

UNIVERZITA KARLOVA

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Chemie

Studijní obor: Chemie se zaměřením na vzdělávání – Biologie se zaměřením na
vzdělávání



Jan Staníček

**Alternativní zařízení pro měření a sběr dat a jejich možnosti využití ve
výuce chemie**

Alternative devices for data collection and possibilities of employment in chemistry
education

Bakalářská práce

Vedoucí práce: doc. RNDr. Petr Šmejkal, Ph.D.

Praha, 2020

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. RNDr. Petra Šmejkal, Ph.D. Všechny použité zdroje a literaturu jsem řádně ocitoval a uvedl v seznamu použitých zdrojů a literatury. Tato práce ani její podstatná část nebyla využita pro získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování:

Rád bych zde poděkoval svému vedoucímu práce doc. RNDr. Petru Šmejkalovi, Ph.D. za trpělivost, věnovaný čas a správnou navigaci během tvorby této práce.

Také bych zde rád poděkoval doc. RNDr. Karlu Nesměrákovi, Ph.D. za konsultaci ohledně formální stránky některých částí této práce.

Zvláštní poděkování patří také Mgr. Tomáši Feltlovi za technické rady a za školení pro sestavení a práci se školním měřícím systémem Molegraph, který byl využit k testování některých čidel v této práci, a kterého je jedním z tvůrců.

Na závěr bych rád poděkoval Katedře učitelství a didaktiky chemie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy za poskytnutí její laboratoře.

Abstrakt:

Školní měřicí systémy (ŠMS) mají za sebou již delší historii a stávají se dnes čím dál více běžným a efektivním pomocníkem ve výuce chemie. Rozšíření ŠMS však může bránit nedostatek finančních prostředků, který je pro některé učitele hlavním důvodem, proč se ŠMS ve výuce chemie nepracují. Pro řešení tohoto problému je proto vhodné hledat levnější zařízení, která by mohla sloužit jako alternativa ke značkovým ŠMS, a která by si mohl dovolit každý učitel. Expanze mezinárodních internetových obchodů a možnost levné mezinárodní přepravy vedly k tomu, že se začínají objevovat levné alternativy k relativně nákladným značkovým ŠMS či profesionální instrumentální technice. Je tedy žádoucí tyto alternativy ŠMS hledat a testovat jejich potenciál k využití ve výuce chemie jako levnější náhrady ke značkovým ŠMS, což je také hlavním tématem této práce. Výsledky této práce ukázaly, že taková levná zařízení jsou dobře dostupná a při jejich nákupu lze uspořit značné množství finančních prostředků. Tyto alternativy školních měřicích systémů poskytují data a výsledky v souladu s očekáváním, přičemž výstupy těchto zařízení a čidel se významně neliší od výstupů poskytovaných značkovými školními měřicími systémy a jsou uspokojivě reprodukovatelné. Nevýhodou může být delší doba dodání zboží ze zahraničního e-shopu a obtížný proces jeho případné reklamace. Další nevýhodou může být také absence funkce pro analýzu a práci s naměřenými daty u alternativ s autonomním displejem. Nicméně, celkově se jeví, že všechny testované levné alternativy ke školním měřicím systémům mají potenciál implementace ve výuce chemie.

Klíčová slova:

senzory, MBL, vzdělávání v chemii, školní měřicí systémy, levná čidla a zařízení

Abstract:

Probeware already has a long history and it is now more recognised as an effective utility in chemistry education. One of the main obstacles for probeware to expand is the lack of the financial means which is one of the main reasons why they are still plenty of teachers that do not use probeware in chemistry education. To solve this issue it is important then to find a cheaper replacement for original probeware so every teacher can use it. The rise of e-shops and cheap international shipping led to the appearance of cheap alternatives to relatively expensive probeware and to professional devices for instrumental methods. It is then vital to find these alternatives and to test their potential of becoming a fine replacement of the original probeware and that is also the main topic of this bachelor thesis. The results have shown that these cheaper devices already exist and by buying them a lot of financial means can be saved. This alternative probeware provides quality reproducible outputs based on real expectation which are not that much different from the outputs of the original probeware. They are also some disadvantages like long delivery time of goods from foreign e-shops and its complaint. As well as, advanced functions for data analysis are not available in the case of devices with autonomous display. Overall it seems like all cheaper alternatives to probeware that have been tested for this thesis have the potencial of implementation in chemistry education.

Keywords:

sensors, MBL, chemistry education, probeware, cheap sensors and devices

Seznam zkratek:

A/D – Analog/digital

BXK – Bílý Xiaomi konduktometr (Xiaomi TDS-meter)

c – Molární koncentrace (mol/l)

CNDT – Čínský diferenční tlakoměr MPX5700DP neznámého výrobce použitý v této práci

CNE – Čínská pH-elektroda neznámého výrobce použitá v této práci

ČR – Česká republika

EC – Electrical conductivity

EdLaB – Educational Laboratory Board

ISA – Industry Standard Architecture

ISES – Internetové školní experimentální studio

LAN – Local-area network

m – Hmotnost (kg)

MBL – Microcomputer based laboratory

MFF UK – Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy

MK – Modrý ruční konduktometr (TDS&EC-meter)

MS – Microsoft

MŠMT – Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy

n – Látkové množství (mol)

PC – Personal computer

PCI – Peripheral Component Interconnect

ppm – Parts per milion

RVP G – Rámcový vzdělávací program pro gymnázia

SCSI – Small Computer System Interface

SW – Software

ŠMS – Školní měřicí systém

ŠVP – Školní vzdělávací program

t – Čas (s)

TDS – Totally dissolved solids (ppm nebo mg/l)

USB – Universal serial bus

V – Objem (m³)

VK – Vínový ruční konduktometr (TDS-meter 3)

WIN – Windows

κ – Konduktivita ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

Obsah

Úvod.....	10
Teoretická část.....	12
Školní měřicí systém a počítačem podporovaný experiment	12
Technická stránka počítačem podporovaného experimentu.....	12
Výběr vhodného školního měřicího systému	13
Školní měřicí systémy a pohled do minulosti.....	15
Školní měřicí systémy na českém trhu	16
Cíle práce.....	21
Praktická část.....	22
Výběr levných alternativ za značkové ŠMS.....	22
Zakoupená zařízení a důvody jejich výběru	22
Použité přístroje, programy a další technika	24
Použité metody	31
Cenové srovnání (nejen) použitých zařízení a dalšího příslušenství	33
Výsledky a diskuse.....	37
Porovnání přístrojů pro měření pH.....	37
Měření čínskou elektrodou v tovární kalibraci a ke značkovým ŠMS	37
Měření čínskou elektrodou po provedení kalibrace přes ŠMS PASCO	38
Reprodukovatelnost měření čínské elektrody a její implementace do výuky.....	40
Měření čínskou elektrodou v ŠMS Molegraph.....	42
Bezdrátové měření pomocí ŠMS Molegraph a čínské elektrody.....	42
Titrace s využitím ručního pH-metru a porovnání se značkovými ŠMS.....	44
Reprodukovatelnost měření ručního pH-metru a jeho implementace do výuky	45
Porovnání přístrojů pro měření tlaku.....	47
Srovnání měření čínského diferenčního tlakoměru se značkovými ŠMS a jejich reprodukovatelnost.....	47
Uplatnění čínského diferenčního tlakoměru k demonstraci principu reakční kinetiky	50
Porovnání látkového množství vzniklého vodíku z hodnot tlaku a hodnot navážek.....	51
Porovnání přístrojů pro měření konduktivity	53
Porovnání ručního konduktometru ke značkovým ŠMS	53
Porovnání ručního TDS&EC-metru se dvěma TDS-metry a jejich uplatnění.....	54

Závěr.....	56
Zdroje	58

Úvod

Od zavedení povinné školní docházky v roce 1774 Marií Terezií na území Česka k roku 2019 uplynulo již 245 let. Od tabule a křídly, přes dataprojektory a powerpointové prezentace, k interaktivním tabulím. Od břídlícové tabulky v lavici, přes sešity, k notebookům. Na některých školách se dokonce už objevují i tablety jako prostředek ke zkvalitnění výuky, zatím však spíše v zahraničí. V České republice (ČR) je nejvíce rozšířena výuka přes zmíněné dataprojektory a interaktivní tabule, a v tomto směru si naše vlast vede možná mírně lépe než je to tomu v zahraničních státech. Během procesu, který bychom mohli jen pro naši potřebu nazývat didaktická evoluce, se ke klasické frontální výuce, která bývala odjakživa více teoreticky zaměřená, přidala i výuka laboratorních cvičení, která se orientují především na praktické hledisko věci. Dnes je nám dobře znám empiricky zjištěný fakt, že praktická část výuky přírodních věd, zejména chemie, pokud má být kvalitní, se bez experimentu neobejde. V životě často patří mezi ty nejlepší učitele vlastní zkušenost. Nicméně je to právě zodpovědnost a břímě učitele žákovi tyto zkušenosti zprostředkovat, ať už ve formě školního experimentu, či kvalitní přednášky o tabuli a křídě. Při demonstraci školního experimentu žák zapojuje téměř všechny smysly, chemie pro žáka přestává v ten moment být jen abstraktní vědou. Žák podle zvoleného experimentu může chemii vidět na vlastní oči, případně i cítit či slyšet. V případě laboratorní práce a badatelské výuky žák zapojuje i svojí motoriku, vlastní úsudek, a co především, svojí zvědavost. Bývá to právě zvědavost, která žene ať jednoho člověka či lidstvo kupředu. Ve školní laboratoři je pak žák vtážen do děje na plných sto procent, stává se objevitelem i tvořitelem. Pro žáka to může být podstatně intenzivnější zážitek než pouhá přednáška. Tento zážitek se pak stává zkušeností. Stopa již zmíněné didaktické evoluce se otiskla i na poli laboratorních cvičení a školního experimentu, a to ve formě tzv. počítačem podporovaného experimentu, kde jsou data naměřená čidlem či sondou (pH, elektrické vodivosti, tlaku) převedena a zpracována do počítače. Tento moderní způsob školního experimentu přibližuje žákům s čím se dnes mohou setkat v praxi, a to nejen ve svém případném budoucím studiu přírodních věd a oblasti vědeckého výzkumu, ale i v potravinářském, farmaceutickém a chemickém průmyslu a nakonec i v běžném životě. Pro zavedení počítačem podporovaného experimentu na dané škole je vždy třeba vypořádat se s několika problémy. Zcela intuitivně připadají v úvahu hned tři největší.

Prvním by mohla být neochota učitele k zaškolení k práci s těmito přístroji a jejich zakomponování do výuky (např. vlivem nedostatku času, či nedostatku metodických materiálů a jejich dostupnosti). Druhým může být samotný přístup žáků k počítačem podporovanému experimentu. Na scéně je opět učitel, který musí umět pomoci žákům vybudovat si kladný vztah k této metodě školního experimentu. Tyto dva problémy se mezi sebou, jak je vidno, prolínají. Třetím problémem, tím nejvíce diskutovaným, byť možná ne nejčastějším, je nedostatek finančních prostředků. Ceny značkové sondy u největších výrobců školních měřících systémů na měření pH, či elektrické vodivosti jsou kolem deseti tisíců korun českých. Nutno brát v potaz, že ke zprovoznění a rozšíření možnosti měření různých fyzikálních a chemických veličin je vždy třeba několika komponentů. Výměna komponent se prodraží, jelikož k opotřebení soupravy dochází rychleji, protože prochází rukama mnoha studentů. Vyřešení těchto problémů je nezbytně důležité pro masové využití počítačem podporovaného experimentu ve výuce chemie a dalších přírodních věd u nás a pro jeho uchycení vůbec. V případě, že učitelé brání k implementaci počítačem podporovaného experimentu právě nedostatek finančních prostředků, nabízí se tak jedno alternativní řešení tohoto problému. Zprostředkovat počítačem podporovaný experiment do výuky při výrazně nižších cenových nákladech, a právě tímto tématem se bude zabývat tato práce.

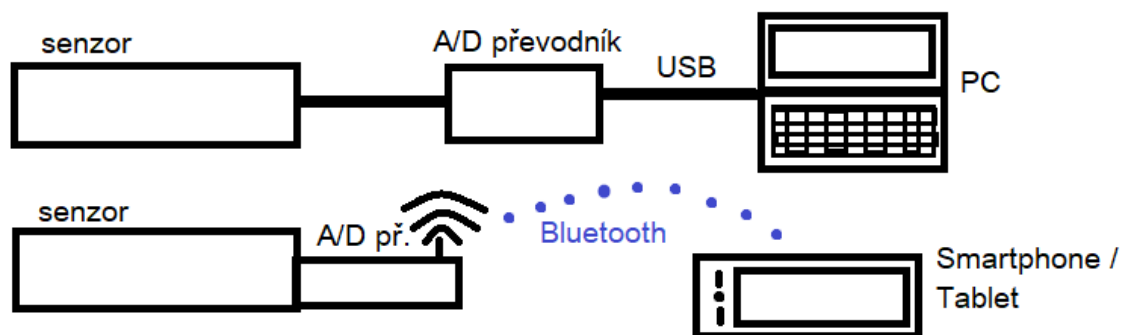
Teoretická část

Školní měřicí systém a počítačem podporovaný experiment

Pojem školní měřicí systém (ŠMS) nejčastěji označuje elektronické zařízení, jehož pomocí jsou získávána, případně i vyhodnocována a analyzována data nejrůznějších chemických a fyzikálních veličin ve školním experimentu, tedy s ohledem na fakt, že taková zařízení obsluhují hlavně žáci a učitelé, a to především ve školním prostředí. Z pohledu učitele se zařízení může stát ŠMS nejčastěji při splnění alespoň některých vlastností vhodných pro ŠMS (viz *Výběr vhodného školního měřicího systému*). Pojem počítačem podporovaný experiment je volný překlad anglického „Microcomputer based laboratory“ (MBL), a byl definován např. jako „...využití počítače ke snímání, uchování a zpracování měřicích se hodnot fyzikálních a chemických veličin a jako řídicího média při automatizaci experimentální činnosti.“ (Bílek, 2015). V následující podkapitole se ukáže jakým způsobem je školní měřicí systém prostředkem k realizaci počítačem podporovaného experimentu.

Technická stránka počítačem podporovaného experimentu

Při práci se školními měřicími systémy vypadá souprava počítačem podporovaného experimentu ve valné většině jedním ze dvou následujících způsobů (viz Obrázek 1)



Obr. 1 – Schéma dvou nejběžnějších souprav pro počítačem podporovaný experiment (vytvořeno v programu Malování)

Jak je z obrázku patrné vždy začínáme čidlem, na kterém v souvislosti s chemickým nebo fyzikálním dějem, který na něm probíhá změní voltmetr napětí. Toto napětí je

určitým způsobem úměrné jiné veličině, jejíž hodnota nás zajímá. Lze tak kromě elektrických veličin (proud, napětí) měřit i veličiny neelektrické (pH, teplota, tlak, hmotnost apod.). Vzhledem k tomu, že počítač zpracovává hlavně číselné údaje, je třeba toto napětí transformovat na proporciovaný elektrický signál, tedy z analogového signálu (zejména elektrické napětí) převést na signál digitální (číselný), který dokáže počítač zpracovat a zobrazit. K tomuto účelu slouží další komponent soupravy – A/D převodník. Nejběžnější 8-bitový převodník předává analogový signál ve 256 krocích v číslech 0 až 255. Chceme-li měřit hodnoty napětí v intervalu -20 až 20 V, bude jeden číselný krok (tzv. digit) odpovídat napětí $40/256 = 0,156$ V (odtud vyplývá pojem „proporciovaný elektrický signál“). Převodník pak počítači signalizuje změnu napětí (resp. jinou hodnotu napětí) až po překročení intervalu 0,156 V. Jinými slovy došlo k rozdělení napěťového intervalu -20 až 20 V na 256 stejných dílků o hodnotě 0,156 V. Změny napětí uvnitř jednoho dílku počítač nezaznamená. Chceme-li s uvedeným převodníkem získávat přesnější hodnoty napětí (resp. více desetinných míst), je třeba zmenšit rozsah měřeného intervalu. (Bílek, 2011). K těmto tzv. rozhraním (výraz, který používají výrobci ŠMS pro komponentu, která slouží jako A/D převodník) lze připojit nejrůznější čidla, a někdy i více čidel naráz. Třetí komponentu bychom mohli označit jako zobrazovací jednotku, která umožňuje zobrazovat a analyzovat naměřená data. Rozhraní u některých značek ŠMS pak má přímo integrovanou zobrazovací jednotku (pozn. vestavěný displej), nebo je připojeno kabelem nejčastěji do USB portu počítače, či bezdrátově pomocí Bluetooth ke smartphonu nebo tabletu (viz Obrázek 1). Ve všech třech případech je k analýze a zpracovávání dat potřeba také ještě příslušný software (program, aplikace), který je velmi často poskytován samotným výrobcem daného ŠMS.

Výběr vhodného školního měřícího systému

Výběr vhodného zařízení jako školního měřícího systému má své meze. S ohledem na bezpečné přechovávání zařízení mimo výuku, bezpečnou a snadnou manipulaci, kterou zvládnou i mladší žáci, velikost, chatrnost, údržbu apod. je žádoucí postupovat při výběru takového zařízení rozumně a nekupovat „slona do akvária“. (Šmejkal, 2019) uvádí následujících sedm doporučení, kterými je radno se při výběru takového zařízení řídit.

- 1) Obsluha a zapojení – Dané zařízení by mělo být možné snadno zapojit a rychle uvést do provozu. Obsluha zařízení musí být nenáročná i pro žáky. Získaná data musí přehledně zobrazená. Práce v uživatelském rozhraní (je-li nějaké) by neměla zabírat mnoho času. (Dodatek: Velkou výhodou je, je-li uživatelské rozhraní dostupné v rodném jazyce studentů resp. v jazyce, ve kterém výuka probíhá.)
- 2) Velikost a mobilita – zařízení by nemělo zabírat příliš prostoru, a je-li přechováváno v učebně nemělo by na svém místě bránit jiné aktivitě, vhodné pro tuto učebnu. Je-li zařízení přechováváno mimo učebnu, mělo by se jednat o zařízení, které se dá snadno a bezpečně přenášet.
- 3) Jednotnost ovládání – je-li k dispozici více zařízení, je užitečné, aby jejich ovládání probíhalo ve stejném uživatelském rozhraní. (pozn. Výrobci školních měřících systémů často nabízí daná čidla ve formě komponentů, jejichž obsluha probíhá přes jeden software.)
- 4) Odolnost – zařízení by nemělo být příliš křehké, a mělo by být konstruováno s ochrannými prvky proti poškození. (příkladem může být plastová ochrana elektrody, která brání jejímu kontaktu s pevným povrchem. Kryt zařízení by měl být pevný proti menším pádům, a relativně těsný proti průniku vody a vzdušné vlhkosti)
- 5) Údržba a provoz – Provoz i údržba by neměly být náročné na prostředky časově i ekonomicky. V opačném případě používání zařízení ve výuce učitele odrazuje. (Učitel na základní a střední škole nemá k dispozici laboranta, který by se staral o přípravu, chod a úklid laboratoře.)
- 6) Cena – Na základní a střední škole přesnost měření nehraje takovou roli jako názornost experimentu, kterou je vysvětlena jeho podstata. Mnohdy je důležité jen zda se jedná o kyselé či zásadité pH, nebo jak se mění vodivost při přidávku slabého a silného elektrolytu, nikoliv absolutní hodnoty pH a vodivosti. Z toho důvodu lze při nákupu zařízení ušetřit na přesnosti zařízení nemalé částky.
- 7) Spolehlivost – Zařízení by mělo být konstruované tak, aby při jeho zacházení či instalaci do provozu nedocházelo k odchýlkám při měření proti běžnému stavu, v horším případě úplnému selhání. Experiment musí být za stejných podmínek vždy proveditelný a reprodukovatelný.

Je patrné, že některá z těchto doporučení lze snadno dodržet, jiná vyžadují určitou praxi. Není od věci popsat se kolegů, vidět zařízení nejdříve na vlastní oči, případně zajistit si možnost si takové zařízení i vyzkoušet, v nejmenším případě zapátrat na internetu. Za

50 let školních měřících systémů ve výuce se na trhu objevilo několik výrobců, specializující se právě na zařízení, která splňují výše uvedená doporučení. Několik takových výrobců školních měřících systémů, se kterými se můžeme setkat na českém trhu, je uvedeno v podkapitole *Školní měřící systémy na českém trhu*.

Školní měřící systémy a pohled do minulosti

Počítačem podporovaný experiment (MBL) se ve výuce přírodních věd poprvé objevuje v USA koncem 70. let (Hood, 1994), krátce na to byly publikovány jejich technické aspekty, které se věnovaly možnostem hardwaru školních měřících přístrojů (např. Lam, 1983; Tinker 1985). Také byly vydány publikace týkající se jejich pedagogického aspektu (např. Thornton, 1986) a zrealizovány pedagogicko-didaktické výzkumy (Thornton & Sokoloff, 1990; Hamne & Bernhard, 2001; Tinker, 1996), které odhalily pozitivní vliv počítačem podporovaného experimentu na vývoj abstraktního myšlení žáků a zvýšení jejich dovedností v oblasti přírodních věd. Tyto první publikace patří fyzikům, kteří byli průkopníky využití školních měřících přístrojů ve výuce. Mezi ty zahraniční autory patří například již zmínění fyzici D. R. Sokoloff, R. F. Tinker a R. K. Thornton. V Česku je velkým průkopníkem ŠMS fyzik F. Lustig, který je autorem ŠMS ISES a mnoha publikací na téma počítačem podporovaného experimentu ve fyzice (Lustig, 2013). Mezi českými autory zabývajícími se aktuálně ŠMS a MBL v chemii patří především (Bílek, 2011; Stratilová Urválková, 2013; Skoršepa 2015; Šmejkal, 2019). Mezi hlavní důvody činící implementaci školních měřících přístrojů do výuky tak převratnou byly rychlý, volitelně automatický záznam a sběr dat, většinou i okamžité sledování vykreslované závislosti zjištěných veličin na grafu, a s tím i možnost jejich rychlého vyhodnocení, což poskytuje studentům dostatečný čas k diskusi získaných výsledků podle jejich potřeb (Šmejkal, Skoršepa, Stratilová Urválková 2018). Z dosavadních zkušeností se ukazuje implementace školních měřících systémů do výuky jako velmi užitečná jak pro vývoj schopností žáka, tak pro výuku přírodních věd jako takovou.

Školní měřicí systémy na českém trhu

Jedním z nejstarších ŠMS na českých školách je **ISES** (Internetový Školní Experimentální Systém)(viz Obrázek 2), který se poprvé objevil v roce 1985, byť se tak tehdy ještě nejmenoval. Jeho autorem je doc. RNDr. František Lustig, CSc. z MFF UK a kolektiv. V té době nebylo užívání počítače mezi lidmi běžné, natož pak ve školství a ve výuce přírodních věd u nás. Vzhledem k tehdejší absenci USB portu bylo propojení s počítačem komplikovanější - zajištěno zvláštními kartami jako PCI, SCSI, ISA, které musely být instalovány do počítače ručně. Nastavení a práce s tehdejšími čidly byla často tvrdý oříšek, který zvládali rozlousknout pouze počítačová nadšenci. Dnes již pár let ISES nabízí výrazně modernější produkty, které data převádějí přes USB jako souprava ISES-USB, či vzdáleně přes internet jako souprava ISES-LAN, která má v sobě integrovaný počítač. Komponenty jsou ovládány přes program ISESWIN. Od roku 2017 je na trhu produkt ISES-WIN s vestavěným počítačem s dotykovou obrazovkou. Dnes je pro přírodní vědy k dispozici již 20 čidel (např. teploměr, pH metr, konduktometr, sonar, měřič srdečního tepu, ampérmetr, voltmetr a mnoho dalších) (Ryzner, 2018) Více na <http://www.ises.info/old-site/>.



Obr. 2 – Školní experimentální systém ISES

Zdroj: http://www.ises.info/ises_data/systemises/introduction/general.jpg ze dne 8. 12. 2019

Od roku 2008 je na českém trhu dostupný americký velkovýrobce školních měřících systémů s více než 50 letou tradicí – **PASCO** (viz Obrázek 3). Jeho hlavními distributory v ČR jsou Profimedia s.r.o. a AV media a.s. (Šmejkal, 2019). Nabízí více než 60 senzorů, z toho téměř 3 desítky i v bezdrátovém provedení. Sensory jsou tak zapojeny přes převodník do USB portu, či lze jejich bezdrátové varianty ovládat přes Bluetooth i pomocí smartphonu či tabletu přes verzi programu SPARKvue pro Android

i iOS. Rovněž nabízí zvlášť sady pro chemii, biologii i fyziku. K ovládání tohoto systému jsou k dispozici 2 programy. Prvním je uživatelsky snazší program PASCO SPARKvue, který je více edukačního charakteru s možností vytvoření interaktivního průvodce experimentem. Tento software kromě naměření a vyhodnocení dat dokáže toto měření zasadit i do širšího teoretického i praktického rámce problematiky pokusu. Interaktivní průvodce s experimentem pracuje podle předem vytvořeného materiálu, a informuje žáky jak mají pokus realizovat, jaké senzory zapojit apod. Druhým programem je PASCO Capstone, který je uživatelsky vyspělejší, vhodný pro sběr, zobrazení a důkladnou analýzu naměřených dat. Rovněž nabízí zasazení videonahrávky probíhajícího experimentu v synchronizaci s průběhem měření. Oba programy jsou dostupné i v českém jazyce. PASCO rovněž nabízí širokou škálu kompatibility softwaru na nejrůznějších zařízeních, a stáří počítače, softwaru či čidla tak nehraje velkou roli. „*Vše funguje se vším a na všem.*“ PASCO též nabízí seminář k zaškolení pro práci s jejich produkty a k jejich implementaci do výuky (Profimedia s.r.o., 2019). Více na <https://www.pasco.cz/>.



Obr. 3 – pH elektroda PASCO připojená BNC-konektorem k senzoru obecná chemie, který je připojen k USB Link PS-2100A s USB výstupem

Dalším tvůrcem školního měřicího systému, se kterým se na českém trhu můžeme setkat je opět americká firma – **Vernier Software & Technology** (Obrázek 4). Firma má více než 30 letou tradici. Jejím distributorem v ČR je Edufor s.r.o. Velmi bohatý sortiment zahrnuje nespočet (více než 100) senzorů všeho druhu, 10 různých rozhraní, 7

spektrofotometrů, 7 vah, 7 softwarů, a mnoho dalšího příslušenství a vybavení. Rovněž distribuují desítky knih a manuálů o práci s produkty Vernier k fyzice, chemii, agrokultuře, psychologii, biologii či forenzní analytice (Edufor s.r.o., 2019). Některé senzory se opět připojí kabelem přes převodník do USB portu, jiné jsou bezdrátové, a data jsou přenášena přes Bluetooth (Šmejkal, 2019). Ovládání sensorů na počítači může probíhat nejen přes placený program Logger Pro, který umožňuje zobrazení, analýzu a další zpracování naměřených dat (např. prokládání naměřených dat matematickými funkcemi, či vytváření vlastních veličin a koeficientů, kterými lze demonstrovat jejich vliv na podobu grafu). Zdarma k dispozici je zjednodušená verze tohoto programu zvaná Logger Lite, která nenabízí takové možnosti analýzy a zpracování naměřených dat. Pro bezdrátová čidla je rovněž zdarma k dispozici program Graphical Analysis, který umožňuje zobrazení a určité zpracování naměřených dat pro rychlou demonstraci v terénu na smartphonu či tabletu. V možnostech tohoto programu je i prokládání naměřených dat matematickými funkcemi, měření více čidly naráz apod. Ten je dostupný pro Windows, Android i iOS. Všechny tři uvedené programy jsou dostupné i v českém jazyce. Vernier rovněž poskytuje školení pro učitele o práci s jejich měřicími systémy, jejich implementaci do výuky a též širokou technickou a metodickou podporu (Edufor s.r.o., 2019). Více na <https://www.vernier.cz/>.



Obr. 4 – pH elektroda Vernier připojená k USB rozhraní GO-LINK s USB výstupem

Ze tří výše uvedených školních měřicích systémů je ISES českým reprezentantem významným právě pro svou dobu působnosti a český původ. Druzí dva reprezentanti ŠMS z USA jsou v ČR nejvíce známy, jak tvrdí například menší průzkum

(Jenčuš, 2019). Vzhledem k cílům této práce a vybrané metodiky k jejich dosažení, budou proto další školní měřicí systémy zmíněny pouze okrajově.

Mezi nováčky na českém trhu je Izraelský systém **NeuLog** od firmy Scientific Educational Systems distribuovaný firmou KDZ, spol s.r.o. (Šmejkal, 2019) V praxi se jedná o sérii nezávislých senzorů připojených na dotykově ovládaný logger zobrazující data. Tento logger se pak připojí k USB, Wifi nebo Bluetooth modulu, který pak přenáší data do počítače. Loggery jdou spojovat k sobě, takže k přenosu dat stačí mít pouze jeden modul. S daty se pracuje v aplikaci pracující ve webovém prohlížeči. Neulog momentálně nabízí 40 různých senzorů (KDZ, spol. s.r.o., 2019). Více na www.neulog.cz.

Malým avšak českým zástupcem školních měřicích systému je **EdLaB (Educational Laboratory Board)**. Výrobcem a zároveň distributorem je firma Connexia electric, s.r.o. Na českém trhu je od roku 2009. K dispozici je 33 čidel, které se připojují kabelem do analogových vstupů rozhraní EdLaB. To je pak připojeno přes USB do počítače. K ovládání čidel slouží software EdLaB (podp. Windows XP a vyšší), který je dodáván s rozhraním. Bezdrátové varianty čidel zatím nejsou vyráběny (Connexia electric, s.r.o., 2019). Více na www.edlab.cz.

Posledním zástupcem ŠMS, který zde stojí za zmínku je **Platforma einstein** od Izraelské firmy Fourier Education (Šmejkal, 2019). Jejím distributorem je firma Moravia Europe, spol. s.r.o. přes <http://www.fourieredu.cz/cz>. K dispozici je 54 senzorů. Sensory jsou připojeny kabelem do rozhraní, které pak podle jeho typu komunikuje s PC přes USB kabel, či bezdrátově přes Bluetooth. K ovládání senzorů jsou k dispozici aplikace (pro Windows, Mac, Linux, Android, iOS) zdarma na stránkách výrobce. Stejně tak jsou tam k dispozici vytvořené materiály pro implementaci jejich produktů do výuky přírodních věd (Fourier Education, 2019; MORAVIA Consulting, spol. s r.o., 2019)

Výše uvedený přehled některých školních měřicích systémů dostupných v ČR nemá za cíl žádný z nich zviditelňovat či naopak pohoršovat před konkurencí. Cílem této podkapitoly bylo ukázat, že výrobci zabývající se speciálně na ŠMS existují, a že i většina z nich poskytuje kvalitní výukové materiály pro žáky a školení učitelům

k implementaci ŠMS do výuky, což je bezpochyby dobře. Nicméně se stává, že odrazujícím faktorem k pořízení značkového ŠMS bývá jeho cena. V takovém případě by nebylo na škodu, kdyby mohl vyučující sáhnout po levnější alternativě. S nástupem velkých zahraničních internetových obchodů, které dováží zboží i do ČR, by se mohlo zdát, že taková potenciální alternativa k ŠMS již na těchto obchodech existuje. Pokud ano, bylo by vhodné tato zařízení otestovat z hlediska jejich funkčnosti a porovnat je se současnými značkovými ŠMS. Pokud by tato zařízení splnila vlastnosti školního měřicího systému a byla schopna plnit zvolené chemické experimenty, tak by získala potenciál pro implementaci do výuky chemie jako levnější náhrada za značkové ŠMS. Tímto problémem se podle výsledků provedené rešerše zatím zřejmě nikdo významně nezabýval. Z tohoto důvodu se proto tato práce vydá tímto směrem.

Cíle práce

Tato závěrečná práce se zabývá testováním a zhodnocením funkčnosti a využitelnosti alternativních zařízení ke školním měřícím systémům při výrazně nižších cenových nákladech. Dílčími cíli této práce tak jsou:

- 1) Na základě internetové rešerše vyhledat a vybrat několik nízkonákladových zařízení, jejichž prostřednictvím by bylo možné realizovat experimenty s využitím instrumentální techniky (ŠMS).
- 2) Provést srovnávací testování několika těchto vybraných zařízení proti školním měřícím systémům specializovaných výrobců (značkové ŠMS).
- 3) Zhodnotit tato levná zařízení, zda a k čemu je lze použít v laboratorních cvičení pro výuku chemie jako náhradu za finančně náročnější školní měřící systémy.

Praktická část

Výběr levných alternativ za značkové ŠMS

Vzhledem k tématu a cílům této práce bylo třeba vybrat čidla, která mohou mít ve výuce chemie vhodné uplatnění, a ke kterým existují dostupné alternativy v co nejnižší cenové relaci. Hledání těchto zařízení bylo soustředěno na velké internetové obchody (Amazon, Banggood, Aliexpress), a to hlavně z důvodů, že mají největší výběr, nízké ceny, dodávají zboží i do ČR a mají i anglickou verzi stránek, takže se na nich snadno hledá. Samozřejmě nelze vyloučit existenci levnějšího e-shopu, ale není-li jeho rozhraní lokalizováno do anglického jazyka, těžko si k němu učitel najde cestu. Navíc, hledání v malých prodejnách je časově velmi náročné a většinou nenabízí tak široký sortiment a často ani nízké ceny. Nákupu na zmíněných internetových obchodech se nevyhnu rizika s tím spojená. Člověk kupuje „zajíce v pytli“, doba doručení se může výrazně protáhnout, obzvláště cestuje-li zboží až z Číny. V neposlední řadě případné reklamace bývají komplikované, čas beroucí a někdy neúspěšné. Následující podkapitola prezentuje, která zařízení byla vybrána a proč.

Zakoupená zařízení a důvody jejich výběru

S ohledem na nabízený sortiment v nízké cenové relaci na internetových obchodech a na uplatnění čidla ve výuce chemie byla k testování vyplývajícímu z cílů práce vybrána čidla pH, tlaku a vodivosti. Čidlo pH má uplatnění při výuce teorie kyselin a zásad a provádění acidobazických titrací, které jsou často součástí laboratorních cvičení, a které mimo jiné demonstrují také stechiometrický průběh reakcí. Acidobazické titrace patří do kvantitativní analýzy, jejíž znalosti jsou požadavkem očekávaných výstupů z chemie podle rámcového vzdělávacího programu pro gymnázia (RVP G) (MŠMT, 2007), a provedení acidobazické titrace se objevuje i v očekávaných kompetencích žáka z chemie v některých školních vzdělávacích programech (ŠVP) (Hamhalterová et al, 2009; Schejbalová et al., 2019). Čidla tlaku lze využít především při demonstraci principů reakční kinetiky, která je podobně jako v předchozím případě zmíněna jak v RVP G (MŠMT, 2007), tak v některých ŠVP (Hamhalterová et al, 2009; Schejbalová et al., 2019). Konduktometry lze pak využít při výuce silných a slabých elektrolytů,

kteře jsou opět předmětem učiva chemie v některých ŠVP (Hamhalterová et al, 2009; Kmentová, Kvasničková 2009; Schejbalová et al., 2019). Jako čidlo pH byla pro účely této práce zvolena levná čínská elektroda neznámého výrobce, která je v této práci označována jako „CNE“. CNE byla pořízena na www.banggood.com. Kromě velmi nízké ceny byla zvolena proto, že měla připojení pomocí tzv. [BNC-konektoru](#) („BNC-konektor“, 2020). Elektrody od ŠMS PASCO mají též BNC-konektor. Zajímalo nás tedy, zda může učitel v případě poruchy drahé značkové elektrody zapojit tuto mnohonásobně levnější variantu do rozhraní ŠMS PASCO a ušetřit tak mnoha tisíc korun za novou PASCO elektrodu. Jako další čidlo pH k testování byl zvolen ruční pH-metr (pH tester pH-107) taktéž neznámého výrobce, pořízený opět na www.banggood.com. Tento ruční pH-metr je běžně používán mezi zahrádkáři, akvaristy a vařiči piva. Obsluha je nadmíru snadná a nevyžaduje žádný počítač, telefon ani software. Nevýhodou je, že žák nevidí vykreslení titrační křivky během měření a musí si data zpracovat sám později ve vhodném programu na počítači nebo pomocí tužky a milimetrového papíru. Zároveň se jedná o malé dobře skladovatelné zařízení, které vyžaduje jen občas doplnit uchovávací roztok chloridu draselného a vyměnit baterky. Zajímalo nás, zda je titrace proveditelná i tímto jednoduchým přístrojem a jestli dostaneme podobný výstup titračních křivek jako u značkových ŠMS. Analogicky k malému ručnímu pH-metru bylo zakoupeno pět ručních konduktometrů (čidel měrné vodivosti) na www.banggood.com, www.akva-tera.cz a www.xiaomimarket.cz. Pro tři z nich, které byly testovány v této práci jsou použity následující zkratky: MK pro modrý, VK pro vínový a BXK pro bílý Xiaomi konduktometr. Malou velikostí, cenou, a snadnou obsluhovatelností se jedná o velmi podobné zařízení ručnímu pH-metru. Výběr byl zde velmi jednoduchý, protože sortiment obsahoval buď tyto malé konduktometry nebo větší a složitější přístroje jejichž cena se pohybovala v řádech tisíců korun. Důvodem k jejich zakoupení bylo opět porovnat jejich výstupy proti čidlům vodivosti dostupných u značkových ŠMS. Jako čidlo tlaku byl zvolen diferenční tlakoměr MPX5700DP, pro který je v této práci použita zkratka CNDT a který byl zakoupen na www.laskarduino.cz. U tlakoměrů byl výběr jen velmi omezený. CNDT lze zakoupit pouze jen jako součástku, ke které je třeba připájet kabel, aby ji bylo možné připojit k rozhraní, přes které je ovládána. Důvodem výběru tohoto tlakoměru bylo zjistit jeho použitelnost k demonstraci platnosti reakční kinetiky, a také porovnat jeho výstupy proti značkovým ŠMS. Posledním zařízením k testování, s ohledem na cíle práce, byl nový a již složitější prototyp rozhraní nazývaný Molegraph U01. Jedná se v podstatě o

tuzemský open source ŠMS založený na bázi Arduino. Jeho hlavním tvůrcem je Mgr. Tomáš Feltl, který se i nadále podílí na dalším vývoji a inovaci tohoto ŠMS. Se školitelem jsme měli možnost si jej sestavit v rámci kurzu „Arduino – školní měřicí systém svépomocí a levně“ (viz <https://www.interactivelearning.cz/vzdelavani/arduino-skolni-merici-system->). Nejedná se tedy o čidlo jako takové, ale o komponentu rozhraní, jehož funkce byla probrána v podkapitole *Technická stránka počítačem podporovaného experimentu*. Důvodů výběru zařízení Molegraph U01 je hned několik. Zařízení umožňuje přes další součástku (ph E201) připojit CNE pomocí BNC-konektoru. Též umožňuje připojit upravený CNDT pomocí RJ12 konektoru. Toto rozhraní nám tedy umožnilo dále testovat a obsluhovat CNE a CNDT. Kromě zmíněných čidel lze k němu připojit i další levně dostupná čidla (voltmetr, detektor plynů, ampérmetr, infračervený teploměr apod.), takže uživatel získává za přijatelnější finanční prostředky řadu funkcí a možností školního měřicího systému, které čidla sama o sobě neposkytují. Kupodivu čidlo vodivosti k ŠMS Molegraph zatím není k dispozici. Samozřejmě to byla i příležitost otestovat tento jednodušší a levnější ŠMS proti značkovým ŠMS v tom, zda s ním lze např. provádět titraci i při připojení k tabletu pomocí Bluetooth (toto zařízení totiž umí přepínat mezi připojením pomocí mikroUSB do počítače a bezdrátovým připojením pomocí Bluetooth, přičemž během bezdrátového připojení je napájeno klasickou 9V baterií).

Použité přístroje, programy a další technika

V této podkapitole je uveden výčet použitých měřicích zařízení a dalších přístrojů, programů apod. se zjištěnými údaji (některé technické parametry, zvláště u zakoupených levných alternativ nebyly k dispozici nebo je nebylo z různých důvodů možno zpětně dohledat).

Školní měřicí systém PASCO:

- PC se SW Datastudio (pro Windows)
- tablet se SW SPARKvue (pro Android)
- drátové rozhraní USB Link PS-2100A (komunikuje s PC přes USB)(Obrázek 2)
- Bezdrátové rozhraní AirLink 2 PS-2010 (komunikuje s tabletem přes Bluetooth)
- senzor obecná chemie (Obrázek 2 a 5)

- měření teploty (rozsah: -35 až $+135$ °C, přesnost: $\pm 0,5$ °C)
 - měření pH (skleněná elektroda – rozsah: 0 až 14 pH, přesnost: $\pm 0,1$ pH)
 - měření absolutního tlaku (rozsah: 0 až 700 kPa)
 - měření napětí (přesnost: ± 10 V)
 - maximální měřicí frekvence: 20 Hz
- senzor na měření vodivosti (Obrázek 6)
- Rozsah senzoru: 0 - 1000 $\mu\text{S/cm}$, 0 – 10000 $\mu\text{S/cm}$, 0 – 100000 $\mu\text{S/cm}$
 - Přesnost: ± 10 % zvoleného rozsahu
 - Rozlišení: 0,1 %
 - Maximální měřicí frekvence činí 20 Hz
 - Operační rozsah: 0 – 50 °C

Školní měřicí systém Vernier:

- PC se SW LoggerPro (pro Windows)
- USB rozhraní GO-LINK (komunikuje s PC přes USB) (Obrázek 7)
- pH senzor (Obrázek 4)
- rozsah 0 - 14 pH
 - Citlivost: 0,005 pH
 - Provozní teplota: 5 °C až 80 °C
- Čidlo tlaku plynu (Obrázek 8)
- Rozsah: 0 - 210 kPa
 - Citlivost: 0,06 kPa
- Elektroda na měření vodivosti (Obrázek 7)
- Rozsahy měření: 0-200 $\mu\text{S/cm}$, 0-2000 $\mu\text{S/cm}$ a 0-20 000 $\mu\text{S/cm}$
 - Odpovídající citlivost: 0,1 $\mu\text{S/cm}$, 1 $\mu\text{S/cm}$ a 10 $\mu\text{S/cm}$.
 - Přesnost: 1 % z rozsahu.

Elektroda původem z Číny (CNE) (Obrázek 9)

- Výrobce, rozsah, přesnost – neuvedeno
- K použití elektrody jsou třeba některé komponenty (rozhraní) ŠMS PASCO či ŠMS Molegraph

Ruční pH-metr z Číny (pH tester pH-107) (Obrázek 10)

- Rozsah: 0,0 – 14,0 pH
- Přesnost: ± 0.1 pH
- Rozlišení: 0,1 pH
- Provozní teplota: 50 °C
- K vyhodnocení dat byl použit PC s MS Excel 2010 (pro Windows)

Ruční konduktometr z Číny (TDS&EC meter) – modrý (MK) (Obrázek 11)

- Výrobce – neuveden
- Rozsah: 0-9990 $\mu\text{S}/\text{cm}$; 0-9990 ppm
- Přesnost: ± 2 %
- Teplotní rozsah pro měření: 0-50 °C
- Měří *TDS* v jednotkách ppm
- Měří vodivost v jednotkách $\mu\text{S}/\text{cm}$
- Měří teplotu v jednotkách °C a °F

Ruční konduktometr z Číny (TDS meter 3) – vínový (VK) (Obrázek 11)

- Výrobce – neuveden
- Rozsah: 0-9990 ppm
- Přesnost: ± 2 %
- Teplotní rozsah pro měření: 0-50 °C
- Měří *TDS* v jednotkách ppm

Ruční konduktometr z Číny (Xiaomi TDS-meter) – bílý (BXK) (Obrázek 11)

- Výrobce: Xiaomi
- rozsah, přesnost – neuvedeno
- Měří *TDS* v jednotkách ppm

Školní měřicí systém Molegraph:

➤ Rozhraní Molegraph U01 (Obrázek 9)

- platforma Arduino NANO v3 (Atmega328)
- Komunikace s PC: mikroUSB, komunikace se senzory: 4x RJ12 slot, bezdrátová komunikace s tabletem/smartphonem/PC: Bluetooth HC-05 modul

- V režimu bezdrátové komunikace napájeno 9V baterií
- pH E201 (součástka k propojení elektrody k rozhraní) (Obrázek 9)
 - rozsah: 0 - 14 pH
 - komunikuje s elektrodami mající BNC-konektor
- diferenční tlakoměr MPX5700DP (CNDT) (Obrázek 12)
 - rozsah: 0 – 700 kPa
- PC se SW Molegraph (pro Windows)
 - Slouží k ovládání čidel
- Tablet se SW Molegraph (pro Android)
- PC se SW ArduinoIDE (pro Windows)
 - Slouží ke kalibraci čidel

(pozn. klíčové součástky k sestrojení rozhraní Molegraph a senzorů pro Molegraph jsou původem z Číny a jsou běžně prodejné na větších e-shopech. Návrh rozhraní z těchto součástek jako celku, kryty, software je původem z ČR, hlavním autorem je Mgr. Tomáš Feltl, více na <https://www.e-mole.cz/diy/molegraph-shield>



Obr. 5 – senzor „Obecná chemie“ od ŠMS PASCO



Obr. 6 – Senzor na měření vodivosti PASCO připojený k rozhraní USB Link PS-2100A



Obr. 7 – Elektroda na měření vodivosti zapojená k USB rozhraní GO-LINK



Obr. 8 – čidlo tlaku plynu ŠMS Vernier



Obr. 9 – ŠMS Molegraph – Rozhraní Molegraph U01 (vpravo), do něj konektorem RJ12 zapojená součástka pH E201 (uprostřed), a k ní BNC-konektorem zapojena CNE (vlevo)



Obr. 10 – levný čínský ruční digitální pH-metr



Obr. 11 – TDS-meter Xiaomi (BXX), TDS&EC-meter (MK), TDS-meter 3 (VK)



Obr. 12 – diferenční tlakoměr MPX5700DP (CNDT) čínského původu spájený k ethernetovému kabelu uvnitř 3D tištěného krytu navrženého tvůrci ŠMS Molegraph

Použité metody

K porovnávání elektrod, ŠMS a ručního pH metru byla jako stěžejní metoda zvolena acidobazická titrace, protože se jedná o běžně ve škole prováděnou analytickou metodu, se kterou se setká ve škole de facto každý žák na laboratorních cvičení. Zároveň je i z jedné titrace získáno mnoho dat a senzory pH jsou prověřeny v kyselé i bazické oblasti. Provedeny byly jednak titrace 0,2M kyseliny octové 0,2M hydroxidem sodným a také titrace navážek kyseliny šťavelové 0,2M hydroxidem sodným. Grafické výstupy a hodnoty dat z jednotlivých titrací byly porovnávány mezi zakoupenými levnými čidly a značkovými ŠMS. Dva hlavní aspekty, které byly sledovány i u dalších zařízení v této práci, jsou odlišnost získaných výstupů srovnávaných zařízení a soulad těchto výstupů s realitou (pozn. pod pojmem „soulad s realitou“ si lze představit například, zda byl získán typický tvar titrační křivky či zda pH kyseliny bylo skutečně kyselé). Nutné je podotknout, že zcela účelově nebyla zkoumána správnost naměřených hodnot (pod pojmem „správnost“ si lze představit např. zda má roztok 0,2M kyseliny octové pH 3,63), to pro potenciální implementaci do výuky chemie není tak důležité. U čidel pH pak tedy bylo konkrétně zjišťováno, zda je dobře nakalibrována CNE z továrny. Jestli měří CNE při zapojení do ŠMS PASCO. Jak CNE měří proti značkovým ŠMS. Jestli jsou její měření reprodukovatelná a jaká je její reprodukovatelnost proti značkovým ŠMS. Také bylo testována jak měří při zapojení do ŠMS Molegraph a jestli lze provádět

titraci s rozhraním Molegraph připojeném k tabletu přes Bluetooth. Na závěr bylo testováno zda lze provádět titraci s ručním pH-metrem, zda jsou jeho titrace reprodukovatelné a jaká je jeho reprodukovatelnost proti značkovým ŠMS. **K porovnávání čínského diferenčního tlakoměru proti značkovým ŠMS** byl zvolen experiment s vhozením navážky hořčíku do zkumavky s roztokem kyseliny chlorovodíkové, a sledování změny tlaku způsobené vývojem vodíku. Tento pokus se provádí k demonstraci principu reakční kinetiky. Zkumavka s vybraným roztokem kyseliny chlorovodíkové je umístěna do stojanu. Do zkumavky je vhozena navážka hořčíku. Zkumavka je ihned uzavřena zátkou, která má v sobě otvor, do kterého se umístí hadička připojená k tlakoměru. Navážky hořčíku byly voleny úmyslně velmi podobné, ale buď byly ve zkumavce 2 ml 2M kyseliny chlorovodíkové nebo 4 ml 2M kyseliny chlorovodíkové nebo 2 ml 1,5M kyseliny chlorovodíkové. Výstup dat tlakoměru za čas je pak závislý na koncentraci zvoleného roztoku kyseliny. Tímto lze tedy dokázat, že rychlost reakce závisí na koncentraci výchozích látek a nezávisí na látkovém množství. Výhodou je opět vyšší množství získaných dat, které lze porovnat v širším rozmezí funkčnosti čidla. Sériemi takových to měření bylo jednak testováno, zda může být CNDT použit k ověření principů reakční kinetiky, zda jsou jeho měření reprodukovatelná, a jaký je jeho výstup měření ve srovnání se značkovými ŠMS. V poslední řadě bylo porovnáno, zda hodnoty změn tlaku z CNDT přepočítané na látkové množství plynu odpovídají látkovému množství vodíku, který skutečně vznikl při znalosti použité navážky hořčíku a jak tento výstup vypadá u značkových ŠMS. Totiž pro již zmíněné způsoby testování CNDT bude při práci s daty nutné využít stavovou rovnici ideálního plynu, což znamená, že tímto posledním typem testování je možné zkoumat, zda aspoň přibližně data vložená do stavové rovnice ideálního plynu (naměřený tlak, teplota, objem) korespondují s navážkou hořčíku. Tedy, zda se naměřené hodnoty tlaků blíží možným reálným hodnotám (jedna z forem již zmíněného „souladu s realitou“). **K porovnávání ručních konduktometrů proti značkovým ŠMS** bylo zvoleno měření vodivosti sestupné koncentrační řady kyseliny mravenčí. Při stálém objemu byla sestupně měřena vodivost roztoku 0,02M kyseliny mravenčí, a koncentrace byla celkem 4krát snížena na polovinu. Nejdříve byl porovnán pouze MK se značkovými ŠMS, protože zobrazuje hodnoty v $\mu\text{S}/\text{cm}$, zatímco VK a B XK nedokáží zobrazovat v jednotkách měrné elektrické vodivosti, jelikož se jedná pouze o TDS-metry, proto nemohly být porovnány se značkovými ŠMS. VK a B XK tak byly

porovnány pouze s MK, který umí přepínat mezi hodnotami ppm a $\mu\text{S}/\text{cm}$. Zbylé dva z celkem pěti zakoupených konduktometrů nemohly být testovány, jelikož nefungovaly.

Cenové srovnání (nejen) použitých zařízení a dalšího příslušenství

V tabulce 1 níže jsou uvedena jednak všechna použitá zařízení, komponenty a jejich přibližné ceny, aby byla porovnána finanční náročnost jednotlivých řešení pro měření uvedených veličin. U měření pH a tlaku byl této práci od ŠMS PASCO použit senzor obecná chemie. Nicméně, aby byla srovnána cena analogických zařízení, tak byly do tabulky 1 zařazeny i ceny senzoru pH PASCO a čidla tlaku PASCO. Některé uvedené modely komponent jsou zastaralé a nedostupné. Výrobci nahradili starší modely novějšími, často jejich bezdrátovými verzemi. Ceny bezdrátových verzí bývaly v minulosti výrazně vyšší, dnes jsou prakticky totožné. Ceny novějších modelů se výrazně neliší od cen modelů starších. U levných alternativ lze narazit na různě lišící se ceny, proto je uvedeno pouze cenové rozmezí. Ceny použitého počítače, popř. tabletu nebyly do tabulky 1 zahrnuty, neboť je vyžadují všechna uvedená řešení (i měření pomocí čidel s autonomním displejem, kdy jsou PC nebo tablet nezbytné ke zpracování dat). Rovněž v tabulce 1 nejsou nikde uvedeny a zahrnuty ceny použitého SW, protože k uvedeným ŠMS existují i verze SW, které jsou zdarma dostupné. Také je samozřejmostí, že k tomu, aby bylo možné provádět měření pH, tlaku i vodivosti nám stačí zakoupit SW pouze jednou (inf. pozn. Cena multilicence placené verze SW u ŠMS PASCO a ŠMS Vernier se pohybuje okolo 16 000 Kč. SW pro ŠMS Molegraph je zdarma). Aktuální nabídky vybavení ŠMS PASCO v ČR jsou dostupné na www.pasco.cz/, ŠMS Vernier pak na www.vernier.cz/. Informace k ŠMS Molegraph jsou dostupné na <https://www.e-mole.cz/diy/molegraph-shield>. Levné alternativy čidel jsou, jak již bylo zmíněno, běžně dostupné např. na <https://www.amazon.com/>, <https://www.banggood.com/> a <https://www.aliexpress.com/>.

Tab. 1 – Cenové srovnání (nejen) použitého vybavení

Typ zařízení/komponenty	Zařízení/Komponenta (cena v Kč)		
	PASCO	Vernier	Levná alternativa
Rozhraní	USB Link PS- 2100A (2300),	USB GO-LINK (3980)	Molegraph U01 (4780 v rámci

	AirLink 2 PS-2010 (alt. 3000)		kurzu, 1000-1500 domácí sestavení)
pH-elektroda/metr	Senzor pH (5500), Senzor Obecná chemie (5850)	pH senzor (4500)	CNE (100-350), ruční pH-metr z Číny (100-300)
tlakoměr	Senzor absolutního tlaku (5260), Senzor Obecná chemie (5850)	Čidlo tlaku plynu (4980)	CNDT včetně ŠMS Molegraph (4780) v rámci kurzu
konduktometr	Senzor měření vodivosti (4250)	Elektroda pro měření vodivosti (5985)	MK/VK/BXK (200-500)

(pozn. cena počítače, tabletu a SW není uvedena)

Rychlými počty dojdeme k přibližným celkovým finančním nákladům potřebným k provádění daného typu měření ve výuce chemie. V tabulkách 2-4 jsou uvedeny náklady na soupravu pro daný typ měření. Již z výše uvedených důvodů, opět bez zahrnutí cen PC/tabletu a SW.

Tab. 2 – cenové srovnání použitých souprav pro měření pH v této práci

Měření pomocí	pH	Složení soupravy	Přibližná cena bez SW, PC/tabletu (Kč)
PASCO		SW Datastudio + senzor obecná chemie + USB Link PS-2100A + PC	8000
PASCO (bezdrátově)		SW SPARKvue (pro Android) + AirLink 2 PS-2010 + senzor obecná chemie + tablet	9 000
Vernier		SW LoggerPro (multilicence) + USB GO- LINK + pH senzor	9000
Molegraph		SW Molegraph + ŠMS Molegraph + CNE + PC/tablet	5 000
Ruční pH-metr		Ruční pH-metr + PC/milimetrový papír s tužkou	100-300

Tab. 3 - cenové srovnání použitých souprav pro měření tlaku v této práci

Měření tlaku pomocí	Složení soupravy	Přibližná cena bez SW, PC/tabletu (Kč)
PASCO	SW Datastudio + senzor obecná chemie + USB Link PS-2100A + PC	8000
Vernier	SW LoggerPro (multilicence) + USB GO-LINK + čidlo tlaku plynu	9500
Molegraph	SW Molegraph + ŠMS Molegraph + CNDT + PC/tablet	5 000

Tab. 4 - cenové srovnání použitých souprav pro měření konduktivity v této práci

Měření měrné elektrické vodivosti pomocí	Složení soupravy	Přibližná cena bez SW, PC/tabletu (Kč)
PASCO	SW Datastudio + senzor měření vodivosti + USB Link PS-2100A + PC	6500
Vernier	SW LoggerPro (multilicence) + USB GO-LINK + elektroda pro měření vodivosti	10000
Ruční EC-metr	(MK / VK / BXK) ruční konduktometr	200-500

Z tabulek 2-4 je patrné, že použitím levnějších alternativ se ušetří mnoho peněz. Při používání značkových ŠMS lze ušetřit např. použitím jiného SW či zakoupením multičidla (např. senzor Obecná chemie od PASCO, kterým bylo v této práci měřeno pH i tlak), pomocí kterého je možné měřit hned několik veličin. Takový ŠMS lze po zakoupení ihned použít. Naproti tomu ŠMS Molegraph je třeba si sestavit ručně a dovoz všech dílů také chvíli trvá. S ohledem na to, že čas jsou peníze, čas k sestavení Molegraph a připojení čidel pro učitele určitě vyjde mnohonásobně levněji než čas k získání finančních prostředků na značkový ŠMS s takovým počtem možných čidel. Čidla, která lze k Molegraph připojit stojí obvykle kolem 200 Kč, zatímco čidla ke značkovým ŠMS stojí kolem 5000 Kč. Chceme-li tak např. pět čidel, pak na rozhraní Molegraph ušetříme pětadvacetinásobek ceny dražší značkové alternativy. Při koupi ručního zařízení pak ztrácíme většinu funkcí a možností konvenčního ŠMS (pozn.

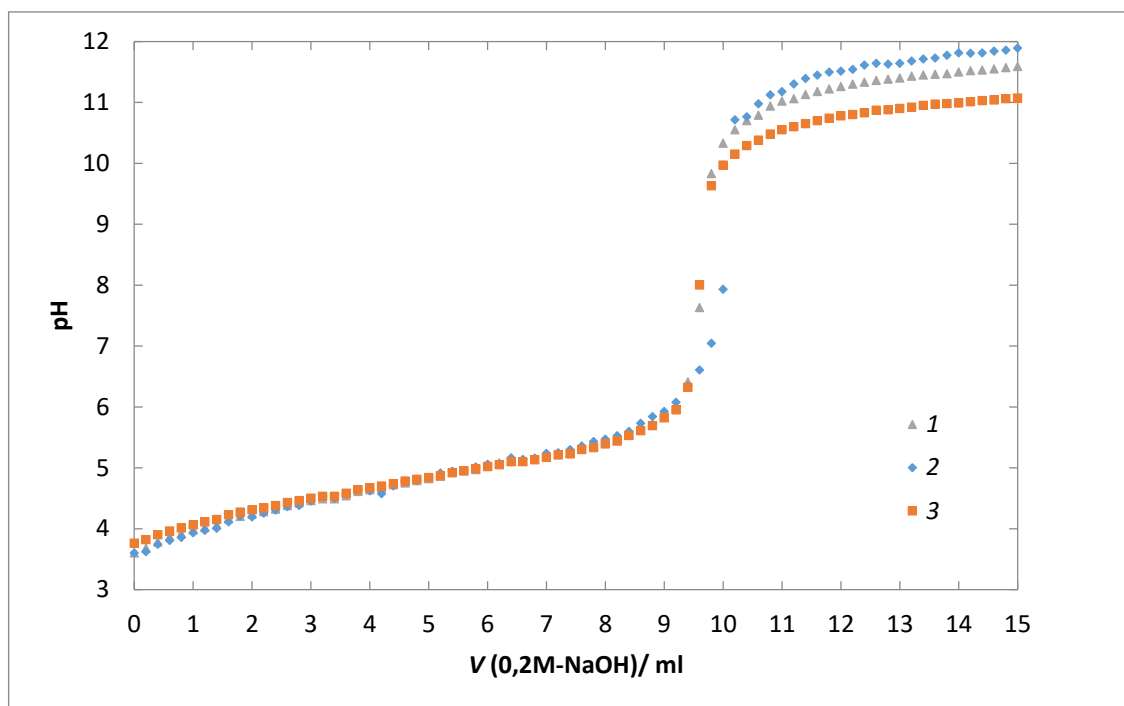
Pojmem „konvenční ŠMS“ je myšleno zařízení přímo sestavené za účelem aplikace ve školní výuce, které se skládá z čidla, rozhraní a SW určeného k ovládní čidel a sběru a analýzy dat. Naopak zařízení jako ruční pH-metr či ruční konduktometr patří do skupiny „alternativních ŠMS“, protože tyto přístroje nejsou primárně vyráběny za účelem využití ve školní výuce. ŠMS Molegraph patří do konvenčních ŠMS, ale jedná se o levnou alternativu ke značkovým ŠMS jako je PASCO či Vernier.). Ušetříme ale spoustu peněz a obsluha takového zařízení má prakticky nulovou náročnost. Pouze data je však potřeba vyhodnocovat dodatečně např. v MS Excel. Zůstává však otázka, zda tyto levná čidla a zařízení z Číny fungují, a zda s nimi lze provádět uvedené experimenty v chemii. Jak dopadlo testování jejich schopností je prezentováno v následující kapitole.

Výsledky a diskuse

Porovnání přístrojů pro měření pH

Měření čínskou elektrodou v tovární kalibraci a ke značkovým ŠMS

Nejprve bylo testováno zda CNE poskytne výstup odpovídající titrační křivce podobný výstupům značkových ŠMS i v tovární kalibraci, což by učiteli umožnilo okamžité první použití elektrody bez nutnosti kalibrace (přičemž tato vlastnost je běžnou součástí elektrod značkových ŠMS) i jako levnější náhradu za značkové elektrody. Za tímto účelem byla provedena titrace, při které byla tato elektroda zapojena k ŠMS PASCO. Pro porovnání výstupů měření byly v roztoku i značkové elektrody dodávané k ŠMS PASCO a ŠMS Vernier. Výsledek této titrace je pak na obrázku 13.



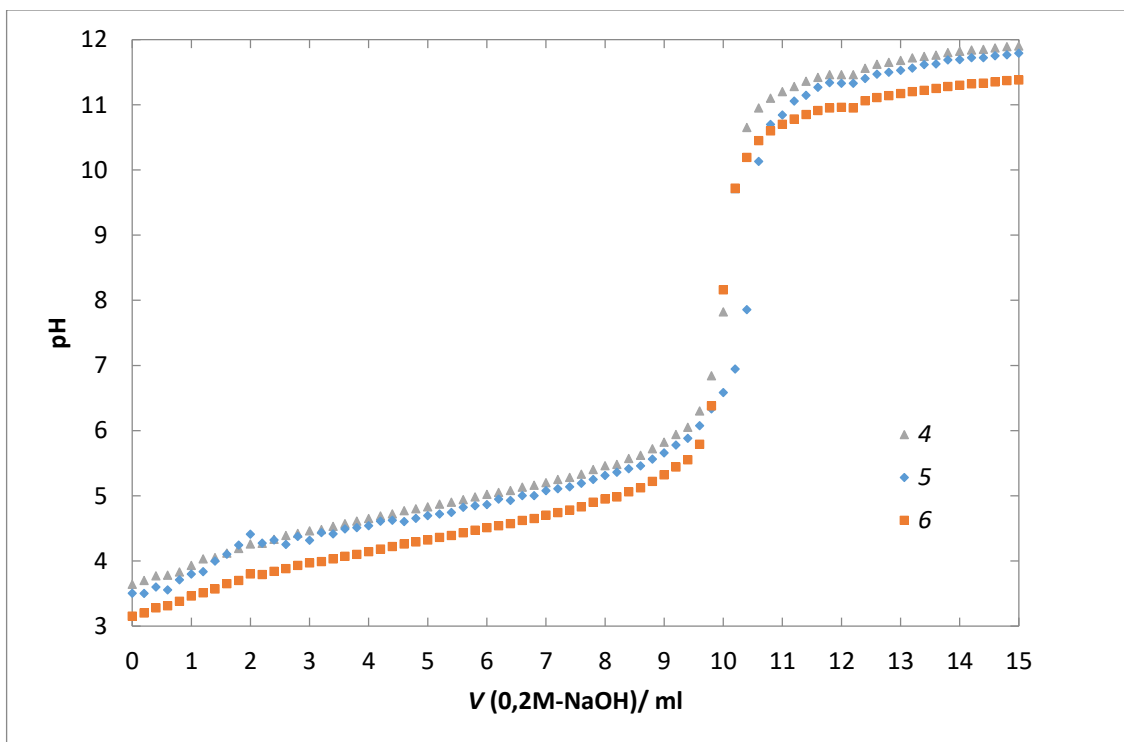
Obr. 13 – Titrace 10,00 ml roztoku 0,2M kyseliny octové 0,2M hydroxidem sodným pro posouzení měřicí schopnosti (1) CNE v tovární kalibraci proti elektrodám (2) ŠMS Vernier a (3) ŠMS PASCO

Všechny elektrody vykazují výraznou podobnost naměřených hodnot pH v kyselé oblasti. ŠMS Vernier naměřil pH při bodu ekvivalence při vyšší spotřebě titračního

činnidla než elektrody PASCO a CNE, což může být způsobeno stářím použitých zařízení Vernier a PASCO. V bazické oblasti (tedy v oblasti počínající alkalické chyby skleněných pH elektrod) pak všechny elektrody vykazují rozdíly naměřených hodnot pH mezi sebou. Čínská elektroda a PASCO přibližně půl jednotky pH. PASCO a Vernier pak o polovinu menší rozdíl než čínská elektroda a PASCO. Výstupem měření na obrázku 13 jsou typické titrační křivky bez větších abnormálií, které jsou si velmi podobné, a které napohled neindikují chybné měření způsobené vadou senzoru. Jednotlivé body křivek leží v očekávaných hodnotách pH a výstupy těchto elektrod splňují soulad s realitou. CNE je zjevně z továrny nakalibrována a lze ji tak hned po vybalení využít k měření, protože její měřicí schopnost se od elektrod značkových ŠMS prakticky neliší.

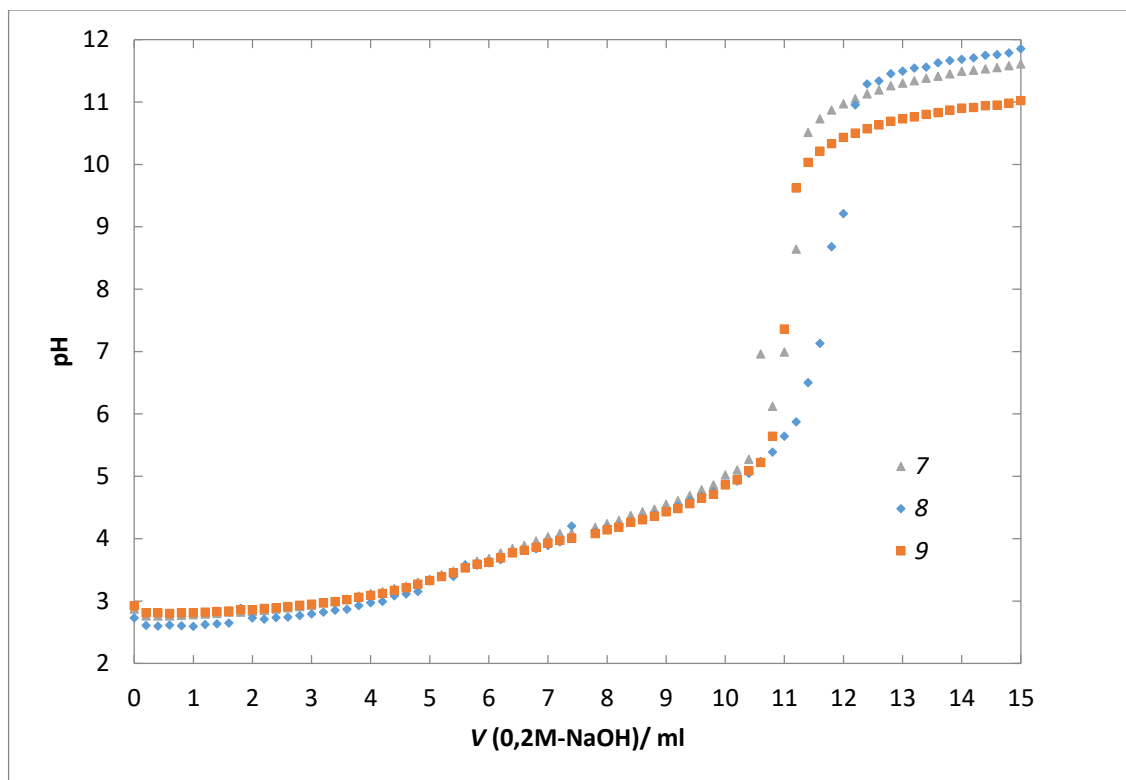
Měření čínskou elektrodou po provedení kalibrace přes ŠMS PASCO

Aby bylo možné využít CNE jako plnohodnotnou alternativu ke značkovým elektrodám, bylo třeba otestovat, zda lze čínskou elektrodu přes ŠMS PASCO nakalibrovat a jaké budou v tomto případě její výstupy měření proti elektrodám ŠMS PASCO a ŠMS Vernier. Za tímto účelem bylo provedeno několik titrací, před kterými byly všechny použité elektrody nakalibrovány. Výsledky vybraných dvou titrací jsou na obrázcích 14 a 15.



Obr. 14 – Titrace 10,00 ml 0,2 kyseliny octové 0,2M hydroxidem sodným pro posouzení měřicí schopnosti (4) CNE kalibrované přes ŠMS PASCO proti elektrodám (5) ŠMS Vernier a (6) ŠMS PASCO

Na obrázku 14 je vidět, že výstupy všech elektrod jsou opět typické titrační křivky vykazující soulad s realitou. Elektroda PASCO po kalibraci měřila při této titraci přibližně o půl jednotky pH méně v kyselé oblasti než ostatní elektrody. Výstupy od bodu ekvivalence do alkalické oblasti byly podobné jako při titraci na obrázku 13.

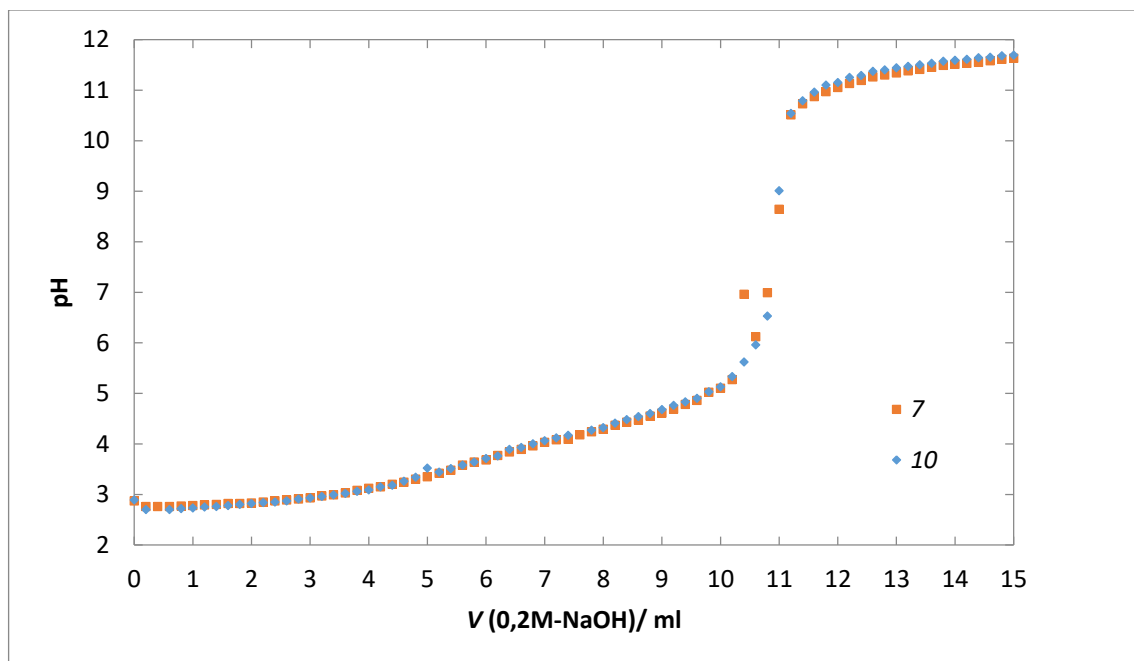


Obr. 15 – Titrace navážky 0,12705 g kyseliny šřavelové 0,2M hydroxidem sodným pro posouzení měřicí schopnosti (7) CNE kalibrované přes ŠMS PASCO proti elektrodám (8) ŠMS Vernier a (9) ŠMS PASCO

Podle obrázku 15 (8) elektroda Vernier opět měřila odlišně kolem bodu ekvivalence a (9) elektroda PASCO zase v bazické oblasti, což je nejspíše následek zmíněného opotřebení těchto elektrod dlouholetým používáním. Z provedených titrací lze soudit, že CNE přes ŠMS PASCO kalibrovat jde a nebyla touto kalibrací negativně ovlivněna. Nyní je třeba ještě ověřit její reprodukovatelnost měření.

Reprodukovatelnost měření čínské elektrody a její implementace do výuky

Aby bylo možné uvažovat o čínské elektrodě jako plnohodnotné alternativě ke značkovým elektrodám ve výuce chemie, je nutné, aby byla jednotlivá měření reprodukovatelná. K tomu byly srovnány výstupy několika analogicky provedených titrací realizovaných pomocí této elektrody. Na ukádku je jedno takové porovnání na obrázku 16 (zobrazeny pouze dvě titrace).



Obr. 16 – Titrace navážek (7) 0,12705 g a (10) 0,12570 g kyseliny šťavelové 0,2M hydroxidem sodným provedené CNE zapojenou přes ŠMS PASCO pro posouzení její reprodukovatelnosti měření

Podle obrázku 16 je reprodukovatelnost velmi dobrá, srovnatelná se značkovými ŠMS (není zde prezentováno) a pro uplatnění při výuce chemie naprosto dostačující. U výstupů z titrací 0,2M kyseliny octové 0,2M hydroxidem sodným byly titrační křivky každé elektrody vůči sobě posunutě po ose spotřeby titračního činidla, což bylo pravděpodobně způsobeno chybně napipetovaným množstvím 0,2M kyseliny octové. Při zanedbání tohoto posunutí by i zde reprodukovatelnost dopadla srovnatelně velmi dobře mezi všemi elektrodami.

Již v podkapitole *Zakoupená zařízení a důvody jejich výběru* bylo zmíněno, že CNE pro připojení k rozhraní využívá BNC-konektor stejně jako elektrody od značky PASCO a důvodem jejího zakoupení bylo mimo jiné zjistit, jestli může učitel tuto elektrodu použít v případě rozbití či opotřebení elektrody PASCO jako levnou náhradu. S ohledem na zjištěná data lze soudit, že tuto CNE s BNC-konektorem je možné jako levnou náhradu za elektrody PASCO použít. Elektroda je přes ŠMS PASCO kalibrovatelná a měří v tomto systému srovnatelně dobře s elektrodami použitých značkových elektrod a má v tomto zapojení i srovnatelně dobrou reprodukovatelnost měření s ostatními elektrodami ŠMS.

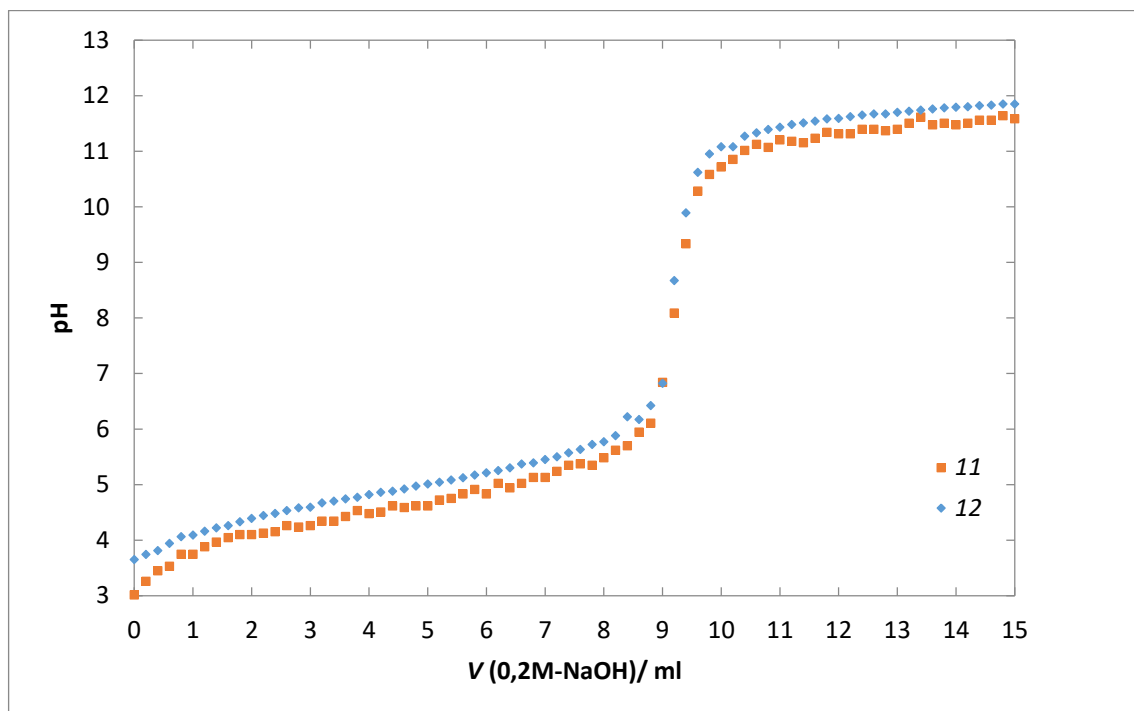
Měření čínskou elektrodou v ŠMS Molegraph

Dále bylo, obdobně jako výše, testováno nejlevnější řešení ŠMS tedy uspořádání CNE s rozhraním Molegraph U01. Výstupy měření byly srovnávány opět se značkovými elektrodami ve spojení se ŠMS PASCO a ŠMS Vernier. Během těchto titrací se objevilo několik menších problémů. Bylo zjištěno, že při zapojení rozhraní Molegraph U01 do počítače kabelem, se výstupy všech měřicích systémů (ty jsou rovněž zapojeny do počítače) ponořených v titrovaném roztoku od sebe výrazně lišily o několik jednotek pH. Například, jsou-li v roztoku CNE připojená k rozhraní Molegraph a elektroda PASCO v ŠMS PASCO, a oba tyto systémy jsou připojeny k PC kabelem, pak jsou všechny naměřené hodnoty pH posunuty o několik jednotek. Je-li jedna z těchto elektrod vyndána z titrovaného roztoku, pak zbývající ponořená elektroda začne měřit opět správné hodnoty pH resp. v souladu s realitou. Příčina tohoto problému nebyla vysvětlena. Mimo tyto dva problémy čínská elektroda v ŠMS Molegraph měřila srovnatelně s ostatními ŠMS, měření poskytla obdobné výsledky jako v podkapitolách o měření CNE přes ŠMS PASCO. Toto OpenSource ŠMS se dokázalo téměř ve všech aspektech vyrovnat ŠMS PASCO. V době testování zatím bohužel nebylo možné čidla přes SW Molegraph kalibrovat. Kalibrace musela být prováděna „programátorsky“ přes program ArduinoIDE, který je volně dostupný na <https://www.arduino.cc/en/main/software>. V tuto chvíli nelze tak úplně ŠMS Molegraph podrobně hodnotit. Tento systém je v tuto chvíli neustále ve vývoji a zlepšuje se (např. koncem února roku 2020 byla vydána testovací verze SW, kde lze již připojená čidla kalibrovat). Molegraph má určitě veliký potenciál do budoucna. Především z toho důvodu, že za nízké finanční náklady učitel získá mnoho čidel a měření lze provádět i bezdrátově jak bude probráno v další podkapitole. Z provedených testů v této části práce lze zatím tvrdit, že učitel určitě může Molegraph společně s CNE použít jako náhradu za pH senzor značkových ŠMS při zapojení kabelem do PC.

Bezdrátové měření pomocí ŠMS Molegraph a čínské elektrody

V této části bylo testováno, zda lze pomocí ŠMS Molegraph měřit bezdrátově, což by učiteli umožnilo provádět měření pH ve výuce chemie využitím chytrých zařízení např. tabletu nebo smartphonu. Rozhraní MolegraphU01 totiž obsahuje Bluetooth HC-05 modul, kterým je možné jej připojit k jakémukoliv zařízení přes Bluetooth. Ke zjištění, zda-li je možné takto se ŠMS Molegraph smysluplně pracovat, zda přenos dat probíhá

správně a bez problémů s připojením a zda jde u uživatelsky příjemné řešení, byla, obdobně jako v předchozích případech, provedena acidobazická titrace s CNE v ŠMS Molegraph a její výsledek byl srovnán s daty pořízenými pomocí ŠMS PASCO. Obě rozhraní byla připojena k tabletům pomocí Bluetooth (pozn. v případě ŠMS PASCO byl senzor obecná chemie připojen přes rozhraní AirLink 2 PS-2010). Výsledek této titrace je na obrázku 17.



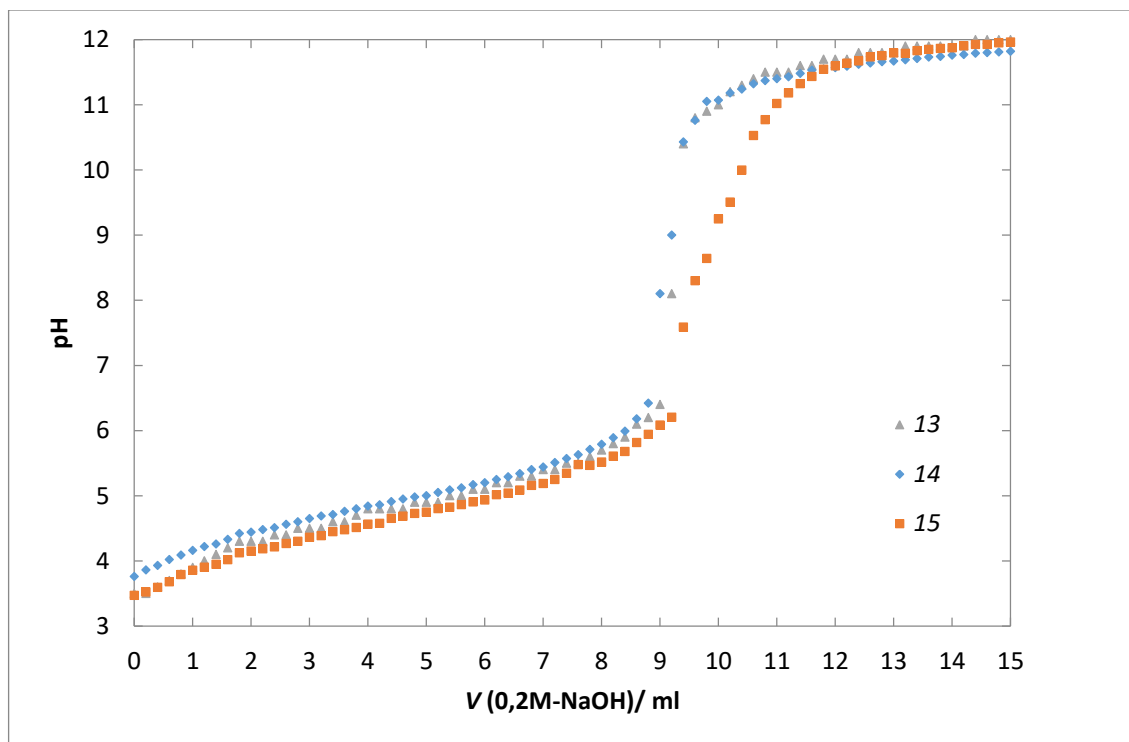
Obr. 17 – Titrace 10,00 ml 0,2M kyseliny octové 0,2M hydroxidem sodným pro porovnání bezdrátového měření (11) CNE v ŠMS Molegraph proti (12) ŠMS PASCO

Body titrační křivky (11) čínské elektrody v ŠMS Molegraph vykazují někde menší výkyvy, které jsou nejspíše způsobené nedostatečným rozcvičením čínské elektrody. Rozdíl v hodnotách pH mezi oběma titračními křivkami se pohybuje nejčastěji do 0,3. Oba systémy pak obdobně indikovaly bod ekvivalence. Z těchto výsledků lze soudit, že ŠMS Molegraph je možné použít i k bezdrátovému měření a učitel tak může popř. provádět titrace i bez počítače. Nicméně obě křivky mají podobný charakter, správný tvar i hodnoty pH víceméně odpovídají realitě. Mírné odlišnosti zde nejsou zásadní, navíc zjevně nejsou způsobeny bezdrátovým přenosem dat, ale spíše odlišnostmi a stářím použitých elektrod, kvalitou kalibrace apod. S připojením rozhraní Molegraph nebyly žádné problémy a spojení k tabletu bylo bez výpadků. Nevýhodou bylo, že v době testování měla verze SW Molegraph pro Android velmi malé „tlačítko“ pro

zachování hodnoty („Vzorek“), které bylo hned vedle tlačítka „Start/Stop“ měření, což vyžaduje určitou zručnost v ovládní dotykového zařízení. Naopak výhodou je, že SW Molegraph pro všechna zařízení vypadá úplně stejně. Jak již bylo jednou řečeno, toto OpenSource ŠMS je stále ve vývoji, takže všechny uživatelské nedostatky jsou postupně odstraňovány.

Titrace s využitím ručního pH-metru a porovnání se značkovými ŠMS

V této části byl testován čínský ruční pH-metr a porovnáván se značkovými ŠMS Vernier a PASCO. V případě ručních pH metrů s autonomním displejem se nejedná o konvenční ŠMS, nelze tedy data jimi naměřená přenášet během měření do PC a tam je přímo vizualizovat a zpracovávat, nelze ani nijak nastavovat měření nebo spouštění měření (např. funkce „trigger“) a nelze automaticky data nijak uchovávat a sledovat jejich historii. Díky tomu přicházíme o řadu funkcí, které jsou tolik výhodné a charakteristické při využití konvenčního ŠMS. Nicméně, čidla v těchto ručních pH metrech s autonomním displejem mohou poskytovat smysluplná data a jejich využití jako té úplně nejlevnější alternativy pro měření dat může dávat v určitých situacích, dle didaktického záměru pedagoga, smysl (např. pro práci v terénu). Za účelem zhodnocení funkce těchto zařízení a za účelem porovnání získaných dat byly, stejně jako ve všech případech testování alternativních čidel a ŠMS pro měření pH, provedeny titrace při použití ručního pH-metru a elektrod PASCO a Vernier ve spojení se rozhraními PASCO a Vernier. Všechna zařízení byla před titrací kalibrována. Výstup první z nich je na obrázku 18.

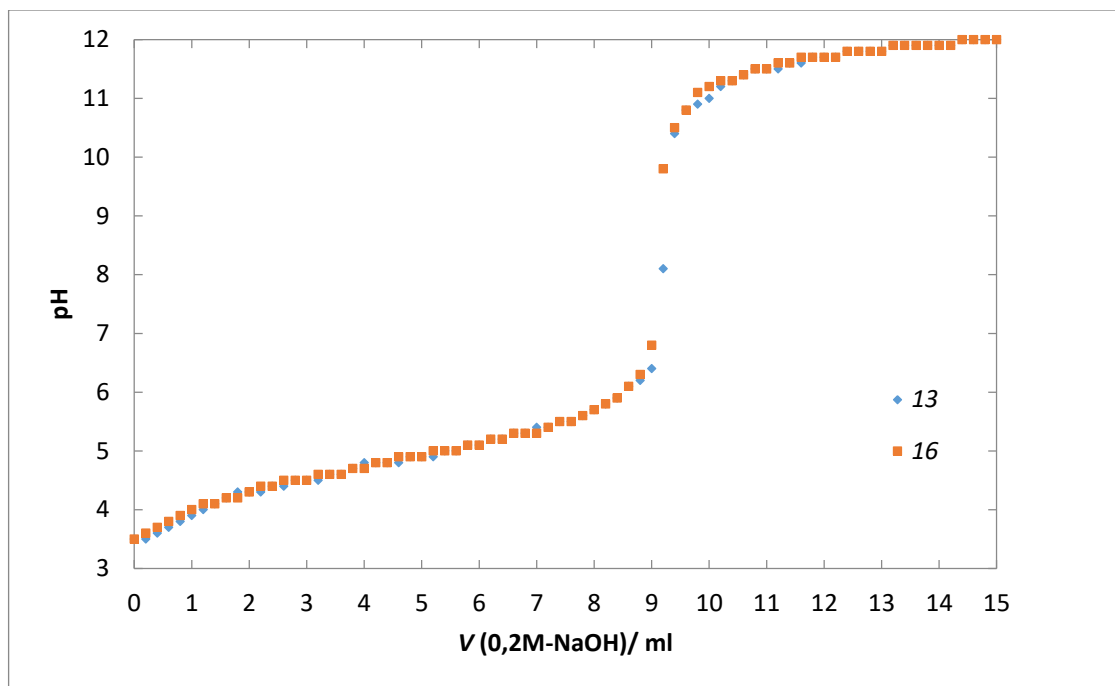


Obr. 18 – Titrace 10,00 ml 0,2M kyseliny octové 0,2M hydroxidem sodným pro posouzení měřicí schopnosti (13) ručního pH-metru proti pH sensorům (14) ŠMS PASCO a (15) ŠMS Vernier

Na obrázku 18 je vidět, že (13) ruční pH-metr a (14) ŠMS PASCO vykazují podobný výstup měření. Neobvyklý tvar titrační křivky (15) ŠMS Vernier byl pravděpodobně způsoben použitím jiné opotřebovanější elektrody Vernier než v předcházejících měřeních. Kromě odlišnosti výstupu měření kolem bodu ekvivalence u ŠMS Vernier se výstupy všech zařízení výrazně neliší. Křivky mají typický tvar a charakter v souladu s realitou. Podle těchto výstupů to vypadá, že by ruční pH-metr mohl být využit jako jejich náhrada. Nyní zbývá ještě prověřit, zda jsou jeho měření reprodukovatelná.

Reprodukovatelnost měření ručního pH-metru a jeho implementace do výuky

Aby bylo možné ruční pH-metr implementovat do výuky chemie, je nutné, aby byla jeho měření reprodukovatelná. Pro posouzení reprodukovatelnosti měření ručního pH-metru byly porovnány výstupy obou provedených titrací na obrázku 19.



Obr. 19 – Titrační křivky z (13) první a (16) druhé titrace 10,00 ml 0,2M kyseliny octové 0,2M hydroxidem sodným při měření ručním pH-metrem pro posouzení jeho reprodukovatelnosti měření

Podle výstupů na obrázku 19 měl ruční pH-metr velmi dobrou reprodukovatelnost měření. Kalibrován byl pouze před první titrací, a svou měřicí schopnost si dokonale zachoval i do druhého měření. Ze všech tří použitých zařízení v těchto dvou titracích měl ruční pH-metr nejlepší reprodukovatelnost, což bylo patrně způsobeno stářím obou značkových elektrod (PASCO a Vernier). Zda je možné ruční pH-metr implementovat do výuky chemie a jaké jsou potenciální výhody a nevýhody je shrnuto v následující podkapitole.

Z dosavadních výsledků provedených testů vyplynulo, že ruční pH-metr je k titracím použitelný a jeho měření jsou reprodukovatelná. Nicméně je vhodný spíše pro „netechnické“ typy učitelů či jako výrazně levnější alternativa ke značkovým ŠMS při velkém nedostatku finančních prostředků, případně jako zařízení při práci v terénu. Ruční pH-metr neposkytuje výhody konvenčního ŠMS, takže se provádění titrací ručním pH-metrem od konvenčních ŠMS výrazně liší. Obsluha zařízení je sice jednodušší a příprava k měření trochu rychlejší, ale data je třeba si zapisovat ručně a graf titrační křivky vykreslovat až po skončení titrace na milimetrový papír nebo na počítači např. v MS Excel. To může být nevýhodou v tom směru, že je potřeba více času na vykreslení grafu, a také žák si hned nespojí provádění samotné titrace

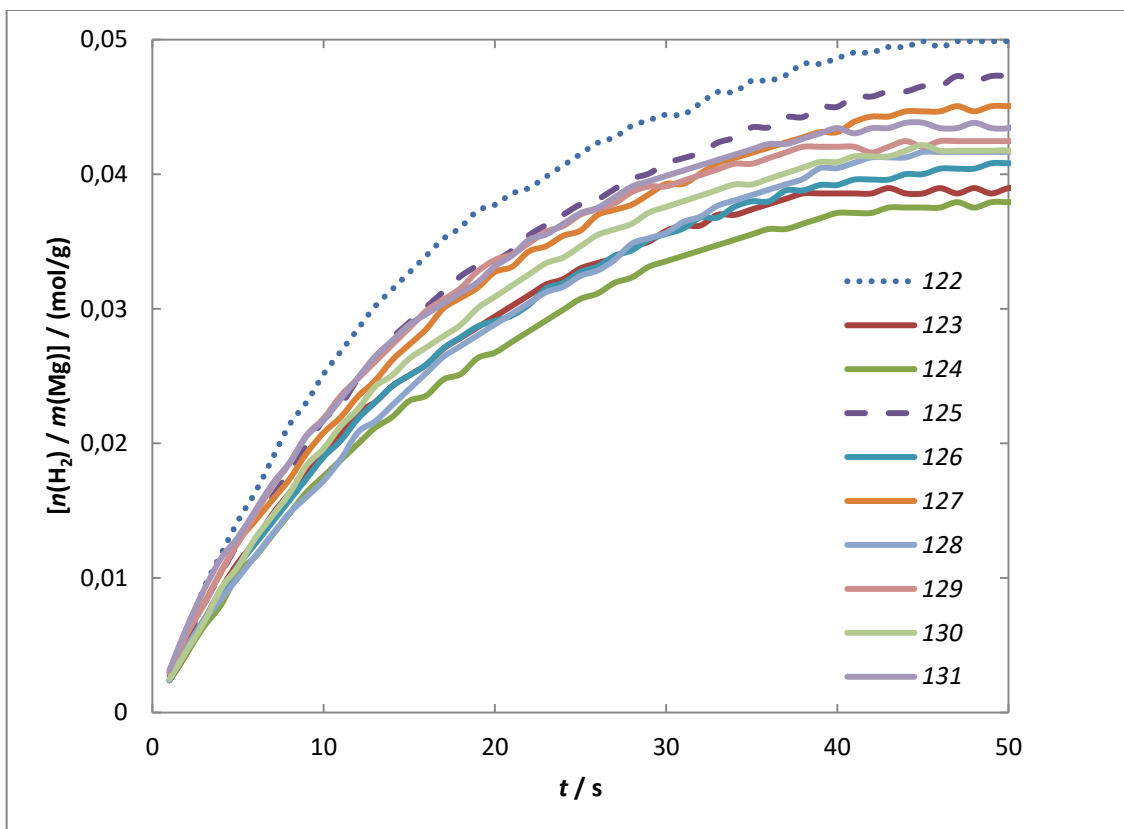
s vykreslováním titrační křivky, pokud ji bude vykreslovat např. až doma. Nicméně lze na toto pohlížet i jako na výhodu v tom, že se žák musí učit samostatné práci a také se naučí trochu ovládat např. MS Excel, jehož používání je běžné i v jiných oblastech reálného světa než pouze v chemii.

Porovnání přístrojů pro měření tlaku

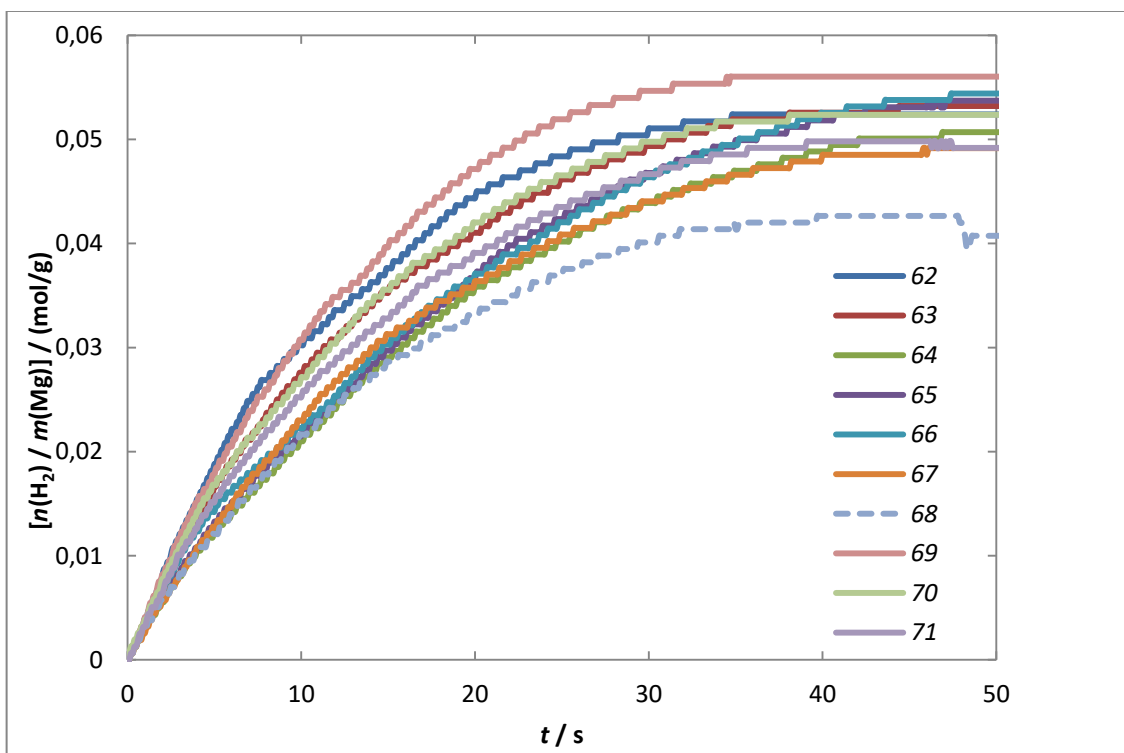
Srovnání měření čínského diferenčního tlakoměru se značkovými ŠMS a jejich reprodukovatelnost

Bylo porovnáváno, jaké jsou rozdíly v používání a ve výsledcích měření čínského diferenčního tlakoměru MPX5700DP (CNDT) ve spojení s rozhraním Molegraph proti čidlům absolutního tlaku a rozhraním ŠMS PASCO a ŠMS Vernier, tedy zda lze smysluplně použít CNDT jako náhradu za tyto značkové ŠMS. Za tímto účelem byl zvolen experiment s vývojem vodíku při reakci hořčíku s kyselinou chlorovodíkovou, který je detailně popsán v podkapitole *Použité metody*. Vzhledem k tomu, že je třeba porovnat diferenční tlakoměr s čidly absolutního tlaku, z nichž každé měří trochu něco jiného, je nutné nejdříve vysvětlit typ výstupu měření každého z nich. Diferenční tlakoměr měří pouze rozdíl tlaku mezi vnějším tlakem (tlak v laboratoři) a tlakem v uzavřené soustavě, kterou je v případě experimentu aparatura (zkumavka + hadička vedoucí k čidlu), v níž probíhá reakce hořčíku s kyselinou chlorovodíkovou. Proti tomu čidla absolutního tlaku měří absolutní tlak v soustavě, kterou je v případě experimentu opět aparatura. To znamená, že naměřené hodnoty tlaku diferenčním tlakoměrem jsou ochuzené o absolutní počáteční tlak v soustavě a je měřen pouze příbytek tlaku, zatímco čidla absolutního tlaku měří absolutní tlak v soustavě. Pro porovnání výstupu diferenčního tlakoměru a čidla absolutního tlaku je nutné u výstupu čidla absolutního tlaku odečíst počáteční tlak v soustavě (v praxi byla použita první naměřená hodnota tlaku), čímž opět zbude jen příbytek tlaku, takže lze výstupy obou zařízení porovnat. Po spočítání objemu, který může plyn v aparatuře zaujmout, lze ze zjištěných hodnot tlaku (při měření diferenčním tlakoměrem) dopočítat, dle stavové rovnice ideálního plynu, kolik látkového množství vodíku vzniklo. U použití čidla absolutního tlaku lze postupovat téměř analogicky, s tím rozdílem, že je nejdříve nutné odečíst počáteční tlak v soustavě od všech naměřených hodnot tlaku, aby byl získán rozdíl tlaku, který

reprezentuje vzniklý vodík. Aby bylo možné porovnat reprodukovatelnost měření daného tlakoměru a v další podkapitole i výstupy měření při použití různých koncentrací a objemů kyseliny chlorovodíkové, je optimální naměřené hodnoty tlaku při znalosti objemu plynu přepočítat na látkové množství vznikajícího vodíku, které musí být vždy stejné, jelikož do zkumavky jsou vhazovány téměř stejně velké navážky hořčíku a kyselina chlorovodíková je vždy v nadbytku. Přímo pro posouzení reprodukovatelnosti, aby byl tento přepočet na látkové množství porovnatelný v rámci každé série měření daným tlakoměrem, byla vypočítána látková množství vznikajícího vodíku vydělena hodnotou navážky daného měření (pozn. série měření má význam provedení tohoto experimentu desetkrát při použití jednoho zařízení a jednoho objemu a koncentrace kyseliny). Jednodušeji řečeno, závislost tlaku vznikajícího vodíku na čase byla nejdříve přepočtena na závislost vznikajícího látkového množství na čase a toto látkové množství bylo navíc poděleno velikostí použité navážky hořčíku pro srovnatelnost výstupů měření. Podělení látkového množství navážkou eliminuje rozdíl výstupu způsobený rozdílnými hodnotami navážek, takže rozdíly výsledných křivek jsou způsobeny pouze lidskou chybou a chybou zařízení. Výsledek pro posouzení výstupu a reprodukovatelnosti měření CNDT v sérii při použití 2 ml 2M kyseliny chlorovodíkové je pak na obrázku 20. Analogický výstup pro ŠMS PASCO je pak na obrázku 21.



Obr. 20 – (122-131) Závislost podílu látkového množství vodíku a navážky hořčíku na čase k posouzení výstupu a reprodukovatelnosti měření CNDT při použití 2 ml 2M kyseliny chlorovodíkové

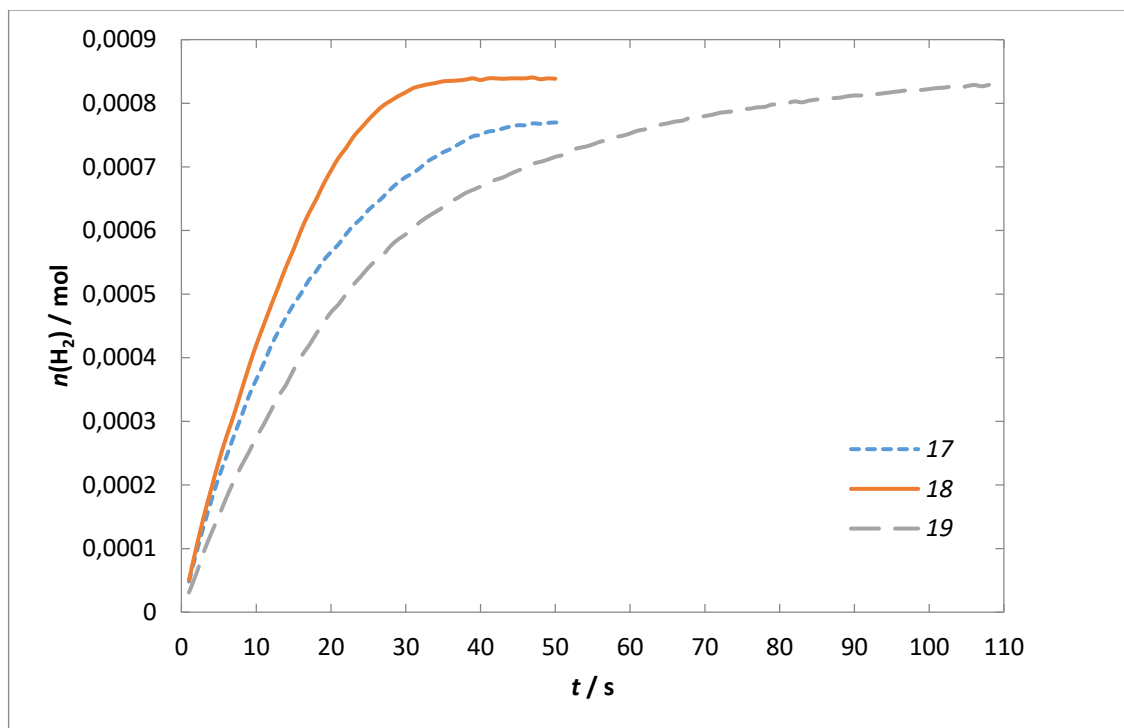


Obr. 21 – (62-71) Závislost podílu látkového množství vodíku a navážky hořčíku na čase k posouzení výstupu a reprodukovatelnosti měření ŠMS PASCO při použití 2 ml 2M kyseliny chlorovodíkové

Z obrázků 20 a 21 je vidět, že tvar křivek a změny hodnot tlaků jsou v souladu s realitou, také je vidět, že až na měření 68 měl ŠMS PASCO mírně lepší reprodukovatelnost měření než CNDT. Nicméně zanedbáme-li měření 122, 125 a 68, tak rozdíl reprodukovatelnosti mezi těmito zařízeními je téměř minimální (pozn. Tyto závěry jsou učiněny pouze výsledkem vizuálního posouzení zpracovaných výstupů. Statistické podložení těchto tvrzení např. využitím směrodatných odchylek by bylo užitečné, pokud by byla hledána přesná např. procentuální hodnota rozdílu v reprodukovatelnosti dvou zařízení. K tomu by pak bylo potřeba provést stovky až tisíce měření k získání statisticky reprezentativního vzorku. Pro cíle této práce bylo však důležité pouze zjistit, zda zařízení dokáže provádět tento experiment, a to i reprodukovatelně, jako značkové ŠMS. K tomu nebylo nutné ani vhodné statistiku použít.). Výstupy a reprodukovatelnost měření u ŠMS Vernier (není uvedeno na obrázku) dopadla prakticky stejně jako u ŠMS PASCO a CNDT. CNDT očividně funguje a dokáže experiment provést s očekávanými výstupy, které se nijak významně neliší od výstupů značkových ŠMS včetně reprodukovatelnosti měření.

Uplatnění čínského diferenčního tlakoměru k demonstraci principu reakční kinetiky

V této části bylo testováno, zda je možné CNDT využít k demonstraci principu reakční kinetiky, jak je vysvětleno v podkapitole *Použité metody*. Za tímto účelem byly u CNDT porovnány všechny výstupy závislosti průměrného příbytku látkového množství vodíku z každé série na čase jednotlivých použitých objemů a koncentrací kyseliny chlorovodíkové. Výsledek tohoto porovnání pro CNDT je na obrázku 22.



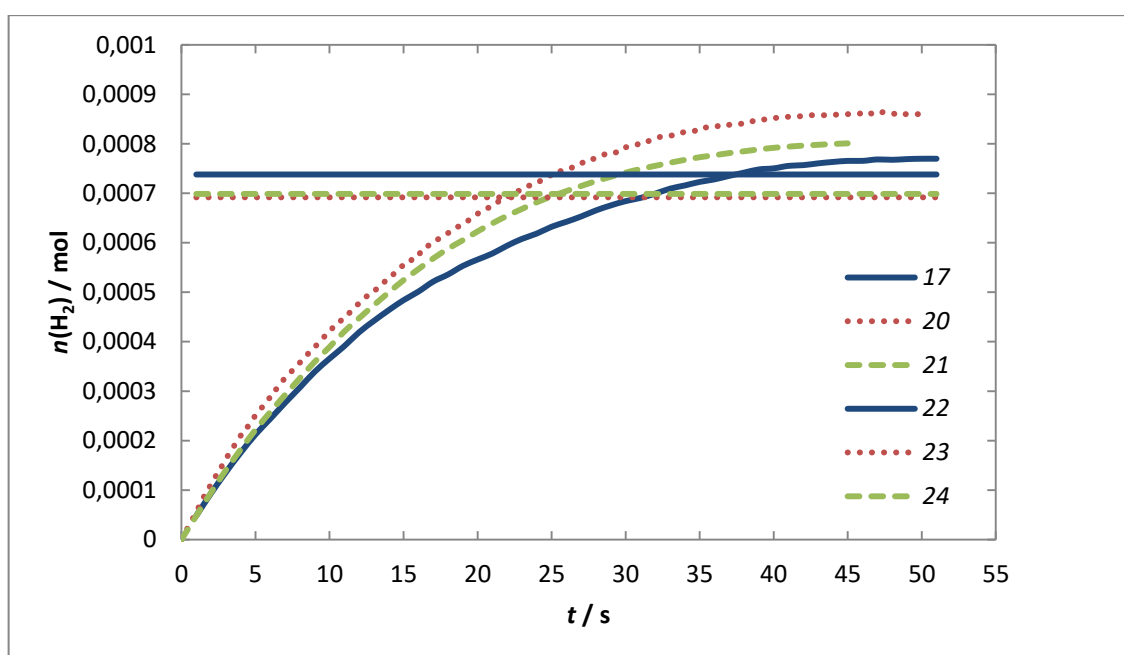
Obr. 22 – Závislost průměrného látkového množství vzniklého vodíku na čase měřením pomocí CNDT při použití (17) 2 ml 2M kyseliny chlorovodíkové, (18) 4 ml 2M kyseliny chlorovodíkové a (19) 2 ml 1,5M kyseliny chlorovodíkové

Z výstupů měření CNDT na obrázku 22 je vidět, že k rovnováze při použití méně koncentrované kyseliny došlo výrazně později než při použití výše koncentrované kyseliny. Zároveň k rovnováze došlo přibližně ve stejném čase při použití různého objemu stejně koncentrované kyseliny. Přičemž kyselina chlorovodíková byla v soustavě vždy v nadbytku nad hořčíkem. Odtud je experimentálně ověřeno, že rychlost reakce tedy závisí na koncentraci výchozích látek. Získané výstupy tedy odpovídají principům reakční kinetiky a CNDT by tak bylo možné ve výuce chemie využít k demonstraci těchto principů. (Pozn. Zpracovaný výstup dat na obrázku 22 byl analogicky proveden i pro značkové ŠMS (není uvedeno na obrázku) a vykazuje naprosto obdobné trendy, což znamená, že v tomto směru dokáže CNDT značkové ŠMS nahradit.)

Porovnání látkového množství vzniklého vodíku z hodnot tlaku a hodnot navážek

Poslední testování vybraných čidel tlaku se věnovalo tomu, zda se hodnoty tlaku zjištěné tlakoměrem a přepočtené na látkové množství vzniklého vodíku rovnají látkovému množství vodíku skutečně vzniklého z navážky hořčíku. Nepředpokládá se,

že se obě hodnoty budou přesně shodovat, ale že se budou aspoň přibližně pohybovat ve stejném řádu. K přepočtu hodnot tlaku na látkové množství je aplikována stavová rovnice ideálního plynu, která v reálném systému neplatí úplně přesně, zároveň na výsledcích tohoto testování má velký podíl lidská chyba. Kdyby se k sobě obě zmíněné hodnoty látkových množství velmi blížily, bylo by možné pomocí CNDT demonstrovat platnost stavové rovnice ideálního plynu (s ohledem na reálnou soustavu a lidskou chybu), která je předmětem učiva některých ŠVP (Kmentová, Kvasničková 2009; Schejbalová et al., 2019). Výsledek tohoto testování je pro CNDT a čidla tlaku PASCO a Vernier při použití 2 ml 2M kyseliny chlorovodíkové na obrázku 23.



Obr. 23 – Porovnání průměrného látkového množství vzniklého vodíku spočteného z hodnot tlaku na čase při použití 2 ml 2M kyseliny chlorovodíkové měřením (17) CNDT, (20) ŠMS PASCO a (21) ŠMS Vernier s průměrným látkovým množstvím vodíku spočteného z aritmetického průměru navážek příslušné série měřené (22) CNDT, (23) ŠMS PASCO a (24) ŠMS Vernier

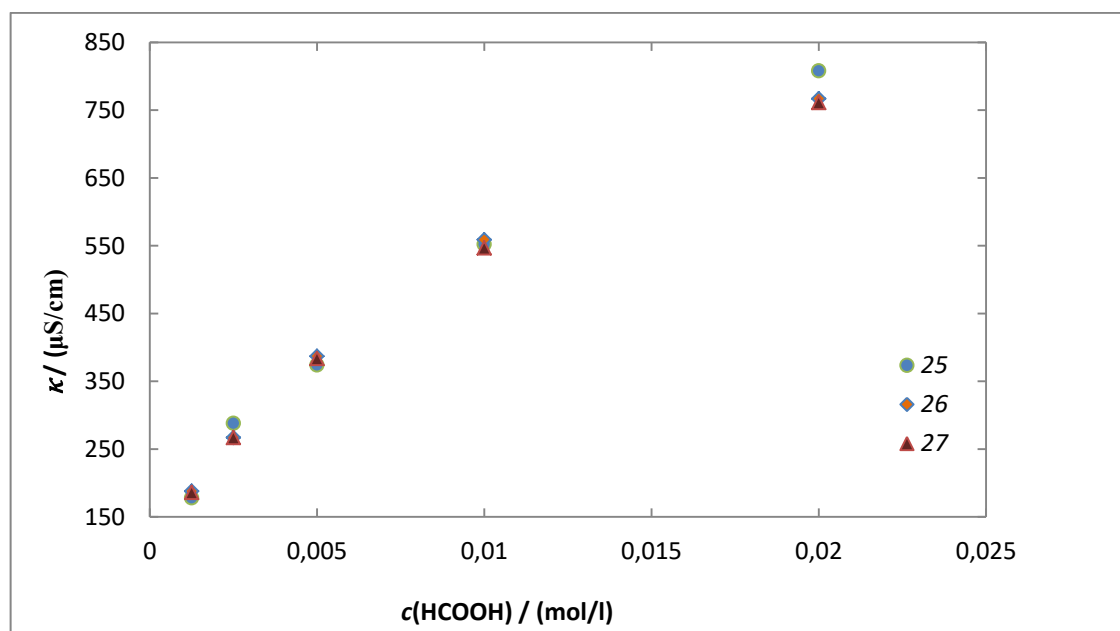
Na obrázku 23 je vidět, že po dosažení rovnováhy (přibližně po čase 40 sekund) jsou k sobě nejbližší křivky (17) a (22) CNDT, což znamená, že se na základě provedených měření toto zařízení ukázalo jako nejvhodnější k přibližnému ověření platnosti stavové rovnice ideálního plynu a může být tedy za tímto účelem rovněž využito při výuce chemie. (Pozn. Z výsledků měření i značkové ŠMS mohou být za tímto účelem použity a k označení CNDT jako nejlepšího čidla z testovaných tlakoměrů by bylo potřeba

provést mnohonásobně větší počet měření, kterým by byl získán statisticky reprezentativní vzorek.)

Porovnání přístrojů pro měření konduktivity

Porovnání ručního konduktometru ke značkovým ŠMS

Tato část práce je zaměřená na porovnání ručního konduktometru k sensorům vodivosti značkových ŠMS. Nabídka sensorů vodivosti byla jen velmi omezená a v nízké cenové relaci byla k dispozici jen ruční čidla s displejem. Čidlo, které by se dalo připojit k rozhraní Molegraph nebylo nalezeno. Z pěti koupených ručních zařízení k měření měrné vodivosti fungovaly jen tři. První zařízení byl TDS&EC-meter (MK), který měří měrnou vodivost v jednotkách $\mu\text{S}/\text{cm}$, kterou pak pomocí koeficientu nastaveného z výroby umí převádět na tzv. jednotky ppm (parts per milion), které jsou vysvětleny v další podkapitole. Jen MK byl tedy porovnán se značkovými ŠMS (PASCO, Vernier) pomocí již popsané metody uvedené v podkapitole *Použité metody*. Výsledek porovnání je na obrázku 24.

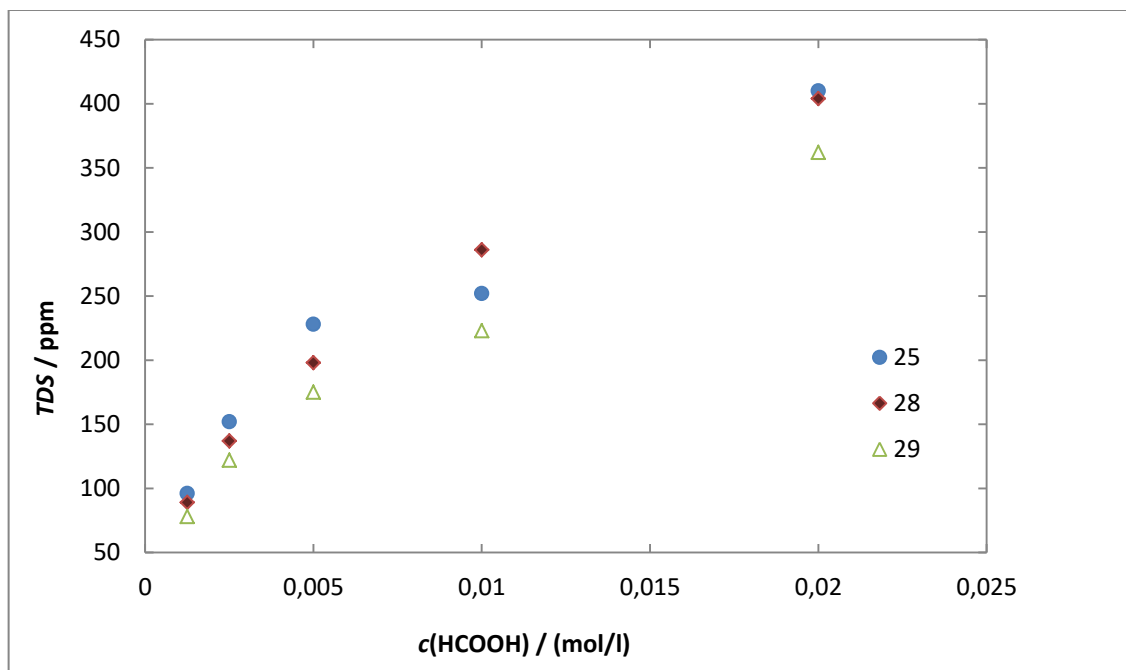


Obr. 24 – Měření konduktivity sestupné koncentrační řady roztoků kyseliny mravenčí pro porovnání (25) MK proti sensorům vodivosti (26) ŠMS PASCO a (27) ŠMS Vernier

Z výsledků porovnání na obrázku 24 je patrné, že MK měří hodnoty konduktivity velmi blízké ŠMS PASCO a ŠMS Vernier, a má tedy potenciál stát se levnější alternativou k senzorům vodivosti značkových ŠMS ve výuce chemie (např. při demonstraci závislosti vodivosti na koncentraci silných a slabých elektrolytů). Výhodou je tedy jeho cena a snadná obsluhovatelnost. Nevýhodou použití ručního konduktometru je pak absence funkcí konvenčních ŠMS jako např. SW pro sběr a analýzu dat. Navíc ruční konduktometry poskytují nižší rozsah měření – dvakrát nižší než u ŠMS Vernier a desetkrát nižší než u ŠMS PASCO.

Porovnání ručního TDS&EC-metru se dvěma TDS-metry a jejich uplatnění

Dva zbylé ruční konduktometry (VK, B XK) fungují jen jako tzv. TDS-metry, které ukazují odhad koncentrace rozpuštěných látek v roztoku v jednotkách ppm (známo též jako mg/l). Přístroj je po technické stránce konduktometr, ale neukazuje hodnotu v jednotkách měrné vodivosti $\mu\text{S}/\text{cm}$, nýbrž pouze v uvedených jednotkách koncentrace - ppm. Veličina *TDS* znamená z angličtiny „Total dissolved solids“, což je do češtiny volně přeloženo jako „obsah rozpuštěných pevných látek“. Vztah mezi konduktivitou a *TDS* je pokaždé jiný, protože závisí na konkrétním elektrolytu. Hodnoty ppm, které TDS-metr ukazuje mají význam *TDS* jakou má roztok jedné konkrétní látky nebo směsi látek. Výrobce však nikde neuvádí k jaké látce je toto *TDS* vztaženo. Někdy výrobce uvádí koeficient k přepočtu ppm na $\mu\text{S}/\text{cm}$, jindy jej neuvádí vůbec nebo je uvedený koeficient chybný, jako se tomu stalo v případě MK. Výrobce uvádí hodnotu koeficientu přepočtu jednotek 1,56, přičemž přístroj ve skutečnosti používal hodnotu 2. Z těchto důvodů nebyly TDS-metry (VK, B XK) porovnány se značkovými ŠMS (PASCO, Vernier), ale pouze MK byl porovnán se dvěma TDS-metry (VK, B XK). Výsledek tohoto srovnání je pak na obrázku 25.



Obr. 25 – Měření *TDS* sestupné koncentrační řady roztoků kyseliny mravenčí pro porovnání (25) MK proti TDS-metrům (28) VK a (29) BXX

Z obrázku 25 se jeví že tato zařízení v porovnání mezi sebou měří mírně odlišně. Potenciál k využití při výuce chemie mají, vzhledem k tomu, že přístroj pracuje s hodnotou *TDS* jako s hodnotou konduktivity, což znamená, že závislosti konduktivity na koncentraci elektrolytu demonstrovat lze (pozn. Přístroje tedy snižují *TDS* se snižující se konduktivitou a zvyšují *TDS* se zvyšující se konduktivitou). Nicméně v takovém případě je nutné žákům vysvětlit problematiku těchto přístrojů resp. skutečný význam a chování *TDS* proti *TDS*, které uvádí přístroj. Nicméně jejich použití není z hlediska didaktiky vhodné, přestože výrobce uvádí koeficient přepočtu na jednotky konduktivity, jeho hodnota bývá chybná, navíc práce s těmito TDS-metry přináší velké zmatky ohledně veličiny *TDS* a tím i ztrátu času, který by mohl být využit měřením či vyhodnocováním dat. Cena konduktometru schopného měřit v jednotkách $\mu\text{S/cm}$ bývá jen o pár korun vyšší (pozn. v našem případě přibližně o 200 Kč), proto je lepší tyto TDS-metry nepoužívat a zakoupit raději pravý ec-metr (zařízení měřící v jednotkách $\mu\text{S/cm}$). Učitel by měl rovněž zpozornět při koupi konduktometru, aby omylem nezakoupil TDS-metr, protože prodejci obvykle nerozlišují mezi jednotkou měrné elektrické vodivosti a koncentrace, nicméně do popisu výrobku (který nejčastěji označují jako konduktometr nebo ruční měřič vodivosti) jednotky uvádějí.

Závěr

Na základě internetové rešerše, požadavků a očekávaných výstupů uvedených ve vybraných školních vzdělávacích programech a v rámcovém vzdělávacím programu, na základě diskusí s kolegy a s ohledem na dostupnost pro uživatele v ČR a časové možnosti zpracování práce, byla k testování jako možné náhrady za značkové školní měřicí systémy vybrána čidla pro měření pH, tlaku a měrné vodivosti, která lze patrně zařadit mezi nejvyužívanější čidla ve výuce chemie. Internetová rešerše ukázala, že za nejnižší ceny (100-1000 Kč) jsou uvedená čidla dostupná, dle očekávání, na čínských internetových obchodech (např. Aliexpress.com, Banggood.com). O něco dražší, nicméně stále v akceptovatelné a velmi nízké cenové relaci, jsou uvedená čidla dostupná i na českých internetových obchodech, které přeproductávají čínské zboží, a to přibližně za dvojnásobek ceny na čínských e-shopech. Nicméně v případě využití českého e-shopu zákazník získává možnost jednodušší reklamace. Levné varianty čidel a rozhraní byly porovnány se značkovými školními měřicími systémy PASCO a Vernier. Výsledky tohoto testování ukázaly, že všechna použitá levná zařízení jsou funkční a přináší očekávané a uspokojivě reprodukovatelné výstupy měření srovnatelné s výstupy značkových ŠMS. Rovněž s nimi lze v rámci jejich možností provádět všechny vybrané chemické experimenty, které učitel může běžně provádět ve výuce chemie a lze předpokládat, že i další experimenty s nimi bude možné realizovat. Učitel by měl při zakoupení levnější alternativy z většího čínského internetového obchodu očekávat delší dobu dodání (třeba i dva měsíce) a také by si měl pořídit minimálně dvě až čtyři podobná zařízení, protože se může stát, že ve výjimečných případech zařízení vůbec nelze uvést do provozu. V takovém případě mohou být reklamace problematické a zabírají další čas. Nicméně z hlediska finančních nákladů učitel pořídí zařízení, podle vybrané alternativy, třeba i za padesátkrát nižší cenu než má soubor zařízení pro měření se značkovým ŠMS (komunikační rozhraní + A/D převodník + čidlo). V případě pH-elektrody se ukázalo, že ji může učitel použít již v tovární kalibraci a i jako náhradu k reprodukovatelnému měření a titracím za značkovou elektrodu do ŠMS PASCO. Učitel může rovněž tuto elektrodu zapojit do rozhraní Molegraph – výrazně levnějšího Open Source ŠMS, který v tuto chvíli poskytuje ty nejzákladnější výhody počítačem podporovaného experimentu a dokáže se k zobrazovací jednotce připojit i pomocí rozhraní Bluetooth, takže učitel může při titraci použít např. tablet místo počítače, což

obvykle bývá prémiová funkce značkových školních měřicích systémů. Pro měření v terénu či při značném nedostatku finančních prostředků i času může učitel použít k měření pH a vodivosti ruční pH-metr a ruční konduktometr. Tato zařízení sice neposkytují výhody konvenčních ŠMS a vyžadují další ruční zpracování dat, ke kterému může být potřeba počítač (např. vykreslení titrační křivky), na což lze nahlížet jako na výhodu i nevýhodu. Tato zařízení s autonomním displejem však zvládají chemické experimenty jako takové bez problémů a poskytují očekávané a uspokojivě reprodukovatelné výstupy. K rozhraní Molegraph bohužel není zatím dostupné vodivostní čidlo. Naopak u tlakového čidla nebyla nalezena varianta s autonomním displejem, nýbrž pouze součástka, kterou je nutno upravit pro připojení k rozhraní či zobrazovací jednotce. Takto upravené čidlo, jakým je např. diferenční tlakoměr použitý v této práci, funguje bez problémů a poskytuje v experimentu zaměřeném na reakční kinetiku očekávané a reprodukovatelné výstupy v souladu s realitou, které jsou srovnatelné s výstupy značkových ŠMS. Celkově lze konstatovat, že sortiment levných zařízení je dostatečně bohatý a alternativní čidla pH, tlaku a vodivosti jsou dostupná i za velmi nízké finanční náklady a učitel tak výrazně ušetří. Použitá čidla fungovala dobře a tedy v mnoha směrech splňovala jak požadavky na ŠMS, tak byla schopna vykonávat zvolené experimenty v plném rozsahu. Pro lepší posouzení například celkové kvality, přesnosti a správnosti měření či životnosti nebo funkčnosti daného zařízení by samozřejmě bylo potřeba vybrat buď větší rozmanitost zařízení či více kusů stejného zařízení. Dobrým doporučením je v učitelské praxi si takový alternativní přístroj ozkoušet na vlastní pěst, ale již z výsledků této práce je možné předem tvrdit, že tyto přístroje fungují tak, jak mají, pracují spolehlivě a poskytují data v souladu s realitou. Na úplný závěr lze konstatovat, že tyto levné alternativy potenciál k uplatnění ve výuce chemie určitě mají a jejich přímá implementace může být eventuálně tématem dalšího výzkumu.

Zdroje

- Bílek, M. (2011). *Chemické experimenty podporované PC ve výuce* [online]. (Studijní materiál). Univerzita Palackého, Přírodovědecká fakulta, Olomouc. s. 6-7. [cit. 2019-12-13]
Dostupné z: http://www.ucitelchemie.upol.cz/materialy/studijni_texty/prednaska_chemicke_experimenty_podporovane_pc_bilek.pdf
- Bílek, M. (2015). *Moderní přístupy k výuce chemie* [online]. (Studijní materiál). s. 45. [cit. 2020-04-17].
Dostupné z: <https://digifolio.rvp.cz/artefact/file/download.php?file=73566&view=11605>
- BNC-konektor. (2020). In: Wikipedia. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/BNC_konektor
- Connexia electric, s.r.o. (2019). *edlab.cz* [online]. [cit. 2019-12-12] Dostupné z: <http://www.edlab.cz/>
- Edufor s.r.o. (2019). *Vernier.cz* [online]. [cit. 2019-12-08] Dostupné z: <https://www.vernier.cz/>
- Fourier Education (2019). *einstein™* [online]. [cit. 2019-12-12] Dostupné z: <http://www.einsteinworld.com/home/>
- Hamhalterová Z. et al. (2009). *Školní vzdělávací program „Velký cíl dává životu velký smysl“*. [online]. [cit. 2020-04-26] Dostupné z: https://www.gyarab.cz/media/docs/Id_udaje_01_09_2018.pdf
- Hood, B. J. (1994). *Research on computers in chemistry education: reflections and predictions March 29, 1993*. J. Chem. Edu., 71(3), p. 196–200.
- Jenčuš, H. (2019). *Databáze úloh pro práci se školními měřicími systémy na SŠ*. (Bakalářská práce). Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Praha. Vedoucí práce RNDr. Petr Šmejkal, Ph.D. s. 21.
- KDZ, spol. s.r.o. (2019). *NeuLog.cz* [online]. [cit. 2019-12-11] Dostupné z: <https://www.neulog.cz/>
- Kmentová J., Kvasničková Š. (2009). *Školní vzdělávací program „Objevovat a rozvíjet“* [online]. [cit. 2020-04-26] Dostupné z: https://www.zatlanka.cz/dokumenty/prijimacky_2017/_kolni_vzdelavaci_program_objevovat_a_rozvijet_platny_od_1._9.pdf

- Lam, T. (1983). *Tools of the trade: Microcomputer-based instrumentation: As easy as ADC*. In: *Hands On!*, 6(2), p. 18–19.
- Lustig, F. (2013). *Vzdálené experimenty s jednoduchými technickými prostředky*. In: *Trendy ve vzdělávání*. Roč. 2013, č. 1, s. 675-678. ISSN 1805-8949. Dostupné z: https://www.ises.info/old-site/clanky_pdf/Lustig_TV_V_2013%20.pdf
- MORAVIA Consulting spol. s r.o. (2019). *fourieredu.cz* [online]. [cit. 2019-12-12] Dostupné z: <http://www.fourieredu.cz/cz>
- MŠMT. (2007). *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia* [online]. [cit. 2020-04-18] Dostupné z: <http://www.nuv.cz/file/159>
- Profimedia s.r.o. (2019). *Pasco.cz* [online]. [cit. 2019-12-08] Dostupné z: <https://www.pasco.cz/>
- Ryzner, J. (2018). *Školní experimentální systém ISES* [online]. Aktualizováno 11. Června 2018 [cit. 2019-12-08] Dostupné z: <http://www.ises.info/old-site/>
- Schejbalová, R. et al. (2019). *Školní vzdělávací program „Klíč ke vzdělání“* [online]. Aktualizováno 7. Října 2019 [cit. 2020-04-18] Dostupné z: <https://www.gymstola.cz/images/docs/svp/svp2019.v4.pdf>
- Skoršepa M. (2015). *Počítačem podporované experimenty v přírodovědném vzdělávání*. Praha: Belianum. ISBN 978-80-557-0898-0
- Stratilová Urválková E. (2013). *Počítačem podporované experimenty ve výuce chemie na střední škole*. (Disertační práce). Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Praha.
- Šmejkal, P., Skoršepa, M. a E. Stratilová Urválková (2018). *Evaluation and Comparison of Newly Designed IBSE Oriented MBL Activities and of Work with MBL Systems by Slovak and Czech Teachers (a Comparative Study)*. In: *Science Teaching in the XXI Century*. Kraków: Pedagogical University of Cracow. p. 51-71. ISBN 978-83-8084-062-1
- Šmejkal, P. (2019). *Vybrané aspekty zavádění školních měřicích systémů do výuky přírodovědných předmětů se zaměřením na chemii*. (Habilitační práce). Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Praha. s. 18-19, 24-29, 32-33.
- Thornton, R. K. (1986). *Tools for Scientific Thinking: Microcomputer-Based Laboratories for the Naive Science Learner*. In: *Proceedings of the National Educational Computing Conference, San Diego, California*.

- Thornton, R. K. & Sokoloff, D. R. (1990). *Learning motion concepts using real-time microcomputer-based laboratory tools*. In: American Journal of Physics, 58(9), 858–867.
- Tinker, R. (1985). *How to Turn Your Computer Into a Science Lab*. In: Classroom Computer Learning, 5(6), p. 26–29.
- Tinker, R. (1996). *Microcomputer-based labs: educational research and standards*. Berlin: Springer-Verlag.