

# Změny v definicích základních fyzikálních jednotek SI a jejich dopad do cukrovarnictví

CHANGES IN DEFINITIONS OF SI BASE UNITS AND THEIR IMPACT ON SUGAR INDUSTRY

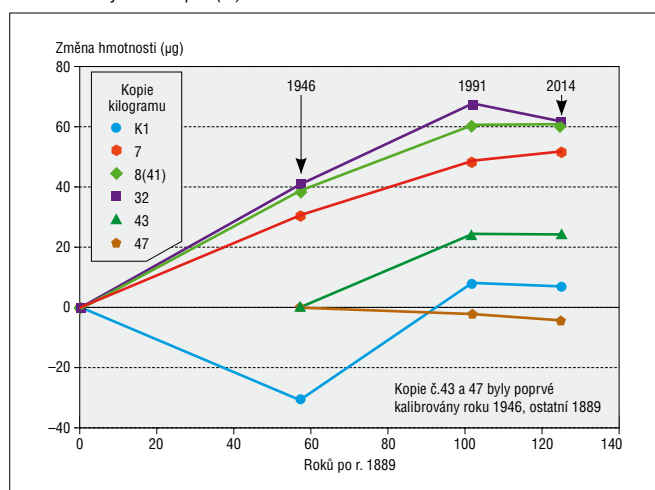
Jan Válek – Masarykova univerzita v Brně

Základní fyzikální jednotky hrají v jakémkoli průmyslu významnou roli. Nejinak je tomu v hospodářství a cukrovarnictví. Je potřeba si uvědomit, s jakými jednotkami se setkáváme v základních dokumentech, jako jsou například normy, výkaznictví, výroční zprávy, statistické ročenky. Při studiu dokumentů se setkáváme s problémy při srovnání jednotek imperiálních a jednotek ze soustavy SI nebo při měření hodnot příslušných veličin (1, 2). V cukrovarnictví ze soustavy SI používáme hmotnost (gram, kilogram, tuna), plochu (hektar, ar, kilometr čtvereční), objem (mililitr, litr, hektolitr). U hmotnosti hovoříme přímo o základní jednotce soustavy SI, a to o kilogramu, proto se mu v následujících odstavcích se budeme věnovat podrobněji.

## Kilogram jak jsme jej znali dříve

Kilogram, jako jediná ze základních jednotek soustavy SI, nebyl definován pomocí jiných veličin, ale pouze pomocí svého vlastního etalonu. Změna nastala 20. 5. 2019, kdy byla zavedena nová definice kilogramu. Nejprve si zkapitulujeme vývoj definice kilogramu.

Obr. 1. Změna hmotnosti Mezinárodního prototypu kilogramu a jeho kopií (8)



Pozn.: Vliv čistících procedur na hmotnost Mezinárodního prototypu kilogramu, jeho šesti kopií. Křivky demonstrují změnu jejich hmotností po jednotlivých čistěních. Hmotnosti kopií jsou vztahovány k Mezinárodnímu prototypu, jedná se tedy o relativní změny hmotností. V grafu jsou uvedeny hmotnosti Mezinárodního prototypu kilogramu a jeho šesti ověřovacích kopií, všechny uložené v Sèvres u Paříže, podobně na to budou také národní etalony kilogramu.

Vývoj definice kilogramu lze vypočítat do roku 1795, kdy ve Francii byl v důsledku reformy po Francouzské revoluci přijat gram „jako hmotnost jednoho krychlového centimetru vody za teploty tajícího ledu“ (1). Již o rok později (1796) byla přijata definice kilogramu na základě vody o objemu 1 dm<sup>3</sup> a hustotě při teplotě kolem 4 °C. V roce 1799 byl kilogram definován pomocí platinového válečku (průměr 39,4 mm, výška 39,7 mm). Tato definice kilogramu byla v roce 1889 nahrazena definicí pomocí válečku (průměr i výška 39,17 mm) ze slitiny platiny a iridia v poměru 9 : 1 (1). Je tedy z výše uvedeného zřejmé, že definice kilogramu za cca 200 let byla několikrát měněna, aby byla přesnější. Tyto změny se odehrávají v důsledku toho, že se změnila přesnost měřících přístrojů a také naše potřeba po přesnějších jednotkách.

Stejným způsobem, tedy pomocí etalonu, byl definován také metr. Ten byl ale v roce 1960 předefinován takto: „Metr je délka, rovnající se 1 650 763, 73 násobku vlnové délky záření širčícího se ve vakuu, které přísluší přechodu mezi energetickými hladinami 2p<sub>10</sub> a 5d<sub>5</sub> atomu kryptonu 86“ (2). Poté byl ještě jednou předefinován, zpřesněn v roce 1983: „Vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu během časového intervalu 1/299 792 458 sekundy (tj. světlo urazí ve vakuu za sekundu přesně 299 792 458 metrů)“ (2). Vidíme, že již před cca 60 lety byl metr definován velmi přesně oproti kilogramu.

Dalším důvodem, proč bylo přikročeno k nové definici kilogramu, bylo to, že hmotnost etalonu se v čase snižuje, a to v důsledku čistících procedur, které podstupuje. Při posledním měření se tak ukázalo, že mezinárodní prototyp „ztratil“ od předposledního měření přibližně 50 µg (hmotnost jedné lidské řasy), viz obr. 1., což odpovídá relativní chybě 5 · 10<sup>-8</sup> (1). Uvážíme-li, že průměrná hmotnost jednoho zrníčka cukru je 0,000 625 gramů = 625 µg, je to jistě zanedbatelný rozdíl (3). Nicméně v celosvětovém měřítku, kdy produkce cukru dosahuje 190 mil. t ročně (4), bude rozdíl činit 9,5 t. Protože byl kilogram definován jako aktuální hmotnost Mezinárodního prototypu kilogramu, změnila se tak vlastně i definovaná velikost kilogramu (5).

Jak je tedy patrné, na definicích základních fyzikálních jednotek se neustále pracuje, abychom se při měření dopouštěli pokud možno co nejmenších chyb (zde si samozřejmě uvědomujeme, že záleží také na zvolené metodě a měřícím přístroji).

## Nová definice kilogramu

Po velkém hlasování v listopadu 2018 se oficiální definice kilogramu změnila. Počínaje 20. 5. 2019 (na 20. května připadá Světový den metrologie, neboť 20. 5. 1875 byla sedmnácti státy

signována Metrická konvence) již kilogram nebude „jenom kusem kovu“, ale jeho definice bude založena na univerzální Planckově konstantě. Přímou sám Mezinárodní úřad pro míry a váhy (dále BIPM z francouzského Bureau international des poids et mesures) uvádí definici: „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  $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$  when expressed in the unit  $J \cdot s$ , which is equal to  $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ , where the metre and the second are defined in terms of  $c$  and  $\Delta\nu Cs$ “ (7) Česky potom: „Kilogram, značka kg, je jednotka hmotnosti v SI. Je definována fixací číselné hodnoty Planckovy konstanty  $h$ , aby byla rovna  $6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ , je-li vyjádřena jednotkou  $J \cdot s$ , rovnou  $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ , kde metr a sekunda jsou definovány pomocí  $c$  a  $\Delta\nu Cs$ “ (5)

Novou definici kilogramu lze experimentálně ověřit, a to pomocí tzv. *Watt balance* nebo *Kibble balance* (obr. 2.), jejichž konstruktérem byl Bryan P. Kibble. Tyto váhy slouží k přesnému měření hmotnosti nebo k přesnému určení Planckovy konstanty. Princip vyjádření hmotnosti na Kibbleho vahách je:

1. V rovnováze jsou tíhová síla a Lorentzova síla:

$$mg = BI l \quad (1)$$

2. Cívka se v magnetickém poli nechá pohybovat rovnoměrně rychlostí  $v$ , pohybem se na ní indukuje měřitelné napětí  $U$ , pro něž platí:

$$U = v \int dl \times B \quad (2)$$

3. Následně můžeme zapsat podmínku rovnováhy jako:

$$UI = mgv \quad (3)$$

Na levé straně rovnosti je **elektrický výkon**, na pravé **mechanický výkon**.

Přesná měření elektrického proudu a rozdílu potenciálů jsou prováděna v konvenčních elektrických jednotkách. Ty jsou založeny na neměnných „konvenčních hodnotách“ Josephsonovy konstanty

$$K_{J-90} = \frac{2e}{h} \quad (4)$$

a von Klitzingovy konstanty

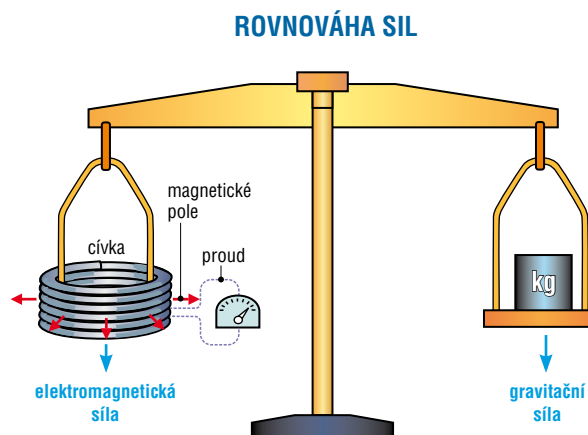
$$R_{K-90} = \frac{h}{e^2} \quad (5)$$

kde  $e = 1,602\,176\,6208(98) \cdot 10^{-19}$  C je elementární (nejmenší, dále nedělitelný) elektrický náboj a  $h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$  J·s je Planckova konstanta, což základní konstanta popisující chování mikrosvětla (je to základní konstanta kvantové teorie) (9).

Konstanty Josephsonova i von Klitzingova byly průběžně zpřesňovány. Pokud je u konstanty uvedeno v dolním indexu 90, pak se jedná o hodnoty definované v roce 1990 (údaje konstant, které byly zafixovány vzhledem ke stavu poznání v roce 1990, tyto hodnoty bývají také označovány jako tzv. konvenční hodnoty), jinak používáme hodnoty, které byly zpřesněny v roce 2010 (10). S větší přesností konstant  $e$  a  $h$  se bude také zvyšovat přesnost měření kilogramu.

Současné experimenty s Kibbleho vahami jsou ekvivalentní měření hodnoty konvenčního wattu v jednotkách SI. Z definice

Obr. 2. Kibbleho váhy, dle (10)



konvenčního wattu jde o ekvivalentní měření hodnoty  $K_{J-90}$  a  $R_{K-90}$  v jednotkách SI namísto jeho pevné hodnoty v konvenčních elektrických jednotkách:

$$K_J^2 R_K = K_{J-90}^2 R_{K-90} \frac{mgv}{U_{90} I_{90}} \quad (6)$$

Pokud upravíme vztahy (3) na (3a):

$$1 = \frac{mgv}{UI}$$

a (6) na (6a):

$$\frac{K_J^2 R_K}{K_{J-90}^2 R_{K-90}} = \frac{mgv}{U_{90} I_{90}}$$

pak vidíme, že vztahy (3a) a (6a) a tedy také vztahy (3) a (6) si jsou podobné. Jak je již uvedeno výše, pokud budou s dalším postupem vědeckého poznání zpřesňovány hodnoty  $e$  a  $h$ , pak se budou zpřesňovat hodnoty Josephsonovy i von Klitzingovy konstant a také hodnota kilogramu (9).

Je nutné pro běžný život tyto změny pochopit? Při běžném použití v zemědělské produkci to nemusíme brát v potaz, důležité je mít reálnou představu jakých hodnot v daných jednotkách dosahujeme při sledování produkce bulvy.

Obtíže mohou nastat při přípravě pracovníka v oblasti cukrovarnictví nebo jiných oborů zpracovávající cukrovou řepu a produkty z ní, kde by mohli být žáci a studenti či laická veřejnost přivedeni na scestí neboli zmatení složitostí definice kilogramu, zvláště když současné učebnice budou používány ještě hezkou řádku let.

## Závěr

Podstatnou výhodou nových definic základních jednotek soustavy SI je nahrazení definice Mezinárodního prototypu kilogramu spojením na fundamentální přírodní konstanty. Eliminujeme tím riziko ztráty nebo jeho (Mezinárodního prototypu kilogramu) poškození. Nyní je tedy možné, aby si každý stát sestrojil svůj vlastní kilogram.

Reálný dopad do běžného života člověka-nevědce bude mizivý, vzhledem k nejistotám měřících systémů, které jsou o několik řádů vyšší, než u experimentální sestavy Kibbleho

vah. V běžné populaci se s novými definicemi budou ale muset vypořádat hlavně žáci a studenti základních, středních a vyšších odborných škol. V tomto případě je potřeba ale zmínit, že pro žáky středních škol bez znalostí kvantové fyziky budou definice zřejmě velmi abstraktní.

Základním pravidlem by mělo pro běžného člověka být, že základní jednotka musí pro něj být snadno reprodukovatelná, dosažitelná a přestavitelná. To je předpokladem toho, že budeme všichni používat stejný systém jednotek.

### Souhrn

Příspěvek se dotýká změn v definicích základních fyzikálních jednotek. Poslední změny se dotkly čtyř z nich – kilogram, ampér, kelvin a mol. Jde o poměrně rozsáhlé předefinování, které využívá univerzálních konstant. Vedle představení úprav a historie definice kilogramu příspěvek pojednává o dopadech změn do běžné praxe a s tím souvisejícími obtížemi.

**Klíčová slova:** kilogram, nová definice jednotek, konstanty, watt balance, kibble balance.

### Literatura

1. ŽÁČEK, M.: Nová definice kilogramu. In: *Aldebaran bulletin: Týdeník věnovaný aktualitám a novinkám z fyziky a astronomie*. Praha: AGA & Štefánikova hvězdárna, 2008, ISSN 1214-1674, [online] [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2008\\_28\\_kil.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_28_kil.php), cit. 14. 5. 2019.
2. Metr. *Wikipedia: the free encyclopedia*, San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019, [online] <https://cs.wikipedia.org/wiki/Metr>, cit. 14. 5. 2019.
3. ONKEN, M.: Would I be right in saying that 1 jar of sugar could be ‚1 mole‘ of sugar? *MadSci Network: Chemistry*, 2001, [online] <http://www.madsci.org/posts/archives/apr2001/988480569.Ch.r.html>, cit. 7. 6. 2019.
4. FRONĚK, D. ET AL. (ED): *Situační a výhledová zpráva cukr – cukrová řepa 2018*. Praha: Ministerstvo zemědělství ČR, 2018, s. 13.
5. Klasická definice kilogramu už neplatí. Celý svět přešel na popis přes Planckovu konstantu. *ČT24 – Česká televize*, 2019, [online] <https://ct24.ceskatelevize.cz/veda/2819459-klasicka-definice-kilogramu-uz-neplati-cely-svet-presel-na-popis-pres-planckovu>, cit. 7. 6. 2019.

6. STOCK, M. ET AL.: Calibration campaign against the international prototype of the kilogram in anticipation of the redefinition of the kilogram part I: comparison of the international prototype with its official copies. *Metrologia*, BIPM, 2015, [online] <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/52/2/310>, cit. 7. 6. 2019.
7. Resolution 1 of the 26<sup>th</sup> CGPM. *BIPM*, 2018, [online] <https://www.bipm.org/en/CGPM/db/26/1/>, cit. 14. 5. 2019.
8. PIB: World's standard definition of kilogram now redefined. *Civildaily – UPSC IAS Preparation*, 2018, [online] 2018, <https://www.civildaily.com/news/pib-worlds-standard-definition-of-kilogram-now-redefined/>, cit. 7. 6. 2019.
9. KULHÁNEK, P.: Už není kilo to, co dříve bylo. In: *Aldebaran bulletin: Týdeník věnovaný aktualitám a novinkám z fyziky a astronomie*, Praha: AGA & Štefánikova hvězdárna v Praze, 2018, ISSN 1214-1674, [online] [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2018\\_43\\_kil.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2018_43_kil.php), cit. 7. 6. 2019.
10. FLETCHER, N. ET AL.: Electrical Units in the New SI: Saying Goodbye to the 1990 Values. *NCSLI Measure: The Journal of Measurement Science*, 9, 2014 (3), 6 s., [online] <https://www1.bipm.org/cc/CCEM/Allowed/29/CCEM-15-06-electrical-units-in-new-SI.pdf>.

### Válek, J.: Changes in Definitions of SI Base Units and their Impact on Sugar Industry

The paper deals with the changes in the definitions of SI base physical units. The latest changes have affected four of them – kilogram, ampere, kelvin and mole. It is a relatively extensive redefinition that uses universal constants. In addition to introducing the modifications and the history of the kilogram definition, the paper reflects on the impact of these changes on current practice and associated difficulties.

**Key words:** kilogram, new definition of SI units, constants, watt balance, kibble balance.

### Kontaktní adresa – Contact address:

PhDr. Jan Válek, Ph. D., Masarykova univerzita, Pedagogická fakulta, Katedra fyziky, chemie a odborného vzdělávání, Poříčí 7, 603 00 Brno, Česká republika, e-mail: valek@ped.muni.cz

### Zemřel Philippe Duval, bývalý generální ředitel skupiny Tereos

Ve čtvrtek 22. srpna 2019 zemřel ve věku 75 let Philippe Duval, dlouholetý generální ředitel skupiny Tereos a předseda dozorčí rady Tereos TTD.