

MĚŘENÍ A MODELOVÁNÍ pH JAKO PROPOJENÍ STŘEDOŠKOLSKÉ CHEMIE A MATEMATIKY

JAN BRÍŽĎALA a EVA STRATILOVÁ URVÁLKOVÁ

Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Hlavova 2030/8, 128 00 Praha 2, Česká republika
 urvalkov@natur.cuni.cz

Došlo 12.2.24, přijato 30.5.24

Zkoumání kyselosti a zásaditosti roztoků je spojeno s pochopením problematiky pH roztoků. Na středoškolské úrovni to znamená chápat rovněž koncept logaritmické funkce, a tím pádem je toto téma vhodné pro rozvíjení matematické gramotnosti. Cílem proto bylo navrhnout takovou úlohu, ve které žáci nejen proměřují roztoky o očekávaném pH, ale navíc bez znalosti závislosti pH na koncentraci H_3O^+ sami z naměřených hodnot sestavují graf, ve kterém hledají/modelují funkci, která nejlépe odpovídá získané křivce. Představená úloha diskutuje limity provedení a učitelům poskytuje podklady pro přípravu laboratorního cvičení, včetně pracovního listu pro žáky. Ověření úlohy ukázalo, že během realizace cvičení jsou žáci schopni sestavovat graf z naměřených hodnot a řešit aplikační úlohy spojené s pochopením konceptu logaritmické funkce.

Klíčová slova: pH, pH elektroda, matematické modelování, matematická gramotnost

1. Úvod – pojetí kyselosti a zásaditosti na různých stupních vzdělávání

Koncept kyselosti a zásaditosti látek patří k důležitým tématům chemie, neboť má i významnou roli v lidském životě. Veličina pH je v omezeném rozsahu zaváděna již na 2. stupni základních škol v rámci předmětu chemie. Látky se na této úrovni vzdělávání rozdělují na kyselé ($\text{pH} < 7$), neutrální ($\text{pH} = 7$) a zásadité ($\text{pH} > 7$), uvádí se jejich příklady (např. ocet je kyselý, voda neutrální a roztok pracího prášku zásaditý) a představují se indikátorové papírky (univerzální, lakmusové) a acidobazické indikátory (např. lakmus, fenolftalein) jako prostředky, které mohou orientačně pomoci určit hodnotu pH vzorků. V závazném kurikulárním dokumentu, Rámcovém vzdělávacím programu pro základní vzdělávání, je očekávaný výstup orientován na znalost pH, ale i dovednost jej změřit, „(Žák) orientuje se na stupnici pH, změří reakci roztoku univerzálním indikátorovým papírkem a uvede příklady uplatňování neutralizace v praxi“¹. V Rámcovém vzdělávacím programu pro gymnázia koncept pH explicitně zmíněn není, avšak může být chápán jako součást očekávaného výstupu „(Žák) využívá znalosti o částicové struktuře látek a chemických vazbách k předvídání některých fyzikálně-chemických vlastností látek a jejich chování v chemických reakcích“². Ve výuce chemie na středních školách se již upřesňuje, že veličina pH závisí na koncentraci oxoniových kationtů H_3O^+ v roztoku, zavádí se jednotlivé výpočty hodnot pH různých roztoků nebo se v laboratorních praktikách provádí acidobazické titrace (alkalimetrie, acidimetrie). Těmito praktickými laboratorními cvičeními se dosahuje očekáva-

ného výstupu „(Žák) využívá znalosti základů kvalitativní a kvantitativní analýzy k pochopení jejich praktického významu v anorganické chemii.“ a „(Žák) provádí chemické výpočty a uplatňuje je při řešení praktických problémů“².

Učivo pH je vhodné ve výuce středoškolské chemie zavádět s ohledem na vybudovaný matematický aparát. Jelikož se jedná o logaritmickou závislost, tak by tomu měla předcházet výuka logaritmu v matematice. Uspořádání učiva ve výuce je však dáno školním vzdělávacím programem konkrétní školy, a školy mnohdy zavádí koncept pH v chemii v prvním ročníku během témat z obecné chemie, zatímco v matematice se často zavádí logaritmická funkce až ve druhém ročníku^{3,4}. Přitom aplikace dekadického logaritmu v chemii (veličina pH) je ukázkovým příkladem, který lze zmínit při zavedení tohoto učiva v matematice a podpořit tak motivaci žáků věnovat danému tématu pozornost.

2. Matematická gramotnost – jak (na)učit a chápat logaritmus

Matematická gramotnost má různé definice, v rámci mezinárodního šetření PISA je definována jako „schopnost jedince matematicky uvažovat a formulovat, používat a interpretovat matematiku při řešení problémů v různých kontextech každodenního života. Zahrnuje používání matematických pojmů, postupů, faktů a nástrojů k popisu, vysvětlování a předpovídání jevů. Pomáhá jedinci uvědomit si úlohu matematiky ve světě a díky tomu od-

povědně usuzovat a rozhodovat se jako tvořivý, angažovaný a přemýšlivý občan 21. století.“⁵ Obecně lze říci, že matematická gramotnost je vnímána jako funkční gramotnost a její podstatou je schopnost aplikovat matematické poznatky na konkrétních problémech. Obdobně lze zavést také digitální gramotnost jako schopnost efektivně využívat informační a komunikační technologie.

Pro správné pochopení veličiny pH a jejích funkčních závislostí, tedy možností, jak její hodnotu ovlivňovat, je nezbytné rozumět významu logaritmu. Jedná se o aplikaci matematické gramotnosti, tedy schopnosti využívat poznatky z matematiky na reálném problému. Zjednodušeně řečeno, žáci by si tak měli uvědomit, že pro zvýšení pH kyseliny (či snížení pH zásady) o jednotku je zapotřebí provádět ředění (v ideálních podmínkách) v poměru 1:10. Příkladem budiž nápoj Coca-Cola s pH cca 2,5, který je oproti jablečné šťávě s pH cca 3,5 přibližně desetkrát kyselější. Pokud je zapotřebí upravit hodnotu pH vody směrem k neutrální oblasti o vyšší desetiny (např. v bazénu), je zřejmé, že nestačí naředit roztok vodou, ale musí se pro tento účel použít specializované prostředky, které pH upraví chemicky. Experimentální prověření závislosti pH může přispět k lepšímu porozumění aplikaci dekadického logaritmu⁶. Za účelem zajištění lepší představitosti významu dekadického logaritmu je možné využít jak aritmetické výpočty, tak modelování závislostí pomocí grafu logaritmické funkce^{7,8}. Odpovídající simulaci lze nalézt i na stránce PhET, kde lze v simulaci *pH Scale* mezi sebou porovnávat kyseliny a zásady, určovat koncentraci roztoku na základě jeho pH, odhadovat pH po zředění roztoku a řešit další otázky, které simulace umožňuje⁹. Přestože je veličina pH zaváděna na středních školách jako záporný dekadický logaritmus hodnoty koncentrace oxoniových kationtů H_3O^+ , s interpretací mají problém i studenti vysokých škol, např. oborů biochemie i medicíny^{10,11}. Scott ve studii z roku 2012 poukazuje na to, že studenti snáze zvládají provádět obecné matematické výpočty, než tyto poznatky aplikovat na konkrétních problémech¹². Tomu odpovídá i nižší dosahovaná úroveň matematické gramotnosti, která je pravidelně ověřována pomocí mezinárodních šetření PISA⁵. V případě učiva tématu pH na tento problém poukázala srovnávací studie mezi absolventy kurzů Analytické chemie a Fyzikální chemie, kdy v rámci analytické chemie studenti provádí výpočty dle zadaných vzorců, ale při fyzikální chemii je vyžadováno odvozování a interpretování definičních vztahů závislostí, což je pro studenty obtížnější¹³. Problém se teoreticky i prakticky komplikuje v případě koncentrovanějších roztoků, u nichž pro výpočet pH nelze použít zjednodušený výpočetní vztah s koncentrací oxoniových iontů, $\text{pH} = -\log c(\text{H}_3\text{O}^+)$, nýbrž definiční vztah s aktivitou oxoniových kationtů, $\text{pH} = -\log a(\text{H}_3\text{O}^+)$. Aktivita iontů je součin koncentrace daného iontu a aktivitního koeficientu, který v sobě zahrnuje veškeré reálné chování všech iontů v roztoku, což se podstatně složitěji zjišťuje¹⁴. Aktivita oxoniových iontů mj. hrála roli při designování níže uváděné úlohy na zkoumání a ilustraci logaritmické funkce.

3. Příprava úlohy – metodika pro učitele

Návrh dvouhodinového laboratorního cvičení představuje průnik několika předmětů a naplňuje tak charakteristiky STEM přístupu, protože v sobě pojí chemii (Science), práci s čidly (Technology) a zpracování matematického konceptu v tabulkovém procesoru MS Excel (Mathematics, částečně i Engineering).

Úloha je koncipována jako badatelská, ve které žáci naměří hodnoty pH roztoků vybrané silné kyseliny (zvolena byla kyselina chlorovodíková kvůli její dostupnosti) o známých molárních koncentracích a pomocí regrese prozkoumají funkční závislost mezi těmito veličinami. Následně žáci tyto experimentálně naměřené hodnoty porovnají s teoreticky očekávanými (po zjištění výpočetního vztahu pro pH) a naměřené závislosti využijí jak pro odečet dat z grafů funkce, tak pro představování vlastních návrhů řešení příprav roztoků o požadovaných acidobazických vlastnostech. Formát bádání byl zvolen jako strukturované bádání, při kterém žáci mají řešit zadanou otázku s relativně předem daným postupem, aby se tím omezily chyby při provedení a zpracování dat. Svými požadavky na laboratorní práci a zpracování dat zahrnuje dvouhodinová úloha velké množství vzdělávacích cílů, které by během nasměrovaného nebo otevřeného bádání neúměrně vzrostly o kreativní úroveň a nemuselo by být dosaženo primárních cílů, jako je pochopení vztahu mezi koncentrací kyseliny a logaritmickou funkcí.

Samotné měření závislosti pH na různě koncentrovaných roztocích kyseliny je předmětem některých již dříve navržených úloh^{15,16}, avšak ty nejsou podpořeny prvky prokládání zjištěné závislosti pomocí regrese a modelování chování. Didakticky je vhodné provádět měření v oblasti, kdy nastává minimální odchylka reálného chování roztoku od toho očekávaného (teoreticky vypočítaného ze zjednodušeného vztahu), což znamená pracovat s poměrně dost zředěnými roztoky. U koncentrovaných roztoků totiž dochází k odchylce od ideálního chování. Při designování úlohy se potvrdilo, že již koncentrace 0,1 M (teoreticky $\text{pH} = 1$) je příliš vysoká na to, aby skutečné výsledky naměřené prostřednictvím pH elektrody odpovídaly vypočteným hodnotám pH jako záporně vzatému dekadickému logaritmu koncentrace oxoniových iontů. Koncentrace HCl 0,05 M byla stále poměrně nespolehlivá, až koncentrace 0,03 M se při opakovaném měření ukázala být jako přijatelná pro zařazení do sady měřených roztoků. Koncentrace roztoků kolem 10^{-5} M a menší vykazovala nespolehlivost díky chybám ředění a také díky možnému vytvoření pufry z rozpuštěného CO_2 . Naopak, v případě zásad s $\text{pH} > 12$ se při měření pH pomocí skleněné elektrody objevuje alkalická chyba, a proto bylo měření v zásadité oblasti a oblastem blízkým $\text{pH} 7$ vyloučeno. Pro experimentální provedení úlohy byla tudíž vybrána oblast pH tak, aby experimentální data co nejlépe odpovídala očekávaným výsledkům a pomocí regrese bylo možné verifikovat, že se jedná o logaritmickou závislost.

Formální uspořádání: dvouhodinové cvičení se zpravidla realizuje s polovinou třídy, tj. cca 15 žáky. Z důvodu

nároků na vybavení se během cvičení žáci rozdělí do samostatně pracujících skupinek o 3–4 žácích, tzn. v laboratorii jsou cca 4 skupiny žáků, pro které budou potřeba 4 pH elektrody, ovšem úlohu lze realizovat i s menším počtem elektrod, které si skupinky mezi sebou zapůjčují.

3.1. Limity úlohy

Úloha, která je podrobněji popsána v příloze článku (Doplňek), s sebou nese problémy, na které musí být učitel připravený, aby byl schopen ji modifikovat vzhledem k podmínkám daného školního prostředí. Jsou jimi (1) správně uchovávané, a tedy správně měřící pH elektrody a pufrы potřebné ke kalibraci elektrod, (2) dostatek vhodného odměrného nádobí a (3) standardizace roztoku HCl. Všechny tři body jsou diskutovány v Doplňku.

3.2. Laboratorní příprava učitele

Učitel před laboratorním cvičením (1) připraví roztok HCl a (2) stanoví jeho přesnou koncentraci. Poté (3) naředí roztok HCl o známé koncentraci do zásobních baněk pro jednotlivé skupiny a (4) připraví kalibrované pH elektrody, ověří jejich přesnost. Tyto čtyři kroky jsou rovněž podrobněji popsány v příloze článku, viz Doplňek.

3.3. Badatelská otázka, vzdělávací cíle, potřebné znalosti a dovednosti žáků

Cílem laboratorního cvičení je, aby žáci zodpověděli následující otázku:

Jaká je matematická závislost mezi koncentrací oxoniových kationtů a pH roztoku?

Otázku lze modifikovat dle potřeb učitele s ohledem na danou třídu a použít klíčová slova jako závislost/vztah, koncentrace oxoniových kationtů, koncentrace kyseliny: Jaký je matematický vztah mezi hodnotou koncentrace roztoku silné jednosytné kyseliny HCl a pH roztoku?

Úloha je multidisciplinární, zahrnuje v sobě vědomosti a dovednosti z oblasti chemie, matematiky i informatiky a má proto řadu vzdělávacích cílů. Je úkolem

učitele rozhodnout, zda je v možnostech dané třídy zvládnout všechny cíle během dvouhodinového laboratorního cvičení, nebo se na některé cíle zaměřit více a jiné lze případně řešit v následující teoretické hodině.

Laboratorní úloha má následující vzdělávací cíle:

Žák připraví roztoky HCl ředěním zásobního roztoku; žák spočítá koncentrace HCl v naředěných roztocích; žák měří hodnoty pH roztoků; žák dodržuje zásady správné laboratorní praxe; žák zapisuje data a sestaví graf závislosti pH na koncentraci HCl v tabulkovém procesoru, popř. žák pracuje s grafem v programu školního měřicího systému, žák vysvětlí rozdíl mezi nezávislou a závislou proměnnou a určí je v případě prováděného měření; žák používá regresní křivku, analyzuje, která funkce nejlépe odpovídá naměřeným datům; žák vyhodnocuje data a odvodí vztah mezi pH a koncentrací kyseliny/oxoniových iontů na základě interpretace proložené funkce grafu; žák vysvětlí na základě naměřených dat logaritmickou funkci, na konkrétním příkladu s pH.

Pro dosažení stanovených cílů potřebují mít žáci laboratorní dovednosti související se správnou laboratorní praxí, převážně s ředěním roztoků a správným měřením pH, a také teoretické znalosti související hlavně s disociací elektrolytů a sestavováním grafů. Tyto potřebné dovednosti a znalosti jsou blíže popsány v příloze článku, viz Doplňek.

4. Laboratorní cvičení: zadání, výsledky a ověřování

Úloha je zadána tak, aby žáci samostatně řešili otázku *Jaká je matematická závislost mezi koncentrací oxoniových kationtů a pH roztoku?* Při bádání žáků je vede pracovní list, který je součástí přílohy článku (viz Doplňek).

Představená úloha byla ověřována se 30 žáky Gymnázia Třebíč, v rámci třetího ročníku výběrového semináře. Tito žáci prováděli navíc standardizaci roztoku HCl, protože měli k dispozici více času než pouhé dvě hodiny cvičení. Pro dvouhodinové laboratorní cvičení však není tento formát časově zvládnutelný. Žáci během 90 min zvládnou naředit příslušné roztoky a naměřit jejich pH, dopočítat koncentraci v naředěných roztocích a sestavit

Tabulka I

Vztahy mezi koncentracemi roztoků HCl a autorsky naměřené hodnoty pH. Hodnoty psané kurzívou jsou doplněny až během měření, přičemž aktuální hodnotu $c_0(\text{HCl})$ dostanou žáci zadanou od učitele.

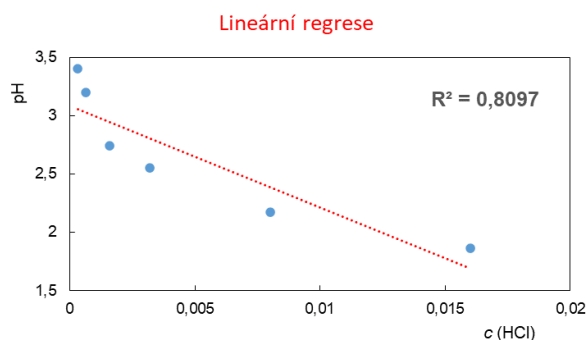
Číslo vzorku	Označení koncentrace	$V(\text{HCl})$ [ml] o c_0 (HCl)	Vztah k c_0	$c(\text{HCl})$ [mol l ⁻¹]	Naměřená hodnota pH
1	c_1	1	$c_0/100$	<i>0,00032</i>	3,40
2	c_2	2	$c_0/50$	<i>0,00064</i>	3,20
3	c_3	5	$c_0/20$	<i>0,0016</i>	2,74
4	c_4	10	$c_0/10$	<i>0,0032</i>	2,55
5	c_5	25	$c_0/4$	<i>0,008</i>	2,17
6	c_6	50	$c_0/2$	<i>0,016</i>	1,86
0	c_0	100	c_0	0,032	

graf. Obvykle žáci pracují v tabulkovém procesoru, např. Microsoft Excel. Do jednoho sloupce se uvedou skutečné koncentrace kyseliny chlorovodíkové, tj. hodnoty $c_1(\text{HCl}) - c_6(\text{HCl})$, ve druhém pak naměřené hodnoty pH. V tabulce I jsou uvedeny zprůměrované hodnoty pH, které byly zjištěny při autorském měření. Tato data žáci vynesou do bodového grafu (závislou proměnnou bude hodnota pH) a zobrazená naměřená data prokládají různými druhy spojnic trendů se zobrazením hodnot spolehlivosti R^2 . Žáci ověří, která regrese vykazuje nejvyšší shodu s naměřenými hodnotami, a tak identifikují, o jaký typ funkční závislosti se ve vztahu molární koncentrace / hodnota pH jedná. Zobrazí-li se navíc parametry regrese, uvidí žáci ihned matematickou formulaci – rovnici proložené křivky. Grafy tvoří obrázky 1–4 zobrazují, jak vypadají regresní křivky prokládající vnesené hodnoty pH roztoků kyseliny chlorovodíkové v závislosti na její molární koncentraci. Z těchto měření je patrné, že závislost pH na koncentraci je s vysokou mírou pravděpodobnosti logaritmická. V úloze lze dále pokračovat tak, že žáci pomocí právě zjištěného výpočetního vztahu $\text{pH} = -\log c(\text{H}_3\text{O}^+)$ a známých koncentrací nařazených roztoků vypočítají pH

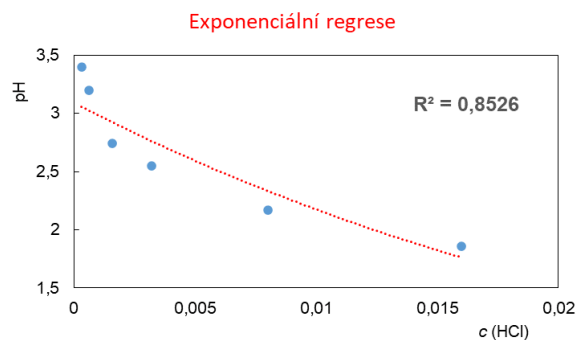
těchto roztoků a zjistí rozdíl proti naměřeným hodnotám. Vypočítané hodnoty pH lze též vyneset do grafu vedle naměřených hodnot pH, jak ukazuje obr. 5. Jeden z klíčových závěrů úlohy je, aby žáci porovnáním hodnot pH roztoků, jejichž koncentrace se liší desetinásobně, viděli, že příslušná pH se neliší desetinásobně, nýbrž o jednotku. Aplikací tohoto zjištění je schopnost žáků odhadnout, jak je třeba zředit roztok, u kterého je nutné změnit pH o dvě jednotky, případně že lze pH upravit chemicky, tedy nějakou vhodnou chemickou reakcí.

5. Závěr

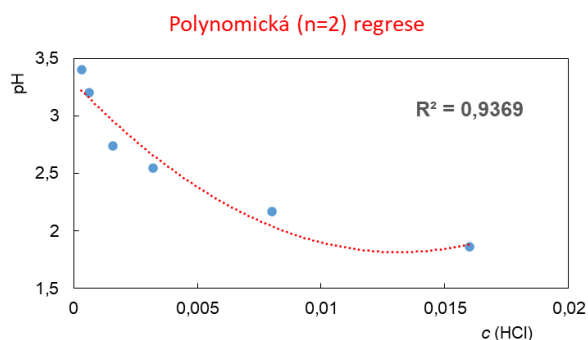
Existují chemické koncepty, které jsou založeny na komplexním matematickém konceptu, bez jehož pochopení zůstává chemický koncept pouze na úrovni znalosti. Příkladem je pH roztoků, jehož hodnota je logaritmicky závislá na koncentraci (přesněji aktivitě) oxoniových iontů. Vztah pro výpočet pH se zavádí na středních školách, přičemž pH je často součástí výuky chemie v 1. ročníku, zatímco funkce, včetně logaritmické funkce, jsou probírá-



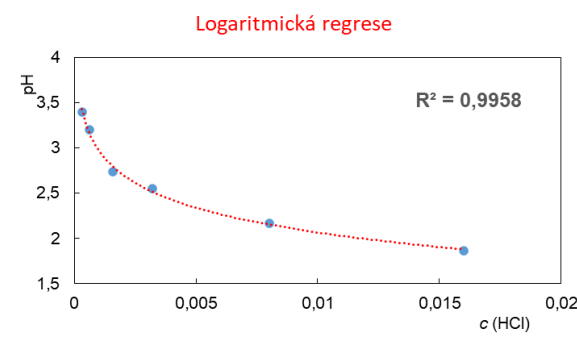
Obr. 1. Naměřené hodnoty proložené lineární regresí (hodnota spolehlivosti $R^2 = 0,8097$)



Obr. 2. Naměřené hodnoty proložené exponenciální regresí (hodnota spolehlivosti $R^2 = 0,8731$)



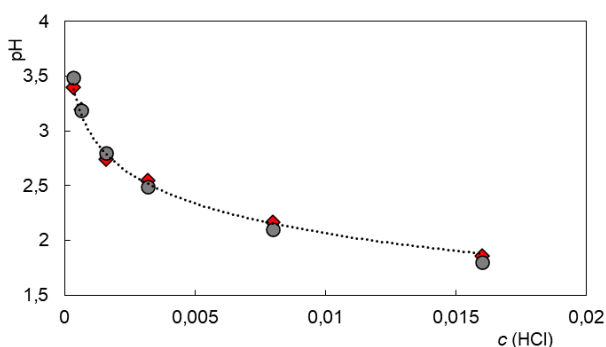
Obr. 3. Naměřené hodnoty proložené polynomickou regresí (hodnota spolehlivosti $R^2 = 0,9369$)



Obr. 4. Naměřené hodnoty proložené logaritmickou regresí (hodnota spolehlivosti $R^2 = 0,9958$)

Tabulka II
Autorsky naměřené a očekávané hodnoty pH

Číslo vzorku	Skutečná koncentrace HCl [mol l ⁻¹]	Naměřená hodnota pH	Očekávané hodnoty pH	Rozdíl
1	0,00032	3,40	3,49	-0,09
2	0,00064	3,20	3,19	+0,01
3	0,0016	2,74	2,80	-0,06
4	0,0032	2,55	2,49	+0,06
5	0,008	2,17	2,10	+0,07
6	0,016	1,86	1,80	+0,06



Obr. 5. Naměřené a očekávané hodnoty pH roztoků kyseliny chlorovodíkové o různých koncentracích; ♦ naměřená hodnota pH, ● očekávané hodnoty pH, Log. (naměřená hodnota pH)

ny ve 2. ročníku. Porozumění podstaty logaritmu je nezbytným předpokladem pro schopnost interpretovat význam hodnoty pH a závislostem s tím spojeným, a proto je v rámci tohoto příspěvku navržena úloha, ve které žáci i bez předchozí znalosti logaritmu měří pH roztoků různě koncentrované HCl, sestavují graf a hledají, jaká funkce nejlépe ilustruje naměřená data. Na základě porovnávání hodnot a nově objevené závislosti dvou veličin mezi sebou poté řeší úlohy, které ověřují pochopení logaritmické funkce (viz Doplněk, supplement práce). Navržená úloha podporuje rozvoj matematické i digitální gramotnosti a na základě praktické činnosti žáků usnadňuje analýza dat pochopení konceptu pH.

Internetová verze této práce obsahuje navíc doplňující část. Pro vyhledání plné verze článku včetně příslušného *supplementu* je třeba otevřít aktuální webovou stránku Chemických listů.

LITERATURA

- <https://www.edu.cz/rvp-ramcove-vzdelavaci-programy/ramcove-vzdelavaci-program-pro-zakladni-vzdelavani-rvp-zv/>, staženo 22. 5. 2024.
- <https://www.edu.cz/rvp-ramcove-vzdelavaci-programy/ramcove-vzdelavaci-programy-pro-gymnazia-rvp-g/>, staženo 22. 5. 2024.
- <https://www.zatlanka.cz/skola/skolni-dokumenty/skolni-vzdelavaci-programy-gymnazia-na-zatlance.39>, staženo 22. 5. 2024.
- https://www.slovanak.cz/wp-content/uploads/2023/10/svpB_23_new.pdf, staženo 22. 5. 2024.
- Boudová S., Tomášek V., Halbová B.: *Národní zpráva PISA 2022*. Česká školní inspekce, Praha 2023.
- Park E. J., Choi K.: *J. Korean Assoc. For Sci. Educ.* 30, 920 (2010).
- Matůš I.: *Modelování představ žáků o chemických principech s využitím matematiky*. Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Praha 2018.
- Kovac J.: *J. Chem. Educ.* 89, 1485 (2012).
- <https://phet.colorado.edu/en/simulations/ph-scale>, staženo 22. 5. 2024.
- Watters D. J., Watters J. J.: *Biochem. Mol. Biol. Educ.* 34, 278 (2006).
- Hooper J., Marshall W. J., Miller A. K.: *Ann. Clin. Biochem.* 35, 85 (1998).
- Scott F. J.: *Chem. Educ. Res. Pract.* 13, 330 (2012).
- Clark T. M., Dickson-Karn N. M., Anderson E.: *J. Chem. Educ.* 99, 1587 (2022).
- Fraenkel D.: *J. Phys. Chem. B* 115, 557 (2011).
- <https://edu.rsc.org/experiments/testing-the-ph-of-different-solutions/395.article>, staženo 22. 5. 2024.
- <https://makezine.com/laboratory-111-determine-the-effect/>, staženo 22. 5. 2024.

J. Břížd'ala and E. Stratilová Urválková (*Faculty of Science, Charles University, Prague, Czech Republic*):
pH Measurement and Modelling as a Link between High School Chemistry and Mathematics

Investigating the acidity and alkalinity of solutions is linked to understanding the pH of solutions. At the secondary school level, this also means understanding the concept of the logarithmic function, which is a suitable topic for developing mathematical literacy. The objective was to design a laboratory activity in which students would not only measure solutions with the expected pH, but also construct a graph from the measured values without being aware of the dependence of pH on H_3O^+ concentration. This would enable them to identify the function that best fits the obtained curve. The problem presented discusses the limitations of the design and provides teachers with a basis for preparing the laboratory exercise, including a worksheet for students. The validation of the laboratory activity demonstrates that during the implementation of the exercise, students are able to construct a graph from the measured values and solve application problems related to understanding the concept of a logarithmic function.

Keywords: pH, pH electrode, mathematical modelling, mathematical literacy



Užití tohoto díla se řídí mezinárodní licencí Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.cs>), která umožňuje neomezené využití, distribuci a kopírování díla pomocí jakéhokoliv média, za podmínky řádného uvedení názvu díla, autorů, zdroje a licence.