

Úvod do problematiky acidobazické rovnováhy

MUDr. Jiří Havránek¹, MUDr. Pavel Heinige², MUDr. Simona Kontuřová¹, MUDr. Lesia Kollárová¹,
MUDr. Julia Formanová¹, MUDr. Andrea Navrátilová¹

¹Dětské a novorozenecké oddělení, Nemocnice Slaný

²ODIM, Fakultní Thomayerova nemocnice a 3. LF UK, Praha

Autoři tohoto článku chtějí v širších souvislostech představit poruchy acidobazické rovnováhy (ABR). Pochopení celé problematiky je nepodkročitelným minimem pro klinický přístup k těmto poruchám. Tento článek bude úvodem do celé problematiky. Představíme princip zachování stálého pH, tak jak bylo definováno tzv. kodaňskou školou. Budou představeny proměnné (H^+ , pH, HCO_3^- a pCO_2) a vzájemné vztahy mezi metabolickými a respiračními poruchami. V níže uvedených rovnicích můžeme nejen přesně definovat typ poruchy, ale vyjádřit přítomnost kombinovaných poruch a možnost jejich kompenzací. Lze určit, zda daná porucha je akutní či chronická.

Klíčová slova: acidobazická rovnováha, respirační a metabolická porucha, pufry, ledviny a plíce.

Introduction to the issue of acid-base balance

The authors of this article want to present acid-base balance in a broader context. Understanding the whole issue is imperative to clinical approach to these disorders. This article will be an introduction to the whole context. We will introduce the principle of maintaining a constant pH, as it defined by the so-called Copenhagen school. The variables (H^+ , pH, HCO_3^- a pCO_2) and their interrelation will be introduced between metabolic and respiratory disorders. In the equations below, we can not only precisely define the type of fault, but to express the presence of combined faults and the possibility of their compensation. It can be determined whether the given disorder is acute or chronic.

Key words: acid-base balance, respiratory and metabolic disorder, buffers, kidneys and lungs.

Zkratky

ABR = acidobazická rovnováha

H^+ = vodíkový proton

ECT = extracelulární tekutina

Hb = hemoglobin

HHb = oxygenovaný Hb

HCO_3^- = hydrogenuhličitan, po staru bikarbonát

ICT = intracelulární tekutina

MAC = metabolická acidóza

MAL = metabolická alkalóza

RAAS = renin-angiotenzin-aldosteronový systém

RAC = respirační acidóza

RAL = respirační alkalóza

RTA = renální tubulární acidóza

TT = tělesná teplota

Historie

O pH prvně hovořil Sorensen v r. 1908, Hendersonova-Hasselbalchova rovnice spatřila světlo světa v r. 1916 a v roce 1920 Bronstead a Lowry prvně definovali kyseliny jako H^+ donory a báze jako příjemce H^+ . Význam ABR pro hodnocení plynů definoval Astrup v 50. letech minulého století, kdy Kodaň čelila epidemii poliomyelitidy. V roce 1962 Siggard a Sorensen představili nomogram pro interpolaci pCO_2 , HCO_3^- a BE a výstupem bylo zjištění možných smíšených poruch ABR (viz nomogram) (1).

Úvod do problematiky

V lidském organismu je pH silně sříženo. Stálost pH je naprosto klíčová pro zachování

DECLARATIONS:

Declaration of originality:

The manuscript is original and has not been published or submitted elsewhere.

Ethical principles compliance:

The authors attest that their study was approved by the local Ethical Committee and is in compliance with human studies and animal welfare regulations of the authors' institutions as well as with the World Medical Association Declaration of Helsinki on Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects adopted by the 18th WMA General Assembly in Helsinki, Finland, in June 1964, with subsequent amendments, as well as with the ICMJE Recommendations for the Conduct, Reporting, Editing, and Publication of Scholarly Work in Medical Journals, updated in December 2018, including patient consent where appropriate.

Conflict of interest and financial disclosures:

None.

Funding/Support:

None.

Cit. zkr: *Pediatr. praxi.* 2025;26(1):14-16

<https://doi.org/10.36290/ped.2025.003>

Článek přijat redakcí: 3. 10. 2024

Článek přijat k tisku: 2. 1. 2025

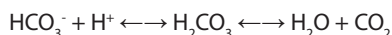
MUDr. Jiří Havránek

Jiri.Havranek@nemsl.cz

správné funkce bílkovin a enzymů. Fyziologické hodnoty se v ECT pohybují mezi 7,35–7,45 (hodnoty < 7,35 poukazují na acidózu, hodnoty > 7,45 na alkalózu), intracelulárně napříč spektrem autorů je uváděno pH 6,8–7,0. Stálost střeží chemické látky zvané pufrы neboli nárazníky (reagují okamžitě), dále pak plíce (regulace řádově v minutách) a ledviny (hodiny až dny). Kyselina je substance schopná uvolnit vodíkový proton H^+ (H^+ donor), báze je substancí schopnou volný H^+ přijmout (H^+ akceptor). „As a fire makes smoke“ (1), organismus stále čelí tvorbě kyselin: glykolýza při anaerobním metabolismu sacharidů produkuje laktát, při metabolismu tuků vznikají ketolátky a z metabolismu bílkovin vznikají fosfáty a sulfáty. Zachování relativní stability pH krve je komplexní proces, na kterém se podílí tři hlavní mechanismy: nárazníky (pufrы), plíce a ledviny.

Pufrы

Pufrы se nachází prakticky ve všech kompartmentech (5). Patří mezi ně bílkoviny, sulfáty, fosfáty, Hb ad. Protože v rámci monitoringu pacienta jsme schopni měřit a případně regulovat parametry intravaskulární tekutiny, je to právě bikarbonátový pufr, který je nejdůležitější (3). Probíhá reakce:



Hodnocení ABR vychází z kodaňské školy (Henderson, Hasselbalch, Sorensen). Vznikla slavná Hendersonova-Hasselbalchova rovnice (2, 3, 4, 9):

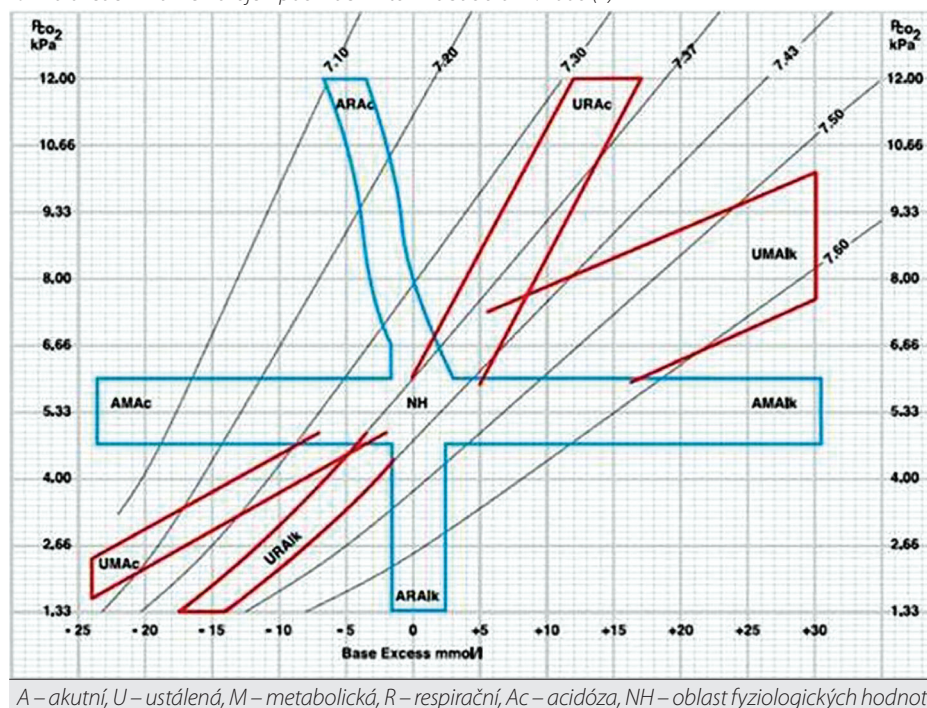
$$pH = 6,1 + \log(HCO_3^-) / CO_2 \times 0,03$$

6,1 = disociační konstanta pro H_2CO_3 , záporný dekadický logaritmus dané kyseliny, 0,03 mmol/l/mmHg = solubilní konstanta, která zprostředkovává převod mmHg na mmol/l, pH má s koncentrací H^+ nepřímo úměrný vztah

$$H^+ = 24 \times pCO_2 / HCO_3^-$$

Hendersonova-Hasselbalchova rovnice má 4 proměnné: pCO_2 , pH, HCO_3^- a base excess/deficit. Měřenými veličinami jsou pH a pCO_2 , zatímco HCO_3^- a BE/BD jsou vypočítávány (4). **Aktuální bikarbonát** je hodnota vztažena k aktuálnímu metabolickému stavu organismu, vyžaduje aktuální pCO_2 (využíváme: milimetry rtuti (mmHg = 1 torr) > 1 mmHg = 0,1333 kPa neboli 1 kPa = 7,5 mmHg) a TT. **Standardní bikarbonát** je výpočetem při definovaných hod-

Obr. 1. Nomogram poruch acidobazické rovnováhy dle Siggarda-Andersena, upraven Englišem v roce 1972 a uveden v rámci zdroje v publikaci Antonína Jabora z r. 2008 (7)



A – akutní, U – ustálená, M – metabolická, R – respirační, Ac – acidóza, NH – oblast fyziologických hodnot

notách TT a pCO_2 . Pro složitější případy, kdy se na poruše pH podílí 2 a více poruch, je vhodné využít nomogram. Nejznámější je pravděpodobně nomogram Siggarda-Andersena (5).

Bikarbonátový systém je vysoce účinný (3, 4) – vysoká je hodnota samotného bikarbonátu, ale hlavně jde o systém otevřený, kde vzniklé CO_2 je následně vydycháno pryč mimo organismus (6, 7). Mezi non-bikarbonátové pufrы patří některé proteiny, fosfáty, sulfáty a kosti. Extracelulární nárazník představuje např. albumin, intracelulárně potom Hb.

Respirační systém

Upravuje pH řádově v minutách, je kompenzačním mechanismem metabolických poruch. Hyperventilace vede ke snížení pCO_2 a tudíž se snižuje i H^+ v organismu. Při MAL nastává hypoventilace. Tato kompenzace však může být jen mírná, neboť významná hypoventilace by vedla k hypoxemii a měla by tak pro organismus horší dopad, než samotná MAL.

Ledviny

Efekt je v hodinách až dnech a je konečný. Na definitivní úpravu pH mají ledviny tyto 2 mechanismy:

- 1) zpětná resorpce HCO_3^- z primitivní moči v proximálním tubulu
- 2) aktivní sekrece H^+ ve sběrném kanálku a z části i v distálním tubulu

Sekrece H^+ vyžaduje exkreci renálních pufrů, kterými jsou fosfáty a amoniový iont.

Základy využití ABR v klinické praxi

Akutní porucha je primární porucha, při které ještě nedošlo ke kompenzaci (hodnota pH určuje, zda byla primární acidóza nebo alkalóza). Kompenzovaná porucha představuje situaci, při níž činnost kontraregulačního orgánu (= ledvin při primární respirační poruše nebo plic při primární metabolické příčině) vede k posunu pH zpět směrem k hodnotě 7,40.

Pro vyšetření acidobazické rovnováhy provádíme tzv. Astrupa. Nejčastěji se odebírá arterIALIZOVANÁ kapilární krev – nutno pečlivě zahřát místo odběru (paty u novorozenců, špičky prstů nebo ušní lalůčky). Pro posouzení metabolické situace tento typ postačuje. Pokud však chceme mít přesně i krevní plyny, tj. pO_2 a pCO_2 , je v intenzivní péči vhodný arteriální odběr (buď jednorázově nebo ze zavedené arteriální linky).

Abnormality pH, které vznikají následkem prvotních změn bikarbonátu se proto označují jako metabolické, abnormality pH, které vznikají následkem prvotních změn pCO_2 se označují respirační. Při akutních poruchách kompenzační mechanismy nikdy pH nepřekompensují, tj. při akutních poruchách

pH určí, který proces byl primární. Primární je vždy ta porucha, na kterou stranu je vychýlené pH.

MAC je kompenzována hyperventilací, MAL hypoventilací, RAL vede k nižší zpětné resorpci bikarbonátu, u RAC je tomu naopak.

Je-li pH ve fyziologickém rozmezí, ale současně jsou přítomny změny parametrů $p\text{CO}_2$, HCO_3^- a BE, pak to může znamenat, že porucha je kompenzována nebo se může jednat o poruchu kombinovanou.

Rozlišení akutních a chronických poruch ABR (8)

Zjistíme, zda jde o poruchu akutní či chronickou. Využijeme tyto vzorce:

akutní RAC: HCO_3^- stoupá o 1 mmol na každých 10 mmHg $p\text{CO}_2$

chronická RAC = HCO_3^- stoupá o 3,5 mmol na každých 10 mmHg $p\text{CO}_2$

akutní RAL = HCO_3^- klesá o 2 mmol na každých 10 mmHg $p\text{CO}_2$

chronická RAL = HCO_3^- klesá o 4 mmol na každých 10 mmHg $p\text{CO}_2$

Vyjádření smíšených poruch (8)

MAC: $p\text{CO}_2 = (1,5 \times \text{HCO}_3^-) + 8 \pm 2 =$ Winterova formule (9)

- odpovídá-li výpočet $p\text{CO}_2$ výše uvedené rovnici, potom se jedná o poruchu jednoduchou
- je-li změřená hodnota $p\text{CO}_2$ nižší než vypočtená, jde o kombinaci MAC + RAL
- je-li změřená hodnota $p\text{CO}_2$ vyšší než vypočtená, jde o kombinaci MAC + RAC. V případě této rovnice je třeba uvažovat, že nemocný, který kompenzuje MAC hyperventilací, je již fyzicky vyčerpan a přítomná RAC je důsledkem snížení jeho respiračního úsilí (9).

Tab. 1. Referenční hodnoty ABR

Parametr	Referenční rozmezí
pH	7,36–7,44
$p\text{CO}_2$, kPa / mmHg	4,5–6 kPa / 35–45 mmHg, torr
aHCO_3^-	22–26 mmol/l
BD / BE	$\pm 2,5$ mmol/l
Korigovaný anion gap (AG)	8–16 mmol/l

MAL: $p\text{CO}_2$ stoupá o 7 mmHg na každých 10 mmol HCO_3^-

- odpovídá-li poměr $p\text{CO}_2$ ve výše uvedené rovnici, jedná se o poruchu jednoduchou
- je-li změřená hodnota $p\text{CO}_2$ nižší než vypočtená, jde o kombinaci MAL + RAL
- je-li změřená hodnota $p\text{CO}_2$ vyšší než vypočtená, jde o kombinaci MAL + RAC

RAC: HCO_3^- stoupá o 1 mmol na každých 10 mmHg $p\text{CO}_2$

- odpovídá-li poměr $\text{HCO}_3^- / p\text{CO}_2$ ve výše uvedeném řádku, jedná se o poruchu jednoduchou
- je-li hodnota HCO_3^- nižší než vypočtená, jde o kombinaci RAC + MAC
- je-li hodnota HCO_3^- vyšší než vypočtená, jde o kombinaci RAC + MAL

RAL: HCO_3^- klesá o 2 mmol na každých 10 mmHg $p\text{CO}_2$

- odpovídá-li poměr $\text{HCO}_3^- / p\text{CO}_2$ ve výše uvedeném řádku, jedná se o poruchu jednoduchou
- je-li změřená hodnota HCO_3^- nižší než vypočtená, jde o kombinaci RAL + MAC
- je-li změřená hodnota HCO_3^- vyšší než vypočtená, jde o kombinaci RAL + MAL

Anion gap (AG)

AG („aniontové okno“) = $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$

fyziologická hodnota AG je 8–16 mmol/l. Hodnota AG souvisí s principem elektroneutrality (7). Jeho zvýšení znamená vzestup neměřených aniontů (ať již jde o tělu vlastní metabolity jako laktát, ketolátky, nebo exogenně, hlavně při otravách – methyalkohol, ethylalkohol, ethylenglykol ad.). Zvýšený AG může být často jediným znakem skryté MAC nebo v rámci smíšených poruch svědčí pro významný vliv MAC (11). Normální hodnoty AG při přítomné MAC svědčí pro ztrátu bikarbonátu (v praxi je nahrazen Cl).

Korigovaný AG

Hodnotu AG může významně ovlivnit hypoproteinemie, nejčastěji hypoalbuminemie, která má alkalizující účinek (12) a může tak maskovat skrytou acidózu.

Korigovaný $\text{AG}_{\text{cor}} = \text{AG} + 0,25 \times (\text{A} - \text{B})$, referenční rozmezí je identické s AG.

Písmeno A v rovnici představuje průměrnou hodnotu albuminu, zpravidla 40 g/l a písmeno B je potom hodnota změřeného albuminu, rovněž v g/l (7, 13).

Závěr

Základní patofyziologické principy metabolických, respektive respiračních poruch acidobázické rovnováhy a jejich vzájemná souvztažnost představují nepodkročitelné minimum k pochopení vzájemných vztahů při respirační korekci metabolické, resp. metabolické korekci respirační poruchy.

LITERATURA

- Barry P, Morris K, Ali T. Acid – base balance. Paediatric intensive care. Oxford medical publications. 2017:247-255.
- Bianca N, Quade M, Parker D, et al. The therapeutic importance of acid-base balance, Biochemical pharmacology. January 2021;183:114278.
- Clayton M, Sharma MP. Renal physiology: Acid – base balance. Anaesthesia & Intensive Care Medicine. July 2021;22(7):415-421.
- Hamm LL, Nakhouli N, Hering-Smith K, et al. Acid base homeostasis. Clin J Am Soc Nephrol. 2015;10(12):2232-2242.
- Siggaard-Andersen O, et al. Measured and derived quantities with modern pH and blood gas equipment: calculations, algorithms with 54 equations. Scand J Clin Lab Invest. 1988;48: Suppl. 189.
- Husain-Syed F, Slutsky AS, Ronco C. Lung-kidney cross-talk in the critically ill patient. Am J Respir Crit Care Med. 2016;194(4):402-414.
- Jabor A, et al. Vnitřní prostředí. Grada. 2008:259-283.
- Greenbaum LA. Acid-base balance. Nelson textbook of pediatrics. 2024; 509-525.
- Winter SD, et al. The fall of the serum anion gap. Arch Int Med. 1990;150:311-313.
- Vepraskas W, Toth H, Weisgerber M. Acid base and electrolyte disturbances, in Nelson pediatric symptom – based diagnosed. Elsevier. 2023:1114-1122.
- Figge J, et al. Anion gap and hypoproteinemia. Crit Care Med. 1998;26:1807-1810.
- Figge J, Mydosh T, Fencel V. Serum proteins and acid-base equilibria: a follow-up. J Clin Lab Med. 1992;120:713-719.
- Watson PD. Modeling the effects of proteins on pH in plasma. J Appl Physiol. 1999; 86:1421-1427.
- Rees L, Bockenhauer D, Webb NJA, et al. Acid-base balance. Paediatric nephrology, Oxford medical publications. 2019:153-160.
- Shaffner DH, McCloskey JJ, Hunt EA, et al. Iborn errors of metabolism. Roger's textbook of pediatric intensive care. 2023;1954-1967.