



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích
Pedagogická fakulta
Katedra Psychologie

Bakalářská Práce

Aproximální numerický systém u
vysokoškolských studentů matematiky;
evokované potenciály

Vypracoval: Denis Veselý
Vedoucí práce: Mgr. Michala Plassová, Ph.D.

České Budějovice 2021

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury. Prohlašuji, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. v platném znění souhlasím se zveřejněním své bakalářské práce, a to v nezkrácené podobě fakultou elektronickou cestou ve veřejně přístupné části databáze STAG provozované Jihočeskou univerzitou v Českých Budějovicích na jejích internetových stránkách, a to se zachováním mého autorského práva k odevzdanému textu této kvalifikační práce. Souhlasím dále s tím, aby toutéž elektronickou cestou byly v souladu s uvedeným ustanovením zákona č. 111/1998 Sb. zveřejněny posudky školitele a oponentů práce i záznam o průběhu a výsledku obhajoby kvalifikační práce. Rovněž souhlasím s porovnáním textu mé kvalifikační práce s databází kvalifikačních prací Theses.cz provozovanou Národním registrem vysokoškolských kvalifikačních prací a systémem na odhalování plagiátů

V Českých Budějovicích dne

.....

Denis Veselý

Poděkování

Za pomoc a podporu rázu odborného, chtěl bych zde moc poděkovat doktorce Michale Plassové, magistru Jakubu Staňkovi a magistře Ivoně Říhové. Krom toho však děkuji i všem učitelům naší katedry, již vedli mne na této cestě a předali mi znalosti zde uplatněné. Dále můj vděk patří i mým nejbližším. Mé rodině, rodičům, bratru, ale i dalším členům, stejně tak jako přítelkyni, přátelům a vlastně všem těm, kdo stáli při mně v době psaní, i mimo ní.

Odůvodnění

Původní plán práce – měření v Neuropsychologické laboratoři JU – byl znemožněn z důvodu přetrvávající pandemie viru SARS-CoV-2. Předkládaná práce je tedy návrhem původního plánu. Jedná se tedy o práci teoretickou.

Abstrakt práce

Název práce: Aproximální numerický systém u vysokoškolských studentů matematiky; evokované potenciály

Autor práce: Denis Veselý

Vedoucí práce: Mgr. Michala Plassová, Ph.D.

Počet stran: 83

Počet zdrojů: 180

Abstrakt: Tato Bakalářská práce se zabývá návrhem popisu vlivu kompromisu rychlosti vůči (SAT) přesnosti, na výkon v testu aproximálně aritmetických úloh, u vysokoškolských studentů matematiky. Zaměřuje se jednak na popis neurálních korelátů zpracování čísla, měřených skrz mozkovou aktivitu, při výkonu zmiňovaných úloh. Stejně tak jako na behaviorální vliv, na výsledky těchto měření. Aproximální numerický systém (ANS), stojící za těmito korelátů, je jedním ze systémů, jež tvoří základ symbolické matematiky. Jako takový je tedy předmětem širokého výzkumného zájmu, napříč psychologickými disciplínami. Existuje však relativně nízký počet prací zabývajících se vlivem kompromisu rychlosti vůči přesnosti, jako zátěže na získaná data. A to i přesto, že se jedná o významný behaviorální fenomén kognitivních věd. Udává totiž tendenci jedince dosahovat nízkých reakčních časů na úkor přesnosti a vice versa. Práce se tedy věnuje popisu, jak aproximálního numerického systému, tak kompromisu rychlosti vůči přesnosti, navrhuje možnosti testování obou fenoménů a nastiňuje další možné směrování ANS výzkumů obdobného zaměření.

Klíčová slova: numerozita, aproximální numerický systém, reakční časy, kompromis rychlosti vůči přesnosti, evokované potenciály, EEG

Abstract of thesis

Title: Approximate number system in college students of math; event-related potential

Author: Denis Veselý

Supervisor: Mgr. Michala Plassová, Ph.D.

Number of pages: 83

Number of references: 180

Abstract: This bachelor thesis deal with design proposal of description of speed-accuracy tradeoff (SAT) influence, on approximal arithmetic tasks; at college math students. We focuses on description of neural correlates of number processing; measured through brain activity of performance at tasks mentioned above. Second interest of ours, aims for analysis of possible behavioral influence, arises in these tasks. Approximate number system (ANS) is one of theoretical neurocognitive systems, responsible for such processing. And thus, it creates basis for symbolic math understanding. As this, there is strong research interest for investigation of its functions. Nevertheless, it seems like there is just trifling number of works, which are focused on hypothetical SAT influence on collected evidence. Despite the fact, that SAT is rather important phenomenon in cognitive science. It describes individual's tendency, for trading reaction speed for reaction accuracy and vice versa. And so, this work pursue description of ANS and SAT, propose possibilities of testing both phenomena and also tries to illustrate theoretical future of researches of similar character.

Key words: numerosity, approximate number system, reakction time, speed-accuracy tradeoff, evoked potentials, EEG

Obsah

I.	Teoretická část	11
1	Nesymbolická reprezentace čísel	12
1.1	Numerozita.....	12
1.2	Aproximální numerický systém	12
1.3	Neuroanatomické ukotvení matematických schopností.....	14
1.4	Matematické schopnosti.....	15
1.5	Neurovědní modely matematických schopností	16
2	Schopnosti matematického výpočtu a odhadu	18
2.1.1	Principy osvojení matematických schopností	18
2.1.2	Jedna ku jedné (z originálu The one-one principle).....	18
2.1.3	Stálost pořadí (Z originálu The stable-order principle).....	19
2.1.4	Kardinální princip (z originálu The cardinal principle)	19
2.1.5	Abstraktní princip (z originálu The abstraction principle).....	19
2.1.6	Irelevance pořadí (z originálu The order-irrelevance principle)	19
2.2	Intelligence a inteligenční modely	20
2.2.1	Psychometrické inteligenční modely	20
2.2.2	Spearmanova dvoufaktorová teorie.....	20
2.2.3	Teorie primárních mentálních schopností L. L Thurstonea	21
2.2.4	Kognitivní inteligenční modely.....	21
2.2.5	Paradigma simple/choice reakčního času.....	22
2.3	Poruchy matematických schopností.....	22
3	Mentální chronometrie	24
3.1	Reakční časy	24
3.2	Moderní chronometrická paradigmatata	25
3.2.1	Počítačové testování.....	25
3.2.2	Binární paradigma	26

3.2.3	Inspekční čas	26
3.3	Hickův zákon	27
3.4	Kompromis přesnosti a rychlosti	28
3.5	Testy měření reakčních časů	29
4	Elektroencefalografie	33
4.1	Princip funkce EEG.....	33
4.2	Výstupní signál a EEG křivky.....	34
4.3	Morfologie vlny	35
4.4	Vlnová frekvenční pásma a jejich amplitudy	36
4.5	Evokované potenciály	37
4.6	Kvantifikace observovaných nálezů.....	39
4.7	Rušení biosignálů a artefakty	39
II.	Praktická část	40
5	Výzkumný návrh.....	41
5.1	Koncepce výzkumu.....	41
5.2	Výzkumný soubor	42
6	Výzkumné fáze	42
6.1	Testování matematické inteligence	42
6.1.1	Test struktury inteligence IST.....	42
6.1.2	Administrace a postup testování	45
6.1.3	Vyhodnocení výsledků.....	45
6.2	EEG experiment	46
6.2.1	Design experimentu	46
6.2.2	Průběh experimentu	48
6.3	Testování reakčního času	49
6.3.1	Výběr kognitivního testu.....	49
6.3.2	Průběh experimentu	50
7	Analýza dat	51

7.1	Preprocessing EEG dat	51
7.1.1	Decimace.....	51
7.1.2	Re-reference	52
7.1.3	Filtrace	52
7.1.4	Čištění od artefaktů	53
7.1.5	Baseline korekce a epochování	53
7.2	Analýza EEG dat.....	54
7.3	Analýza behaviorálních dat.....	56
7.3.1	CAF.....	56
8	Diskuze.....	58
9	Závěr	61
10	Shrnutí.....	62
	Seznam literatury	63
	Seznam obrázků	77
	Seznam příloh	78

ÚVOD

„Matematika je nuda.“; „K čemu mi to bude?“; „Matematika je nuda.“; „Stejně je k ničemu, krom sčítání, odčítání a možná procent, jí nikdy na nic nevyužiješ!“; „Matematika je nuda!“... S těmito, či obdobnými prohlášeními, se v životě dost dobře možná setkala většina z nás. Možná z úst někoho z okolí a třeba i z těch vlastních. Matematika je lidmi, a zejména pak studenty, v prostém životě uváděna v nemilost. A kolektivně zažitá sofizma říká, že je její hlubší studium jen ztráta času. Přesto by se, cum grano salis, dalo tvrdit, že je matematika jedním z vůbec nejpodstatnějších předmětů ve školních lavicích. Nejen že je totiž matematika jazykem vědy, bez které se žádná věda, ano, ani ta naše, neobejde. Ale člověk, a nejen ten, se s ní setkává na denní bázi a je s námi spojena více, než si pravděpodobně uvědomujeme.

Je tedy na místě položit si otázku, jak změnit náš přístup k ní, jak nám ji více přiblížit. Než se k takové otázce ale vůbec dostaneme, je záhodné se nejprve zaměřit na to, jak vlastně matematiku zpracováváme. Jaké neurokognitivní principy stojí za tím, že dokáže dědoušek správně určit nepoměr podílu sklizené jablečné úrody vůči babičce. Takovými principům se snažíme blíže porozumět v této práci, kde je zkoumáme a testujeme na těch nejpovolanějších. Na lidech, jež dobrovolně zasvětili svůj život utvářením těch nejviditelnějších teorémů, tím nejneepochopitelnějším způsobem. Na studentech matematiky.

Věříme, že mohou být prezentované poznatky hodnotným příspěvkem vedoucím jednak k lepšímu porozumění matematické kognice, a zejména jedním z kroků ke změně našeho pohledu na výuku i vnímání matematiky.

I. Teoretická část

1 Nesymbolická reprezentace čísel

1.1 Numerozita

Na otázku, jak dokáže lidský mozek reprezentovat číslo, odpovídá současný konsenzus kognitivní vědy množstvím experimentálně podložených evidencí (Sokolowski & Ansari, 2016). V současnosti se mluví o existenci evolučně determinovaného, neurálně-kognitivního systému (např. Dehaene et al., 2003; Dehaene & Brannon, 2011, Nieder & Dehaene, 2009; Piazza, 2010), který podmiňuje nejen percepci a komparaci nesymbolických množin, ale i samotnou reprezentaci čísla. Onen systém, kterému se budeme důkladněji věnovat v nadcházející podkapitole, a který je v literatuře souhrnně označován jako aproximální numerický systém (dále jen ANS), totiž zodpovídá za kognitivní schopnost zpracování nesymbolické množiny předmětů (ve smyslu skupiny předmětů; kupříkladu rybiček v akváriu), globálně označované pojmem numerozita (Dehaene et al., 2003; Haist, 2015).

Právě díky numerozitě jsme schopni bez složitějších numerických operací rozpoznat, zda v rybníku plave více kaprů či pstruhů, a to pouze jednoduchou estimací (Haist et al., 2015; Piazza, 2010). Jedná se tedy o schopnost intuitivní a jako takovou ji můžeme pozorovat i u ostatních non-humánních druhů¹.

Důležité je nicméně definovat si i samotné číslo². Jelikož mohou být pro reprezentaci stejné kvantity (množiny) použity zcela rozdílné senzorycké formáty (Piazza et al., 2006), je ze své podstaty číslo abstraktní, respektive formát-nezávislé. Tato jeho kondice je pak jedním z argumentů proto, že jsou jak nesymbolická, tak i ta symbolická čísla, zpracována stejným neurálním systémem, což vede právě ke vzniku teorie o existenci již zmiňovaného ANS (Sokolowski & Ansari, 2016).

1.2 Aproximální numerický systém

Jak již bylo řečeno, ANS je systémem stojícím za zpracováním nesymbolických množin (Sokolowski & Ansari, 2016), respektive systémem hrubého matematického odhadu a hrubého výpočtu, jehož silnou stránkou je zejména výška rychlosti tohoto odhadu (Plassová, 2019). Víme o něm nejen to, že se vyskytuje u lidí i zvířat³, nýbrž i to, že jde o systém vrozený. Výzkumy totiž potvrdily, že se spontánní projevy numerozity objevují i u dětí v kojeneckém období (např. Antell & Keating, 1983; Xu & Spelke, 2000; Cantlon et al., 2009). U zvířat poté experimentátoři zjistili výraznou preferenci čísla, jako pojítka při "match-to-sample" úloze, oproti dalším možným pojítkům (barvě, tvaru, aj.), a to i u jedince bez předchozího tréninku k

¹ Jmenovitě například u makaků rhesus (Brannon & Terrace, 2000)

² Nezaměňovat s číslicí, tedy symbolickým znakem pro zápis čísla

³ V přírodě, i laboratorních podmínkách (Piazza, 2010)

numerickému porozumění (Cantlon & Brannon, 2007). ANS tak není závislý na jazyku, ani na symbolickém vyjádření čísla (třeba arabskou číslicí "1"), neboť je schopnost zpracovat numerické symboly kulturně podmíněným produktem vývoje a učení (Ansari, 2008; Piazza, 2010).

Haist (2015) tvrdí, že z toho, co doposud o fungování ANS víme, můžeme vyzdvihnout dvě jeho základní vlastnosti. První vlastnost popisuje skutečnost, že jsme schopni aktivitu ANS nejspolehlivěji sledovat u veličin s počtem objektů vyšším než 4, jelikož se zpracování množin o přibližně 3 až 4 objektech řídí takzvanou subitací (z anglického subitizing), tedy rapidním a velmi přesným odhadem malého množství objektů. (ibid.) Pojem "subitace" prvně použil Kaufman (et al., 1949) a je v mozku zpracováván jiným neurálním systémem (viz kapitola "Neurofyziologické ukotvení matematických schopností"). Tato vlastnost, jinak také nazývána pojmem *aproximální aritmetika*, je předpokládaným důležitým faktorem v rozvoji komplexnějších matematických operací, jako sčítání či odčítání (Plassová, 2019). Druhou vlastností ANS je senzitivita vůči numerické distanci a vůči velikosti množiny. Numerická distance znamená absolutní rozdíl mezi první a druhou veličinou. Tedy ANS bude reagovat rychleji a přesněji spíše v případě, kdy bude rozlišovat 16 modrých a 6 oranžových teček (distance = 10), než u 8 modrých a 6 oranžových (distance = 2). Na druhou stranu, zůstane-li numerická distance stejná, ANS pracuje lépe s menší velikostí množiny. V případě porovnání 8 teček oproti 5 bude tedy ANS spolehlivější, nežli u porovnání 38 ku 35. (Haist et al., 2015)

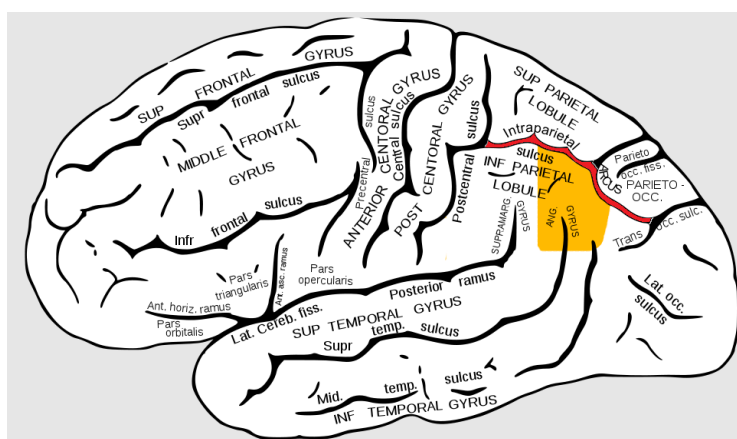
Někteří autoři (Mazzocco, & Feigenson, 2008; DeWind & Brannon, 2012; Roitman et al., 2012, citováno podle Plassová et al., 2017) proto tvrdí, že se ANS řídí Weber-Fetcherovým zákonem, jenž říká, že *je intenzita smyslového počítka logaritmicky závislá na intenzitě fyzikálního podnětu*. Jiné studie tuto hypotézu nicméně vyvrací (Sasanguie, Defever et al., 2013; Sasanguie, Gobel et al., 2013; Tibber et al., 2013; Park & Brannon, 2014, citováno podle Plassová et al., 2017).

V podkapitole "Numerozita" jsme zmiňovali abstraktnost čísla, jako jeden z argumentů pro existenci vrozeného numerického systému (ANS). To by však znamenalo, že musí ANS podmiňovat i matematiku symbolickou. Takovou myšlenku se pokusila testovat řada autorů a existuje tedy hned několik důkazů (například Piazza et al., 2007; Ansari, 2008; Piazza, 2010; Szudlarek & Brannon, 2017) svědčících o ANS, jako o fundamentálním systému a *sine qua non* pro vznik symbolické matematiky.

1.3 Neuroanatomické ukotvení matematických schopností

Dnešní doba neurovědeckých výzkumných prací je typická užíváním neurozobrazovacích metod, které jsou tu s námi však teprve od druhé poloviny dvacátého století (Plassová, 2019). Před objevem moderních metod pro zkoumání funkcí mozku tu ovšem byla jiná seriózní metoda - případové studie cerebrálních traumat. Zmíňme v tomto kontextu pro připomenutí například světoznámý případ Phinease Gage (O'Driscoll & Leach, 1998), nebo v roce 1861 provedenou pitvu muže neschopného smysluplné mluvy, která vedla k objevu Brocova centra řeči a motorické afázie (Buckingham, 2013).

Této formě vědeckého bádání se nevyhnula ani centra stojící za matematikou. Plassová (2017) ve svém článku píše, že: „V roce 1908 Lewandowsky a Stadelman publikovali vůbec první report o selektivním narušení matematických schopností v důsledku traumatického poranění hlavy a z něho plynoucího lokálního poškození mozku.“. Velmi významný je v tomto ohledu objev Gerstmannova, který popsal skupinu symptomů souhrnně známou jako Gerstmannův syndrom; projevující se *akalkulií*⁴, *agnózií*⁵ prstů a pravolevou *disorientací* (Rusconi & Cubelli, 2019; Ansari, 2008). Gerstmannův syndrom se objevuje při lézi v oblasti levého parietálního laloku (Mayer, 1999; Takayama et al., 1994). Od dob tohoto objevu vznikl nespočet článků připisující matematické schopnosti oblastem parietálního laloku. (Ansari, 2008) Tuto oblast moderní výzkumy ještě více specifikovaly na *bilaterální intraparietální sulky* (brázdy) pro zpracování nesymbolických veličin, levý *angulární gyrus* pro zpracování verbálního aspektu čísla a *bilaterální posteriorně superiorní parietální laloky*, podporující vizuální pozornost při zpracování čísla. (Dehaene et al., 2003)



Obrázek 1 Lokalizace intraparietálních sulků (červeně) a angulárního gyru (žlutě). (dostupné z: <https://bit.ly/3j7AFCy>, <https://bit.ly/3trpyJe>)

⁴ Neschopnost provedení jednoduchých matematických operací, více viz kapitola poruchy matematických schopností (Nevšimalová et al., 2002)

⁵ Porucha poznávání pomocí smyslů (Nevšimalová et al., 2002)

Pro účel naší práce je nicméně nejstěžejnější oblastí *horizontální segment intraparietálních sulků* (HIPS), respektive jejich střední část, ve které se nachází ANS (Dehaene & Brannon, 2011). HIPS je oblastí s majoritní aktivací, při zpracování hned několika odlišných matematických operací. Jako nejvíce aktivní se jeví v momentu, kdy je zapotřebí kvantitativní reprezentace čísla - jeho aktivita je vyšší při počítání, než v případě pouhého čtení numerických symbolů (Dehaene et al., 2003), Piazza (et al., 2004) nicméně aktivitu v HIPS naměřila i u množin teček, tedy u nesymbolické matematiky. Z dřívějších výzkumů se zdálo, že je HIPS aktivnější u odčítání, nežli u násobení (Chochon et al., 1999; Lee, 2000). Andres (et al., 2011) ve své studii kombinující fMRI a rTMS nicméně prokázal aktivitu stejně vysokou jak u sčítání, tak i násobení. Aktivita v HIPS byla mimo to zaznamenána také v případě, kdy byli probandi vystaveni expozici arabských číslic mezi shlukem písmen (Eger et al., 2003), což znovu potvrzuje citlivost této oblasti vůči číslu.

Krom samotného ANS, nacházejícího se bilaterálně v oblastech HIPS, existuje ovšem ještě jeden přidružený systém, v literatuře označovaný jako *systém paralelní individualizace*, případně *systém sledování objektu* (z anglického object tracking system), který je zodpovědný za subitaci množin o velikosti 3 až 4 prvků (Ansari et al., 2007; Hyde, 2011; Hyde & Spelke, 2011). Plassová (2019) ve své práci říká, že: „*Všechny studie naznačují, že pro ANS a systém sledování objektu existují specifické neurální mechanismy.*“ Z fMRI výzkumu Ansariho (et al., 2007) vyšlo najevo, že se při porovnání menší množiny prvků zvyšuje aktivita v pravé *temporoparietální junkci*, kdežto u porovnání větších množin se aktivita v této oblasti snižuje. K podobnému zjištění došli i Hyde a Spelke (2011), kteří ve své EEG studii přišli na to, že jsou při zpracování větších čísel zapojovány primárně intraparietální regiony, zatímco u menších čísel nejprve vizuální kortex a po čase pravá temporoparietální junkce. Experimentálně byla přítomnost podobného systému testována i na zvířatech. Jmenovitě například u živorodky duhové (Agrillo et al., 2012) byla prokázána schopnost rozlišit skupinu do čtyř prvků, po této hranici rozlišovací schopnost klesala. Neuroanatomie paralelního systému individualizace avšak stále není důkladně prozkoumána (Piazza, 2010).

1.4 Matematické schopnosti

Schopnost je ve slovníku Americké psychologické asociace definována jako *existence kompetence pro to provést specifický fyzický, nebo mentální akt* (VandenBos, 2015). Matematické schopnosti bývají poté v literatuře definovány, jako *soubor kognitivních schopností a exekutivních funkcí* (Wilson & Swanson, 2016; Mihajlovic, 2008).

Looi a Kadosh (2016) ve své práci rozdělují tyto schopnosti na "*esenciální*" (v originále "*core*") a "*neesenciální*" (v originále "*noncore*"). Jako esenciální označují ty schopnosti, které

nám poskytují kapacitu ke zpracování numerické informace, k reprezentaci a diskriminaci množin, i k samotnému počítání (*ibid.*). Tvoří tak základ pro učení se matematice (DeWind & Brannon, 2012) a jsou podporovány ANS (Looi & Cohen Kadosh, 2016). Předpokládá se, že mají jako takové vrozenou povahu, některé jsou nicméně v pozdějších vývojových stádiích osvojeny učním (geary, 2005). Za neesenciální poté Looi a Kadosh (2016) označují schopnosti, exekutivní funkce, jež jsou zásadní pro matematickou kognici, ale neslouží výhradně matematickému poznání (inhibiční kontrola, pracovní paměť, prostorová orientace, pozornost, jazykové kompetence a další). Jak esenciální, tak neesenciální schopnosti jsou považovány za trénovatelné (Uttal et al., 2013; Kuhn & Holling, 2014). Přestože existují studie (Goldin et al., 2014; Hawes et al., 2019) prokazující účinky tréninku neesenciálních schopností na úspěšnost v matematice, je tato spojitost stále málo prozkoumána (Looi & Cohen Kadosh, 2016).

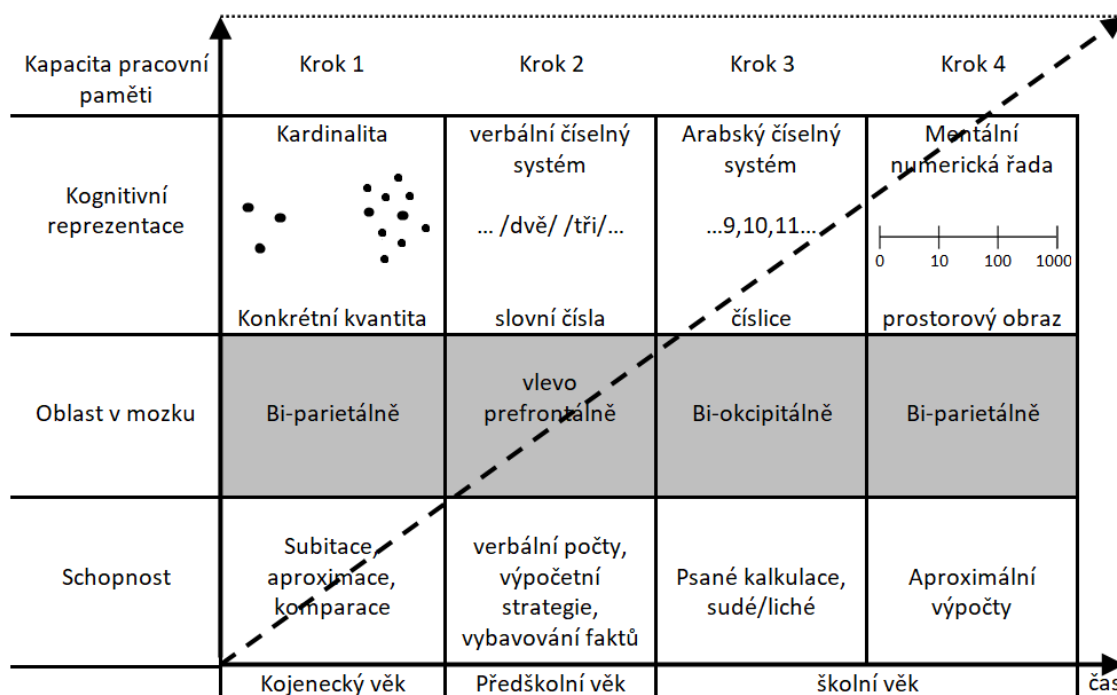
1.5 Neurovědní modely matematických schopností

Většina toho, co o matematice víme, pochází ze studií na dospělé populaci (Kaufmann et al., 2014). Z případových studií u dospělých pacientů s matematickými poruchami (např. Hittmair-Delazer et al., 1995; McCloskey, 1992, citováno podle Kaufmann et al., 2014) totiž vychází najevo, že by mohl být neurokognitivní systém uspořádán modulárně; že tedy spolu různé subsystémy úzce spolupracují, ale jsou na sobě vzájemně nezávislé (Kaufmann et al., 2014). Evidencí pro toto uspořádání je dvojí disociace, nalezená právě v oněch případových studiích. (Kaufmann et al., 2014; Geary, 1993) Dvojí disociace ve zkratce znamená ztrátu schopnosti A spolu se zachováním schopnosti B u pacienta X (Kaufmann et al., 2014; Plassová, 2019) a byla pozorována u *vybavování numerických faktů* (ve smyslu, že $2 \times 2 = 4$) oproti *aritmetickým konceptuálním znalostem* (pochopení principů základní aritmetiky), nebo u *procedurální aritmetické schopnosti* (provádění vícekrokové operace) oproti *znalosti numerických faktů* (Temple, 1991; Hittmair-Delazer et al., 1995, citováno podle Kaufmann et al. 2014).

Dehaene a Cohen (1995) tedy vytvořili model numerické kognice u dospělých lidí, nazývaný model trojího kódu (v originále triple code model). (Dehaene & Cohen, 1991; Dehaene et al., 2003; Dehaene et al., 2005). Tento model leží na třech hypotézách (Dehaene, 2001). Zaprvé, numerické informace mohou být mentálně manipulovány ve třech formátech: analogickou reprezentací množin (skrz distribuci čísel na mentální číselné řadě), verbálně (skrz slovní symbolické vyjádření čísla, jako třeba dvacet-čtyři) a vizuálně (skrz arabské číslice). Zadruhé, zpracované informace mohou být přímo překódovány z jednoho kódu na druhý. A zatřetí, každý výpočet spočívá na pevně dané sadě vstupních a výstupních kódů. (Dehaene, 2001) Mentální číselná řada, jež představuje první ze tří kódů daného systému, je takzvanou *analogovou mentální magnitudou* (Plassová, 2019). Mentální magnitudou se poté

rozumí počítatelné číslo, v mozku realizovaný symbol, který podléhá aritmetické manipulaci. Na rozdíl od "čísla" je mentální magnituda pregnatnějším vyjádřením pro množinu, protože má pouze tento jeden denotát, zatímco číslo může poukazovat jak na numerositu množiny, tak například na délku v metrech (Gallistel, 2011).

Existence tohoto modelu se však nepředpokládá v ranějších vývojových stádiích (Ansari, 2001). Dětský neurokognitivní systém je totiž stále ve vývinu, neurální sítě tudíž ještě nejsou specifikovány a funkční specifikace jednotlivých oblastí mozku se teprve diferencují (Kaufmann et al., 2014). Na základě asumpce, že během vývoje postupně nabýváme odlišných kognitivních reprezentací, tedy autoři von Aster a Shalev (2007) vytvořili vývojový model nazvaný "čtyřstupňový model vývoje numerické kognice" (v originále "four-step-developmental model of numerical cognition"). Tento systém, který částečně vychází z dospělého modelu trojího kódu, se řídí hierarchickým uspořádáním jednotlivých stádií, rozlišuje mezi sémantickou (verbální) a symbolickou (arabskou číslicí) reprezentací čísla, a u sémantického zpracování navíc rozlišuje na ranou a pozdější fázi (von Aster & Shalev, 2007).



Obrázek 2 Čtyřstupňový model vývoje numerické kognice (von Aster & Shalev, 2007).

2 Schopnosti matematického výpočtu a odhadu

2.1.1 Principy osvojení matematických schopností

Začněme tuto kapitolu prezentací jednoduchého experimentu, s kterým přišel během svých studií dětské kognice Jean Piaget (1952) a který byl od té doby mnohonásobně replikován (Gelman & Gallistel, 1986). V tomto experimentu dítěti prezentoval zdánlivě triviální úlohu, kdy mělo poměřit počet mincí ve dvou řadách. V první části úkolu byly řady mincí přesně nad sebou, takže většina dětí souhlasně odpovídala, že je počet mincí v obou řadách stejný. Kdežto v druhé půlce úlohy byla jedna řada posunuta tak, aby byla vizuálně delší, mezi každou mincí tím vznikla větší mezera, což zapříčinilo, že zatímco v prvním případě odpověděla většina dětí správně, v případě druhém tomu bylo přesně naopak. (Piaget, 1952) Tato úloha v Piagetovské teorii testovala takzvanou konzervaci čísla. Konzervace všeobecně značí vývojový úkol; schopnosti dítěte rozlišit, že i když dojde ke změně tvaru či vzdálenosti, zůstává magnituda stejná. Krom konzervace čísla, existuje například také konzervace hmotnosti, nebo tekutiny. (Hooper, 1969) Děti předškolního věku neselhávají jen v konverzaci čísla, ale ve všech konzervačních úlohách. S podobnou přesností, s jakou úlohu plní dospělí, se u dětí setkáváme až okolo 7-8 let; tento věk v Piagetově teorii odpovídá stádiu konkrétních operací. (Piaget, 1954, citováno podle Gelman & Gallistel, 1986)

Z těchto zjištění by se dalo usuzovat, že mladší děti zkrátka matematické schopnosti neovládají, že se rozvíjí až o několik let později, ve stádiu konkrétních operací. To ale, jak jsme si již představili v předešlých kapitolách, není úplnou pravdou. Americká psychologka Gelmanová, spolu se svým manželem Gallistelem, jako první kritizovali metodologii konzervačního testu a poukazovali na to, že neúspěch v oněch úlohách nemusí nutně plynout z absence matematických schopností, ale z nevhodnosti zadání pro mladší děti. (Gelman & Gallistel, 1986) Zároveň jako první prokázali zárodky aritmetických schopností u předškolních dětí (Gelman & Gallistel, 1986), které byly posléze hned několikrát potvrzeny v dalších studiích (např. Xu & Spelke, 2000; Cantlon et al., 2009). Proto se moderní vývojové teorie (např. Carey 2009, citováno podle Sarnecka & Wright, 2013) ubírají jiným směrem, než který přinesly Piagetovy výzkumy. Pro porozumění číslu je zapotřebí osvojit si základní matematické principy **jak počítat a co počítat** (Gelman & Gallistel, 1986).

2.1.2 Jedna ku jedné (z originálu The one-one principle)

Prvním z těchto principů je takzvaný princip Jedna ku jedné. Dítě musí umět ke každému jednotlivému objektu v množině přiřadit "nálepku" (z originálu tag) v podobně symbolického označení čísla (Gelman & Gallistel, 1986). Při tomto přiřazování musí dítě sledovat, který objekt již označilo a který je teprve označit třeba. Pouhá schopnost označení

množiny ale pro porozumění počítání nestačí, jelikož se je může naučit označovat mechanicky a bez hlubšího porozumění. Zároveň se v tomto principu může dítě dopustit 3 odlišných druhů chyb. Zaprvé může jeden objekt množiny buďto onálepkovat vícekrát, nebo naopak na jeho onálepkování zapomenout. Zadruhé, může jednu nálepku použít vícekrát, například dvakrát po sobě označit číslem 2. A konečně zatřetí, může pokazit celý proces koordinace nálepkování a značení již onálepkovaných objektů. (Gelman & Gallistel, 1986). Speciálně této podmínce se ve své práci věnovali Potter a Levy (1968), kteří zkoumali, zda jsou tříleté děti schopné spočítat každý objekt v řadě pouze jednou; výsledky dokázaly, že ano.

2.1.3 Stálost pořadí (Z originálu The stable-order principle)

Přiřazování numerických nálepek tedy musí probíhat v určeném pořadí, dítě musí brát při počítání ohled na koordinaci stálosti tohoto pořadí a zároveň nesmí zapomenout, kterou část množiny již pojmenovalo, udělat si stabilní seznam stejně tak dlouhý, jako je množina sama. Lidé obecně mají při tvorbě dlouhých seznamů slov či jiných položek vyžadujících stabilitu relativní obtíže. Takže je, dle Gelmanové a Gallistela, významnou složkou vývoje numerických schopností právě vypořádání se s praktickými problémy tohoto principu. (Gelman & Gallistel, 1986)

2.1.4 Kardinální princip (z originálu The cardinal principle)

Poslední z principů *jak počítat* říká, že má konečné číslo v řadě speciální význam, protože indikuje velikost celé množiny a jedná se tedy o kardinální číslo. Děti se často naučí počítat bez pochopení, že smyslem počítání je najít výslednou velikost množiny, reprezentovanou kardinálním číslem. Toto pochopení se obvykle vyvíjí po osvojení principu jedna ku jedné a principu stálosti pořadí. (Gelman & Gallistel, 1986, Sarnecka & Wright, 2013)

2.1.5 Abstraktní princip (z originálu The abstraction principle)

Kromě základních principů *jak počítat*, existují ještě dva principy *co počítat*. Abstraktní princip poukazuje na fakt, že tři předchozí principy mohou být aplikovány na jakoukoliv množinu entit, a to jak fyzických, tak i mentálních. Gast (1957, citováno podle Gelman & Gallistel, 1986) na základě poznatků ze svého výzkumu usuzuje, že teprve děti ve věku sedmi let mohou plně porozumět abstraktnímu principu, a tomu, co všechno je počítatelné. (Gelman & Gallistel, 1986)

2.1.6 Irelevance pořadí (z originálu The order-irrelevance principle)

Podle závěrečného principu nezáleží na tom, v jakém pořadí začneme množinu počítat, jaký objekt dostane jakou nálepkou, protože jsou tyto nálepky pouze ad hoc a výsledné kardinální

číslo bude vždy stejné. Dospělí rozumí třem principům jak počítat, a můžou tedy, pokud tyto tři principy dodrží, bez problému v jednom případě jako první započítat oranžovou rybkou, zatímco v druhém rybkou v barvě kachní modři. Pro dítě je princip irelevance pořadí podtržením abstraktního principu a pochopením některých z vlastností čísla, jako je právě formátová nezávislost. (Gelman & Gallistel, 1986)

2.2 Intelligence a inteligenční modely

Snahy o studium inteligence prostupují napříč celou kognitivní psychologií, a i když se definice odlišných autorů různí, základní myšlenka však zůstává stejná (Sternberg, 2002). Thurstone (1924) například říká, že je *inteligence, ve smyslu mentální vlastnosti, schopnost vyvolat ohnisko impulzů v jejich rané a nedokončené fázi formace, a je proto tedy schopností abstrakce*. Weschler (1958) pojímá svou definici z praktického hlediska, když říká, že jde o *globální koncept zahrnující jednotlivcovu schopnost jednat účelně, myslet racionálně a pracovat efektivně v prostředí*. Střední definici podává i Herbert Woodrow (citováno podle Sternberg, 2000), prezident americké psychologické asociace ze čtyřicátých let, podle něj je totiž inteligence zkrátka *kapacita pro nabytí kapacity*. Asi nejužitečnější shrnující definicí pojmu inteligence je však její prosté vymezení, jako *kombinace schopností učit se a zužitkovat naučené*, tedy kombinace učení ze zkušenosti a adaptace na situaci. Problematika definice tak komplexního konstruktů s sebou zároveň přináší značnou rozštěpenost a neucelenost inteligencí konceptů a teorií. Jednak protože různé teorie inteligence přicházejí z rozmanitých oblastí psychologie (vývojové, kognitivní, biologické apod.), a zároveň proto, že se každá z teorií zabývá odlišným aspektem lidského výkonu (Gardner, 2012). Gardner (ibid.) proto shrnuje teorie inteligence do několika kategorií:

2.2.1 Psychometrické inteligenční modely

Jedná se o modely založené na kvantitativních studiích performačních rozdílů. V takové studii je vysokému počtu probandů (např. N= 3484 pro základní modul testu I-S-T 2000 R) administrován soubor testů kognitivních schopností (slovních, číselných, praktických apod.), které jsou následně skórovány a interkorelovány, a z kterých jsou následně za pomoci faktorové analýzy vytvořeny dimenze inteligenčních schopností. (Gardner, 2012)

2.2.2 Spearmanova dvoufaktorová teorie

Za tvůrce faktorové analýzy je mnohými považován Charles Spearman (Bartholomew, 1995, Everitt & Howell, 2005), který roku 1904 publikoval článek (Spearman, 1904) o experimentu, ve kterém měřil skrz specifické úlohy senzorické dovednosti a inteligenci. Když mezi sebou skóry z těchto úloh zkoreloval, vyšel mu koeficient 1 (Brody & Brody 1976, citováno podle

Gardner, 2012). Daný výsledek byl pravděpodobně statistickou chybou, ale díky němu přišel na myšlenku, že inteligence sdílí jednu základní fundamentální funkci, kterou popsal *jako univerzální jednotu inteligenčních funkcí* (z originálního *universal unity of intellective functions*). (Wiseman, 1967, citováno podle Gardner, 2012) Tento objev dal vzniknout jeho dvou-faktorové teorii inteligence (Spearman, 1927), která říká, že je výkon v každé intelektuální úloze ovlivněn dvěma faktory: obecným faktorem inteligence „g“ (z anglického *general*) a specifickou schopností „s“ (z anglického *specific*). Dle této teorie, je obecný faktor „g“, ve větší či menší míře, nezbytný pro vykonávání jakýchkoli intelektuálních úkonů (Spearman, 1927). Ve vyjádření toho, co by měl g faktor znamenat, byl však Spearman nekonzistentní (Gardner & Clark, 1992). Jednou na něj referoval jako na mentální energii, jindy o něm mluvil jako o prosté charakteristice, společné pro inteligenční testy (Gardner, 2012).

2.2.3 Teorie primárních mentálních schopností L. L Thurstonea

Chicagský psycholog a zakladatel psychometrické společnosti Luis Thurstone vznesl vůči teorii obecného faktoru G silnou kritiku, když říkal, že v mysli jedince existuje ne jeden, ale hned několik faktorů zodpovědných za specifické aspekty mentální aktivity (Thurstone, 1947; Gardner & Clark, 1992). Thurstone rozšířil Spearmanovu faktorovou analýzu tak, aby byla schopna rozpoznat více faktorů. Zároveň také ukázal, že korelační matice potřebuje pro adekvátní změření pravděpodobně více než jeden faktor (Gardner, 2012; Everitt & Howell, 2005). Na základě těchto zjištění a následných experimentů tedy sestavil 7 faktorů, které nazval primární mentální schopnosti:

1. V (verbal comprehension) – verbální porozumění (například slovní zásoba)
2. N (number aptitude) – numerická schopnost (aritmetické uvažování)
3. S (spatial visualization) – prostorová vizualizace (ohýbání papíru)
4. M (memory) – paměť (zapamatování číselné řady)
5. R (inductive reasoning) – induktivní usuzování (doplnění do série čísel)
6. W (word fluency) – slovní plynulost (rychlé hledání slovíček)
7. P (perceptual speed) – percepční rychlost (hledání rozdílů v symbolech)

(Thurstone, 1924/2014).

2.2.4 Kognitivní inteligenční modely

Zatímco se psychometrické teorie zaměřují zejména na strukturu inteligence, kognitivní teorie zkoumají procesy za inteligencí stojící (Stenberg 1985, citováno podle Gardner, 2012; Sternberg, 1986). Spektrum kognitivních studií začíná u procesů zcela elementárních, jako je měření sensorických vjemů a končí procesy komplexními, například testováním rychlosti pracovní paměti (Gardner, 2012).

2.2.5 Paradigma simple/choice reakčního času

Pro účely této práce je důležité z kognitivních modelů zmínit zejména model navržený Arthurem Jensenem (1981; 1982). Jensen zjišťoval vztah mezi inteligencí a kognitivními operacemi za pomoci simple/choice testu. Tého úloze je v naší práci věnována celá kapitola (viz testy měření reakčního času), ve zkratce v ní však musí proband co nejrychleji zareagovat na specifický signál zmáčknutím (nebo naopak puštěním) tlačítka, kdy je mu měřen reakční čas a prodleva mezi expozicí signálu a jeho reakcí. (Jensen & Munro, 1979). Měření se dá následně rozdělit na reakční čas-RT (z anglického reaction time) a čas pohybu-MT (z anglického movement time), kdy by měl RT teoreticky reprezentovat čas na rozhodnutí a MT čas na vykonání tohoto rozhodnutí (Gardner, 2012). Jensen se při těchto experimentech opíral o práci německo-rakouského psychologa Erwina Rotha (1964), který zjistil, že RT negativně koreluje s lidskou inteligencí, a čím vyšší RT je, tím nižší by měl být intelekt daného jedince. Rothův experiment následně replikoval (Carlson & Jensen, 1982) s výsledkem $r = -0,30$. Což bylo jedním z důvodů, které jej podnítily k tomu dále pokračovat ve studiích tohoto paradigmatu; které navíc začal považovat za ideální způsob měření inteligence.

Tento předpoklad se však zdá být hned z několika důvodů ne zcela přesný. Byť by měl být teoreticky RT parametrem souvisejícím s inteligencí, mnoho jiných parametrů s ní při měřeních korelovalo stejně, či více. Například MT, který by měl pouze reflektovat vykonání zamýšlené odpovědi, koreloval s inteligencí také. Zároveň mělo testování problém jak se split-half, tak s test-retest reliabilitou. Pravděpodobně zatím nerozumíme simple/choice testu natolik, abychom mohli přesvědčivě říci, co přesně měří a abychom jej mohli použít na testování lidské inteligence. (Gardner, 2012)

2.3 Poruchy matematických schopností

V obecné rovině poruchy matematických schopností (dále jen poruchy MS) můžeme dělit na vrozené a získané (Ardila & Rosselli, 2002). Vrozená forma se řadí mezi specifické poruchy učení (dsm V, MKN-10). V odborné literatuře bývá označována jako dyskalkulie, vývojová akalkulie, či vývojová porucha aritmetického počítání (Fleischner & Garnett, 1993) a desátá revize mezinárodní klasifikace nemocí ji definuje jako: „*specifickou poruchu schopnosti počítat, která není vysvětlitelná pouze mentální retardací nebo nepostačující výukou. Defekt je především v neschopnosti běžného počítání, sčítání, odčítání, násobení a dělení, spíše než abstraktnějších početních úkonů, jako je algebra, trigonometrie, geometrie nebo vyšší matematika*“ (Světová zdravotnická organizace, 2004). Jedním z nejcharaktističtějších znaků dyskalkulie je porucha ve vybavování aritmetických faktů (Mazzocco et al., 2008, citováno podle Price & Ansari, 2013). Děti na třetím stupni prochází v matematice vývojovým posunem,

na prvním a druhém stupni řeší matematické úlohy procedurálními metodami (například sčítání, odčítání), ve třetí třídě (typicky okolo 7-8 let) si ale začínají utvářet kapacitu po fakta matematických operací, ze které si mohou rychle vybavit správnou odpověď (Ashcraft, 1982, citováno podle Price & Ansari, 2013). Dětem, které trpí dyskalkulií, tato schopnost nicméně chybí a musejí se tak spoléhat na procedurální metody výpočtu, což dále vede k používání nevhodných strategií řešení problému. (Price & Ansari, 2013) Zároveň však výzkumy podle Prince a Ansariho (ibid.) neprokázaly významný rozdíl mezi pracovní pamětí dyskalkuliků a normálně se vyvíjejících dětí. Za pravděpodobnou příčinu dyskalkulie se tedy kvůli její roli v aritmetickém zpracování považuje vizuálně-prostorová pozornost (Price & Ansari, 2013).

Za další navrženou příčinu vzniku dyskalkulie považují Rousselle a Noël (2007) takzvanou *hypotézu nedostatečného přístupu* (z originálu *access deficit hypothesis*). Lidé trpící dyskalkulií totiž dle jejich zjištění vykazují zhoršení u symbolické matematiky, zatímco je jejich nesymbolická komparace neporušená, což by mohlo předznamenávat poruchu v asociaci matematických symbolů a jejich mentálních magnitud (Rousselle a Noël, 2007). Na druhou stranu jiným výzkumníkům (Gilmore et al., 2010; Piazza et al., 2010) se korelaci mezi úrovní schopnosti odhadu množin (za níž zodpovídá ANS) a výši aritmetických znalostí najít podařilo. Leč Butterworth (2010) upozorňuje na prostý fakt, že **korelace neimplikuje kauzalitu**, a není tedy jasné, zdali je špatný výkon v aproximačních úlohách příčinou, anebo důsledkem dyskalkulie.

Poruchy MS se však často vyskytují i u jedinců, jejichž matematické schopnosti byly nejprve v normě (Kahn & Whitaker, 1991; Fleischner & Garnett, 1993; Ardila & Rosselli, 2002). Jmenovitě například u pacientů s fokální lézí mozku (Ardila & Rosselli, 2002), nebo pacientů trpících demencí (Deloche et al., 1995) či cévní mozkovou příhodou (Grimaldi & Jeanmonod, 2018). Takto nabyté formě poruchy MS se říká *akalkulie*, jako první tento termín použil Henschen (1925) pro popis poklesu ve schopnostech aritmetických operací, v důsledku *laesio traumatica* v oblasti angulárního gyru. Nahlédneme-li do slovníku neuropsychologie a klinické neurovědy (Loring, 2015), zjistíme, že je akalkulie definována jako *nabytá porucha aritmetických schopností, která je běžně asociována s alexií a agrafií pro čísla a je u ní narušeno jak verbální, tak psané počítání*. Hans Berger, na základě zkoumání 18 případů pacientů trpících nějakou formou poruchy MS, rozlišil akalkulii na primární a sekundární (Bergen, 1926, citováno podle Kahn & Whitaker, 1991). Primární akalkulí se myslí taková porucha MS, která vznikla lézí v oblasti *zodpovědné* (viz kapitola neuroanatomické ukotvení matematických schopností) za matematické úkony a je nezávislá na poškozeních v jiné části mozku. Sekundární akalkulie vzniká naopak při porušení center primárně s matematikou nesouvisejících, ale nepřímou jí ovlivňujících. Postihuje tedy *neesenciální matematické*

schopnosti (například jazyk, paměť...) tak, jak jsme si je vymezili v kapitole Matematické schopnosti. (Kahn & Whitaker, 1991; Ardila & Rosselli, 2002)

3 Mentální chronometrie

3.1 Reakční časy

Saul Sternberg (1969) píše, že *jednou z nejstarších myšlenek⁶ experimentální psychologie je, že čas mezi prezentací stimulu a odpovědí ovládají mentální procesy aranžované tak, aby každý nový z nich začal až po skončení toho předchozího*. Sumarizací doby trvání těchto fází je poté *reakční čas*, a determinujeme-li jeho jednotlivé aspekty, můžeme podle Stenberga (*ibid.*) přijít na zajímavé odpovědi ohledně původu oněch mentálních operací.

Slovník Americké psychologické společnosti reakční čas definuje jako *čas uplynulý od počátku prezentace stimulu do následného objevení odpovědi na tento stimul* (VandenBos, 2015). Podle stejného slovníku existuje více variant reakčních časů (včetně takzvaného „simple RT“ a „choice RT“) a může být použitý pro měření rozličného množství psychologických konstruktů (*ibid.*). Takovým měřením se věnuje *mentální chronometrie*, termín označující empirické studie reakčních časů. (Jensen, 2006)

Z historického hlediska se dá na měření reakčních časů dívat ze dvou úhlů pohledu. Diferenciální psychologie se zaměřila na rozdíly reakčních časů u odlišných osob, zatímco experimentální psychologie zkoumala účinky manipulace s různými vnějšími podmínkami, na změny v reakčním času jednotlivce. (Jensen, 2006) Avšak počátky měření reakčních časů se datují ještě před samotným vznikem psychologie, jako samostatné vědní disciplíny⁷, a to do roku 1850, kdy zkoumal německý fyziolog Hermann von Helmholtz přímo *rychlost vedení nervem* (hodnotící parametr elektromyografie, poukazující na rychlost šíření elektrochemického impulsu v neurální síti) u skokana volského, zavedením jedné elektrody do trojhlavého svalu lýtkového a druhé do příslušného nervu ve větší vzdálenosti. Ze svalových kontrakcí poté vyměřil rychlost vedení nervem na hodnotu zhruba 50-100 m/s (Helmholtz 1850, citováno podle Jensen, 2006; Helmholtz 1850, citováno podle Klein, 2003)

Tato měření později inspirovala ke své práci i nizozemského fyziologa Franze Donders (1868/1969), který při výzkumu rychlosti mentálních procesů vytvořil metodu vhodnou pro lidské probandy.

⁶ Tímto výrokem odkazoval na takzvanou *teorii fází akce a pozornosti* (např. Schall & Woodman, 2012)

⁷ Za založení experimentální psychologie, jako vědní disciplíny, bereme založení první psychologické laboratoře Wilhelmem Wundtem roku 1879

Donders v experimentu použil tři postupy:

1. První z nich měřil takzvaný simple reaction time (do češtiny přeložitelné jako jednoduchý reakční čas), neboli *SRT*, tedy jednu reakci (například zmáčknutí tlačítka) na jeden stimulus (jako třeba rozsvícení jedné žárovky)
2. Druhý postup byl komplikovanější a měřil choice reaction time (do češtiny přeložitelné jako výběrový), neboli *CRT*, kdy existuje více stimulů (například dvě žárovky) a pro každý z nich specifická reakce (rozsvítí-li se druhá žárovka, je třeba zmáčknout tlačítko levou rukou, případně pravou rukou při rozsvícení žárovky první)
3. Třetí postup, discrimination reaction time (do češtiny přeložitelné jako rozlišovací), neboli *DRT*, byl podobný *CRT*, s tím rozdílem, že v něm musel dotyčný proband rozlišit, na jaký stimulus reagovat a na jaký ne (například zmáčknutí tlačítka pouze při rozsvícení první žárovky)

Každý z těchto postupů zároveň aplikoval na tři rozdílné úlohy, které měřily tři odlišné smysly (taktilní, vizuální, auditivní), za pomoci stimulace příslušných smyslových orgánů. Pro výpočet rychlosti mentálního procesu poté Donders odečetl výsledek *SRT* od výsledku *CRT* (Donders, 1868/1969)

3.2 Moderní chronometrická paradigmatata

Arthur Jensen ve své knize *Clocking the mind* (2006) rozlišuje několik moderních paradigmat (ve smyslu postupů při aranžování stimulů a měření reakcí v jednotlivých testech), s nejfrekventovanějším výskytem při měření *RT*. Zároveň však zdůrazňuje, že byt' se s nimi v literatuře setkáváme často, nemusí být tato paradigmatata standardizována (*ibid.*).

3.2.1 Počítačové testování

Krom toho, že se v moderní době používají počítače jako nejčastější testovací prostředek (dalším může být například testování tužka-papír) u jiných paradigmat, je zároveň paradigmatem *per se* (Jensen, 2006). Před samotným vysvětlením principu paradigmatu počítačového testování je avšak nejprve nutné osvětlit si rozdíl mezi takzvaným *reakčním časem* a *časem odpovědi* (v zahraniční literatuře známým jako *responce time*), který jako první představil Robert Luce (1986/1991). Zatímco u měření reakčního času je experimentátorem přesně a explicitně stanovené, že se jedná o měření rychlosti reakce, u měření času odpovědi tomu tak není; testovaná osoba neví, že je na reakční čas testována a nevnímá tedy, že je u měření stěžejní rychlost jeho odpovědi, nacež dochází tak ke zpomalení ve výkonu (Jensen, 2006).

Čas odpovědi jednotlivé položky testu je právě tím parametrem, který počítačové testování měří nejlépe, a který je užitečný při zjišťování charakteristiky dané testové položky. Existuje totiž silný vztah mezi latencí času odpovědi a náročností položky (viz podkapitola Kompromis přesnosti a rychlosti). Tedy, *latence času odpovědi položky* může sloužit pro odhalení obtížnosti položky i v tom případě, že dosahuje testovaná skupina minimální chybovosti. (Jensen, 2006) Takovéto testování je tedy užitečné při stanovování obtížnostních úrovní testů.

3.2.2 Binární paradigma

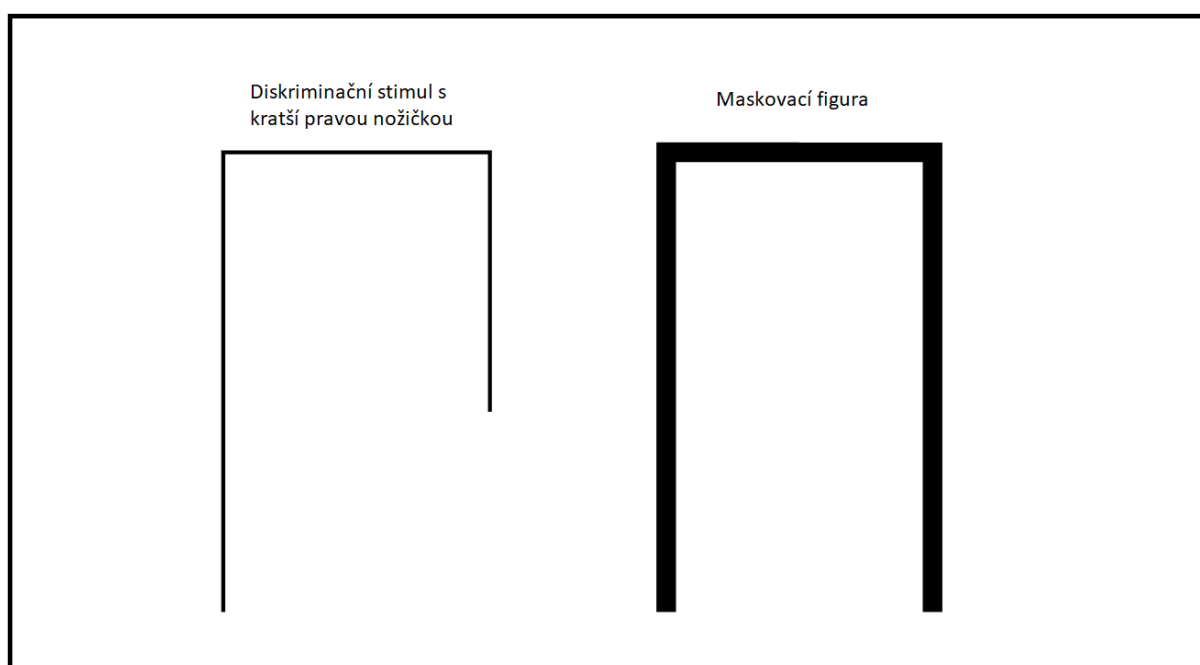
Toto paradigma představuje takovou testovou úlohu, na kterou může proband odpovědět binárně, tedy *ano/ne, pravda/lež, stejný/odlišný*. Je paradigmatickým velmi rozšířeným a stojí na něm celá řada dalších paradigmat a testů, má totiž výhodu ve své uniformní jednoduchosti a zároveň ve variabilitě stimulů, které při něm mohou být prezentovány.

Obvyklým postupem při administraci tohoto druhu testování je, že je dotyčný proband posazen před monitor, na který je prezentován daný stimulus, zatímco on odpovídá na konzoly o třech tlačítkách. Dvě z nich představují tlačítka výběrová (například ano/ne), třetí je takzvané tlačítko domovské (z anglického home key), které je v experimentu drženo po celou dobu klidového stavu. Proband tedy drží domovské tlačítko do momentu, kdy na monitoru zpozoruje nový stimulus, poté pouští domovské tlačítko a stlačuje patřičné tlačítko výběrové. Jak jsme již zmiňovali v podkapitole *Intelligence a inteligenční modely*, tento čas se v odborné literatuře nazývá *čas pohybu*. Celkový čas odpovědi na prezentovaný stimulus je poté součet reakčního (od prezentace do jejího uvědomění) a pohybového času (od uvědomění do vykonání patřičné odpovědi). (Jensen, 2006)

3.2.3 Inspekční čas

Lidský reakční čas zahrnuje dva hlavní aspekty, senzorický, ovlivňován aferentními nervy a motorický, ovlivňován nervy eferentními. (Jensen, 2006) Všechna výše prezentovaná paradigmatata s tímto rozvržením pracují a měří jak samotný reakční, tak i pohybový čas. Jenže jak Jensen (2006) píše, kdyby byl jeden z neurálních systémů méně propojený s funkcí informačního zpracování, zkresloval by tím měření kognitivních výkonů. Jensen (*idib.*) je tedy toho názoru, že by měl být zkoumán pouze aferentní nervový systém, tedy že by mělo být minimalizováno měření motorického reakčního času. Inspekční čas tuto podmínku naplňuje a je zároveň jedním z nejpozoruhodnějších a nejlépe prozkoumaných chronometrických paradigmat. (Jensen, 2006) Tvůrcem původního testu inspekčního času je australský kognitivní psycholog Douglas Vickers (et al., 1972), který jej použil ve studii při výzkumu percepčních ukazatelů výkonnosti a zpracování informace. Samotný test potom sestává z diskriminačního stimulu,

podobného velkému řeckému písmenu Π (Π), kdy je při prezentaci každé nové části úlohy jedna z vertikálních nožiček náhodně zobrazena jako viditelně kratší a probandovým cílem je označit která. Přičemž expozice tohoto stimulu trvá 100 ms, načež je překryt maskovací figurou, pro zamezení dalšímu mentálnímu zpracování. (Vickers et al., 1972). Jensen (2006) navíc zmiňuje, že je důležité, aby experimentátor probanda pečlivě instruoval, že zde nezáleží ani tolik na času odpovědi, jako především na její přesnosti, protože se měří primárně percepční rychlost, nikoliv reakční čas *per se*. Program je nastaven tak, aby zkrátil interval překrytí maskovací figurou v případě probandovy správné odpovědi a *vice versa*. Zároveň je počítačem měřena i lambda (λ), která v rámci tohoto paradigmatu představuje performační kritérium, tedy dobu expozice stimulu potřebnou k dosažení 97,5% úspěšnosti v úloze, průměrná λ v populaci je poté okolo 100 ms. (Jensen, 2006)



Obrázek 3 Ukázka stimulu a maskovací figura (Vickers et al., 1972).

3.3 Hickův zákon

Tento zákon vychází z původního experimentu britského psychologa Williama Hicka (Hick, 1958/2018), který prezentoval probandům sérii devíti CRT, o n množině eventuálních výběrů, na škále od dvou do desíti. Kdy mělo množství n výběru v každém testu nejprve charakter ascendentní (první test měl dvě možnosti, druhý tři...), poté descendentní (první test měl možností deset, druhý test devět...) a ve třetí sérii bylo pořadí randomizované (Hick, 1958/2018). Jinak řečeno, každý z testů obsahoval náhodné množství sensorických stimulů, které se pohybovalo v rozmezí od dvou do deseti.

Hick (*ibid.*) se v tomto experimentu opíral o *teorii informace*, respektive informační entropii, která je měřítkem efektivnosti, s kterou systém přenáší informace (VandenBos, 2015). Výsledek tohoto experimentu ukázal, že se CRT navyšuje spolu s množstvím nejistoty toho, který stimul se objeví příště. (Hick, 1958/2018) *Nejistota*, nebo také *neurčitost*, z anglického uncertainty, je poté v teorii informace měřena v bitech, kdy jeden bit představuje množství informace potřebné ke snížení neurčitosti o polovinu. Uvedeme-li tento model na příkladu zařízení o dvou pozicích, řekněme vypínače, obsahuje tento vypínač 1 bit a n vypínačů, poté n bitů, protože, binární logaritmus $2^n = n$. (Shannon, 1948) Odvozený Hickův zákon tedy říká, že *se čas vynaložený na zpracování stimulu zvyšuje úměrně k počtu stimulů v setu* (VandenBos, 2015), respektive *že zvyšující se počet možností zároveň navyšuje čas pro rozhodnutí logaritmicky* (Trueman et al., 2012).

3.4 Kompromis přesnosti a rychlosti

V každém CRT, tedy testu měřícím jak rychlost, tak přesnost, vniká mezi těmito dvěma proměnnými kompromis, takzvaný *speed-accuracy tradeoff*. (Jensen, 2006; Heitz, 2014; Bogacz et al., 2010; Samavatyan & Leth-Steensen, 2009) Míra tohoto kompromisu (SAT) je odvislá od *náročnosti úlohy* (Jensen, 2006; Luce, 1986/1991) a *inklinace jedince k jedné či druhé proměnné* (Jensen, 2006; Luce, 1986/1991). To znamená, že u člověka, pro nějž je testovaná úloha nenáročná a záleží mu na přesnosti odpovědi, bude výsledný SAT nižší a nakloněný spíše k větší přesnosti, na úkor delšího času provedení. Naopak v případě subjektivní náročnosti a inklinaci k rychlejším časům bude SAT vyšší a nakloněný k vyšší rychlosti, za cenu většího množství chyb⁸.

Mnozí odborníci (například Heitz, 2014; Bonnet & Dresp, 1993; Lappin & Disch, 1972; Wickelgren, 1977) se domnívají, že je měření SAT, jako závislé proměnné, lepší cestou, nežli měření samotných RT. Wood a Jennings (1976) ve své práci zdůrazňují SAT jako důležitý problém při interpretaci chronometrických experimentů. Lappin a Disch (1972) pokládají samotný RT za zcela nedostatečný pro posouzení percepčního zpracování RT testů. A specificky v rámci ANS pak například Park⁹ se Starnsem (2015) vznesli kritiku vůči měření ostrosti ANS za pomoci Weberova zlomku (viz podkapitola Aproximální numerický systém). Takovouto akvizici totiž považují za silně kontaminovanou SATem a navrhují alternativní difuzní model (*ibid.*).

Historicky první demonstrací kovariace RT s přesností odpovědi datuje Heitz (2014) do roku 1899, kde se jí věnovaly dvě soudobé práce Woodwortha (1899, citováno podle Heitz,

⁸ Takto zvolené inklinace jsou pouhým příkladem; stejně tak může být nenáročná a tíhnout k vyššímu RT a vice versa

⁹ Joonkoo Park je zároveň spoluautorem testu (Park & Brannon, 2014), jehož upravenou formu popisuje v praktické části

2014); a Martina a Müellera (1899, citováno podle Heitz, 2014). A první skutečnou demonstraci SAT poté najdeme v práci z roku 1911 (Heitz, 2014), kdy Henmon (1911) prezentoval CRT o dvou čarách různé délky, kdy na probandovi bylo reagovat příslušnou rukou na kratší (v 50 % případů), nebo delší čáru; byla-li kratší levá čára, reagoval levou rukou a vice versa (ibid.). Zjištění z této studie následně ve své disertační práci replikoval Garrett (1922; citováno podle Heitz, 2014), který tento fenomén označil právě jako speed-accuracy tradeoff (1922; citováno podle Heitz, 2014).

Byť jsme úvodem této podkapitoly prezentovali SAT, jako téměř všudypřítomný fenomén experimentální psychologie, některé studie (Halberda et al., 2012; Hellgren et al., 2013; Libertus et al., 2011) využívající *úlohu ostrosti ANS* nicméně našly jen nízké zatížení experimentálního tasku; je však nutné podotknout, že nevyužily ve svých analýzách žádnou z funkcí na výpočet SAT. Tyto poznatky nás přivádí k myšlence o ověření míry SAT v rámci našeho experimentu a blíže se jim budeme věnovat v praktické části této práce, kde si mimo jiné probereme i přístupy k výpočtu SAT.

3.5 Testy měření reakčních časů

Začátkem minulé podkapitoly jsme zmiňovali, že lze měření reakčních časů aplikovat na širokou škálu psychologických konstruktů napříč mnoha disciplínami. Raymond Klein (2003) například ve svém článku poskytl rozbor empirických výzkumů reakčních časů ve vztahu k hraniční poruše osobnosti; Michal Postner (2005) zase vidí mentální chronometrii jako užitečný nástroj neurovědy. Jak jsme si představili, způsobů měření reakčních časů existuje mnoho, a je tedy podstatné vybrat ten nejvhodnější.

Jednoduchý reakční čas-SRT má výhodu v tom, že slouží jako „základní hodnota“, respektive jako čistý údaj o reakčním čase, neovlivněn dalšími mentálními procesy, jako například rozhodováním (Luce, 1986/1991), a je tedy používán zejména jako ukazatel času detekce signálu (Kornblum, 1973). Přestože by se však mělo jednat o metodu měřící čistý RT, stále existují omezení, která přesnost SRT narušují (Kornblum, 1973).

Pro dosažení nejčistšího možného měření reakčních časů je totiž nezbytné použít SRT s nahodilým výskytem signálního stimulu. Jenže takový SRT musí být kontrolován dobře specifikovaným randomizačním procesem. (Luce, 1986/1991) Americký profesor matematické psychologie Robert Luce (1986/1991) uvádí, že takovým procesem bude pravděpodobně *proces Poissonův*, který je matematickým rozdělením pravděpodobnosti, ve kterém je distribuce objektů exponenciální. Poissonův proces má konstantní takzvanou *hazardní funkci*. Jedná se o matematickou formuli popisující pravděpodobnost výskytu události v určeném časovém intervalu, která se stává konstantní právě při exponenciální distribuci; což je pro nás žádoucí, protože by se při její snižující tendenci zároveň snižovala i míra nahodilosti. V SRT, které se

řídí Poissonovým procesem, tedy čas výskytu signálního stimulu, neposkytuje žádnou informaci o výskytu nadcházejícím a každý z dalších výskytů je tedy čistě nahodilý a při měření teoreticky přesný. Takto randomizovaný test má však jiný problém, a to ten, že může vést k překrývání stimulů, což Luce (1986/1991) vidí buďto jako chybu tohoto testového modelu per se, nebo jako něco, co je vlastní reálnému světu, ve kterém se také vyskytují události v domněle nahodilém uspořádání (Luce, 1986/1991).

Účelem měření reakčního času je v našem případě nicméně prosté zjištění rychlosti a přesnosti reakcí a je tedy lepší se těmto komplikacím vyhnout. Jednou z cest jak toho docílit je anulovat hazardní funkci vždy při každé nové prezentaci stimulu a znovu ji přivést do původního konstantního stavu po ukončení expozice signálního stimulu. Tím se zamezí překrývání stimulů, protože je pravděpodobnost výskytu nového signálu po dobu probíhajícího signálu uměle nastavena na nulovou hodnotu.

Další možností je opětovné nastavení hazardní funkce posunout ještě po odpovědi na prezentovaný signál, například její příchod podmínit stlačením příslušné klávesy, nebo vymezeným časovým intervalem, což dává možnost probandovi odpočinout si v mezičase a připravit se na další prezentaci signálu. Při použití tohoto modelu se často přidává takzvaný varovný signál, který upozorní probanda, že se hazardní funkce vrátila do konstantní podoby a je třeba dávat pozor na příchod dalšího signálu. Takovým varovným signálem může být například krátká prezentace stimulu v barvě kontrastní k barvě testového stimulu, nebo auditivní signál o dostatečné intenzitě. Luce (1986/1991) navrhuje jako nejlepší variantu takový varovný signál, který má charakter odpočtu (tři krátké signalizace za sebou). Interval mezi varovným signálem a prezentací testového stimulu se poté v zahraniční literatuře (viz například Sternberg, 1969; Kornblum, 1973; Niemi & Näätänen, 1981; Meyer et al., 1988; Luce, 1986/1991; Jensen, 2006) říká *foreperiod*, což lze do češtiny volně přeložit jako před-období.

I modelů pro aplikaci před-období existuje spousta (viz například Kornblum, 1973; Niemi & Näätänen, 1981; Luce, 1986/1991; Jensen, 2006), zmiňme například *variabilní před-období*. V takovémto případě je totiž čas po prezentaci varovného signálu naprosto neužitečný (nemůže si například odpočítávat, kdy zhruba přijde signální stimul) a probandovi tedy nezbyvá, než se snažit o co nejrychlejší reakci. Na druhou stranu ale může takové před-období trvat tak dlouho, že začne proband ztrácet na pozornosti, což může negativně zkreslovat výsledky. (Luce, 1986/1991) Existují tedy i *nenáhodné modely SRT*, které se neřídí Poissonovým procesem. Jedním z nich je takzvaný *catch trial*, také nazývaný jako **go/nogo test**. V tom je v rychlém sledu prezentována celá baterie stimulů, řekněme kupříkladu zelených čtverců na neutrálním pozadí, která však obsahuje i stimuly falešné, například čtverce červené barvy. Úkolem probanda je poté co nejrychleji reagovat na prezentaci zelených čtverců a ignorovat přitom čtverce červené, které slouží jako ukazatel toho, zdali proband skutečně pečlivě čeká na testový signál. (Luce, 1986/1991) Za validní jsou poté považována data s co

nejmenším počtem reakcí na falešné signály a některé výzkumy (Kohfeld, Santee, & Wallace, 1981, citováno podle Luce, 1986/1991) jdou tak daleko, že vyřazují veškerá data, byť jen s jednou špatnou reakcí.

Luce (1986/1991) nicméně namítá to, že je lidem tendence k falešné odpovědi vlastní – *ne vždy když v autě brzdíte, vidíte nutně v mlze zabředlou překážku* – a ještě o to více, jedná-li se o situaci tlačící nás k rychlé reakci. V některých situacích je totiž lepší zareagovat raději i bez stoprocentní jistoty, jelikož by v opačném případě mohl nastat scénář katastrofičtější, než jen opotřebením brzdových destiček. Podle Luce (1986/1991) jsou lidé schopni subjektivně posouvat kritéria pro vlastní rozhodování a alterovat tak míru k tendenci vytvořit falešnou odpověď. *Což s sebou nicméně přináší i delší čas odpovědi a nastává zde tedy výše popisovaný speed-accuracy tradeoff* (Nadel, 2006; Luce, 1986/1991; Heitz, 2014).

Jak model s randomizovaným, tak i model s konstantním před-obdobím mají bezesporu své klady i zápory, náhodné STR se vyznačuje silně variabilní délkou intervalů, která může vést jednak k poklesu v pozornosti, či naopak navyšování anticipace a *chybě předčasně odpovědi*¹⁰; konstantní STR může na druhou stranu podávat lehce zkreslené výsledky, způsobené obavou ze špatné odpovědi, která uměle navyšuje rozhodovací čas.

Byť pracující na stejném principu, komplexnější formu měření reakčních časů představuje *výběrový reakční čas-CRT*. Nejzásadnější rozdíl mezi oběma modely je ten, že u CRT existuje vždy více než jedna reakce na více než jeden podnět (Luce, 1986/1991). Luce (1986/1991) zde znovu používá přirovnání k automobilu, když říká, že *nebezpečí na vozovce kolikrát nestačí pouze detekovat, ale je zároveň třeba vyhodnotit, jak vůči němu reagovat; jestli brzdit, přidat na rychlosti, nebo stočit volant stranou*. Stejně tak jako SRT má nicméně i CRT často varovné signály, před-období, i další podobnosti (Nadel, 2006). Luce (1986/1991) tedy popisuje pět nových možností, které vzešly z komplexnějšího uspořádání modelu CRT:

¹⁰ Při stlačení příslušného tlačítka v před-období; opakem je chyba pozdní odpovědi, tedy až po prezentaci signálního stimulu, za podmínky, že konec této prezentace není podmíněn reakcí

1. Na rozdíl od STR je kompletně v pořádku použít konstantní před-období, protože musí proband pro diskriminaci stimulů počkat na signál tak jako tak, a není tak potřeba obávat se zkreslení dat při jeho anticipaci.
2. Experimentátor má díky kontrole nad sekvencí prezentovaných signálů možnost získat informace o rozhodovacích strategiích probandů, což může být užitečnou informací pro další výzkum.
3. Oproti SRT obsahuje CRT více druhů¹¹ chyb, které mohou jak probandovi, tak experimentátorovi poskytnout cenný feedback o přesnosti odpovědi
4. Vztah mezi signály může být manipulován (například navýšením intenzity podnětu u jednoho a snížením u druhého) pro zjištění, jak tato proměnná ovlivňuje behaviorální reakce.
5. Podobně jako tomu je u SRT i zde existuje mnoho možností, jakou podobu může nabývat signální stimul. Co je ale oproti SRT rozdílné, je četnost alternativních vzájemných stavů všech potenciálních stimulů a reakcí na ně.

(Luce, 1986/1991)

Oba modely testování reakčního času jsou zdrojem užitečných dat, jedině SRT nám poskytuje informace o základní, čisté formě reakce; CRT na druhou stranu nabízí komplexnější data a větší variabilitu při práci s nimi. V praktické části se budeme blíže věnovat testové formě, kterou jsme pro tuto práci vybrali a přiblížíme si důvody, které k tomuto výběru vedly.

¹¹ Krom chyby předčasné a pozdní odpovědi, také chyby neadekvátní reakce na stimul

4 Elektroencefalografie

4.1 Princip funkce EEG

Historie vzniku elektroencefalografu – EEG nás vezme zpět do tehdejší Výmarské republiky. Tamní psychiatr, se sklony k mysticismu (Farnsworth, 2016), a s téměř obsedantní touhou po prokázání fyzického ukotvení mysli (La Vaque, 1999), zde roku 1924 zaznamenal na kůži pacienta s trepanací¹² lebky, minutu trvající vibrace svého zrcadlového galvanometru. A naměřil tak vůbec poprvé v historii elektrický signál mozku (La Vaque, 1999; Haas, 2003). O pět let později publikoval tento psychiatr – Hans Berger – článek *O elektroencefalogramu lidí*¹³ (Berger, 1929 citováno podle La Vaque, 1999), ve kterém představil elektroencefalograf – EEG v takové podobě, která se od moderních EEG přístrojů principiálně příliš neliší (Farnsworth, 2016).

EEG v zásadě funguje na principu záznamu bioelektrického signálu lidského skalpu¹⁴. Tento signál je poté produktem přibližně jednoho sta miliard neuronů (Herculano-Houzel, 2009), respektive produktem jejich synaptické činnosti¹⁵ (Mecarelli, 2019). EEG je tak neinvazivní¹⁶ metodou záznamu mozkové aktivity a nepostradatelnou neurovizuální technikou (Mecarelli, 2019), jejíž výhoda tkví ve velmi vysoké (v řádech milisekund) rychlosti takzvaného *časového rozlišení*, což je ukazatel toho, kdy přesně se v čase odehrála daná mozková aktivita. (Mecarelli, 2019) EEG proto nalézá uplatnění jak v klinické praxi, při diagnostice epilepsie, neurodegenerativních onemocnění, spánkových poruch, či vyšetření léze korových center mozku, tak i v experimentální oblasti. (viz například St. Louis et al., 2016; Tan et al., 2012; Mecarelli, 2019)

Samotné zařízení poté sestává ze skalpových elektrod, které zaznamenaný signál přenesou do zesilovače, kde je zesílen a za pomoci filtrů¹⁷ očištěn do finální podoby, která je následně zaznamenaná buďto na papír, u starších analogových modelů, nebo v moderní době digitálně na úložný disk počítače. (Mecarelli, 2019)

¹² Chirurgický zákrok navrtání lebky

¹³ Z německého Über das elektroencephalogramm des Menschen

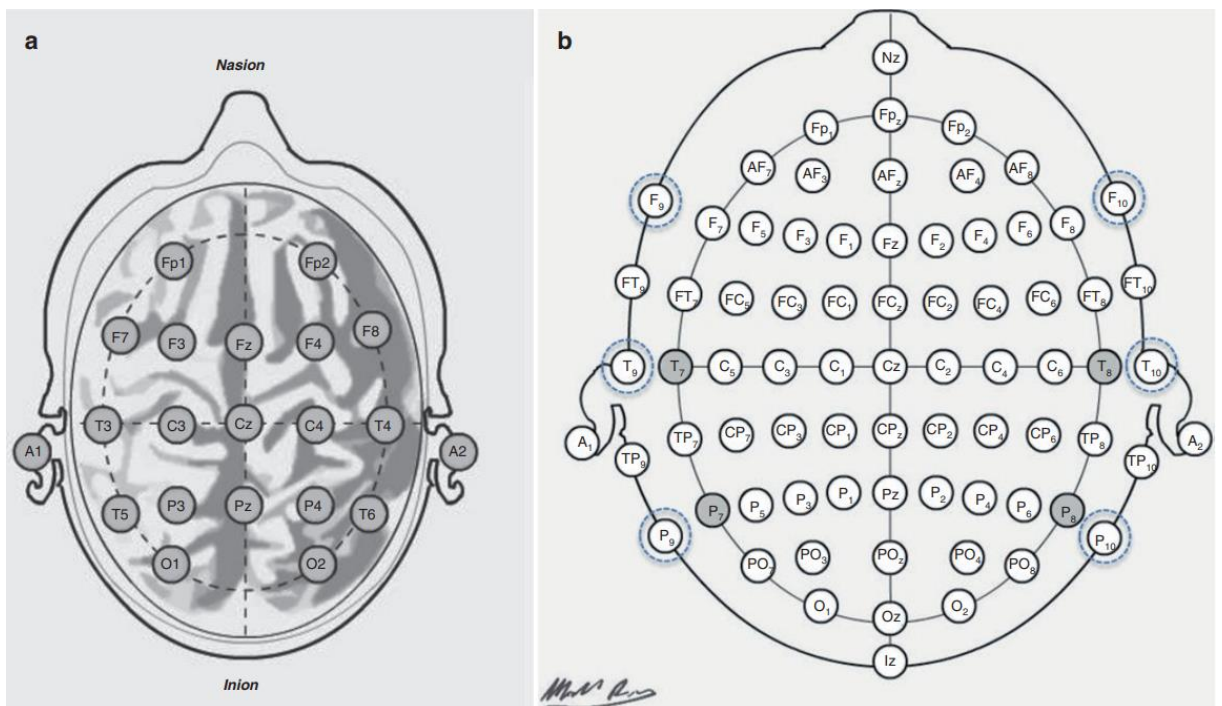
¹⁴ Anatomická oblast kůže povrchu hlavy

¹⁵ Elektřina zde vzniká v důsledku takzvaného postsynaptického potenciálu, což je označení pro změnu elektrického potenciálu, zapříčiněnou změnou propustnosti iontů cytoplazmatické membrány, kdy tato změna v propustnosti následně podnítlí v místě vzniku transformaci napětí (Mecarelli, 2019; Proekt, 2018)

¹⁶ Invazivní formu tohoto měření poté představuje elektrokortikografie, neboli intrakraniální EEG – iEEG, které má tu výhodu, že je schopné měřit i hluboká podkorová centra (Bi et al., 2016; Mecarelli, 2019).

¹⁷ V okolí se nachází elektromagnetický smog, který způsobují i běžné spotřebiče či součástky, jako například mobilní telefon, nebo běžná zásuvka, a je tedy třeba jej odfiltrovat (viz podkapitola Rušení biosignálů a artefakty)

Skalповé elektrody jsou běžně vyráběny z materiálů o adekvátní vodivosti a chemicko-fyzikálních vlastnostech, jakými je například stříbro (případně Chlorid stříbrný), zlato, či platina. (Mecarelli, 2019) Na hlavu jsou usazovány podle mezinárodně uznávaného schématu, takzvaného systému 10 – 20, schváleného Mezinárodní federací klinické neurofyzologie. (Mecarelli, 2019) 10 – 20 systém referuje na procentuální rozestup mezi jednotlivými elektrodami. Při aplikaci existuje 5 základních pozic umístění: frontopolární (Fpz¹⁸), frontální (Fz), centrální (Cz), parietální (Pz) a okcipitální (Oz). (Mecarelli, 2019) V 10 % celkové vzdálenosti mezi kořenem nosu a týlním hrbolem je poté na příslušném konci umístěn Fpz a Oz, od kterých je vždy v 20 % vzdálenosti umístěna každá další elektroda. (Mecarelli, 2019) Modifikovanou verzi představuje systém 10-10¹⁹, který se užívá při aplikaci vyššího počtu elektrod (kupříkladu dvou svazků o 64). (Mecarelli, 2019) Elektroda může být aplikována buďto volně, většinou za pomoci kolodia, nebo do takzvané elektrodové čepice, pod kterou se pro lepší vodivost aplikuje vodivý gel. (Mecarelli, 2019)



Obrázek 4 Rozložení 10-20 a 10-10 (Mecarelli, 2019).

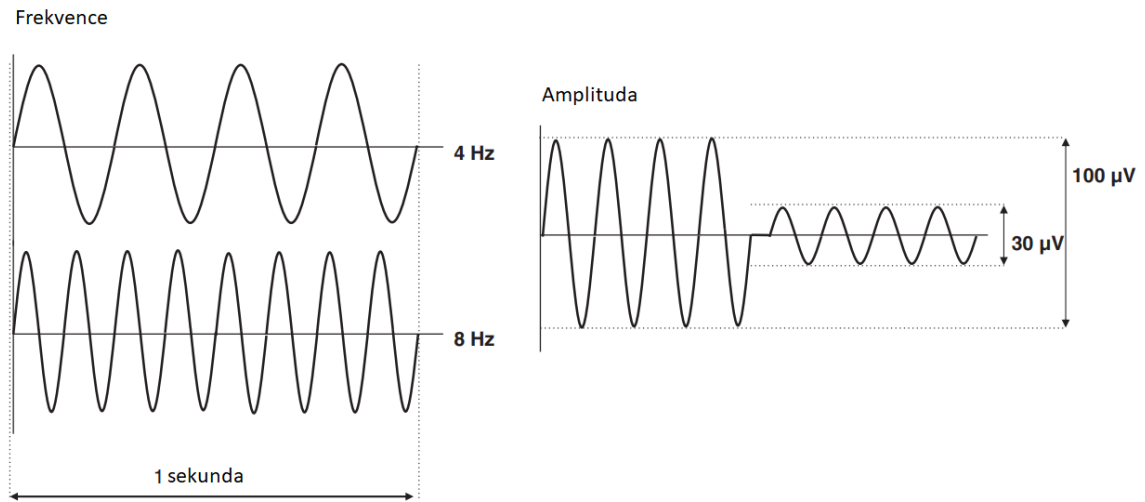
4.2 Výstupní signál a EEG křivky

Hlavními parametry při popisu výstupního signálu jsou *tvar vlny*, *oscilační frekvence* (rychlost kmitů vlny, měřená v Hz), *amplituda* (maximální výška vlny měřená v μV) a *prostorová distribuce* (kde konkrétně se v mozku snímaná aktivita nachází). (Mecarelli, 2019) Jelikož

¹⁸ „z“ zde značí číslo nula, z anglického zero. Levá hemisféra je vždy značena číslem lichým, pravá poté číslem sudým (Mecarelli, 2019)

¹⁹ Užívaný v našem případě

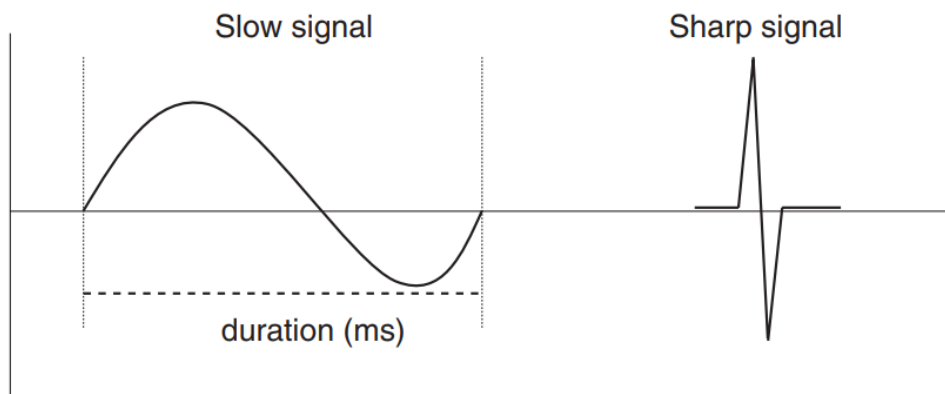
variují s věkem, mentálním rozpořením a mírou pozornosti, je třeba brát na tyto skutečnosti zřetel; například se rozdílně měří dospělí jedinci a děti; je ideálnější měřit v ranních hodinách, nežli těsně po obědě. (Mecarelli, 2019)



Obrázek 5 Rozdíl mezi frekvencí a amplitudou (Mecarelli, 2019).

4.3 Morfologie vlny

Tvar vlny je důležitý zejména pro detekci patologických abnormalit v mozkové aktivitě. Obecně vlny dělíme na *monomorfní* a *polymorfní*, přičemž monomorfní vlna má pomalejší a pravidelný průběh, zatímco polymorfní vlna je nepravidelná a má zpravidla velice rychlý průběh, způsobující její ostrou a trn připomínající vizáž (viz obrázek číslo 4). Polymorfní vlny se mohou vztahovat k epileptickému syndromu a v takovém případě je nazýváme jako epileptiformní²⁰. (Mecarelli, 2019)

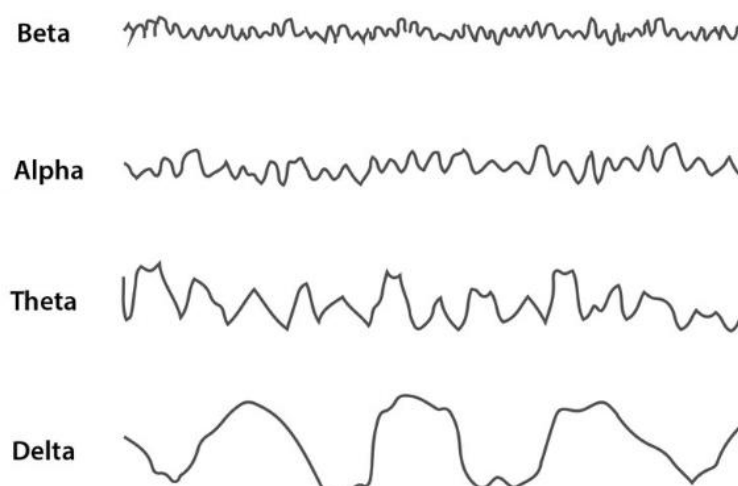


Obrázek 6 Monomorfní a polymorfní vlny (Mecarelli, 2019).

²⁰ Existují však i zcela běžně se vyskytující polymorfní vlny, mezi které můžeme řadit například lambda vlny; vyskytující se při vizuální exploraci či mhouření očí. Takovéto vlny poté nazýváme nonepileptiformní

4.4 Vlnová frekvenční pásma a jejich amplitudy

EEG zařízení většinou nezaznamenává frekvence (rytmy) nižší²¹ než 0,5Hz. Rozlišujeme proto čtyři základní frekvence, začínající *delta* (0.1 až <4 Hz); frekvencí typickou pro dětský věk, nebo hluboký spánek, při kterém k ní dochází ve frontocentrální části mozku (Nayak & Anilkumar, 2018; *Mecarelli, 2019*), v bdělém stavu může nicméně při fokální aktivitě indikovat cerebrální tumor (Decker & Knott, 1972); její amplituda je 75 až 150 μV (Plassová, 2019). Druhou nejnižší frekvencí je *Théta* (4 až <8 Hz); přítomná v ospalosti nebo v raných fázích spánku, podobně jako delta je prominentní zejména ve frontocentrální části mozku (Nayak & Anilkumar, 2018; *Mecarelli, 2019*) a stejně jako delta může být indikací tumoru (Decker & Knott, 1972); její amplituda je 15 až 25 μV (Plassová, 2019.) Následuje *alfa* rytmus (8 až <13 Hz); frekvence charakteristická pro bdělý a klidový stav v okcipitálních regionech, jejíž amplituda je 20–80 μV (Plassová, 2019). Specifickou formou alfa frekvence poté představuje takzvaný „mí rytmus“, který je známý tím, že zmizí ihned po iniciaci pohybu kontralaterální končetiny (nebo myšlenky na iniciaci pohybu), nachází se v primární motorické oblasti (Nayak & Anilkumar, 2018). Poslední a pro naši práci nejdůležitější frekvence je známá jako *beta* (13 až 30 Hz); je spřízněna s aktivitou ve frontálním kortexu a motorické oblasti centrálního mozku, objevuje se u lidí v bdělém stavu s otevřenými očima²² a příznačná je pro svou aktivaci při exekuci kognitivních procesů, v úzkostných stavech, nebo při zvýšené pozornosti (tedy například u našeho kognitivního tasku). (Nayak & Anilkumar, 2018; *Mecarelli, 2019*). Její amplituda se pohybuje od 10-20 μV a zřídka přesáhne k hranici 30 μV ²³ (Kropotov, 2009)



Obrázek 7 Frekvenční pásma (*Mecarelli, 2019*).

²¹ Takové frekvence se označují jako *Infra-pomalé oscilace* a jsou běžné například u nedonošených novorozenců.

²² Při jejich zavření je překryta amplitudou mnohem výraznější alfy

²³ Amplituda a kvantita beta aktivity se zvyšuje po požití většiny *depresantů*, jako jsou třeba barbituráty, benzodiazepiny, neuroleptika, antihistaminika, a podobně (Nayak & Anilkumar, 2018; *Mecarelli, 2019*)

4.5 Evokované potenciály

Evokované potenciály jsou takové elektrické potenciály, které jsou v nervovém systému měřitelné po prezentaci určitého vizuálního, auditivního, senzorického či motorického stimulu (Abhang et al., 2016). Jsou signifikantní fluktuací napětí, vzešlou z evokované (vyvolané) mozkové aktivity (Abhang et al., 2016), a slouží proto jako bezpečný a neinvazivní způsob studie psychofyzilogických korelátů mentálních procesů (Sur & Sinha, 2009). Studiím zkoumajících neurální systém (viz například Regan, 1989; Barber et al., 1999, citováno podle Runehov & Oviedo, 2013) se podařilo identifikovat a popsat nejrobustnější evokované potenciály, jež jsou vyvolány ve vztahu k mentálním procesům; jakými jsou například paměť, expektace, či pozornost. Tím se liší od klasických evokovaných potenciálů, pro jejichž aktivaci stačí pouhá změna externího stimulu. Komponenty s rychlejším nástupem, do 100ms, jsou označovány jako senzorické, jelikož silně závisí na fyzikálních parametrech stimulu (Sur & Sinha, 2009). Tyto robustní potenciály jsou v zahraničí nazývány jako *event-related potentials* (dále jen ERP), což by se dalo doslovně přeložit jako událost-vázané potenciály; v české literatuře jsou nicméně známé jako *kognitivní evokované potenciály* (Bareš, 2011; Seidl & Obenberger, 2004). Rozlišujeme několik základních ERP neurokomponentů:

N1

Vlna s negativní deflekcí a vrcholem okolo 90 až 200ms po prezentaci stimulu. Nejčastěji je viditelná při zpracování nečekané události, a jedná se tak o orientační odpověď nervové soustavy. Přiřazuje tím percipovaný stimul ke stimulu známému z minulosti. (Sur & Sinha, 2009) Nachází se většinou ve frontocentrálním regionu skalpu (Sur & Sinha, 2009) a bývá spojována s P2, která po ní často následuje jako N1-P2 vlna (viz například Lightfoot, 2016; Carpenter & Shahin, 2013).

P2

Je vlna s pozitivní deflekcí, která se objevuje s latencí 200ms. (Sur & Sinha, 2009) Byla zkoumána v souvislosti s Alzheimerovou chorobou, kde se vlna P2 objevovala při vizuální stimulaci v signifikantně vyšší míře, u pacientů touto nemocí trpících (Moore et al., 1995).

P2p

Jde o specifickou formu pozitivní vlny s latencí od 200 do 450ms. (Plassová, 2019; Soltész & Szűcs, 2014) P2p v numerickém experimentu označil a popsal Dehaene (1996), který ji upozoroval v blízkosti elektrod²⁴ **P3** a **P4**, v čase 220ms po expozici a který argumentoval, že je místem i časem zřetelně odlišitelná od komponenty P2. Označil ji tedy jako *následnou posteriorně pozitivní komponentu*, zkráceně P2p (ibid.). Od té doby byla opakovaně spojena, spolu s vlnou N1, s *nesymbolickým zpracováním matematiky* a vazbou na percepci čísla. (Liu et al., 2018; Gouet, et al., 2018; Soltész & Szűcs, 2014; Dehaene, 1996)

²⁴ Elektrody přiléhající ohlasem HIPS

N200

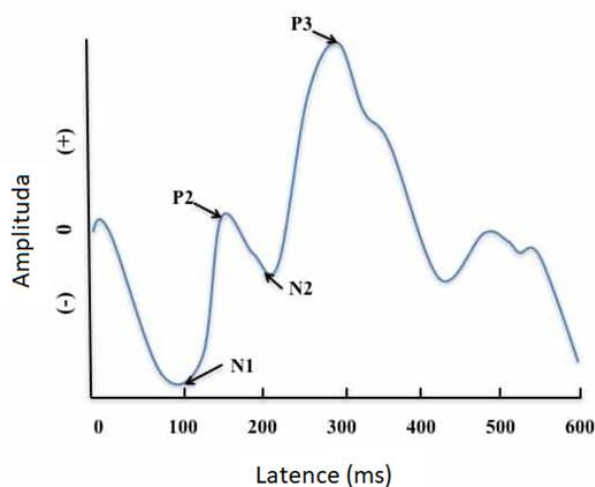
Je vlnou s negativní deflekcí a vrcholem amplitudy okolo 200ms, podobně jako je tomu v N1-P2 vlny, je tato vlna spojována spolu s P300, která po ní velice často přichází. Dělí se na několik podkategorií; N2a, N2b, N2c, ze kterých je nejpodstatnější takzvaná N2a, známá také jako *mismatch negativity*, která je reprezentací automatické mozkové aktivity, *detekující změny v percipovaném stimulu*. (Sur & Sinha, 2009)

P300

Jedná se o nejlépe prozkoumanou ERP komponentu s pozitivní deflekcí, o které se původně myslelo, že dosahuje vrcholu po 300ms. (Sutton et al., 1965) Avšak novější zjištění mluví spíše o škále od 250 do 450ms (Sur & Sinha, 2009); jiné zdroje nicméně uvádí až 500ms (Polich, 2007). Většinou se nachází parietocentrálně (Picton, 1992). Sur a Sinha (2009) připisují kratší latence lepšímu mentálnímu zpracování. Bývá spojována s kategorizací stimulů, pracovní pamětí, či kognitivním vybavováním (Woodman, 2010) a může být reprezentací přenosu informace do vědomí (Picton, 1992). Patric (et. al., 2006) zjistil vztah mezi výškou její amplitudy a náchylností k externalizovaným poruchám chování u adolescentních mužů.

N400-P600

Jsou vlny nejčastěji spojované se zpracováním jazyka, N400 byla poprvé popsána v souvislosti se sémantickou inkongruencí (Kutas and Hillyard, 1980, citováno podle Sur & Sinha, 2009) a je nepřímou související se slovy zakončujícími větu. (Sur & Sinha, 2009) Nejsilnější výskyt je u této komponenty lokalizován do centroparietální oblasti (Kutas & Hillyard, 1980). P600 se poté objevuje v případě čtení vět zcela porušujících syntaxi, nebo majících komplexní či ojedinělou větnou skladbu (Sur & Sinha, 2009). Také je lokalizována do oblasti centroparietální (Kaan & Swaab, 2003).



Obrázek 8 Rozdíl vln s viditelnou deflekcí. (dostupné z <https://hearinghealthmatters.org/pathways/2017/clinical-utility-p300-evoked-responses-post-sport-related-concussion-evaluation/>)

4.6 Kvantifikace observovaných nálezů

Woodman (2010) popisuje *relativní výšku amplitudy komponenty* (v μV), jako proměnnou, často využívanou při ERP analýzách. Osobně nicméně více doporučuje pro takovéto analýzy spíše *rychlost nástupu*, nebo *odeznění* komponenty (ibid.). Dr. Plassová (2019) ve své práci hodnotí jako relevantní oba přístupy (jak výšku amplitudy, tak nástup komponenty), a proto navrhneme jejich využití i v naší práci (viz praktická část).

4.7 Rušení biosignálů a artefakty

EEG artefaktem se myslí nežádoucí signál negativně zkreslující výsledky měření. Brienza a Mecarelli (2019) definuje tři skupiny artefaktů:

Fyziologické – Tyto artefakty jsou generované samotným probandem, nejčastěji v podobě očních pohybů, nebo při svalových či respiračních aktivitách, které způsobují změny v elektrickém toku, což je nechtěně zaznamenáno citlivými EEG elektrodami.

Způsobené systémem – Tyto artefakty vznikají při špatné manipulaci a přípravě zařízení. Prvním takovým artefaktem je signál vzniklý takzvanou „salt-bridge mezi-elektrodovou interferencí“, která nastává, když se vzájemně propojí dvě elektrody; například kvůli přílišné aplikaci vodivého gelu, nebo při nadměrném pocení. V takovém případě je nutné pokožku hlavy očistit a osušit. Další možností je špatný spoj mezi skalpem a elektrodou (nedostatečná aplikace gelu), nebo při špatném zapojení elektrod do EEG zařízení.

Způsobené elektrickou interferencí – Veškerá zařízení v laboratorní místnosti způsobují nechtěné elektromagnetické záření, které nepříznivě ovlivňuje výsledný signál, nejběžnějším artefaktem tohoto druhu je samotná zásuvka se střídavým elektrickým proudem. Dalším takovýmto typem artefaktu může být artefakt způsobený mobilním telefonem, či světelným vypínačem.

(Mecarelli, 2019)

II. Praktická část

5 Výzkumný návrh

V empirické části této bakalářské práce si popíšeme výzkumný problém spolu s cílem experimentu. Popíšeme si hypotézy a podrobně se podíváme na metodologii a možnosti provedení experimentu, byl-li by uskutečněn.

5.1 Koncepce výzkumu

Navrhovaný experiment je spolu s celým tématem bakalářské práce součástí širšího výzkumného záměru v rámci Neuropsychologické laboratoře JU. Spolu s touto prací se tématu neurálních korelátů aritmetických funkcí věnovaly například Votavová, Kratochvílová či Klempířová (Votavová, 2020; Kratochvílová, 2019; Klempířová, 2019), a to pod vedením doktorky Plassové (např. 2017, 2019), hlavního výzkumníka diskutovaného tématu. Obecným cílem výzkumného snažení je přesnější popis a pochopení matematických schopností z pohledu neuropsychologie, přičemž konkrétně tato práce měla původně sloužit pro rozšíření poznatků o funkci ANS, stejně tak jako jeho vztahu k *fenoménům* ovlivňujících *obecné reakční časy*. Z nemožnosti uskutečnit v důsledku probíhající pandemie experiment dle původního plánu, je však nutno podotknout, že se jedná pouze o návrh možného měření.

Návrh, ne-návrh, nic se nemění na tom, že cíle původního záměru zůstávají a s nimi i řešený výzkumný problém. Základní cíle navrhovaného experimentu jsou tedy: porovnání rychlosti a přesnosti odpovědi v testech ANS a testech měření reakčního času; porovnání rychlostí v odpovědích matematicky „nadaných“ a „běžných“ studentů; rozšíření poznatků o fungování ANS. Na základě těchto skutečností si tedy můžeme položit výzkumné otázky: **Jakých hodnot v neurální aktivitě dosahují matematicky nadaní (N) jedinci, oproti běžným (B) probandům? a Jaká je zátěž SAT u testu ANS ve srovnání s testem reakčních časů?** Z takto položených otázek si poté zároveň můžeme vystavit i hypotézy našeho záměru:

H1a: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v μV) komponenty **P2p** u skupiny matematicky nadaných a u skupiny běžných probandů.

H1b: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v μV) komponenty **N200** u skupiny matematicky nadaných a u skupiny běžných probandů.

H2a: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **nástupem** komponenty **P2p** u skupiny matematicky nadaných a u skupiny běžných probandů.

H2b: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **nástupem** komponenty **N200** u skupiny matematicky nadaných a u skupiny běžných probandů.

H3: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **reakčním časem** v úlohách měřících funkci ANS u skupiny matematicky nadaných a u skupiny běžných probandů.

H4: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **přesností odpovědi** v úlohách měřících funkci ANS u skupiny matematicky nadaných a u skupiny běžných probandů.

H5: Neexistuje statisticky signifikantní pozitivní korelace mezi **přesností a rychlostí odpovědi** v úlohách měřících ANS u skupiny **nadaných probandů**.

H6: Existuje statisticky signifikantní pozitivní korelace mezi **přesností a rychlostí odpovědi** v úlohách měřících ANS u skupiny **běžných probandů**.

H7: Existuje statisticky signifikantní pozitivní korelace mezi **přesností a rychlostí odpovědi** v kognitivních úlohách měřících reakční časy.

5.2 Výzkumný soubor

Původním záměrem a předkládaným návrhem je vybrat výzkumný soubor dle nepravděpodobnostního kvótního výběru na základě dobrovolnosti. Přičemž by měl proband pro zapojení do výzkumu splňovat následující podmínky: **věk** – 18 až 26; **studijní zaměření** – *matematické*; **lateralita** - pravá rukovost²⁵. Výzkumným souborem by tedy měli být vysokoškolští studenti matematického oboru – praváci. Tato cílová skupina byla vybrána z důvodu strategického plánu výzkumného záměru naší neuropsychologické laboratoře, kdy představuje jednu z klíčových, dosud netestovaných skupin. Zároveň však tvoří i adekvátní soubor pro náš další záměr, a to práci s fenomény ovlivňující reakční časy.

Stanovené kvóty poté představují: Nadané studenty prvních až druhých ročníků; běžné studenty prvních až druhých ročníků; nadané studenty třetích až pátých ročníků; běžné studenty třetích až pátých ročníků.

Způsob oslovení by probíhal prostřednictvím poutače (viz příloha číslo 1) na nástěnce katedry matematiky PF JCU. Stejně tak, jako s pomocí doktorky Plassové, která na katedře vyučuje, a která by dle původního plánu s oslovením studentů pomáhala.

Samotný výzkum je poté koncipován do dvou fází. V první fázi, sloužící pro diferenciaci a naplnění kvót, píše proband inteligenční test IST (viz podkapitola Administrace a postup testování), který probandy rozděluje dle výsledků na matematicky *nadané a běžné*. V druhé fázi se poté účastní kognitivního testování reakčních časů a EEG měření.

Etická otázka byla při sestavení experimentu ošetřena informovaným souhlasem (viz příloha číslo 2), shrnujícím informace o experimentu a probandova práva. Součástí těchto práv je i právo na informace, respektive na sdělení výsledků experimentu, které jsou však z podstaty práce pouze orientační; EEG data nelze bez příslušené medicínské akreditace sdělovat vůbec.

6 Výzkumné fáze

6.1 Testování matematické inteligence

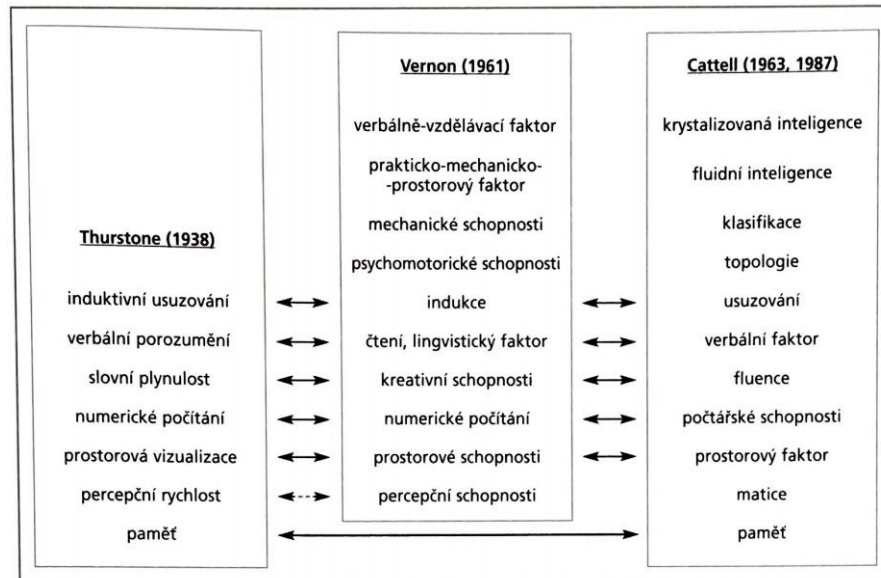
K testování inteligence navrhujeme první revizi testu struktury inteligence I-S-T 2000 R, který dobře diferencuje u průměrných a nadprůměrných jedinců a je standardizovaný na českou dospělou populaci. (Amthauer et al., 2015) Standardizace proběhla na vzorku $n=746$ ve věku od 13 do 53 let. (*ibid.*) V běžné praxi se test užívá při volbě dalšího studia, řešení studijních problémů, nebo v oblastech psychologie práce, organizace a řízení.

6.1.1 Test struktury inteligence IST

IST chápe inteligenci jako komplexní, otevřený konstrukt, zahrnující velký počet dílčích schopností. Při jeho konstrukci byl přitom brán zřetel na přístup L. Thurstonea, či G. H. Thomsona. Tedy, že každé inteligentní chování, či intelektový výkon, může být ovlivněn hned

²⁵ Z důvodu přednastavení experimentu pro praváky

několika aspekty primárních schopností. Jako příklad poté autoři udávají aritmetické či geometrické řady, kde mohou být výkony ovlivněny jak schopností zacházet s čísly, tak schopností logického úsudku. Tento princip mnohočetné determinace je tedy primárním předpokladem hierarchického uspořádání schopností, které jsou základním východiskem vývoje I-S-T. (Amthauer et al., 2015)



Obrázek 9 Konvergence ve výzkumu struktury inteligence (Amthauer et al., 2015).

Test nabízí možnost duálního zadání ve variantě A a B, zároveň obsahuje jak základní, tak i zkrácený (bez paměťových úloh) modul pro parciální zrychlené testování, spolu s modulem rozšířeným o úlohy testující všeobecné znalosti. Úlohy ze základního modulu slouží k testování verbální, numerické a figurální inteligence. Skládá se z devíti skupin úloh po třech, pro jednotlivé části struktury inteligence; dvou skupin paměťových úloh pro slova a obrazce; a jedné skupiny úloh, testující znalosti z různých teoretických oblastí, jako geografie, umění, přírodní vědy, či každodenní znalosti. Základní sada devíti úloh se poté skládá z doplňování vět, analogií a zobecňování, pro **verbální**; **početních úloh, číselných řad a početních znamének**, pro **numerické**; a výběru obrazců, úloh s kostkami a úloh s maticemi, pro **figurální** složky inteligence. Jednotlivé subtesty jsou z předpokladu zlepšení stability koncentrace a vytrvalosti časově limitované. (Amthauer et al., 2015)

Protože jsou pro účely výzkumu podstatné úlohy testující numerickou složku inteligence, podíváme se na ně konkrétněji v následujícím odstavci. V první ze série úloh – početní úlohy – řeší probandi početní operace z oboru reálných čísel.

Příklady:	$60 - 10 = A$	$A = ?$
Výsledek této úlohy je:	50 ($A = 50$)	
	$15 + 17 = B$	$B = ?$
Výsledek této úlohy je:	32 ($B = 32$)	

Obrázek 10 Ukázka příkladů početní úlohy (Amthauer et al., 2015).

V druhé sérii – číselné řady – jsou uspořádány řady čísel dle určitého pravidla. U každé z řad má proband následně přijít na nejbližší následující číslo.

Příklady:

2	4	6	8	10	12	14	?
---	---	---	---	----	----	----	---

Řešením této úlohy je: 16

9	7	10	8	11	9	12	?
---	---	----	---	----	---	----	---

Řešením této úlohy je: 10

Obrázek 11 Ukázka příkladů číselné řady (Amthauer et al., 2015).

A konečně, v sérii třetí – početní znaménka – je třeba doplnit vynechaná početní znaménka (čtyř základních početních úkonů), do úloh z oblasti racionálních čísel.

Příklady:

	6	?	2	?	3	= 5
Výsledkem této úlohy je:	6	+	2	-	3	= 5

	7	?	2	?	4	= 10
Výsledkem této úlohy je:	7	x	2	-	4	= 10

Obrázek 12 Ukázka příkladů početní znaménka (Amthauer et al., 2015).

Veškeré slovní úlohy byly v testu nahrazeny čistě matematickými příklady, a to z důvodu minimalizace dopadu vlivu řečových schopností na výkon jedince. Standardizovaný čas na vyplnění každé ze sérií úloh je poté stanoven na 10 minut. Odhad reliability numerické složky inteligence nabývá koeficientu Cronbachovy alfy 0,95 a mnohočetné analýzy potvrdily validitu tří škál základního modulu. (Amthauer et al., 2015)

Skupina úloh	verbální	numerické	figurální
Doplňování vět	0,46		
Analogie	0,81		
Zobecňování	0,74		
Početní úlohy		0,83	
Číselné řady		0,80	
Početní znaménka		0,79	
Výběr obrazců			0,73
Úlohy s kostkami			0,58
Úlohy s maticemi			0,46

Obrázek 13 Konfirmativní analýza faktorů pro devět skupin úloh (Amthauer et al., 2015).

6.1.2 Administrace a postup testování

Ještě před začátkem pandemie se nám podařilo naměřit prvního probanda²⁶. Popíšeme si tedy alespoň postup testování u tohoto jednoho probanda, jelikož by byla stejná administrace aplikována i u probandů dalších, a slouží tedy jako forma návrhu na standardizovaný postup administrace.

Před samotným začátkem testování byl proband seznámen s jeho průběhem, byly mu sděleny práva a povinnosti, kterých vstupem do výzkumu nabývá, a byl pobídnut k samostatnému prostudování a podpisu informovaného souhlasu (viz příloha číslo 2). Proband měl k dispozici záznamový arch, list s úlohami, čistý papír na poznámky, a v tomto konkrétním případě vypůjčenou propisovací tužku. Po seznámení s průběhem výzkumu vyplnil proband osobní údaje do záznamového archu a byl instruován, jakým způsobem má zaznamenávat své odpovědi.

Pro účely výzkumu měli probandi za úkol vyplnit pouze část testu týkající se numerické inteligence (viz podkapitola Test struktury inteligence IST); kdy měl proband na každou ze sérií vždy 10 minut času²⁷. Dále byl proband zároveň instruován, aby k psaní poznámek a odpovědí využíval pouze přiřazený papír a záznamový arch; nikoli předtištěnou kopii úloh. Před začátkem testu, a vždy po uplynutí té předchozí, byla každá z následujících úloh probandovi náležitě ústně vysvětlena.

Po skončení testování byla probandovi nabídnuta možnost rozhovoru o pocitech z testu. Tento rozhovor nebyl archivován, ani dále kódován.

6.1.3 Vyhodnocení výsledků

Dle původního plánovaného postupu by se po nasbírání dat sečetly hrubé skóry a převedly na skóry standardní (viz tabulka číslo 14). Normy pro IST byly stanoveny podle věkových kategorií²⁸, dosaženého vzdělání²⁹ a v jednom případě – pro věk 18-33 – i pohlaví. Jelikož jsou cílovou populací studenti vysokoškolské matematiky, rozhodli jsme se pro použití dvou norem, a to: *pro věk 18-33 let, absolventi středních škol – muži*; *pro věk 18-33 let, absolventi středních škol – ženy*. Tyto normy byly vybrány z důvodu zahrnutí pouze probandů s úplným středoškolským vzděláním.

²⁶ Získaná data však neprezentujeme jako ukázkou, z důvodu neschopnosti zajištění adekvátní anonymity.

²⁷ Měřeno aplikací *stopky*, na mobilním zařízení se systémem android.

²⁸ Například norma pro věk 17-18 let.

²⁹ Například norma pro věk 15-16 let, gymnazisté.

Početní úlohy (Skupina úloh 04)		Číselné řady (Skupina úloh 05)		Početní znaménka (Skupina úloh 06)	
H5	SS	H5	SS	H5	SS
8	98	1	73	13	111
9	102	2	80	14	114
10	105	3	86	15	117
11	108	4	91	16	121
12	111	5	95	17	126

průměr = 8,22	průměr = 6,62	průměr = 10,08
směr. odch. = 4,22	směr. odch. = 4,83	směr. odch. = 3,97
N = 1537	N = 1537	N = 1537

Obrázek 14 Ukázka standardizovaných skóreů pro věk 18-33 let, absolventy středních škol – ženy (Amthauer et al., 2015).

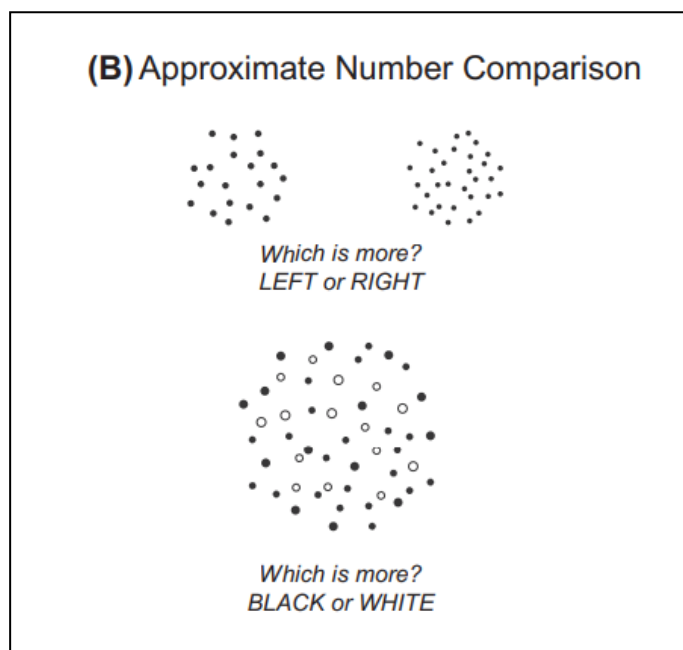
6.2 EEG experiment

První částí druhé fáze empirické části je neuropsychologický experiment prováděný na zobrazovacím zařízení EEG. Pro tento účel v bakalářské práci přebíráme experiment z původního výzkumu doktorky Plassové (2017, 2019), který byl upraven i pro testování na dospělé populaci.

6.2.1 Design experimentu

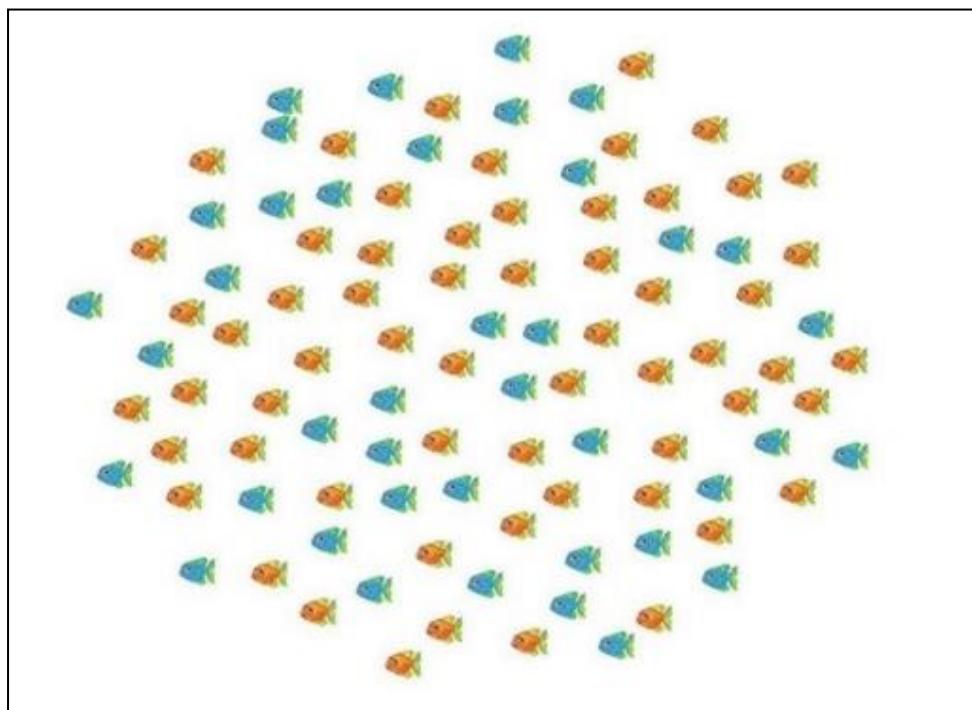
Původní experiment dr. Plassové byl koncipován na měření dětských participantů a byl, po svolení autorů (Park & Brannon, 2014), převzat z originální experimentální úlohy, testující aproximální aritmetiku. Takto převzatý test byl následně přepracován a transformován do podoby vhodné pro měření EEG.

Přepracovaná verze tak například pracuje pouze s jedním druhem úloh, kdežto verze originální (Park & Brannon, 2014) obsahuje těchto druhů hned několik (viz obrázek číslo 15). Výsledný design tedy představuje jednu množinu o dvou barvách, soustředěnou doprostřed monitoru. K tomuto rozhodnutí dr. Plassová (2019) přistoupila z důvodu vlivu prostorové architektury na EEG signál; kdy tato varianta úloh vykazuje nejmenší množství artefaktů z očních pohybů (ibid.).



Obrázek 15 Původní verze aproximální aritmetické úlohy (Park & Brannon, 2014).

V původní verzi (viz obrázek číslo 15) se na rozdíl od té transformované pracuje s množinou bílých a černých teček. (Park & Brannon, 2014) V případě naší verze jde poté o množinu jednoho sta kreslených rybiček modré a oranžové barvy, které byly vybrány z důvodu lepší rozlišitelnosti (Plassová, 2019).



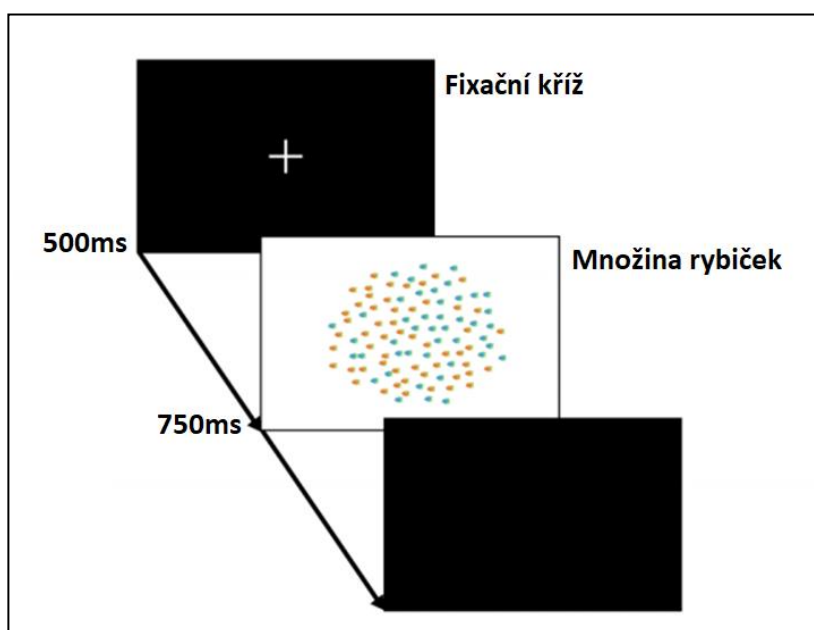
Obrázek 16 Ilustrace experimentální úlohy o obtížnostním logaritmu 1.5 (Plassová, 2019).

Samotný experiment začíná nácvikem nezaznamenávaným na EEG, ve kterém si probandi na několika úlohách vyzkoušejí test nanečisto. Při spuštění přichází 500ms prezentace středového kříže na kontrastním černém podkladu, jenž slouží k navýšení koncentrace před prezentací podnětu. Po uplynutí této epochy je následně na dobu 750ms prezentována i množina rybiček, po níž se objeví černá obrazovka, tzv. *signál pro odezvu* (z anglického response signal). Při

tomto signálu proband stiskává příslušné tlačítko podle toho, kterých rybiček je na monitoru více.

Tlačítka byla pro zlepšení orientace polepena nálepkou o příslušné barvě (oranžová a světle modrá). I když velikost, tvar i celkový počet rybiček zůstává konstantní, náhodností generátor mění dle zvolené obtížnosti poměr modrých rybiček k oranžovým.

Obtížnostní úroveň jednotlivých úloh se mění (zvyšuje) po každém stu zpracovaných úloh. Začíná úlohami jednoduchými s postupnou zvyšující se náročností. Obtížnost je nastavena a začíná na úrovni 24 (logaritmus 2.4). Poté pokračuje až na úroveň 11 (logaritmus 1.1), kdy je rozdíl v poměru minimální, 49 modrých a 51 oranžových. Z důvodu časové³⁰ i kognitivní³¹ náročnosti experimentu je v jeho polovině zařazena pauza.



Obrázek 17 Posloupnost testu (Plassová, 2019).

6.2.2 Průběh experimentu

Stejně tak jako u testování numerické inteligence, i v tomto případě se nám podařilo naměřit první EEG záznam a ukážeme si tedy postup tohoto měření, jako ideálního navrhovaného postupu.

Při poslední domluvě před měřením byl proband instruován, aby si na měření nebral žádné šperky, neupravoval vlasy (lakem, gelem apod.) a dostatečně se vyspal³². Hned po vstupu do Neuropsychologické laboratoře JU³³, kde byl experiment prováděn, byl poté proband informován o průběhu experimentu; byl mu ve stručnosti vysvětlen princip fungování EEG³⁴, pro zmírnění případné úzkosti z testování, a byl znovu pobídnut k prostudování a podpisu

³⁰ Průměrná doba trvání přesahuje jednu hodinu.

³¹ Obsahuje přes 1400 úloh.

³² Při podpisu informovaného souhlasu potvrdil spánek 8 hodin.

³³ Laboratoř je vybavena 64 – kanálovým EEG zařízením od firmy Biosemi.

³⁴ Například, že se jedná o neinvazivní zobrazovací metodu.

druhého informovaného souhlasu sestaveného na míru pro měření EEG (viz příloha číslo 3). Místnost byla před měřením vyvětrána a pro probanda byla připravena sklenice s vodou.

Následně byl usazen do židle, kde mu byl změřen obvod lebky, nikoliv z důvodu frenologické zvědavosti, ale pro určení správné velikosti EEG čepice. Po jejím výběru a nasazení jsme přešli rovnou ke gelování³⁵ dvoj-svazku 64 elektrod, které trvalo v tomto konkrétním případě cca 35-40 minut. Po naaranžování experimentu byla zkontrolována kvalita EEG signálu a bylo v programu opensesame 3. 2. 1.³⁶ spuštěno nejdříve cvičení „nanečisto“, a poté i samotné experimentální úlohy.

Když měření skončilo, byl probandovi propůjčen ručník pro umytí vlasů od elektrokonduktivního gelu a nabídnuta možnost k rozhovoru o experimentu. Ten sloužil jen jako probandova možnost sdělit nám svou zpětnou vazbu, či se doptat na zajímavosti. Taktéž tedy zaznamenán, ani nadále kódován.

6.3 Testování reakčního času

V konečné části druhé fáze výzkumu jsme se zaměřili na rychlost (dále jen RT) a přesnost (dále jen Acc) reakce našich probandů. Konkrétně nás zajímal rozdíl v kompromisu rychlosti a přesnosti (viz kapitola mentální chronometrie; dále jen SAT) v klasických úlohách určených k měření RT, vůči SAT v úlohách ANS. Základními premisami v tomto ohledu bylo, že by měla být diskrepance mezi rychlostí a přesností u ANS úloh za a) menší než u úloh měřících RT, za b) menší v případě nadaných probandů, oproti probandům běžným, za c) relativně nízká a stabilní u nadaných probandů. Abychom tyto premisy ověřili, bylo zapotřebí najít vhodný model, SAT měřící.

6.3.1 Výběr kognitivního testu

V teoretické části jsme zmiňovali, že se prostá analýza průměrného RT a Acc nejeví jako vhodná a je tedy lepší použít některou z empiricky ověřených funkcí SAT. Takovou funkcí je konkrétně v našem případě *conditional accuracy function*³⁷ (dále jen CAF), které se budeme důkladněji věnovat níže.

Samotná aplikace CAF na behaviorální data ANS testu by nicméně nepřinesla užitečnou komparaci s obecnou úrovní SAT daného probanda, která se nejvýrazněji projevuje v komplexních CRT (Jensen, 2006; Luce, 1986/1991).

Proto navrhujeme zakomponování dalšího testu pro srovnání SAT v obou úlohách. Konkrétně se v případě našeho návrhu jedná o upravenou verzi kognitivního testu detekce písmene; který byl pod vedení dr. Plassové použit v pracích zaměřujících se na bilingualitu (Janoušková, 2019; Šimková, 2019; Sochorová, 2019).

³⁵ Pro zlepšení vodivosti skalpu a zesílení EEG signálu, viz kapitola Elektroencefalografie

³⁶ Určený přímo pro testování v oblasti neurověd a psychologie (Plassová 2019)

³⁷ volně přeloženo jako funkce podmíněné přesnosti

Původní test spočíval v zobrazení do kruhu seřazených písmen H, K, M, N, V, W, Z, X, o velikosti 0,53x 0,53° a bílé barvě, na kontrastním černém pozadí. Rozmístění odpovídalo uspořádání na analogových hodinách, respektive hodině 2., 4., 6., 8., 10. a 12.; kdy bylo úkolem probanda najít v takto vytyčeném kruhu písmeno X a zmáčknout mezerník, pokud jej uvidí (zobrazilo se ve 20 % případů). Test byl zároveň doplněn o auditivní distraktor. OBRÁZEK?

Navrhovaná upravená verze poté přináší změny v prezentaci stimulu; konkrétně nastavuje 5 deadlineů po 240 úlohách. Deadline je čas, do kterého musí proband reagovat, a po jehož uplynutí stimul mizí a přichází následující³⁸; v našem záměru slouží jako obtížnostní úrovně. Kdy nejlehčí úroveň úloh začíná na 1500ms, a každá další snižuje čas na reakci o 200ms. Takže musí proband při nejobtížnější úrovni odpovédět do 700ms.

Dále mění původní písmena na C, G; M, N; O, D; X a Y. A to jednak z důvodu navýšení *kontrastu* ostatních párů vůči X, kdy by nízký kontrast příliš zatížil reakční úlohu rozhodováním; užíváme tedy písmena od X snadno odlišitelných (Boles & Clifford, 1989; Grissinger, 2017). A zároveň navýšení *podobnosti* X, vůči Y. Užití kombinace snadno zaměnitelných písmen (Boles & Clifford, 1989; Grissinger, 2017) navyšuje komplexnost úlohy, a tím i její obtížnost (Gajewski & Falkenstein, 2013). Přičemž se ve *chtěných* úlohách vždy nachází pouze X a v *nechtěných* pouze Y.

Zároveň také odebírá auditivní distraktor, pro náš záměr nadbytečný, nastavuje nenáhodné před-období na 350ms, a z důvodu následné analýzy (viz kapitola analýza dat) nastavuje celkový počet úloh na 1200. Poslední změnou je i úprava poměru úloh zobrazujících X, na poměr 4:1. Zobrazilo by se tedy v 75 % náhodných úloh, vypočítáno pro každou obtížnostní úroveň zvlášť. Takto výrazná změna poměru úloh je žádaná díky své vlastnosti maximalizace špatné odpovědi. Jelikož se se zvětšujícím poměrem chtěných vůči nechtěným úlohám snižuje RT a zvyšuje šance chyby (Young et al., 2018).

Takovéto úpravy principiálně mění funkci testu v diferenční *go/no-go task*³⁹. Jinými slovy, jestliže se v konkrétní úloze *nachází* písmeno X (*go*), musí proband co nejrychleji reagovat na jeho přítomnost stlačením příslušné klávesnice (mezerník), a pakliže se v ní *nenachází* (*no-go*), musí vyčkat do deadlineu úlohy. Tento design navrhujeme z několika důvodů. Za a) hlavním smyslem přidání doplňujícího testu je snaha ukázat míru SAT u každého probanda, hledáme tedy takový test, který zobrazí SAT nejprůkazněji, a proto dle Hickova zákona (viz kapitola mentální chronometrie) volíme test s více než jednou možnou odpovědí (CRT oproti SRT); za b) nejen počet možností, ale i obtížnost výběru navyšuje RT (Dambacher & Hübner, 2013; Heitz, 2014). A takto navržený design obsahuje oproti běžným *go/nogo* testům vyšší počet podnětů nutných na zpracování c) *go/nogo task* je oproti složitějším formám CRT jednodušší na konstrukci i analýzu (Luce, 1986/1991), a je tedy vhodnější pro účel takto konstruovaného návrhu.

6.3.2 Průběh experimentu

Na rozdíl od inteligenčního a ANS testu jsme již skutečné probandy naměřit nestihli. Podíváme se tedy alespoň na návrh možného postupu administrace.

³⁸ Oproti signálům pro odezvu, které využívá ANS test, je zde deadline zvolen z praktických důvodů funkčnosti testu. Výrazné rozdíly vlivu těchto designů na SAT nicméně nebyly potvrzeny (Dambacher & Hübner, 2013)

³⁹ Princip *go/no-go* tasku byl popsán v kapitole mentální chronometrie

Po příchodu do Neuropsychologické laboratoře JU by měl být proband ideálně informován o průběhu experimentu, jeho principu, odhadované době trvání a zejména cíli; kdy je zásadní explicitně vyjádřit, že testujeme reakční čas i přesnost. Respektive instruovat, aby se pokusil odpovědět v co nejkratším časovém intervalu s pokud možno co nejmenším počtem chybných odpovědí⁴⁰. Místnost by měla být ideálně předem vyvětrána, ale během průběhu se zavřeným oknem, pro snížení okolních ruchů.

Po uvedení by se mělo ideálně přejít k samotnému měření, prováděném na laboratorním PC⁴¹. Následně by nejprve proběhl krátký zácvik nanečisto, po kterém by se přešlo na hlavní měření. Jelikož neproběhla pilotáž (k tomuto více viz diskuze) takovéto úpravy testu, odhadujeme délku celé úlohy alespoň na základě zprůměrování deadlinů, na cca 20-25 minut.

Po skončení měření se nabízí poskytnout možnost rozhovoru o experimentu, jeho průběhu, pocitech z něj, či případných otázkách a připomínkách, které by proband mohl mít. Stejně jako při inteligenčním a ANS testování, ani zde by nebyl rozhovor zaznamenán a dále analyzován.

7 Analýza dat

7.1 Preprocessing EEG dat

Za běžných podmínek by zpracování nasbíraných dat probíhalo v programovacím softwaru Matlab, respektive v EEGLABu, což je volně stáhnutelný doplněk Matlabu, sloužící ke zpracování EEG i dalších elektrofyziologických dat. Jelikož však ke zpracování dat nedošlo, popíšeme si alespoň, jaké kroky bychom učinili, případně, jak bychom při jejich zpracování postupovali.

7.1.1 Decimace

Čím vyšší je frekvence zaznamenaného signálu, tím kvalitnější signál je. (Mecarelli, 2019) Kmitočet záznamu v našem případě představuje 2048 Hz, tedy 2048 záznamů o mozkové aktivitě za vteřinu. Takto vysoká frekvence s sebou nicméně přináší i relativně vysoké nároky na počítačové zpracování, a proto se běžně užívá takzvané *decimace*⁴². Tedy snížení původní vzorkovací frekvence za účelem snížení zátěže na zpracování dat. Každá decimace by se měla řídit takzvaným vzorkovacím teorémem (Mecarelli, 2019); který říká, že je vzorkování bezztrátovým procesem tehdy, a pouze tehdy, je-li vzorkovací frekvence (F_s) alespoň dvakrát větší, než maximální frekvence (F_{max}) objevená na signálu, vzorcem zapsatelný jako $F_s > 2 \times F_{max}$. Při jejím nedodržení dochází ke korupci signálu (ibid.). Doktorka Plassová (2019) zvolila ve své práci redukci na 265 Hz.

⁴⁰ Což se shoduje s běžnou administrací RT testů (Wood & Jennings, 1976). Jiný přístup zvolili Howell a Kreidler (1963), kteří svůj test administrovali s podmínkou reakce buďto rychlé, nebo přesné, anebo rychlé i přesné. Naším záměrem je nicméně sledovat spíše podvědomou inklinaci k SAT

⁴¹ Kognitivní úloha je stejně jako úloha ANS spouštěna v programu opensesame 3.2.1.

⁴² V literatuře označováno běžně také jako *downsampling*, v doslovném překladu *snížení vzorků*. (Mecarelli, 2019)

7.1.2 Re-reference

EEG měří rozdíly v elektrických potenciálech (napětí) mezi dvěma body, které jsou obvykle vyjádřeny v jednotkách mikrovoltů μV . (Leuchs, 2019) Což znamená, že je signál z jednotlivých kanálů ve skutečnosti rozdílem měřeným vůči jinému kanálu, respektive jiné elektrodě; nazývané jako referenční⁴³. Tato elektroda se sama o sobě nechová jako kanál a rozdíl mezi dvěma referenčními elektrodami tedy vykazuje nula voltů. (Leuchs, 2019) Re-referencování, nebo také znovu-referencování, je poté metoda offline změny referenční elektrody, která, je-li provedena správně, výrazně ovlivňuje a dopomáhá kvalitě zpracovaného signálu. (Leuchs, 2019; Li et al., 2018) Při re-referencování je tedy signál každé nově zvolené referenční elektrody odečten od všech dalších EEG kanálů. Řekněme tedy, že se novou referenční elektrodou stane kupříkladu Fc3, což přináší nejen to, že se nyní měří rozdíl všech ostatních elektrod vůči Fc3, ale zároveň se uvolní elektroda původní, řekněme Cz; a je možné zpětně nabýt informací o jejím signálu. Nejlepší volbou při provádění znovu-referencování je držet se takzvaného REST⁴⁴ přístupu (Li et al., 2018; Dong et al., 2017), který je integrovaný například v toolboxu EEGLAB (Dong et al., 2017).

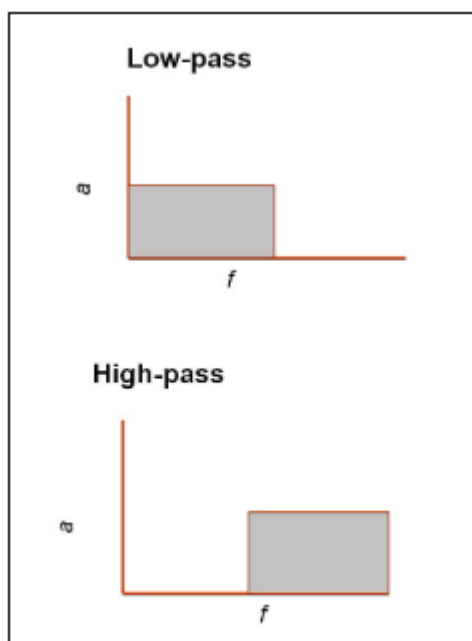
7.1.3 Filtrace

Filtrace je další důležitou metodou pro úpravu kvality signálu. Zbavuje data takových frekvenčních pásem, která se skládají především z nežádoucích frekvenčních pásem, jež obsahují non-neurální a irelevantní informace. (Acunzo et al., 2012) V zásadě se jedná o dva druhy filtrů: high-pass a low-pass (filtr s horní a dolní propustí), které odříznou pásma s vyšší, respektive nižší frekvencí. (Mecarelli, 2019) High-pass filtry se běžně užívají pro odstranění driftu⁴⁵, low-pass poté pro uhlazení signálu. (Mecarelli, 2019) Při volbě filtrů je však třeba dávat si pozor, například Luck (2005 cit. podle Acunzo et al., 2012) doporučuje pro high-pass maximální hranici 0.1 Hz. Při jejím překročení totiž může docházet k systematické distorzi dat a vzniku nových artefaktů. (např. van Driel et al., 2021; Acunzo et al., 2012; Kappenman & Luck, 2010) Špatně nastavený low-pass může na druhou zamaskovat vlny s vyšší frekvencí jako například gama vlny. (de Cheveigné & Nelken, 2019) Doktorka Plassová (2019) na své práci prováděné na dětských probandech užila pásem 0,1 Hz pro high pass a 120 Hz pro low-pass.

⁴³ Běžně se připojují na pozici FCz či Cz

⁴⁴ Zkratka anglického Reference electrode standardization technique

⁴⁵ Drift signálu značí konstantní, skokovou změnu potenciálu



Obrázek 18 Ukázka principu filtrů propustnosti; a = amplituda, f = frekvence. (dostupné z <https://bliricex.hypotheses.org/filtering-introduction>)

7.1.4 Čištění od artefaktů

Posledním krokem preprocessingu je čištění dat od artefaktů. Toho lze dosáhnout buďto manuálně, nebo programem k tomu určeným. Manuální čištění vykazuje charakteristiku kvalitativní práce a je tedy vysoce subjektivní. Jedná se o časově i kognitivně náročnou práci (Wu et al., 2018), jejíž úspěch je podmíněn schopností výzkumníka (Daly et al., 2012). Využití kombinace manuálního čištění je nicméně vhodné u dětských probandů, u kterých může zkušený výzkumník rozpoznat specifickou aktivitu lépe než počítačové programy samotné. (Plassová, 2019)

7.1.5 Baseline korekce a epochování

Baseline je v zobrazovacích metodách termín označující *klidový stav probanda před expozicí stimulu*. Krom jiného je pro nás důležitý díky takzvané korekci baselinou. Taková korekce znamená, že pro úpravu aktivity vzniklé po expozici externího stimulu, využijeme aktivity v čase před expozicí. (Luck, 2005) Například Adlay (2019) říká, že se korekce baselinou často využívá i jako náhrada high-pass filtru. To (ibid.) nicméně nedoporučuje on, ani ostatní výzkumníci (například Tanner et al., 2016). Adlay (2019) jde však ještě dál, když tvrdí, že je její využití v tradičním pojetí nevhodné, zvyšuje šum signálu a narušuje čistotu dat. Sám (ibid.) poté přichází s návrhem baseline korekce založené na regresní analýze, která dle jeho slov přináší vhodnější alternativu. V rámci naší práce bychom nicméně zvolili krátkou, 100ms korekci, která je z povahy našich dat dostačující.

Epochování poté představuje důležitý poslední krok zpracování dat, který Kristensenová (Kristensen et al., 2017) definuje jako *dočasně, časově ohraničené okno každého*

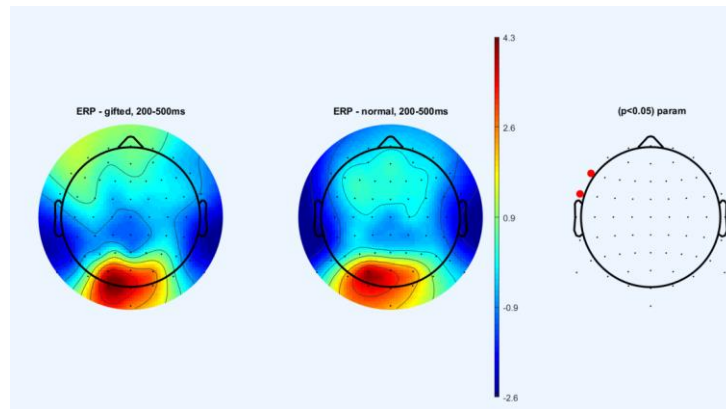
cílového stimulu. Což v praxi znamená to, že nastavíme-li epochy například na -500ms a 1000ms⁴⁶, epocha započne 0,5s před začátkem úlohy a končí 1s po něm. Tímto způsobem je možné vyčlenit aktivitu mozku v okamžiku zpracovávání stimulu, což je pro náš experiment klíčové. Woodman (2010) z důvodu snížení experimentálního šumu doporučuje nastavení delší epochy před expozici stimulu.

7.2 Analýza EEG dat

V rámci přístupu k analýze neurálních dat navrhujeme podobný postup, který ve své práci představila dr. Plassová (2019), a který byl užit i v ostatních pracích v rámci katedry (Klempířová, 2019; Kratochvílová, 2019). Jako takový by se skládal z rozdělení dat na *tři části, o třech formách*.

Tyto části jsou poté sestaveny z komprimace logaritmů úloh a reprezentují tak tři obtížnostní úrovně: *lehké* (log 2.3⁴⁷-2.0), *střední* (log 1.9-1.5) a *obtížné* (log 1.4-1.1). U každé z takto navržených úrovní by byl pro ilustraci nejprve zkonstruován topografický model aktivace ve sledovaných časech. Ten barevně vyobrazuje na nákresu skalpu mozkovou aktivitu v časovém okně, zejména pak v momentu měřeného ERPu.

Po domluvě s dr. Plassovou jsme se rozhodli prezentovat ukázkou analýzy z jejího výzkumu. Jedná se nicméně pouze o analýzu ilustrativní, která nijak nesouvisí s naší prací, ale dobře vykreslí princip analýzy EEG dat.

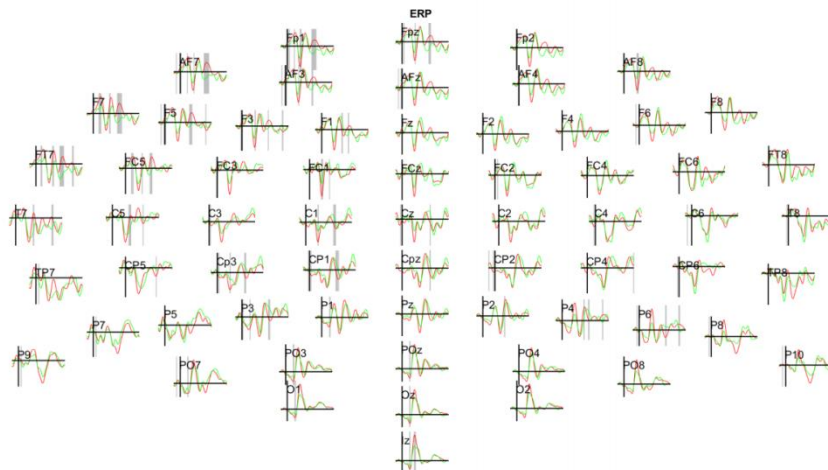


Obrázek 19 Příklad topografického modelu z práce dr. Plassové (2019).

Následně by byl vynesena ERP celého skalpu. Ten ukazuje na rozdíl v mozkové aktivitě při probíhající úloze na všech elektrodách.

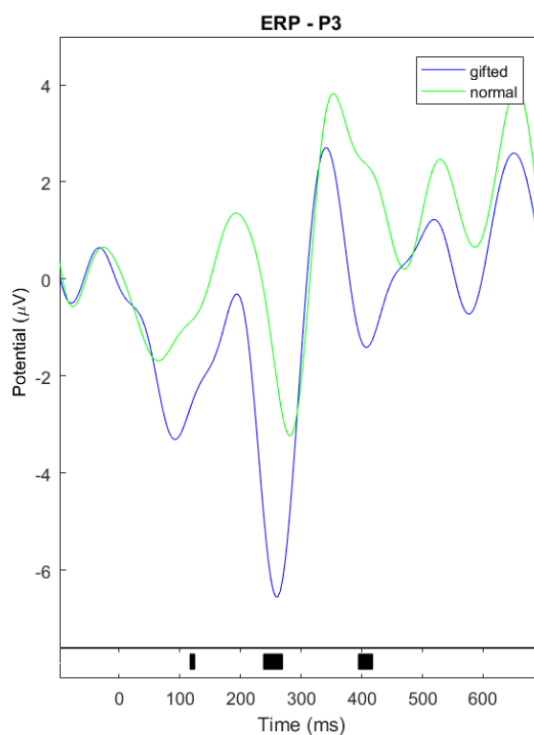
⁴⁶ Toto nastavení použila v experimentu dr. Plassová (2019); stejné nastavení poté navrhujeme v i této práci.

⁴⁷ Log 2.4 byl v práci dr. Plassové (2019) vyhodnocen jako zácvičný, a proto nebyl v analýze zahrnut.



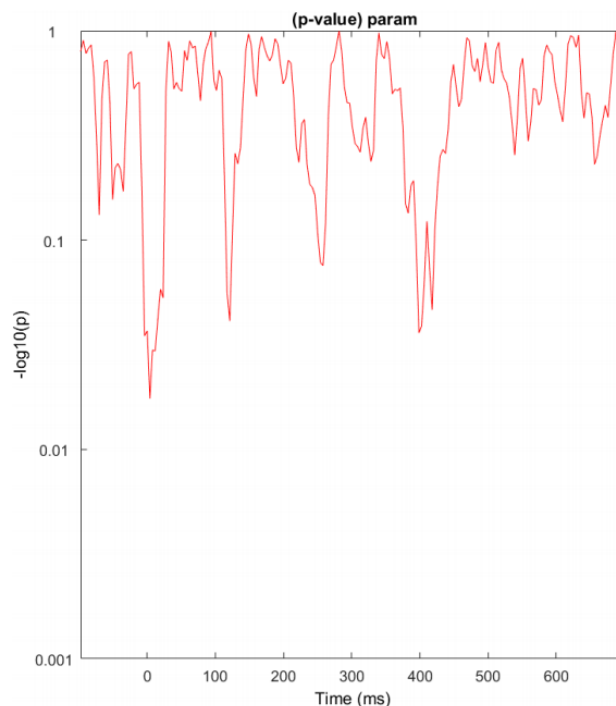
Obrázek 20 Příklad vizualizace aktivity všech elektrod z práce dr. Plassové (2019).

A nakonec i z elektrod nacházející se nejbližší oblastem HIPS; jmenovitě P3 a P4, případně PO3 a PO4. Tato poslední část analýzy ukazuje na konkrétní oblasti mozku, které jsou pro daný výzkum nejpodstatnější.



Obrázek 21 Příklad vizualizace aktivity na elektrodě P3 z práce dr. Plassové (2019).

Veškerá analýza probíhá v Matlab doplnku EEGLAB, který navíc umožňuje statistické ověření všech analyzovaných dat.



Obrázek 22 Příklad vizualizace p-hodnoty na elektrodě P3 z práce dr. Plassové (2019).

7.3 Analýza behaviorálních dat

Pro analýzu behaviorálních dat navrhujeme grafické vyobrazení SAT funkce spočítané na oba datové svazky⁴⁸.

7.3.1 CAF

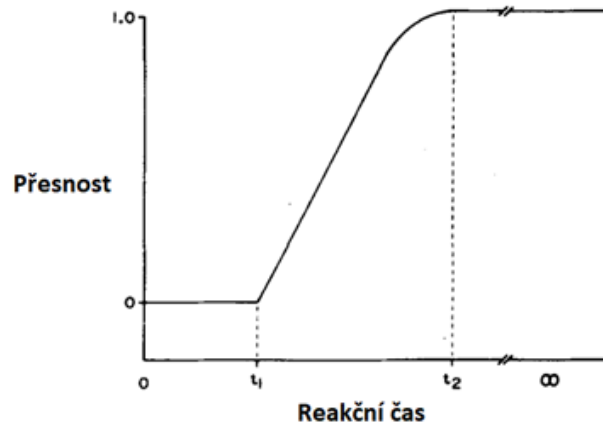
Conditional accuracy function patří spolu se *speed-accuracy tradeoff function* (SATF) a *quantile-probability plot* (QPP) k nejčastěji užívaným funkcím SAT (viz např. Heitz, 2014; Wood & Jennings, 1976). Byla tak užita v řadě výzkumů (). Detailně jí poprvé pod názvem *latency operating characteristic* popsali Lappin a Disch (1972), kteří ji navrhovali jako alternativu k čistému RT pro měření percepčních procesů. Dnes nejčastěji užívané označení Conditional accuracy function poprvé použil Ollman (1977) a Lappin ho přijal jako termín adekvátnější (Lappin 1978 citováno podle Luce 1986/1991).

Pro náš záměr je nespornou výhodou CAF zejména fakt, že je schopný, jako jediný (Heitz, 2014; Wood & Jennings, 1976), vyhodnotit tendenci probanda směřovat přesnost za rychlost v úlohách primárně nezaměřených na zkoumání SAT. A to proto, že pro výpočet nepotřebuje více-podmínkový design; je vypočítán z jediné RT distribuce⁴⁹ (Wood & Jennings, 1976; Lappin & Disch, 1972). Na stranu druhou je však velice náchylný na změnu variability SAT u jednotlivých subjektů, a proto neadekvátní pro úlohy přímo manipulující s úrovní SAT (Wood & Jennings, 1976), nebo experimenty snažící se primárně o osvětlení psychologických aspektů k SAT vedoucím (Heitz, 2014). Ani jedno ze zmiňovaných úskalí nicméně není případem v našem testování, a proto navrhujeme využít právě tuto funkci.

⁴⁸ Jak z ANS testu, tak CRT testu

⁴⁹ Může být tedy spočítán z kteréhokoliv CRT – kterým je i ANS test – který měří Acc i RT

CAF je formálně definovaná jako *podmíněná pravděpodobnost správné odpovědi, kdy se RT rovná konkrétnímu t , spočítáno pro všechny hodnoty t* . Přičemž t_1 odpovídá v idealizované funkci (viz obrázek číslo 23) takovému RT, ve kterém začíná Acc překonávat náhodu; a t_2 takovému RT, ve kterém dosahuje Acc svého maxima.

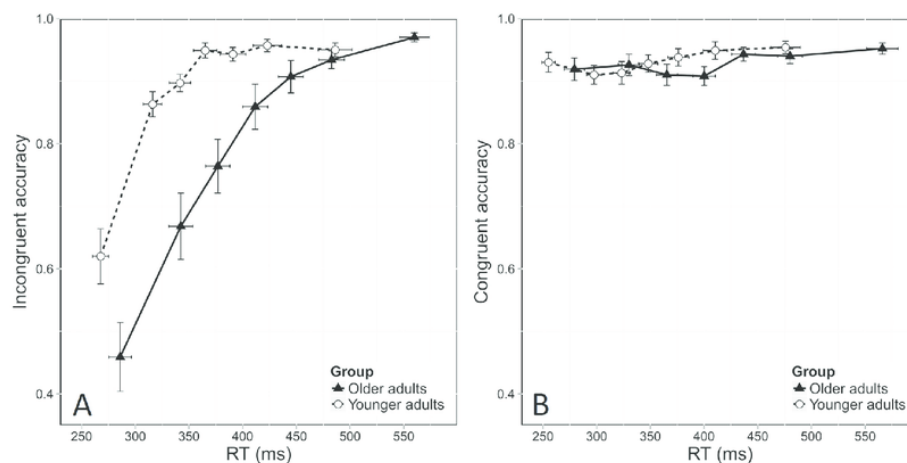


Obrázek 23 Ideální SAT funkce (Wood & Jennings, 1976).

V praxi se tedy CAF vypočítá ascendentním seřazením RT z celého souboru uskupením do kvantilů o stejném N úloh a vnesením zprůměrované⁵⁰ Acc na graf vůči zprůměrovanému RT, a to v každém z kvantilů.

V našem konkrétním případě používáme u testu go/no-go kvintil o 240 úlohách; zatímco u testu ANS kvintil o úlohách 280. Dohromady tedy vzniká na grafech obou testů 5 bodů, které po spojení přímkou utvářejí požadovanou funkci.

Pro potvrzení naší hypotézy by poté měla být křivka CAF grafu u ANS úloh relativně stabilní a jen mírně šikmá, až plochá; zatímco křivka go/no-go testu podstatně strmější, se zřetelně viditelnou stupňující tendencí. Kromě takto vnesených grafů můžeme CAF i statisticky ověřit, na základě analýzy jednotlivých kvintilů, která by sloužila pro statistické potvrzení, či zamítnutí navržených hypotéz.



Obrázek 24 Příklad vizualizace CAF v Simonově testu z práce dr. Drupeze (et al., 2016).

⁵⁰ Součet správných odpovědí vydělený celým souborem

8 Diskuze

Původně se měla tato práce zaměřovat pouze na čisté zpracování evokovaných potenciálů u studentů matematiky. Z důvodů spojených s rizikem nemožnosti uskutečnění EEG měření jsme se nicméně shodli na rozšíření tohoto záměru o behaviorální složku. Hledali jsme tak adekvátní možnost rozšíření práce, kterou jsme našli právě v zaměření se na zátěž kognitivně behaviorální složky, na výsledná data. Byť dosavadní výzkumy jasně poukazují na vztah ANS s aproximální aritmetikou, stejně tak jako lokalizují ANS v mozku. Existuje doposud jen nevelké množství studií věnujících se zátěži rozhodování (SAT) na experimenty s ANS. A to i napříč omniprezencí SAT, který se z výše prezentovaných studií jeví jako nezanedbatelný, ve smyslu jeho vlivu na behaviorální data.

V rámci obecného výzkumného záměru katedry vidíme přínos této práce/tohoto návrhu, zejména v možnosti následného porovnání výsledků námi zvolených probandů s dalšími skupinami; nestudentů matematiky, hudebníků (viz Kratochvílová, 2019; Votavová, 2020). Další přínos spatřujeme v ověření míry zátěže SAT, v rámci námi prezentované ANS úlohy; která tímto povede jednak k hlubšímu ověření vnitřní validity testu, případně i k lepšímu porozumění ANS, z nového úhlu pohledu. A v neposlední řadě považujeme za přínosné i vytvoření zcela nové testové úlohy, která se po náležitých úpravách může stát relativně rychlým nástrojem pro *orientační* měření SAT. Jako taková by tedy mohla být do budoucna využita v následných pracích. Věříme tedy, že je testování SAT nosnou nadstavbou pro výzkum ANS, uvědomujeme si ale i úskalí a mantinely tohoto návrhu.

Limity a úskalí

Už samotný navrhovaný vzorek představuje limit z důvodu své nenáhodnosti. Z principu dále není možné zajistit ucelené měření v jeden čas, za stejných podmínek, čímž dochází k dalšímu narušení koheze. Zvolený test je zároveň standardizován na populaci obecné, nikoliv specializované, kterou představují probandi našeho návrhu; jedná se tedy o rozdělení spíše orientační, u kterého by navíc mohlo hrozit riziko obtížného sestavení kontrolní skupiny.

Ani testování ANS se neobejde bez limitů a hned prvním z nich je jeho architektura. Jak píšeme výše, testovací úloha je převzata ze studie Parka a Brannonové (2014), následně upravena pro měření na EEG, na dětských probandech, a poté znovu upravena pro probandy dospělé. Přičemž je tento návrh první prací, která upravuje časy expozice (v práci dr. Plassové představovaly 1000ms expozice fixačního kříže a 1500ms stimulu). Takovouto úpravu by bylo jistě lepší ošetřit pilotáží. Kromě samotných časů expozice upravuje užitá verze i počet logaritmu obtížnosti; 14 v naší, oproti 5 v originální. Tím se nicméně snižuje náročnost, což může v kombinaci s délkou úlohy vést ke snížení pozornosti, i zájmu o úlohu. Co se samotné délky testu týče, je třeba zmínit ještě další úskalí, úloha i příprava na něj jsou skutečně dlouhé. To může u probandů zapříčinit únavu, která, byť se ji snažíme mírnit navrženou pauzou, nepochybně negativně ovlivňuje výkon a výsledky. I když se jedná jen o návrh, je mimoto třeba zmínit i problematiku samotného měření. To se totiž neobejde bez zatížení artefakty, interferencemi, a případně i korupcí celých datasetů (viz kapitola elektroencefalografie – teoretická část).

Zaměříme-li se na problematiku navrhovaného go/no-go testu, je hned začátkem vhodné zmínit jeho zásadní nedostatek. Byť se navrhovaný model sice v konstrukci opírá o prezentovanou literaturu, v praxi zcela chybí pilotáž. Správná funkce takto navrženého testu je nicméně přímo podmíněna adekvátní úrovní nastavené obtížnosti; příliš nízká obtížnost by

nemusela adekvátně zobrazit míru SAT u probanda, zatímco by nadměru velká obtížnost mohla (zejména v posledních deadlinech) zase vést k takovému nárůstu chybovosti, který by zapříčinil znehodnocení dat i procedury. Pro správnou funkci navrhované testové metody je tedy bezpodmínečně nutné správné nastavení času jednotlivých deadlineů. Zejména by mohlo vzniknout velké množství chyb vynecháním (omission error), protože by proband úlohy jednoduše nestíhal. Na pováženou je tedy následně i zavedení 8. hypotézy; ohledně vztahu poměru chyb vykonání (commission error) vůči chybám vynechání. Dalším problémem této úlohy je i její neschopnost změřit, za jak dlouho proband správně určí nogo úlohu; dokdy hledá a kdy začne skutečně čekat. Může ji totiž odhadnout těsně před jejím deadlineem, anebo taky velice rychle po začátku. Tato skutečnost mírně ovlivňuje data ve prospěch alternativní hypotézy. Vzhledem k poměru úloh a relativní náročnosti testu se nicméně nedomníváme, že je toto ovlivnění stěžejní. Navíc je záhodno zdůraznit, že se jedná pouze o orientační, exhibiční testovou úlohu, u které se nejedná o takový problém, jaký by mohl být v rámci testu ANS. Na druhou stranu by však mohlo být zajímavou úpravou testu i snižování poměru go-nogo úloh se stěžující se úrovní, protože by tato úprava o to víc podněcovala jedince k pozorovanému kompromisu. V neposlední řadě je také nutné zdůraznit, že není možné vyřadit ukvapené odpovědi (100ms a méně), protože by jejich vyřazení vedlo k narušení výpočtů CAF.

Zmínivše CAF, i samotná navrhovaná analýza má však svá úskalí. Jak jsme již poznamenali, výpočet CAF pro celý dataset není nejspolehlivější metodou, z důvodu silné výkonové variability (mezi deadliney, mezi logaritmy, aj.). Bylo by tedy na místě zvážit výpočet SATF, počítané pro každou podmínku testu zvlášť. SATF je tedy mnohonásobně přesnější (Heitz, 2014; Wood & Jennings, 1976), zároveň je ale její výpočet podmíněn záměrnou manipulací se SAT (Heitz, 2014; Wood & Jennings, 1976). Tuto manipulaci představují v testu reakčních časů deadliney i verbální instrukce. Pro kvalitní měření ANS, u které je fenomén SAT až vedlejším kritériem, by však byla jakákoliv manipulace kontraproduktivní; zkreslovala by totiž primární záměr tohoto testu. Nadto by i relativní náročnost posledních logaritmů ANS testu mohla vést k výraznému ovlivnění CAF; proband by je nemusel být schopen dostatečně posoudit a zvládat. Výhodou CAF je nicméně ta skutečnost, že může být na rozdíl od SATF vypočítána pro celý vzorek; zvláště pro každý deadline či logaritmus; nebo jen pro část, dejme tomu prvních 8 logaritmů, které daný proband kupříkladu normálně zvládal.

Pakliže by se do budoucna prokázala problematika SAT ve výzkumu ANS jako relevantní, stojí za zvážení lehce poupravit i tento test, pro přesnější analýzu. V tento okamžik je nicméně podstatnější vůbec zjistit, jak na tom jsme. Návrh tedy nepočítá s analýzou přesnou, nýbrž přibližnou.

Podíváme-li se ještě o úroveň výše, na tento návrh jako celek, vyvstává zde další řada limitací. Návrh se skládá ze dvou fází, respektive ze třech částí. Přičemž je celková doba testování dlouhá a pro probandy náročná. Přináší s sebou tedy relativní riziko možné experimentální mortality, zejména zvážíme-li cílovou populaci obecně vytížených studentů. Další z problémů vztahujících se na dvě ze tří částí návrhu je i takzvaný jitter, tedy nežádoucí odchylka v měření, způsobená latencí signálu. Jelikož naše laboratoř nemá tuto latenci změřenou, může zpoždění přenosu dat z PC na monitor a z EEG do PC přinést i zkreslení měřených dat. Za důležité považujeme ilustrovat i možnost vzniku konfliktu zájmů. Jelikož ilustruje navrhovaná práce mimo jiné i možnosti prověření vnitřní validity užitého ANS testování, je na místě zaslepit zpracovávaná data, aby tak nebylo možné jakkoliv manipulovat s výslednou analýzou SAT tendencí.

Tvorba návrhu

Jak jsme vznesli již začátkem diskuze, celou práci doprovázela řada nešťastných příhod. Nejdříve hrozilo, a to ještě před samotným začátkem probíhající pandemie, že nebudeme schopni měřit; z důvodů komplikací v laboratoři. Začali jsme tedy pracovat na úpravě původního návrhu, abychom v případě skutečného znemožnění mohli prezentovat alespoň behaviorální data. Po čase stráveném rešerší i kontemplací, jsme došli k závěru, že by nosnou nástavbou mohlo být prověření reakčních časů v ANS testu vůči jiné metodě. Hledali jsme tedy takové postupy, které by šlo vhodně implementovat do původního návrhu. Z čehož nám jako nejadekvátnější vyšlo právě poměření míry SAT. Situace se nicméně naštěstí zachránila, a tak jsme neupustili z původního plánu, ponechali jsme však i novou behaviorální nástavbu.

Vše tedy vypadalo idylicky, už se téměř znovu měřilo, vtom však přišla celosvětová pandemie. To znovu otřáslu podstatou původní práce a nezbylo, než vyčkávat na její pominutí. Ještě koncem léta 2020 jsme stále počítali s možností návratu k měření, nicméně jsme se nedočkali. Než abychom tedy vyčkávali na vzdálenou vidinu luxusně nagegované FCz elektrody, rozhodli jsme se raději pro změnu koncepce na výzkumný návrh. S tím ale vyvstal další problém v podobě absence pilotáže. Tu jsme se snažili vyřešit alespoň dostatečnou rešerší. Stejně tak jako restrukturalizací navrhované testové metody do takové podoby, kterou by bylo po pilotáži možné jednoduše kalibrovat. Návrh tedy jednoznačně není bezchybný, v rámci studie oblasti ANS však přináší cenný pohled na doposud málo prozkoumanou problematiku.

V každém případě se stále jedná o práci spíše orientačního charakteru. Jak v případě skutečného měření, i v případě proběhnutých pilotáží. Stále se totiž jedná o relativně novou problematiku, která si zaslouží hlubší porozumění. Takové porozumění nicméně naše práce saturovat nedokáže. Jednak velikostí plánovaného vzorku, jednak designem, principem i limity tohoto návrhu; stejně tak jako i rozsáhlostí této problematiky. Proto je celý koncept předkládané práce spíše nahlédnutím, kompasem určujícím možné směrování dalších prací, které by se mohly jak problematikou samotného ANS, tak i jeho vztahu k SAT v budoucnu zabývat.

Autorství

Za velice podstatné navíc považuji i připomenutí prohlášení ze začátku této práce. Ta má totiž skutečně jediného autora. Za množné číslo první osoby se tedy neskrývám, nevzdávám se osobní odpovědnosti za zpracování tohoto návrhu. Autorským plurálem spíše vyjadřuji úctu dr. Plassové, která mi byla v průběhu psaní rádcem i kritikem a bez jejíž supervize by vůbec nemusela vzniknout.

Možné výsledky

Z prezentované literatury, i z dosavadních poznatků jak o ANS, tak o SAT můžeme deduktivně usuzovat i předpokládaný výsledek navrhovaných měření. Jak jsme si představili, ANS je jedním ze systémů, který přímo podmiňuje vznik symbolické matematiky a který je výrazně citlivý na zpracování čísla. Jeho efektivita tedy přímo ovlivňuje jedincovu schopnost zpracovávat číslo. Můžeme tedy předpokládat, že se bude jednat v případě matematiků o populaci s všeobecně vyšší mírou efektivity tohoto systému, měřitelnou skrz míru aktivity v příslušných mozkových partiích na EEG. Tento rozdíl by měl být o to patrnější u navrhovaných skupin. Tedy že skupina *nadaných* probandů, vykáže vyšší aktivitu v měřených oblastech, než skupina probandů *běžných*. Čímž by se potvrdila 1. a 2. hypotéza.

Jestliže je naše dedukce správná a matematická nadanost opravdu souvisí s funkčností ANS, měla by skupina nadaných probandů současně dosahovat i lepších *behaviorálních výsledků* v testu ANS. Tím pádem by měli dosáhnout *vyšší přesnosti za menší časy* než skupina běžná. Mohli bychom tedy přijmout i 3. a 4. hypotézu, respektive 5. a 6. Funkčnost ANS nicméně zásadně neovlivňuje obecnou zdatnost výkonu v testech reakčních časů, je přímo vázána specificky na testy pracující s aproximálním odhadem. Předpokládáme tedy, že by neměl existovat signifikantní rozdíl mezi výkonem v go/no-go testu u obou skupin, čímž by se potvrdila i poslední hypotéza.

Smysl návrhu

Začneme tento bod diskuze trochu netradičně, a to otázkou. Co by se stalo, kdyby navrhovaná práce vznikla a prokázala by vysokou míru tendence SAT v testu ANS? Znamenala by vyvrácení funkce a principu ANS i znehodnocení dosavadní práce? Rozhodně ne. Znamenalo by to devaluaci použité testovací metody, potvrzení její nefunkčnosti? Taktéž ne. Poukázalo by to na určitý vliv jiných, zatím neurčených, neurokognitivních sil na rozhodování v testu ANS? Pravděpodobně ano.

Mimochodem moderní neuropsychologické pojetí mozku už dávno nepočítá pouze s rigidními areami sloužícími deterministicky daným funkcím (jako tomu bylo např. v teorii trojjediného mozku neurovědce MacLeana (1985; 1990); jako spíše holisticky propojené komplexní sítě neurálních uzlů, navzájem se ovlivňující (například Barrett, 2018; Barrett & Satpute, 2019).

Směřování

Je záhodno zaměřit se do budoucnosti studie vlivu SAT na ANS, na přímou komparaci obou testových metod, zvážit ad hoc úpravu ANS testu pro přesnější analýzu, využít i jiných metod než nahrnovaného go/no-go tasku, jako třeba Stroopova, nebo Simonova testu; stejně tak, jako se na vyšším vzorku zaměřit na čistou analýzu SAT tendence v ANS, bez aditivních testů, pro čisté ověření. Dále by bylo zajímavé podívat se na míru SAT v ANS testu u studentů matematiky, ve vztahu k ostatním výzkumným skupinám.

9 Závěr

Bakalářská práce: ANS a SAT prezentuje návrh, který popisuje možnosti měření aproximálního numerického systému (ANS) a možnosti ověření vlivu kompromisu rychlosti a přesnosti (SAT) na toto měření. Na problematiku ANS tedy nahlíží jak z neuropsychologického, tak kognitivního pohledu. Tento návrh představuje na cílové skupině vysokoškolských studentů matematiky, která je pro záměr návrhu ideální z důvodu dlouhodobých záměrů studie ANS v rámci katedry, i z důvodu vhodnosti pro první výzkum míry SAT v testech ANS.

Teoretická část se věnuje detailnímu popisu vztahu člověka vůči matematice. Krom samotného ANS popisuje i další matematické funkční systémy, jejich anatomii, i vztah k inteligenci. Dále se zabývá fenoménem reakčních časů, možnostmi jejich měření, i vlivu na výsledky psychologických testů v důsledku SAT. A představuje principiální funkci klíčové metody užití v praktické části – EEG. Praktická část poté představuje samotný návrh obou měření, v podobě testu aproximálně aritmetických úloh, pro měření ANS a go/no-go testu, pro měření SAT. Popisuje možnosti zpracování nabytých dat, i jejich následnou analýzu.

Prezentovaná evidence jasně poukazuje na významnost navrhovaného měření, které by mohlo představovat cenné rozšíření poznatků o problematice aproximálního numerického systému.

10 Shrnutí

Teoretická část začíná pohledem na numerozitu, zaměřuje se na symbolické i nesymbolické zpracování čísla a popisuje mechanismy za tímto zpracováním stojící. Dále se věnuje popisu neurálních korelátů a anatomického ukotvení matematických schopností. Vymezili jsme si zde, co vlastně matematické schopnosti jsou, představili si principy jejich osvojování a popsali i obecné modely inteligence. V další části jsme se věnovali popisu problematiky reakčních časů, principům jejich měření a zejména problematice, kterou způsobují v kompromisu s přesností. Tu jsme popsali jak prezentovanými výzkumy, tak jejím přímým působením v rámci testu, kde jsme se jí věnovali spolu s obecnými atributy tvorby testové metody. Poslední kapitola teoretické části jsme vyhradili popisu, principům, i omezením funkce EEG, které je nezbytným nástrojem prezentovaného návrhu.

Praktickou část začínáme představením celkové výzkumné koncepce, zaměřujeme se zde na hypotézy a prezentujeme zamýšlený výzkumný soubor. Následně se v práci zaměřujeme přímo na průběh navrhovaných experimentů. Ukazujeme jeho jednotlivé fáze, počínaje administrací inteligenčního testu pro rozdělení probandů do skupin. Dále se soustředíme na popis principu, administrace i zpracování samotného testování aproximálně aritmetických úloh, které je konceptuálně měřeno za pomoci zobrazovací metody EEG. A v neposlední řadě líčíme i návrh nově upraveného designu testu pro měření reakčních časů, respektive vztahu reakčních časů a přesnosti reakční odpovědi. V této kapitole probíráme výběr kognitivního testu, veškeré úpravy, které pro jeho administraci navrhujeme, stejně tak jako teoretickou možnost standardizované administrace této úpravy. Finální kapitola praktické části je následně zaměřena na analýzu získaných dat.

Relativní náročnost posledních logaritmů ANS testu by taktéž mohla vést k výraznému ovlivnění CAF; proband by je nemusel být schopen dostatečně posoudit a zvládat. Výhodou CAF je nicméně ta skutečnost, že může být na rozdíl od SATF vypočítán pro celý vzorek, pro každý deadline či logaritmus zvlášť, nebo jen pro část, dejme tomu prvních 8 logaritmů, které daný proband kupříkladu normálně zvládal.

Seznam literatury

1. Abhang, P. A., Gawali, B. W., & Mehrotra, S. C. (2016). Technological Basics of EEG Recording and Operation of Apparatus. In *Introduction to EEG- and Speech-Based Emotion Recognition* (pp. 19-50). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804490-2.00002-6>
2. Acunzo, D. J., MacKenzie, G., & van Rossum, M. C. W. (2012). Systematic biases in early ERP and ERF components as a result of high-pass filtering. *Journal of Neuroscience Methods*, 209(1), 212-218. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2012.06.011>
3. Agrillo, C., Piffer, L., Bisazza, A., & Butterworth, B. (2012). Evidence for Two Numerical Systems That Are Similar in Humans and Guppies. *PLoS ONE*, 7(2). doi: 10.1371/journal.pone.0031923
4. Alday, P. M. (2019). How much baseline correction do we need in ERP research? Extended GLM model can replace baseline correction while lifting its limits. *Psychophysiology*, 56(12). <https://doi.org/10.1111/psyp.13451>
5. Amthauer, R., Brocek, B., Liepmann, D., Beaidicel, A. (2015). *Příručka, Test struktury inteligence*. Praha: Testcentrum.
6. Andres, M., Pelgrims, B., Michaux, N., Olivier, E., & Pesenti, M. (2011). Role of distinct parietal areas in arithmetic: An fMRI-guided TMS study. *Neuroimage*, 54(4), 3048-3056. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.009>
7. Ansari, D. (2008). Effects of development and enculturation on number representation in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 278-291. <https://doi.org/10.1038/nrn2334>
8. Ansari, D. (2010). Neurocognitive approaches to developmental disorders of numerical and mathematical cognition: The perils of neglecting the role of development. *Learning and Individual Differences*, 20(2), 123–129. doi: 10.1016/j.lindif.2009.06.001
9. Ansari, D., Lyons, I. M., van Eimeren, L., & Xu, F. (2007). Linking Visual Attention and Number Processing in the Brain: The Role of the Temporo-parietal Junction in Small and Large Symbolic and Nonsymbolic Number Comparison. *Journal Of Cognitive Neuroscience*, 19(11), 1845-1853. <https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.11.1845>
10. Antell, S. E., & Keating, D. P. (1983). Perception of Numerical Invariance in Neonates. *Child Development*, 54(3). <https://doi.org/10.2307/1130057>
11. Ardila, A., & Rosselli, M. (2002). Acalculia and Dyscalculia. *Neuropsychology Review*, 12(4), 179-231. <https://doi.org/10.1023/A:1021343508573>

12. Bareš, M. (2011). Kognitivní evokované potenciály. *Česká a slovenská neurologie a neurochirurgie*, 74/107(5), 508-517. Získáno z <https://www.csnn.eu/pdf?id=36052>
13. Barrett, L. F. (2018). *How Emotions Are Made: The Secret Life of the Brain*. Mariner Books.
14. Barrett, L. F., & Satpute, A. B. (2019). Historical pitfalls and new directions in the neuroscience of emotion. *Neuroscience Letters*, 693, 9-18.
<https://doi.org/10.1016/j.neulet.2017.07.045>
15. Bartholomew, D. J. (1995). Spearman and the origin and development of factor analysis. *British Journal Of Mathematical And Statistical Psychology*, 48(2), 211-220.
<https://doi.org/10.1111/j.2044-8317.1995.tb01060.x>
16. Berl, M. M., Vaidya, C. J., & Gaillard, W. D. (2006). Functional imaging of developmental and adaptive changes in neurocognition. *Neuroimage*, 30(3), 679-691.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.10.007>
17. Bi, W. L., Olubiyi, O., Tharin, S., & Golby, A. J. (2016). Neurosurgical Treatment Planning. In *Handbook of Neuro-Oncology Neuroimaging* (pp. 217-229). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800945-1.00023-9>
18. Bogacz, R., Wagenmakers, E. -J., Forstmann, B. U., & Nieuwenhuis, S. (2010). The neural basis of the speed–accuracy tradeoff. *Trends in Neurosciences*, 33(1), 10-16.
<https://doi.org/10.1016/j.tins.2009.09.002>
19. Boles, D. B., & Clifford, J. E. (1989). An upper- and lowercase alphabetic similarity matrix, with derived generation similarity values. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 21(6), 579-586. <https://doi.org/10.3758/BF03210580>
20. Bonnet, C., & Dresch, B. (1993). A fast procedure for studying conditional accuracy functions. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 25(1), 2-8.
<https://doi.org/10.3758/BF03204443>
21. Brannon, E. M., & Terrace, H. S. (2000). Representation of the numerosities 1-9 by rhesus macaques (*Macaca mulatta*). *Journal Of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 26(1), 31-49. <https://doi.org/10.1037//0097-7403.26.1.31>
22. Brienza, M., & Mecarelli, O. (2019). Neurophysiological Basis of EEG. In O. Mecarelli (Ed.), *Clinical Electroencephalography* (pp. 9-21). Springer International Publishing.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-04573-9_2
23. Bray, M. (Ed.). (2012). *The Oxford handbook of school psychology*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780195369809.001.0001>
24. Buckingham, H. (2013). Leonard L. LaPointe. Paul Broca and the Origins of Language in the Brain. *Journal Of The History Of The Neurosciences*, 23(1), 95-101.
<https://doi.org/10.1080/0964704X.2013.787681>

25. Butterworth, B. (2010). Foundational numerical capacities and the origins of dyscalculia. *Trends In Cognitive Sciences*, 14(12), 534-541.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.09.007>
26. Cantlon, J. F., & Brannon, E. M. (2007). How much does number matter to a monkey (Macaca mulatta)? *Journal Of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, 33(1), 32-41. <https://doi.org/10.1037/0097-7403.33.1.32>
27. Cantlon, J. F., Libertus, M. E., Pineda, P., Dehaene, S., Brannon, E. M., & Pelphrey, K. A. (2009). The Neural Development of an Abstract Concept of Number. *Journal Of Cognitive Neuroscience*, 21(11), 2217-2229. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.21159>
28. Carlson, J. S., & Jensen, C. M. (1982). Reaction time, movement time, and intelligence: A replication and extension. *Intelligence*, 6(3), 265-274. [https://doi.org/10.1016/0160-2896\(82\)90003-4](https://doi.org/10.1016/0160-2896(82)90003-4)
29. Carpenter, A. L., & Shahin, A. J. (2013). Development of the N1–P2 auditory evoked response to amplitude rise time and rate of formant transition of speech sounds. *Neuroscience Letters*, 544, 56-61. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2013.03.041>
30. Daly, I., Pichiorri, F., Faller, J., Kaiser, V., Kreiling, A., Scherer, R., & Muller-Putz, G. (2012). What does clean EEG look like? In 2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (pp. 3963-3966). IEEE.
<https://doi.org/10.1109/EMBC.2012.6346834>
31. Dambacher, M., & Hübner, R. (2013). Investigating the speed–accuracy trade-off: Better use deadlines or response signals? *Behavior Research Methods*, 45(3), 702-717.
<https://doi.org/10.3758/s13428-012-0303-0>
32. de Cheveigné, A., & Nelken, I. (2019). Filters: When, Why, and How (Not) to Use Them. *Neuron*, 102(2), 280-293. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2019.02.039>
33. Decker, D. A., & Knott, J. R. (1972). The EEG in intrinsic supratentorial brain tumors: A comparative evaluation. *Electroencephalography And Clinical Neurophysiology*, 33(3), 303-310. [https://doi.org/10.1016/0013-4694\(72\)90157-5](https://doi.org/10.1016/0013-4694(72)90157-5)
34. Dehaene, S. (1996). The Organization of Brain Activations in Number Comparison: Event-Related Potentials and the Additive-Factors Method. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8(1), 47-68. <https://doi.org/10.1162/jocn.1996.8.1.47>
35. Dehaene, S. (2001). Precis of The Number Sense. *Mind And Language*, 16(1), 16-36.
<https://doi.org/10.1111/1468-0017.00154>
36. Dehaene, S., & Brannon, E. (2011). Space, time and number in the brain: searching for the foundations of mathematical thought : an attention and performance series volume. Elsevier Academic Press.

37. Dehaene, S., & Cohen, L. (1991). Two mental calculation systems: A case study of severe acalculia with preserved approximation. *Neuropsychologia*, 29(11), 1045-1074. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(91\)90076-K](https://doi.org/10.1016/0028-3932(91)90076-K)
38. Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). Toward an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1, 83-120.
39. Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. (2005). The neural code for written words: a proposal. *Trends In Cognitive Sciences*, 9(7), 335-341. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.05.004>
40. Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). THREE PARIETAL CIRCUITS FOR NUMBER PROCESSING. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3-6), 487-506. <https://doi.org/10.1080/02643290244000239>
41. Deloche, G., Mannequin, D., Carlomagno, S., Agniel, A., Dordain, M., Pasquier, F., Pellat, J., Denis, P., Desi, M., Beauchamp, D., Metz-Lutz, M. -N., Cesaro, P., & Seron, X. (1995). Calculation and number processing in mild Alzheimer's disease. *Journal Of Clinical And Experimental Neuropsychology*, 17(4), 634-639. <https://doi.org/10.1080/01688639508405151>
42. DeWind, N. K., & Brannon, E. M. (2012). Malleability of the approximate number system: effects of feedback and training. *Frontiers In Human Neuroscience*, 6. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00068>
43. Donders, F. C. (1969). On the speed of mental processes. *Acta Psychologica*, 30, 412-431. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(69\)90065-1](https://doi.org/10.1016/0001-6918(69)90065-1)
44. Dong, L., Li, F., Liu, Q., Wen, X., Lai, Y., Xu, P., & Yao, D. (2017). MATLAB Toolboxes for Reference Electrode Standardization Technique (REST) of Scalp EEG. *Frontiers in Neuroscience*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00601>
45. Duprez, J., Houvenaghel, J. -F., Argaud, S., Naudet, F., Dondaine, T., Auffret, M., Robert, G., Drapier, D., Vérin, M., & Sauleau, P. (2016). Enhanced Impulsive Action Selection in Middle-Aged Adults—Insights From an Oculomotor Simon Task. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2016.00251>
46. Eger, E., Sterzer, P., Russ, M. O., Giraud, A. -L., & Kleinschmidt, A. (2003). A Supramodal Number Representation in Human Intraparietal Cortex. *Neuron*, 37(4), 719-726. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(03\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00036-9)
47. Everitt, B. S., & Howell, D. C. (Eds.). (2005). *Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science*. John Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470013192>
48. Farnsworth, B. (2016) What is EEG (Electroencephalography) and How Does it Work? *IMOTIONS*

49. Fleischner, J. E., & Garnett, K. (1993). Math Disorders. *Child And Adolescent Psychiatric Clinics Of North America*, 2(2), 221-231. [https://doi.org/10.1016/S1056-4993\(18\)30563-7](https://doi.org/10.1016/S1056-4993(18)30563-7)
50. Gajewski, P. D., & Falkenstein, M. (2013). Effects of task complexity on ERP components in Go/Nogo tasks. *International Journal of Psychophysiology*, 87(3), 273-278. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2012.08.007>
51. Gallistel, C. R. (2011). Mental magnitudes. In S. Dehaene & E. Brannon (Eds.), *Space, time and number in the brain: Searching for the foundations of mathematical thought* (p. 3–12). Elsevier Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-12-385948-8.00001-3
52. Gardner, M. K. In Bray, M. (2012). *The Oxford handbook of school psychology*. Oxford University Press. doi: 10.1093/oxfordhb/9780195369809.001.0001
53. Gardner, M. K., & Clark, E. (1992). The psychometric perspective on intellectual development in childhood and adolescence. In Sternberg, R. J., & Berg, C. A. (Eds.). *Intellectual development*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
54. Geary, D. C. (1993). Mathematical disabilities: Cognitive, neuropsychological, and genetic components. *Psychological Bulletin*, 114(2), 345-362. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.114.2.345>
55. Geary, D. C., & Hoard, M. K. (2005). Learning disabilities in arithmetic and mathematics: Theoretical and empirical perspectives. In J. I. D. Campbell (Ed.), *Handbook of mathematical cognition* (p. 253–267). Psychology Press.
56. Gelman, R., & Gallistel, C. R. (1986). *The child's understanding of number*. Harvard University Press.
57. Gilmore, C. K., McCarthy, S. E., & Spelke, E. S. (2010). Non-symbolic arithmetic abilities and mathematics achievement in the first year of formal schooling. *Cognition*, 115(3), 394-406. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.02.002>
58. Goldin, A. P., Hermida, M. J., Shalom, D. E., Elias Costa, M., Lopez-Rosenfeld, M., Segretin, M. S., Fernandez-Slezak, D., Lipina, S. J., & Sigman, M. (2014). Far transfer to language and math of a short software-based gaming intervention. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, 111(17), 6443-6448. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320217111>
59. Gouet, C., Gutiérrez Silva, C. A., Guedes, B., & Peña, M. (2018). Cognitive and Neural Effects of a Brief Nonsymbolic Approximate Arithmetic Training in Healthy First Grade Children. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 12. <https://doi.org/10.3389/fnint.2018.00028>
60. Grimaldi, M., & Jeanmonod, R. (2018). Acute stroke presenting with isolated acalculia. *The American Journal Of Emergency Medicine*, 36(10), 1923.e1-1923.e3. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2018.06.038>

61. Grissinger, M. (2017). Misidentification of Alphanumeric Symbols Plays a Role in Errors. NCBI. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5614409/>
62. Haas, L. F. (2003). Hans Berger (1873-1941), Richard Caton (1842-1926), and electroencephalography. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 74(1), 9-9. <https://doi.org/10.1136/jnnp.74.1.9>
63. Haist, F., Wazny, J. H., Toomarian, E., & Adamo, M. (2015). Development of brain systems for nonsymbolic numerosity and the relationship to formal math academic achievement. *Human Brain Mapping*, 36(2), 804-826. <https://doi.org/10.1002/hbm.22666>
64. Halberda, J., Ly, R., Wilmer, J. B., Naiman, D. Q., & Germine, L. (2012). Number sense across the lifespan as revealed by a massive Internet-based sample. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(28), 11116-11120. <https://doi.org/10.1073/pnas.1200196109>
65. Hawes, Z., Moss, J., Caswell, B., Seo, J., & Ansari, D. (2019). Relations between numerical, spatial, and executive function skills and mathematics achievement: A latent-variable approach. *Cognitive Psychology*, 109, 68-90. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2018.12.002>
66. Heitz, R. P. (2014). The speed-accuracy tradeoff: history, physiology, methodology, and behavior. *Frontiers In Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00150>
67. Hellgren, K., Halberda, J., Forsman, L., Ådén, U., & Libertus, M. (2013). Compromised approximate number system acuity in extremely preterm school-aged children. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55(12), 1109-1114. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12206>
68. Henschen, S. E. (1925). Clinical and anatomical contributions on brain pathology. *Archives Of Neurology And Psychiatry*, 13(2). <https://doi.org/10.1001/archneurpsyc.1925.02200080073006>
69. Herculano-Houzel, S. (2009). The human brain in numbers: a linearly scaled-up primate brain. *Frontiers In Human Neuroscience*, 3. <https://doi.org/10.3389/neuro.09.031.2009>
70. Hick, W. E. (1958/2018). On the Rate of Gain of Information. *Quarterly Journal Of Experimental Psychology*, 4(1), 11-26. <https://doi.org/10.1080/17470215208416600>
71. Hooper, F. H. (1969). Piaget's conservation tasks: The logical and development priority of identity conservation. *Journal Of Experimental Child Psychology*, 8(2), 234-249. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(69\)90098-8](https://doi.org/10.1016/0022-0965(69)90098-8)
72. Howell, W. C., & Kreidler, D. L. (1963). Information processing under contradictory instructional sets. *Journal of Experimental Psychology*, 65(1), 39-46. <https://doi.org/10.1037/h0038982>

73. Hyde, D. C. (2011). Two Systems of Non-Symbolic Numerical Cognition. *Frontiers In Human Neuroscience*, 5. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00150>
74. Hyde, D. C., & Spelke, E. S. (2011). Spatiotemporal dynamics of processing nonsymbolic number: An event-related potential source localization study. *Human Brain Mapping*, 33(9), 2189-2203. <https://doi.org/10.1002/hbm.21352>
75. Chochon, F., Cohen, L., Moortele, P. F. van de, & Dehaene, S. (1999). Differential Contributions of the Left and Right Inferior Parietal Lobules to Number Processing. *Journal Of Cognitive Neuroscience*, 11(6), 617-630. <https://doi.org/10.1162/089892999563689>
76. Janoušková, N. (2019). *EEG ERP inhibiční reakce selektivní pozornosti u bilingvních osob* (kvalifikační práce) Dostupné z webových stránek VŠ: <https://wstag.jcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>
77. Jensen, A. R. (1981). Reaction Time and Intelligence. In M. P. Friedman, J. P. Das, & N. O'Connor (Eds.), *Intelligence and Learning* (pp. 39-50). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-1083-9_4
78. Jensen, A. R. (1982). Reaction Time and Psychometric g. In H. J. Eysenck (Ed.), *A Model for Intelligence* (pp. 93-132). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-68664-1_4
79. Jensen, A. R. (2006). *Clocking the mind: mental chronometry and individual differences*. Amsterdam: Elsevier.
80. Jensen, A. R., & Munro, E. (1979). Reaction time, movement time, and intelligence. *Intelligence*, 3(2), 121-126. [https://doi.org/10.1016/0160-2896\(79\)90010-2](https://doi.org/10.1016/0160-2896(79)90010-2)
81. Kaan, E., & Swaab, T. Y. (2003). Repair, Revision, and Complexity in Syntactic Analysis: An Electrophysiological Differentiation. *Journal Of Cognitive Neuroscience*, 15(1), 98-110. <https://doi.org/10.1162/089892903321107855>
82. Kahn, H. J., & Whitaker, H. A. (1991). Acalculia: An historical review of localization. *Brain And Cognition*, 17(2), 102-115. [https://doi.org/10.1016/0278-2626\(91\)90071-F](https://doi.org/10.1016/0278-2626(91)90071-F)
83. Kappenman, E. S., & Luck, S. J. (2010). The effects of electrode impedance on data quality and statistical significance in ERP recordings. *Psychophysiology*. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2010.01009.x>
84. Kaufman, E. L., Lord, M. W., Reese, T. W., & Volkman, J. (1949). The Discrimination of Visual Number. *The American Journal Of Psychology*, 62(4). <https://doi.org/10.2307/1418556>
85. Kaufmann, L., Kucian, K., & Aster, M. V. (2014). Development of the numerical brain. *Oxford Handbooks Online*. doi: 10.1093/oxfordhb/9780199642342.013.008

86. Klein, R. M. (2003). Chronometric explorations of disordered minds. *Trends In Cognitive Sciences*, 7(5), 190-192. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00093-7](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00093-7)
87. Klempířová, K. (2019). *Numerozita u dětí s Aspergerovým syndromem* (kvalifikační práce) Dostupné z webových stránek VŠ: <https://wstag.jcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>
88. Kornblum, S. (1973). Simple reaction time as a race between signal detection and time estimation: A paradigm and model. *Perception & Psychophysics*, 13(1), 108-112. <https://doi.org/10.3758/BF03207243>
89. Kratochvílová, D. (2019). *Numerozita u vysokoškolských studentů* (kvalifikační práce) Dostupné z webových stránek VŠ: <https://wstag.jcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>
90. Kristensen, E., Guerin-Dugué, A., & Rivet, B. (2017). Regularization and a general linear model for event-related potential estimation. *Behavior Research Methods*, 49(6), 2255-2274. <https://doi.org/10.3758/s13428-017-0856-z>
91. Kropotov, J. D. (2009). Beta Rhythms. In *Quantitative EEG, Event-Related Potentials and Neurotherapy* (pp. 59-76). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374512-5.00003-7>
92. Kuhn, J. -T., & Holling, H. (2014). Number sense or working memory? The effect of two computer-based trainings on mathematical skills in elementary school. *Advances In Cognitive Psychology*, 10(2), 59-67. <https://doi.org/10.5709/acp-0157-2>
93. Kutas, M., & Hillyard, S. (1980). Reading senseless sentences: brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, 207(4427), 203-205. <https://doi.org/10.1126/science.7350657>
94. La Vaque, T. J. (1999). The History of EEG Hans Berger. *Journal Of Neurotherapy*, 3(2), 1-9. https://doi.org/10.1300/J184v03n02_01
95. LaPointe, L. L. (2013). *Paul Broca and the origins of language in the brain*. San Diego: Plural Pub.
96. Lappin, J. S., & Disch, K. (1972). The latency operating characteristic: I. Effects of stimulus probability on choice reaction time. *Journal of Experimental Psychology*, 92(3), 419-427. <https://doi.org/10.1037/h0032360>
97. Lee, K.-M. (2000). Cortical areas differentially involved in multiplication and subtraction: A functional magnetic resonance imaging study and correlation with a case of selective acalculia. *Annals of Neurology*, 48(4), 657–661. doi: 10.1002/1531-8249(200010)48:4<657::aid-ana13>3.0.co;2-k
98. Li, Y., Wang, Y., Zhang, B., Wang, Y., & Zhou, X. (2018). Electrophysiological Responses to Expectancy Violations in Semantic and Gambling Tasks: A Comparison of Different EEG Reference Approaches. *Frontiers in Neuroscience*, 12. <https://doi.org/10.3389/fnins.2018.00169>

99. Libertus, M. E., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Preschool acuity of the approximate number system correlates with school math ability. *Developmental Science*, 14(6), 1292-1300. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2011.01080.x>
100. Lightfoot, G. (2016). Summary of the N1-P2 Cortical Auditory Evoked Potential to Estimate the Auditory Threshold in Adults. *Seminars In Hearing*, 37(01), 001-008. <https://doi.org/10.1055/s-0035-1570334>
101. Liu, R., Schunn, C. D., Fiez, J. A., & Libertus, M. E. (2018). The integration between nonsymbolic and symbolic numbers: Evidence from an EEG study. *Brain And Behavior*, 8(4). <https://doi.org/10.1002/brb3.938>
102. Looi, C. Y., & Cohen Kadosh, R. (2016). Brain stimulation, mathematical, and numerical training. In *The Mathematical Brain Across the Lifespan* (pp. 353-388). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.pbr.2016.04.009>
103. Loring, D. W., & Bowden, S. (2015). *INS dictionary of neuropsychology and clinical neurosciences*. Oxford: Oxford University Press.
104. Luce, R. D. (1986/1991). Response times: their role in inferring elementary mental organization. New York: Oxford University Press.
105. MacLean, P. D. (1985). Brain Evolution Relating to Family, Play, and the Separation Call. *Archives of General Psychiatry*, 42(4). <https://doi.org/10.1001/archpsyc.1985.01790270095011>
106. MacLean, P. D. (1990). *The Triune Brain in Evolution: Role in Paleocerebral Functions* (1990th ed.). Springer.
107. Mayer, E. (1999) A pure case of Gerstmann syndrome with a subangular lesion. *Brain*, 122(6), 1107-1120. <https://doi.org/10.1093/brain/122.6.1107>
108. Mecarelli, O. (Ed.). (2019). *Clinical Electroencephalography*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-04573-9>
109. Meyer, D. E., Osman, A. M., Irwin, D. E., & Yantis, S. (1988). Modern mental chronometry. *Biological Psychology*, 26(1-3), 3-67. [https://doi.org/10.1016/0301-0511\(88\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0301-0511(88)90013-0)
110. Mihajlovic, A., Egeric, M. Dejjic, M. (2008, leden). *Mathematical abilities: identification and development*. XV International Conference Mathematics, Dubna, Rusko
111. Moore, N. C., Tucker, K. A., Jann, M. W., Hostetler, R. M., & Coburn, K. L. (1995). Flash P2 delay in primary degenerative dementia of the Alzheimer type. *Progress In Neuro-Psychopharmacology And Biological Psychiatry*, 19(3), 403-410. [https://doi.org/10.1016/0278-5846\(95\)00021-M](https://doi.org/10.1016/0278-5846(95)00021-M)
112. Nadel, L. (Ed.). (2006). *Encyclopedia of Cognitive Science*. John Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470018860>

113. Nayak, C. S., & Anilkumar, A. C. (2020) EEG Normal Waveforms. Dostupné z webových stránek: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK539805/>
114. Nevšimalová, S., Tichý, J., & Růžička, E. (c2002). Neurologie. Galén.
115. Nieder, A., & Dehaene, S. (2009). Representation of Number in the Brain. *Annual Review Of Neuroscience*, 32(1), 185-208. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.051508.135550>
116. Niemi, P., & Näätänen, R. (1981). Foreperiod and simple reaction time. *Psychological Bulletin*, 89(1), 133-162. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.89.1.133>
117. O'Driscoll, K., & Leach, J. P. (1998). "No longer Gage": an iron bar through the head. *Bmj*, 317(7174), 1673-1674. <https://doi.org/10.1136/bmj.317.7174.1673a>
118. Park, J., & Brannon, E. M. (2014). Improving arithmetic performance with number sense training: An investigation of underlying mechanism. *Cognition*, 133(1), 188-200. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2014.06.011>
119. Park, J., & Starns, J. J. (2015). The Approximate Number System Acuity Redefined: A Diffusion Model Approach. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01955>
120. Patrick, C. J., Bernat, E. M., Malone, S. M., Iacono, W. G., Krueger, R. F., & McGue, M. (2006). P300 amplitude as an indicator of externalizing in adolescent males. *Psychophysiology*, 43(1), 84-92. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8986.2006.00376.x>
121. Piaget, J. (1965). *The child's conception of number*. London: Routledge & Kegan Paul
122. Piazza, M. (2010). Neurocognitive start-up tools for symbolic number representations. *Trends In Cognitive Sciences*, 14(12), 542-551. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.09.008>
123. Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A. N., Berteletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., Dehaene, S., & Zorzi, M. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia. *Cognition*, 116(1), 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.03.012>
124. Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Tuning Curves for Approximate Numerosity in the Human Intraparietal Sulcus. *Neuron*, 44(3), 547-555. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.10.014>
125. Piazza, M., Mechelli, A., Price, C. J., & Butterworth, B. (2006). Exact and approximate judgements of visual and auditory numerosity: An fMRI study. *Brain Research*, 1106(1), 177-188. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.05.104>

126. Piazza, M., Pinel, P., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2007). A Magnitude Code Common to Numerosities and Number Symbols in Human Intraparietal Cortex. *Neuron*, 53(2), 293-305. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.11.022>
127. Picton, T. W. (1992). The P300 Wave of the Human Event-Related Potential. *Journal Of Clinical Neurophysiology*, 9(4), 456-479. <https://doi.org/10.1097/00004691-199210000-00002>
128. Plassová, M. (2019) *Neurální koreláty aritmetických funkcí* (kvalifikační práce) Dostupné z webových stránek VŠ: <https://wstag.jcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>
129. Plassová, M., Stuchlíková, I., & Vavrečka, M. (2017). Úvod do aproximálního numerického systému. *Pedagogika*, 67(2). <https://doi.org/10.14712/23362189.2017.410>
130. Polich, J. (2007). Updating P300: An integrative theory of P3a and P3b. *Clinical Neurophysiology*, 118(10), 2128-2148. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2007.04.019>
131. Posner, M. I. (2005). Timing the Brain: Mental Chronometry as a Tool in Neuroscience. *Plos Biology*, 3(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0030051>
132. Potter, M. C., & Levy, E. I. (1968). Spatial Enumeration without Counting. *Child Development*, 39(1). <https://doi.org/10.2307/1127377>
133. Price, G., & Ansari, D. (2013). Dyscalculia: Characteristics, Causes, and Treatments. *Numeracy*, 6(1). <https://doi.org/10.5038/1936-4660.6.1.2>
134. Proekt, A. (2018). Brief Introduction to Electroencephalography. In *Chemical and Biochemical Approaches for the Study of Anesthetic Function Part B* (pp. 257-277). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.mie.2018.02.009>
135. Rousselle, L., & Noël, M. -P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: A comparison of symbolic vs non-symbolic number magnitude processing. *Cognition*, 102(3), 361-395. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.01.005>
136. Runehov, A. L. C., & Oviedo, L. (Eds.). (2013). *Encyclopedia of Sciences and Religions*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8265-8>
137. Rusconi, E., & Cubelli, R. (2019). The making of a syndrome: The English translation of Gerstmann's first report. *Cortex*, 117, 277-283. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2019.03.021>
138. Samavatyan, H., & Leth-Steensen, C. (2009). The time course of task switching: A speed—accuracy trade-off analysis. *Memory & Cognition*, 37(7), 1051-1058. <https://doi.org/10.3758/MC.37.7.1051>
139. Sarnecka, B. W., & Wright, C. E. (2013). The Idea of an Exact Number: Children's Understanding of Cardinality and Equinumerosity. *Cognitive Science*, 37(8), 1493-1506. <https://doi.org/10.1111/cogs.12043>

140. Seidl, Z. & Obenberger, J. (2004). *Neurologie pro studium i praxi*. Praha: Grada Publishing.
141. Shannon, C. E. (1948). A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27(3), 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
142. Schall, J. D., & Woodman, G. F. (2012). A Stage Theory of Attention and Action. In G. R. Mangun, *The Neuroscience of Attention Attentional Control and Selection* (pp. 187-208). Oxford University Press.
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195334364.003.0009>
143. Sochorová, M. (2018) *EEG ERP inhibiční reakce selektivní pozornosti u bilingvních osob* (kvalifikační práce) Dostupné z webových stránek VŠ:
<https://wstag.jcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>
144. Sokolowski, H. M., & Ansari, D. (2016). Symbolic and Nonsymbolic Representation of Number in the Human Parietal Cortex: A Review of the State-of-the-Art, Outstanding Questions and Future Directions. In *Continuous Issues in Numerical Cognition* (pp. 326-353). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801637-4.00015-9>
145. Soltész, F., & Szűcs, D. (2014). Neural adaptation to non-symbolic number and visual shape: An electrophysiological study. *Biological Psychology*, 103, 203-211.
<https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2014.09.006>
146. Spearman, C. (1904). "General Intelligence," Objectively Determined and Measured. *The American Journal of Psychology*, 15(2).
<https://doi.org/10.2307/1412107>
147. Spearman, C. (1927). *The abilities of man*. New York: Macmillan.
148. St. Louis, E., Frey, L., Britton, J., Hopp, J., Korb, P., Koubeissi, M., Lievens, W., & Pestana-Knight, E. (2016). *Electroencephalography (EEG): An Introductory Text and Atlas of Normal and Abnormal Findings in Adults, Children, and Infants*. American Epilepsy Society. <https://doi.org/10.5698/978-0-9979756-0-4>
149. Sternberg, R. J. (1986). GENECEs: A framework for intellectual abilities and theories of them. *Intelligence*, 10(3), 239-250. [https://doi.org/10.1016/0160-2896\(86\)90018-8](https://doi.org/10.1016/0160-2896(86)90018-8)
150. Sternberg, R. J. (1986). GENECEs: A framework for intellectual abilities and theories of them. *Intelligence*, 10(3), 239-250. [https://doi.org/10.1016/0160-2896\(86\)90018-8](https://doi.org/10.1016/0160-2896(86)90018-8)
151. Sternberg, R. J. (2000). *Handbook of intelligence*. Cambridge: Cambridge University Press. doi: 10.1017/CBO9780511807947
152. Sternberg, R. J. (2002). *Kognitivní psychologie*. Portál.

153. Sternberg, S. (1969). The discovery of processing stages: Extensions of Donders' method. *Acta Psychologica*, 30, 276-315. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(69\)90055-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(69)90055-9)
154. Sur, S., & Sinha, V. K. (2009). Event-related potential: An overview. *Industrial Psychiatry Journal*, 18(1). <https://doi.org/10.4103/0972-6748.57865>
155. Sutton, S., Braren, M., Zubin, J., & John, E. R. (1965). Evoked-Potential Correlates of Stimulus Uncertainty. *Science*, 150(3700), 1187-1188. <https://doi.org/10.1126/science.150.3700.1187>
156. Szkudlarek, E., & Brannon, E. M. (2017). Does the Approximate Number System Serve as a Foundation for Symbolic Mathematics? *Language Learning And Development*, 13(2), 171-190. <https://doi.org/10.1080/15475441.2016.1263573>
157. Šimková, K., M. (2018) *Vietnamsko-česky bilingvní adolescenti na EEG – zjišťování efektu bilingvnosti na kognitivní výhodu* (kvalifikační práce) Dostupné z webových stránek VŠ: <https://wstag.jcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>
158. Takayama, Y., Sugishita, M., Akiguchi, I., & Kimura, J. (1994). Isolated Acalculia due to Left Parietal Lesion. *Archives Of Neurology*, 51(3), 286-291. <https://doi.org/10.1001/archneur.1994.00540150084021>
159. Tan, D. E. B., Tung, R. S., Leong, W. Y., & Than, J. C. M. (2012). Sleep Disorder Detection and Identification. *Procedia Engineering*, 41, 289-295. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.175>
160. Tanner, D., Norton, J. J. S., Morgan-Short, K., & Luck, S. J. (2016). On high-pass filter artifacts (they're real) and baseline correction (it's a good idea) in ERP/ERMF analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, 266, 166-170. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2016.01.002>
161. Temple, C. M. (1991). Procedural Dyscalculia and Number Fact Dyscalculia: Double Dissociation in Developmental Dyscalculia. *Cognitive Neuropsychology*, 8(2), 155-176. <https://doi.org/10.1080/02643299108253370>
162. Thurstone, L. L. (1924/2014). *Nature of intelligence*. London: Routledge.
163. Thurstone, L. L. (1947) *Multiple-factor analysis*. Chicago: University of Chicago Press.
164. Thurstone, L. L. (1948). Psychological implications of factor analysis. *American Psychologist*, 3(9), 402-408. <https://doi.org/10.1037/h0058069>
165. Trueman, R. C., Brooks, S. P., & Dunnett, S. B. (2012). Choice Reaction Time and Learning. In N. M. Seel (Ed.), *Encyclopedia of the Sciences of Learning* (pp. 534-537). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1428-6_594
166. Uttal, D. H., Meadow, N. G., Tipton, E., Hand, L. L., Alden, A. R., Warren, C., & Newcombe, N. S. (2013). The malleability of spatial skills: A meta-analysis of

- training studies. *Psychological Bulletin*, 139(2), 352-402.
<https://doi.org/10.1037/a0028446>
167. van Driel, J., Olivers, C. N. L., & Fahrenfort, J. J. (2021). High-pass filtering artifacts in multivariate classification of neural time series data. *Journal of Neuroscience Methods*, 352. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2021.109080>
168. VandenBos, G. R. (2015). *Apa dictionary of psychology*. Washington, DC: American Psychological Association.
169. Vickers, D., Nettelbeck, T., & Willson, R. J. (1972). Perceptual Indices of Performance: The Measurement of 'Inspection Time' and 'Noise' in the Visual System. *Perception*, 1(3), 263-295. <https://doi.org/10.1068/p010263>
170. von Aster, M. G., & Shalev, R. S. (2007). Number development and developmental dyscalculia. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 49(11), 868-873. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2007.00868.x>
171. Votavová, J. (2020). *Numerozita u hudebníků* (kvalifikační práce) Dostupné z webových stránek VŠ: <https://wstag.jcu.cz/portal/studium/prohlizeni.html>
172. Wechsler, D. (1958). *The Measurement and Appraisal of Adult Intelligence (4th ed.)*. Williams & Wilkins Co. <https://doi.org/10.1037/11167-000>
173. Wickelgren, W. A. (1977). Speed-accuracy tradeoff and information processing dynamics. *Acta Psychologica*, 41(1), 67-85. [https://doi.org/10.1016/0001-6918\(77\)90012-9](https://doi.org/10.1016/0001-6918(77)90012-9)
174. Wilson, K. M., & Swanson, H. L. (2016). Are Mathematics Disabilities Due to a Domain-General or a Domain-Specific Working Memory Deficit? *Journal Of Learning Disabilities*, 34(3), 237-248. <https://doi.org/10.1177/002221940103400304>
175. Wood, C. C., & Jennings, J. R. (1976). Speed-accuracy tradeoff functions in choice reaction time: Experimental designs and computational procedures. *Perception & Psychophysics*, 19(1), 92-102. <https://doi.org/10.3758/BF03199392>
176. Woodman, G. F. (2010). A brief introduction to the use of event-related potentials in studies of perception and attention. *Attention, Perception & Psychophysics*, 72(8), 2031-2046. <https://doi.org/10.3758/APP.72.8.2031>
177. World Health Organization. (2004). *International statistical classification of diseases and related health problems*. Geneva.
178. Wu, W., Keller, C. J., Rogasch, N. C., Longwell, P., Shpigel, E., Rolle, C. E., & Etkin, A. (2018). ARTIST: A fully automated artifact rejection algorithm for single-pulse TMS-EEG data. *Human Brain Mapping*, 39(4), 1607-1625. <https://doi.org/10.1002/hbm.23938>
179. Xu, F., & Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74(1), B1-B11. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(99\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(99)00066-9)

180. Young, M. E., Sutherland, S. C., & McCoy, A. W. (2018). Optimal go/no-go ratios to maximize false alarms. *Behavior Research Methods*, 50(3), 1020-1029.
<https://doi.org/10.3758/s13428-017-0923-5>

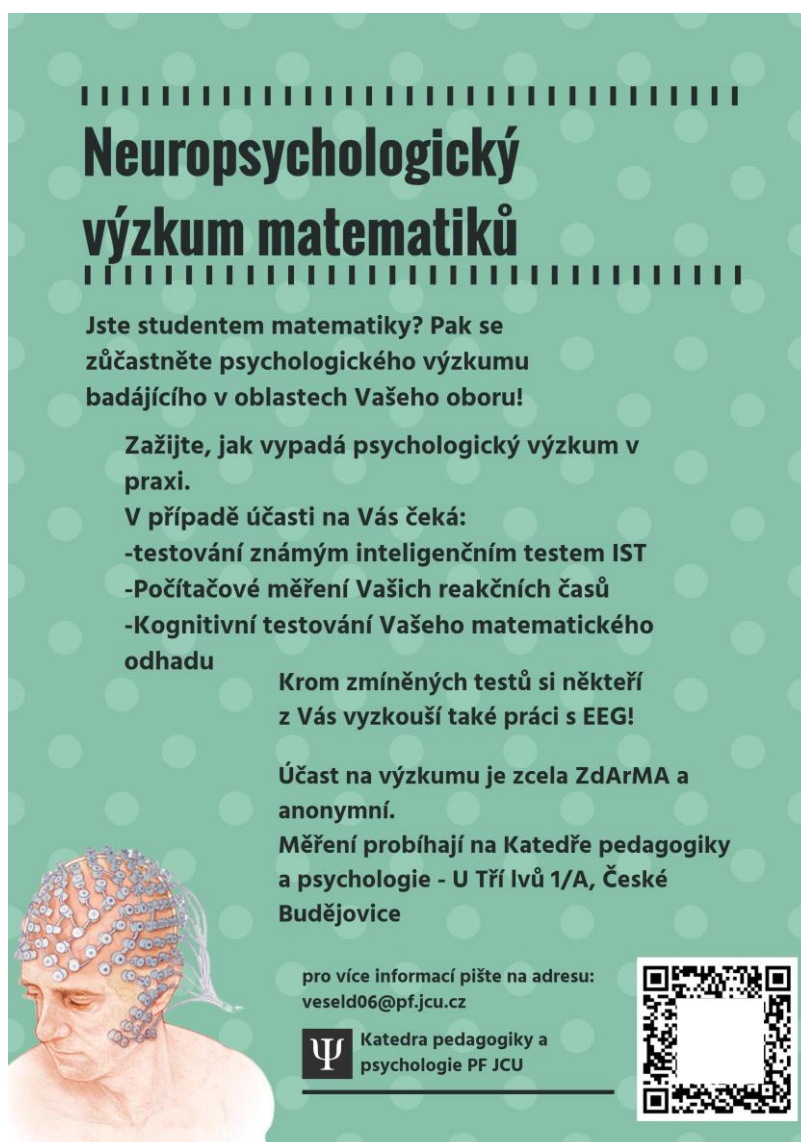
Seznam obrázků

<i>Obrázek 1</i> Lokalizace intraparietálních sulků (červeně) a angulárního gyru (žlutě). (dostupné z: https://bit.ly/3j7AFCy , https://bit.ly/3trpyJe).....	14
<i>Obrázek 2</i> Čtyřstupňový model vývoje numerické kognice (von Aster & Shalev, 2007).	17
<i>Obrázek 3</i> Ukázka stimulu a maskovací figura (Vickers et al., 1972).	27
<i>Obrázek 4</i> Rozložení 10-20 a 10-10 (Mecarelli, 2019).....	34
<i>Obrázek 5</i> Rozdíl mezi frekvencí a amplitudou (Mecarelli, 2019).....	35
<i>Obrázek 6</i> Monomorfní a polymorfní vlny (Mecarelli, 2019).	35
<i>Obrázek 7</i> Frekvenční pásma (Mecarelli, 2019).....	36
<i>Obrázek 8</i> Rozdíl vln s viditelnou deflekcí. (dostupné z https://hearinghealthmatters.org/pathways/2017/clinical-utility-p300-evoked-responses-post-sport-related-concussion-evaluation/).....	38
<i>Obrázek 9</i> Konvergence ve výzkumu struktury inteligence (Amthauer et al., 2015).....	43
<i>Obrázek 10</i> Ukázka příkladů početní úlohy (Amthauer et al., 2015).....	43
<i>Obrázek 11</i> Ukázka příkladů číselné řady (Amthauer et al., 2015).....	44
<i>Obrázek 12</i> Ukázka příkladů početní znaménka (Amthauer et al., 2015).....	44
<i>Obrázek 13</i> Konfirmativní analýza faktorů pro devět skupin úloh (Amthauer et al., 2015).	44
<i>Obrázek 14</i> Ukázka standardizovaných skóreů pro věk 18-33 let, absolventy středních škol – ženy (Amthauer et al., 2015).	46
<i>Obrázek 15</i> Původní verze aproximální aritmetické úlohy (Park & Brannon, 2014).....	47
<i>Obrázek 16</i> Ilustrace experimentální úlohy o obtížnostním logaritmu 1.5 (Plassová, 2019).	47
<i>Obrázek 17</i> Posloupnost testu (Plassová, 2019).....	48
<i>Obrázek 18</i> Ukázka principu filtrů propustnosti; a = amplituda, f = frekvence. (dostupné z https://bliricex.hypotheses.org/filtering-introduction)	53
<i>Obrázek 19</i> Příklad topografického modelu z práce dr. Plassové (2019).	54

Obrázek 20 Příklad vizualizace aktivity všech elektrod z práce dr. Plassové (2019).....	55
Obrázek 21 Příklad vizualizace aktivity na elektrodě P3 z práce dr. Plassové (2019).....	55
Obrázek 22 Příklad vizualizace p-hodnoty na elektrodě P3 z práce dr. Plassové (2019).	56
Obrázek 23 Ideální SAT funkce (Wood & Jennings, 1976).	57
Obrázek 24 Příklad vizualizace CAF v Simonově testu z práce dr. Drupeze (et al., 2016).....	57

Seznam příloh

Příloha č. 1 Plakátek-poutač



Neuropsychologický výzkum matematiků

Jste studentem matematiky? Pak se zúčastněte psychologického výzkumu badájcího v oblastech Vašeho oboru!

Zažijte, jak vypadá psychologický výzkum v praxi.

V případě účasti na Vás čeká:


- testování známým inteligenčním testem IST
- Počítačové měření Vašich reakčních časů
- Kognitivní testování Vašeho matematického odhadu


Krom zmíněných testů si někteří z Vás vyzkouší také práci s EEG!

Účast na výzkumu je zcela ZdArMA a anonymní.

Měření probíhají na Katedře pedagogiky a psychologie - U Tří lvů 1/A, České Budějovice

pro více informací pište na adresu:
veseld06@pf.jcu.cz

 Katedra pedagogiky a psychologie PF JCU



Příloha č. 2 Informovaný souhlas (1/2)



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Informovaný souhlas účastníka výzkumu:

Vážený pane, vážená paní,

v souladu se zásadami etické realizace výzkumu¹ Vás žádám o souhlas s Vaší účastí ve výzkumném projektu v rámci bakalářské práce.

Název projektu: Aproximální numerický systém u vysokoškolských studentů matematiky; evokované potenciály

Řešitel projektu: Denis Veselý, 725 [redacted], veseld06@pf.jcu.cz

Název pracoviště: Obor Psychologie, Katedra pedagogiky a psychologie, Pedagogické fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích.

Vedoucí práce: Mgr. Michala Plassová, Ph.D., mplassova@pf.jcu.cz

Cíl výzkumu: Prozkoumat schopnost matematického odhadu a matematického nadání u vysokoškolských studentů matematiky pomocí inteligenčního testu, behaviorálního testu, a za použití elektroencefalografie.

Popis výzkumu: Účastníci výzkumu budou podrobeni inteligenčnímu testu IST (Intelligence Structure Test) a behaviorálnímu testu na měření reakčního času. Doba trvání testování je závislá na situaci a účastníkovi. Osobní údaje účastníků nebudou nikomu dále předány a bude s nimi zacházeno anonymně. Osobní údaje budou odstraněny ihned po ukončení výzkumu. Účastníci jsou zapojeni do výzkumu na základě dobrovolného rozhodnutí. Za účast ve výzkumu nebude poskytnuta žádná peněžité forma odměny. Účastník je oprávněn k rozhodnutí kdykoliv z výzkumu odejít, a to bez udání důvodu.

.....
datum a podpis řešitele projektu

¹ Všeobecnou deklaraci lidských práv, nařízením Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 2016/679 o ochraně fyzických osob v souvislosti se zpracováním osobních údajů a o volném pohybu těchto údajů a o zrušení směrnice 95/46/ES (obecné nařízení o ochraně osobních údajů) a dalšími obecně závaznými právními předpisy (jimiž jsou zejména Helsinská deklarace přijatá 18. Světovým zdravotnickým shromážděním v roce 1964, ve znění pozdějších změn (Fortaleza, Brazílie, 2013), zákon č. 372/2011 Sb., o zdravotních službách a podmínkách jejich poskytování (zákon o zdravotních službách), ve znění pozdějších předpisů, zejména ustanovení jeho § 28 odst. 1, a Úmluva na ochranu lidských práv a důstojnosti lidské bytosti v souvislosti s aplikací biologie a medicíny: Úmluva o lidských právech a biomedicíně publikované pod č. 96/2001 Sb. m. s., jsou-li aplikovatelné).

Příloha č. 2 Informovaný souhlas (2/2)



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Prohlášení a souhlas účastníků s jejich zapojením do výzkumu:

Prohlašuji a svým níže uvedeným vlastnoručním podpisem potvrzuji, že dobrovolně souhlasím s účastí ve výše uvedeném projektu a že jsem měl/a možnost si řádně a v dostatečném čase zvážit všechny relevantní informace o výzkumu, zeptat se na vše podstatné týkající se účasti ve výzkumu a že jsem dostal/a jasné a srozumitelné odpovědi na své dotazy. Byl/a jsem poučen/a o právu odmítnout účast ve výzkumném projektu nebo svůj souhlas kdykoli odvolat.

Jméno a příjmení účastníka:..... Datum narození:.....

Adresa trvalého bydliště účastníka:.....

Podpis účastníka:..... Datum:.....

Příloha č. 3 Informovaný souhlas (1/3)



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Informovaný souhlas s EEG měřením

Vážený pane, vážená paní,

v souladu se zásadami etické realizace výzkumu¹ Vás žádám o souhlas s Vaší účastí ve výzkumném projektu v rámci bakalářské práce.

Název projektu: Aproximální numerický systém u vysokoškolských studentů matematiky; evokované potenciály

Řešitel projektu: Denis Veselý, 725 [redacted], veseld06@pf.jcu.cz

Název pracoviště: Obor Psychologie, Katedra pedagogiky a psychologie, Pedagogické fakulty Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích.

Vedoucí práce: Mgr. Michala Plassová, Ph.D., mplassova@pf.jcu.cz

Cíl výzkumu: Prozkoumat schopnost matematického odhadu a matematického nadání u vysokoškolských studentů matematiky pomocí inteligenčního testu, behaviorálního testu, a za použití elektroencefalografie.

Popis výzkumu: Účastníci výzkumu budou podrobeni měření pomocí elektroencefalografie neboli EEG. Účastníkům bude nasazena čepice s elektrodami a na počítači jim bude promítán experiment, ve kterém bude testována jejich schopnost matematického odhadu. Osobní údaje účastníků nebudou nikomu dále předány a bude s nimi zacházeno anonymně. Osobní údaje budou odstraněny ihned po ukončení výzkumu. Účastníci jsou zapojeni do výzkumu na základě dobrovolného rozhodnutí. Za účast ve výzkumu nebude poskytnuta žádná peněžitá forma odměny. Účastník je oprávněn k rozhodnutí kdykoliv z výzkumu odejít, a to bez udání důvodu.

.....
datum a podpis řešitele projektu

¹ Všeobecnou deklaraci lidských práv, nařízením Evropského parlamentu a Rady (EU) č. 2016/679 o ochraně fyzických osob v souvislosti se zpracováním osobních údajů a o volném pohybu těchto údajů a o zrušení směrnice 95/46/ES (obecné nařízení o ochraně osobních údajů) a dalšími obecně závaznými právními předpisy (jimiž jsou zejména Helsinská deklarace přijatá 18. Světovým zdravotnickým shromážděním v roce 1964, ve znění pozdějších změn (Fortaleza, Brazílie, 2013), zákon č. 372/2011 Sb., o zdravotních službách a podmínkách jejich poskytování (zákon o zdravotních službách), ve znění pozdějších předpisů, zejména ustanovení jeho § 28 odst. 1, a Úmluva na ochranu lidských práv a důstojnosti lidské bytosti v souvislosti s aplikací biologie a medicíny: Úmluva o lidských právech a biomedicíně publikované pod č. 96/2001 Sb. m. s., jsou-li aplikovatelné).

Příloha č. 3 Informovaný souhlas (2/3)



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Typ studie: EEG 32 kanálů EEG 64 kanálů EEG 128 kanálů

Hodin spánku:

Lateralita: pravák levák

Poznámky:

Příloha č. 3 Informovaný souhlas (3/3)



Pedagogická
fakulta
Faculty
of Education

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

Prohlášení a souhlas účastníků s jejich zapojením do výzkumu:

Prohlašuji a svým níže uvedeným vlastnoručním podpisem potvrzuji, že dobrovolně souhlasím s účastí ve výše uvedeném projektu a že jsem měl/a možnost si řádně a v dostatečném čase zvážit všechny relevantní informace o výzkumu, zeptat se na vše podstatné týkající se účasti ve výzkumu a že jsem dostal/a jasné a srozumitelné odpovědi na své dotazy. Byl/a jsem poučen/a o právu odmítnout účast ve výzkumném projektu nebo svůj souhlas kdykoli odvolat.

Jméno a příjmení účastníka:..... Datum narození:.....

Adresa trvalého bydliště účastníka:.....

Podpis účastníka:..... Datum:.....