f(p, t_r) \frac{p_{sv}(t_r)}{p}$$

където:

$p$  - е атмосферно налягане;

$t$  - е температурата изразена в °C;

$hr$  - е относителна влажност на въздуха изразена в дробни части;

$p_{sv}(t)$  - е налягането на наситените пари на водата;

## ОПРЕДЕЛЯНЕ НА КОНВЕНЦИОНАЛНАТА МАСА

$$m_{ct} = m_{cr} + \delta m_c + \delta C + \delta m_D + \delta m_k$$

$$m_{ct} = \left(1 - \frac{\rho_0}{8000}\right)^{-1} \times (m_t - \rho_0 V_t)$$

$$\delta C = m_{cr} C$$

където:

$$C = (\rho_a - \rho_0) \left[ \frac{1}{\rho_t} - \frac{1}{\rho_r} \right]$$

$\rho_a$  - плътността на въздуха по време на калибрирането;

$\rho_0$  - 1,2 kg/m<sup>3</sup> е изходната стойност на плътността на въздуха при 20 °C, съгласно рекомендация на OIML R33;

$\rho_r$ ,  $\rho_t$  са плътностите на еталонната и калибрираната теглилка.

## Стандартна неопределеност на масата на еталонната теглилка

Стандартната неопределеност на масата на еталонната теглилка –действителна или конвенционална, се оценява от разширената стандартна неопределеност  **$U$**  дадена в свидетелството за калибриране и множител на покритие  **$k$**  за определено ниво на доверителна вероятност.

$$u(m_r) = \frac{U}{k} \quad \text{или} \quad u(m_{cr}) = \frac{U}{k}$$



# СТАНДАРТНА НЕОПРЕДЕЛЕНОСТ ОТ НЕСТАБИЛНОСТ НА МАСАТА НА ЕТАЛОННАТА ТЕГЛИЛКА

$$u_D(m_r) = \frac{D}{2\sqrt{3}}$$

## Стандартна неопределеност на корекцията на масата от изтласкващата сила на въздуха

Стандартната неопределеност на корекцията на масата от изтласкващата сила на въздуха се оценява от:

$$u_b^2 = (-\rho_a \times u(V_r))^2 + (\rho_a \times u(V_t))^2 + ((V_t - V_r) \times u(\rho_a))^2$$

Когато обема е изчислен въз основа на плътността на тегилката присъединената неопределеност се определя от формулата:

$$u(V_t) = \frac{m_{nom.}}{\rho_t^2} \times u(\rho_t)$$

Стандартната неопределеност на корекцията от изтласкващата сила на въздуха при определяне на конвенционална маса при известна плътност се определя от:

$$u_b^2 = \left[ m_{cr} \frac{(\rho_r - \rho_t)}{\rho_r \rho_t} u(\rho_a) \right]^2 + [m_{cr} (\rho_a - \rho_0)]^2 \frac{u^2(\rho_t)}{\rho_t^4} - \\ - m_{cr}^2 (\rho_a - \rho_0) [(\rho_a - \rho_0) + 2(\rho_{al} - \rho_a)] \frac{u^2(\rho_r)}{\rho_r^4}$$

където  $\rho_{a_i}$  е плътността на въздуха при калибрирането на изходния еталон.

## СТАНДАРТНА НЕОПРЕДЕЛЕНОСТ НА ПЛЪТНОСТТА НА ВЪЗДУХА

Когато плътността на въздуха не се измерва по време на калибрирането, стандартната неопределеност на плътността на въздуха се оценява от:

$$u(\rho_a) = \frac{0.12}{\sqrt{3}}$$

При измерване на плътността на въздуха по време на калибрирането, стандартната неопределеност се определя от формулата:

$$u^2(\rho_a) = u_F^2 + \left[ \frac{\partial \rho_a}{\partial p} u_p \right]^2 + \left[ \frac{\partial \rho_a}{\partial t} u_t \right]^2 + \left[ \frac{\partial \rho_a}{\partial rh} u_{rh} \right]^2 + \left[ \frac{\partial \rho_{co_2}}{\partial co_2} u_{co_2} \right]^2$$

където:

$$u_F = 22 \times 10^{-6} \times \rho_a; \quad \frac{\partial \rho_a}{\partial p} \approx 1 \times \rho_a \times 10^{-5} Pa^{-1}; \quad \frac{\partial \rho_a}{\partial t} \approx -4 \times \rho_a \times 10^{-3} K^{-1}; \quad \frac{\partial \rho_a}{\partial rh} \approx -9 \times \rho_a \times 10^{-3};$$

$$\frac{\partial \rho_{co_2}}{\partial co_2} \approx 0.4 \times \rho_a$$

$$u_p^2 = \frac{(p_{max} - p_{min})^2}{12} + \left( \frac{U_p}{2} \right)^2 + \frac{|грешка|^2}{3}$$

$$u_t^2 = \frac{(t_{max} - t_{min})^2}{12} + \left( \frac{U_t}{2} \right)^2 + \frac{|грешка|^2}{3}$$

$$u_{hr}^2 = \frac{(hr_{max} - hr_{min})^2}{12} + \left( \frac{U_{hr}}{2} \right)^2 + \frac{|грешка|^2}{3}$$



## Стандартна неопределеност на резултата от измерване

$$u_w(\overline{\Delta m}) = \frac{s_w(\Delta m)}{\sqrt{n}}$$

стандартно отклонение на резултата от измерване е:

$$s_w^2(\Delta m) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta m_i - \overline{\Delta m})^2$$



Стандартна неопределеност на компаратора

$$u_k = \frac{U}{k}$$

## Комбинирана стандартна неопределеност

Комбинираната стандартна неопределеност се определя от:

$$u(m_t) = \sqrt{u_w^2(\Delta m) + u_b^2 + u_D^2(m_r) + u^2(m_r) + u_k^2}$$

Комбинираната стандартна неопределеност при преминаване от действителна към конвенционална маса на калибрираната теглилка е:

$$u(m_{ct}) = \sqrt{u^2(m_t) + \rho_0^2 u^2(V_t) - 2\rho_0 r(m_t, V_t) u(m_t) u(V_t)}$$

Корелационен коефициент между действителната маса и обема се определя от формулата:

$$r(m_t, V_t) = \frac{\rho_a \times u(V_t)}{u(m_t)}$$

## Разширена неопределеност

Разширената неопределеност на стойността на масата – действителната или конвенционалната е:

$$U = k \times u(m_t) \quad \text{или} \quad U = k \times u(m_{ct}) \quad (43)$$


Множителят на покритие **k** се определя в зависимост от броя на ефективните степени на свобода **v<sub>eff</sub>**, които се пресмятат по формулата:

$$v_{eff} = (n-1) \frac{u^4(m_t)}{u_w^4(\Delta m)} \quad (44)$$

Множителят на покритие **k**, съответстващ на различните степени на свобода **v<sub>eff</sub>** е посочен в таблицата по-долу:

<i>v<sub>eff</sub></i>	1	2	3	4	5	6	8	10	20	∞
k	13.97	4.53	3.31	2.87	2.65	2.52	2.37	2.28	2.13	2.00

Обикновено при калибриране на теглилки ефективните степени на свобода са над 100 и се прилага стандартния множител на покритие **k=2**.



**Благодаря Ви за  
вниманието!!!**

Цветомир Петков  
БИМ, ГД НЦМ, отдел МИ  
[Ts.Petkov@bim.government.bg](mailto:Ts.Petkov@bim.government.bg)