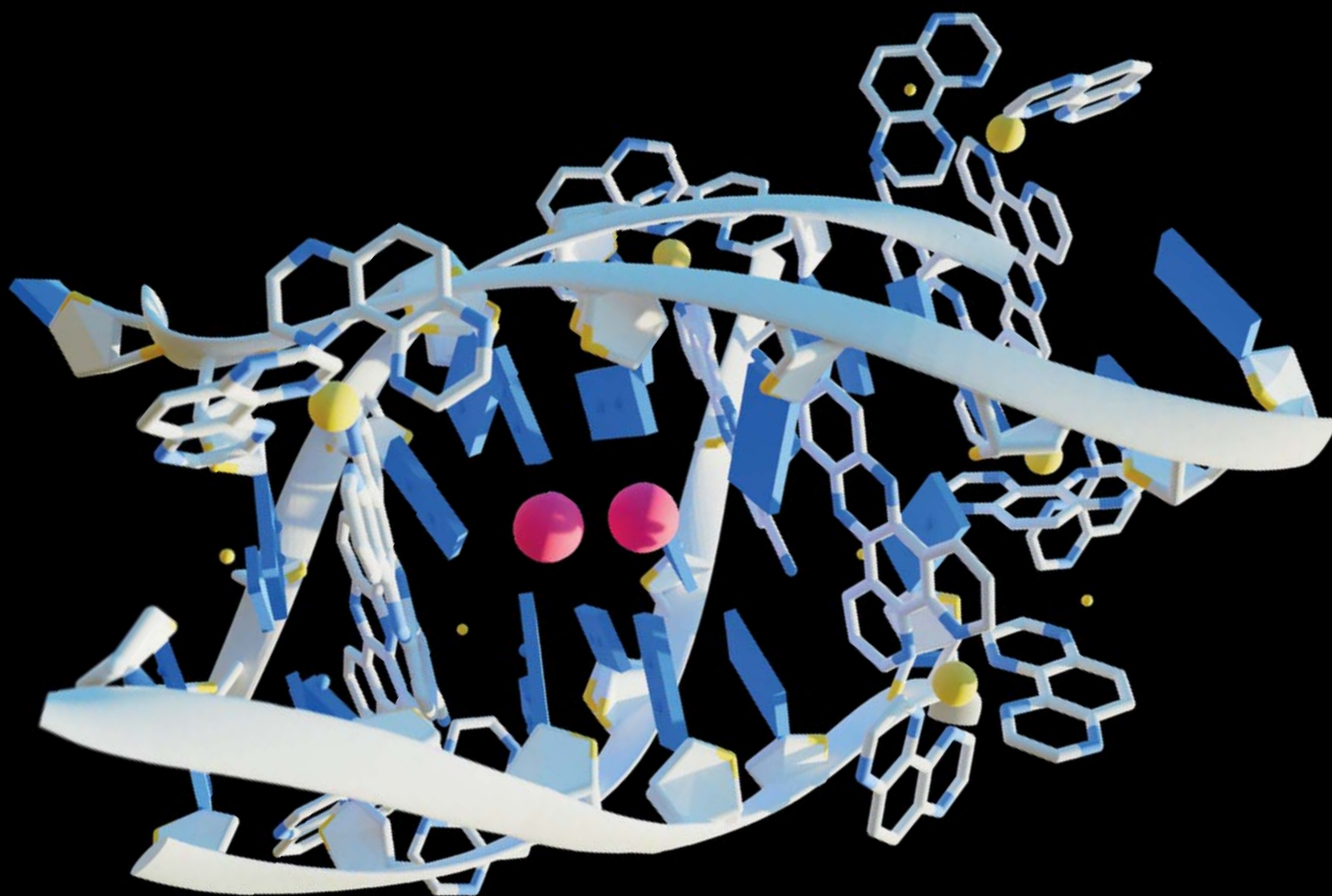


# Chemické Listy

# 9

ročník • 118



Zajímavosti o boru

Sarva roga nivarini

Chemie na osmiletých gymnáziích

Velkokapacitní elektrolyzéry  
v tuzemských jaderných elektrárnách



# Excellence in Chemistry Research



## Why publish with *ChemistryEurope*?

- Gold Open Access
- Publishing charges waived
- Preprints welcome
- Rigorous peer-review

## Meet the Editors



**Luisa De Cola**

Università degli Studi  
di Milano Statale, Italy



**Lars Christian Grabow**

University of  
Houston, USA



**Ken Tanaka**

Tokyo Institute of  
Technology, Japan

## Náhoda ve vědeckém výzkumu

Náhoda je filozofická kategorie a lze ji lze charakterizovat jako souhrn drobných, ne zcela zjistitelných, nebo vůbec nezjistitelných vlivů. Příroda si s náhodnými ději hraje ráda. Náhodné mutace DNA sehrály zásadní úlohu v evoluci. I jiné procesy, např. házení kostek či ruleta, jsou náhodné. Náhoda byla též považována za matku mnohých objevů a vynálezů. Angličtina má pro tento jev výraz serendipity, který byl údajně poprvé použit v roce 1754. Tento výraz pochází z perské pohádky o třech princeznách ze Serendipu (perské jméno pro Sri Lanku), jež opakovaně náhodně objevovaly věci, které nehledaly. Počítačový vědec Jaime Teevan z Microsoftu ovšem tvrdí, že k jakoby náhodnému objevování dochází, když „... lidé nevědí, co dělat s novými informacemi. Místo toho chtějí informace, které jsou na okraji něčeho, co už znají, protože pak je možné, máme-li kognitivní struktury, dát smysl novým myšlenkám“. Zdá se tedy, že povětšinou nemáme problém vidět tu náhodnou část zdánlivě náhodných nálezu. Druhou, mnohdy přehlíženou částí ale je skutečnost, že úspěšný objev nespočívá v neočekávanosti toho, co najdeme, ale v naší schopnosti dát tomu smysl a spojit to s tím, co už víme. Tedy kauzalita. Toto chápání náhody nás ovšem zavádí hluboko do minulosti. Již v prvním století před Kristem římský básník a spisovatel Publius Vergilius Maro konstatoval ve své knize Aeneis, že „audaces fortuna iuvat“, tedy něco na způsob, že štěstí přeje připravěným.

Často se náhoda uvádí jako zdroj nových léků. Celou řadu detailních příkladů lze nalézt v knize Stanislava Rádlá Příběhy spojené s objevy léčiv nebo v knize Vladimíra Marka From Aspirin to Viagra. Jako věhlasný příklad jistě „náhody“ v této oblasti je často uváděn objev penicilinu. Skotský doktor Alexander Fleming léta zkoumal vlastnosti stafylokoků. V roce 1928 pěstoval *Staphylococcus aureus* v přirozených podmínkách. Před odjezdem na dovolenou naočkoval stafylokoky na kultivační misky a nechal je na stole v rohu své laboratoře. Když se 3. září 1928 vrátil do své laboratoře poté, co strávil dovolenou se svou rodinou v Suffolku, všiml si, že jedna kultura byla kontaminována plísní a že kolonie stafylokoků bezprostředně obklopující plíseň byly zničeny. Naopak kolonie stafylokoků ve větších vzdálenostech byly normální. Fleming údajně jenom suše poznamenal „That's funny“. Pak mu to ale nedalo, po několika dnech vypěstoval samotnou plíseň a v jejím extraktu pak opět pozoroval antibakteriální účinek. Tak přišel na svět penicilin. Sám Fleming rovněž později poznamenal: „Člověk někdy najde to, co nehledá. Když jsem se 28. září 1928 těsně po svítání probudil, rozhodně jsem neměl v plánu udělat revoluci v celé medicíně objevením prvního antibiotika neboli vraha bakterií na světě. Ale předpokládám, že přesně to jsem udělal.“ Určitě se to však nestalo pouhou náhodou. Kdyby nestudoval bakterie, nikdy by efekt *Penicillium notatum* neobjevil. Byl prostě připraven.

V mém oboru je známý příběh měkkých kontaktních čoček Otty Wichterleho. Jejich vznik autenticky popisuje ve své knize *Vzpomínky*. Prvním impulsem k práci na vývoji polymerních čoček byl jeho rozhovor ve vlaku cestou z Olomouce do Prahy v létě roku 1952. Spolucestující četl odborný článek v oftalmologickém časopise a Wichterle v něm zahlédl reklamu na tantalové protězy pro chirurgickou náhradu enukleovaného očního bulbu. Navázal hovor a poznám, že umělá hmota by byla lepším materiálem pro implantát než ušlechtilé kovy. Začal tedy přemýšlet o hydrofilním polymeru, který by byl pro oko dobře snesitelný. Ve spolupráci se svým asistentem Drahoslavem Límem se jako nejvhodnější ukázal poly(2-hydroxyethyl-methakrylátový) hydrogel, který absorboval zhruba 40 % vody, byl průhledný a měl dostatečné mechanické vlastnosti. Problém byl s jeho tvářením. Nejprve se gel „odléval“ v polystyrenových formách. Čočky se však při otevírání formy trhaly a měly nepravidelné okraje, které dráždily oko. Na půdě Ústavu makromolekulární chemie ČSAV pak byl po roce 1958 proces vylepšen polymerizací ve skleněných formách. Získaly se tak čočky s přesnou optikou ve střední části, ale jejich výroba zahrnovala pracné ruční obrušování okrajů. Tyto čočky oko sice již nedráždily, ale počty vyrobených použitelných čoček byly velmi malé. Koncem roku 1961 si Wichterle všiml, že zbytek monomeru zpolymerizovaný na dně zkumavky, který opomenul zlikvidovat po svém předchozím experimentu, měl hladký tvar a podobu čočky. Proto se vrátil ke své dřívější teoretické myšlence použití odstředivého odlévání v otevřených rotujících formách. Den před Štědrým dnem roku 1961 doma sestavil první aparaturu na výrobu kontaktních čoček z dětské stavebnice Merkur poháněnou dynamem z jízdního kola jako motorkem. S ní pak okamžitě prokázal, že použití rotujících forem je cesta k výrobě široce aplikovatelných hladkých čoček. Lze se ptát, jestli vznik gelu na dně zkumavky, který inicioval úspěšný vývoj, byla náhoda. Vznikl by, kdyby se Wichterle nezabýval polymerizací poly(2-hydroxyethyl-methakrylátu) a nebyl tedy připraven?

Vratme se tedy k otázce, jakou hraje roli náhoda ve vědeckém výzkumu. Jistě, zcela vyloučit ji asi nelze. Náhodou by nejspíš bylo, kdybych jako chemik našel něco třeba v oboru astrofyziky, který je mi zcela cizí a v němž určitě připraven nejsem. Ale takové věci se dějí opravdu zřídka. Když se probereme většinou zdánlivě překvapivých neboli „náhodných“ objevů, zjistíme, že ti, kdo objev učinili, pracovali v daném oboru již jistou dobu. Spojení jejich zkušeností a pozorovacích schopností je pak dovedlo k danému nálezu. Poučením tedy budiž, že spoléhat se na náhodu ve vědecké práci není ten nejlepší přístup. Prostě, bez tvrdé práce a bystrého mozku je obtížné udělat něco významného a náhoda přitom příliš nepomůže.

František Švec



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.

## NA PÁTÉM POLÍČKU PERIODICKÉ TABULKY JE BOR

PETR HOLÝ

Česká společnost chemická, redakce Chemické listy, Novotného lávka 5, 116 00 Praha, Česká republika  
pholy382@seznam.cz

Došlo 5.7.24, přijato 12.8.24.

I přes velice nízké zastoupení boru v zemské kůře nalezly bor i jeho sloučeniny široké uplatnění v praktickém životě i ve vědeckém výzkumu. Článek zmiňuje důležitost tohoto prvku pro rostliny a pro člověka. Podává stručný přehled o vlastnostech boru a jeho sloučenin a jejich technickém využití pro přípravu skel, skelných vláken, vysoce odolných a tvrdých materiálů pro průmyslové využití a pro jadernou technologii. Uvádí také využití borových sloučenin v lékařství a v syntetické chemii.

Klíčová slova: historie boru, vlastnosti boru, borové minerály, odolné borové materiály, použití boru v lékařství, borové materiály pro jaderné elektrárny, borohydridy, hydroborace, karboranové kyseliny

### Obsah

1. Úvod
2. Vlastnosti boru a oblasti jeho použití
3. Význam boru pro rostliny a pro člověka
4. Sloučeniny boru
  - 4.1. Halidy, boridy, karbidy, nitridy
  - 4.2. Borany, hydroborace, borohydridy
  - 4.3. Karboranové kyseliny
5. Závěr

### 1. Úvod

V minulých letech jsem napsal dvě pojednání o českém lithiovém pokladu<sup>1,2</sup>, tedy o prvku na třetím políčku periodické tabulky. Ke 150. výročí Mendělejevova objevu periodického systému jsem se posunul o jedno políčko dál, a tak jsem napsal krátký referát o prvku s protonovým číslem 4, tedy o beryliu<sup>3</sup>. Nynějším dalším krokem jsem se v tabulce dostal na políčko s číslem 5 patřící boru. Naštěstí bor, na rozdíl od v periodě následujících veledůležitých prvků C, N a O, nepatří mezi známější prvky, což poskytuje možnost o něm napsat něco poučného a snad i zajímavého.

Bor získal své jméno podle minerálu boraxu (z arabského slova *buraq* znamenajícího „bílý“, cit.<sup>4,6</sup>). Borax byl znám od nepaměti a používán byl hlavně na dálném východě jako tavidlo a k přípravě glazur a skel. Naopak prvek bor byl poměrně nejasně popsán až v roce 1808 (cit.<sup>5-7</sup>) Josephem Louisem Gay-Lussacem a Louisem Jacquesem Thénardem<sup>8</sup> (obr. 1) a ve stejném roce též nezávisle i Humphrym Davym<sup>9</sup> jako produkt vzniklý redukcí kyseliny borité (systematickým názvem kyseliny trihydrogenborité,  $H_3BO_3$ ) draslíkem. Humphry Davy v prvním poku-

su použil přímou elektrolýzu roztoku směsi kyseliny borité a potaše ( $K_2CO_3$ ) (obr. 2). V čistém stavu připravil bor Američan Ezekiel Weintraub o sto let později reakcí par chloridu boritého s vodíkem v elektrickém oblouku<sup>10</sup> a až u takto připraveného elementárního boru byly jeho vlastnosti správně popsány.

### 2. Vlastnosti boru a oblasti jeho použití

Amorfní bor je tmavě hnědý prášek<sup>11</sup>. Vzniká metalotermickou redukcí oxidu boritého ( $B_2O_3$ ) kovovým sodíkem, hořčíkem nebo hliníkem<sup>5,6,11</sup>. Takto připravený bor nebývá příliš čistý, protože obsahuje jako příměsi boridy použitých kovů. Surový amorfní bor se čistí varem se zředěnou kyselinou chlorovodíkovou nebo promýváním kyselinou fluorovodíkovou<sup>11</sup>. Amorfní bor nalézá použití v pyrotechnických světlicích, kterým dodává jejich výraznou zelenou barvu, a jako zapalovač raketových paliv<sup>4,6</sup>. Zelené zbarvení plamene kahanu také slouží jako důkaz přítomnosti boru v analyzovaném vzorku<sup>5,7</sup>.

Krystalický bor se získává redukcí bromidu boritého ( $BBr_3$ ) vodíkem při teplotě nad  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  nebo redukcí chloridu boritého ( $BCl_3$ ) zinkem za teploty  $900\text{ }^\circ\text{C}$ . Velmi čistý bor je možné připravit termickým rozkladem jodidu boritého ( $BI_3$ ) při teplotě  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  nebo redukcí chloridu boritého vodíkem<sup>11</sup>. Prvek nejvyšší čistoty pro přípravu polovodičů se získává termickým rozkladem boranů<sup>6</sup>. Krystalický bor je velmi tvrdá látka (9,5 v Mohsově stupnici<sup>6</sup>) stříbrně-černé barvy s teplotou tání  $2076\text{ }^\circ\text{C}$  (cit.<sup>3</sup>). Díky své schopnosti vytvářet kovalentními vazbami různé klustry poskytuje čtyři hlavní alotropy<sup>6</sup>:  $\alpha$ -rhombohedrální ( $\alpha$ -R),  $\beta$ -rhombohedrální ( $\beta$ -R),  $\gamma$ -orthorhombický ( $\gamma$ ) a  $\beta$ -tetragonální ( $\beta$ -T).

## NOTICE

*Sur la décomposition et la recomposition de l'acide boracique;*

PAR MM. GAY-LUSSAC ET THENARD.

Nous avons annoncé, le 21 juin dernier, dans une note lue à l'Institut, et nous avons imprimé dans le Bulletin de la Société philomatique pour le mois de juillet, qu'en traitant les acides fluorique et boracique par le métal de la potasse, on obtenoit des résultats tels qu'on ne pouvoit les expliquer qu'en admettant que ces acides étoient composés d'un corps combustible et d'oxygène. Cependant comme nous ne les avons point recomposés, nous avons ajouté que nous ne donnions point cette composition comme parfaitement démontrée. Depuis ce tems, nous avons continué et varié nos recherches; et nous pouvons assurer aujourd'hui que la composition de l'acide boracique n'est plus problématique. En effet nous décomposons et nous recomposons à volonté cet acide:

Pour le décomposer, on met parties égales

de métal et d'acide boracique bien pur et bien vitreux, dans un tube de cuivre auquel on adapte un tube de verre recourbé. On dispose le tube de cuivre dans un petit fourneau, et on engage l'extrémité du tube de verre dans un flacon plein de mercure. L'appareil étant ainsi disposé, on chauffe peu-à-peu le tube de cuivre, jusqu'à le faire rougir légèrement; on le conserve dans cet état pendant quelques minutes; alors l'opération étant terminée, on le fait refroidir et on en retire la matière. Voici les phénomènes qu'on observe dans cette expérience.

Lorsque la température est environ 150 degrés, tout-à-coup le mélange rougit fortement, ce qu'on voit d'une manière frappante, en se servant d'un tube de verre. Il y a même tant de chaleur produite que le tube de verre fond en partie et se brise quelquefois, et que presque toujours l'air des vaisseaux est repoussé avec force. Depuis le commencement jusqu'à la fin de l'expérience, il ne se dégage que de l'air atmosphérique et quelques bulles de gaz hydrogène qui ne répondent pas à la 50<sup>e</sup>. partie de ce que le métal employé en dégageroit par l'eau. Tout le métal disparoit constamment en décomposant une partie de

Obr. 1. První dvě stránky článku Gay-Lussaca a Thénarda o přípravě boru (cit.<sup>8</sup>)

Krystalický bor je chemicky inertní a odolný vůči napadení vroucí kyselinou fluorovodíkovou nebo chlorovodíkovou<sup>11</sup>. Jemně rozmělněný se pomalu oxiduje za horka peroxidem vodíku, koncentrovanou kyselinou dusičnou nebo kyselinou sírovou na kyselinu boritou<sup>6,7</sup>. Reakcí s halogeny tvoří trihalogenidy<sup>6,7,11</sup> obecného vzorce BX<sub>3</sub>.

Bor je poměrně vzácným prvkem ve vesmíru. Jeho vznik při „velkém třesku“ se nepovažuje za významný a ani se netvoří v jádrech hvězd během jejich životních fází. Vzniká pouze z jiných jader jejich následnými přeměnami vlivem kosmického záření<sup>6</sup>. Důsledkem toho je jeho velmi nízký obsah v zemské kůře<sup>6</sup>, kde tvoří jen 0,001 %. I přes toto nepatrné zastoupení je bor považován pro život na Zemi jako nepostradatelný. V této souvislosti je zajímavé, že vozítko Curiosity tento prvek detekovalo v roce 2017 v kráteru Gale na Marsu<sup>6,12</sup>, což podpořilo úvahy o existenci života na této planetě.

Elementární bor se na Zemi nevyskytuje<sup>6</sup> (ale stopy boru byly nalezeny v měsíčním regolitu<sup>6</sup>). Díky oxidační-

mu charakteru zemského prostředí se bor vyskytuje téměř výhradně ve sloučeninách ve formálním oxidačním stavu +III, nejčastěji jako boritany<sup>5-7</sup>. Existuje více než sto boritanových minerálů<sup>6</sup>. Také v dalších sloučeninách, jako jsou sulfidy, nitridy a halogenidy, má bor formální oxidační stav +III. Jsou to kovalentní sloučeniny, ve kterých má atom boru svou valenční sféru obsazenou pouze šesti elektrony, což jim dodává zvláštní vlastnosti.

Bor vytváří celou řadu ve vodě rozpustných solí. V mořské vodě jeho obsah dosahuje až 5 mg l<sup>-1</sup>. Prosakováním a odpařováním se vytvářela ložiska minerálů, z nich nejdůležitější jsou borax<sup>6</sup> (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>10</sub>·10H<sub>2</sub>O, jeho struktura viz obr. 3), kernit (Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>·4H<sub>2</sub>O), dále pak kaliborit (KHMg<sub>2</sub>B<sub>12</sub>O<sub>16</sub>(OH)<sub>10</sub>·4H<sub>2</sub>O) a kotoid (Mg<sub>3</sub>B<sub>2</sub>O<sub>6</sub>). Nejvyšší obsah boru (25,57 % B) má minerál diomignit<sup>11</sup> (Li<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>). Pro průmyslovou těžbu má význam nerost kolemanit<sup>11</sup> (Ca<sub>2</sub>B<sub>6</sub>O<sub>11</sub>·5H<sub>2</sub>O). Největší naleziště borových minerálů jsou v centrální části Turecka. Další významná ložiska jsou v Kalifornii, dále pak v Argentině



přispěl k většímu používání izolačních skleněných vláken, a růst spotřeby boru bude proto pokračovat<sup>6</sup>.

Je známo celkem 13 izotopů boru. Z nich jsou pouze dva stabilní, které se vyskytují v přírodě –  $^{10}\text{B}$  a  $^{11}\text{B}$ , cit.<sup>6,7</sup>. Výrazně hojnější je těžší  $^{11}\text{B}$  (80,1 %). Větší praktický význam má lehčí izotop  $^{10}\text{B}$ , kterého je ale méně než 20 %. Tento izotop má velice výhodnou vlastnost, neboť jeho jádra mají mimořádnou schopnost zachycovat neutrony širokého energetického spektra bez následného vzniku štěpných radioaktivních produktů. Záchytem neutronu se jádro  $^{10}\text{B}$  změní na excitované jádro  $^{11}\text{B}^*$ , které se následně rozpadá za vzniku izotopu lithia  $^7\text{Li}$  a částice  $\alpha$  (heliového jádra). Proto je bor  $^{10}\text{B}$  hojně používán k řízení a kontrole chodu jaderných reaktorů pracujících s tepelnými neutrony<sup>6,14</sup>. Mechanické vlastnosti samotného boru nejsou vhodné, proto se používají oceli s vysokým obsahem boru nebo karbid boru pro materiály plášťů reaktorů a regulačních tyčí<sup>11</sup>. U tlakovodních jaderných reaktorů se používá borem  $^{10}\text{B}$  obohacená kyselina boritá jako zpomalovač chodu při výměně paliva a jako bezpečnostní pojistka pro mimořádné situace<sup>6,14</sup>. Skelná vlákna s obohaceným  $^{10}\text{B}$  se perspektivně uvažují jako neutronový štít pro ochranu vesmírných zařízení před kosmickým zářením<sup>6</sup>. Reakce jader s neutrony lze využít také pro rozšíření funkce Geigerova-Müllerova detektoru<sup>7</sup>. Pokud se vybaví komorou obsahující plynný  $\text{BF}_3$ , indikuje i neutrony prostřednictvím částic  $\alpha$  vzniklých reakcí s jádrem  $^{10}\text{B}$ .

Kromě jaderné energetiky má schopnost izotopu  $^{10}\text{B}$  zachycovat neutrony využití i v lékařství. Na ní je založena protinádorová terapie (boron neutron capture therapy, BNCT)<sup>5,6,15,16</sup>. Při ní je pacientovi podán přípravek s izotopem  $^{10}\text{B}$ , který je třeba nejlépe selektivně dopravit do orgánu s rakovinnými buňkami. Následuje krátké ozáření tepelnými neutrony, při kterém proběhne výše zmíněná jaderná reakce produkující agresivní ionizaci prostřednictvím jader  $^7\text{Li}$  a záření  $\alpha$ . Vyvolaná ionizace má ale jen krátký dosah v rozmezí 5–9  $\mu\text{m}$ , který přibližně odpovídá průměru cílové buňky, a proto letální zásah postihuje pouze buňky obsahující bor. Úspěšnost metody BNCT je závislá na selektivním dodání dostatečného množství  $^{10}\text{B}$  do nádoru, aby normální tkáň byla ušetřena radiací vyvolané ozářením. Terapie BNCT byla původně vyvinuta k léčbě zhoubných mozkových nádorů. V klinických studiích se ukázaly slibné výsledky i pro různé další malignity, například rakoviny krku, kožního melanomu a karcinomů jater a plic<sup>6,16</sup>.

Výše uvedená použití jsou založena na výhodné vlastnosti izotopu  $^{10}\text{B}$ , který má v přírodních zdrojích minoritní zastoupení. Proto byly vyvinuty nejrůznější průmyslové postupy jeho obohacování, z nich se nejvíce používá vakuová rektifikace komplexu fluoridu boritého s dimethyletherem<sup>6</sup>, chromatografické dělení boritanů<sup>17</sup> nebo centrifugační dělení plynného  $\text{BF}_3$  (cit.<sup>11</sup>).

Obě jádra  $^{10}\text{B}$  i  $^{11}\text{B}$  mají nenulový jaderný spin<sup>6,7</sup>. Jaderný spin jádra  $^{10}\text{B}$  má hodnotu 3 a jaderný spin jádra  $^{11}\text{B}$  je 3/2. Oba izotopy jsou proto využitelné v nukleární magnetické rezonanční spektroskopii. Komerčně dostupné jsou spektrometry speciálně upravené pro detekci jader  $^{11}\text{B}$  (cit.<sup>6</sup>).

Bor je užitečný dopant pro takové polovodiče, jako je křemík, germanium a karbid křemíku<sup>6</sup>. Tím, že atomy boru mají o jeden valenční elektron méně než nahrazovaný atom, vytvářejí děrovou vodivost typu p. Tradiční metodou zavádění boru do polovodičů je jeho atomová difuze při vysokých teplotách<sup>6</sup>. Tento proces využívá buď pevné ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ), kapalné ( $\text{BBr}_3$ ), nebo plynné zdroje boru ( $\text{B}_2\text{H}_6$  nebo  $\text{BF}_3$ ). Pro výrobu běžných polovodičových materiálů se používá bor s přirozeným izotopovým složením. Kosmické záření ale může štěpit jádra  $^{10}\text{B}$  a produkty jejich rozpadu mohou poškozovat polovodičové čipy. Pro zařízení pracující v kosmickém prostředí se proto musí používat radiálně odolné polovodiče<sup>6</sup>. Pro jejich výrobu se využívá „ochuzený“ bor, který je vedlejším produktem jaderného průmyslu, který po odseparování jader  $^{10}\text{B}$  obsahuje téměř výhradně jádra  $^{11}\text{B}$ .

Velmi zajímavou aplikaci představuje také využití boru jako dopantu uhlíku, respektive syntetického diamantu. Tenké vrstvy diamantu dopovaného borem (BDD), které se nejběžněji vyrábějí ve speciálních reaktorech pomocí chemické depozice z plynné fáze (CVD) s využitím mikrovlnného plazmatu (MWCVD) nebo horkých vláken (HFCVD), se od svého představení v roce 1992 postupně staly hojně využívaným elektrodovým materiálem v elektrochemii<sup>18,19</sup>. BDD je v současnosti vnímán jako biokompatibilní materiál s dobrými elektronickými, chemickými a mechanickými vlastnostmi, který vykazuje polovodivost až vodivost kovového typu v závislosti na úrovni dopování borem a obsahu nediamantové uhlíkové fáze. Pro elektroanalýzu jsou nejdůležitějšími vlastnostmi široké potenciálové okno ve vodných a smíšených vodně-organických roztocích (asi 3–3,5 V), nízký a stabilní proud pozadí, snížená náchylnost k pasivaci povrchu ve srovnání s jinými pevnými elektrodovými materiály a možnost elektrochemické aktivace *in situ*.

### 3. Význam boru pro rostliny a pro člověka

Bor má pro člověka velký význam, protože ovlivňuje růst rostlin, které (přímo i nepřímo) vytvářejí podstatnou složku lidské potravy<sup>7</sup>.

Elementární bor a také jeho běžné sloučeniny jako oxid boritý, kyselina boritá a boritany jsou relativně netoxické pro lidi a zvířata (s toxicitou podobnou kuchyňské soli<sup>6</sup>). Kyselina boritá je toxičtější pro hmyz než pro savce a běžně se používá jako mírný insekticid.

Bor patří mezi významné rostlinné živiny. Ačkoliv je řazen mezi mikroprvky, zastává v rostlině mnohé významné funkce na úrovni makroprvků<sup>11</sup>. Mezi nejvýznamnější stavební funkce boru se řadí účast na tvorbě a stabilitě buněčných stěn, kde se nachází až 90 % z obsahu boru v rostlinách<sup>13</sup>, který se běžně pohybuje celkově mezi 0,001–0,01 %. Bor nepřímo ovlivňuje tvorbu buněčné stěny, ale také se přímo podílí na její struktuře, neboť spojuje pektiny a vytváří příčné vazby mezi jednotlivými komponenty buněčných stěn. Bor se váže na *cis*-hydroxylové skupiny pektinu rhamnogalakturonanu II (cit.<sup>4,6,13</sup>),

což je polysacharid důležitý pro stavbu buněčné stěny rostlin. Bor tím ovlivňuje vlastnosti buněčných stěn, především jejich pružnost, a s tím související schopnost růstu rostlin. Prostřednictvím výstavby buněčných stěn bor také ovlivňuje odolnost rostlin proti nepříznivým či škodlivým vlivům, jako jsou mraz a patogenní organismy<sup>13</sup>.

Vazba kyseliny borité a boritanů s organickými *cis*-dioly také zůstává nejpravděpodobnějším chemickým mechanismem pro roli tohoto prvku v evoluci živého světa. Předpokládá se, že v raných stádiích prebiotické evoluce, kdy formosovou reakcí vznikaly směsi cukrů, boritany pomohly stabilizovat furanosovou formu ribosy a vytvořit tak dobré podmínky pro tvorbu ribonukleotidů. Tím mohl bor poskytnout zásadní příspěvek ke „světu před RNA“ (cit.<sup>20,21</sup>). Proto detekce boru v marsovském kráteru<sup>6</sup> povzbudila úvahy o životě na této planetě.

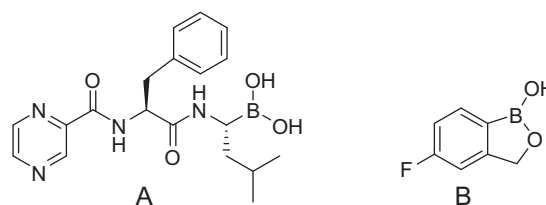
Bor není klasifikován jako základní živina pro člověka, protože výzkum dosud neidentifikoval jasnou biologickou funkci boru<sup>6</sup>. Může však mít příznivé účinky na takové funkce, jako je reprodukce a vývoj, metabolismus vápníku, tvorba kostí, funkce mozku, metabolismus inzulínu a energetických substrátů, imunita a funkce steroidních hormonů (včetně vitamínu D a estrogeneru)<sup>11,14,22</sup>.

Člověk zpravidla nedostatkem boru netrpí. Dostatečné množství boru v rozmezí 0,9 až 1,4 mg denně přijímá v potravinách<sup>6,11,14,22,23</sup>. K potravinám s vysokým obsahem boru patří zejména sója, fazole, arašidy, jablka, špenát a cibule. Denní dávku lze tak dosáhnout například malou porcí fazolí, sáčkem oříšků nebo 2–3 jablky<sup>11</sup>. Vzhledem k běžně konzumovanému množství jsou dostatečným zdrojem boru i brambory<sup>22</sup>.

Lidské tělo obsahuje asi 18 mg boru<sup>23</sup>. Kostí, nehty a vlasy mají vyšší hladiny boru než jiné tělesné tkáně<sup>22</sup>, například tuk. Kyselina boritá je hlavní formou boru v krvi, moči a dalších tělesných tekutinách. Bylo zjištěno, že tělo udržuje homeostázu boru, jeho přebytky jsou vylučovány převážně močí<sup>23</sup>. Vzhledem k tomu, že se bor v těle neakumuluje, projde lidským organismem za život až několik desítek gramů boru<sup>4,11</sup>. Pro stanovení obsahu boru v potravinách se používá kolorimetrická metoda založená na reakci kyseliny borité s kurkumínem, při které vzniká červeně zbarvený komplex rosocyanin<sup>6</sup>.

Kyselina boritá má antiseptické, protiplísňové a antivirové vlastnosti a z těchto důvodů se používá v přípravcích pro úpravu bazénové vody<sup>6</sup>. Roztok kyseliny borité (3%) se používá jako oční antiseptikum. Peroxotrihydrát boritanu sodného (perboritan,  $\text{NaBO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) se využívá jako oxidační činidlo s bělicími účinky v textilním průmyslu, v pracích prostředcích a bělicích zubních pastách<sup>5,6</sup>.

Existuje několik známých přírodních antibiotik obsahujících bor. Prvním nalezeným byl boromycin, izolovaný z bakterie *Streptomyces antibioticus* v 60. letech 20. století<sup>6</sup>. Další je skupina makrolidových antibiotik s názvem tartrolony<sup>6</sup>, které byly objeveny v roce 1994. Byla také syntetizována antibiotika obsahující bor<sup>6</sup>. Jedním z nich je bortezomib (obr. 5, s obchodními názvy Velcade a Cytomib) uváděný na trh pro léčbu maligních lymfomů a mno-



Obr. 5. Vzorce syntetických antibiotik<sup>6</sup> obsahující bor: bortezomib (A) a tavorborol (B)

hočetného myelomu. Další je tavorborol (v léčivu Kerydin), který se používá k léčbě plísni nehtů na nohou (obr. 5). Bylo izolováno a syntetizováno mnoho dalších sloučenin obsahujících bor, u nichž byla studována jejich antibakteriální a antimykotická účinnost, viz přehledný článek<sup>24</sup>.

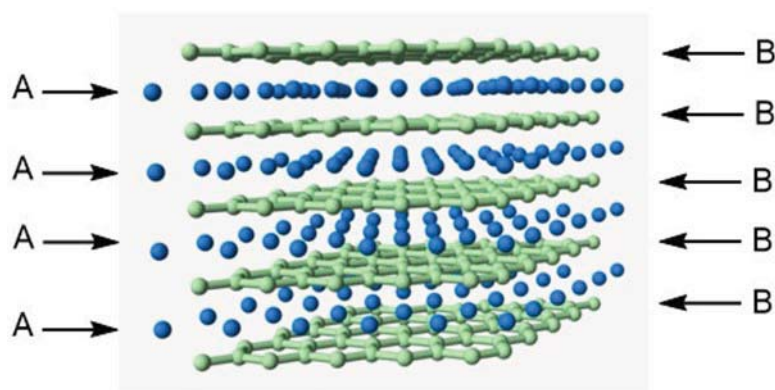
## 4. Sloučeniny boru

### 4.1. Halidy, boridy, karbidy, nitridy

Bor reaguje se všemi halogenovými prvky za vzniku monomerních, vysoce reaktivních trihalogenidů<sup>6,7</sup> obecného vzorce  $\text{BX}_3$ , kde X je F, Cl, Br nebo I. Lepší výchozí sloučeninou pro reakci s chlorem je oxid boritý<sup>6</sup>. Trihalogenidy mají planární trigonální strukturu. Tyto sloučeniny se v důsledku pouze sextetu elektronů ve valenční sféře chovají jako Lewisovy kyseliny<sup>6</sup>. Snadno tvoří komplexy s donory elektronových párů, například s aminy, fosfíny, ethery a halogenidovými ionty. Fluorid boritý se používá v petrochemickém průmyslu jako katalyzátor. Halogenidy reagují s vodou za vzniku kyseliny borité. Bor také tvoří řadu halogenidů s obecným vzorcem  $\text{B}_n\text{X}_n$ , které ve své struktuře mají uzavřené klastry atomů boru. Příkladem je chlorid boritý  $\text{B}_4\text{Cl}_4$ . Na rozdíl od běžných trihalogenidů jsou tyto zajímavé halogenidy mimořádně obtížně připravené<sup>6,7</sup>.

Sloučeniny boru s kovy – boridy – vykazují často velmi zajímavé vlastnosti. Jsou to tvrdé, žáruvzdorné, chemicky netečné látky s vysokými teplotami tání. Některé, zvláště boridy titanu a zirkonia, jsou mimořádně elektricky i tepelně vodivé<sup>6</sup>. Boridy (zde *de facto* diboridy)  $\text{TiB}_2$ ,  $\text{ZrB}_2$  a  $\text{CrB}_2$  v důsledku jejich inertnosti a vysokých teplot tání jsou velice vhodné materiály na zhotovení vysokoteplotních reakčních nádob a raketových trysek, lopatek turbín a vnitřních povrchů spalovacích komor<sup>5,6,11</sup>. Také jsou používány jako materiály pro neutronové štíty a kontrolní tyče v jaderných reaktorech<sup>6,14</sup>. Diborid hořčíku ( $\text{MgB}_2$ ) patří mezi velmi perspektivní vysokoteplotní supravodiče<sup>4,6,25,26</sup>. Tato vlastnost vyplývá z jeho vnitřní struktury. Atomy boru, z nichž každý má formální náboj  $-1$ , jsou uspořádány do rovinných trigonálních vrstev s delokalizovanými elektrony, které se podobají hexagonálním vrstvám uhlíku v grafitu. Mezi vrstvami borových atomů jsou vloženy ionty hořčíku (obr. 6). V organizaci





Obr. 6. Schematická struktura diboridu hořečnatého  $\text{MgB}_2$ . Trigonálně propojené atomy boru vytvářejí rovinné vrstvy (B) podobné hexagonálním vrstvám atomů uhlíku v grafitu. Mezi vrstvami jsou volně pohyblivé ionty hořčíku (A). Upravený motiv z cit.<sup>6</sup>

CERN byly testovány supravodivé kabely z diboridu hořečnatého<sup>6</sup> schopné přenášet proud až 20 000 A pro provoz velkého hadronového urychlovače LHC (z angl. large hadron collider).

Mezi sloučeniny boru s kovy lze zařadit i materiál neodymových magnetů o složení  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ . Tyto magnety patří mezi nejsilnější typy permanentních magnetů<sup>6</sup>. Používají se v různých elektromechanických a elektronických zařízeních, jako jsou lékařské zobrazovací přístroje pracující s magnetickou rezonancí, v počítačových pevných discích a v CD a DVD přehrávačích. V mobilních telefonech poskytují magnety „neo“ magnetické pole, které umožňuje i malým reproduktorům dodávat dostatečný zvukový výkon<sup>6</sup>.

Několik sloučenin boru je známých svou extrémní tvrdostí a houževnatostí. Karbid boru ( $\text{B}_4\text{C}$ ) je keramický materiál, který se získává reakcí  $\text{B}_2\text{O}_3$  s uhlíkem v elektrické peci<sup>6</sup>. Poměr uhlíku a boru v karbidu boru je nižší, než by odpovídalo stechiometrii, protože struktura karbidu boru není jednotná. Kombinace polymerních a semikrystalických motivů způsobuje velkou strukturální pevnost materiálu při jeho malé hmotnosti, čehož se využívá například v neprůstřelných vestách a v pancéřování tanků a letadel<sup>6</sup>.

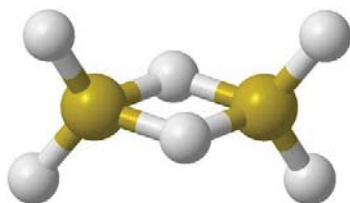
Nitrid boritý (BN) je sloučenina, která je isoelektronická s uhlíkem. Proto podobně jako uhlík může vytvářet jak hexagonální strukturu (kterou má měkký grafitový h-BN), tak kubickou kostru (obsaženou v tvrdém diamantovém c-BN) (cit.<sup>6</sup>). Modifikace h-BN se používá jako vysokoteplotní mazivo, alotrop c-BN, známý pod obchodním názvem borazon, je vynikající brusivo. Jeho tvrdost je jen o málo menší než u diamantu, ale jeho chemická stabilita je lepší<sup>6</sup>. V současné době jsou k dispozici technologické procesy pro pokrytí kovových povrchů tímto nitridem a kovoobráběcí nástroje s tímto povlakem jsou výrazně dlouhodobě odolnější<sup>11</sup>.

I jiné boridy kovů se používají pro potahování povrchů nástrojů chemickou nebo fyzikální depozicí z plynné fáze. Ke stejnému účelu se úspěšně používá také lase-

rové legování. Upravené povrchy mají podobné vlastnosti jako u objemových boridů a upravené nástroje jsou alternativou k nástrojům s diamantovým povlakem<sup>5,6</sup>.

#### 4.2. Borany, hydroborace, borohydridy

Borany<sup>27</sup> jsou sloučeniny boru s vodíkem. Tyto sloučeniny se v přírodě nevyskytují. Molekula nejnižšího boranu ( $\text{BH}_3$ ) se při vzniku stabilizuje zdvojením na diboran ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ). Diboran se připravuje s vysokým výtěžkem reakcí jodu s tetrahydridoboritanem sodným v diglymu nebo reakcí pevného tetrahydridoboritanu sodného s bezvodou kyselinou fosforečnou<sup>7</sup>. Jedním z důvodů velkého zájmu o borany je skutečnost, že mají strukturu odlišnou od jakékoli jiné třídy sloučenin. Struktura boranů obsahuje multicentrické vazby, při kterých tři nebo více atomů sdílí pár vazebných elektronů<sup>27</sup>. Borany jsou proto elektrondeficitními sloučeninami. Struktura diboranu je příkladem třícentrové (též trojstředové) dvouelektronové vazby, neboť systém tří atomů B–H–B je vzájemně poután prostřednictvím pouze jednoho páru elektronů<sup>6,27,28</sup> (viz obr. 7). Diboran je výchozí látka pro většinu vyšších boranů. Složení jejich molekul lze vyjádřit obecnými vzorci  $\text{B}_n\text{H}_{n+4}$  a  $\text{B}_n\text{H}_{n+6}$ . Borany s menší relativní molekulovou hmotností jsou plynné (diboran má bod varu  $-92,5\text{ }^\circ\text{C}$ , cit.<sup>5,11,28</sup>) nebo kapalné látky, vyšší borany (počínaje dekaboranem) jsou většinou pevné látky. Borany jsou velmi reaktivní, některé se na vzduchu samovolně vzněcují. Hořením se uvolňuje značné množství tepla (borany mají vyšší spalná tepla než uhlovodíky). Například triethylboran se používá jako zapalovač paliva proudových motorů Pratt & Whitney J58 pohánějících letouny Lockheed SR-71 Blackbird. Byl také používán k zážehu motorů F-1 na raketě Saturn V a i dnes slouží ke stejnému účelu u motorů rakety Falcon 9 společnosti SpaceX (cit.<sup>6</sup>). Na rozdíl od prostého řetězení atomů C v uhlovodících jsou atomy boru ve složitějších boranech umístěny v rozích mnohostěnů. Vznikají tak borové klastry nejrůznějších tvarů. Pro jejich popis se podle IUPAC používají charakteristické strukturální předpo-



Obr. 7. **Prostorové znázornění molekuly diboranu  $B_2H_6$**  (v modelu jsou atomy boru okrové a vodíkové atomy bílé)

ny *closo-*, *nido-*, *arachno-*, *hypho-* a *klado-*, které jsou odvozené od řeckých slov charakterizujících tvar borových klastrů<sup>7,27</sup>.

Existuje široká řada dialkylboranů, které se často používají v organické syntéze při hydroboračních reakcích (viz dále), například dimesitylboran, pinakolboran, katecholboran a 9-borabicyklo[3.3.1]nonan (9-BBN)<sup>27</sup>.

Borany byly poprvé systematicky syntetizovány a charakterizovány v období před druhou světovou válkou německým chemikem Alfredem Stockem<sup>27</sup>. Jeho zásluhou byly vyvinuty pracovní metody a konstruována zařízení pro práci ve vysokém vakuu, které byly nezbytné vzhledem k toxicitě hydridů boru a jejich citlivosti na vzduch a vlhkost. William Nunn Lipscomb jr. obdržel v roce 1976 Nobelovu cenu za chemii za své studie o struktuře boranů a problémech chemické vazby. Následně jeden ze Schlesingerových studentů, Herbert Charles Brown, získal s Georgem Wittigem v roce 1979 Nobelovu cenu za objev hydroborační reakce a za výzkum v oblasti stereospecifické organické syntézy<sup>27</sup>.

Hydroborace<sup>29</sup> je skupina organických reakcí spočívajících v adici vazeb vodík–bor na dvojnou vazbu  $C=C$ ,  $C=N$  a  $C=O$  nebo na trojnou vazbu  $C\equiv C$ . Hydroborační reakce mají široké využití v organické syntéze. Hydroborace obvykle probíhají proti Markovnikovovu pravidlu, u alkenů se vodík aduje na nejvíce substituovaný uhlík dvojnou vazby. Obrácená regiochemie oproti běžné adici  $HX$  souvisí s polaritou vazeb  $B^{\delta+}-H^{\delta-}$ . Hydroborace probíhají přes čtyřčlenné přechodné stavy – atomy vodíku a boru se vážou na stejnou stranu dvojnou vazby. Hydroborace jsou stereospecifické. Hydroboracemi vznikají organoborany, které mohou reagovat s dalšími látkami (peroxidem vodíku, chloraminem, halogeny) za vzniku užitečných produktů, jako jsou alkoholy, aminy a halogenalkany. Tento postup je ceněn proto, že z koncových alkenů poskytuje deriváty s funkční skupinou na koncovém C atomu. V případě alkylbromidů a alkyljodidů se ale stalo oblíbenější použití sukcinimidových reaktantů.

Tetrahydridoboritany<sup>30</sup>, často nazývané jako komplexní borohydridy, jsou soli tetrahydridoboritanového (borohydridového) aniontu  $[BH_4]^-$ . Obecně je možno jejich složení vyjádřit vzorcem  $[BH_{4-n}X_n]^-$ , kde n je celé číslo od 0 do 3. X může být například kyanoskupina, pak jde o kyanoborohydridy (kyanotrihydridoboritany) s ionty  $[BH_3(CN)]^-$ . Borohydridový anion obsahuje atom boru v tetraedrickém uspořádání. Reaktivita vazeb B–H závisí na přítomných ligandech. Kyanidové ionty v kyanoboro-

hydridech reaktivitu oslabují a jedná se tak o slabší redukční činidla<sup>30</sup>.

Hermann I. Schlesinger a Herbert C. Brown připravili v roce 1940 borohydrid lithný ( $LiBH_4$ ) z hydridu lithného a diboranu. I v současnosti se borohydridy připravují reakcemi diboranu s hydridy kovů ve vhodném rozpouštědle<sup>30</sup>.

Tetrahydridoboritany mají využití v průmyslové anorganické chemii. V největším množství, kolem 5000 tun ročně, se vyrábí borohydrid sodný. Jeho hlavním využitím je redukce oxidu siřičitého na dithioničitan sodný<sup>30</sup>. Tetrahydridoboritany se často používají v organické syntéze k redukcím organických sloučenin. K nejdůležitějším hydridoboritanovým činidlům patří tetrahydridoboritan lithný ( $LiBH_4$ ) a sodný ( $NaBH_4$ ).  $LiBH_4$  je silnějším redukčním činidlem.  $NaBH_4$  selektivně redukuje aldehydy, ketony, anhydridy a chloridy karboxylových kyselin na alkoholy, ale neredukuje estery, nitrily a nitroskupiny<sup>5,6,11</sup>.

#### 4.3. Karboranové kyseliny

Zajímavou skupinou látek odvozených od boranů jsou karboranové kyseliny<sup>31</sup> obecného vzorce  $H(CXB_{11}Y_5Z_6)$ , kde X, Y, Z mohou být vodík, alkyl, halogen nebo skupina  $CF_3$ .

Karboranová kyselina  $H(CHB_{11}Cl_{11})$  byla poprvé popsána v roce 2004. Mateřská molekula, ze které je kyselina karboranová odvozena, je ikosaedrický karboranátový aniont  $HCB_{11}H_{11}^-$ , který byl poprvé syntetizován ve společnosti DuPont v roce 1967. Výzkum vlastností této struktury byl zabrzděn jeho praktickou nedostupností až do poloviny 80. let 20. století. V té době česká skupina vědců zabývajících se borem (Bohumil Štíbr, Stanislav Heřmánek a Jaromír Plešek) zdokonalila proces halogenace karboranového klastru tak, aby došlo k jeho úplné chloraci. Od roku 2010 existují podrobné postupy pro syntézu karboranových kyselin a jejich derivátů. Syntéza karboranových kyselin ale i nyní zůstává zdoluhavá a obtížná<sup>32</sup>.

Kyselina karboranová se skládá z 11 atomů boru. Každý atom boru váže atom chloru. Borový klastr se skládá z 11 atomů boru, 11 atomů chloru a jednoho atomu uhlíku, na který je vázán atom vodíku. Ačkoli se struktura kyseliny karboranové značně liší od konvenčních kyselin, i zde souvisí distribuce náboje a stabilita aniontu podobným způsobem. Karboranátový anion delokalizuje svůj náboj do všech 12 atomů klece. Rentgenová difrakční studie monokrystalu prokázala zkrácení vazebných délek v klastru, což naznačuje tuto elektronovou delokalizaci<sup>32</sup>.

Karboranové kyseliny na bázi boru byly navrženy jako katalyzátory pro krakování uhlovodíků a isomerizaci lineárních alkanů za vzniku rozvětvených isoalkanů. Karboranové kyseliny mohou být také použity jako silné Brønstedovy kyseliny pro jemnou chemickou syntézu, kde může být výhodná nízká nukleofilita protianiontu. V anorganické syntéze může jejich bezkonkurenční kyselost umožnit izolaci exotických struktur, jako jsou například soli protonovaného xenonu<sup>31</sup>.

Karboranové kyseliny patří do třídy superkyselin, z nichž některé jsou odhadovány jako o šest řádů silnější než 100% čistá kyselina sírová. Kyselost karboranových kyselin výrazně převyšuje kyselost kyseliny trifluorsírové, dříve považované za nejsilnější izolovatelnou kyselinu<sup>31,33</sup>. Karboranové kyseliny se liší od klasických superkyselin tím, že jsou dobře definovanými jednosložkovými látkami. Naproti tomu klasické superkyseliny jsou často směsí dvou složek, nejčastěji v molárním poměru 1:1 (např. HF/SbF<sub>5</sub>, „magic acid“ FSO<sub>3</sub>H/SbF<sub>5</sub>, cit.<sup>33</sup>). Navzdory tomu, že jsou nejsilnějšími kyselinami, jsou karboranové kyseliny popisovány jako „jemné“, čistě protonující slabě zásadité látky bez dalších vedlejších reakcí<sup>34</sup>. Zatímco konvenční superkyseliny rozkládají i fullereny díky své silné oxidující Lewisově kyselé složce, karboranová kyselina má schopnost protonovat fullereny při pokojové teplotě za vzniku izolovatelné soli<sup>31</sup>.

## 5. Závěr

I přes velice nízké zastoupení boru v zemské kůře si lidé dokázali tento prvek spojit se svým životem velice rozmanitým způsobem – od očních kapek až po zážeh raketových motorů. Přitom je zřejmé, že využití boru se bude ještě dále rozvíjet v mnoha směrech materiálové chemie, v lékařství i v oblasti teoretické i syntetické chemie. Perspektivní je vývoj a využití boridových nanomateriálů<sup>35</sup>. A na bor čeká i další perspektivní uplatnění. Počítá se s ním v pozdějších generacích fúzních reaktorů, kde bude využívána tzv. bezneutronová fúze<sup>5,36–38</sup>. Při ní má hlavní roli jádro <sup>11</sup>B, které se ostřelováním protony rozštěpí za uvolnění značné energie na tři heliová jádra. Skutečnost, že touto jadernou reakcí vznikají pouze elektricky nabitě částice udržitelné magnetickým polem uvnitř reaktoru, umožní zjednodušení konstrukce fúzního reaktoru. Ale i přes tuto výhodu si na výstavbu takových zařízení budeme muset ještě dlouho počkat.

## LITERATURA

- Holý P.: Chem. Listy 112, 142 (2018).
- Holý P.: Chem. Listy 115, 413 (2021).
- Holý P.: Chem. Listy 113, 249 (2019).
- <https://www.rsc.org/periodic-table/element/5/boron>, staženo 26. 7. 2024.
- [https://cs.wikipedia.org/wiki/Bor\\_\(prvek\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Bor_(prvek)), staženo 26. 7. 2024.
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Boron>, staženo 26. 7. 2024.
- <https://www.britannica.com/science/boron-chemical-element>, staženo 26. 7. 2024.
- Gay-Lussac J. L., Thenard L. J.: *Annales de Chimie* 68, 169 (1808).
- Davy H.: *Philos. Trans. R. Soc. London* 99, 39 (1809). Staženo z <https://royalsocietypublishing.org/>, 4. 7. 2024.
- Weintraub E.: *Trans. Am. Electrochem. Soc.* 16, 165 (1910).
- <http://www.prvky.com/5.html>, staženo 26. 7. 2024.
- Gasda P. J. a 16 spoluautorů: *Geophys. Res. Lett.* 44, 8739 (2017).
- <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/vyziva-a-stimulace/hnojeni/vyznam-boru-ve-vyzive-rostlin>, staženo 26. 7. 2024.
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Control\\_rod](https://en.wikipedia.org/wiki/Control_rod), staženo 26. 7. 2024.
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron\\_capture\\_therapy\\_of\\_cancer](https://en.wikipedia.org/wiki/Neutron_capture_therapy_of_cancer), staženo 26. 7. 2024.
- Luo T., Huang W., Chu F., Zhu T., Feng B., Huang S., Hou J., Zhu L., Zhu S., Zeng W.: *Mol. Pharmaceutics* 20, 4942 (2023).
- Aida M., Fujii Y., Okamoto M.: *Sep. Sci. Technol.* 21, 643 (1986).
- Vyskočil V., Daňhel A., Fischer J., Novotný V., Deýlová D., Musilová-Karaová J., Maixnerová L., Pecková K., Barek J.: *Chem. Listy* 104, 1181 (2010).
- Baluchová S., Daňhel A., Dejmková H., Ostatná V., Fojta M., Schwarzová-Pecková K.: *Anal. Chim. Acta* 1077, 30 (2019).
- Scorei R.: *Orig. Life Evol. Biosph.* 42, 3 (2012).
- Franco A., da Silva J. A. L.: *Angew. Chem. Int. Ed.* 60, 10458 (2021).
- <https://ods.od.nih.gov/factsheets/Boron-HealthProfessional/>, staženo 26. 7. 2024.
- <https://www.lenntech.com/periodic/elements/b.htm>, staženo 26. 7. 2024.
- Dembitsky V. M., Al Aziz Al Quntar A., Srebnik M.: *Chem. Rev.* 111, 209 (2011).
- Jones M. E., Marsh R. E.: *J. Am. Chem. Soc.* 76, 1434 (1954).
- Nagamatsu J., Nakagawa N., Muranaka T., Zenitani Y., Akimitsu J.: *Nature* 410, 63 (2001).
- <https://www.britannica.com/science/borane>, staženo 26. 7. 2024.
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Diborane>, staženo 1. 8. 2024.
- <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hydroborace>, staženo 26. 7. 2024.
- <https://en.wikipedia.org/wiki/Borohydride?oldid=1109381254>, staženo 26. 7. 2024.
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Carborane\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Carborane_acid), staženo 26. 7. 2024.
- Chan A. L., Fajardo J. Jr., Wright J. H., Asay M., Lavallo V.: *Inorg. Chem.* 52, 12308 (2013).
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Magic\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Magic_acid), staženo 26. 7. 2024.
- Reed C. A.: *Chem. Commun.* 2005, 1669.
- Hong J., Mutalik S., Pescarmona P. P., Protesescu L.: *Chem. Mater.* 36, 2147 (2024).
- Entler S., Ficker O., Havlíček J., Horáček J., Hron M., Mlynář J., Pánek R., Řípa M., Stöckel J., Varju J., Weinzettl V.: *Budoucnost energetiky: jaderná fúze*.

Středisko společných činností AV ČR, v.v.i., Praha 2019.

37. <https://www.avcr.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/Jaderna-fuze-bez-neutronu-nabizi-i-jednodussi-technologie/>, staženo 1. 8. 2024.
38. <https://oenergetice.cz/jaderna-elektrarny/fuze-protonu-s-borem-11-v-magneticky-udrzovanem-plazmatu>, staženo 1. 8. 2024.

**P. Holý** (*Czech Chemical Society, Chemické Listy, Prague, Czech Republic*): **The Fifth Position in the Periodic Table Belongs to Boron**

Despite the very low proportion of boron in the Earth's crust, boron and its compounds have found wide application in practical life and in scientific research. The article presents the importance of this element for plants and for humans. It enumerates the properties of boron and its compounds for the technical use in the preparation of glass, glass fibres, highly resistant and hard materials for industrial applications and for nuclear technology. It also mentions the use of boron compounds in medicine and synthetic chemistry.

**Keywords:** boron history, boron properties, boron minerals, boron resistant materials, boron in medical use, boron materials for nuclear power plants, borohydrides, hydroboration, carboranoic acids



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.

## SARVA ROGA NIVARINI, DAR BOHŮ

MICHAL JURÁŠEK a PAVEL DRAŠAR

Ústav chemie přírodních látek, Vysoká škola chemicko-technologická, Technická 5, 166 28 Praha 6, Česká republika  
drasarp@vscht.cz

Došlo 25.7.24, přijato 43.8.24

Článek popisuje strom azadirachtu indickou, zvaný neem, a výrobky z něj. Tyto výrobky se používají v tradiční medicíně, jako agrochemikálie, zdroj biologicky aktivních látek, ale i jako součást potravy. Článek popisuje hlavní chemické složky, jmenovitě azadirachtin.

Klíčová slova: neem, *Azadirachta indica*, přírodní biologicky aktivní látky



Obr. 1. *Azadirachta indická*<sup>1</sup>

V Indii a okolních jihovýchodních asijských zemích se má za to, že strom zvaný dnes „neem“ ni:m, ( नीम, někdy též nim, nimba, margosa, česky azadirachta indická, patří do rodu *Azadirachta*; řazení do příbuzného rodu *Zederach* (*Melia*) je chybné, oba rody patří však do stejné podčeledi *Melioidae*). Strom zřejmě přišel původně z Myanmaru (Barmy) jako dar bohů, neboť je známo, že když byla amrita (elixír nesmrtnosti) přenášena do nebes, pár jejich kapek padlo na neem. Védy znají tuto drogu jako „*sarva roga nivarini*“, což znamená „ten, který léčí všechny nemoci“. Název neem je odvozen ze sanskrtského „*nimbati svasthyamdadati*“, znamenající „dávat dobré zdraví“. Je proto nazýván též „vesnickou lékárnou“ nebo „božským stromem“. Článek mexických autorů přináší rozsáhlý přehled přípravků z neemu a obsahových látek, ale i jejich popsané biologické vlastnosti<sup>2</sup>.

V tradiční orientální medicíně je používán již přes 4500 let. Jeho latinský název je *Azadirachta indica* A. Juss. a pochází z perštiny „*āzād-darakht-e-hindi*“, což značí svobodný strom z Indie<sup>3</sup>. Popis léčebných účinků lze nalézt již v počátcích novodobé lékařské literatury<sup>4</sup>; zajímavé je, že citovaný anglický článek používá termín „nim“.

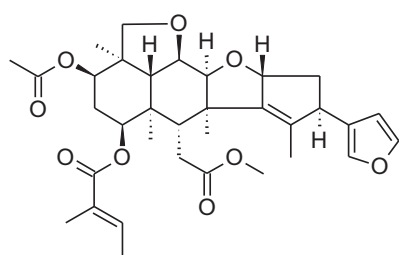
V zemích, kde je uctíván, roste velký, stále zelený a bíle kvetoucí strom neem, dřevem podobný mahagonu, obvykle uprostřed každé vesnice a poskytuje stín a chlad, spolu se spirituální inspirací pod svými větvemi až do té míry, že pod ním přebývala řada významných mudrců, jako například známý shri Sai Baba<sup>5</sup>.

Po poranění kůry vytéká z kmene pryskyřičný výpotek obsahující mnoho proteinů a je používán jako lepidlo. Kůra obsahuje hojně tříslovin a trvanlivé barvivo. Dřevo je tradičně používáno jako palivo v domácnostech a vyrábí se z něj výhřevné dřevěné uhlí. Listy a mladé větvičky se v období sucha používají jako krmivo domácích zvířat. Tenké větvičky se od pradávna žvýkají, což nahrazuje čištění zubů kartáčkem, a navíc posiluje zdraví ústní dutiny a imunitu. Usušené listy odpuzují různý hmyz, vkládají se například do knih nebo mezi uskladněné látky. Plody se konzumují čerstvé nebo vařené, případně se z nich připravuje dezert nebo limonáda. Rozkvetlé květy jsou složkou různých salátů, z mladých výhonků se vaří v Indii polévka. Ze semen se v průmyslovém měřítku lisuje olej, který je nevhodný ke konzumaci, ale slouží pro výrobu mýdla, kosmetiky, pro léčitelské úkony, dále jako palivo do lamp či vařičů nebo mazivo jednoduchých strojů. Jeho obvyklá produkce je okolo 50 % z váhy semen a v roce 2024 činila cena oleje jednotky dolarů za kilogram.

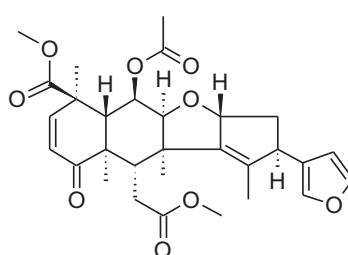
Celá rostlina, nejvíce však semena, a tudíž i olej s vůní připomínající česnek, obsahuje desítky triterpenů (limonoidů), kde jako příklad strukturních typů lze uvést salannin, nimbin, meliantriol, azadiradion, gedunin, nimbolid a hlavně azadirachtin, které mají insekticidní, fungicidní, baktericidní, protipožerové, antimalarické, antioxidační i protinádorové účinky. Rostlina obsahuje i další biologicky aktivní sloučeniny jako flavonoidy, katechiny, saponiny aj.

V lidovém léčitelství se olej, známý pod názvem nimbový, užívá proti vnějším mykózám, středním parazitům i jako uklidňující sedativum. Při déletrvajícím užívání ale škodí játrům a ledvinám<sup>6</sup>.

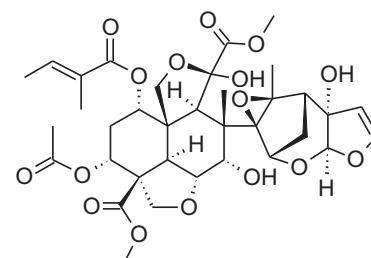
Insekticidní aktivita výrobků z neemu, pokrutin (výlisků) po získávání oleje (neem cake) a samotného nimbového oleje je využívána v zemědělství, ovocnářství



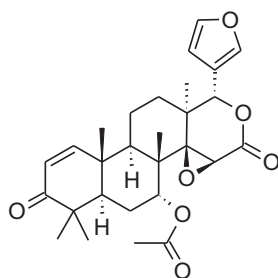
salannin



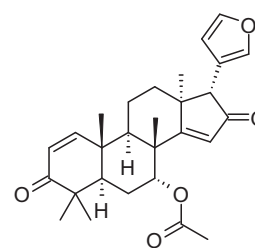
nimbin



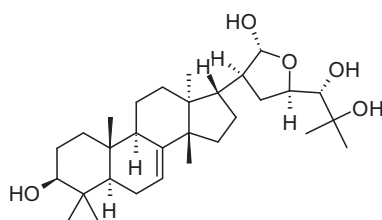
azadirachtin



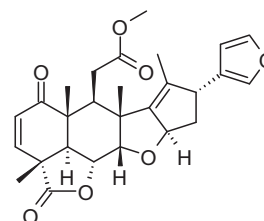
gedunin



azadiradion



meliantriol



nimboldin

a při produkci rýže, bavlny, vinné révy apod.<sup>7</sup> Takovým široce užívaným insekticidním prostředkem je např. NeemAzal (Trifolio-M GmbH, Lahnau), obsahující čištěnou aktivní složku semenných jader neemu. Aktivní látka (azadirachtin) proniká do listů a je distribuován částečně systémově v rostlině. Do organismu škůdce se dostává sáním nebo požerem. NeemAzal nemá okamžitý toxický účinek (tzv. „knock down“); během několika hodin po aplikaci prostředku dojde k inaktivaci široké škály volně žijícího sajícího, žvýkajícího či listy požírajícího hmyzu, jako jsou např. mandelinka, mšice, molice a třásněnky. Hmyz přestane s převážně požerovou aktivitou, a tím postupně omezí činnosti poškozující rostliny. Procesy vývoje a svlékání jsou navíc inhibovány, což vede k úmrtnosti jedince po několika dnech. U dospělých organismů je navíc výrazně snížena plodnost.

Pokud vezmeme jako příklad použití NeemAzal (v prostředku je deklarováno 1 % azadirachtinu) proti mandelince u brambor, tak 2,5 g azadirachtinu je aplikováno na 1 ha, což je 0,25 mg na m<sup>2</sup>. Tato dávka přírodní látky v zemědělství, či pěstitelství je srovnatelná např. s brassinolidy<sup>8</sup>. Lze snít o agrochemickém

prostředku, kde „téměř homeopatické“ dávky absolutně přírodních a pro člověka bezpečných sloučenin ochrání zemědělskou plodinu před škůdci i stresem. Vedle NeemAzalu je v Registru přípravků na ochranu rostlin povoleno v ČR použití ještě několika prostředků obsahujících azadirachtin a dvou prostředků obsahujících nimbový olej. Na straně druhé Vyhláška č. 58/2018 Sb. o doplňcích stravy a složení potravin azadirachtu indického řadí mezi látky zakázané při výrobě potravin.

Samotné neemové pokrutiny jsou vhodnou přísadou do kompostů a půd, protože kromě organické hmoty a obsahu živinových komponent (hlavně NPK) stále vykazují insekticidní a baktericidní aktivitu, a navíc působí při pěstování rostlin velmi pozitivně zadržováním vlhkosti a dusíkatých sloučenin<sup>9</sup>. Článek ghanských autorů přináší obsáhlý přehled rostlin a škůdců, kde bylo popsáno užitečné použití výrobků z neemu<sup>10</sup>.

Neem je, jak již bylo řečeno, zajímavý i z lékařského hlediska. Preklinické studie prokázaly, že neem může být potenciální preventivní a terapeutické činidlo proti různým typům rakoviny. Protirakovinné účinky neemového extraktu jsou spojeny s modulací hlavních

charakteristických jevů v nádorových buňkách včetně inhibice nadměrné proliferace, indukce buněčné smrti, potlačení angiogeneze, obnovení buněčné redoxní rovnováhy a posílení imunitní odpovědi proti nádorovým buňkám, ale i ke zvýšení účinnosti jiných chemoterapeutických činidel nebo jako adjuvans v imunoterapii a radioterapii, s minimálními nebo žádnými vedlejšími účinky během terapie<sup>11</sup>. Dosavadní studie ukazují, že mezi nejatraktivnější přínosy neemů patří protirakovinné, antidiabetické, fungicidní, baktericidní a protizánětlivé vlastnosti v něm obsažených sloučenin. Zastavení ROS (antioxidační aktivity) je měřítkem prevence a zprostředkování potenciální exacerbace metabolických onemocnění<sup>2</sup>. Zajímavá je aktivita kontrareceptivní, a to zřejmě u obou pohlaví<sup>12,13</sup>.

Pro svoje zejména baktericidní aktivity se výrobky z neemů uplatní velmi často i v kosmetice a péči o tělo a vlasy.

Jako přírodní zdroj má neem výhody snadné dostupnosti, nízké ceny a bezpečnosti pro člověka, což společně činí sloučeniny získané z neemů cennými kandidáty pro další zkoumání jak biologických, tak i agronomických a insekticidních vlastností. I zde je třeba upozornit na nejrůznější kulišáky, kteří slibují prostředky zaručeně „bez chemikálií“ a 100% standardizované, aniž uvedou, na kterou složku byl standard přírodního produktu vztažen. Inu, kšeft je kšeft. Je nutno dále poznamenat, že informace o neemů ať již na webu, tak i v „odborné“ literatuře jsou velmi různorodého typu. Některé před publikováním zřejmě nečetl ani sám autor.

Přinášíme i tento příspěvek jako další příspěvek do série učebních textů popisujících již delší dobu různé zajímavé aspekty chemie přírodních látek<sup>14–16</sup> i proto, že chceme takto reagovat na množství smyšlenek, polopravd a nesmyslů, které jsou kolem přírodních sloučenin dnes šířeny. Je nabíledni, že zkoumání přírodních látek, jakožto látek z obnovitelných zdrojů, je jednou z cest jak laciným a efektivním způsobem přispět ku všeobecnému prospěchu<sup>17,18</sup>.

## LITERATURA

1. <https://www.herbalreality.com/herb/neem/>, staženo 30. 4. 2024.
2. Islas J. F., Acosta E., Buentello Z. G., Delgado-Gallegos J. L., Moreno-Treviño M. G., Escalante B., Moreno-Cuevas J. E.: *J. Funct. Foods* **74**, 104171 (2020).
3. Singh K. K., Phogat S., Tomar A., Dhillon R. S.: *Neem a Treatise*. I. K. Intl Publishing House Pvt. Ltd., New Delhi 2008.
4. Ganguli M. N.: *Ind. Med. Gaz.* **16**, 333 (1881).
5. Guru Vani: *Teachings of Revered Dr. C. B. Satpathy – Teachings of Shri Sai Baba*; <https://guruvani.us/index.php/2015/10/14/significance-of-the-neem-tree/>, staženo 19. 9. 2023.
6. [https://cs.wikipedia.org/wiki/Azadirachta\\_indica](https://cs.wikipedia.org/wiki/Azadirachta_indica), staženo 30. 4. 2024.
7. <https://www.trifolio-m.de/en/about-us/>, staženo 2. 5. 2024.
8. Jurášek M., Drašar P.: *Chem. Listy* **116**, 223 (2022).
9. Schmutterer H. (Ed.): *The Neem Tree: Source of Unique Natural Products for Integrated Pest Management, Medicine, Industry and Other Purposes, 2nd Edition*. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 2002.
10. Adusei S., Azupio S.: *J. Chem.* **2022**, 6778554.
11. Hao F., Kumar S., Yadav N., Chandra D.: *Biochim. Biophys. Acta* **1846**, 247 (2014).
12. Talwar G. P., Upadhyay S. N., Dhawan S.: *US5501855* (1996).
13. Asif M.: *J. Pharmacogn. Phytochem.* **1**, 61 (2013).
14. Jurášek M., Stárka L., Drašar P.: *Chem. Listy* **116**, 115 (2022).
15. Jurášek M., Drašar P.: *Chem. Listy* **117**, 278 (2023).
16. Lapčík O., Čopíková J., Uher M., Moravcová J., Drašar P.: *Chem. Listy* **101**, 44 (2007).
17. Jurášek M., Cabalka J., Drašar P.: *Chem. Listy* **117**, 547 (2023).
18. Jurášek M., Drašar P.: *Chem. Listy* **116**, 519 (2022).

**M. Jurášek and P. Drašar** (Department of Chemistry of Natural Compounds, University of Chemistry and Technology, Prague, Czech Republic): **Sarva Roga Nivarini, Gift of the Gods**

The article deals with the *Azadirachta indica* tree, called neem, which, as well as its products, is used in traditional medicine, agrochemicals, as a source of biologically active substances, but also as part of food. It describes the main chemical components, namely azadirachtin.

Full text English translation is available in the on-line version.

Keywords: neem, *Azadirachta indica*, natural biologically active substances



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.

## ROZVOJ KRITICKÉHO MYŠLENÍ VE VÝUCE CHEMIE

VLASTIMIL HORÁLEK<sup>a</sup> a PETR DISTLER<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Katedra učitelství a didaktiky chemie, Přírodovědecká fakulta UK, Albertov 6, 128 00 Praha 2, <sup>b</sup> Katedra jaderné chemie, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT, Břehová 7, 115 19 Praha 1, Česká republika  
petr.distler@natur.cuni.cz

Došlo 27.6.24, přijato 15.8.24.

Kritické myšlení představuje důležitou a českými kurikulárními dokumenty akcentovanou součást vzdělávání, jejíž důležitost je nyní diskutována i v souvislosti s rozvojem umělé inteligence. Ve výuce (nejen) chemie lze kritické myšlení cíleně rozvíjet vhodnými aktivitami. V článku jsou proto představeny tři komplexní učební úlohy do výuky chemie na středních školách, které mají potenciál rozvíjet kritické myšlení: Geneticky modifikované plodiny (úloha založená na problémovém učení a analýze zdrojů informací), Jaderná energetika a nakládání s vyhořelým jaderným palivem (úloha zaměřená na kritické čtení textu, argumentaci a práci s umělou inteligencí) a Reakční kinetika (badatelsky orientovaná laboratorní práce posílená o prvky interpretování grafů a dat a zdůvodňování). Budovat kritické myšlení v oboru chemie je podstatné pro pochopení abstraktních konceptů a osvojení dovedností, díky nimž žáci zodpovědně a informovaně přistupují k chemickým tématům v každodenním životě.

Klíčová slova: kritické myšlení, výuka chemie, aktivizační metody, argumentace

### 1. Úvod

Klíčovou dovedností 21. století, která je mnohými výzkumníky označována nejen jako jeden z faktorů úspěšného učení, ale také jako pilíř demokratické společnosti, je kritické myšlení<sup>1–3</sup>. Kritické myšlení patří mezi aktuální témata – zejména s ohledem na velkou dostupnost informací, mezi nimiž se může nacházet i zavádějící obsah (dezinformace, hoaxy, fake news apod). S prudkým rozvojem umělé inteligence, jejíž výstupy ne vždy odpovídají skutečnosti, je tento apel ještě zřetelnější.

Kritickému myšlení se člověk může naučit a postupně zdokonalovat. Např. učitel může vhodnými metodami a za dodržení několika zásad rozvíjet kritické myšlení u svých žáků. Cílem článku je představit možnosti rozvíjení kritického myšlení ve výuce (nejen) chemie a představené metody a zásady ilustrovat na třech konkrétních učebních úlohách (badatelsky orientovaná laboratorní práce, kritické čtení textu a skupinová práce se zdroji informací).

### 2. Vymezení termínu kritického myšlení a jeho význam ve výuce

Ačkoliv patří kritické myšlení k často skloňovaným pojmům nejen v kontextu vzdělávání, mezi odborníky neexistuje konsenzus, co přesně znamená nebo co všechno zahrnuje<sup>1,4–6</sup>. Pokusy o definování kritického myšlení kom-

plicuje zejména skutečnost, že různé obory (zejména filozofie a kognitivní psychologie, v menší míře pedagogika) přistupují ke konceptu kritického myšlení odlišným způsobem<sup>7</sup>.

Literatura uvádí shodu v tom, že kritické myšlení představuje širokou škálu dovedností nebo postojů, přičemž mezi nejvýznamnější patří kognitivní operace vyšší náročnosti (např. syntéza, analýza, evaluace), argumentace, kladení otázek nebo řešení problémů<sup>1,6</sup>. Mezi nejpodstatnější postoje patří tendence ověřovat informace, pracovat s věrohodnými zdroji, vnímavost vůči různým názorům nebo způsobům argumentace nebo motivace používat dovednosti spojené s kritickým myšlením a zdokonalovat se v nich. Zásadním prvkem kritického myšlení je i zaměření se na sebe (tj. sebereflexe, metakognice neboli myšlení o vlastním myšlení, hodnocení vlastních argumentů)<sup>1,6</sup>.

Kritické myšlení kladně ovlivňuje studijní úspěch žáků a studentů, pomáhá jim efektivněji řešit problémy a podle výzkumníků je klíčové pro rozvoj v jakémkoliv vědním oboru<sup>2,8</sup>. Rozvoj kritického myšlení pomáhá žákům lépe pochopit přírodní vědy, rozvinout vědecký způsob myšlení nebo schopnost řešit problémy spojené s přírodními vědami, v rámci chemie je podstatné pro pochopení abstraktních konceptů a vyhodnocování chemických jevů v každodenním životě<sup>7–10</sup>. Pozitivní vliv má také na rozvoj sociálních dovedností žáků a na jejich aktivní zapojení do demokratické společnosti. Pomáhá jim



informovaně posuzovat společenská témata, adaptovat se na rychle se měnící svět a dokázat v něm plnohodnotně fungovat<sup>3,4</sup>.

Není proto překvapující, že vlády některých států (Česká republika, USA, Velká Británie, Finsko, Kanada aj.) vyvíjejí již několik let snahu, aby se rozvoj kritického myšlení stal pevnou součástí jejich kurikula<sup>11</sup>.

### 3. Zásady, metody a překážky rozvoje kritického myšlení ve výuce

Obecná zásada při rozvoji kritického myšlení ve školní výuce je dominantní aktivita žáků, učitel vystupuje spíše v roli průvodce<sup>2</sup>. Vhodné jsou konstruktivistické metody, při nichž žáci samostatně přicházejí na skutečnosti a sami budují své poznání<sup>6</sup>. Zároveň je nutné kritické myšlení neustále kultivovat a opakovaně začleňovat vhodné aktivity, které ho rozvíjejí<sup>12</sup>. Učitel by měl z rozvoje kritického myšlení vytvořit samostatný cíl a explicitně o něm komunikovat s žáky. Neefektivněji je kritické myšlení rozvíjeno právě tehdy, když jsou cíl i instrukce explicitní (např. vyučující spolu s tématem hodiny uvede, že náplní bude i procvičování argumentace, v průběhu začlení aktivitu na tvorbu nebo rozbor argumentů a následně s žáky rozebírá jednotlivé aspekty týkající se argumentace)<sup>5,6,13</sup>. Kritické myšlení lze rozvíjet prací s textem, která je zaměřena na kladení vhodných otázek (kdo je autorem a příjemcem, jaký je účel textu, případně zda se v textu objevují argumenty nebo formulace přesvědčující čtenáře)<sup>14</sup>. Další vhodnou metodou je badatelsky orientovaná výuka, při níž žáci stanovují hypotézy, plánují svou práci a následně interpretují a reflektují výsledky<sup>5</sup>. Rozvoj kritického myšlení může podpořit také problémové vyučování, kdy žáci nacházejí řešení problému, který je obvykle mezioborový, pochází z běžného života a neexistuje jediná správná odpověď<sup>9</sup>.

Existuje řada popsanych příčin, které brání efektivnímu rozvíjení kritického myšlení. Mezi nejběžnější patří předávání izolovaných poznatků a chybějící propojování znalostí v rámci předmětu i mezi předměty (což je pro rozvoj kritického myšlení klíčové zejména z toho důvodu, že při posuzování různých situací z běžného života je nutné zapojit pohled více oborů). Další významnou překážkou je ze strany učitele příliš dominantní role ve výuce (případně role „vševědoucího“ učitele, který předává pouze hotové poznatky), tlak na výkon nebo známky (na úkor rozvoje dovedností spojených s kritickým myšlením). Kritickým bodem může být i nedostatek informací, které žáci o tématu mají. Pokud mají žáci argumentovat, diskutovat nebo se jakkoliv více angažovat v tématu, musejí mít o něm znalosti, jinak je velmi omezen rozvoj kritického myšlení. V neposlední řadě může rozvoji bránit nedostatek učebních aktivit zaměřených na cílený rozvoj kritického myšlení a nedostatek procvičování, neboť dovednosti spojené s kritickým myšlením je nutné opakovaně trénovat<sup>2,3,7,9</sup>.

### 4. Kritické myšlení v kontextu českého prostředí a vzdělávání

Důležitost kritického myšlení je reflektována i v českých kurikulárních dokumentech, konkrétně v Rámcovém vzdělávacím programu pro gymnázia je kritické myšlení zmíněno přímo i nepřímo na několika místech. Explicitní zmínky je možné nalézt v klíčových kompetencích, například:

- „(Žák) kriticky interpretuje získané poznatky a zjištění a ověřuje je, pro své tvrzení nachází argumenty a důkazy, formuluje a obhajuje podložené závěry“<sup>15</sup>;
- „(Žák) uplatňuje při řešení problémů vhodné metody a dříve získané vědomosti a dovednosti, kromě analytického a kritického myšlení využívá i myšlení tvořivé s použitím představivosti a intuice“<sup>15</sup>.

Další významné zmínky obsahuje i samotná vzdělávací oblast *Člověk a příroda*, jejíž je chemie součástí. V popisu vzdělávací oblasti je kladen důraz na důležitost diskuse a argumentace, vědecké metody a vlastní bádání nebo řešení přírodovědných problémů. Ve všech těchto případech je možné nalézt průnik s kritickým myšlením.

### 5. Učební úlohy rozvíjející kritické myšlení v chemii

Na základě široké literární rešerše zahraničních odborných zdrojů o kritickém myšlení a jeho cíleného rozvíjení ve výuce byly vytvořeny a pilotovány tři komplexní učební úlohy včetně metodiky pro učitele<sup>16</sup>, které jsou pro vyučující i odbornou veřejnost dostupné na odkazu <https://bitly.cx/IS6>. Aby měly vytvořené učební úlohy potenciál rozvíjet kritické myšlení, byly v nich použity prvky, které byly výše zmíněnými publikacemi podloženy jako efektivní pro rozvoj kritického myšlení (podrobnější popis u každé úlohy dále v textu). Úroveň kritického myšlení žáků před a po pilotáži představených úloh nebyla testována, protože začlenění takovýchto úloh do výuky představuje dlouhodobý proces, jehož výsledky se projevují až po delší době systematické práce.

Jako příklad si podrobněji uvedeme učební úlohu s názvem *Geneticky modifikované plodiny*, která představuje skupinovou práci se zdroji a problémovou úlohu současně. Úvodem je evokace, kde si žáci ve dvojicích řeknou, co o tématu již vědí. Poté si shrnou své poznatky s učitelem. Následuje aktivita, kdy žáci pracují se dvěma videi, jedno má informační charakter, druhé je reportáží ve stylu pro a proti. Pracovní list k této části obsahuje 14 tvrzení z obou videí, některá z nich obsahují nepravdivou informaci (ukázka je na obr. 1). Žáci před zhlédnutím videí označují do prvního sloupce tvrzení jako pravdivá, nebo nepravdivá, aniž by měli všechny potřebné informace. Následuje zhlédnutí obou videí, během něhož si žáci zaznamenávají do druhého sloupce pravdivost podle informací z videa. Rovněž si mohou vybrat počet tvrzení pro posuzování – tento prvek diferenciací dává žákům mož-

#	tvrzení	před videem	po videu
první video (Nezkreslená věda)			
1	Nositelkou dědičnosti u organismů je RNA, která je složena z genů.	pravda / nepravda	pravda / nepravda
2	Už první úpravy do dědičné informace byly cílené.	pravda / nepravda	pravda / nepravda
3	Transgenose je úprava dědičné informace, kdy přenášíme cizorodé geny z jednoho organismu do druhého.	pravda / nepravda	pravda / nepravda
4	Do rostlinných genů lze vkládat jen geny rostlin, např. není možné do nich vložit geny bakterií.	pravda / nepravda	pravda / nepravda
5	Nejběžnějším druhem geneticky modifikované rostliny je pšenice.	pravda / nepravda	pravda / nepravda

Obr. 1. Ukázka práce s videem

nost volby a bere ohled na úroveň jejich motivace a aktuálního psychického rozpoložení a dalších potřeb. Po zhlédnutí videa žáci chybná tvrzení opraví a aktivita je učitelem vyhodnocena hromadně. Aktivita rozvíjí kritické myšlení tím, že žáky podněcuje k přemýšlení o tématu ještě před zhlédnutím videí, vede je k uvědomění, co už vědí nebo co se potřebují dozvědět. Proces uvědomování, co žák ví, nebo neví (evokace), a následná reflexe totiž hrají velkou roli v cíleném rozvíjení kritického myšlení<sup>9</sup>.

Následuje skupinová práce koncipovaná jako skládkové učení (žáci pracují v tzv. expertních skupinách podle různých odborností, poté ve smíšených). První je práce v expertních skupinách. V jejím rámci mají skupinky žáků zodpovědět na základě práce se zdroji informací a vzájemné diskuse otázku, zda by měla fiktivní Chemická republika souhlasit s pěstováním geneticky modifikovaných plodin. Žáci nahlízejí na řešení této otázky z pohledu různých odborností (biolog, agrochemik, odborník na pesticidy, ekonom), každá skupinka vyplňuje posudek shrnující postup zjišťování informací i argumenty (obr. 2). Samotná práce na posudku začíná evokací, která vede žáky k uvědomění si toho, co o tématu už vědí. Před zjišťováním informací formulují i skutečnosti, které budou muset zjistit k zodpovězení výzkumné otázky, a také se vyjadřují, které zdroje a proč využijí k získání informací. Poté pracují nejen na hlavní výzkumné otázce, ale mají za úkol si vybrat tři další související podtémata. Minimálně jedno si volí z nabídky (např. u agrochemika *znečištění a eutrofizace vod, výhody a nevýhody hnojení, druhy hnojiv*). Práce v expertních skupinách je zakončena vyvozením tří konkrétních závěrů, s nimiž žáci přicházejí do smíšené skupiny.

Ve smíšených skupinách sdílejí žáci závěry z expertních skupin a výstupem je společné rozhodnutí o (ne)pěstování geneticky modifikovaných plodin. Rozhodnutí musí být podloženo třemi hlavními klady a třemi hlavními riziky, jichž si je smíšená skupina vědoma. Tento výběr vede žáky ke sdílení zjištění jednotlivých odborností, ke komunikaci i argumentaci s cílem vybrat nejdůležitější body a shodnout se na závěrečném stanovisku. Každá

smíšená skupina následně prezentuje svůj závěr před celou třídou a uvádí argumenty, které ji k tomu vedly.

Tato část učební úlohy má potenciál rozvíjet kritické myšlení, neboť stejně jako v případě videí vede žáka k uvědomění si, co ví a co bude muset zjistit. Kromě toho se týká práce se zdroji informací a argumentace, kdy žáci musí zdůvodnit volbu svých zdrojů, dále je jejich úkolem formulace závěru (rozhodnutí), který podpoří argumenty. Podstatným faktorem je i forma úlohy, a sice skupinová práce, kdy žáci společně řeší problém, musí si obhájit před ostatními své stanovisko nebo poslouchat a posuzovat argumenty spolužáků, než se dohodnou na společném závěru.

Učební úloha je koncipována na dvě vyučovací hodiny a vzhledem ke komplexnosti témat je vhodné zařadit ji do posledního ročníku, kdy je vyučována chemie. Žáci by měli mít znalosti z anorganické chemie (hnojiva), organické chemie (pesticidy) a biochemie (nukleové kyseliny, molekulární základy genetiky), vhodné jsou i znalosti z biologie (ekologie, botanika) nebo společenských věd (ekonomie). Úlohu je možné modifikovat množstvím samostatné práce (např. zda budou výzkumné otázky formulovány předem, nebo je žáci budou vymýšlet), případně úpravou rolí (v menším počtu žáků je možné některé role sloučit – např. agrochemika a odborníka na pesticidy, v opačném případě lze přidat další role – např. překladatel cizojazyčných zdrojů).

Druhá učební úloha je zaměřená na téma *Jaderná energetika a nakládání s vyhořelým jaderným palivem*. Podobně jako předchozí úloha pracuje s aktuálním tématem, které je pro část populace kontroverzní. V jejím úvodu žáci vyplňují SWOT analýzu týkající se jaderné energetiky, která slouží jako přemostění k následnému kritickému čtení, které se týká nakládání s vyhořelým jaderným odpadem, jakožto hlavní nevýhodou jaderné energetiky. Během SWOT analýzy žáci píší své nápady k těmto kategoriím: S (Strengths, silné stránky), W (Weaknesses, slabé stránky), O (Opportunities, příležitosti) a T (Threats, hrozby).

**Zápis ze setkání expertní skupiny číslo ...**

Tento zápis je interním dokumentem *Mezioborové skupiny pro implementaci geneticky modifikovaných rostlin do zemědělství*, která byla zřízena z iniciativy Úřadu vlády Chemické republiky.

**Odbornost:** agrochemie

**Výzkumná otázka:** *Sníží se spotřeba hnojiv, pokud Chemická republika začne pěstovat geneticky modifikované rostliny?*

**Posudek zpracovali:**

**Podrobný záznam ze setkání**

Co o tématu už víme (před studiem dalších podkladů):
Co budeme muset zjistit, abychom odpověděli na výzkumnou otázku?
Které zdroje (a proč) využijeme pro doplnění těchto informací?
Zaměřte se alespoň na <b>3 různá témata</b> v rámci vašeho bádání. Minimálně jedno si vyberte z nabídky níže: <b>znečištění a eutrofizace vod</b> <b>výhody a nevýhody hnojení</b> <b>druhy hnojiv</b>
Formulujte <b>3 hlavní závěry</b> vaší výzkumné skupiny a podpořte je argumenty:
<b>Za správnost posudku ručí (podpisy):</b>

Obr. 2. Ukázka výstupu expertní skupiny agrochemie (vynechány volné řádky, běžný formát A4)

V rámci kritického čtení žáci posoudí dva protichůdné texty pojednávající o nakládání s vyhořelým jaderným palivem – první pochází z webové stránky Nechceme úložiště.cz, druhý text je přepis rozhovoru o přepracování vyhořelého jaderného paliva, který se vysílal v Českém rozhlase. Žáci oba texty analyzují z různých hledisek (obr. 3, autor, jeho vztah k tématu, pravděpodobný účel textu a jeho cílová skupina, shodné a rozdílné znaky obou

článků) a následně mají za úkol reagovat na modelové argumenty v pracovním listě. Učební úloha vede žáky k zodpovídání otázek nejen na obsah textu, ale na otázky vypsané výše – v souladu se zjištěním výzkumů podporuje taková analýza kritické myšlení, protože učí žáky číst na první pohled skryté informace (např. záměr článku nebo obsažené argumenty)<sup>14</sup>. Součástí úlohy je i práce s umělou inteligencí (*ChatGPT*), u které se žáci během práce

**Jak a co se píše o jaderném palivu?**

V dnešním světě jsme zaplaveni informacemi z různých zdrojů, a proto se naučíme v této hodině:

- Pečlivě analyzovat zdroj, kde je informace uvedena.
- V textu hledat argumenty.
- Na základě dostupných informací formulovat vlastní stanovisko

**O čem, pro koho a od koho je text?**

1) Zapište jednu hlavní myšlenku obou textů.

text 1

text 2

2) Pro koho je text patrně určen? Svou odpověď zdůvodněte.

text 1

text 2

Obr. 3. Ukázka úvodu pracovního listu o přepracování vyhořelého jaderného paliva

s textem střídají. Práce s umělou inteligencí žákům nabízí možnost konzultovat nejasné informace z obou textů, případně získat tipy týkající se analýzy textů nebo argumentace. V rámci učební úlohy si žáci procvičují i argumentaci (rozeznat ji v textu a samostatně argumentovat), což je klíčové pro rozvoj kritického myšlení.

Učební úloha je koncipována na 1,5 vyučovací hodiny. Aby byla realizace úlohy efektivní, žák by měl mít znalosti o tématech radioaktivita, ionizující záření a jeho účinky, případně o f-prvcích. Úlohu je možné modifikovat přidáním dalších textů (např. názorové příspěvky, odborné práce, popularizační články), které žáci mohou analyzovat podle návodu v pracovním listu. Vzhledem k aktuálnosti tématu pro Českou republiku v souvislosti s dostavbou jaderných bloků je vhodné na tuto skutečnost upozornit např. v úvodu a reflexi učební úlohy.

Třetí učební úlohou je badatelsky pojatá úvodní úloha do tématu rychlost chemických reakcí s názvem *Reakční kinetika*. Skládá se ze dvou částí – první část slouží jako evokace a teoretická příprava, žáci zde pracují na teoretických otázkách a interpretují grafy. Žáci nemají k popisu grafů všechny dostupné informace a musejí argumentovat, proč je popsali určitým způsobem, případně mají interpretovat vyobrazené závislosti. To podněcuje rozvoj kritického myšlení – žáci mají jen část informací a jejich úkolem je zbylé informace odvodit, domyslet a napsat, proč si to myslí.

V praktické části úlohy mají žáci za úkol ověřit na reakci zředěné kyseliny chlorovodíkové a zinku stanovenou hypotézu, která se týká rychlosti chemické reakce mezi zinkem a kyselinou chlorovodíkovou. Součástí jsou otázky na metodiku práce (co bude pro žáky ukazatelem rychlosti chemické reakce), žáci zde argumentují, proč si vybrali konkrétní způsob práce, v závěru vyhodnocují a reflektují práci vzhledem ke znění hypotézy. V souvislosti s rozvíjením kritického myšlení je klíčová skutečnost, že si žáci plánují práci sami, jejich úkolem je i určit si, co a proč pro ně bude indikátorem rychlosti chemické reakce. Úloha je také vede k tomu, aby reflektovali svou práci a aby z ní vzešlo poučení do příště (např. co by příště udělali jinak, kde a proč mohly vzniknout chyby v měření). Veškeré toto uvažování nad způsobem práce, jejím rozplánováním a reflexí má potenciál rozvíjet kritické myšlení.

Učební úloha je koncipována na 1,5 vyučovací hodiny a vzhledem k jejímu charakteru úvodní motivační aktivity může sloužit jako první úloha v rámci tohoto tématu. Úlohu lze modifikovat přidáním dalších běžně dostupných kovů, případně využít kusový a práškový vápenec nebo jedlou sodu.

## 6. Pilotáž vytvořených úloh ve výuce na gymnáziu

Vytvořené učební úlohy byly ověřeny ve výuce chemie na osmiletém Gymnáziu Altis, fakultní škole Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Pro pilotáž byly zvo-

leny třídy, v nichž žáci měli daná témata již probraná (v souladu se zásadou mít znalosti o tématu pro efektivnější rozvoj kritického myšlení). Po realizaci úloh žáci prostřednictvím dotazníků poskytli zpětnou vazbu s ohledem na srozumitelnost zadání, obtížnost a přínos úlohy (zda se domnívají, že je úloha naučila nové znalosti nebo schopnosti). Na základě nich byly úlohy a metodiky pro učitele upraveny do finální podoby. Pilotáže se vždy zúčastnili všichni přítomní žáci.

První učební úloha s názvem *Geneticky modifikované plodiny* byla ověřena ve výuce 7.A na konci školního roku (tedy v době, kdy žáci měli poslední rok povinné výuky chemie). Ověření úlohy se zúčastnilo 13 žáků této třídy. Obtížnost úlohy byla většinou žáků (9 žáků) hodnocena jako optimální, 3 žáci hodnotili úlohu jako spíše obtížnou, pouze jeden žák ji vnímal jako spíše jednoduchou. Zadání a srozumitelnost instrukcí byly vnímány 10 žáky jako spíše srozumitelné, dva žáci vybrali možnost srozumitelné a jeden žák možnost spíše nesrozumitelné. S tvrzením, že učební úloha žáka něco nového naučila, souhlasili všichni (9 žáků vybralo možnost ano, zbylí 4 žáci možnost spíše ano). Žáci na úloze nejvíce ocenili úvodní motivační videa a způsob práce s nimi, začlenění skupinové práce (někteří oceňovali i střídání skupin) a diskuse, pohled na problematiku z více oborů a interaktivní formu aktivity. Dále jako přínos vnímali, že byli vedeni k argumentaci nebo obhajobě vlastního stanoviska, čímž si mohli tuto dovednost procvičit.

Pilotáže druhé úlohy (*Jaderná energetika a nakládání s vyhořelým jaderným palivem*) se účastnilo 15 žáků ze třídy 6.A v polovině školního roku (žáci již měli probrány téma stavby atomu, radioaktivity a f-prvků). Obtížnost úlohy vnímali 4 žáci jako spíše obtížnou, 10 žáků ji označilo jako optimální a 1 žák jako spíše jednoduchou. Úloha se jevila jako srozumitelná většině žáků (11 žáků) a zbylým 4 žákům jako spíše srozumitelná. S tvrzením, zda učební úloha žáka něco nového naučila, souhlasilo 11 žáků, zbylí žáci zvolili možnost spíše souhlasím. Žáci na úloze nejvíce oceňovali texty (jejich volbu, čtivost a srozumitelnost), možnost porovnat dva opačné názory a na základě nich si vytvořit vlastní názor. Zmínku z pilotáže si zaslouží i úvodní SWOT analýza, v níž žáci uváděli vysokou efektivitu produkce energie a nízkou uhlíkovou zátěž jako silné stránky jaderné energetiky, zatímco např. riziko radiační havárie nebo vyhořelé jaderné palivo jako slabou stránku. Mezi příležitostmi uvedli např. snahu některých států snížit emise uhlíku, na druhou stranu vnímali negativní pohled určitých skupin na jadernou energetiku jako hrozbu pro její další pokračování.

Učební úloha s názvem *Reakční kinetika* byla ověřena ve výuce 5.A (žáci probírali faktory ovlivňující rychlost chemické reakce na nižším stupni gymnázia). Ověření úlohy se zúčastnilo 19 žáků, z nichž 10 žáků vnímalo úlohu jako spíše obtížnou a zbylí žáci ji označili za optimální. Poměrně velkou část žáků vnímajících úlohu jako spíše obtížnou lze vysvětlit tím, že tato učební úloha bezprostředně nenavazuje na probranou látku, ale je stavěna jako úvodní seznámení s novým tématem a předpokládá zna-

losti z předchozí výuky chemie. Srozumitelnost úlohy a dílčích úkolů označili 2 žáci jako srozumitelnou, valná část třídy (14 žáků) za spíše srozumitelnou a zbylí 3 žáci za spíše nesrozumitelnou. S tvrzením, že učební úloha žáka něco nového naučila, souhlasilo 15 žáků (5 žáků vybralo možnost ano, 10 žáků možnost spíše ano), 4 žáci zvolili možnost spíše ne. Je vhodné poznamenat, že kromě faktografických znalostí (reakce kyseliny chlorovodíkové s kovy, vliv reakčních podmínek na rychlost reakce atp.) žáci uváděli, že se naučili např. pracovat s časem, popisovat grafy nebo lépe si rozdělovat práci ve skupině.

## 7. Závěr

Kritické myšlení patří mezi zásadní dovednosti současné doby a má své nezastupitelné místo ve školní výuce. Pro rozvoj kritického myšlení je vhodné používat metody zaměřené na činnost žáků, vést žáky k argumentaci či kladení otázek a začleňovat vhodné aktivity (např. kritické čtení textu, problémové učení, badatelsky orientovanou výuku). Důležitost kritického myšlení ilustruje skutečnost, že je na několika místech explicitně zmíněno v českých kurikulárních dokumentech. Byly představeny tři vytvořené a ověřené komplexní učební úlohy zaměřené dle platných doporučení z odborné literatury na cílený rozvoj kritického myšlení ve výuce chemie na středních školách (skupinovou práci se zdroji a problémovou úlohu současně, kritické čtení textu a badatelsky zaměřenou laboratorní práci). Učitelé mají k dispozici metodiku i všechny potřebné učební materiály (včetně řešení). Na tématu rozvoje kritického myšlení ve výuce chemie budou autoři dále navazovat další tvorbou učebních úloh a testováním vlivu jejich dlouhodobým zařazením do výuky.

## LITERATURA

1. Uribe-Enciso O., Uribe-Enciso D., Vargas-Daza M.: *Rastros Rostros* 19, 78 (2017).
2. Snyder L. G., Snyder M. J.: *Delta Pi Epsilon Journal* 5, 90 (2008).
3. Ku K. Y. L.: *Think. Skills Creativity* 4, 70 (2009).
4. Abrami P. C., Bernard R. M., Borokhovski E., Wade A., Surkes M. A., Tamim R., Zhang D.: *Rev. Educ. Res.* 78, 1102 (2008).
5. Bailin S.: *Sci. Educ.* 11, 361 (2002).
6. Lai E. R.: *Critical Thinking: A Literature Review Research Report*. Pearson's Research Reports, Londýn 2011.
7. Vieira R., Tenreiro-Vieira C., Martins I. P.: *Sci. Educ. Int.* 22, 43 (2011).

8. McCollister K., Sayler M. F.: *Gift. Child Today* 33, 41 (2010).
9. Forawi S. A.: *Think. Skills Creativity* 20, 52 (2016).
10. Demir S.: *J. Educ. Practice* 6, 157 (2015).
11. Vieira R. M., Tenreiro-Vieira C.: *Int. J. Sci. Math. Educ.* 14, 659 (2016).
12. The Foundation for Critical Thinking. *Defining Critical Thinking*. <https://www.criticalthinking.org/pages/defining-critical-thinking/766>, staženo 30. 5. 2024.
13. Hayes K. D., Devitt A. A.: *J. Food Sci. Educ.* 7, 65 (2008).
14. Oliveras B., Márquez C., Puig N.: *Int. J. Sci. Educ.* 35, 1 (2011).
15. MŠMT. RVP G. <https://tinyurl.com/yyz7fmdm>, staženo 30. 5. 2024.
16. Horálek V.: *Rozvoj kritického myšlení ve výuce chemie na středních školách. Diplomová práce*. Univerzita Karlova, Praha 2024.

V. Horálek<sup>a</sup> and P. Distler<sup>a,b</sup> (<sup>a</sup>Department of Teaching and Didactics of Chemistry, Faculty of Science, Charles University, Prague; <sup>b</sup>Department of Nuclear Chemistry, Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering, Czech Technical University, Prague, Czech Republic): **Development of Critical Thinking in Chemistry Teaching**

The critical thinking is an important part of education supported by the Czech curriculum documents, and its importance is now being discussed in the context of the development of artificial intelligence. In the teaching of (not only) chemistry, the critical thinking can be purposefully developed through appropriate activities. The article presents three comprehensive teaching tasks for chemistry education that have the potential to develop critical thinking: Genetically Modified Crops (a task using the problem-based learning and analysis of information sources), Nuclear Energy and Spent Nuclear Fuel Management (a task focused on critical reading of text, reasoning and working with artificial intelligence) and Reaction Kinetics (research-oriented laboratory work enhanced with elements of graph and data interpretation and reasoning). Building critical thinking skills in chemistry is essential for understanding abstract concepts and acquiring skills that enable students to approach chemistry topics responsibly and knowledgeably in everyday life.

Full text English translation is available in the on-line version.

Keywords: critical thinking, chemistry teaching, activation methods, argumentation



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.

## QUO VADIS, CHEMIE NA OSMILETÝCH GYMNÁZIÍCH?

LUKÁŠ WILHELM a PETR ŠMEJKAL

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

Došlo 5.8.24, přijato 26.8.24.

Tento článek přináší podrobnější vhled do rozsahu a obsahu výuky chemie na osmiletých gymnáziích. Jaký je nejčastější ročník, ve kterém se na osmiletých gymnáziích v ČR s výukou chemie začíná? S jakými tématy se žák po nástupu na gymnázium v chemii nejčastěji setkává? A dostává se chemii jako vyučovacímu předmětu na osmiletých gymnáziích více prostoru než na základních školách a čtyřletých gymnáziích? Na právě tyto otázky se snažíme v článku odpovědět. Ukazuje se, že ve srovnání se základními školami se s výukou chemie začíná na osmiletých gymnáziích dříve, a to až o dva roky. Celkový rozsah výuky chemie je tedy na většině osmiletých gymnázií výrazně vyšší než na základních školách a čtyřletých gymnáziích. Z hlediska výukových témat se však osmiletá gymnázia přidržují obvyklého pořadí, tedy začít s obecnou chemií a pokračovat s dalšími chemickými disciplínami. Zohlednění těchto zjištění by mohlo pedagogům po přečtení článku nabídnout zamyšlení nad koncepcí výuky chemie na osmiletých gymnáziích v budoucích letech.

Klíčová slova: výuka chemie, analýza obsahu učiva, analýza rozsahu učiva, osmiletá gymnázia

### 1. Úvod

Je tomu právě dvacet let, co spatřil světlo světa první Rámcový vzdělávací program pro základní vzdělávání (RVP ZV), tedy kurikulární dokument, který, kromě dalšího, měl odvést výhradní pozornost učitelů čistě od vzdělávacího obsahu jednotlivých předmětů a tendence k memorování faktů k tomu, aby zejména napomáhal k utváření a rozvoji tzv. klíčových kompetencí v jednotlivých vyučovacích předmětech základní školy a příslušných ročníků osmiletých gymnázií a dále stanovoval doporučený obsah učiva a v neposlední řadě vytyčoval základní vzdělávací cíle, kterých by měl žák v daném předmětu dosáhnout<sup>1</sup>. RVP ZV tedy žádal po učitelích, aby v jednotlivých předmětech u žáků nebyl kladen důraz pouze na naučení se daného učiva, memorování faktů a případnou aplikaci naučených vědomostí, ale také na současný rozvoj dalších schopností a dovedností, nově kompetencí, relevantních pro daný předmět a dané učivo. To mělo umožnit učitelům implementovat do své výuky modernější výukové metody a přístupy, v jejichž rámci by bylo rozvíjeno více kompetencí najednou, realizovat výuku více v relevantních souvislostech a umožnit hladší uplatnění žáků ZŠ a posléze SŠ v praxi. Nicméně, poměrně značný rozdíl v množství explicitně uvedeného učiva oproti do té doby existujícím osnovám<sup>2</sup> a jen rámcově uvedený rozsah témat, kdy časový rámec probíraných témat a pořadí, ve kterých by měla být jednotlivá učební témata ve školách probírána, RVP ZV explicitně neuváděl

(a neuvádí), způsobil jisté zmatení mezi učiteli, jak koncipovat výukový obsah pro své žáky. RVP ZV je totiž jen výchozím a závazným dokumentem, na jehož základě každá škola vytváří nový závazný dokument, tzv. Školní vzdělávací program (ŠVP), který může učivo, tedy témata a tematické celky, způsoby jejich výuky, tedy používané metody a formy, a rovněž pořadí jejich výuky, specifikovat jednoznačně, dle potřeb školy a jejich pedagogů. Takto specifikované učivo a způsoby a formy výuky jsou pak závazné a škola je musí dodržet. Toto přirozeně platí pro všechny předměty, tedy i pro chemii, která je v centru našeho zájmu v tomto článku. Z uvedeného ale vyplývá, že každá škola může připravit svůj vlastní a odlišný ŠVP, teoreticky tak může vzniknout takový počet odlišných ŠVP, který je roven počtu existujících základních škol. A vzhledem k pojetí RVP ZV může rovněž výuka chemie začínat v libovolném ročníku druhého stupně ZŠ a rovněž libovolným tématem a učivem rámcově zmíněným v RVP ZV. Realita samozřejmě není tak různorodá a výuka chemie na běžných ZŠ tak obvykle začíná v 8. ročníku ZŠ, a to některými partiiemi z obecné chemie. Zajímavostí v tomto ohledu může být české specifikum, kterými jsou víceletá, tedy osmiletá a šestiletá, gymnázia. Vzhledem k tomu, že se jedná o *de facto* elitní (výběrové) školy, s předpokládaným nadstavbovým učivem, bylo by možné předpokládat, že tato víceletá gymnázia budou mít vlastní rámcové vzdělávací programy s větším rozsahem učiva. Nicméně, pro tato gymnázia žádná zvláštní RVP neexistují a dle RVP ZV se neřídí pouze „klasické“ základní školy,

ale také nižší ročníky osmiletých gymnázií. Cílem tohoto článku je tak blíže zanalyzovat časový rozsah výuky chemie na osmiletých gymnáziích a porovnat ho jak napříč českými gymnázii, tak i nastínit rozdíl v rozsahu výuky chemie ve srovnání se základními školami a gymnázii čtyřletými v situaci, kdy žák po ZŠ pokračuje ve studiu na čtyřletém gymnáziu (tzn. rovněž ve výuce ve stupních ISCED 2 + ISCED 3, cit.<sup>3</sup>). Další částí tohoto článku pak bude i obsahová analýza témat výuky chemie osmiletého gymnázia, se kterými se žáci setkávají hned v prvním ročníku, ve kterém se chemie vyučuje (tedy na počátku výuky předmětu chemie).

## 2. Teoretická část

S výukou chemie se čeští žáci setkávají poprvé až ve druhé polovině povinné školní docházky. Buďto se setkají s chemií na základní škole, nebo na šestiletém či osmiletém gymnáziu<sup>2</sup>. V tomto článku se šestiletými gymnázii dále nebudeme zabývat. Nakonec jsou to právě osmiletá gymnázia, která stojí nejvíce na pomezí mezi základní a střední školou<sup>4</sup>. Čtyři roky se řídí Rámcovým vzdělávacím programem pro základní školy a čtyři roky Rámcovým vzdělávacím programem pro gymnázia<sup>5,6</sup>. Mezi přístupem k výuce chemie na základních školách a osmiletých gymnáziích by však mohl být značný rozdíl. Na základě výzkumu z roku 2014 je zjevné, že rodiče přihlašují své děti na osmiletá gymnázia především proto, aby měli hlubší znalosti v daných oborech, které by jim mohly pomoci dostat se na vytouženou vysokou školu<sup>7</sup>. I z šetření realizovaných mezi učiteli působícími na osmiletých gymnáziích vychází, že učivo chemie probírají více do hloubky než na základních školách, aby zvyšovali motivaci žáků a více rozvíjeli žákovský potenciál<sup>8</sup>.

Vzdělávací cíle a doporučený obsah učiva jsou však pro osmiletá gymnázia i základní školy identické. V rámci doporučeného obsahu učiva by si měl pak žák osvojit základy obecné, anorganické i organické chemie, seznámit se se základní laboratorní technikou a bezpečností práce při nakládání s chemickými látkami či zhodnotit využívání chemických látek ve vztahu k životnímu prostředí i společnosti<sup>5</sup>. Obsah výuky chemie je v RVP ZV členěn do sedmi tematických celků. Jedná se o *Pozorování, pokus a bezpečnost práce, Směsi, Částicové složení látek a chemické prvky, Chemické reakce, Anorganické sloučeniny, Organické sloučeniny a Chemii a společnost*. S ohledem na shodné vzdělávací cíle a doporučený obsah učiva je ovšem otázkou, zda výuka chemie skutečně dostává na osmiletých gymnáziích větší prostor, než je tomu na základních školách, a zda je skutečně výuka chemie realizována tak, aby žáci získávali hlubší znalosti v oboru, jak rodiče vyžadují<sup>6</sup>. S ohledem na to se tento článek zabývá porovnáním rozsahu a obsahu výuky chemie na osmiletých gymnáziích mezi sebou i mezi nimi a školami základními, s ambicí zjistit, v jakém ročníku se žáci nejčastěji s chemií setkávají poprvé a jakými tematickými celky většina škol s výukou chemie začíná. Tato snaha zaměřená

na zjištění začátku výuky chemie na osmiletých gymnáziích je motivována nejen skutečností, že dřívější začátek výuky chemie na ZŠ dává možnost k probrání většího rozsahu více témat či hlubšímu probrání jednoho tématu, ale také skutečností, že chemie nabízí i řadu abstraktních témat, zejména z obecné chemie, např. témata zaměřená na atom či chemické názvosloví. Tato abstraktní témata je ale vhodné do výuky chemie implementovat až ve věku, kdy z pohledu vývojové psychologie dle J. Piageta přešla většina žáků třídy ze stádia konkrétních myšlenkových operací do stádia formálních myšlenkových operací, tedy většina žáků je schopna plně uvažovat abstraktně<sup>9</sup>. K uvedenému přechodu ale dochází zhruba ve věku 11–13 let, což odpovídá nižším ročníkům víceletých gymnázií. Pokud by tedy výuka chemie byla zahájena v nižších ročnících osmiletého gymnázia a učivem by byla právě témata s mnoha abstraktními pojmy, bylo by žádoucí reorganizovat témata výuky tak, aby ta abstraktnější přišla na řadu až ve vyšších ročnících.

## 3. Metodika práce

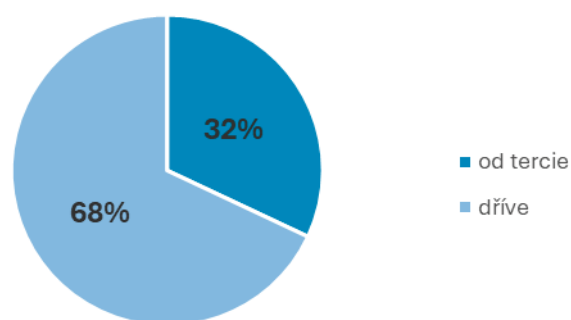
Pro porovnání obsahu a rozsahu výuky chemie v prvních ročnících osmiletých gymnázií a vybraných základních školách byla provedena analýza školních vzdělávacích programů (ŠVP) u vybraných gymnázií a základních škol, přičemž zkoumán byl počátek výuky předmětu chemie (tedy ve kterém ročníku je předmět chemie zařazen do výuky) a dále rozsah (počet vyučovacích hodin v ročníku a celkový počet hodin výuky chemie, včetně ročníku, kdy je výuka předmětu chemie ukončena) a obsah výuky chemie (učivo, výběr tematických celků). Zatímco počátek výuky předmětu chemie a rozsah jeho výuky v jednotlivých ročnících osmiletého gymnázia byl sledován u všech státních gymnázií uvedených v Rejstříku škol a školských zařízení<sup>10</sup> (210 gymnázií), výukový obsah v prvním ročníku (tedy na počátku) výuky předmětu byl sledován v ŠVP u 31 vybraných gymnázií. Výběr gymnázií, jejichž ŠVP byla z pohledu učiva analyzována, byl učiněn tak, že z každého kraje ČR byla pro obsahovou analýzu náhodně vybrána dvě osmiletá gymnázia, přičemž u tří krajů, jejichž celkový počet obyvatel přesahuje jeden milion, byla náhodně vybrána k analýze ŠVP gymnázia tři, celkem tak bylo analyzováno 31 ŠVP osmiletých gymnázií. Výsledky analýz byly následně porovnávány s obdobnou analýzou počátku výuky a rozsahu výuky u vybraných základních škol (ZŠ) a čtyřletých gymnázií, přičemž byl využit obdobný postup stratifikovaného výběru jako u osmiletých gymnázií.

## 4. Výsledky a diskuse

Z analýzy školních vzdělávacích programů vybraných základních škol vychází, že se s výukou chemie začíná ve všech případech v 8. ročníku povinné školní docházky, a to s časovou dotací 2 hodiny týdně. Předmět chemie

se pak opět u všech škol objevuje i v posledním, tedy devátém ročníku, ve většině základních škol s dvouhodinovou dotací, pouze u 11 % škol s časovou dotací jedna hodina za týden. Za obvyklý počátek výuky předmětu chemie lze tedy skutečně považovat osmou třídu základní školy. Pokud by žák po absolvování povinné školní docházky na základní škole přešel na čtyřleté gymnázium, navázal by tam u všech vybraných škol výukou chemie hned od prvního ročníku. Na zhruba 80 % čtyřletých gymnázií by byla výuka chemie ukončena již ve třetím ročníku, pouze u cca 20 % je chemie jako povinný vyučovací předmět začleněn i v posledním, čtvrtém ročníku. Chemie je nejčastěji dotována dvěma hodinami týdně. V posledním ročníku je nejčastěji výuka chemie již dobrovolná, na bázi volitelných seminářů. U žáků, kteří po ZŠ nastoupí studium na čtyřletém gymnáziu tak lze za celkovou obvyklou dobu výuky chemie pokládat dva roky na škole základní a další tři roky na gymnáziu, celkem tedy 5 let výuky chemie (tabulka I). Na základě analýzy školních vzdělávacích programů osmiletých gymnázií lze konstatovat, že u 68 % gymnázií se s výukou chemie začíná již buď v prvním (primě), nebo častěji ve druhém ročníku (sekundě). V primě je chemie součástí učebních plánů u tří osmiletých gymnázií s časovou dotací jedné hodiny týdně. Pouze u 32 % osmiletých gymnázií se žáci poprvé setkávají s chemií až v tercii, tedy třetím ročníku nižšího gymnázia (obr. 1), nejčastěji dvakrát týdně, u sedmi škol je výuka chemie rozšířena na tři hodiny za týden<sup>8</sup>. Jedno z gymnázií, kterého se výuka chemie již v prvním ročníku týká, je Gymnázium Frýdlant. Dle kurikulárních dokumentů této školy je chemie začleňována do výuky v primě s ohledem na značnou návaznost na další přírodovědné předměty a také s ohledem na potřebu delší doby studia,

která by měla žákům umožnit hlubší pochopení učiva<sup>11</sup>. Výuka předmětu chemie na osmiletých gymnáziích, stejně jako na gymnáziích čtyřletých, končí nejčastěji v předposledním, tedy sedmém ročníku. Pouze u dvou škol je výuka chemie naposledy součástí povinných předmětů v sextě a až do osmého ročníku gymnázia je chemie zařazena u 29 % škol<sup>8</sup> (obr. 2). Z uvedeného by se mohlo zdát, že chemie dostává na osmiletých gymnáziích, ve srovnání s výukou chemie na základních školách a posléze na čtyřletých gymnáziích, více prostoru. Situace je ale o něco komplikovanější a z daného pohledu je možné rozdělit analyzovaná osmiletá gymnázia do několika kategorií dle celkového počtu hodin výuky chemie, jak je patrné z tabulky I. Minimum gymnázií (2) nabízí svým žákům



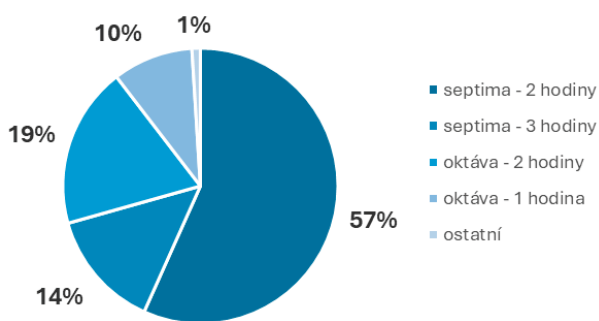
Obr. 1. Ročník začátku výuky chemie na osmiletých gymnáziích

Tabulka I

Srovnání rozsahu výuky chemie na osmiletých gymnáziích a kombinace ZŠ + čtyřleté gymnázium

Osmiletá gymnázia	Přibližný počet hodin výuky chemie celkem	Počet škol	Celkový průměrný počet hodin chemie	Začátek-konec výuky chemie	Počet let studia chemie
Skupina 1	přes 500	2	525	prima-oktáva	8
Skupina 2	cca 490	39	492	sekunda-oktáva	7
Skupina 3	cca 440	1	455	prima-septima	7
		100	442	sekunda-septima	6
Skupina 4	cca 400	18	434	tercie-oktáva	6
		48	395	tercie-septima	5
Skupina 5	méně než 320	2	315	tercie-sexta	4
Výuka chemie na ZŠ + čtyřleté gymnázium	Přibližný počet hodin výuky chemie celkem	% škol	Celkový průměrný počet hodin chemie	Začátek-konec výuky chemie	Počet let studia chemie
8. ročník ZŠ – 4. ročník G.	cca 400	cca 20	403	8. ročník ZŠ – 4. ročník gymnázia	6
8. ročník ZŠ – 3. ročník G.	cca 370	cca 80	368	8. ročník ZŠ – 3. ročník gymnázia	5





Obr. 2. Ročník ukončení a rozsah výuky předmětu chemie v ročníku ukončení na osmiletých gymnáziích

více než 500 hodin výuky chemie za celé studium, ale 39 (přibližně 19 %) gymnázií stále nabízí téměř 500 hodin výuky chemie. Více než polovina (cca 56 %) osmiletých gymnázií pak realizuje přibližně 440 hodin výuky chemie, což je stále asi o 70 hodin výuky chemie více, než je nejběžnějším scénářem v kombinaci výuky chemie na ZŠ a posléze na čtyřletém gymnáziu. Pouze 48 (tj. cca 23 %) osmiletých gymnázií věnuje výuce předmětu chemie přibližně 400 hodin ročně, což je ale stále asi o 30 hodin více než u kombinace ZŠ + čtyřleté gymnázium s výukou chemie do 3. ročníku a podobně jako kombinace ZŠ a čtyřleté gymnázium, kde se chemie vyučuje i ve 4. ročníku. Lze konstatovat, že se žákům na více než 160 osmiletých gymnáziích z 210 analyzovaných skutečně dostane výuky chemie ve větším rozsahu než na základních školách a čtyřletých gymnáziích, a to v některých případech i o více než 150 hodin a až 3 celé ročníky její výuky<sup>8</sup>. Co se rozsahu výuky chemie týče, lze v případě základních škol potvrdit, že se chemie na základních školách vyučuje obvykle v osmém a devátém ročníku<sup>2</sup>, přičemž na velké většině osmiletých gymnázií dochází k začleňování výuky chemie do kurikula oproti základním školám dříve, což vede k výrazně vyšší hodinové dotaci chemie ve srovnání se

školami základními a navazujícími čtyřletými gymnázií<sup>8</sup>. V daném kontextu je zajímavé si uvědomit, že učebnice jsou pro výuku chemie na ZŠ a osmiletých gymnáziích shodné, přičemž jsou obvykle určeny základním školám a zároveň odpovídajícím ročníkům osmiletých gymnázií. Tedy, ti žáci, kteří dostávají na osmiletých gymnáziích tyto učebnice do ruky, mohou být o rok až dva roky mladší než žáci, kteří využívají tutéž učebnici na základních školách. To ale může být problematické s ohledem na kognitivní schopnosti a vyspělost těchto žáků na osmiletých gymnáziích. Pojďme se tak nyní blíže podívat na obsahovou náplň ŠVP osmiletých gymnázií, která začínají s výukou chemie oproti ZŠ dříve. Bude nás zajímat, které tematické celky osmiletá gymnázia do svých kurikulárních dokumentů zařazují a jaké konkrétní učivo se pod těmito celky skrývá. Obsahová náplň ŠVP i názvy jednotlivých kapitol se do značné míry opakují, a proto je možné shrnout tyto tematické celky, vyučované na vybraných gymnáziích, do několika skupin prezentovaných v souhrnné tabulce II. V tabulce II je dále uveden počet osmiletých gymnázií, kde je dané téma vyučováno a rovněž pořadí, v němž je dané téma vyučováno. Tedy například téma *Vlastnosti látek, pozorování, pokus a bezpečnost práce* je vyučováno v 1. ročníku výuky chemie jako první v pořadí na 29 gymnáziích a jako druhé v pořadí na jednom gymnáziu. Tématem *Směsi* se pak začíná na jednom gymnáziu z 31 sledovaných, na 18 jde o druhé téma v pořadí a na devíti o třetí téma v pořadí. V předposledním sloupci, označeným symbolem hvězdičky (\*), je uvedeno, v kolika případech není daný tematický celek v prvním roce výuky chemie na daném osmiletém gymnáziu součástí kurikula. Poslední sloupec této tabulky pak vyjadřuje hodnotu modu. Z obsahové analýzy je patrné, že se na vybraných gymnáziích v prvním roce výuky předmětu chemie zařazují především témata z obecné chemie, minoritně jsou pak zastoupena témata z anorganické chemie. Prvním vyučovaným tematickým celkem jsou obvykle *Vlastnosti látek*. Tento celek se zabývá většinou fyzikálními vlastnostmi látek, jako jsou hustota, tvrdost, vodivost a skupenské změny. Jako druhý, či společně s tématem *Vlastnosti*

Tabulka II

Četnost výskytu a rámcové pořadí vyučovaných tematických celků v prvním ročníku na osmiletých gymnáziích

Tematický celek	Pořadí v ŠVP								Modus
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	*	
Vlastnosti látek, pozorování, pokus a bezpečnost práce	29	1						1	1
Směsi	1	18	9		1			2	2
Voda a vzduch	1	7	11	4	1	2		5	3
Částicové složení látek, chemické prvky		5	8	14	4				4
Chemické reakce			1	7	12	2	1	8	5
Anorganická chemie, kyseliny a hydroxidy			2	5	8	7	2	7	5

*látek*, je pak na většině škol vyučován tematický celek nesoucí název *Pozorování, pokus a bezpečnost práce*. Zde se mimo očekávané učivo související s praktickou činností v chemické laboratoři, včetně základů poskytnutí první pomoci, objevuje například i téma alchymie. Tento celek je málokdy ukotven do konkrétního časového rámce, ale žáci se s ním setkávají v průběhu celého roku. Tematický celek *Směsi* je velmi často spojován v ŠVP analyzovaných škol i s celkem *Voda a vzduch*. Celek je dále rozveden do učiva klasifikace směsí a jejich způsoby oddělování. Často se v něm objevují i chemické výpočty (hmotnostní zlomek či molární koncentrace). Následuje tematický celek *Částicové složení látek, chemické prvky*. Učivo se v kurikulárních dokumentech u toho tematického celku týká především struktury atomu, principem vzniku chemické vazby a jejími typy. Méně často se objevují pojmy jako jsou nuklid či izotop. Dalším tematickým celkem jsou *Chemické reakce*. Učivo zahrnuje především klasifikace chemických reakcí, faktory ovlivňující průběh chemických reakcí, zápisy chemické rovnice, zákon zachování hmotnosti či rychlost chemické reakce. Tematickým celkem vyučovaným obvykle na konci prvního ročníku výuky chemie jsou základy *Anorganické chemie, kyseliny a hydroxidy*, který obsahuje názvosloví dvouprvkových sloučenin, vlastní systematiku vybraných prvků a kyselost látek (včetně pojmu pH), se kterými se pojí část týkající se kyselin a zásad. Zdá se tedy, že i přes možnost variabilnějšího pojetí počátku výuky předmětu chemie, česká osmiletá gymnázia se přidržují spíše zažitého systému, kdy se začíná s chemií obecnou a anorganickou, na které navazují další oblasti chemie tak, jak jsou témata obvykle řazena i v případě nejvyužívanějších učebnic na základních školách a osmiletých gymnáziích. Takovými učebnicemi jsou dle Průchové<sup>12</sup> publikace autorů (Beneš & Pumpr, 1995)<sup>13</sup>, (Pánek & Škoda, 2006)<sup>14</sup>, (Mach & Plucková, 2015)<sup>15</sup> a v době výzkumu zatím neexistující, ale dnes často využívané učebnice Hravá chemie (Taktik)<sup>16</sup>. Jsou ale právě tato témata, zejména z obecné chemie, pro žáky vhodná a nemohla by u nich narážet na nepochopení kvůli vysoké míře abstrakce, např. u pojmů atom, chemická vazba, kyselost či fázový přechod?

## 5. Souvislost mezi učivem chemie a kognitivním vývojem žáků na osmiletých gymnáziích

Jak bylo zmíněno, žáci se na osmiletých gymnáziích setkávají často s chemií dříve než na základních školách, ale obsahová náplň hodin je, pokud nebudeme zohledňovat hloubku učiva, shodná s konceptem výuky chemie na ZŠ (tedy, že na začátku výuky chemie se žáci setkávají nejprve s obecnou chemií a následně s chemií anorganickou atd.). Ve výběru učiva je ale potřeba zohlednit i fakt, že mladší žáci nemusí být natolik kognitivně vyspělí, aby učivo tak náročné na abstraktní myšlení pochopili<sup>17</sup>. Kognice jako způsob myšlení, související s vývojem paměti, pozornosti či řeči se mění po celý život člověka<sup>18</sup>, nicméně v určitých etapách lidského života se mění velmi výraz-

ně<sup>19</sup>. Jednou z posledních razantních změn prochází děti mezi 11.–13. rokem věku, tedy právě tehdy, kdy přechází ze základních škol na osmiletá gymnázia. Toto období definoval jeden z nejuznávanějších kognitivních psychologů Jean Piaget jako přechod mezi stádiem konkrétních a stádiem formálních operací<sup>20</sup>. Období konkrétních operací je typické pro děti ve věku od sedmi do dvanácti let, z hlediska dětské ontogeneze lze tedy říci, že toto období je charakteristické pro žáky mladšího školního věku či prvního stupně základní školy. V tomto stádiu vývoje je dítě v uvažování připoutáno pouze ke konkrétní známé realitě. Tedy na předměty, které dítě zná, ať už jsou nebo nejsou v daný okamžik v dohledu. Dítě v tomto vývojovém stádiu je zároveň schopno provádět řadu myšlenkových operací, je například schopno brát v úvahu v jednu chvíli více různých hledisek, uvažovat reverzibilně a vnímat trvalost předmětů kolem sebe, tedy zohledňovat, že tatáž věc může vypadat za určitých okolností různě<sup>21</sup>. Spojením těchto tří klíčových schopností je žák schopen vnímat stálost množství<sup>19</sup>. V souvislosti s výukou chemie je tedy žák ve stádiu konkrétních operací schopen chápat a správně interpretovat procesy, které jsou smyslově ověřitelné. Typické je měření objemu a hmotnosti. Žák by byl dále schopen na základě empirického zážitku formulovat jednoduchá pravidla. Jako příklad lze uvést experiment, během kterého bychom zapálili několik dřevěných předmětů. Žák by měl být následně schopen zobecnit, že dřevo je hořlavé. Smyslově lze ověřovat i takové zdánlivě abstraktní pojmy, jako jsou kyselina nebo zásada. Tyto pojmy je ale nutné definovat jako látky, které barví pH papírek do červena, respektive do modra<sup>22</sup>. Stádium formálních operací je pak typické pro děti starší dvanácti let. Ta nejdůležitější charakteristika dítěte v tomto stádiu kognitivního vývoje je schopnost uvažovat abstraktně, tedy o předmětech, jevech a procesech, které jsou smyslově nepozorovatelné a uvažovat o nich i v rovině symbolické<sup>18</sup>. Mladí dospívající již v tomto věku uvažují originálně, experimentují s různorodými myšlenkami a málokdy se spokojí pouze s jedinou možností řešení<sup>23</sup>. Z pohledu výuky chemie v tomto stádiu je žák schopen uvažovat například i o stavbě atomu a chápat význam hustoty či reakčního tepla. Kyselina a zásada pak může být již definována jako látka, která odštěpuje, respektive přijímá proton. V praktické výuce pak lze od žáků vyžadovat i takové závěry, které nejsou přímo pozorovatelné<sup>22</sup>. Ačkoliv se v odborné veřejnosti objevují i názory uvádějící, že přechod do stádia formálních operací může nastat i dříve než kolem dvanáctého roku věku<sup>24,25</sup>, či že rychlost přechodu mezi těmito stádii závisí především na společenských stimulacích a vnějším prostředí<sup>26,27</sup>, panuje mezi kognitivními psychology shoda v tom, že nejčastějším věkem, kdy dítě začíná uvažovat abstraktně, je právě pomyslná hranice dvanácti let<sup>19</sup>, což je v případě českého školského systému právě v době přechodu na osmileté gymnázium. Nevnímejte ale tuto skutečnost jako záminku pro odstranění jakýchkoliv složitějších jevů a principů ve výuce chemie mladších žáků<sup>9</sup>. Dle dalšího významného a všeobecně uznávaného psychologa Lva Vygotského<sup>28</sup> dosahuje žák

blíží se přechodu mezi dvěma výše popsány obdobími dříve vyššího stupně kognice, pokud je vystavován složitějším myšlenkovým pochodům. Je tedy možné, že řada žáků bude schopna již při nástupu na osmileté gymnázium uvažovat i na abstraktní bázi, ale nezanedbatelná část žáků se bude stále nacházet ve stádiu konkrétních operací. Právě na tuto část třídy by ale bylo vhodné brát ohled a přizpůsobit výuku tak, aby tato skupina byla schopna učivo chápat a dosáhnout tak kýženého pocitu úspěchu. Zamysleme se spíše nad možností, zda by nebylo na místě potenciál většího rozsahu výuky chemie na osmiletých gymnáziích využít k větší motivaci žáků k jejímu studiu tím, že upravíme pořadí tematických celků v místních kurikulech tak, aby měli žáci možnost setkávat se na začátku výuky chemie spíše s konkrétnějšími tématy, než jsou právě struktura atomu, typy chemických reakcí či chemická vazba. Případně tím, že omezíme množství abstraktních pojmů v těchto tématech na nejnútnejší minimum a budeme se snažit přiblížit tato témata žákům co nejvíce konkrétně, a to i za tu cenu, že se dopustíme řady zjednodušení a možná drobných odborných chyb<sup>17</sup>.

## 6. Závěr

V rámci tohoto článku byly předloženy výsledky analýzy počátečních fází výuky chemie, rozsahu výuky a analýzy výukového obsahu primárně zaměřených na osmiletá gymnázia. Bylo při nich zjištěno, že výuka chemie skutečně obvykle začíná již v osmé třídě základní školy, ale v menším počtu případů je tomu tak v odpovídajícím ročníku osmiletého gymnázia, tedy v tercii. Ve většině případů (více než 65 %) osmiletá gymnázia zařazují výuku chemie již do prvního (primy) či častěji do druhého ročníku (sekunda), tedy o rok či dva dříve, než je tomu na základní škole. I celkový rozsah výuky chemie je v případě absolvování osmiletého gymnázia, ve srovnání s variantou ukončení povinné školní docházky na základní škole a přechodu na gymnázium čtyřleté, mnohem vyšší a liší se řádově o desítky hodin. Z provedené analýzy obsahu učiva na počátku výuky chemie (v 1. ročníku výuky chemie) pak vyplývá, že ačkoliv je rozsah této výuky na osmiletých gymnáziích mnohem vyšší, sama gymnázia nezařazují do výuky neobvyklé tematické celky, ale stále se drží tradičního pořadí učiva, tedy začínají obecnou chemií a pak navazují chemií anorganickou. Obzvláště však obecná chemie, plná abstraktních pojmů týkajících se mimo jiné struktury atomu, chemických výpočtů a těžko představitelných veličin, může dělat žákům, kteří se s chemií setkávají na osmiletých gymnáziích poprvé, největší problém. Nezanedbatelná část žáků totiž ještě pravděpodobně nepřeklenula stádium konkrétních operací a není schopna abstraktním pojmům kognitivně správně rozumět. Nabízí se tedy přeskupení pořadí výuky těchto témat tak, aby se žáci s obecnou chemií setkávali až později či minimalizovat abstraktní pojmy a procesy při její výuce. Tyto změny by mohly pomoci žákům v objevování toho, že chemie je fascinující věda, o které je radost se učit.

## LITERATURA

- Maňák J., Janík T., Švec V.: *Kurikulum v současné škole*. Masarykova univerzita, Brno 2008.
- Čtrnáctová H., Banýr J.: *Chem. Listy* 91, 59 (1997).
- ÚIV: *Struktury systémů vzdělávání a odborné přípravy v Evropě*. Praha 2009.
- Dostálová J.: *Vstup na víceleté gymnázium očima rodičů. Diplomová práce*. Masarykova univerzita, Brno 2010.
- MŠMT: *Rámcový vzdělávací program pro základní vzdělávání*. Praha 2021.
- MŠMT: *Rámcový vzdělávací program pro gymnázia*. Praha 2022.
- Straková J., Greger D.: *Orbis Scholae* 7, 73 (2018).
- Wilhelm L.: *Výuka chemie v nižších ročnících nižšího gymnázia v ČR. Bakalářská práce*. Univerzita Karlova, Praha 2021.
- Good R., Kromhout R. A., Mellon E.: *J. Chem. Educ.* 56, 426 (1979).
- MŠMT: <https://rejstriky.msmt.cz/rejskol/>, staženo 2. 7. 2024.
- <https://www.gymfry.net/wp>, staženo 20. 10. 2009.
- Průchová J.: *Názornost vybraných učebnic chemie. Bakalářská práce*. Masarykova univerzita, Brno 2017.
- Beneš P., Čech V., Banýr J., Pumpr V., Jakešová M., Lexová N.: *Základy chemie pro 2. stupeň základní školy, nižší ročníky víceletých gymnázií a střední školy*. Fortuna, Praha 1995.
- Pánek J., Škoda J.: *Chemie 8 pro ZŠ a víceletá gymnázia (I.)*. Fraus, Plzeň 2006.
- Mach J., Plucková I., Šibor J.: *Chemie; Úvod do obecné a anorganické chemie*. Nová škola, s.r.o., 2010.
- Budínská G., Jelínková L., Štikovcová K., Jandová J.: *Hravá chemie 8. Taktik*, Praha 2019.
- Wilhelm L.: *Vybrané materiály pro výuku chemie v nižších ročnících na osmiletém gymnáziu. Diplomová práce*. Univerzita Karlova, Praha 2023.
- Pugnerová M.: *Psychologie: pro studenty pedagogických oborů*. Grada Publishing a.s., Praha 2019.
- Sternberg R. J.: *Kognitivní psychologie*. Portál s.r.o., Praha 2009.
- Piaget J., Inhelder B.: *Psychologie dítěte*. Portál s.r.o., Praha 2010.
- Vágnerová M., Lisá L.: *Vývojová psychologie: dětství a dospívání*. Univerzita Karlova v Praze. Karolinum Press, Praha 2021.
- Herron J. D.: *J. Chem. Educ.* 52, 146 (1975).
- Langmeier J., Krejčířová D.: *Vývojová psychologie*. Grada publishing a.s., Praha 2006.
- Brainerd C. J.: *Cognition* 2, 349 (1973).
- Damon W., Lerner R. M., Kuhn D., Siegler R. S.: *Handbook of child psychology, cognition, perception, and language*. John Wiley & Sons, New Jersey 2006.
- Piaget J.: *The theory of Stages in Cognitive Development*. DR Green, MP Ford, & GB Flamer, Measure-

ment and Piaget (str. 1–11). McGraw-Hill, New York, NY 1971.

27. Sternberg R. J., Berg C. A.: *Intellectual development*. Cambridge University Press, Cambridge 1992.
28. Vygotsky L.: *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press, Cambridge 1978.

**L. Wilhelm and P. Šmejkal** (*Faculty of Science, Charles University in Prague, Prague, Czech Republic*):  
**Quo Vadis, Chemistry in Eight-Year Grammar Schools?**

This article provides a more detailed insight into the scope and content of chemistry teaching in eight-year grammar schools. What is the most common year in which chemistry is started in eight-year grammar schools in the Czech Republic? What topics do students most often encounter in chemistry when they start high school? And does chemistry as a subject receive more space in eight-year grammar schools than in the sequence of primary schools followed by four-year grammar schools? These are the questions we seek to answer in this article. It turns out that, compared to primary schools, chemistry teaching starts earlier in eight-year grammar schools, by up to two years. Thus, the overall scope of chemistry teaching is significantly higher in most eight-year grammar schools than in the combination of primary schools and four-year grammar schools. In terms of teaching topics, however, eight-year grammar schools follow the usual sequence, i.e. to start with general chemistry and continue with other chemistry disciplines. Taking these findings into account, reading the article might offer to educators a reflection on the concept of teaching chemistry in future years.

Keywords: chemistry education, content analysis, scope analysis, eight-year grammar school



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.

## PROVEDITELNOST UMÍSTĚNÍ VELKOKAPACITNÍCH ELEKTROLYZÉRŮ V TUZEMSKÝCH JADERNÝCH ELEKTRÁRNÁCH

MARTIN ŠILHAN<sup>a</sup>, VÁCLAV HAKL<sup>b</sup>, JAROSLAV STOKLASA<sup>a</sup> a PAVLA LUKÁŠOVÁ<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Centrum výzkumu Řež s.r.o., Hlavní 130, 250 68 Husinec-Řež, <sup>b</sup> ÚJV Řež, a.s. Hlavní 130, 250 68 Husinec-Řež, Česká republika  
martin.silhan@cvrez.cz

Došlo 21.7.24, přijato 28.8.24.

Cílem článku je ověřit proveditelnost umístění technologie vodní elektrolýzy o velikosti řádově 100 MWe v areálu tuzemské jaderné elektrárny nebo v jeho blízkosti. Možné umístění elektrolýzérů a distribuce vyrobeného vodíku jsou zkoumány z technologických, logistických a jaderně-bezpečnostních hledisek.

Klíčová slova: jaderný reaktor, vodík, elektrolýzér

### Obsah

1. Úvod
2. Vstupy pro LTE a HTE
3. Synergické efekty umístění elektrolýzérů v jaderné elektrárně
4. Provozní aspekty umístění elektrolýzérů v blízkosti jaderné elektrárny
  - 4.1. Měrné spotřeby médií a energii elektrolýzérem
  - 4.2. Odvod vyrobeného vodíku
  - 4.3. Porovnání prostorových nároků nízko- a vysokoteplotní elektrolýzy
5. Situace na tuzemských jaderných elektrárnách
  - 5.1. Elektrárna Temelín
  - 5.2. Elektrárna Dukovany
  - 5.3. Jaderně-bezpečnostní aspekty
  - 5.4. Umístění elektrolýzérů v rámci nového jaderného projektu
6. Závěr

### 1. Úvod

Vodík je klíčovým prvkem strategie EU k dosažení klimatické neutrality do roku 2050. V kontextu dekarbonizace a přechodu na nízkouhlíkové zdroje bude nutné vyrábět vodík s minimálními emisemi. Vodíková strategie České republiky<sup>1</sup> předpokládá, že v roce 2050 dosáhne tuzemská spotřeba 1160–1835 tis. t nízkouhlíkového vodíku ročně. Tento vodík má být převážně vyráběn procesem vodní elektrolýzy, což si již v roce 2030 vyžádá instalovaný výkon elektrolýzérů 400 MWe. Vzhledem k obrovskému množství energie potřebné k výrobě vodíku se očekává, že významnou roli bude hrát jaderná energetika.

Jaderná elektrárna (JE) je díky nízkým emisím CO<sub>2</sub> a stabilnímu charakteru výroby vhodným zdrojem energie pro elektrolýtickou výrobu vodíku. Propojení se zařízením na výrobu vodíku může přinést výhody i pro samotnou JE. Zvyšování podílu intermitentních obnovitelných zdrojů v energetickém mixu vede ke zvyšování fluktuací cen na trhu s elektřinou. Tento trend představuje výzvu pro stávající jaderné bloky, které byly původně navrženy pro výrobu elektřiny v základním zatížení a mají omezené možnosti regulace výkonu. Časté změny výkonu jaderné elektrárny mají rovněž negativní dopad na životnost komponent. Nedostatečnou flexibilitu jaderných bloků je možné kompenzovat přidružením výroby vodíku. Na místo snižování výkonu jaderného bloku v dobách nízkých cen elektrické energie může být pro JE výhodnější využít přebytečnou energii k elektrolýtické výrobě vodíku. Vyrobený vodík pak může být skladován a v době vysokého zatížení elektrizační soustavy a vysokých cen elektřiny použit pro zpětnou výrobu elektřiny, například pomocí palivových článků. Alternativně může být vyrobený vodík vtlačěn do plynovodu nebo využit v dopravě či průmyslu. Integrace výroby vodíku tedy přispívá ke zvýšení flexibility dodávek elektrické energie z JE. Přidružení elektrolýtické výroby vodíku k JE má i ekonomické výhody, jednou z nich je sdílení technologické infrastruktury<sup>2</sup>. V areálu JE existuje infrastruktura potřebná pro elektrolýtickou výrobu vodíku, např. elektrické vedení, systém chladicí vody, demineralizační linka aj. Pokud by umístění velkokapacitního elektrolýzérů v areálu JE nebylo proveditelné, je možné vyvést energii a média ven z areálu a umístit elektrolýzér v bezprostřední blízkosti. Při propojení výroby vodíku s JE přímým elektrickým vedením dochází také k úspoře značné části nákladů na dodávku elektrické energie. Tyto náklady mají nejvyšší podíl na celkových měrných nákladech

dech elektrolyticky vyrobeného vodíku (LCOH – Levelised Cost Of Hydrogen – vyrovnané náklady na výrobu vodíku).

Využití jaderné energie pro elektrolytickou výrobu vodíku představuje zajímavé téma. Řada výzkumných projektů se zaměřuje na pokročilé, vysokoteplotní reaktory další generace, jejichž parametry budou velmi dobře kompatibilní s potřebami vysokoteplotní elektrolyzy. Kvůli četným synergickým efektům a možným ekonomickým benefitům pro provoz JE se toto téma řeší rovněž v kontextu vytvoření hybridních systémů na stávajících jaderných elektrárnách. Například evropský projekt NPHyCo (Nuclear Powered Hydrogen Cogeneration) se zabývá posouzením proveditelnosti a konkurenceschopnosti vodíku vyráběného na existujících JE, a to z technického, ekonomického i jaderně-bezpečnostního hlediska. Studie proveditelnosti pro 2 MWe systém elektrolyzérů byla provedena také pro JE Heysham ve Velké Británii<sup>3</sup>. Zároveň bylo ohlášeno několik demonstračních projektů elektrolytické výroby vodíku na stávajících JE. Nízkooteplotní elektrolyzéry o velikosti 1–2 MWe mají být realizovány na JE Davis-Besse, Nine Mile Point a Palo Verde v USA (cit.<sup>4</sup>). V JE Prairie Island v USA se připravuje pilotní projekt pro demonstraci výroby vodíku pomocí vysokoteplotní elektrolyzy.

Areál existující jaderné elektrárny má z hlediska elektrolytické výroby vodíku mnoho předností, ale také přináší mnohá omezení pro umístění elektrolyzérů. Omezení mohou být například jaderně-bezpečnostní povahy či logistické povahy (současné nebo plánované využití volných lokalit uvnitř perimetru JE, existence velmi husté sítě potrubních vedení a elektrovodů, která může komplikovat realizaci nových sítí). V lokalitě určené pro nový jaderný zdroj je možné řadu omezení eliminovat včasným plánováním. Při umístění do zastavovacího plánu JE je třeba respektovat vazby elektrolyzérů a jeho příslušenství na dostupnost médií a energií v lokalitě.

Cílem tohoto článku je ověřit možnost umístění velkokapacitního nízko-, nebo vysokoteplotního elektrolyzérů do areálu JE, případně do jeho těsné blízkosti. Článek bude zaměřen na české jaderné elektrárny, tj. na jadernou elektrárnu Temelín (ETE) a jadernou elektrárnu Dukovany (EDU), které jsou vlastněné a provozované společností ČEZ, a. s. Možné umístění elektrolyzérů, využití energií a médií dostupných v JE a způsob využití vyrobeného vodíku jsou posuzovány z technologických, logistických a jaderně-bezpečnostních hledisek.

## 2. Vstupy pro LTE a HTE

Nízkoemisní vodík lze vyrobit pomocí řady technologií, tento článek se zaměřuje pouze na vodní elektrolyzu, jelikož Vodíková strategie ČR považuje tuto technologii za dominantní do budoucna<sup>1</sup>. Hlavní technologie vodní elektrolyzy představují alkalická elektrolyza (AEL), proton-výměnná elektrolyza (PEM) a vysokoteplotní elektrolyza (HTE). První dvě jsou souhrnně označeny jako nízko-

teplotní elektrolyza (LTE). LTE pracuje při mírně zvýšených teplotách (obvykle do 100 °C), provozní teplota HTE se pohybuje mezi 750–1000 °C. HTE musí být udržována na provozní teplotě (vyžaduje dodávku energie), nebo řízeně odstavena a najeta (proces trvá typicky 10 a více hodin). Vodík vystupující z jednotky HTE je poměrně chladný, typicky mírně nad 40 °C, srovnatelně s vodíkem z LTE, což je výhodné pro jeho další kompresi.

Do procesu LTE vstupuje pouze elektrická energie a voda. Měrná spotřeba elektrické energie AEL / PEM / HTE se obvykle pohybuje okolo 4,5 / 4,5 / 3,6 kWh/Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub> (cit.<sup>5–7</sup>). V procesu HTE je část energie dodávána v páře, což snižuje měrnou spotřebu elektrické energie. Přibližně lze uvést, že 1 MWe LTE / HTE vyrobí za hodinu 200 Nm<sup>3</sup> / 300 Nm<sup>3</sup> H<sub>2</sub>. Dalším vstupem do LTE je chlazení, u větších elektrolyzérů ve formě chladicí vody. LTE i HTE potřebují k provozu stlačený dusík pro inertizaci komor a stlačený vzduch pro pneumatické ovládací prvky.

Pro ilustraci, vysokoteplotní elektrolyzér společnosti Sunfire pracuje se vstupní párou o teplotě 150–200 °C a tlaku 3,5–5,5 bar (cit.<sup>7</sup>), pára o těchto parametrech je na JE k dispozici. Nevýhodou HTE je vyšší složitost implementace do stávajícího provozu JE, především kvůli nutnosti propojení JE a výroby vodíku pomocí parovodu.

Výhodou HTE je výše zmíněná vyšší energetická účinnost, dodání části energie v teple (které je typicky levnější než elektřina) a absence vodního chlazení. Mezi výhody LTE lze zařadit vyšší schopnost reagovat na požadavky na změnu výkonu, nižší investiční náklady a vyšší životnost než u HTE. Životnost aktivních částí elektrolyzérů je 80 / 60 / 22 tis. hodin (cit.<sup>8,9</sup>). Investiční náklady pro AEL / PEM / vysokoteplotní elektrolyzér představují 12,5 / 18,8 / 20 mil. Kč/MWe (cit.<sup>8</sup>). Podle cit.<sup>8</sup> jsou náklady na výrobu vodíku při poměrně nízké ceně elektrické energie o 1500 Kč nižší u HTE než u LTE. Vyšší investiční náklady HTE jsou díky vyšší účinnosti oproti LTE částečně kompenzovány nižšími náklady na vstupní elektrickou energii. S rostoucí cenou elektřiny tedy ekonomická efektivita nasazení HTE roste.

## 3. Synergické efekty umístění elektrolyzérů v jaderné elektrárně

Umístění elektrolyzérů v JE nabízí řadu možných synergických efektů: přímou dodávku elektřiny, dodávku páry, demineralizované vody (demivody), pitné vody, chladu (ve formě cirkulační chladicí vody), tlakového vzduchu a dusíku, odvod odpadních vod, zajištění ostrahy a pochůzkové činnosti. Nejdůležitější požadavek představuje umístění elektrolyzérů v blízkosti systému vyvedení elektrického výkonu uvnitř nebo vně areálu JE, protože je obtížné technicky realizovatelné zajistit přívod vysokých elektrických příkonů do jiných částí areálu JE. Z technologického hlediska je klíčové zajištění dodávky chladicí vody a demivody. Z ekonomického hlediska se nejedná o významné položky v celkových LCOH. Ještě

menší váhu má z pohledu provozní ekonomiky zajištění přívodu dusíku a stlačeného vzduchu. Obojí lze zajistit dodáním svazků tlakových lahví, pokud by nebyly k dispozici rozvody uvedených plynů, případně by se toto propojení ukázalo jako finančně nevýhodné.

**Přímá dodávka elektrické energie** je klíčová pro ekonomickou efektivitu výroby vodíku, jelikož platby za elektrickou energii představují značnou část LCOH. Dodávka elektrické energie přímým vedením z JE není zatížena regulovanými poplatky spojenými s distribucí a přenosem elektrické energie, čímž dochází k významné úspoře provozních nákladů. Elektrolyzátor pro svoji funkci potřebuje napájení pomocí stejnosměrného proudu. Ačkoliv se v JE nacházejí rozvodny se stejnosměrným proudem, nelze do nich elektrolyzátor připojit, neboť slouží pouze k bezpečnostním účelům. Pro napájení elektrolyzátorů jsou v areálu JE k dispozici střídavé zdroje, a to vedení 400 kV (vyvedení výkonu bloků) či odbočkové transformátory zajišťující napájení vlastní spotřeby bloků, existuje-li zde dostatečná rezerva výkonu. Pro dodávku elektrické energie do elektrolyzátoru je dále nutné zajistit transformaci napětí na vhodnou napěťovou hladinu a usměrnění.

**Demivoda** představuje hlavní surovinu pro elektrolyzátor. Některé elektrolyzátor mají přísné požadavky na kvalitu vstupní vody, proto může být vyžadováno dodatečné čištění demivody dostupné v JE. V případě nedostatku demivody může být nahrazena pitnou vodou, která je obvykle také upravena přímo v elektrolyzátoru. Využití demivody je preferováno kvůli vyšší ceně a tvrdosti pitné vody.

**Pára, potřebná pro chod HTE**, je na tuzemských jaderných elektrárnách dostupná o teplotách maximálně 278,5 °C / 259 °C pro ETE / EDU. Za účelem dosažení provozní teploty vysokoteplotní elektrolyzy (přibližně 800 °C) je třeba páru dále dohřát. Zvýšení teploty páry je zajištěno elektrickým ohřevem, který probíhá přímo ve vysokoteplotním elektrolyzátoru.

**Odvod odpadních vod** z elektrolyzy je možné provést ve stávajících čistírnách odpadních vod na JE. Odpadní vodu z elektrolyzy představují především: retentát (vyskytne se pouze v případě, kdy kvalita demivody nedostačuje pro vstup do elektrolyzátoru), úniky roztoku KOH (pouze u alkalických elektrolyzátorů), popř. další kondenzáty.

**Chladicí voda** je klíčové médium pro chlazení nízkoteplotních elektrolyzátorů a některých typů vodíkových kompresorů. Pro chlazení lze využít stávající systémy cirkulační chladicí vody, u kterých nedochází k potenciální jaderné kontaminaci. Ohřátou chladicí vodu je ideální využít v nejaderné části technologie.

Zajištění přívodu **tlakového dusíku i tlakového vzduchu** do všech částí areálu JE je technicky realizovatelné. Mnoho ovládacích prvků elektrolyzátorů funguje z bezpečnostních důvodů na pneumatické bázi. Potřebu tlakového vzduchu lze také řešit vybudováním kompresní stanice stlačeného vzduchu. Elektrolyzátor potřebují dávky dusíku pro inertizaci prostor, kde dochází k vývoji vodíku, např. při odstávkách. Spotřeba dusíku pro inertizaci elektrolyzátoru i tlakového vzduchu pro pneumatické

ovládací prvky elektrolyzátoru je nízká. Spotřeba dusíku má nárazovou povahu, a lze ji zajistit formou akumulace dusíku v tlakové nádobě.

Každá JE má zajištěné **služby požární ochrany a ostrahy**. Pro provoz elektrolyzátorů je vhodné zajistit občasnou pochůzkovou kontrolou, kterou je na JE možné poskytnout stávajícím personálem.

Kromě využívání infrastruktury JE pro výrobu vodíku lze naopak i vyrobený vodík v zanedbatelné míře využít při provozu JE pro chlazení statorů elektrických generátorů. Další využití vodíku v tuzemských JE v současné době není. Kromě vodíku produkují elektrolyzátor i kyslík (osminásobnou hmotnost než vodík). Při provozu tuzemských JE není kyslík využíván. V zanedbatelném množství je kyslík na JE využíván pro řezání kovů a kalibraci měřidel, ale vzhledem k nízké spotřebě není ekonomické uvažovat o budování zařízení pro skladování a výdej kyslíku. Pro úplnost dodáváme, že další (v ČR nepoužívané) koncepty JE kyslík využívají při procesu chemické úpravy vody. Kyslík však může být v budoucnu využitelný pro výrobu elektřiny, jelikož spalováním vodíku v kyslíkové atmosféře vzniká jen vodní pára. Kyslík je možné vypouštět volně do atmosféry.

## 4. Provozní aspekty umístění elektrolyzátoru v blízkosti jaderné elektrárny

### 4.1. Měrné spotřeby médií a energií elektrolyzátorem

V tab. I jsou souhrnně prezentovány spotřeby jednotlivých médií a energií pro LTE a HTE včetně potřebné plochy pro umístění zařízení. Proces vodní elektrolyzy je endotermický, je však nutné odvést teplo vznikající kvůli ohmickým a faradayovským ztrátám. Spotřeba cirkulační chladicí vody pro 1 MWe LTE je zhruba 18 m<sup>3</sup>/t vodíku (cit.<sup>10</sup>). Vzhledem k vysoké provozní teplotě HTE se zařízení uchladí okolním vzduchem, nespotebovává tedy chladicí vodu. Další potřeba chlazení je pro kompresi vodíku, velké vodíkové kompresory pracují obvykle bez potřeby vodního chlazení. Pro 100 MWe LTE i HTE jednotku je odhadovaná dodávka demivody 18 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>, dodávka chladicí vody pro 100 MWe LTE je 40 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup>. Pokud je použita na vstupu pitná voda, je její spotřeba vyšší z důvodu nutnosti zpracování na kvalitu demivody. Zpracování spočívá především ve snížení obsahu rozpuštěných solí, při běžně používaných osmotických procesech vznikne významné množství retentátu. LTE o příkonu 1 MWe zabere plochu cca 60 m<sup>2</sup>. 100 MWe LTE / HTE vyrobí průměrně 20 / 30 tis. Nm<sup>3</sup> vodíku za hodinu a zabere plochu 6 / 11 tis. m<sup>2</sup> (prostorové nároky jsou podrobněji rozepsány v další části).

### 4.2. Odvod vyrobeného vodíku

Pro přepravu velkého množství vodíku přichází v úvahu potrubní přeprava stlačeného vodíku, případně zkaplňování vodíku, a jeho přeprava v kapalné formě. Pro

Tabulka I  
Měrné spotřeby médií, energií a plochy pro LTE a HTE

	LTE	HTE	Poznámka
Spotřeba cirkulační chladicí vody, kg/kg vodíku	18	–	
Spotřeba demivody, kg/kg vodíku	9	9	u HTE ve formě páry
Spotřeba pitné vody, kg/kg vodíku	59	59	u HTE ve formě páry
Výroba vodíku, Nm <sup>3</sup> /hodina pro 1 MWe	200	300	
Spotřeba elektřiny, kWh(AC)/Nm <sup>3</sup> H <sub>2</sub>	4,5	3,6	u LTE uveden průměr mezi PEM a alkalickým elektrolyzérem
Měrná plocha, m <sup>2</sup> /MWe vč. příslušenství	60	110	možná mírná deprese s rostoucím příkonem

odběr vyrobeného vodíku je proto klíčová blízkost dostatečně dimenzované sítě zemního plynu, popřípadě blízkost spotřebitele vodíku. Vzhledem k potenciálním objemům vodíku uvažujeme v tomto případě prakticky jen o vtlačení vyrobeného vodíku do plynovodu (sítě zemního plynu nebo vodíkovodu).

Provozovatel tranzitní sítě zemního plynu, společnost NET4GAS, uvažuje o napojení lokality ETE na tranzitní síť zemního plynu do roku 2050. NET4GAS dále očekává, že kolem roku 2050 se jedna větev tranzitního plynovodu přestaví na přepravu čistého vodíku a kapacita přepravy vodíku dále výrazně vzroste. Vzdálenost areálů ETE a EDE od tranzitního plynovodu je cca 1 a 10 km. V bezprostřední blízkosti EDU se nachází pouze středtlaký plynovod s omezenou kapacitou vtlačení. Vyrobený vodík lze přimíchávat do plynovodní sítě v různých objemových procentech. Povolená procenta obsahu vodíku budou v budoucích letech růst až k 20 %, v závislosti na koncentraci vodíku jsou plynovody a spotřebiče možné používat až po zavedení různých stupňů úprav<sup>1</sup>. Vodík je v tomto případě dodáván společně se zemním plynem koncovým odběratelům připojeným k plynovodu. Výhodou tohoto přístupu je využití stávající infrastruktury.

Spotřeba zemního plynu v České republice činí cca 9 mld m<sup>3</sup>/rok (cit.<sup>11</sup>), při 20% přimíchávání by bylo možné vtlačit 1,8 mld m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>/rok, to odpovídá 162 tis. tun vodíku za rok. Hypotetický elektrolyzátor o příkonu 100 MWe by při koeficientu využití 50 % (a měrné spotřebě elektřiny 4 kWh/Nm<sup>3</sup> vodíku) vyrobil cca 10 tis. tun vodíku za rok, což je výrazně méně, než limit kapacity (celého) tranzitního plynovodu. Z pohledu kapacity plynovodu nepředstavuje nasazení 100 MWe elektrolyzátoru zásadní problém. Alternativní možností pak je budoucí přebudování produktovodu ČEPRO, a.s., který se nachází poblíž ETE i EDU, na přepravu plynného vodíku.

I při přímém napojení elektrolyzátoru na tranzitní síť zemního plynu je třeba počítat se zásobníkem vodíku. Zásobník bude sloužit ke kompenzaci odchylek mezi výrobou a odbytem vodíku či pro potřeby odstávky elektrolyzátoru nebo odběru vodíku. Zásobník dále umožní realizaci případných méně významných odběrů vodíku, například pro vodíkovou čerpací stanici. Pro akumulaci vodíku vyráběného 100 MWe elektrolyzátorem (plně zatíže-

ným) po dobu 10 hodin je nutné uvažovat zásobník o objemu 2,2·10<sup>5</sup> Nm<sup>3</sup> (cca 20 tun) vodíku. Pro úplnost uvádíme, že elektrolyzátor vyprodukuje 8× (m/m) více kyslíku než vodíku, pro vyrobený kyslík v areálu JE není prakticky žádné využití, je možné jej vypouštět volně do atmosféry.

#### 4.3. Porovnání prostorových nároků nízkotepelných a vysokoteplotních elektrolyzátů

Obecně bez bližší specifikace konfigurace technologie uvažujeme s tím, že: 1 MWe LTE s příslušenstvím zabírá plochu 60 m<sup>2</sup>, 1 MWe HTE s příslušenstvím zabírá plochu 110 m<sup>2</sup>. U stavebního objektu elektrolyzátoru se předpokládá výměra 6 000 m<sup>2</sup>/11 000 m<sup>2</sup> pro 100 MWe LTE / HTE jednotku. Požadavek na snížení měrné plochy je možné realizovat, avšak na úkor investičních nákladů. Kromě samotného elektrolyzátoru se v komplexu výroby vodíku nacházejí také transformátory, usměrňovače, kompresory, chladiče, zásobníky vodíku, systémy řízení a kontroly a další pomocné systémy, např. protipožární ochrana. Vhodná je i plocha pro manipulaci vozidel. Na základě vizualizací různých pilotních projektů velkokapacitních výroben vodíku lze odhadnout celkovou plochu areálu pro výrobu vodíku zhruba 2× větší, než je plocha samotného elektrolyzátoru s příslušenstvím. Konkrétní hodnota je závislá na místních podmínkách a vlastním konceptu zařízení. Například systém chlazení se může nacházet na jiném místě (využití infrastruktury JE). Dalším prostorově náročným prvkem jsou zásobníky, jejichž kapacita, a tedy jimi zastavěná plocha, závisí na způsobu využití vyrobeného vodíku.

## 5. Situace na tuzemských jaderných elektrárnách

Umístění výroby vodíku přímo ve střeženém prostoru v blízkosti jaderných bloků představuje komplikaci z důvodu možného zavedení rizikového prvku, který by mohl ovlivnit jadernou bezpečnost bloků. Toto umístění vyžaduje provedení složitých projektových a bezpečnostních analýz, které musí prokázat zachování jaderné bezpečnosti. Další možností je využití lokalit mimo střežený



prostor. Znamé neblokované pozemky v blízkosti JE v majetku ČEZ jsou lokality Křtěnov u ETE a Suchá louka u EDU. Využití těchto vytipovaných lokalit by znamenalo nutnost přivedení médií a energií z areálu JE do prostoru výroby vodíku či výstavbu vlastního zdroje. Finální rozhodnutí by vycházelo z podrobné technicko-ekonomické analýzy. V případě některých vstupů, např. tlakového dusíku a vzduchu, může být výhodnější vybudovat vlastní zdroj média v dané lokalitě (zásobník, tvořený tlakovou nádobou, nebo svazkem tlakových nádob). Naopak u dodávky elektrické energie je přímá dodávka z JE z ekonomického hlediska kritická. Při vybudování přípojky k vyvedení výkonu bloků či k rozvodně vlastní spotřeby JE není nutné hradit regulované poplatky spojené s distribucí elektrické energie. Teoreticky lze výrobu vodíku napájet z rozvodny Kočín, resp. Slavětice, v případě ETE, resp. EDU. V tomto případě však nedochází k úspoře na regulovaných poplatcích. Ostatní synergické efekty výstavby výroby vodíku v blízkosti jaderné elektrárny nemají z ekonomického hlediska dostatečnou váhu, aby tyto poplatky vykompenzovaly. Jinými slovy, nemá smysl uvažovat o jiném než přímém napájení z rozvodů JE.

### 5.1. Elektrárna Temelín

V areálu ETE je možné vybudovat přípojku k vedení 400 kV (vyvedení výkonu bloků) či k rozvodně vlastní spotřeby. Dále se v areálu ETE nachází chemická úpravná vody, která slouží k výrobě demivody iontovou výměnou a reverzní osmózou. Demivoda je po ETE rozvedena po

trubními mosty, z nichž je možné realizovat odbočku pro dodávku do elektrolyzérů. Potřebné chlazení může zajistit stávající oběh cirkulační chladicí vody o teplotě ochlazené vody 12 °C (zima) až cca 27 °C (léto) a tlaku cca 300 kPa.

Pro variantu umístění výroby vodíku mimo areál ETE byla vytipována lokalita Křtěnov, která se nachází zhruba 0,2 km vzdušnou čarou od okraje areálu. Bezprostřední blízkost tranzitního plynovodu v této lokalitě představuje výhodu z hlediska možného vtlačení vyrobeného vodíku. Využitelná plocha v této lokalitě činí ca 26 ha, viz obr. 1.

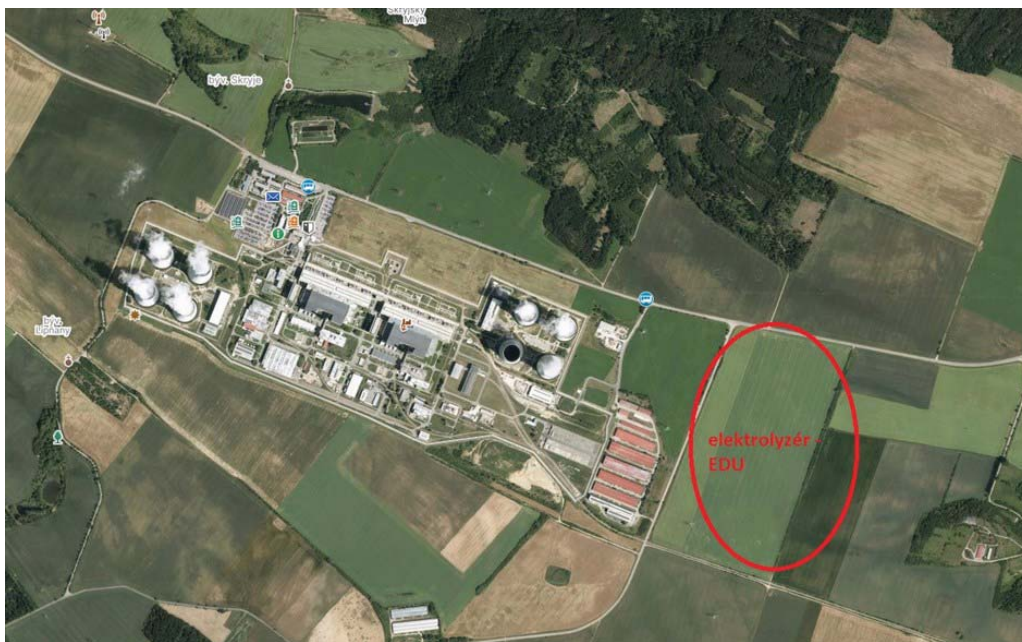
### 5.2. Elektrárna Dukovany

V areálu EDU je možné vybudovat přípojku k vedení 400 kV (vyvedení výkonu bloků) či k rozvodně vlastní spotřeby. Dále se v areálu nachází chemická úpravná vody, která slouží k výrobě demivody. Na EDU je k dispozici dostatečná rezerva demivody. Demivoda je rozvedena potrubními kanály, z nichž je možné kdekoliv realizovat odbočku. Chlazení může zajistit stávající oběh cirkulační chladicí vody o teplotě ochlazené vody 12,5 °C (zima) až cca 33 °C (léto) a tlaku cca 300 kPa. Vybudování odbočky ze systému cirkulační chladicí vody v EDU pro novou výrobu vodíku by však bylo technicky složité a ekonomicky nákladné.

Pro variantu umístění výroby vodíku mimo areál EDU byla vytipována lokalita Suchá louka, která se nachází zhruba 0,5 km vzdušnou čarou od okraje areálu. Využitelná plocha v této lokalitě činí zhruba 40 ha. Určitou nevýhodou je bezprostřední blízkost obce, viz obr. 2.



Obr. 1. Možné umístění elektrolyzérů mimo střežený prostor ETE (Lokalita Křtěnov)



Obr. 2. Možné umístění elektrolyzéro mimo střežený prostor EDU (Lokalita Suchá louka)

### 5.3. Jaderně-bezpečnostní aspekty

Při posuzování přípustnosti umístění velkokapacitního elektrolyzéro (řádové velikosti 100 MWe) do zón v zastavovacím plánu JE je třeba stanovit, jaký vnější vliv z hlediska jaderné bezpečnosti a z hlediska navýšení požadavků na projekt (dle § 46 Atomového zákona 263/2016 Sb. o požadavcích na projekt jaderného zařízení a projektování jaderného zařízení) představuje vlastní technologie elektrolyzéro a jeho příslušenství. Tyto dodatečné vnější vlivy musí být jasně identifikovány a jejich účinky vyhodnoceny a projekt musí zajistit odolnost a ochranu jaderného zařízení proti nebezpečí plynoucímu z těchto vnějších vlivů. Účinky vnějších vlivů musí být zohledněny v návrhu generelu a dispozice stavebních objektů a zařízení elektrárny.

Vzhledem k tomu, že vodík je za určitých parametrů výbušný a hořlavý, jeho výroba a skladování v areálu JE (nebo v blízkosti) může mít negativní vliv na zajištění stanovené míry jaderné bezpečnosti. Z hlediska vnitřních vlivů představuje velkokapacitní elektrolyzér zdroj zejména výbuchů a požárů a škodlivých účinků jejich zplodin. Dále se působením produktovodů při jejich poškození mohou uvolňovat látky snadno hořlavé, výbušné. Z hlediska bezpečnosti jsou pro umístění elektrolyzéro následující zóny nepřijatelné bez přijetí zásadních projektových opatření, která zajistí, že nedojde ke snížení bezpečnosti bloku z hlediska jaderné, technické a radiační bezpečnosti:

- Zóna hlavní výroby – hlavní výrobní blok (HVB)
- Zóna hlavní výroby – vně HVB
- Zóna systémů důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti vně HVB

Pro případné umístění elektrolyzéro v těchto zónách by muselo být posouzeno, jak může jeho umístění a působení ovlivnit plnění bezpečnostních funkcí a vyhodnotit umístění elektrolyzéro jako nový vnější vliv z hlediska působení: a) vlivu tlakové vlny na vstupy systémů vzduchotechniky bloku, b) vlivu tlakové vlny a zplodin hoření na nasávaný vzduch pro vzduchotechnické systémy blokové a nouzové dozorny, c) vlivu letících trosk a projektilů vyvolaných explozí na stavební objekty jaderného zařízení a v nich umístěné zařízení, d) vlivu tlakové vlny a letících trosk a projektilů na systémy vyvedení elektrického výkonu a rezervního napájení, e) vliv otřesů, které mohou čidla bezpečnostních systémů vyhodnotit jako zemětřesení/seismicita a automaticky odstavit reaktor.

V ostatních zónách JE je umístění elektrolyzéro možné při respektování vybraných požadavků, plynoucích z potřeby zajistit neovlivnění některých funkcí zařízení a staveb umístěných v těchto zónách.

Umístění elektrolyzéro mimo střežený prostor je vhodné provést v dostatečné vzdálenosti od hlavního výrobního bloku JE a systémů důležitých z hlediska jaderné bezpečnosti vně hlavního výrobního bloku. Dodatečné vnější ohrožení v případě ETE vyvolané elektrolyzérem tak nebude výrazné a nebude vyžadovat významné projektové změny na blocích ETE, neboť projekt JE má již implementována opatření plynoucí z umístění tranzitního plynovodu. Vznik případných dalších vnějších vlivů na jaderné bloky vyvolaných lidskou činností bude muset být posouzen. Umístění mimo střežený prostor nepředstavuje riziko pro fyzickou ochranu střeženého prostoru. Havarijní připravenost JE nebude instalací elektrolyzéro ovlivněna.

#### 5.4. Umístění elektrolyzáru v rámci nového jaderného projektu

Možnosti umístění elektrolyzáru v dispozici NJZ (nový jaderný zdroj) nebo SMR (small and medium reactors – malé a střední reaktory) je dáno konkrétním projektem NJZ a SMR a případnými požadavky na projekt. Pro některé projekty NJZ a SMR může být již umístění elektrolyzáru součástí nabídky, nebo může být požadováno v zadávací dokumentaci tendru jako možná modifikace nabízených projektů. Pokud je umístění elektrolyzáru v dispozici NJZ a SMR již součástí nabízeného projektu, projektant má v takovém případě již vyřešené dispoziční umístění v rámci střeženého prostoru a napojení na zdroje médií v areálu již v úvodním projektu. Umístění elektrolyzáru v dispozici NJZ a SMR má již vyřešené vlivy na jadernou bezpečnost, na fyzickou bezpečnost a také provozní a provozně ekonomické aspekty synergie obou zařízení. Pokud je uvažováno umístění elektrolyzáru v dispozici NJZ a SMR jako modifikace již nabízeného projektu jaderného zařízení před začátkem jeho výstavby a dodávky jednotlivých technologických celků, jsou investiční náklady na změnu projektu řádově nižší než úprava již provozovaného jaderného bloku. Jde například o zvýšení kapacity napájení vlastní spotřeby bloku respektující příkon instalovaného elektrolyzáru a také nároky na dodávky médií a na systémy odvodu tepla. V době přípravy rukopisu nebyl dodavatel SMR znám.

## 6. Závěr

Výrobě vodíku pomocí jaderné energie je věnována pozornost na celém světě, nejen na poli výzkumu a vývoje, ale i mezi provozovateli JE. Existuje řada studií a projektů zaměřených jak na pokročilé, vysokoteplotní reaktory další generace, jejichž parametry budou velmi dobře kompatibilní s potřebami vysokoteplotní elektrolyzy, tak na posouzení proveditelnosti a ekonomické efektivity výroby vodíku na stávajících JE. V USA již byly ohlášeny 4 pilotní projekty, které mají přímo na stávajících JE demonstrovat výrobu vodíku pomocí LTE i HTE.

Mezi jadernou energetickou výrobou a elektrolyzní výrobou vodíku existují četné synergie, velmi důležitá je přímá dodávka silové elektrické energie pro elektrolyzáru a možné vtláčení elektrolyticky vyrobeného vodíku do blízkého tranzitního potrubí zemního plynu. Bez významu není ani dodávka páry pro vysokoteplotní elektrolyzáru. Při případném umístění elektrolyzáru v dispozici ETE a EDU je možné využít i stávající chladicí věže pro odvod zbytkového tepla elektrolyzáru.

Kromě synergií existují i mnohé komplikace, a to jaderně-bezpečnostní nebo logistické. První skupina vychází ze skutečnosti, že v areálu JE jsou přítomna bezpečnostní omezení, která mohou kolidovat s potenciálním nebezpečím výroby a skladování vodíku. Další druhy omezení jsou zapříčiněny vysokou hustotou různých inženýrských sítí v areálu jaderné elektrárny. Mnoho kompli-

kací odpadne, pokud je elektrolyzáru umístěn vně střeženého prostoru jaderné elektrárny s tím, že energie a média jsou vyvedeny z areálu jaderné elektrárny. Pro umístění elektrolyzáru byly vytipovány lokality vně střeženého prostoru JE.

Významné nákladové položky na implementaci elektrolyzáru do JE představují například: elektrolyzáru, vybudování souvisejících sítí (které může být v areálu existující JE komplikované), náklady na vyvedení vodíku (jedná se o liniovou stavbu), připojení elektrolyzáru k jadernému bloku (nepovažujeme za pravděpodobné, že akcí bude možné provést během plánované odstávky JE), zvýšené náklady u technologií v JE (zařízení, certifikovaná pro provoz v JE, jsou obvykle několikanásobně dražší než analogická zařízení fungující mimo JE). Implementace vodíkových technologií do JE je řádově snazší, pokud je na ni pamatováno již ve fázi projektování jaderného bloku, ať už velkého zdroje, nebo malého modulárního reaktoru.

*Prezentované výsledky byly realizovány v rámci Institucionální podpory Ministerstva průmyslu a obchodu ČR.*

#### LITERATURA

1. Vodíková strategie České republiky aktualizace 2024 schválená vládou, dostupné z <https://www.mpo.gov.cz/cz/prumysl/strategicke-projekty/vodikova-strategie-cr-aktualizace-2024-schvalena-vladou--282165/>, staženo 6. 8. 2024.
2. Nuclear hydrogen projects to support clean energy transition: Updates on international initiatives and IAEA activities, Constantin A.: *Int. J. Hydrogen Energy*, 54, 768 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.09.250>
3. H2H Feasibility Report, dostupné z [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/866374/Phase\\_1\\_-\\_EDF\\_-\\_Hydrogen\\_to\\_Heysham.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/866374/Phase_1_-_EDF_-_Hydrogen_to_Heysham.pdf), staženo 6. 8. 2024.
4. Nuclear Power Plants Gearing Up for Clean Hydrogen Production, dostupné z <https://www.energy.gov/ne/articles/3-nuclear-power-plants-gearing-clean-hydrogen-production>, staženo 6. 8. 2024.
5. Sunfire HYLINK alkaline Factsheet, dostupné z [https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Produkte\\_Technologie/factsheets/Sunfire-Factsheet-HyLink-Alkaline\\_202403.pdf](https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Produkte_Technologie/factsheets/Sunfire-Factsheet-HyLink-Alkaline_202403.pdf), staženo 6. 8. 2024.
6. Key features of PEM electrolyser, dostupné z <https://nelhydrogen.com/product/m-series-electrolyser/>, staženo 6. 8. 2024.
7. Sunfire HYLINK SOEC Factsheet, dostupné z [https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Produkte\\_Technologie/factsheets/Sunfire-Factsheet-HyLink-SOEC\\_2023Nov.pdf](https://www.sunfire.de/files/sunfire/images/content/Produkte_Technologie/factsheets/Sunfire-Factsheet-HyLink-SOEC_2023Nov.pdf), staženo 6. 8. 2024.
8. Electrolysis technologies and LCOH: current state and prospects for 2030, dostupné z <https://>

- hydrogentechworld.com/electrolysis-technologies-and-lco-h-current-state-and-prospects-for-2030, staženo 6. 8. 2024.
9. Solid Oxide Electrolysis: A Technology Status Assessment, dostupné z <https://cdn.catf.us/wp-content/uploads/2023/11/15092028/solid-oxide-electrolysis-report.pdf>, staženo 6. 8. 2024.
  10. Water treatment for green hydrogen: what you need to know, dostupné z <https://hydrogentechworld.com/water-treatment-for-green-hydrogen-what-you-need-to-know>, staženo 6. 8. 2024.
  11. Dodávky a nákup zemního plynu, <https://www.plyn.cz/dodavky-a-nakup-zemniho-plynu>, staženo 6. 8. 2024.

**M. Šilhan<sup>a</sup>, V. Hák<sup>b</sup>, J. Stoklasa<sup>a</sup>, and P. Lukášová<sup>a</sup>** (<sup>a</sup> *Research Centre Řež*, <sup>b</sup> *ÚJV Řež, Czech Republic*): **Feasibility of Placing Large-Scale Electrolyzers in Domestic Power Plants**

The aim of the article is to verify the feasibility of placing large-scale (up to 100 MWe) water electrolysis technology unit inside, or in the proximity of a domestic nuclear power plant. The possible location is investigated from technological, logistic and nuclear-safety points of view.

Keywords: nuclear reactor, hydrogen, electrolyzer



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.



PŘÍRODOVĚDECKÁ  
FAKULTA  
Univerzita Karlova

 **Metrohm**  
Česká republika



METROHM Česká republika s.r.o.  
ve spolupráci s  
Odbornou skupinou analytické chemie  
a  
Odbornou skupinou elektrochemie  
České společnosti chemické  
vyhlašuje

## 14. ročník soutěže Cena Metrohm 2025

### A. Cena Metrohm za nejlepší publikaci mladého chemika (do 35 let).

Uděljuje se 5 cen, každá dotovaná částkou 10 000 Kč:

- 3 ceny v oblasti elektroanalytické chemie
- 1 cena v oblasti UV-VIS-NIR spektroskopie a Ramanovy spektrometrie
- 1 cena v oblasti kapalinové chromatografie pro separaci iontových a polárních látek

Soutěžící nechtě zašlou pdf-verzi své publikace, vyšlé v roce 2024, e-mailem na adresy barek@natur.cuni.cz a peter.barath@metrohm.cz spolu se svými identifikačními údaji (příjmení, jméno, pracoviště, datum narození, případně členské číslo České společnosti chemické) do 31. prosince 2024. Do předmětu prosíme uvést Cena Metrohm 2025.

### B. Cena firmy Metrohm za celoživotní přínos k rozvoji elektroanalytické chemie.

Uděljuje se jediná cena, dotovaná částkou 20 000 Kč. Nominační návrh se stručným zdůvodněním v rozsahu cca 2 stránky může zaslat jednotlivec i instituce na emailové adresy barek@natur.cuni.cz a peter.barath@metrohm.cz do 31. prosince 2024.

O udělení ceny bude rozhodovat komise ve složení: Ing. P. Barath, prof. J. Barek, prof. J. Labuda, prof. J. Ludvík, prof. L. Trnková, prof. P. Janoš, prof. P. Matějka. Rozhodnutí této komise je definitivní a nepodléhá žádnému dalšímu schvalování jinými orgány.

**Vyhlášení vítězů této soutěže proběhne na semináři firmy Metrohm Česká republika na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze v únoru 2025. Přesné datum bude oznámeno později. Budeme průběžně informovat e-mailem a na www stránkách firmy Metrohm, Chemických listů a České společnosti chemické.**

Za Metrohm Česká republika s.r.o.

Ing. Peter Barath, Ph.D.

Ředitel společnosti

Za Odbornou skupinu analytické chemie  
České společnosti chemické

prof. RNDr. Jiří Barek, CSc.

Vedoucí UNESCO laboratoře elektrochemie životního prostředí  
Katedra analytické chemie PŘF UK Praha

**PŘIPOJ SE K NĀM  
A OBJEV SVĚT  
CHEMIE!**

**ASOCIACE MLADÝCH  
CHEMIKŮ**

**CO NABÍZÍME?**

VZDĚLÁVÁNÍ: WORKSHOPY, SEMINÁŘE

NETWORKING: BUDUJ SÍŤ SPOJENÍ  
MEZI MLADÝMI CHEMIKY

SPOLEČENSKÉ UDÁLOŠTI:  
KONFERENCE, SOUTĚŽE

**STAŇ SE  
ČLEMEM AMCH**



**SLEDUJ NĀS  
ONLINE**



**ZAPOJ SE DO ORGANIZACE AKCÍ  
ASOCIACEMCSCH@GMAIL.COM**



Česká společnost chemická, Sekretariát a redakce Chemických listů  
Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1  
tel.: 221 082 383, redakce tel. 221 082 370  
e-mail: chem.spol@csvts.cz  
<http://www.csch.cz>

## Členské služby a výhody | Česká společnost chemická

Zapojení v České chemické společnosti, členu Asociace českých chemických společností, EuCheMS, ECTN-A a ČSVTS přináší individuálním chemikům, kromě vlastního členství v největší a nejstarší české profesní organizaci chemiků (zal. 1866):

### ROZŠÍŘTE SVÉ KONTAKTY

- celosvětově uznávanou příslušnost k jedné z nejstarších profesních organizací v chemii na světě,
- možnost zapojení se do práce a komunikace v jedné z místních či odborných poboček ČSCh,
- kontakty, informace, služby, možnosti, uplatnění,...
- přístup ke službám a slevám poskytovaným členskými organizacemi EuCheMS pro členy národních organizací,
- možnost přidruženého členství v IUPAC, a z toho plynoucí sleva u nakladatelství Blackwell a na konferencích sponzorovaných IUPAC, členové IUPAC dostávají časopis Chemistry International,
- možnost získání a doporučení členské přihlášky do významných zahraničních chemických společností (RSC, ACS, GDCh, GÖCh, SFC aj.),

### ZÚČASTNĚTE SE NÁRODNÍCH SJEZDŮ

- možnost zúčastnit se národních sjezdů s významnou slevou pro členy, které jsou pořádány každoročně, jednou na Slovensku jednou v ČR,

### ZLEPŠETE SVOJI INFORMOVANOST

- možnost dostávat 4x ročně zdarma tzv. „bulletinové číslo“ Chemických listů v tištěné či elektronické podobě,
- možnost dostávat 4x ročně, cestou elektronické pošty, členské upozornění na nejdůležitější události a aktuality,
- volný přístup k členskému magazínu ChemViews (<http://www.chemistryviews.org/>), jehož je ČSCh spoluvlastníkem, a to i na vašem mobilním telefonu apod.,
- členské informace o nových knihách, produktech a službách i o připravovaných odborných akcích na celém světě,
- informace o dění v evropských strukturách, jako např. EuCheMS, ECTN, EC2E2N a podobně,
- přístup k elektronickým informačním médiím Společnosti,
- volný přístup k tištěným verzím časopisů ChemPubSoc Europe v „knihovně ČSCh“, kterou po dohodě s PřF UK Praha zřídila ČSCh v Knihovně chemie (sídlicí v budově Hlavova 8/2030, Praha 2, Albertov, přízemí, v místnostech č. 148, 149, 150).

### ZAPOJTE SE DO ŘEŠENÍ GRANTŮ EU

- možnost participovat na řešení grantů s evropskými partnery, jako např. ECTN a partnerskými národními společnostmi.

### UŠETŘETE PENÍZE

- možnost objednání předplatného Chemických listů s významnými slevami,
- podstatné slevy u vložného na sjezdech a konferencích, jejichž oficiálním pořadatelem je ČSCh,
- významnou slevu (ca 90 %) na předplatné časopisu Chemistry – A European Journal, a dalších evropských časopisů konsorcia ChemPubSoc Europe, jichž je ČSCh spolujednatel,
- přístup ke službám a slevám poskytovaným členskými organizacemi EuCheMS pro členy národních organizací,
- možnost získání příležitostných slev obchodních firem spolupracujících s ČSCh,
- slevu při zapůjčení automobilu (až 35 %) u společností AVIS a HERTZ na celém světě, kromě Austrálie, a použití těchto automobilů na akcích v ČR za speciální tarify,
- sleva 20 % z publikačních poplatků v časopise ChemOpenChem, který společnost spoluvlastní.

### ZDŮRAZNĚTE SVOJI PROFESIONALITU

- možnost zažádání o evropskou nostrifikaci chemického vzdělání a odborné praxe spojenou s udělením titulu EurChem, platného v celé EU,

### BUĎTE VIDĚNI

- možnost uplatnit informace z vlastní pracovní činnosti (výsledky, novinky, inzerce, tisková oznámení aj.),
- možnost zveřejnění vlastního oznámení v rubrice Bulletinu Chemických listů „Práci hledají“,
- a řadu dalších služeb, které se teprve sjednávají,

### PRO FIRMY A PODNIKATELE

- Firmám, podnikům, institucím a dalším právnickým osobám nabízí ČSCh mimo jiné i tzv. „kolektivní členství“, při kterém se ve vzájemné smlouvě sjedná to, čím mohou pomoci jedna strana druhé. Podrobnosti na dotaz.



**Jsme Teva, Vaše jistota,  
Vaše místo k růstu.**

## **PŘIDEJ SE K NÁM!**

Jsme jedna z nejmodernějších farmaceutických firem v Evropě

- Vlastní vývojové centrum na účinné farmaceutické látky
- Laboratoře se špičkovými technologiemi
- Výzkumné projekty, zahraniční workshopy a stáže
- Bakalářské a diplomové práce
- Placený trainee program

## **DO OPAVSKÉHO ZÁVODU HLEDÁME:**

- Absolventy oboru chemie farmacie nebo přírodních věd
- Nabízíme uplatnění ve farmaceutické a v chemické výrobě, v R&D, laboratořích, kvalitě a dalších oborech

## **NABÍZÍME:**

- Trainee program
- Zaškolení, šance rychlého růstu – kariérní postup s jasně danými pravidly
- Roční bonus a každoroční navýšení mzdy
- Moderní technologie
- Spousta benefitů + Cafeterie 17 000 Kč ročně
- Skvělá dostupnost – vlak, autobus

T: 553 642 424 | [nabory@tevapharm.cz](mailto:nabory@tevapharm.cz) | [www.teva.jobs.cz](http://www.teva.jobs.cz)



---

**OBSAH****ÚVODNÍK**

- Náhoda ve vědeckém výzkumu** 465  
F. Švec

**REFERÁTY**

- Na pátém políčku periodické tabulky je bor** 466  
P. Holý

- Sarva roga nivarini, dar bohů** 475  
M. Jurášek a P. Drašar

**VÝUKA CHEMIE**

- Rozvoj kritického myšlení ve výuce chemie** 478  
V. Horálek a P. Distler

- Quo vadis*, chemie na osmiletých gymnáziích?** 484  
L. Wilhelm a P. Šmejkal

**CHEMICKÝ PRŮMYSL**

- Proveditelnost umístění velkokapacitních elektrolyzérů v tuzemských jaderných elektrárnách** 491  
M. Šilhan, V. Hakl, J. Stoklasa a P. Lukášová

---

**CONTENTS****EDITORIAL**

- Serendipity in Scientific Research** 465  
F. Švec

**REVIEW ARTICLES**

- The Fifth Position in the Periodic Table Belongs to Boron** 466  
P. Holý

- Sarva Roga Nivarini, Gift of the Gods** 475  
M. Jurášek and P. Drašar

**EDUCATION IN CHEMISTRY**

- Development of Critical Thinking in Chemistry Teaching** 478  
V. Horálek and P. Distler

- Quo Vadis*, Chemistry in Eight-Year Grammar Schools?** 484  
L. Wilhelm and P. Šmejkal

**CHEMICAL INDUSTRY**

- Feasibility of Placing Large-Scale Electrolyzers in Domestic Power Plants** 491  
M. Šilhan, V. Hakl, J. Stoklasa, and P. Lukášová

**CHEMICKÉ LISTY • ročník/volume 118 (2024), čís./no. 9 • LISTY CHEMICKÉ, roč./vol. 148, ČASOPIS PRO PRŮMYSL CHEMICKÝ, roč./vol. 134 • ISSN 0009-2770, ISSN 1213-7103 (e-verze) • evidenční číslo MK ČR E 321 • Vydává Česká společnost chemická jako časopis Asociace českých chemických společností ve spolupráci s VŠCHT Praha, s ČSPCH a ÚOCHB AV ČR za finanční podpory Rady vědeckých společností ČR, Akademie věd ČR, Nadace Český literární fond a kolektivních členů ČSCH • IČO 444715 • Published by the Czech Chemical Society • VEDOUČÍ REDAKTOR/EDITOR-IN-CHIEF: V. Vyskočil • REDAKTORI/EDITORS: J. Barek, E. Benešová, P. Drašar, P. Holý, P. Chuchvalec, M. Jurášek, Z. Kolská, B. Kratochvíl, J. Masák, J. Podešva, P. Šmejkal; Bulletin: P. Drašar; Webové stránky: R. Liboska, V. Vyskočil • ZAHRANIČNÍ A OBLASTNÍ REDAKTORI/FOREIGN AND REGIONAL EDITORS: F. Švec (USA, ČR) • TECHNICKÁ REDAKTORKA/EDITORIAL ASSISTANT: R. Řápková • REDAKČNÍ RADA/ADVISORY BOARD: K. Bláha, L. Červený, E. Dibuszová, L. Grubhoffer, J. Hanika, Z. Havlas, M. Hof, Z. Hostomský, J. Káš, M. Koman, P. Konvalinka, J. Kotek, J. Koubek, J. Málek, P. Matějka, K. Melzoch, V. Pačes, M. Pospíšil, V. Růžička, P. Slaviček, I. Stibor, J. Zima, T. Zima • ADRESA PRO ZASÍLÁNÍ PŘÍSPĚVKŮ/MANUSCRIPTS IN CZECH, SLOVAK OR ENGLISH CAN BE SENT TO: Chemické listy, Novotného Lávka 5, 116 68 Praha 1; tel./phone +420 221 082 370, e-mail: chem.listy@csvts.cz • INFORMACE O PŘEDPLATNÉM, OBJEDNÁVKY, PRODEJ JEDNOTLIVÝCH ČÍSEL A INZERCE/INFORMATION ADS: Sekretariát ČSCH, Novotného lávka 5, 116 68 Praha 1; tel. +420 221 082 383, e-mail: chem.spol@csvts.cz, chem.ekonom@csvts.cz • PLNÁ VERZE NA INTERNETU/FULL VERSION ON URL: <http://www.chemicke-listy.cz> • TISK: TG TISK s.r.o., 5. května 1010, 563 01 Lanškroun • SAZBA, ZLOM: ČSCH, Chemické listy • Užití tohoto díla se řídí mezinárodní licencí Creative Commons Attribution License 4.0 • Cena výtisku 180 Kč, roční plné předplatné 2024 (12 čísel) 1810 Kč, individuální členské předplatné pro členy ČSCH 900 Kč. Roční předplatné ve Slovenské republice 96 EUR (doručování via SCHS), individuální členské předplatné pro členy ČSCH 73 EUR (doručování via SCHS), 96 EUR + poštovné (individuální doručování), ceny jsou uvedeny včetně DPH • DISTRIBUTION ABROAD: KUBON & SAGNER, POB 34 01 08, D-80328 Munich, FRG • Pokyny pro autory najdete na <http://www.chemicke-listy.cz>, zkratky časopisů podle Chemical Abstract Service Source Index (viz <http://cassi.cas.org/search.jsp>) • Chemické listy obsahující Bulletin jsou zasílány zdarma všem individuálním a kolektivním členům ČSCH a ČSPCH v ČR i zahraničí, do všech relevantních knihoven v ČR a významným představitelům české chemie a chemického průmyslu; v rámci dohod o spolupráci i členům dalších odborných společností • Molekulární námět na obálce (Světlem aktivovaný komplex ruthenia vázaný na DNA kvadruplex, McQuaid K. T. a spol.; <https://www.rcsb.org/structure/5ls8>): M. Štětina • Dáno do tisku 3.9.2024.**



# ultra filter ultra fast

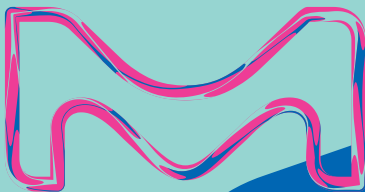
with Amicon® Ultra filters

Achieve the fastest and most efficient concentration or buffer exchange for even the most sensitive downstream applications with Amicon® Ultra filters featuring the following benefits:

- **High sample recovery:** 90% recovery from even the most dilute samples thanks to the low analyte binding of the used Ultracel® membranes
- **Reliability:** a true dead stop provides consistent recovery volumes without the risk of overspinning your precious samples to dryness
- **Less clogging, faster filtering:** the dual vertical membrane design is aligned with the filtrate rather than perpendicular to it
- **Quick processing time:** 10–30 minute spin times
- **Maximum sample retrieval:** the integrated reverse spin feature allows for optimal recovery, especially important with dilute and small volume samples

To learn more, please contact us or visit:

[SigmaAldrich.com/amicon](http://SigmaAldrich.com/amicon)



The life science business of Merck KGaA, Darmstadt, Germany operates as MilliporeSigma in the U.S. and Canada



**Millipore®**

Preparation, Separation, Filtration & Monitoring Products