

POHLED NEUROVĚD NA PROCESY UČENÍ

Zuzana Johanovská

Úvod

Tato seminární práce se zabývá poznatky neurověd z hlediska jejich využití v pedagogice. Vzhledem k tomu, že jde stále v mnoha ohledech o novou a poměrně ještě neprobádanou oblast [7], tak zatím příliš nedochází k propojení těchto poznatků se samotnou výukou ve třídách [1] – nicméně i uvědomění si a pochopení dosavadních zjištění může pomoci učitelům co nejefektivněji uzpůsobit výuku potřebám žákům se zohledněním fungování jejich nervové soustavy.

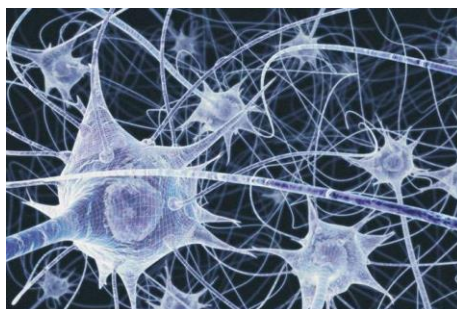
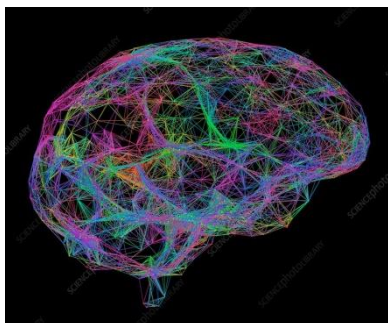
1. Neurobiologie učení obecně

Základem dnešního chápání učení z hlediska neurobiologie můžeme označit dle [2] tři základní, nyní již obecně přijímané hypotézy:

1) Hypotéza učení skrze neuronové sítě

Informace v lidském mozku (respektive jakési mentální reprezentace předmětů či konceptů) jsou dle této teorie uloženy v propojených nervových buňkách neboli neuronech v mozku (tedy v tzv. neuronové síti). Připomeňme, že činnost celé naší nervové soustavy spočívá právě zejména v posílání elektrochemického signálu po spojích mezi těmito neurony, které mohou být přitom umístěny i v odlišných částech mozku či těla. Tyto spoje a možnost přenosu informace pak mohou být v čase zesilovány či zeslabovány dle toho, jak často a jak intenzivně jsou využívány (dají se tedy trénovat v tomto ohledu vlastně podobně jako například svaly). Takovéto trénování a s ním spojená změna spojů se nazývá synaptická plasticita. Čím více jsou dané spoje využívány a čím častěji dochází k vybavování informací, tím více jsou spoje posíleny, a naopak nevyužívané spoje se časem zeslabují. Učením tak vyvoláváme v mozku skutečně přímo fyziologické změny, které jsou zodpovědné za naši paměť [2] (při prvním setkání s látkou pak dokonce takovéto zcela nové sítě, spoje a někdy i buňky vytváříme, jde tedy o tzv. neurogenезi, která je tedy také nedílnou součástí učení se).

Uvědomíme-li si tuto „fyzičnost“ celého procesu učení, tak dává smysl i to, že pro vhodnou funkci mozku nesmíme zapomínat i na vnější faktory jako je vhodná strava, dostatek spánku, dostatek pohybu a další fyzikální vlivy, které ovlivňují vhodným způsobem „chemii mozku“ (týká se konkrétně například dopaminu a kortizolu, zodpovědných za spokojenost a stres, více o tomto vlivu viz dále). Je to proto, že jen za vhodných podmínek může podávat náš mozek ty nejlepší výkony – a opět to vyplývá přímo z vědeckého chápání mozku. [4]



Ilustrační obrázky pro představu neuronových sítí [5] [6]

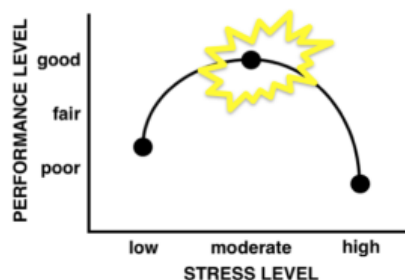
2) Hierarchical relational binding theory (hRBT) – Hierarchická teorie spojování souvislostí

Zkráceně jde popsat tak, že čím silnější je spojení mezi mozkovými neurony, tím je **pravděpodobnější, že** dojde k vybavení si uložené informace v dané síti. Při snaze o vybavení je totiž třeba, jak plyne z předchozího odstavce, propojit odlišné části mozku – a čím je mozek zvyklejší tyto části informace propojovat, tím to jde snáze.

Ve chvíli, kdy tak chceme zpracovat nějaký podnět a vybavit si jej z paměti, dojde k opětovné aktivaci míst, kde byly části informací o tomto podnětu uloženy k prvotnímu zpracování. Tyto střípky jsou následně seskládány dohromady v hippocampu, kde vzniká ucelená koncepce daného předmětu či myšlenky. Čím více různých částí mozku přitom k tomuto dojmu přispívá, tím je vytvořený mentální obraz komplexnější. Přispívat takto mohou například různé smyslové počítky, emoční vzpomínky atd. Pokud naopak tento obraz vytváří méně obsáhlá skupina uložených informací, je celkový dojem spíše vágní. Při učení je tedy jednoznačně lepší zapojovat co nejvíce smyslů, myšlenek a emocí, které se nám uloží na nová místa a přispějí tak k tvorbě komplexního dojmu [2], stejně tak je dobré látku co nejvíce propojovat s dalšími informacemi a tím jí posilovat a ukotvovat. I díky tomu mohou být ve výuce velmi vhodné například různé analogie či další moderní pedagogikou prosazované postupy, navazující nové znalosti na ty již známé a umožňující jejich snadnější upevnění a možnost si celý problém „osahat“ více smysly i emocemi.

3) Hypotéza pozornosti a emocí; neokoukaného a povědomého

V tom, co se náš mozek rozhodne na základě vnitřních priorit pozorně vnímat a co si tedy snáze zapamatujeme, hrají prokazatelně velkou roli emoce zpracované v amygdale, a to jak ty pozitivní, tak i negativní. Pro učení jsou samozřejmě žádoucí spíše ty pozitivní (ovšem pouze v rozumné intenzitě, která neodvede pozornost od tématu), které tak zajistí zvýšenou pozornost a angažovanost žáka [2]. S tím souvisí i přiměřená míra stresu – v přílišném klidu ani v napětí mozek nefunguje ideálně, zatímco při přiměřeném stresu vykazujeme nejlepší výkony (viz ilustrativní graf, vizuálně ukazující závislost školních výkonů na kortizolu, který je zodpovědný za stres).



Schematická závislost výkonu na úrovni stresu – ideální je přiměřená úroveň [4].

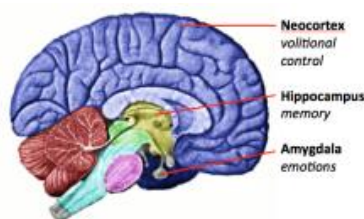
V dosažení této „zdravé míry stresu“ může obecně pomoci jakékoli vytažení z komfortní zóny. Problémem ale může být to, že na různé nezvyklé aktivity reagují jedinci různými způsoby. Tedy to, co u někoho způsobí zdravou míru soustředění, je pro někoho příliš stresující na to, aby mohl předvádět dobré výkony. Je tedy třeba na to pamatovat a pokoušet se výuku přizpůsobit různým typům lidí, a hlídat, co konkrétně svou snahou vyvoláváme [4].

Pozornost stejně tak zvyšuje dojem, že studenti řeší něco neokoukaného a určitým způsobem to tak pro ně vystupuje z řady. I zde jde vlastně o formu stresu, jemuž je nutné se přizpůsobit a daná informace je tak díky tomu opět snáze uložena do paměti. Na druhou stranu je ale třeba stále mít na paměti, že mimo tuto „novost“ je také nutná určitá míra provázanosti s předchozími znalostmi, na něž se dá navázat (v řeči neuronů bychom řekli, že se nová informace propojí s již existující sítí, a doplní tak již existující celek). Ideální je tedy něco, co navazuje na předchozí znalosti, ale zároveň

to působí určitým způsobem neokoukaně právě kvůli získání pozornosti. Stejně tak je vhodné, pokud chceme propojovat více komplexnějších konceptů (tedy několika nezávislých neuronových sítí), aby napřed byly dostatečně zažité a ukotvené před tím, než mezi nimi budeme vytvářet spoje [2].

Z těchto hypotéz plynou pro proces učení se zejména tři hlavní poznatky. Prvním je fakt, že učení se je fyziologický proces a je tedy nutné ho uvažovat v kontextu celého těla a situace, v níž se mozek nachází; druhý je ten, že opakování je skutečně matkou moudrosti, nebo v našem případě alespoň paměti. Třetí je potom to, že pokud při učení zesílíme přijímané podněty, zefektivníme výrazně celý proces, protože donutíme nervovou soustavu reagovat silněji. Velmi žádoucí je tak propojení několika smyslů při výuce (minimálně sluch s doplňujícím obrazem je tak zcela na místě), ideální je zapojit i emoční stránku u žáka a nutit ho využívat vyšší kognitivní funkce, obecně tedy co nejvíce zvýšit pozornost, aktivizovat a rozšířit výukovou situaci o více podnětů, než je pouhý monolog učitele. Pokud v hodině docílíme všech těchto stimulací, zesílení nervových spojů by dle teorie mělo proběhnout o to lépe a naše výuka a ukládání informací by tak mělo být mnohem efektivnější. [2] Ostatně i proto si lépe vybavíme nepodstatné události z vlastního života než informace z vyučovací hodiny a je to také důvod, proč jsou například někteří z nás schopni vyjmenovat všechny členy družiny Thorina Pavézy z Hobita, a zároveň si nejsme schopni v dějepise zapamatovat pár jmen a letopočtů. Klíčem je zde i na fyziologické úrovni zkrátka zájem, emoční angažovanost a v prvním případě i zkušenost, podpořená více smysly a myšlenkami (toto jsme skutečně prožili, nejen tomu naslouchali – přispívalo tedy více podnětů a neuronové spoje se tedy stimulovaly silněji). Je tedy jasné, že tyto vědecké poznatky z neurobiologie jasně mluví pro aktivní výuku – na to, které postupy jsou nejvhodnější, zatím věda odpověď nezná, nicméně další výzkum by mohl ještě lépe odhalit obecně neefektivnější pedagogické postupy dle změn v naší nervové soustavě.

Na závěr této kapitoly se podíváme souhrnně na mozek a jeho části, přispívající k procesu výuky. Kromě kortizolu a dalších vlivů vycházejících z jiných částí těla, je zde za „primitivní“ úroveň celého učení zodpovědná amygdala, která řídí emoce a dojmy. O něco vyšší kognitivní funkci má hippocampus – kromě propojení informací z různých částí mozku také silně souvisí s nižšími úrovněmi Bloomovy taxonomie, které jsou založené právě na vybavení si věcí z paměti a základním porozumění. Oproti tomu vyšší tvořivé a analytické stupně Bloomovy taxonomie působí přímo v kůře mozku, zodpovědné za ty nejvyšší mentální úkoly, vůli a rozhodování. Pokud ji dokážeme aktivovat, vytváří se zde nové spoje mezi neurony, případně se posilují již ty existující, a působí tedy v samotném jádru celého učení se. Proto jsou také tyto stupně společně s aktivním učením neurovědci výrazně doporučovány, protože takovýto vliv na kůru je velice žádoucí [4].

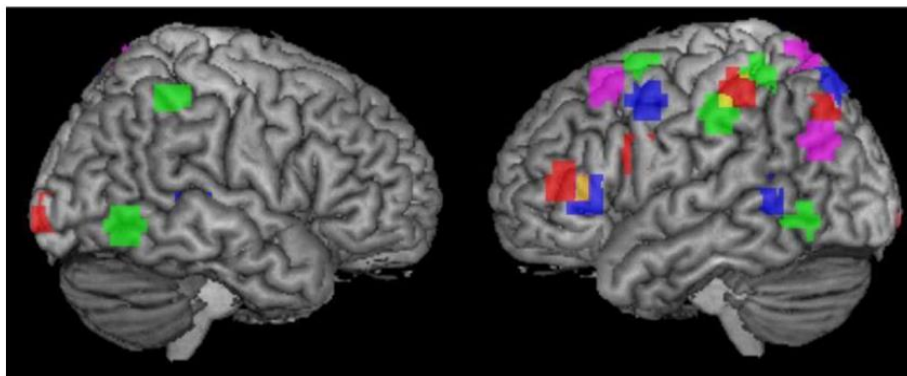


Je vhodné si také uvědomit, že mozek jako takový je stavěný zejména na to, aby vnímal a zpracovával okolní svět. K pochopení a vyšším mentálním úkonům jsou tak mnohdy využívány části, které byly původně určeny právě k pozorování a vnímání dějů co nás obklopují – i proto se některé oblasti lidského vědění o světě mohou zdát na první pohled „neintuitivní“ a složité. [8]

2. Neurobiologie učení zaměřená na fyziku

Kromě zkoumání obecných souvislostí aktivity mozku s učením probíhá i výzkum zaměřený přímo na děje mozku při učení se fyziky. Stále je zde co zkoumat a objevovat (výzkum srovnávající aktivitu mozku při různých stylech výuky je teprve v počátcích [7]) ale i tak už se objevují první zajímavé výsledky hodné pozornosti.

Zkoumání obvykle probíhá na základě funkční magnetické rezonance, při němž se sleduje, jaké části mozku jsou prokrvovány a tudíž aktivizovány [7] [8] [9]. Tato zkoumání pak ukázala (viz obrázek), že při práci s pojmy a koncepty z fyziky jsou zapojovány různé oblasti, u nichž je již poměrně dobře znám jejich význam. [8] Kromě oblastí spojených s pozorností a dalších nezbytných „provozních“ částí jde o oblasti zodpovědné za složitější kognitivní úkony. První je část spojená se slovy a mluvou (neboť tím jsou samozřejmě zadávány instrukce a takto k nám informace přichází), část zodpovědnou za vnímání a sledování pohybu, oblast pro vnímání periodicity, části umožňující počítání a matematické úkony a poslední část, zodpovědná obecně za uvědomování si „plynutí energie“.



Pravá a levá hemisféra s vyznačenými aktivizovanými oblastmi při uvažování o fyzikálních konceptech – růžové jsou části zodpovědné za vnímání pohybu, zelené za vnímání periodicity, červené jsou matematické a výpočetní části, modré jsou zodpovědné za vnímání „energetického toku“, žluté značí překryvy více oblastí. [8]

Část zodpovědná za „vnímání pohybu“ je aktivována nejvýrazněji u mechaniky a dalších oblastí, u nichž jsme zvyklí dané věci pozorovat, a tudíž si je i představovat. Stejně tak je aktivována i u konceptů které přímo nepozorujeme, ale umíme si je spojit s něčím jiným, co už pozorovat lze (platí to například pro vedení tepla, různé další síly a další pro náš mozek vlastně „snadno“ uchopitelné představy). [8]

Další částí je pak „oblast vnímání periodicity“ (spojeno zejména s vlněním či zvukem). Periodicita jako taková je ve světě kolem nás přirozená (střídání dne a noci, ročních období, příliv a odliv), mozek je tedy nastaven na to ji také určitým způsobem vnímal. Mimo jiné je také aktivována u hudby, u pravidelně se opakujících zvuků (například zvuk kopyt cválajícího koně, tikot hodin...), tance a dalších „pravidelných“ činností. I při uchopení těchto poměrně abstraktních pojmů tak dochází pravděpodobně podvědomě k propojení s těmito normálně vnímanými vjemy. [8]

„Matematická část“ je zodpovědná za vybavování si rovnic a jiného systematického matematického popisu užívaného ve fyzice (aktivuje se zejména u témat, v nichž je užívání rovnic u studentů velmi zažité, a která tak chápou právě díky tomuto popisu a tato část je tedy propojena přímo s pochopením některých konceptů, aniž by bylo nutné v danou chvíli doopravdy něco počítat) [8]

Zajímavá je pak část zodpovědná za vnímání toku energie, jako je tomu například u stejnosměrného proudu, světla, zvukových vln, přenosu tepla a dalšího. Je to tedy určitá oblast, v níž je společná představa „proudění“, objasňující a vyvolávající představu takto jinak poměrně abstraktních pojmů. [8]

Další výzkumy mohou být prováděny na základě porovnání změn v aktivitě těchto různých částí mozku před absolvováním kurzu z fyziky a po něm (tentokrát jsou zde pozorovány a ve výsledcích zahrnuty i části pro pozornost a další oblasti, spojené s učením obecně). Tyto výzkumy jsou prováděny zejména na vysokoškolských a starších studentech, i tak jsou ale výsledky zajímavé.

Výsledky z využitého článku [7] se vztahují k aktivní výuce, k tzv. „Modeling Instructions“ – více viz v další kapitole. Sami autoři na konci článku navrhuje, že by bylo dobré dát takovéto výsledky do porovnání i s jinými klasicky užívanými metodami výuky (frontální výuka aj.), stejně jako by bylo dobré zaměřit se na neurologické rozdíly mezi učením se různých oborů fyziky či přímo jiných věd. V tomto výzkumu však bylo jasně pozorováno, že před kurzem byla aktivizována zejména centra spojená s pozorností, řešením problémů (i matematických), plánováním a pracovní pamětí, ale i s částí zodpovědnou za mentální simulace a představivost. Po absolvování kurzu se zvýšila aktivita center zodpovědných za zapamatování, nicméně stejně tak zvýšenou aktivitu vykazovaly i části spojené s krátkodobou pamětí, schopností dělat rozhodnutí (u učení je tato část aktivována poměrně často) a částí zodpovědnou za sebehodnotící úvahy (nicméně i se schopností porozumět vyprávění, práci s mentálními obrazy a dalšími komplexními mentálními úkony). Je možné, že jsou to změny spojené s psychikou daných jedinců, kteří jsou si sebou jistější, nicméně by mohlo jít i o změny spojené se strategií k přístupu k řešení daných problémů [7]. Zajímavé je i to, že u studentů, kteří měli dle výsledků méně ucelené znalosti, převažovala centra založená na vizualizaci, zatímco ti úspěšnější měli aktivnější právě ona nově aktivovaná centra. Rozhodně tedy tyto výsledky ukazují to, že i během jednoho semestru výuky dochází ke změnám na samotné úrovni mozku, a tyto změny se u různě úspěšných studentů liší. [9]

3. Aplikace v pedagogice

Při rozvíjení metod, které by učitelům i žákům umožnily zefektivnit výuku, je více než vhodné zohlednit výše popsané poznatky. Samozřejmě to neznamená, že by pouhé pozorování funkce mozku bylo pro praktické aplikace zcela postačující - je potřeba zahrnout i poznatky z kognitivní psychologie, sociologie a dalších věd. Tímto komplexnějším přístupem se zabývá „Educational Neuroscience“, v překladu tedy Edukační neurověda, která se pokouší neurobiologické poznatky dosadit do tohoto kontextu, a umožnit jim tak proniknout do výuky ve větším měřítku. [1] Problémů, spojených s tím je však několik a z toho plyne i několik požadavků pro rozšíření těchto myšlenek:

- 1) Je třeba překlenout mezeru mezi vědou a samotnou výukou, což vyžaduje zejména větší angažovanost a snahu ze strany neurovědce tyto poznatky v dobře uchopitelné formě šířit dále [3]. Zejména to obnáší potřebu vzdělat v této problematice učitele a přiblížit jim ji dostatečně srozumitelně tak, aby ji mohli využít k obohacení a zefektivnění své výuky [1]. Dobře zvolené analogie a přirovnání pak mohou být dobrým nástrojem při předávání těchto informací kantorům s různým zaměřením, umožňující tyto koncepty dobře uchopit a pracovat s nimi [2]
- 2) Je třeba také čelit dojmu laické veřejnosti, že poznatky získané studiem neurověd jsou vlastně triviální a nepřinesou do výuky žádnou přidanou hodnotu [1], stejně tak prekonceptům o neurobiologii učení ze strany rodičů i kantorů, které nejsou však mnohdy založeny na zcela objektivních základech.
- 3) Také je potřeba upozorňovat na mýty kolující kolem neurověd v pedagogice, kterými se dnes někteří kantoři v dobré víře řídí. Obzvláště v počátečních stádiích výzkumu mozku si někteří učinili spíše spekulativní závěry, které se zakládají často na miskoncepcích ohledně fungování mozku (ty jsou navíc rozšířeny i mezi širokou laickou veřejností), a stejně tak je zde problém přílišného spoléhání se na osobní dojmy kantorů, které se ale ne vždy zakládají na aktuálních objektivních poznacích [2]. Příkladem takovýchto miskoncepcí může být rozlišování mezi žáky využívající „levou nebo pravou hemisféru“, případně rozlišování na vizuální, auditivní a kinetické typy žáků. Tato zjednodušení, která se sice mohou zdát v omezeném měřítku funkční, jsou ale obecně nedostačující, a zejména „škátulkování dětí“ do těchto kategorií není rozhodně vhodným výstupem rigorózní neurovědy [3].

O míře, ve které jsou aktuální znalosti edukační neurovědy zahrnuty v klasické výuce, se toho ví momentálně málo, nicméně v zahraničí se již objevují snahy rozšiřovat povědomí o této problematice [2]. Toto informování je velmi žádoucí i proto, že zatímco z poznatků neurověd poměrně jasně vyplývá vhodnost aktivní výuky (a již se i ukazuje dle výsledků, že si z ní studenti odnáší více), tak mnohdy v samotné výuce převládají stále spíše starší způsoby. [7]

V posledních letech se vyskytuje čím dál více různých přístupů k aktivnímu učení, z nichž jedno je tzv. Model Instructions přístup, který odpovídá ve velké míře aktuálním neurovědným poznatkům. Cílem této metody je učit studenty skrze postup, jakým pracují vědci [10]. Studenti se tak řízeně na různých modelových situacích snaží nalézt vhodné řešení problému, a tím se učí a vštěpují si základní představy. Následně v řešení těchto specifických situací nachází společné znaky, a tím postupují k obecnějšímu nadhledu a následnému zrevidování poznatků (uvědomění si limitací takto vytvořených modelů aj). Dochází tak tedy k vytváření vlastních ucelených představ a kritickému zamýšlení se [7]; nicméně součástí je i sdílení těchto představ se spolužáky, lektorem řízená týmová práce, diskuze aj. Oproti klasické výuce je zde minimum výkladu. Lektor je zde více jako průvodce, který zadává a koriguje aktivity, které již samotné studenty vedou dále. Ukazuje se, že oproti studentům s podobnými předpoklady v klasických třídách jsou touto metodou dosahovány významně lepší výsledky z hlediska pochopení konceptů vědy. [10]

4. Závěr

Na závěr ještě zopakují klíčové informace. Učení se je ve své podstatě „fyzický proces“, přičemž existují způsoby, jak ho zefektivnit, a to s důsledky přímo na úrovni jednotlivých neuronových sítí. Zde je jistě dobré zmínit jako důležité faktory pozornost, aktivizaci žáků (ideálně co nejvíce smysly, emoční angažovaností a dalšími podněty), ideální podmínky (odpočinek, vhodná strava, dostatek pohybu, přiměřená míra stresu aj.). Konkrétně při učení se fyziky pak můžeme pozorovat aktivitu ve vícero částech mozku, spojených s vnímáním fyzikálního světa kolem. Tato skutečnost může být pro pochopení v případech „neintuitivních“ zákonitostí nevýhodná, nicméně s uvědoměním si tohoto problému je možné i tyto nesnáze překlenout. Je také zajímavé uvědomit si, že některé koncepty se uchopí lépe skrze konkrétní vizualizace a představy (pohyb, tok energie) a jiné spíše ryze matematicky; případně jsou zde také pravděpodobně spoje, které si ani neuvědomujeme, ale které se asociují také s pozorovanými skutečnostmi (ukázkou může být část mozku zaměřená na vnímání cyklů a periodicity; ta totiž vnímá jak vlnění a podobné abstraktní koncepty, tak i poslouchané či jinak vnímané skutečnosti). Aktuálním učením se však aktivují i další části mozku (samozřejmě je pozornost, část zodpovědná za naslouchání a rozumění řeči, ale třeba i představivost, vizualizace aj.) Oproti situaci před osvojením nové látky narůstá aktivita center zodpovědných za plánování, rozhodování či sebeuvědomění. Dá se tedy předpokládat, že dochází k určitému získání nadhledu, a pozorované změny na mozku jsou důsledkem této skutečnosti.

Všechny tyto informace je jistě dobré si v pedagogice uvědomit a využívat jich k racionálnímu vytvoření optimálního efektivního výukového stylu. Zkoumání funkcí samotného mozku a neurobiologie mozku je tak velmi dobrým nástrojem k dosažení tohoto cíle (přestože se nesmí opomenout ani psychologie, sociologie a další vědy, které zde mají své nezastupitelné místo). Rozhodně se dá říci, že moderní pedagogika je se svou aktivní výukou v souladu s prozatímními poznatky o tom, jak mozek funguje, a momentálně je tak pedagogika na dobré cestě.

ZDROJE

- [1] Azilawati Jamaludin, Avishai Henik & James B. Hale (2019) Educational neuroscience: bridging theory and practice, *Learning: Research and Practice*, 5:2, 93-98, DOI: 10.1080/23735082.2019.1685027
- [2] Yuen Sze Michelle Tan & Joshua Johnstone Amiel (2019) Teachers learning to apply neuroscience to classroom instruction: case of professional development in British Columbia, *Professional Development in Education*, DOI: [10.1080/19415257.2019.1689522](https://doi.org/10.1080/19415257.2019.1689522)
- [3] Anna van der Meulen, Lydia Krabbendam & Doret de Ruyter (2015) Educational Neuroscience: Its Position, Aims and Expectations, *British Journal of Educational Studies*, 63:2, 229-243, DOI: 10.1080/00071005.2015.1036836
- [4] Daniela Kaufer (2011), Summary of the talk "What can Neuroscience Research Teach Us about Teaching?", How Students Learn series. Dostupné na: <https://gsi.berkeley.edu/gsi-guide-contents/learning-theory-research/neuroscience/> (dne 12.5.2021)
- [5] <https://www.sciencephoto.com/media/874678/view/brain-neural-network-illustration> (13.5.21)
- [6] <https://tnn.org.au/2018/03/whats-on-your-mind-a-snapshot-survey-of-the-nsw-theatre-sector/19lomaz14tqm6yhETFvbmha-2/> (13.5.21)
- [7] Eric Brewe, Jessica E. Bartley, Michael C. Riedel, Vashti Sawtelle, Taylor Salo, Emily R. Boevig, Elsa I. Bravo, Rosalie Odean, Alina Nazareth, Katherine L. Bottenhorn, Robert W. Laird, Matthew T. Sutherland, Shannon M. Pruden, Angela R. Laird. **Toward a Neurobiological Basis for Understanding Learning in University Modeling Instruction Physics Courses.** *Frontiers in ICT*, 2018; 5 DOI: [10.3389/fict.2018.00010](https://doi.org/10.3389/fict.2018.00010)
- [8] R. A. Mason, M.A. Just; Neural Representations of Physics Concepts; *Psychological Science* 2016, Vol. 27(6) 904–913
- [9] Bartley, Jessica E., "Exploring the Neural Mechanisms of Physics Learning" (2018). FIU Electronic Theses and Dissertations. 3889. <https://digitalcommons.fiu.edu/etd/3889>
- [10] C.M. Romanowicz, What Is Modeling Instruction?, NSTA Reports, 2016 National Science Teachers Association