



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 pedagogiky a psychologie

Disertační práce

# Neurální koreláty aritmetických funkcí

Vypracovala: Mgr. Michala Plassová  
Vedoucí práce: Mgr. Michal Vavrečka, Ph.D.

České Budějovice 2019

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svoji disertační práci jsem vypracovala 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 disertační 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 23. 7. 2019

.....

Michala Plassová

*Věnováno každému dítěti, které kdy dostalo pětku z matematiky.*

## **Poděkování**

Za odbornou pomoc a veškerou podporu děkuji Michalu Vavrečkovi, Ivě Stuchlíkové a Michaelu Tesařovi. Dále děkuji všem zúčastněným dětem za trpělivost a nejupřímnější zpětnou vazbu, jakou člověk může dostat. Děkuji rodičům dětí za ochotu „urvat“ trochu času a své miláčky zapůjčit. Kačce Valuchové za pomoc s administrací testů. Veru Alexové - Medové za korekturu a Tomovi Mrhálkovi za neustálé komentáře, ať už práci konečně pološím. V neposlední řadě chci moc poděkovat svojí mámě, která mi už od dětství dodávala důvěru v sebe sama, a konečně pak chci poděkovat Adéle, protože bez ní by tato práce vůbec nevznikla.

## **Abstrakt práce**

Název práce: Neurální koreláty aritmetických funkcí

Autor práce: Mgr. Michala Plassová

Vedoucí práce: Mgr. Michal Vavrečka, Ph.D.

Počet stran: 153

Počet zdrojů: 199

**Abstrakt:** Předkládaná práce se soustředí na popis vztahu mezi mozkovou aktivitou během řešení aproximálních aritmetických úloh a výsledky naměřenými zkrácenou baterií Stanford-Binetova inteligenčního testu u předškolních dětí. Potvrzujeme vliv komponent N1, N2, P2p a pozdních posteriorních komponent na nesymbolické numerické zpracování. Zároveň poukazujeme na vliv maturace u všech zjištěných komponent a pozornost dále soustředíme na rozdíl v amplitudě komponent a rychlosti jejich nástupu po prezentaci stimulu. Z naměřených dat vyplývá, že právě výška amplitudy a nástup komponenty mohou sloužit jako indikátory inteligence u předškolních dětí. Obě složky totiž souvisí s rychlostí kognitivního zpracování, u které byla opakovaně prokázána významná korelace s G faktorem inteligence. Obzvláště slibně se pro potenciální diagnostiku z našich výsledků jeví komponenta N2, jež souvisí s inhibiční kontrolou exekutivních funkcí. Obecně je však výrazná pozornost věnována komponentě P2p. Ta nicméně v našem výzkumu vykazovala nekonzistentní výsledky z hlediska výšky amplitudy, což přikládáme nízkému rozptylu inteligence u měřených probandů.

**Klíčová slova:** numerozita, aproximální numerický trénink, numerická kognice, evokované potenciály, EEG

## **Abstract of thesis**

Title: Neural correlates of arithmetic functions

Author: Mgr. Michala Plassová

Supervisor: Mgr. Michal Vavrečka, Ph.D.

Number of pages: 153

Number of references: 199

**Abstract:** This present thesis is focused on the description of relation between brain activity while solving approximate arithmetic tasks and results in Stanford Binet's intelligence test in preschool children. The influence of N1, N2 and P2p components and late posterior components on non-symbolic numerical processing has been validated. Furthermore, it is the influence of maturation with each measured component and also the difference in their amplitude and their commencement after the stimulus presentation that must be pointed out. Our research data show that it is the very amplitude and its commencement that can be used as a potential intelligence indicator in preschool children. Both these components are related to cognitive processing time which has repeatedly proved to correlate with G intelligence factor. It is especially N2 component, which is connected with inhibitory control of executive functions, that seems to have the potential for this diagnosis. Generally, it is P2p component that is given major attention. Nevertheless, in our research, this component has shown inconsistent results with respect to the amplitude which can be attributed to a low variance of our children's intelligence.

**Key words:** numerosity, approximate number training, numerical cognition, evoked potentials, EEG

# Obsah

I. ÚVOD.....	9
1. Numerická kognice .....	12
1.1 Neuroanatomie numerické kognice z hlediska historické perspektivy .....	13
1.2 Současný pohled na neuroanatomii numerické kognice .....	16
1.3 Vývoj numerického mozku .....	21
1.3.1 Mentální magnitudy .....	27
1.4 Aritmetika z hlediska neuropsychologie.....	29
2. Dva systémy hrubého odhadu .....	32
2.1 Aproximální numerický systém .....	32
2.1.1 ANS a obecná matematika .....	35
2.1.2 Vliv hustoty (a dalších atributů) na ANS .....	36
2.2 Systém sledování objektu neboli paralelní systém individualizace .....	37
3. Elektroencefalografie, porovnání EEG signálu u dospělých a u předškolních dětí .....	39
3.1 EEG u dospělých.....	41
3.1.1 Frekvenční pásma (rytmy).....	41
3.2 Role beta, théta a gamma rytmu při řešení kognitivních, vizuálních úloh.....	45
3.3 EEG u předškolních dětí .....	46
4. Vybrané metody analýzy EEG dat, evokované potenciály.....	51
4.1 EEG studie u předškolních dětí .....	55
5. Vývoj vizuospeciálního (vizuoprostorové) zpracování u dětí .....	61
5.1 Vývoj prostorového (speciálního) zpracování.....	63
5.1.1 Prostorová lokalizace .....	64
5.1.2 Prostorová pozornost a mentální rotace .....	64
5.2 Vývoj zpracování ve ventrálním proudu, porozumění částem i celku.....	65
6. Metodologie výzkumu.....	66
6.1 Výzkumný problém a cíl experimentu.....	66
6.2 Hypotézy .....	67
6.3 Výběr vzorku a sběr dat .....	69
6.4 Etické ošetření .....	70
7. Design experimentu.....	72
7.1 Tvorba EEG experimentu .....	72
7.2 Stanford-Binetův inteligenční test .....	76
7.3 Použitý EEG přístroj.....	77
8. Předzpracování (preprocessing) EEG dat a epochování.....	79
8.1 Zpracování EEG dat první fáze .....	79

8. 1. 1	Formát EEG dat a software .....	80
8. 1. 2	Downsampling.....	80
8. 1. 3	Filtrace .....	80
8. 1. 4	Re-reference a chanel location.....	81
8. 1. 5	Čištění artefaktů.....	81
8. 2	Epochování a baseline .....	81
8. 3	Jitter .....	82
9.	Výsledky.....	83
9. 1	EEG výsledky.....	83
9. 1. 1	Lehké obtížnosti AAT .....	86
9. 1. 2	Středně těžké obtížnosti AAT.....	96
9. 1. 3	Těžké úlohy AAT .....	107
9. 2	Behaviorální výsledky .....	118
9. 4	Shrnutí výsledků.....	121
10.	Diskuze.....	124
11.	Závěr .....	129
12.	Shrnutí .....	130
	Seznam literatury .....	131
	Seznam obrázků.....	147
	Seznam tabulek.....	150
	Seznam příloh .....	151



# I. ÚVOD

„*You don't have to be a mathematician to have a feel for numbers*“

John Forbes Nash

Když si v 17. století sir Isaac Newton položil otázku, zda měsíc padá, započal tím vznik jedné z nejvýznamnější vědecké práce v celé historii lidstva – *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (1687) nebo také česky *Matematické základy přírodní filozofie*. Newton v knize pokládá základy klasické mechaniky, když formuluje tři zákony pohybu. Nejen, že zjistil, že měsíc skutečně neustále padá, ale zároveň popsal jednu ze čtyř základních sil celého vesmíru – gravitaci.

Dalo by se trochu úsměvně a možná i poeticky tvrdit, že celý proces nastartovala procházka mladého Newtona po jeho rodném panství ve Woolsthorpu, kde viděl ze stromu spadnout jablko. Newton odvrátil pozornost od jablka k obloze, zadíval se na měsíc a položil si již zmíněnou otázku, jestli měsíc padá. Nicméně se ukázalo, že třiatřicetiletému Newtonovi na výpočet pohybu padajícího měsíce tehdejší matematika nestačí. Newton proto formuloval kalkulus.

Budeme-li se držet poetického tónu, pak parafrázujeme slova Michia Kaku (2014), který pronesl, že nám matematika odemkla nebesa. Kardinální role matematiky ve vědeckém světě je nesporná, hůře se však důležitost matematiky vysvětluje běžnému dítěti. Cohen Kadosh a Dowkerová (2015) uvádí, že je matematika vnímána jako suchý předmět bez žádné reálné aplikace. Možná tak vlastně ani nepřekvapí, že odhadem 40% dětí, jež vycházejí základní školu, má nedostatečné znalosti základní aritmetiky.

Mezi běžnými lidmi se můžeme setkat s tvrzením, že na matematiku jednoduše „nemají buňky“, a právě toto tvrzení a notná dávka zvědavosti stála i u zrodu naší práce. Quiaquinto (2015) napsal, že číslo nemůže být viděno, slyšeno, nemůžeme se ho dotknout, cítit ho či ho ochutnat. Číslo nevydává žádný signál a nezanechává žádnou stopu.

Vlastně by se tak mohlo zdát, že je číslo, potažmo matematika, skutečně abstraktní vědou, odtrženou od prostého života. Z našeho pohledu však s Quiaquintem nemůžeme souhlasit. Domníváme se totiž, že číslo zanechává stopy již na genetické úrovni živočišného druhu. Lidé i zvířata jsou evolučně vybaveni číslo vnímat a využívat ke svému prospěchu. Hovoříme pochopitelně o čísle na nesymbolické rovině, jako je kupříkladu množina prvků.

Naši tezi podporuje mnoho seriózních vědeckých prací (např. Brannonová, 2006; Piazza et al., 2004; Merritt, DeWind, & Brannonová, 2012). Zároveň na nás působí i poznatky z jiných oborů, obzvláště pak historie. Jedna z výrazných postav evropské archeologie – Karel Absolon – učinila roku 1936 v oblasti Dolních Věstonic pozoruhodný objev. Šlo o lýtkovou kost mladého vlka, jejíž stáří se moderními metodami odhaduje na 25 až 28 tisíc let př. n. l. (Folta, 1997). Výjimečnost objevu spočívala v 55 zářezech, které Absolon na kosti objevil. Šlo o nález světového měřítka, který je znám pod označením *Vlčí radius* nebo *Věstonická vrubovka*. Kost sloužila k primitivnímu zaznamenávání počtu. Sám Absolon kost považoval za nejstarší dokument pro dějiny matematiky na světě. Folta (1997) uvádí, že se Absolon ani příliš nemýlil, protože aktuálně víme o existenci pouze jedné vrubovky, která stáří té věstonické předčila, a to je nález paviání kosti v jeskyni v pohoří Lebombo v Africe. Stáří této vrubovky bylo dle d'Errico (2012) pomocí radikarbonové metody datování určeno na 42 až 43 tisíc let př. n. l. Podle Darlinga (2004) 29 zářezů na Lebombské vrubovce sloužilo jako lunární kalendář. Darling (tamtéž) uvádí, že africké ženy tak mohly být vůbec prvními matematiky v historii. Lze se totiž domnívat, že kost sloužila ke kontrole menstruačního cyklu. Folta (1997) k historii matematiky dále píše, že lidé byli schopni porovnávat různá větší množství i bez numerace. Dokládá to na příkladu primitivního směnného obchodu, kdy lidé užívali jednoduchého jednoznačného přiřazení (bijekce) mezi prvky dvou množin – kupříkladu směna tří kožek za dvě hrsti soli.

Výše uvedené informace jsou nepochybně pouze velmi stručným pohledem do historie matematiky, nicméně mají ilustrovat fakt, že matematika vznikla jako nástroj k naplňování nejrůznějších potřeb. Existují archeologické důkazy, že kupříkladu vrubovky se nezávisle na sobě vyskytovaly všude na světě – ve Skandinávii, Čechách, Maďarsku, Africe i Austrálii (Folta, 1997). Již z těchto poznatků by se dalo uvažovat o vrozené povaze matematiky. V současné chvíli máme množství důkazů, které skutečně potvrzují, že jistá část matematiky (aritmetika) má vrozený charakter (tyto důkazy podrobně uvádíme v kapitole 1.2). V rámci následující práce si poskytneme vhled do fylogeneze a ontogeneze aritmetiky a zároveň si odhalíme její neuroanatomické mechanismy a dále kognitivní procesy a obecné zákonitosti, jež lidem umožňují odhadovat množství prvků, porovnávat dvě a více množin a také sčítat, odčítat, násobit a dělit. Vrátime-li se ke Cohen Kadoshovi a Dowkerové (2015), kteří informovali o tristním stavu aritmetických schopností u školáků, pak věříme, že naše práce může přinést podněty do didaktiky matematiky, a to zejména v oblasti předškolního vzdělávání a vzdělávání na prvním stupni základní školy. V neposlední řadě doufáme, že důraz na vrozené aspekty aritmetiky v edukačním procesu a jistá dávka hravosti při vývoji

specifických úloh, jež v této práci zveřejňujeme, může alespoň částečně pomoci z matematiky sejmout onu nálepkou neoblíbeného předmětu. Zároveň si dovolíme uvést, že celá naše práce má empirickou povahu, ale mnohá z témat, kterými se zabýváme, představují dokonalé epistemické otázky – co je číslo? Co je mentální magnituda? Jaký má numerozita smysl? Obrovskou komplexitou této problematiky nám tak nezbývá, než k problému přistoupit s trochou redukcionismu a věnovat se tak spíše deskripci těchto jevů a následně jejich empirickému testování. Nejsme však vůči filozofickým otázkám, které téma přináší, uzavření a naše práce má přispět svým pomyslným střípkem k poznání těchto jevů a jejich významu.

## 1. Numerická kognice

V současném světě kognitivní neurovědy je obecně přijímáno, že děti, dospělí, ale i zvířata jsou schopny vnímat a zároveň porovnávat nesymbolické množiny objektů, což je běžně označováno jako *numerozita*. Jde o evolučně vyvinutý neurální systém, jehož mapování se věnuje i tato práce. Mentální reprezentace čísla je postavena právě na základě tohoto mechanismu a umožňuje lidem používat symbolické vyjádření čísla a početní operace, které lze souhrnně označit jako aritmetiku (Hubbard, 2008, Nieder, Dehaene, 2009, Plassová, 2017). Začneme tuto kapitolu tak trochu *in media res* a rovnou si definujme, co vlastně numerická kognice je. Numerickou kognici lze vymezit jako jednu z nejmladších disciplín kognitivní vědy, která zkoumá neurální mechanismy a souhrn mentálních operací, struktur a pochodů zajišťující symbolické a nesymbolické zpracování čísel a počtů u lidí a zvířat. Zároveň se numerická kognice věnuje vývojovým specifickým těchto neurálních mechanismů a kognitivních funkcí z hlediska ontogeneze a fylogeneze. LeFevrová (2016) uvádí, že existuje šest základních oblastí, ze kterých se disciplína numerické kognice etablovala, a to psychofyzika, neuropsychologie, kognitivní neurověda, vzdělávání v matematice, psychometrika, vývojová kognice a teorie zpracování informací.

V odborné literatuře (např. Hubbard et al., 2008; Cohen Kadosh et al., 2008, Kaufmannová et al., 2011) se píše, že díky neurozobrazovacím metodám a počítačovému modelingu se podařilo vnést trochu světla na odhalení neurálních mechanismů zajišťujících numerozitu, ale i vyšší numerické operace. Jde o neuroanatomickou oblast intraparietálního sulku (IPS) pro numerozitu a prefrontálního kortexu (PFC) (např. Nieder and Dehaene, 2009) pro vyšší numerické operace. Nicméně neuronové sítě aktivní při základním i pokročilem zpracování čísla lze najít v různých částech parietálního laloku (např. Chou et al., 2009), ale i v dalších kortikálních nebo subkortikálních oblastech (Dehaene and Cohen, 1991). Ansari (et al., 2005) dokonce uvádí, že podíl zapojení parietálního a frontálního kortexu se mění v průběhu vývoje jedince, kdy parietální oblasti postupem času nabývají větší důležitosti.

V naší práci se zabýváme vrozenými systémy numerozity a elementární aritmetikou u předškolních dětí, z tohoto důvodu v následujících třech podkapitolách klademe vyšší akcent především na oblasti parietálních laloků. V první podkapitole pojednáváme o historickém vývoji přístupu k lokalizaci center numerozity a aritmetiky, poté se snažíme stručně představit aktuální stav poznání a konečně se věnujeme vývojovým aspektům numerické kognice u dětí.

## 1. 1 Neuroanatomie numerické kognice z hlediska historické perspektivy

Ačkoli jsou neurozobrazovací metody v oblasti neurovědy využívány až zhruba od druhé poloviny dvacátého století, lze přesto snadno první seriózní práce o vztahu matematiky a mozku datovat podstatně dříve. Na úvod se hodí zmínit, že z historického hlediska se naše současné poznání v oblasti numerické kognice postulovalo na základě mnoha historicky významných prací, jež se věnovaly vztahu mezi poškozením mozku a deficitům v oblasti matematiky. Přitom termínem *poškození mozku* označujeme poškození různého charakteru, tj. od válečných úrazů po léze mozku organické povahy (Plassová, 2017). Levin a Spiers (1985) uvádí, že tyto práce pak přispěly k názoru, že se matematická centra nachází v oddělených částech mozku, která spolu vzájemně nekomunikují. Současný pohled na povahu matematických dovedností hovoří naopak o rozsáhlých neurálních sítích (např. D'Esposito, 2002; Piazza et al., 2004; Brannonová, 2006; Dehaene, 2011), které vytváří komplexní systém.

Z historického hlediska lze jako první pokus zmapovat centrum matematických schopností označit dílo známého frenologa Franze Josefa Galla (in Kahnová & Whitaker, 1991). Gall již na počátku 19. století spojoval matematické funkce s oběma inferiorními frontálními laloky.

V posledních dekádách 19. století bylo obecně přijímáno, že problémy v oblasti počítání a matematiky jsou pouhými doprovodnými potížemi afázie (Boller & Grafman, 1983), které se pojí s lézemi na levém angulárním gyru. Z toho důvodu je významná práce Lewandowskyho a Standelmana z roku 1908. Autoři publikovali vůbec první report o selektivním narušení matematických schopností v důsledku traumatického poranění hlavy a z něho plynoucího lokálního poškození mozku, a to bez poškození levého angulárního gyru. Konkrétně pak Lewandowsky a Standelmann (tamtéž) popsali případ mladého muže, jenž utrpěl traumatické poranění levého okcipitálního laloku. Jazykové schopnosti mladíka zůstaly téměř beze změny, matematické kompetence však vykazovaly výrazný deficit. Zhruba o dvě desetiletí později pak Henschen (1925) poprvé použil termín „akalkulie“, aby pojmenoval pokles kognitivní kapacity pro počítání v důsledku poškození mozku úrazem nebo v důsledku nemoci (např. mozková cévní příhoda). Henschen studoval skupinu dospělých pacientů, kteří v důsledku různých typů poškození mozku nebyli schopni matematických výpočtů. Na základě identifikace té části mozku, kterou měli poškozenou všichni tito pacienti, Henschen potíže s počítáním umístil do oblasti angulárního gyru. Dále

ve své práci Henschen (1925) postuloval, že se při matematických výpočtech zapojuje inferiorní frontální gyrus, který zajišťuje verbální zpracování čísla (např. výslovnost). Za centra zodpovědná za rozpoznání čísla označil angulární gyrus a intraparietální sulkus, přičemž angulárnímu gyru ještě přiřítal schopnost psaní čísla. Významný předěl pak představuje Henschenovo rozpoznání toho, že jazykové a matematické funkce jsou vzájemně propojené, ale mohou fungovat na sobě nezávisle. D'Esposito (2002) nabízí výčet několika dalších prací (např. Berger, 1926; Boller & Grafman, 1983), které navazují na Henschena a dokládají rozdíl mezi akalkulií a afázií. Zároveň tyto práce demonstrují, že je nepravděpodobné, aby matematické výpočty byly spojovány pouze s jedním mozkovým centrem (kupříkladu s angulární gyrem). Berger (1926) publikoval tři různé případy pacientů s akalkulií, které spojovaly léze v oblasti levé temporální a okcipitální kůry, ale bez přítomnosti patologie v oblasti angulárního gyru. Dalším významným Bergerovým přínosem bylo rozpoznání rozdílu mezi sekundární akalkulií a primární akalkulií. Berger termínem *sekundární akalkulie* označoval poruchy v oblasti počítání v důsledku deficitů v oblasti jazyka. D'Esposito (2002) dále uvádí, že Berger do výčtu původců sekundární akalkulie zařazoval i kognitivní deficity v oblasti pozornosti a paměti. Na primární akalkulii Berger pohlížel jako na poruchu, která je nezávislá na jiných poruchách mozku.

K podobným závěrům dospěli i Hécaen (et al., 1961), kteří zdokumentovali problémy v oblasti matematických výpočtů u pacientů s alexií a agrafií pro čísla. Většina zahrnutých probandů (mezi 22 až 53%) měla kombinovanou poruchu a nebyla schopna číst a psát nejen čísla, ale i slova. Zbytek probandů nebyl schopen číst a ani psát běžná slova, ale byl schopen obojího u čísel. Levin a Spiers (1985) uvádí, že výsledky studie poté vedly k diferenciaci role levého parietálního laloku v případech selektivní poruchy psaní čísel a role parietální a temporo-okcipitálních regionů v alexii pro čísla. V literatuře najdeme množství dalších kognitivních deficitů, u kterých autoři postulovali negativní vliv na numerickou kognici. Jde kupříkladu o narušenou prostorovou orientaci nebo poruchy v oblastech mentální manipulace s množinami objektů.

Z neuroanatomického hlediska byl kardinální význam pro numerickou kognici přisuzován parietálním lalokům. D'Esposito (2002) kupříkladu uvádí práci Josefa Gerstmann (1940), ve kterých Gerstmann popsal spojitost mezi lézemi na levém parietálním laloku a neschopností pojmenovat prsty na své nebo cizí ruce, narušenou pravolevou orientací, neschopností psaní (agrafie) a neschopností provádět jednoduché matematické výpočty (akalkulie). Tento známý syndrom nese jméno svého autora a dle Rusconiho (2009) postulované zákonitosti tohoto syndromu překonaly „těžký útok“ mnoha

neuropsychologických studií, které se snažily spojitost mezi výše uvedenými deficity a levým parietálním lalokem vyvrátit. Nicméně je v dnešní době oblast levého parietálního laloku v literatuře (např. Xu, 2010; Rusconi, 2009) podstatně zúžená na léze bílé hmoty v oblasti intraparietální brázdy. Z literatury vyplývá, že dlouhou dobu nebylo jasné, jak může narušené tělesné schéma vlastního těla (kupříkladu neschopnost pojmenovat prsty na ruce) ovlivňovat numerickou kognici. Podle D'Esposito (2002) až koncem 90. let přicházeli vědci s návrhem, že Gerstmannův syndrom představuje přerušení spojení mezi neurálními systémy, které zodpovídají za jazyk a vizuálně-prostorovou orientaci. D'Esposito (tamtéž) uvádí, že právě tento objev sehrál významnou roli v pochopení toho, jak spolu neurální sítě podporující jazyk, mentální manipulaci s množinami objektů nebo systémy zaštiťující vizuálně-prostorovou orientaci, přispívají ke schopnosti počítat a mentálně manipulovat se symbolickým i nesymbolickým vyjádřením čísla.

Další historicky zajímavý milník představuje způsob, jakým se v průběhu 20. století měnil přístup k lokalizaci aritmetických funkcí v mozkových hemisférách. Dle D'Esposito (2002) jsou v historické literatuře poruchy v oblasti počítání běžně spojovány s levou hemisférou. Nicméně kupříkladu již uvedená práce Henshena (1919) nebo dále práce Bergera (1926) či Hécaena (et al, 1961) podávají report o pacientech s poškozením pravé hemisféry. Později se díky pracím Collingona, Leclerqa a Mahyo (1977) a Grafmana a kolektivu (1982) podařilo prokázat, že akalkulie vzniká častěji u pacientů s lézí v oblasti levé hemisféry. D'Esposito (2002) považuje za stěžejní práci Hécaena (et al., 1961). Jde o historicky významný report, kde autor informuje o velkém množství pacientů (183) s posteriorní korovou lézí a potížemi v oblasti počtů. Přínosem práce je přesný popis deficitu a heuristické rozdělení akalkulie na subtypy podle specifických potíží, které pacienti vykazovali. Hécaen (et al., 1961) pacienty rozdělil do tří podskupin. První skupina vykazovala deficit v oblasti počtů, který autor spojuje s poruchou vizuálního prostorového uspořádání číslic. Pacienti měli problém s prostorovými vlastnostmi číslic, jako převrácení jednotlivých číslic, špatný sklon a další. Hécaen (tamtéž) tento typ deficitu spojoval s lézemi převážně v pravé hemisféře.

Druhá skupina pacientů vykazovala alexii a agrafii pro čísla a zároveň sem byli zahrnuti i pacienti s afázií a alexií a agrafií pro písmena. Zde se potíže projevovaly narušením schopnosti číst a psát číslice. Tento typ poruchy byl spojován s lézemi na levé hemisféře, zejména pak lézemi na kůře levého inferiorního parietálního laloku.

Poslední skupinou byli pacienti, kteří byli diagnostikováni jako akalkulici, ale povahou svého deficitu nezapadali do žádné z předchozích dvou skupin. Tyto pacienty sdružovaly

obtíže v oblasti aritmetiky a ve své podstatě se porucha pacientů této skupiny dá z dnešního hlediska označit za *primární akalkulii*. Hécaen (et al., 1961) použil označení *anaritmie* a spojoval ho především s lézemi na levé hemisféře, přičemž se tento typ deficitu dle autora mohl vyskytnout i při lézích na pravé hemisféře, ale to pouze v minimu případů. Podle D'Esposito (2002) byl přínos Hécaenova reportu významný z hlediska hned několika aspektů. Prvně byl potvrzen rozdíl mezi afázií a akalkulií, dále byla potvrzena důležitost parietálních laloků pro numerickou kognici a v neposlední řadě byla prokázána oddělitelnost jednotlivých kognitivních operací, z nichž se schopnost počítat sestává, zejména potom porozumění, produkce a výpočetní složky.

## 1. 2 Současný pohled na neuroanatomii numerické kognice

Již v úvodu kapitoly jsme pověděli o úloze parietálních, frontálních, prefrontálních, ale i dalších kortikálních a subkortikálních struktur při zpracování čísla. Nyní se podíváme trochu blíže na oblast intraparietálního sulku. Dehaene ve své práci *Number, Space and Time* (2011a) nebo česky *Číslo, prostor a čas*, identifikoval jedno z nejvýznamnějších neuroanatomických center numerické kognice do oblasti intraparietálního sulku (brázdy). Nachází se zde kognitivní funkce zajišťující již zmíněnou numerozitu, specificky pak základní aritmetiku, mentální reprezentaci čísla a aproximální numerický systém (ANS). Aproximálnímu numerickému systému patří v této práci vlastní kapitola, nicméně si alespoň stručně definujme, co ANS je a jaké má funkce. ANS je evolučně vyvinutý neurální systém umožňující odhad velikosti množiny, počtu prvků v množině, ale i vzdálenost mezi objekty u lidí i zvířat (např. Dehaene et al., 2003; Piazza et al., 2004; Cantlonová et al., 2006; Cohen Kadosh et al., 2008; Knops et al., 2009; Piazza et al., 2010). V odborné literatuře (např. Gallistel & Gelman, 2000; Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004) je obvykle vymezen jako hrubá mentální reprezentace čísla. Bývá však označován (např. Dehaene, 1999; Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004; Park, Brannonová, 2013) i jako systém hrubého matematického odhadu a hrubého výpočtu. Silná stránka tohoto kognitivního systému spočívá především v rychlosti odhadu, který umožňuje. Odhad probíhá v rámci desetin vteřiny a u dospělého člověka poskytuje relativně vysokou přesnost (Sousa, 2010; Plassová, 2017). Nyní se blíže podívejme na lokalizaci a vlastnosti intraparietálního sulku (IPS), potažmo tak představíme i základní neuroanatomické aspekty aproximálního numerického systému. Následující text je převzatý z našeho článku v časopise *Pedagogika* (Plassová, 2017, str. 165 - 168):



„Dehaene (2011b) píše, že byl učiněn pozoruhodný pokrok ve zmapování behaviorálních kompetencí příslušných oblastí mozku a jednotlivých neuronů zaštiťujících specifické prostorové, temporální a numerické úlohy. Přitom však dodává, že tato doména zůstává stále systematicky neprozkoumána. Předěl ve výzkumu představuje identifikace centra numerických reprezentací v oblasti intraparietální brázdy (intraparietální sulcus – IPS) (Dehaene et al. 2003; Cohen Kadosh et al., 2008) ohraničený inferiorním (IPL) a superiorním (SPL) parietálním lobem (Dehaene et al., 2003; Dehaene, 2011; Nieder, 2013). Jak struktura (Isaacs et al., 2001; Rotzer et al., 2008; Rykhlevskaia et al., 2009), tak neurální aktivita (Price et al., 2007; Kaufmann et al., 2009; Rotzer et al., 2009; Mussolin et al., 2010) této oblasti odráží interindividuální rozdíly v matematických dovednostech.

Oblasti IPS jsou konzistentně aktivovány kdykoli provádíme jednoduché aritmetické operace, jako jsou sčítání, odčítání nebo násobení (Chochon et al., 1999; Pinel et al., 2001; Nieder, 2013). IPS je dokonce aktivováno i v případě, že se mezi shlukem písmen vyskytne arabská číslice (Eger et al., 2003). Intraparietální oblast je asociována s abstraktní reprezentací čísla, přičemž tato abstrakce není kulturně vázána. Může jít o naučené symboly, jako jsou kupříkladu arabské číslice nebo čísla jednoduše vyslovená či vyhláskovaná (Eger et al., 2003). Aktivace IPS byla potvrzena i za přítomnosti nesymbolického vyjádření čísla, jako jsou různě velké množiny teček (Piazza et al., 2004; Castelli et al., 2006).

Soustředme se nyní na podobu neurální aktivace po prezentaci numerického symbolu nebo nesymbolického čísla. Existují studie (např. Cantlonová et al., 2006; Izard, 2008; Nieder, Dehaene, 2009), které zjistily zajímavou anatomickou specializaci mozku. Ve chvíli, kdy člověku prezentujeme numerický symbol, najdeme aktivaci v pravé části parietálního kortexu. Prezentujeme-li objekt (např. skupinu teček), najdeme aktivaci v oblasti okcipitálně-temporálního gyru. Zajímavé je, že tato oblast reaguje i na změny objektu (např. zmizení několika teček z množiny) a oblast v pravé části parietálního kortexu reaguje na změny v číselných setech (kupříkladu ze setu 666 na 696).

Stejný jev pozoroval Izard (et al., 2008) už u tříměsíčních dětí (N=36) ve studii, kterou jsme zmiňovali v úvodu článku. Izard kojencům prezentoval vizuální stimuly v podobě žlutých kachniček a červených kočiček. Následnou analýzou mozkové aktivity měřené pomocí elektroencefalografu (EEG) prokázal, že kojenci reagují na změny v počtu prvků aktivitou dorzálního systému a bilaterální aktivací intraparietálních oblastí. Na změnu v identitě objektu pak kojenci reagovali aktivitou ve ventrálním proudu. Autor uvádí, že povaha aktivace mozku kojenců jasně ukazovala na vrozenou funkční specializaci těchto oblastí. Zároveň při srovnání se studií Cantlonové (2006), který používal stejné vizuální stimuly u

čtyřletých dětí (N=8) a skupiny dospělých lidí (N=20), vykazovala mozková aktivita naměřená pomocí funkční magnetické resonance (fMRI) jasné vývojové zlepšení.

Haist (et al., 2015) také hovoří o vývojové trajektorii zapojování IPS, potažmo ANS. V rámci fMRI studie porovnávali mozkovou aktivitu při určování velikosti a porovnávání nečíselných množin. Výzkumný úkol měl podobu dvou množin teček – žlutý a modrých. Tečky byly probandům prezentovány po dobu 2500 ms a proband měl následně určit, kterých teček bylo více. Šlo tedy o funkci ANS, kterou jsme si pojmenovali jako senzitivita vůči numerickému rozsahu. Výsledky ukázaly, že nejlépe si vedli dospělí probandi (N=16), poté adolescenti ve věku od 13 do 17 (N=16) a až na konci se umístily děti od 6 do 12 let (N= 14). Z analýzy mozkové aktivity vyplynulo, že dospělý člověk při řešení úlohy zapojoval ANS častěji, a to s nižším počtem chyb a rychlejším reakčním časem než děti či adolescenti.

Tyto výsledky se zdají být v určitém rozporu s přímou podstatou ANS, tj. děti, které neovládají symbolickou matematiku, by neverbální matematické kompetence naopak využívat měly, a to více než dospělí. Racionálním vysvětlením se zdá být anatomické zrání oblasti IPS a ontogenetický vývoj ANS. Sousa a David (2010) zjistili, že s dospíváním se preciznost ANS zvyšuje a v dospělosti dosahuje 15%, což znamená, že dospělý člověk dokáže bez počítání rozlišit mezi množinou o 85 prvcích a množinou o 100 prvcích. Je pravděpodobné, že použití ANS si od dítěte žádá větší mentální úsilí než u dospělého, alespoň tomu naznačuje prodloužení reakčních časů. V kombinaci s nižší spolehlivostí by bylo logické, kdyby dítě hledalo jinou strategii. Existují hypotézy (Haist, 2015), že je u dětí přítomný jiný neverbální numerický systém. Libertus (et al., 2013) ve své studii publikuje data naznačující, že svou roli hrají i primitivní vizuální strategie. Konečně také nesmíme opomenout možnost nesprávného metodologického přístupu při získávání dat. Sami se přikláníme k tomu, že oním dalším neverbálním numerickým systémem je již zmíněný paralelní systém individualizace. Důvodem jsou zjištění z našeho pilotního výzkumu (Plassová et al., 2016), kde se i přes nízký počet probandů (N=12) projevil zajímavý jev. V našem výzkumu předškolní děti ve věku od 5 do 6 let porovnávaly množiny teček o různém poměru. Zároveň byla zaznamenávána mozková aktivita pomocí EEG. Úkolem bylo, aby děti určily, která množina je větší a která menší. Při náročných úlohách, kdy se prezentované množiny lišily jen malým množstvím teček (poměr byl kupříkladu 40 ku 60 tečkám) byla patrná spojitost s vysokou mírou aktivity mozku v oblasti IPS. U jednoduchých úloh jsme pak našli mozkovou aktivitu v oblastech ventrální části temporálního laloku, která souvisí s vizuálním zpracováním (Schacter et al., 2010). Zdá se tedy, že svou roli hraje i hustota a struktura vizuálního pole. V případě, kdy je úlohu možné vizuálně shlukovat (např. místo

*bílé a černé množiny teček vidíme tři bílé a dva černé shluky teček) je aktivní ventrální systém. V případě, že je úloha vizuálně členitější, je aktivní IPS. Se stejným závěrem přišli i Piazza (2010) a Hyde (2011). Autoři zároveň tvrdí, že aktivita ve ventrálním systému není přídavným systémem ANS, ale že jde o paralelní systém individualizace, což dále potvrzuje naši hypotézu. Dehaene, Izard a Piazza (2005) vytvořili protokol pro kontrolu tvorby vizuálních stimulů v oblasti numerické kognice a mezi kontrolované položky řadí luminanci, obsazenou plochu, velikost objektu a volný prostor mezi objekty.*

*Haist (et al., 2015) na již zmíněném vzorku dospělých, adolescentních a dětských probandů pomocí funkční magnetické resonance (fMRI) zkoumal, zda úroveň neverbálních matematických kompetencí (tzv. numerozita) předvídá akademickou úspěšnost individua v symbolické matematice. Úroveň neverbálních matematických kompetencí ověřoval na základě přesnosti a rychlosti řešení jednoduchých kognitivních úloh. Z jeho výsledků vyplynulo, že přesnost a reakční čas spolehlivě úspěšnost v symbolické matematice nepředvídají. Zjistil ale, že se s přibývajícím věkem u dětí až do dospělosti průběžně zlepšují jejich neverbální matematické kompetence. Dále našel statisticky významný vztah mezi úspěšností probandů v experimentálních úlohách a předchozím matematickým testu. Probandi úspěšní v matematickém testu vykazovali aktivitu specificky v parietálním laloku a v oblasti IPS. Tato oblast nicméně neposkytla prediktivní hodnotu pro budoucí úspěch v dalším matematickém testování. Nicméně sám autor uvádí, že experimentální úlohy byly pro dospělé probandy možná příliš lehké a tím byla prediktivní hodnota aktivace IPS zkreslena. Zároveň byla během fMRI měření zaznamenána aktivita vizuálního kortexu v oblasti ventrálního proudu, tj. ve stejné oblasti, kterou jsme uváděli v rámci našeho výzkumu výše. Haist (et al., 2015) zjistil, že aktivita této oblasti predikovala úspěšnost ve školní matematice, a to tak, že čím preciznější vizuální strategie, tím lepší výkony ve formální matematice. Tato data opět naznačují existenci systému vizuálních strategií pro řešení neverbálních matematických úloh.*

*Zajímavé také je, že u dospělých lidí nebyly vizuální strategie vázány na oblast ventrálního proudu, ale na ventrální okcipitálně-temporální kortex. Okcipitálně-temporální kortex je místo, kde se velmi zjednodušeně nachází mentální reprezentace času a prostoru (Čihák, 1997), což svědčí o vyšší komplexitě a pokročilosti vizuálních strategií. Lze se tudíž domnívat, že mimo ANS existuje jiný systém schopný řešit neverbální matematické úlohy, který využívá vizuální strategie a zároveň je úzce napojený na ontogenezi. Otázkou zůstává, zdali jde skutečně o paralelní systém individualizace. Dále není zcela jasné, zda se daný systém spolu s ANS vzájemně doplňuje, tj. zda propojením funkce okcipitálně-temporálního*

*kortexu s oblastí IPS dochází k vytvoření vyššího celku schopného zpracovávat data o čase, prostoru a číslech, nebo zda je funkce ANS a systému vizuálních strategií oddělená. Do budoucna je potřeba tento vztah prozkoumat a blíže objasnit.“*

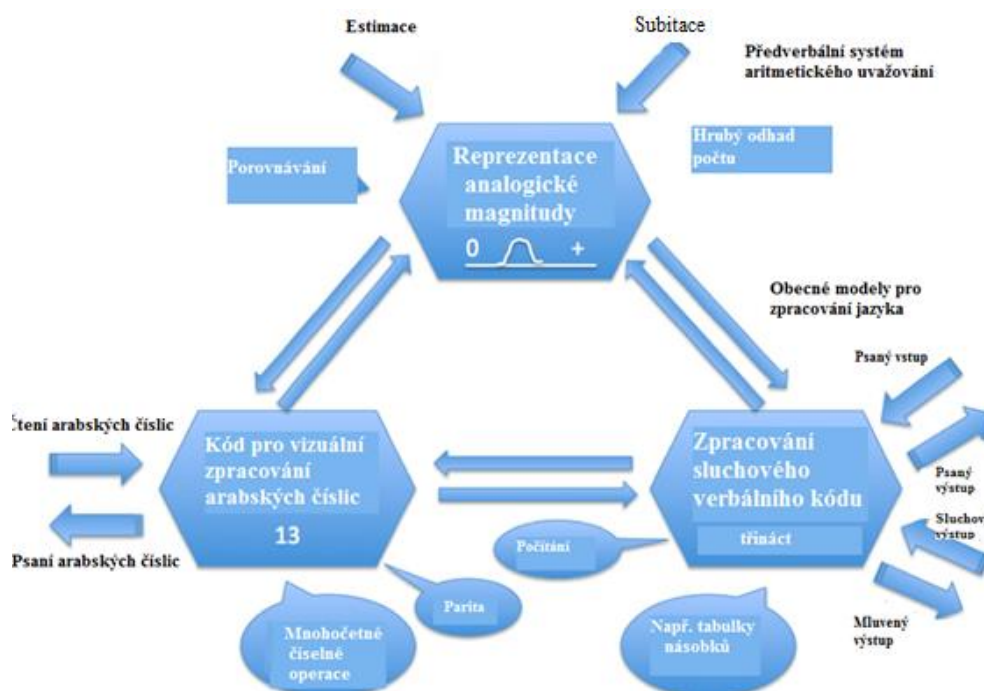
### 1. 3 Vývoj numerického mozku

Název této podkapitoly má odkazovat na práci Kaufmannové, Kuciana a von Astera (2014), která se věnuje popisu ontogeneze numerické kognice od kojenců po dospělého člověka. Jak uvádí sami autoři, ačkoli v poslední dekádě prožíváme boom v počtu neurozobrazujících studií v oblasti numerické kognice, neurozobrazovací studie s dětskými probandy jsou stále vzácné. Většinu současných informací, které o numerozitě, zpracování čísla a schopnosti výpočtu máme, jsou založeny na poznacích u dospělých lidí.

Než se pustíme do popisu vývoje numerické kognice u dětí, prvně se podívejme na termín „modulární architektura“. V literatuře (např. Fodor, 1983; Flombaum et al., 2002) najdeme různé definice. Kupříkladu Flombaum (et al., 2002) modularitu popisuje jako tezi, že je mysl složena z jednotlivých systémů, které na sobě nejsou vzájemně závislé a zároveň jsou omezeny typem informací, které mohou zpracovávat. Kaufmannová, Kucian a von Aster (2014) uvádí, že jde o termín používaný při popisu toho, jak spolu neurokognitivní subsystémy souvisí a jak spolu komunikují. Ačkoli spolu dva nebo více příbuzných systémů v mozku úzce spolupracují, jsou-li funkčně a strukturálně oddělitelné, pak hovoříme o tom, že jsou tyto systémy organizovány modulárně. Z prací Kaufmannové, Kuciana a von Astera (2014) vyplývá, že důkazem existence modularity může být přítomnost dvojité disociace. Autoři uvádí, že v oblasti numerické kognice byly opakovaně zveřejněny studie (např. Dehaene and Cohen, 1995), které disociace dvou kognitivních funkcí popisují. Pro ilustraci si uveďme práci Hittmair-Delazera, Sailer a Benkeho (1995), kde autoři pracovali s mladým, dobře vzdělaným pacientem, u kterého se po transplantaci kostní dřeně a následné extenzivní radio a chemoterapii vyskytly problémy v základní aritmetice, a to z důvodu rozvoje závažné pravostranné hemiparézy. Pacient nebyl schopen řešit základní aritmetické operace (např.  $3+2$ ), ale jeho schopnosti počítat rovnice v algebře nebo komplexní aritmetické slovní úlohy zůstaly zcela nedotčené. Autoři z toho vyvodili, že vybavování si číselných faktů (v originále *number fact retrieval*) (např.  $3+2=5$ ) a konceptuální znalosti aritmetiky (např. principy aritmetiky) jsou funkce na sobě vzájemně nezávislé na behaviorální i neurální úrovni.

Nicméně odborná veřejnost (např. Karmiloff-Smith, 1998; Berlová et al., 2006; Kaufmannová, Kucian & von Aster, 2014) se vyhrazuje k podobě modulární architektury u dětí. Karmiloff-Smith (1998) píše, že u vyvíjejícího se mozku dětí vzhledem k nezralosti neurokognitivních systémů nedochází k funkční specializaci. Berlová (et al., 2006) uvádí, že k funkční specializaci dochází, ale pouze v rozsahu daném zráním nervové soustavy.

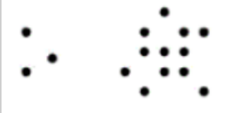

V literatuře (např. Wei et al., 2018) můžeme najít dva modely vývoje numerické kognice, které odborná veřejnost přijímá. První model je nazýván *model trojího kódu* (orig. *triple-code model*) a byl navrhnut Dehaenem a Cohenem (1991). Druhý model na Dehaenův a Cohenův navazuje, autory jsou von Aster a Shalev (2007) a je pojmenován *čtyřfázový model vývoje numerické kognice* (orig. *four-step-developmental model of numerical cognition*). Model trojího kódu (viz obrázek č. 1) ve své podstatě rozlišuje mezi auditivním verbálním kódem, vizuálním kódem pro arabské číslice a mentální reprezentací analogové magnitudy.



Obrázek 1 Model trojího kódu (In Myers, 2015).

V každém z těchto modulů probíhá odlišné numerické zpracování. Kupříkladu počítání, mentální kalkulace nebo vybavování aritmetických faktů probíhá v rámci sluchového verbálního kódu. V rámci kódu pro zpracování arabských číslic pak probíhají mnohočetné operace nebo porovnávání rovnosti skupin čísel (např.  $2 \times 5$  a  $10$ ). Konečně pak v rámci reprezentace analogické magnitudy probíhá zpracování aproximálních úloh (např. porovnávání množin subjektů z hlediska „větší x menší“ nebo hrubý odhad počtu prvků v množině). Ve čtyřfázovém modelu vývoje numerické kognice (viz tabulka č. 1) je kladen větší důraz na hierarchizaci kapacity pracovní paměti, rychlosti zpracování a pozornosti v průběhu času. Pro pochopení čísla dítě potřebuje porozumět několika základním principům. První z těchto principů (1) je **kardinalita**.

Tabulka 1 Čtyřfázový model vývoje numerické kognice (In von Aster, 2007).

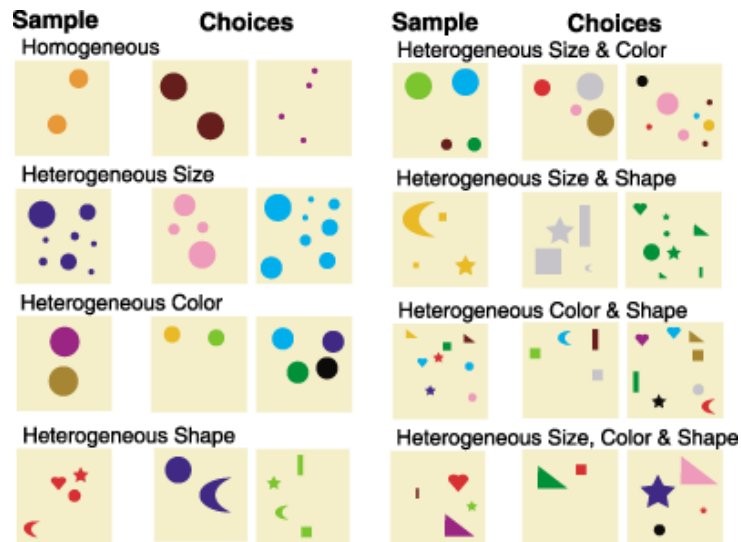
Kapacita krátkodobé paměti				
	Krok 1	Krok 2	Krok 3	Krok 4
Kognitivní reprezentace	Kardinalita 	Verbální numerický systém „jedna“ „dvě“ Slova označující čísla	Systém arabských číslic ...13, 14, 15... číslice	Mentální číselná řada (ordinální) 
Mozková oblast	Bi-parietálně	Prefrontálně vlevo	Bi-okcipitálně	Bi-parietálně
Schopnost	Subitace (viz kapitola 2.2); Aproximace; Porovnávání	Slovní počítání; Vybavování aritmetických faktů;	Psaní kalkulace; Porovnávání	Aproximální kalkulace; Aritmetické přemýšlení
	Kojenecký věk	Předškolní věk	Školní věk	Školní věk

Čas

*Kardinalita* nebo také *kardinální princip* znamená, že musí porozumět tomu, jak počítání souvisí s čísly. Znamená to, že dítě musí porozumět tomu, že při počítání je každé číslo generováno tak, že se přičte číslo 1 k předchozímu číslu. Tomu se říká *sukcesorní funkce* (z angl. successor neboli nástupce). Tato funkce říká, že  $S(n) = n + 1$ .

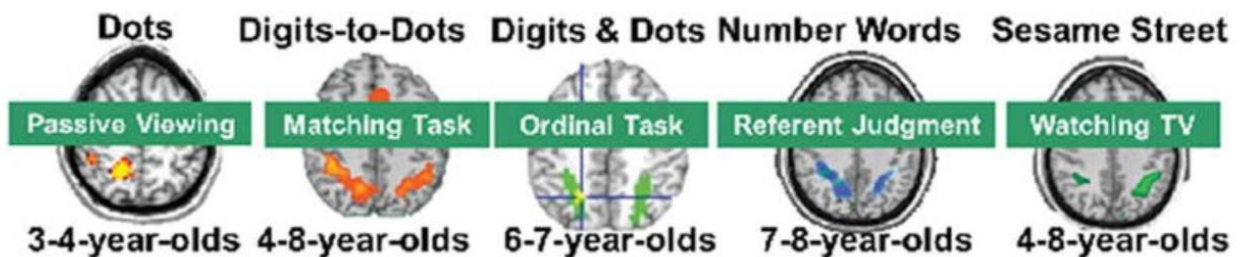
Z psychologického hlediska musíme vyzvednout pojem *porozumění*, jelikož je otázkou, zda předškolní dítě, které umí počítat do deseti, skutečně číslu rozumí. Přímo se nabízí klasická práce Jeana Piageta (1952), který tvrdí, že klíčová dovednost pro pochopení čísla se spolehlivě objevuje kolem sedmého až osmého roku života dítěte s nástupem tzv. *stádiem konkrétních operací*. V naší práci se přikláníme spíše k moderním studiím (např. Sarnecka, 2013), které s Piagetovským konceptem konzervace čísla nesouhlasí a uvádí, že dítě je schopné porozumět číslu již kolem pátého až šestého roku života. Více pak k Piagetovi v druhé kapitole, nyní se vraťme k principům pochopení čísla. V čtyřfázovém modelu kroky dva a tři (tedy verbální numerický systém a systém arabských číslic) představují vývojové podmínky pro dosažení fáze čtyři, tedy vývoj mentální číselné řady. **Mentální číselná řada** pak představuje druhý základní princip (2) pro pochopení čísla. Mentální číselná řada představuje tzv. *analogovou mentální magnitudu*. Mentálním magnitudám věnujeme celou následující podkapitolu.

Schopnost diskriminace numerické kvantity se u dětí vyvíjí od tří let do dospělosti (Kerseyová, Cantlonové, 2017). Ve věku tří let podle Kerseyové a Cantlonové (2017) dítě dokáže provádět explicitní numerické úlohy, kupříkladu při prezentaci (viz obrázek č. 2) stimulů dokáže najít dva obrázky se stejným počtem stimulů.



Obrázek 2 Ukázka stimulu (In Cantlon, 2006).

Autorky (tamtéž) poskytují náhled na aktivaci intraparietálního sulku u dětí od věku 4 do 8 let (viz obrázek č. 3) během různých aktivit, a to od dívání se na televizi (jako kontrolní aktivita) po prezentaci teček nebo verbálně prezentovaných čísel. Konkrétní data autorky čerpały zleva doprava z Cantlonové (et al., 2006), dále pak Emersona a Cantlonové (2012), Cantlonové (et al., 2009) a Lussierové a Cantlonové (2017).



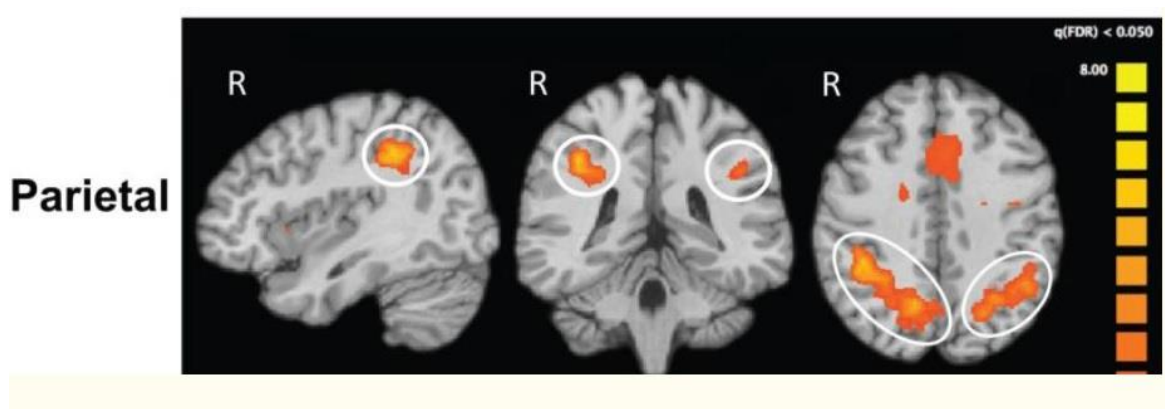
Obrázek 3 Aktivace IPS při různých druzích aktivity u dětí od 4 do 8 let (In Kersey, Cantlon, 2017).

Bohužel z původní studie Cantlonové (et al., 2006) se nám nepodařilo získat obrázky z funkční magnetické rezonance a zůstává nám tak pouze nepřehledná ilustrace úplně vlevo na obrázku číslo 3. Nicméně ve výzkumu šlo opět o porovnávání neverbálních numerických



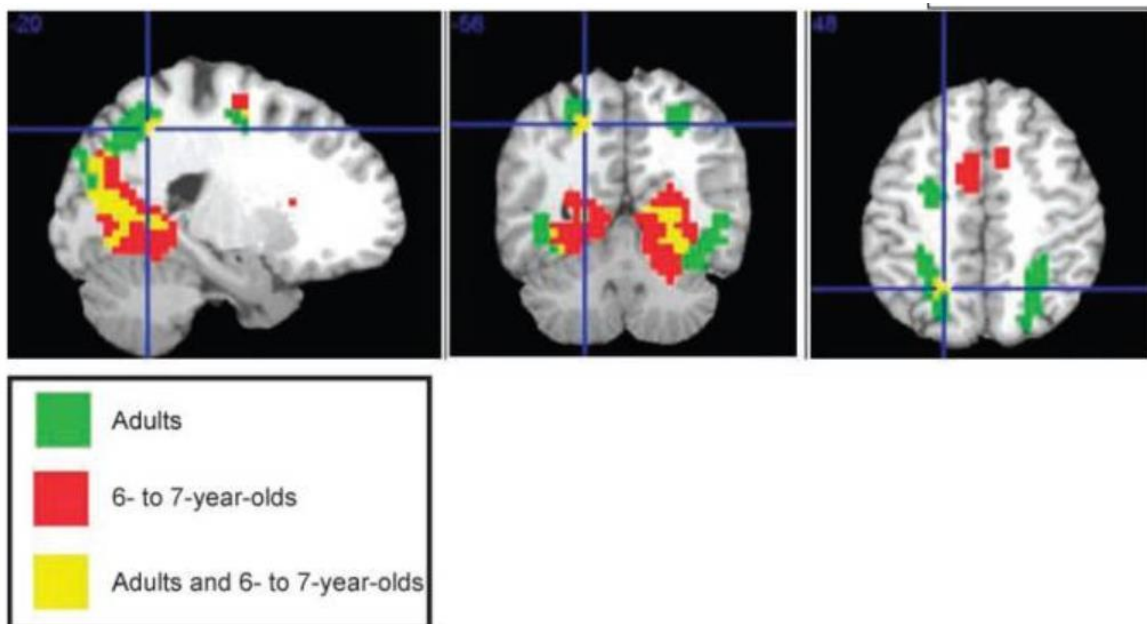
kvantit u dětí a opic. Konkrétně na obrázku (č. 3, úplně vlevo) vidíme pasivní pozorování skupiny teček v množině.

Ve studii Emersona a Cantlonové (2012) autoři na 35 dětech (n=35) ve věku od 4 do 11 let hledali aktivitu mozku při řešení neverbálních aritmetických úloh za pomoci funkční magnetické resonance. Výsledky můžeme vidět na obrázku číslo 4, kde je vidět výrazná aktivace bilaterálně v parietálním kortexu. Konkrétně pak v levém i pravém intraparietálním sulku. Zároveň byla aktivní i centra v prefrontálním kortexu inferiorního gyru a insule.



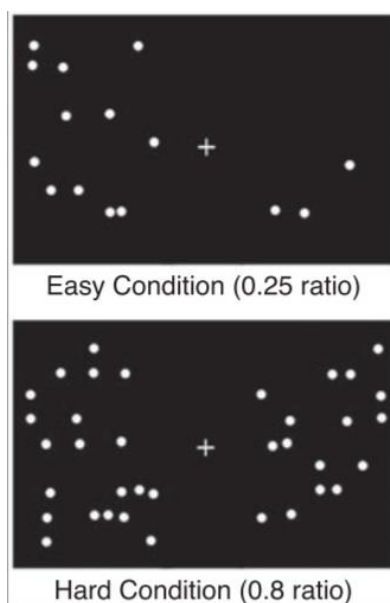
Obrázek 4 Aktivita intraparietálního sulku u dětí ve věku od 4 do 11 let při řešení intraparietálních úloh. S fdr korekcí ( $q < 0.05$ ) (In Emerson, Cantlonová, 2012).

Ve studii Cantlonové (et al., 2009) byly velmi podobné podmínky jako v předchozí uvedené studii. Čtrnácti (n=14) zdravým dětem ve věku od 6 do 7 let autoři prezentovali dvě arabské číslice (např. 2 a 5) a dvě množiny teček. Děti měly říct, jestli byla větší číslice nebo skupina teček vpravo nebo vlevo. Ukázala se výrazná statistická signifikance ( $p < .003$ ), během posuzování (větší versus menší) jak u arabských číslic, tak u množin teček (viz obrázek č. 5). Z obrázku je patrné, že aktivace u dětí byla rozsáhlejší v okcipitálně-temporálních oblastech oproti dospělým, dále pak precentrálně v oblasti parietálního sulku. Také můžeme vidět aktivitu inferiorního frontálního gyru pouze u dětí, a to v obou hemisférách.



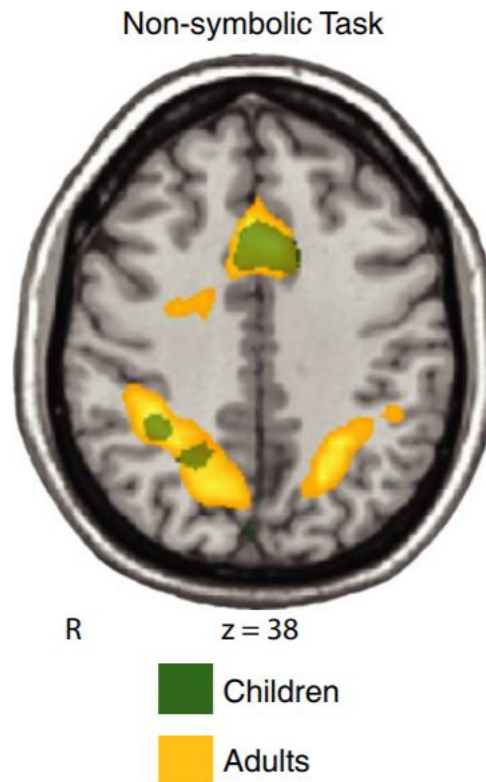
Obrázek 5 Aktivace během posuzování "větší x menší" u arabských číslic a množin teček u dětí a dospělých (In Cantlonová et al., 2009).

Ve studii Lussierové a Cantlonové (2017) autoři použili úlohy s dvěma skupinami teček (viz obrázek č. 6), kdy u čtyřiaadvaceti ( $n=24$ ) dětí ve školním věku (mean 8.6 let) měřili za pomoci funkční magnetické rezonance neurální odezvu při řešení toho, která množina je větší. Úlohy měly různou obtížnost, k dispozici bylo od 1 do 30 teček.



Obrázek 6 Ukázka úloh experimentu (In Lussierová., Cantlonová, 2017).

Autoři zjistili výraznou korelaci ( $p < 0.005$ ) mezi množstvím aktivace a lehkými úlohami (poměr 0.8) a korelaci ( $p < 0.05$ ) u středně těžkých úloh. Naměřenou aktivaci si můžeme prohlédnout na obrázku č. 7.



Obrázek 7 Aktivita mozku při porovnávání dvou množin teček (In Lussierová., Cantlonová, 2017).

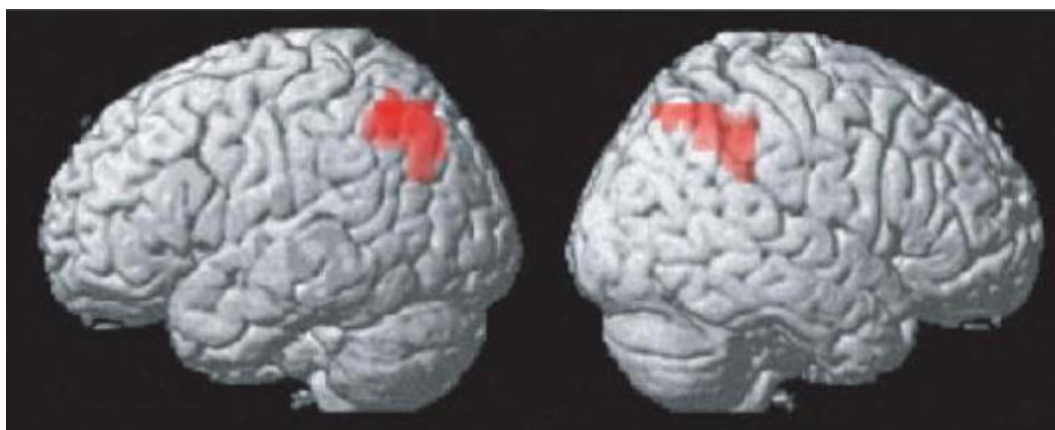
### 1. 3. 1 Mentální magnitudy

Co přesně znamená pojem *mentální magnituda* je, jak jsme již zmínili v úvodu práce, skoro filozofickou otázkou. V následující podkapitole se pokusíme o její definici. V literatuře (např. Gallistel; in Dehaene, 2011) magnituda znamená počitatelné číslo, které je přístupno aritmetické manipulaci. Od čísla se podle Gallistela (tamtéž) liší tím, že nemá dvojí denotát. Také jinak číslo 1 může odkazovat zároveň kupříkladu na množinu, výšku v metrech nebo počet velkých želv v knižní sérii Zeměplocha<sup>1</sup>. Podle Brannonové (2006) je mentální magnituda na jazyku nezávislý systém, který umožňuje reprezentaci čísla u lidí i zvířat a objevuje se velmi brzy během vývoje jedince. Mentální magnitudy mohou reprezentovat

---

<sup>1</sup> Zeměplocha (angl.. Discworld) je knižní série od Terryho Pratchetta.

*kontinuální* nebo *diskrétní* kvantity (Gallistel; in Dehaene, 2011). Kontinuální podobu magnituda získává, když je číslo prezentováno neverbálně. Hlavní důkaz pro tuto myšlenku přinesl již Welford (1960), který tvrdí, že na neverbální číselnou diskriminaci se vztahuje Weberův zákon. Weberův zákon tvrdí, že změna intenzity smyslového vjemu potřebná k tomu, aby byla detekována organismem, je logaritmicky závislá na intenzitě fyzikálního podnětu. Brannonová (2006) uvádí, že jsou-li dospělí lidé požádáni, aby porovnali magnitudy reprezentované arabskými číslicemi, pak je reakční čas (RT) kratší, čím větší je rozdíl mezi lineární vzdáleností a absolutní magnitudou porovnávaných hodnot (např. porovnáváme-li 1 versus 9, pak je RT kratší než, když porovnáváme 1 a 3). Z hlediska neuroanatomického substrátu jsou během reprezentace kontinuální mentální magnitudy opět aktivní různé oblasti parietálního kortexu (např. Lemer et al., 2003; Aydin et al., 2007; Chou et al., 2009) a intraparietálního sulku (např. Piazza et al., 2004; Nieder, Freedman and Miller, 2002) (viz obrázek č. 8). Diskrétním kvantitám se z důvodu neverbální povahy numerického zobrazení našeho experimentu dále nevěnujeme.



Obrázek 8 Aktivní levý a pravý intraparietální sulkus během reprezentace kontinuální numerické magnitudy u dospělých (in Brannonová, 2006).

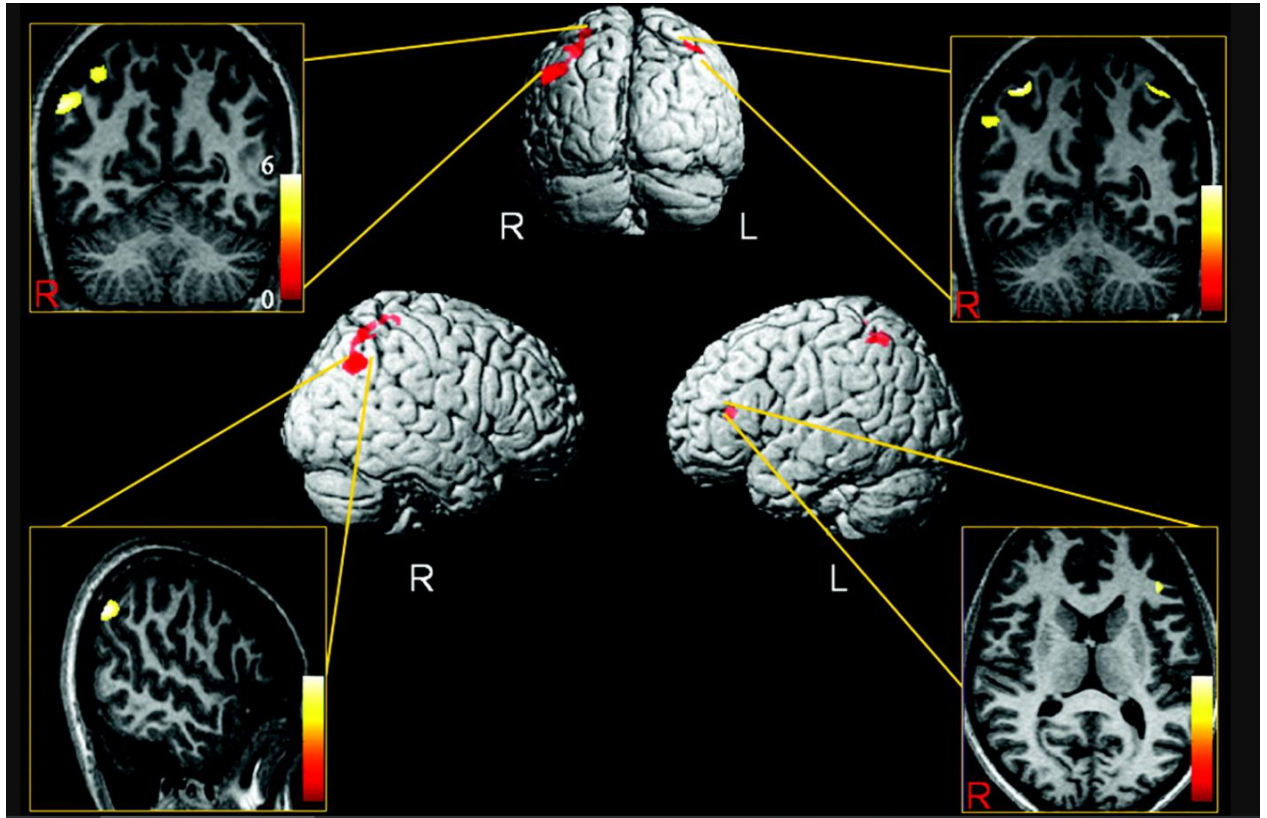
## 1. 4 Aritmetika z hlediska neuropsychologie

Učení se matematice vede k podstatným změnám ve funkci i struktuře mozku (Cohen Kadosh, Dowkerová, 2015). Tyto změny jsou dnes díky rozvoji a větší dostupnosti neurozobrazující techniky dobře uchopitelné a vychází tak studie (např. Aydin et al., 2007; Park, Brannonová, 2014), které přímo takové cerebrální změny popisují a sumarizují. Těchto studií není bohužel mnoho, ale v rámci této kapitoly si ty hlavní představíme. Prvně se ale podívejme, co vlastně aritmetika a aritmetické kompetence z hlediska kognice znamenají. Aritmetické kompetence jsou důležitým aspektem matematických dovedností. Studiu kognitivních mechanismů, které je umožňují, se v průběhu let zabývalo mnoho prací (např. Moeller et al., 2015; Schneider et al., 2017). Klasické práce (např. McCloskey, 1992; McCloskey, Caramazza and Basili, 1985) uvádí, že aritmetický systém se skládá ze tří na sobě nezávislých komponent. První jsou *aritmetická fakta* (znalost toho, že např.  $8 \times 7$  se rovná 56), dále pak *aritmetické postupy pro výpočet mnohačíslných problémů* (znalost toho, jak násobit např. čísla  $313 \times 713$  na papíře pod sebe) a konečně *systém rekognice pro aritmetické symboly*.

Konceptuální znalosti, které podle Cohena Kadoshe a Dowkerové (2015) zahrnují základní porozumění aritmetickým operacím a principům, jsou též nezávislou komponentou smysluplné a efektivní aritmetiky. Cohen Kadosh a Dowkerová (tamtéž) zároveň zmiňují, že mnoho vlivných neuropsychologických prací se zabývalo výzkumem kognitivní architektury zpracování čísla a kalkulace (např. výše uvedený McCloskey, 1992). Dalším významným proudem jsou pak práce, které se soustředí na popis vztahu mozkových lézí a jejich lokalizace a narušené kognitivní komponentě (viz kapitola 1.1). Pro zopakování si připomeňme, že kritickou roli v průběhu historie v jednoduchých kalkulacích hrál levý parietální kortex, přičemž frontální kortex měl nezastupitelnou roli ve zpracování komplexních početních úloh. V současnosti více hovoříme o zastoupení obou parietálních laloků při řešení jednoduchých kalkulací.

Bohužel existuje, jak jsme již zmínili, pouze hrstka prací věnujících se cerebrálním změnám v oblasti tréninku aritmetiky. Pokud už se mu věnují, bývá převažující metodou *morfometrie* (jednotkou je voxel), která měří zejména nárůst density šedé kůry mozkové. Ve výzkumu Aydina (et al., 2007) došlo k porovnání akademických matematiků a nematematiků. Vyšší hustota šedé kůry mozkové byla nalezena bilaterálně (viz obrázek č. 9) v oblasti inferiorních parietálních laloků u matematiků. Tato hustota navíc silně korelovala ( $r = 0.84$ ;  $p < 0.01$ ) s časem, který matematikové strávili v akademické funkci. Oblasti, které byly zapojeny při

aritmetickém zpracování, byly levý inferiorní lalok a bilaterální oblasti parietálního laloku. Inferiorní oblasti parietálního laloku byly také zapojeny při vyšší úrovni matematického přemýšlení, které vyžadovalo prostorovou představivost a manipulaci s 3D objekty.



Obrázek 9 Nárůst density šedé kůry u matematiků oproti nematematikům (In Aydin, et al., 2007).

Andres (et al., 2011) pomocí funkční magnetické rezonance poukázal na roli horizontálního segmentu intraparietálního sulku (viz obrázek č. 10) pro aritmetiku, zejména pak pro číselné zpracování a aritmetické operace jako je sčítání a odčítání.



Obrázek 10 Horizontální segment intraparietálního sulku při řešení aritmetických úloh,  $p < 0.001$ . fMRI experiment (In Andres, 2011).

Popescu a Saderová (2019) poukazují na fakt, že v současné chvíli je intraparietální sulkus nejčastěji uváděnou strukturou při úlohách zahrnující symbolickou i nesymbolickou matematiku.

## 2. Dva systémy hrubého odhadu

Van Marle (2014) uvádí, že již v kojeneckém věku jsme obdařeni dvěma mechanismy, jejichž hlavní úlohou je formální reprezentace čísla. Jde o *aproximální numerický systém* a *systém sledování objektu*. Jde o preverbální mechanismy hrubého odhadu, které člověku umožňují zpracovávat informace numerozitní povahy. Slouží zejména k vytvoření konceptu čísla a na jejich podkladě vznikají elementární aritmetické dovednosti (Plassová, 2017).

Van Marle (tamtéž) jde dokonce dál a tvrdí, že vliv systému sledování objektu je limitovaný a pouze krátkodobý. Dle autorky tak hlavní úlohu při tvorbě aritmetických operací (sčítání, odčítání, násobení, dělení) má pouze *aproximální numerický systém*. V následujících podkapitolách si oba systémy podrobněji představíme.

### 2.1 Aproximální numerický systém

V následující kapitole se blíže podíváme na charakteristické rysy, principy a funkce *aproximálního numerického systému*. Následující text jsme si ještě jednou dovolili převzít z našeho článku v časopise *Pedagogika* (Plassová, 2017, s. 162–165), který je *aproximálnímu numerickému systému* věnován:

*„Odborná literatura (např. Dehaene, 1999; Brannon, 2006; Piazza, 2010; Merritt, DeWind, & Brannon, 2012; Haist, 2015) na kardinální vlastnosti ANS nahlíží relativně jednotně. První vlastnost spočívá v aktivitě ANS při pozorování množin o více než čtyřech prvcích (Kaufman & Lord, 1949). Druhá pak v senzitivitě ANS vůči tzv. numerickému rozsahu (např. Piazza, 2010; Haist, 2015). Numerickým rozsahem se rozumí absolutní rozdíl mezi dvěma kontrastními množinami. Dalším obecně přijímaným rysem ANS, který je v literatuře uváděn, je jeho vrozená povaha (Brannon, 2006; Piazza et al., 2004; Merritt, DeWind, & Brannon, 2012). Na úvod si tak stručně zmiňme, jak se k problému vrozených matematických schopností staví vývojová psychologie a potažmo současná didaktika matematiky.*

*Jean Piaget (1952) ve své knize, která shrnuje vývoj numerické kognice u dětí, píše, že děti získávají spolehlivou mentální reprezentaci čísla až kolem 6 neb 7 let věku. V průběhu kojenecké a batolecí fáze nejsou děti podle Piageta schopné posuzovat velikost množin nebo odhadovat velikost objektů. Piagetovu teorii v tomto ohledu vyvrátila průkopnická práce Gelmana a Gallistela (1978), která popsala, že i předškolní děti mají intuitivní znalosti aritmetiky. Později toto zjištění rozšířili Xu a Spelke (2000), kteří prokázali, že šestiměsíční*



děti ( $N=16$ ) jsou schopné vizuálně rozlišovat mezi malými množinami objektů s poměrem 8 vs. 16 teček. Kojenci však nedokázali rozlišovat mezi množinami o poměru 8 vs. 12 teček. To autory přivedlo ke dvěma závěrům; prvně se zdá, že se diferenciací systému hrubého odhadu řídí Weberovým - Fechnerovým zákonem, který tvrdí, že intenzita smyslového vjemu je logaritmicky závislá na intenzitě fyzikálního podnětu a dále, že se funkce hrubého matematického odhadu ontogeneticky vyvíjí a zpřesňuje.

V praxi se pak setkáváme s tím, že didaktika matematiky (např. Binterová, Hošpesová 2003; Binterová, 2005; Samková, 2013) klade důraz na trénink matematického odhadu. Odhadují se počty prvků v množině, výsledky početních operací nebo metrické vlastnosti geometrických tvarů (Samková, 2013). Nicméně se hodí zdůraznit, že se během těchto odhadů aktivita mozku liší. Je to zpravidla dáno tím, že je pro odhad větší množství času, než je tomu u tréninku ANS a zapojuje se tak i vyšší kognice. Více se tomuto jevu budeme věnovat v následujícím textu. Nyní se blíže podívejme na výzkum vrozených matematických schopností.

Objevují se studie (např. Dehaene, 1999; Brannon, 2006; Merritt, DeWind, & Brannon, 2012), které dokazují, že základní numerické schopnosti nejsou závislé na vzdělání a dokonce ani na jazyku, ale jsou biologicky zakořeněné. Základní numerické kompetence lze nalézt bez rozdílu rasy, pohlaví, věku nebo kulturní příslušnosti v mozku všech lidí a také napříč rozmanitou škálou živočišných druhů. Komparativním psychologům (Brannon, Terrace, 1998; Davis, Perusse, 1988; Hauser et al. 2000; Wilson et al. 2001; Nieder, Dehaene, 2009) se podařilo prokázat, že zvířata dokáží rozlišit mohutnost množiny a zcela běžně využívají numerické informace při rozhodování.

Odhalení vrozené povahy numerických kompetencí je věcí relativně nedávnou. Významný milník představoval objev základních numerických schopností u kojenců (Starkey, Cooper, 1980; Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004; Izard, Sann, Spelke, & Streri, 2009). Následné výzkumy (Dehaene, 1999; Wynn, 1992; Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004; Brannon, 2006) ukázaly, že děti jsou ve věku pouhých pěti měsíců schopné rudimentálních aritmetických početních operací, jako je sčítání a odčítání u malého počtu objektů. Antropologické studie (Gordon, 2004) prokázaly schopnost kvantifikovat objekty u dospělých lidí z izolovaných domorodých kmenů, kde numerické symboly nebyly součástí jejich kultury.

Výše uvedené studie přivedly odbornou veřejnost (např. Halberda et al., 2008) k hypotéze, že jde o mechanismy, které mají fylogenetické i ontogenetické základy. V současnosti (např. Castelli et al., 2006; Piazza et al., 2006; Izard et al., 2008; Piazza, 2010) je patrný trend

tyto vrozené neurální mechanismy zmapovat. Dostáváme se tak konečně k vysvětlení neverbálního numerického mechanismu označovaného jako aproximální numerický systém (ANS). Bližší charakteristika ANS bývá, jak jsme již uvedli, nejčastěji popisována jako hrubá vnitřní reprezentace čísla (Gallistel & Gelman, 2000; Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004), která není závislá na jazyku nebo symbolické matematice (Xu, Spelke, 2000; Gordon, 2004; McCrink, Wynn, 2007; Spaepen et al., 2011). Existují přesvědčivé důkazy (Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004; Halberda, Mazocco, & Feigenson, 2008; Gilmore, McCarthy, & Spelke, 2010; Mazocco, Feigenson, & Halberda, 2011b; Piazza et al., 2010; DeWind & Brannon, 2012; Park, Brannon, 2014) o tom, že jde o klíčový systém tvořící základy symbolických matematických dovedností u dospělých lidí. K vysvětlení tohoto tvrzení je potřeba blíže rozebrat samotnou podstatu ANS. Podle Haista (et al., 2015) je potřeba při pochopení ANS brát v potaz jeho dvě základní složky. Ty pramení z principů ANS, jež jsme uvedli v úvodu kapitoly a nyní se na ně podíváme podrobněji.

První složku ANS, jež můžeme pojmenovat jako aproximativní aritmetiku, můžeme nejspolehlivěji pozorovat ve chvíli, kdy odhadujeme počet množiny. Množina musí mít více než čtyři prvky, má-li menší počet prvků, pak jsou v mozku aktivovány jiné korové oblasti.

V literatuře (např. Hyde, 2011) se hovoří o tzv. paralelním systému individualizace (angl. též „object tracking system“), který je určen právě pro posuzování magnitudy množin o velikosti nižší než čtyři prvky. První složka ANS hraje důležitou roli pro vývoj složitějších matematických operací, konkrétně sčítání a odčítání.

Druhou složkou je senzitivita ANS vůči numerické vzdálenosti rozsahu. Numerickou vzdáleností se rozumí absolutní rozdíl mezi dvěma kontrastními množinami (například reakční čas je kratší a přesnost vyšší, když posuzují, zda je více 12 modrých teček oproti 3 žlutým, než když posuzují, zda je více 6 modrých teček oproti 3 žlutým) (Haist et al., 2015). Podle některých autorů (Mazocco, & Feigenson, 2008; DeWind & Brannon, 2012; Roitman et al., 2012) se preciznost odhadu a reakční čas při zapojení ANS řídí již zmíněným Weberovým - Fechnerovým zákonem. Použijeme-li opět příklad se žlutými a modrými tečkami, pak by se Weberův - Fechnerův zákon manifestoval tím způsobem, že čím větší početní rozdíl mezi žlutými a modrými tečkami, tím rychlejší reakční čas a vyšší přesnost. Někteří autoři (např. Sasanguie, Defever, Maertens, & Reynvoet, 2013; Sasanguie, Gobel, Moll, Smets, & Reynvoet, 2013; Tibber et al., 2013; Park a Brannon, 2014) toto tvrzení popírají a argumentují tím, že na každou studii, která logaritmický vztah potvrzuje (např. Gilmore, McCarthy, Spelke, 2010; Piazza et al., 2010, Mazocco, Feigenson, & Halberda, 2011a; Mazocco, Feigenson, & Halberda, 2011b; DeWind & Brannon, 2012; Halberda,

*Ly, Wilmer, Naiman, & Germine, 2012; Libertus, Odic, & Halberda, 2012), existuje podobný počet studií (např. Holloway, Ansari, 2009; Inglis, AATridge, Batchelor, Gilmore, 2011; Castronovo, Gobel, 2012; Fuhs & McNeil, 2013; Gobel, Watson, Lervag, & Hulme, 2014), které ho vyvrací. Z tohoto důvodu zaujímáme vůči Weberovu - Fechnerovu zákonu v oblasti ANS spíše skeptický postoj a domníváme se, že je pro posouzení preciznosti a rychlosti ANS potřeba navrhnout spolehlivý nástroj. Shrňeme-li konečně zmíněné funkce ANS, pak můžeme konstatovat, že jsou základem pro vývoj jednoduché aritmetiky, a to zejména ve smyslu vytvoření mentální reprezentace pro sčítání, odčítání, dělení a násobení.“*

### 2. 1. 1 ANS a obecná matematika

Učení se matematice vede k podstatným změnám v kognitivních funkcích i neuroanatomickým změnám mozku (Cohen Kadosh, Dowkerová, 2015). Tyto změny jsou dnes díky rozvoji a větší dostupnosti neurozobrazující techniky dobře uchopitelné a vycházejí tak studie (např. Aydin et al., 2007; Park, Brannonová, 2014), které přímo takové cerebrální změny popisují a sumarizují. Tyto změny jsme uvedli v kapitole 1.4. Bohužel studií, které se věnují přímo vlivu aproximálního aritmetického tréninku na obecnou matematiku ve smyslu zlepšení obecných matematických dovedností, je opravdu hrstka. Výchozí studií pro naši práci byl výzkum Parka a Brannonové (2013), který na 26 dospělých studentech vysoké školy (n=26) našel statisticky významný vztah tréninku ANS pomocí speciálně vytvořených ANS úloh, které nazýváme aproximálně aritmetickým tréninkem (AAT) a úrovní matematického výkonu ve standardizovaném matematickém testu. V kapitole číslo 8 pak uvádíme naši verzi těchto úloh, které jsme s laskavým svolením autorů převzali a upravili, abychom mohli úlohy použít u předškolních dětí a zároveň, abychom lépe kontrolovali proměnné v podobě vizuálního zatížení, plochy, vzdálenosti mezi prvky množiny a další.

Oba autoři vycházeli z již uvedených prací (např. Dehaene, 1992; Feigenson et al., 2004; Gallistel & Gelman, 1992; Piazza, 2010), které dokazují, že je ANS neurokognitivní základ pro vyšší symbolickou matematiku. Pro ověření dominantní pozice AAT autoři zařadili i jiné druhy úloh (například trénink počítání) a kontrolní skupině pak byl přiřazen trénink slovíček. Pouze skupina s AAT prokázala statisticky signifikantní ( $p = 0.007$ ) zlepšení v oblasti symbolické matematiky.

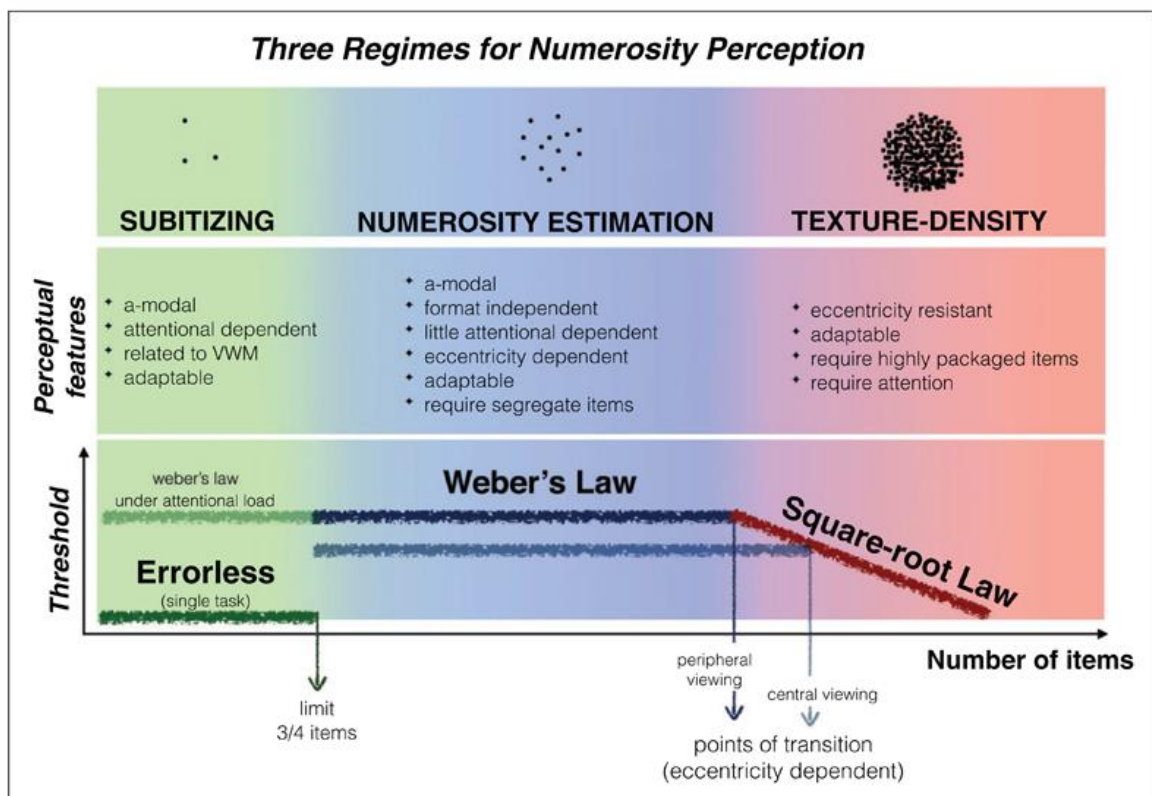
Wang (et al., 2016) ve svém výzkumu na 13 až 16letých dětech zjistil korelaci mezi precizností ANS a výkonem ve standardizované matematické části SAT a ACT testu.

Zhang (et al., 2019) zjistil u desetiletých čínských dětí (n=276) pozitivní korelaci mezi ANS a aritmetickou fluencí. Zároveň byl také objeven vztah mezi rychlostí zpracování ANS úloh a rychlostí aritmetické fluence.

Au (et al., 2018) pak uvádí, že sedmidenní AAT, jenž vychází z funkce ANS, replikuje výsledky Parka a Brannonové (2013) a potvrzuje transfer trénování ANS právě do oblasti symbolické matematiky.

## 2. 1. 2 Vliv hustoty (a dalších atributů) na ANS

Sice jsme si již v textu zmínili, že atributy vizuálního stimulu jako tvar, vzdálenost mezi prvky, hustota nebo barva či jas, mají vliv na ANS, nicméně tento vliv je zpravidla zanedbatelný (např. Libertus, Feigenson, & Halberda, 2011). Rozsáhlou studii tomuto tématu věnuje Anobile (et al., 2016), kde pro nás podstatný je zejména fakt, že v případě vysoké hustoty prvků v množině nenarůstá intenzita smyslového vjemu lineárně, ale odmocninou (viz obrázek č. 11).



Obrázek 11 Tři režimy pro numerickou percepci: subitace; numerický odhad a hustota stimulu. (In Anobile, Cicchini, Burr, 2016).

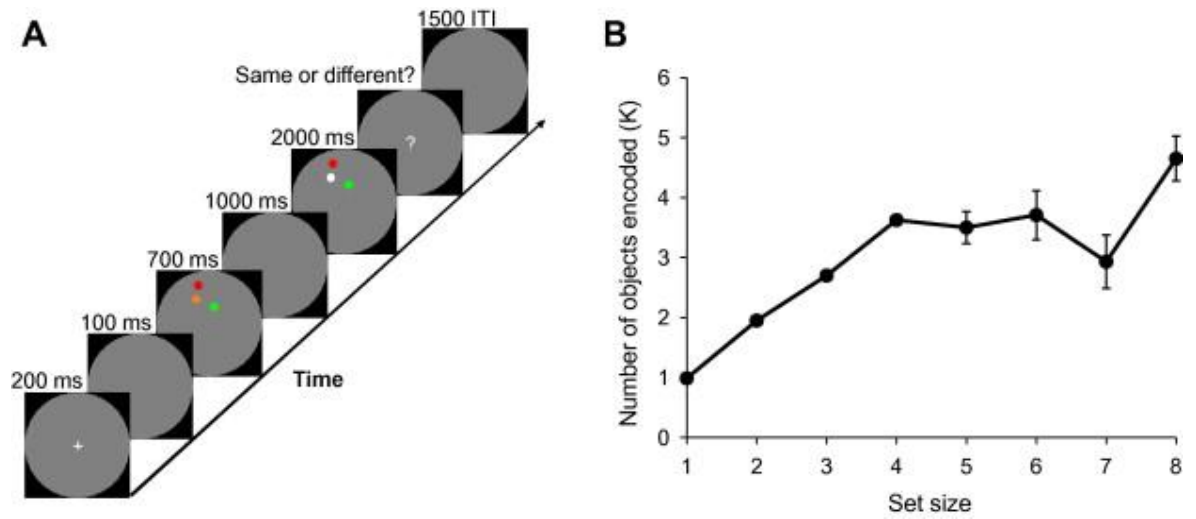
Dále výzkum (např. Olmstead, Kuhlmeier, 2015) vyzdvihuje roli faktického množství zabrané plochy vizuálního stimulu objektů množiny, kdy při malých počtech objektů může tato zabraná plocha sloužit jako vodítko pro určování větší či menší množiny.

## 2. 2 Systém sledování objektu neboli paralelní systém individualizace

Jde o preverbální mechanismus, který je schopen průběžně sledovat prostorové vlastnosti malého počtu objektů (přibližně 3–4). Zároveň tento systém umožňuje rychle a přesně odhadovat numerozitu malých množin objektů, a to bez toho, aniž by docházelo k jejich počítání (Sella et al., 2018). Podrobněji řečeno, jde o systém, který člověku umožňuje odhadovat počet prvků v množině a porovnávat množiny mezi sebou z hlediska velikosti.

V angličtině pro tuto operaci existuje pojem *subitizing*. Jde o pojem, který prvně použil Kaufman (et al., 1949) a odvodil z latinského slova *subitus*, což znamená *náhly*.

Hyde a Spelke (2009) osmačtyřiceti (n=84) dospělým lidem ve věku od 18 do 29 let prezentovali po dobu 250 ms množinu bílých teček na černém podkladu. Zjistili, že malé množiny (1–3 objekty) podnítily brzkou posteriorní parietální aktivitu (okolo 100 ms po prezentaci stimulu), což kontrastuje s aktivitou u velkých množin, které evokovaly středně dobou aktivitu v postero-parietálním kortexu (okolo 200 ms po prezentaci stimulu). Podobná zjištění potvrdil i Feigensonová (et al., 2004) nebo Libertus (et al., 2007). Všechny studie naznačují, že pro ANS a systém sledování objektu existují specifické neurální mechanismy. Hyde (2011) navíc uvádí, že systém sledování objektu není závislé na aproximální numerické magnitudě. To podporuje práce Piazzzy (et al., 2011), která na šestadvaceti (n=26) zdravých dospělých lidech provedla experiment s počítáním teček (viz obrázek č. 12). Z práce vyplývá, že na malé množiny objektů (do 3 objektů) neplatí Weberův zákon. Autorka z toho vyvozuje, že systém sledování objektu je podporován jiným neurálním mechanismem a subitizace je částečně umožněna vizuo-prostorovou pracovní pamětí.



Obrázek 12 Ukázka experimentu (A) a (B) reakčního času a chybovosti (na ose X velikost setu, na ose Y počet kódovaných objektů) (In Piazza, 2011).

### 3. Elektroencefalografie, porovnání EEG signálu u dospělých a u předškolních dětí

V následující kapitole si uvedeme rozdíly v EEG signálu u dospělých zdravých lidí a u předškolních zdravých dětí, a to z důvodu, že dětské EEG se od dospělých v mnoha aspektech významně liší a je tak potřeba si tyto specifika určit a blíže popsat. Nicméně předesíláme, že se v této kapitole nemáme v úmyslu rozsáhle věnovat standardnímu EEG u dospělých, a to zejména z důvodu povahy naší práce, která je zaměřena na předškoláky. Zmíníme tak jen nezbytné základy elektroencefalografie u dospělých, jež mají primárně sloužit pro účel srovnání. V případě zájmu o podrobnější informace o EEG signálu u dospělých si dovolueme doporučit již klasické publikace *EEG do kapsy* od pana profesora Fabera (2001) nebo *Praktickou elektroencefalografii* od pana doktora Moráně (1995).

Nyní si stručně definujme, co se pod názvem elektroencefalografie vlastně skrývá. Britz (et al., 2010) tak trochu poeticky poznamenává, že jde o přímou neinvazivní a integrativní metodu, jež poskytuje jakési okno pro pozorování mozkových funkcí. EEG reflektuje okamžitou aktivitu neuronových sítí a širokou škálu mozkových systémů. Jde tedy o časoprostorové snímání bioelektrického signálu na povrchu hlavy (skalpu). Bioelektrický signál vzniká při jakékoli aktivitě mozku, ať už se jedná o spánek, bdění, relaxaci nebo – jako v našem případě – řešení rozumových úloh a je hojně využíván od doby svého vzniku ve 30. letech 20. století (Britz et al., 2010) jak ve vědě, tak v lékařství.

Budeme-li přesnější, pak jsou zdrojem aktivity změny polarizace neuronů. Neuron je vysoce specializovaná nervová buňka, která se skládá z aferentních (přívodných) dendritů, těla (soma) a eferentních (vedoucích vzruch od centra k periferii) axonů (neuritů). Neurony jsou tak schopné přijímat, vést, zpracovávat a odpovídat na specifické signály. Tuto funkci umožňuje cytoplasmatická membrána, ve které se nachází bílkovinné kanály, nazývané iontové kanály, které propouští určité anorganické ionty. K základním druhům iontových kanálů patří sodíkový kanál, draslíkový kanál nebo vápníkový kanál. Na membráně těla a dendritů, a to v oblastech, kde nasedají synapse, převládají iontové kanály řízené chemicky, ve zbytku neuronu převažují iontové kanály řízené elektricky. Při buněčném katabolismu, tedy procesu, při kterém se uvolňuje energie, dochází k membránovému potenciálu, jež má asi -50 až -90 mV. V klidu je membrána polarizovaná, při chemickém podráždění dochází buďto k depolarizaci nebo hyperpolarizaci. Membrány, kde převažují elektrické iontové kanály, reagují při depolarizaci vzruchem. Tyto procesy, kdy dojde k náhlému zvýšení nebo snížení membránových potenciálů, nazýváme *akčním potenciálem* (Trojan et al., 2003).

Neurony spolu komunikují vysoce specializovaným způsobem, tuto komunikaci umožňují tzv. synapse. Synapse je spojení dvou neuronů, které slouží k převodu vzruchu. Funkce je poměrně snadná – vznikne-li akční potenciál, který se šíří po povrchu celého neuronu, dochází k uvolnění specifických látek (neurotransmiterů) do synaptické štěrby, tedy prostoru mezi dvěma neurony. Neurotransmitter (mediátor) poté způsobí chemické podráždění chemicky řízených iontových kanálů na druhém neuronu, přičemž za vhodných fyziologických podmínek může dojít ke vzniku dalšího akčního potenciálu (tamtéž).

Zdrojem pro snímání EEG signálu jsou poté zejména excitační (EPSP) a inhibiční postsynaptické potenciály (IPSP), v menším zastoupení se pak jedná přímo o akční potenciály (Mysliveček, 2009).

Samotné zařízení elektroencefalografu sestává z elektrod, v našem případě a obecně nejčastěji to jsou elektrody tzv. skalpové. Skalpové elektrody se umísťují samostatně nebo do nasazené elektrodové čepice na hlavu probanda. Dělá se tak podle určených schémat, kupříkladu systém 10–20. Systém 10–20 označuje procentuální vzdálenost mezi jednotlivými elektrodami, která je měřena od kořene nosu až po týlní hrbolek (Faber, 2001). Elektrody mají označení v podobě písmen (A = Ear lobe; C = Central; P = Parietal; F = Frontal; O = Occipital; T = Temporal) a čísel (lichá čísla pro elektrody umístěné nad levou mozkovou hemisférou, sudá čísla pro elektrody nad pravou hemisférou). Počty samotných elektrod se liší, nicméně počet elektrod odpovídá množství záznamových kanálů. Zapojení elektrod může být buďto unipolární nebo bipolární. Rozdíl je v tom, že u bipolárního se snímá rozdíl potenciálů mezi dvěma aktivními elektrodami, přičemž unipolárně zapojené schéma je snímáno napětí mezi aktivní a referenční elektrodou (tamtéž).

Samotné elektrody lze dělit na *povrchové* a *podpovrchové* (Mysliveček, 2009). Povrchové elektrody slouží k neinvazivnímu měření na povrchu skalpu, zpravidla se používají již zmíněné jednotlivé elektrody nebo elektrodové čepice, přičemž u elektrodových čepic se u jistých přístrojů používá elektrovedivý gel pro lepší vodivost mezi skalpem a elektrodou. Podpovrchové elektrody jsou poté drátky, jehly nebo další útvary z platiny, stříbra a dalších vhodných materiálů. Samotný elektroencefalograf se pak sestává z již zmíněných elektrod (kanálů), diferenčního zesilovače a zapisovacího zařízení. Jak jsme uváděli, elektrické potenciály, které snímají elektrody z povrchu hlavy, mají velmi nízkou amplitudu, navíc nás obklopuje tzv. elektromagnetický smog, který vydává i obyčejná elektrická zásuvka. Z toho důvodu se používá vstupní zesilovač, který zesiluje signál a pomáhá k odfiltrování šumu. Naměřená data se poté zaznamenávají do grafu. Aktivita mozku se liší, jak frekvencí neboli počtem opakování za určitý čas a dále pak amplitudou – maximální hodnotou periodicky se



měnicí veličiny. Základní typy mozkové aktivity si popíšeme v následující podkapitole (Faber, 2001; Hrazdira & Mornstein, 2001; Trojan, 2003; Mysliveček, 2009)

### 3. 1 EEG u dospělých

Mozkovou aktivitu snímanou pomocí skalpových elektrod zaznamenává zapisovací zařízení do podoby potenciálových vln, které nabývají podoby sinusoidy, jež má amplitudu v rozmezí desítek až stovek  $\mu\text{V}$  a dobu trvání v řádu jednotek nebo stovek milisekund. Získané potenciálové vlny jsou tak zobrazením aktivity neuronů v reálném čase. Počet potenciálových vln, které se objeví za 1 sekundu, označujeme jako frekvenci, tu uvádíme v hertzech (Hz). Vlny lze poté dělit do frekvenčních pásem (rytmů), kupříkladu pásmo alfa, beta, théta, gamma a delta. Nyní si tyto rytmy stručně popíšeme.

#### 3. 1. 1 Frekvenční pásma (rytmy)

##### *Alfa rytmus*

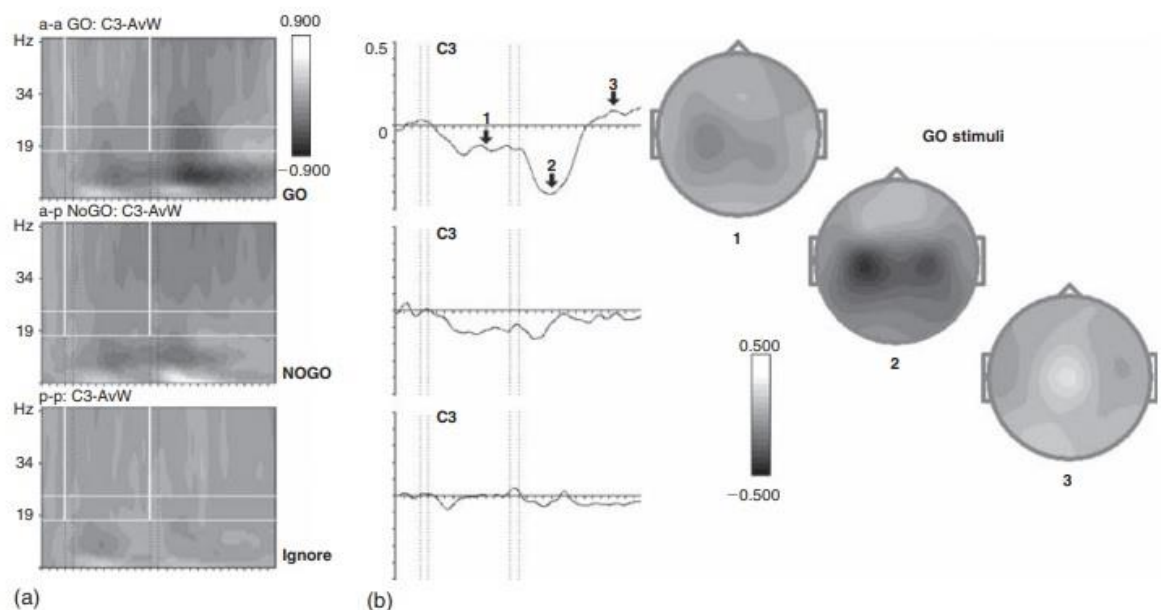
Patří k nejzákladnějším EEG rytmům, převažuje nejvíce parietookcipitálně v klidovém rytmu při zavřených očích. Základní frekvence u dospělého člověka se pohybuje mezi 8–13 Hz a dosahuje amplitudy okolo 20–80  $\mu\text{V}$ . V průběhu maturace mozku dochází k postupnému navyšování frekvence.

##### *Beta rytmus*

Pro naši práci stěžejní frekvenční pásmo. Jde o neurální oscilaci o frekvenci 12,5–30 Hz (někdy uváděno 13–30 Hz nebo dokonce 14–30 Hz), jež se ve spektogramu projevuje zcela distinktivními peaky (vrcholky potenciálových vln) v různých částech kortexu, přičemž se nejčastěji objevuje ve frontálních nebo centrálních oblastech v porovnání s posteriorními oblastmi (Rangaswamy et al., 2002; Buzsáki, 2004; Kropotov, 2009). Beta rytmus lze dělit do tří různých podsekcí na *pomalou betu* o frekvenci 12,5–16 Hz, dále poté na *betu* 16,5–20 Hz a *vysokou betu* o frekvenci 20,5–28 Hz (Rangaswamy et al., 2002). Další dělení nabízí Kropotov (2009), který píše, že můžeme identifikovat minimálně dva typy bety, a to beta rytmus s maximem spektra v oblasti senzomotorické kůry, neboli *rolandický beta rytmus*, a dále poté beta rytmus v oblastech frontálního kortexu, který nazýváme *frontálním beta*

*rytmem*. Prvně si blíže popíšeme rolandický beta rytmus. Ten je pozorován u zdravých subjektů jako spontánní aktivita během otevřených i zavřených očí specificky na elektrodách C3, Cz a C4. Ačkoli má tato aktivita velice často frekvenci okolo 20 Hz, tedy jako zdvojený mu rytmus, neměly by být považovány za subharmonickou oscilaci, jelikož bylo pomocí magneto-encefalografu (MEG) zjištěno, že mají rozdílné zdroje a jedná se tak o samostatnou mozkovou frekvenci a nikoli harmonický artefakt. Rolandická beta se objevuje, jak jsme již uvedli, v senzomotorické kůře a mu rytmus v kůře motorické. Frekvence rolandické bety se pohybuje v rozmezí 14 až 30 Hz, nicméně závisí na věku subjektu, kdy platí, že s věkem frekvence narůstá.

Rolandický beta rytmus se objevuje během rozmanitých motorických a kognitivních úloh, příkladem dynamičnosti rolandické bety může posloužit aktivita na elektrodě C3 během klasického Go/NoGo testu (tastu) (viz obrázek č. 13). Na obrázku vidíme potlačení rolandické bety během stisknutí klávesy při Go trialech a zároveň také během přípravy ke stisknutí klávesy u Go i NoGo trialů (Kropotov, 2009).

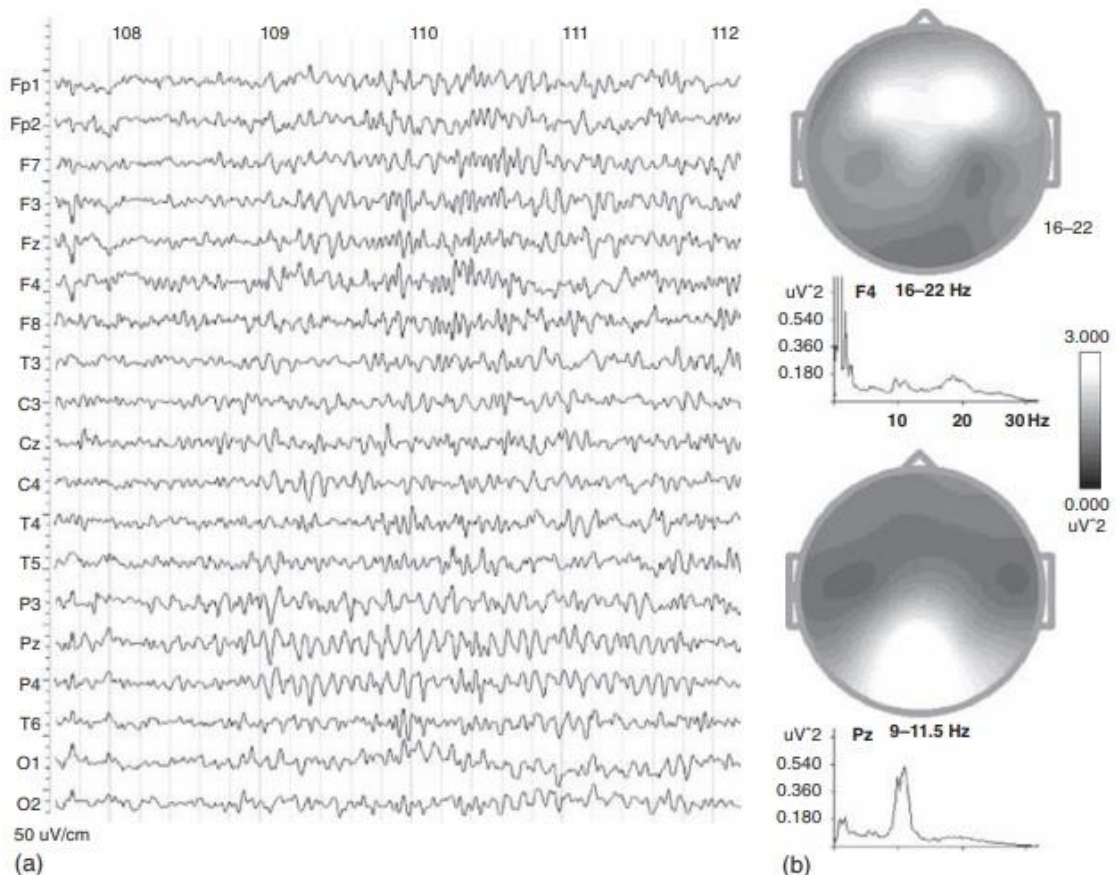


Obrázek 13 Potlačení rolandického beta rytmu motorickou aktivitou u adolescentů při řešení Go/NoGo tasku (Kropotov, 2009).

Nicméně během Ignore trialů, kdy se subjekt nepřipravuje ke stisknutí klávesy, k potlačení rolandického beta rytmu nedochází. Z obrázku je také patrné, že během potlačení rolandické bety, které bývá označováno jako *desynchronizace*, se objevuje také potlačení síly (power) v alfa frekvenci. Po stisknutí klávesy se následně opět objevuje synchronizace beta rytmu,

ale mu rytmus zůstává desynchronizovaný. To poukazuje, že rolandický beta rytmus a mu rytmus mají odlišnou dynamiku (Kropotov, 2009).

Nyní se podívejme na frontální beta rytmus, ten se podle Kropotova (2009) ve spektrogramu vyznačuje nepravidelnými širokými špičkami s nízkou amplitudou. Pouze 2% populace přesahují amplitudu 20  $\mu\text{V}$ . Tato aktivita kontrastuje alfa rytmem v centrálních a posteriorních oblastech, která má navíc mnohem pravidelnější vzor a je ve spektrogramu vyjádřena úzkými špičkami. Ilustraci frontální bety můžeme vidět na obrázku číslo 14, a to konkrétně na elektrodách F3, Fz, a F4. Jde o fragment EEG signálu zdravého subjektu.



Obrázek 14 Frontální beta rytmus. (a) Fragment 19ti kanálového EEG záznamu při otevřených očích. (b) Spektra alfa a beta rytmu (In Kropotov, 2009).

### Delta rytmus

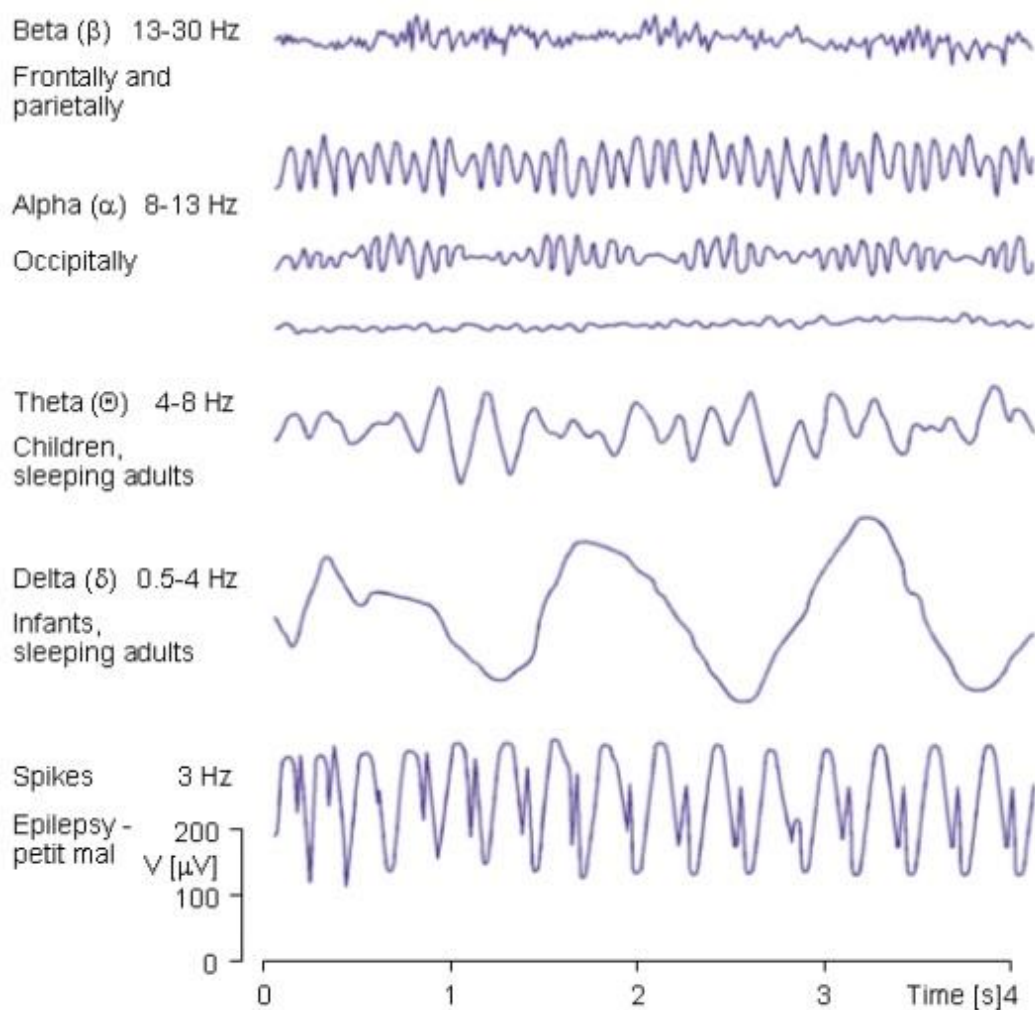
Jde o rytmus s nejnižší frekvencí od 0,5 po 3,5 Hz. Fyziologický pouze v dětství nebo v hlubokém spánku. Amplituda okolo 75 až 150  $\mu\text{V}$  (Myslivoček, 2009).

### *Théta rytmus*

Jde o sporadický rytmus o frekvenci 4 až 7,5 Hz, který je fyziologicky přítomen u dětí a při mělkém spánku, častěji lokalizován v levé hemisféře. Amplituda je relativně nízká – 15 až 25  $\mu\text{V}$  (Myslivoček, 2009). Podle Zheng a Colginové (2015) se jedná o jeden ze tří významných rytmů zaznamenaných v kortexu během aktivního chování. Dalšími jsou již zmíněná beta a níže uvedená gamma. Tomuto problému se budeme blíže věnovat v následující kapitole.

### *Gamma rytmus*

Gamma může dosahovat frekvence od 25 do 100 Hz (Myslivoček, 2009), nicméně typická je aktivita okolo 40 Hz. Stejně jako beta rytmus je gamma asociovaná spolu s pozorností, percepcí a kognicí. Nicméně podle Kopella (et al., 2000) mají oba rytmy odlišnou dynamiku synchronizace, jelikož jsou založeny na odlišných iontových kanálech. Lokalizace je více méně napříč celým mozkem.



Obrázek 15 Ukázka frekvenčních pásem (In Malmivuo, Plonsey, 1995).

### 3. 2 Role beta, théta a gamma rytmu při řešení kognitivních, vizuálních úloh

Mozkové rytmy reflektují synchronizovanou aktivitu napříč různými neurálními sítěmi. Dokonce se předpokládá, že mozkové rytmy přímo představují jakýsi mechanismus, který má za úkol koordinovat aktivitu napříč různými oblastmi mozku. Jak už jsme zmínili v předchozí podkapitole, existují tři významné mozkové rytmy, jež jsou pozorovány v mozkové kůře během aktivního chování. Těmito rytmy jsou beta, gamma a théta. Théta rytmus je spojován s aktivním příjmem sensorických stimulů, včetně pohybů očí. Gamma rytmus se podílí na percepci jako takové a beta rytmus v senzomotorickém kortexu bývá spojován s anticipací vizuálního stimulu (Zheng & Colginová, 2015).

Bastos (et al., 2015) se ve své studii na primátech pokusili objasnit roly bety ve vizuálním zpracování. Pro objasnění směru toku informací ve vizuálních sítí použili Grangerův test kauzality (podmíněnosti), což je test používaný pro rozhodnutí o vzájemném ovlivnění časových řad (Bressler, Seth, Anil, 2011). Zjistili, že theta a gamma rytmus v oblastech vizuálního kortexu geniculate nuclea, tedy v oblastech motorického kortexu s nižší hierarchií, ovlivňují gamma a theta v oblastech s vyšší hierarchií, což ukazuje, že tyto dva mozkové rytmy podporují tok informací v tzv. *feed forward* směru, což lze do češtiny přeložit jako dopředná vazba, a to v rámci zpracování bottom up. Přesně opačně pak pracuje beta rytmus, kde hierarchicky vyšší oblasti ovlivňovaly ty nižší, což ukazuje, že beta rytmus podporuje feedback interakci během top down zpracování.

Velmi zajímavá je práce Buschmana (et al., 2007), která se uskutečnila na MIT, kdy se autoři zaměřili na top down a bottom up zpracování mimo vizuální kortex. Opět si k tomu vybrali primáty a pomocí vnořených elektrod ve frontálním a parietálním kortexu prokázali, že v obou regionech lze pozorovat beta rytmus o frekvenci 25 až 30 Hz při top down zpracování a gamma o frekvenci 40 až 55 Hz při bottom up zpracování.

Na jistý problém poté poukázali Bressler a Richter (2014), když ve své práci zmiňují, že se mimo beta rytmu na top down zpracování podílí i alfa rytmus, a to tím způsobem, že se horní frekvence alfy (13 až 14 Hz) překrývá s nejnižší frekvencí beta pásma. Toto zjištění může podle autorů vést k tomu, že se v různých studiích stejná fyziologická aktivita vydává za alfu nebo betu.

### 3. 3 EEG u předškolních dětí

Lidský mozek prochází mnoha důležitými vývojovými změnami. První významné období pro zrání mozku začíná ještě před narozením a další pokračují až zhruba do pětadvacátého roku života. Můžeme rozlišit dvě podstatné maturační fáze, první probíhá v prvním roce života a je charakteristická zvyšováním synaptické density, růstem dendritů a navyšováním objemu kortexu. Druhá fáze pak začíná hned po té první a pokračuje až do adolescence. Můžeme ji opět charakterizovat ve vztahu k synapsím, nicméně nyní synaptická densita mírně klesá. Je to zapříčiněno zvyšováním specializace neurálních sítí, kdy jednoduše nevyužívané neuronové sítě vyhasínají. V angličtině existuje pro tuto aktivitu příznačné označení „synaptic pruning“, což můžeme do češtiny přeložit jako „synaptické prostrhávání“. Dále je pak i pro toto období charakteristické pokračování růstu dendritu (Barrigo-Paulino, Flores, Gómez, 2011). Pro nás stěžejní je zjištění mnoha studií (např.

Dehaene, 1999; Brannonová, 2006; Barrigo-Paulino, Flores, Gómez, 2011), že cerebrální a kognitivní zrání je spolu neodlučitelně provázané. V této podkapitole se tak chceme zabývat podobou a specifiky elektroencefalografického signálu u předškolních dětí ve věku od 5 do 6 šesti let, také jinak ve věkovém rozmezí, kterému se věnujeme v praktické části této práce. Na úvod se hodí zmínit, že i pro odborníky v oblasti interpretace EEG signálu představuje dětský EEG záznam velkou výzvu. Eisermann (et al., 2012) dokonce uvádí, že od roku 1971 nevznikla žádná významná studie, která by se věnovala dětskému EEG. Je také potřeba mít na zřeteli, že dětský EEG záznam odráží vývojové změny v důsledku zrání mozku a nervové soustavy, nicméně zároveň nese znaky i interindividuálních rozdílů mezi vrstevníky. Maturační změny jsou kupříkladu v novorozeneckém období výrazně akcelerované a u předškolních dětí existují výrazné interindividuální rozdíly, zejména pak hovoříme o rozdílech ve spektrální amplitudě základních EEG komponent, kterými se budeme podrobněji zabývat v pozdější části této kapitoly. Prvně se ale podívejme, jak je v odborné literatuře (např. Misra & Kalita, 2009; Eisermann et al., 2012) definovaná věková kohorta pro EEG záznam předškoláků. Přímo Misra a Kalita, kteří jsou autoři významné publikace o klinické encefalografie (2009), definují předškolní období ve věkovém rozmezí od 3 do 5 let, stejně definuje předškolní věk i Eisermann (et al., 2012). Námí zvolená věková kohorta je výsledkem pilotáže (Plassová, 2017), ve které vyšlo najevo, že děti mladší pěti let obecně nezvládaly námi navržené úlohy, což si vysvětlujeme zejména poznatky o vývoji vizuospaciálního zpracování (např. Stilesová, Paulová, Arková, 2008) a dále pak jednoduše ontogenetickými faktory, kdy samotná situace snímání EEG signálu může být pro mladší děti příliš stresující, zejména, vezmeme-li v potaz, že dítě musí udržet pozornost po dobu minimálně půl hodiny, a to pouze s krátkými přestávkami. Naše práce se pak v literatuře opírala o studie s podobnými podmínkami, příkladem může být práce Novikovové (et al., 2009), která poskytuje významný vzorek EEG dat od 83 dětí ve věku od 5 do 6 let, a to v oblasti kognitivního zrání. Autorka se konkrétně věnovala vztahu mezi silou amplitudy mu a alfa rytmu a inteligencí u předškoláků. Podařilo se jí prokázat, že vysoká amplituda u obou rytmů v průběhu kognitivního zpracování koreluje s inteligencí naměřenou v Kaufmanově inteligenčním testu. Další zajímavou studií přinesl Lo (et al., 2013), který se také věnuje vývoji inhibiční kontroly u předškoláků ve věku od pěti do šesti let. Zjistil, že mezi pětiletými a šestiletými dětmi existuje rozdíl, který nemůže být vysvětlen komponentou N2. Rozdíl dle autora reflektuje zvyšování frontální bety v průběhu maturace mozku. Zdá se tedy, že věková kohorta by měla být zvolena velice pečlivě s ohledem na zvolené úlohy a vývojové rozdíly mezi dětmi. Studiím o zmíněném vizuospaciálním zpracování bude

věnována kapitola následující. Nyní se podíváme na specifika EEG signálu u předškoláků obecně.

### *Alfa rytmus*

U mladších předškolních dětí ve věku kolem tří let je typický základní posteriorní rytmus alfa, přičemž její amplituda dosahuje širšího rozmezí než u dospělých nebo adolescentů. Misra a Kalita (2009) uvádí, že alfa aktivita může dosáhnout amplitudy až na 100  $\mu$ V, přičemž amplituda je vyšší v nedominantní hemisféře. Běžné pásmo alfy pak autoři definují okolo 8 Hz v posteriorních částech temenního laloku a pásmem 1,5–4,0 Hz v temporálním laloku. Pro děti od 6 do 12 let je pak typicky postupný nárůst základního posteriorního rytmu až na 11 Hz, přičemž dívky vykazují rychlejší maturaci než chlapci (Misra & Kalita, 2009; Eisermann et al., 2012)

### *Beta rytmus*

Beta pásmo (13,5–25 Hz) lze podle známé studie Ogawi (et al., 1989) dělit na tři oddělená frekvenční pásma. Autoři studii realizovali na 1340 zdravých dětech ve věku od 3 do 12 let a podařilo se jim identifikovat betu-1 (13,5–17,4 Hz), betu-2 (17,5–21,4) a betu-3 (21,5–25 Hz). Síla (power) bety-1 a bety-2 se u probandů postupně zvyšovala spolu s maturací, beta-3 tuto tendenci neměla. Niedermeyer a Lopes da Silva (1999) uvádí, že beta rytmus je přítomný zejména v centrální a frontální oblasti. Kritickým obdobím pro vývoj beta pásma v různých oblastech mozku byl definován následovně: kolem čtvrtého roku života ve frontálních oblastech. Centrální oblasti pak kolem roku desátého a od 3 do 7 let pro betu v okcipitálním laloku. Na těchto frekvencích lze vidět, že rozdíl oproti stanovení pomalé a rychlé bety u dospělých, jak jej uvádí Rangaswamy (et al., 2002) (viz předchozí kapitola), není příliš podstatný, což ilustrujeme v tabulce č. 2.

*Tabulka 2 Srovnání beta pásem u předškoláků a u dospělých (Ogawi, 1989; Rangaswamy et al., 2002).*

	<b>Pomalá beta</b>	<b>Beta</b>	<b>Rychlá beta</b>
<b>Předškoláci</b>	13,5 – 17,4 Hz	17,5 – 21,4 Hz	21,5 – 25 Hz
<b>Dospělí</b>	12,5 – 16 Hz	16,5 – 20 Hz	20,5 – 28 Hz



Nicméně to odpovídá zjištění Rangaswamy (tamtéž), že s přibývajícím věkem se nižší frekvence ještě snižují a ty vysoké ještě zvyšují. Matoušek a Petersen (1973) pozorovali pokles absolutní i relativní síly (power) v delta a théta pásmu a zároveň zvýšení síly v alfa a beta pásmu. Barrigo-Paulino, Flores a Gómez (2011) považují tento frekvenční posun za jeden z nejtypičtějších znaků zrání mozku pozorovatelným pomocí EEG.

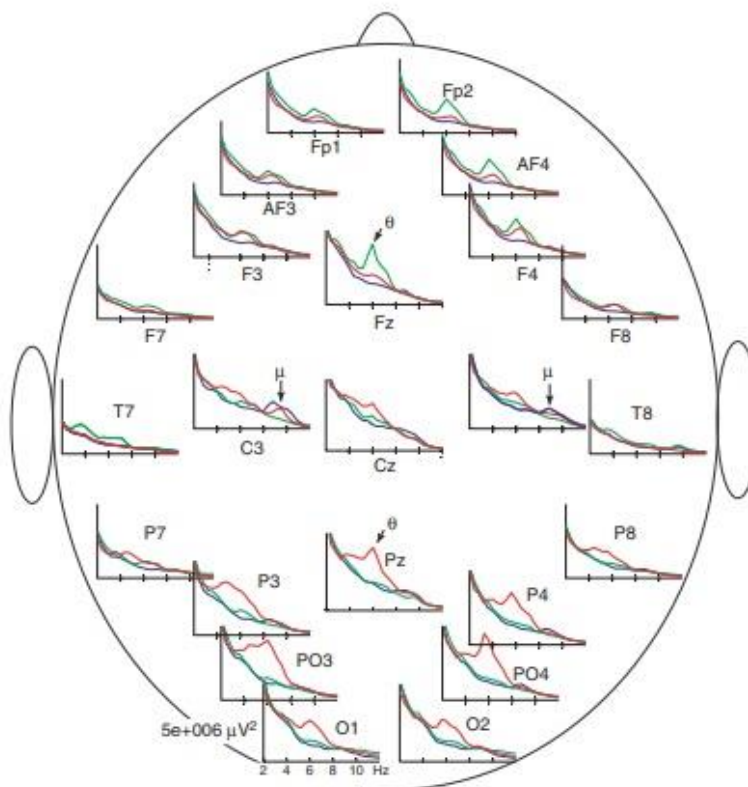
### *Delta rytmus*

V prvních dvou letech života představuje hlavní mozkový rytmus, v kontrastu pak připomeňme, že u dospělých lidí jsou delta vlny za bdělého stavu patologické (Barrigo-Paulino, Flores a Gómez, 2011) a fyziologicky se vyskytují pouze během hlubokého spánku (Myslivoček, 2009).

### *Théta rytmus*

Théta rytmus je pozorován zejména v dětství a s přibývajícím věkem se její výskyt snižuje. V batolecím věku bývá spojena s pozitivním afektem, dokonce bývá aktivita okolo 4 až 6 Hz označována (Orekhova et al., 2006) jako „hedonický rytmus“ a obecně je spojována s jak pozitivními, tak i negativními emocemi, jak u dětí, tak i u dospělých. Zároveň i pro předškoláky platí výskyt théta rytmu během kognitivních procesů.

Orekhova (tamtéž) uvádí, že u předškolních dětí během manipulace s objekty nebo pozornosti vůči sociálním stimulům dochází k prominentnímu zvýšení spektrální síly (power) oproti naměřené baseline. Autorka uvádí, že jde o frekvenci 4 až 7,6 Hz s distinktivními špičkami okolo 6 Hz, což si můžeme prohlédnout na obrázku číslo 16. Vidíme zde, že během manipulace s hračkami se síla (power) zvýšila v oblastech frontálního a temporálního laloku, přičemž během pozornosti vůči řeči dospělého během sociální interakce se síla zvýšila v posteriorních oblastech.



Obrázek 16 Grand average power spektra u předškolních dětí. Modrá křivka je vizuální pozornost (baseline); zelená křivka je objevování nové hračky a červená křivka reprezentuje pozornost vůči sociální stimulaci (In Orekhova et al., 2006).

### Gamma rytmus

Gamma rytmus má frekvenci okolo 30 až 80 Hz a stejně jako u dospělých bývá i u dětí, ale dokonce i u zvířat, spojován s kognitivními funkcemi (Benasich et al., 2008). Benasich (tamtéž) uvádí, že vysokofrekvenční aktivita u lidí i zvířat je obecně spojovaná s vyššími kognitivními funkcemi. U dětí pak autor pozoroval korelaci mezi vyšší silou (power) frontální gammy a nadprůměrnými jazykovými a kognitivními schopnostmi. Zároveň byla pozorována lepší úroveň inhibiční kontroly a zralejší mechanismus přepínání pozornosti.

## 4. Vybrané metody analýzy EEG dat, evokované potenciály

Porozumění základním neurálním procesům, které zajišťují vyšší kognitivní funkce a operace, je stěžejním cílem kognitivní vědy. Nervová aktivita lidského mozku se objevuje již mezi 17. a 23. týdnem lidského života. Tato aktivita řídí celé lidské tělo a můžeme se nejspíše pouze domnívat, zda zmapování těchto mechanismů vedlo výzkumníky k hledání vhodné techniky. Elektroencefalografie (EEG) je neinvazivní a relativně levná metoda pro posuzování neurofyziologických funkcí. EEG měří elektrickou aktivitu velké, synchronně pálicí populace neuronů pomocí elektrod, jež se nejčastěji umísťují na pokožku hlavy probanda. Mnoho výzkumníků využívá experimentální design metody evokovaných potenciálů, kdy při velkém počtu opakování určitého experimentálního stimulu získáváme informace o specifické aktivitě mozku, ta se poté společně průměruje a získaná data umožňují experimentátorovi zkoumat aktivitu mozku s milisekundovou přesností (Light et al., 2010).

Luck (2014) uvádí, že evokované potenciály jsou přímé odpovědi mozku na sensorickou, kognitivní nebo motorickou událost. Z toho pramení i jejich anglický název *event-related potential* (ERP), což lze přeložit jako událost vázané potenciály. Formálně jde o techniku, kde se zaznamenává elektrofyziologická odpověď mozku na experimentální podnět, a to pomocí elektroencefalografu. Jakýmsi pionýrem této techniky byl Richard Caton (1842–1926), který vypožoroval, že pokud umístíme elektrody na dvě různá místa hlavy, prochází jimi slabé elektrické proudy. Toto tvrzení můžeme považovat za určitý zrod elektroencefalografu, ačkoli ten byl vyvinut až později (1929) německým psychiatrem Hansem Bergerem (Sur, Sinha, 2009). Představme si nyní základní typy ERP, ty u lidí můžeme dělit do tří kategorií: časné, střední a pozdní. Časné komponenty dosahují vrcholu amplitudy během prvních 100 milisekund po prezentaci stimulu. Někdy bývají označovány jako *sensorické* nebo *exogenní* (Sur, Sinha, 2009). Tyto komponenty jsou z velké části závislé na fyzické podobě stimulu. Oproti tomu pozdější komponenty bývají označovány jako *kognitivní* nebo *endogenní*, jelikož reflektují mozkovou aktivitu jedince, který stimul evaluuje. Nyní se podíváme na některé konkrétní vlny, ty jsou označovány podle latence a amplitudy. Polich (1989) uvádí, že významný rozdíl mezi těmito vlnami u dětí a dospělých je zejména v délce latence u sensorických a kognitivních stimulů, přičemž spolu s postupujícím věkem se délka latence snižuje. Opačně je to pak s amplitudou křivky, která

narůstá s přibývajícím věkem probanda. Tato zjištění pak platí především pro vlny N1, P2, N2 a P3.

#### N100 nebo N1

V neurovědách tak označujeme relativně velkou vlnu s negativní deflekcí, která dosahuje vrcholu amplitudy mezi 90 a 200 milisekundami po nástupu stimulu. Podle Wanga (et al., 2008) ji můžeme pozorovat zejména ve fronto-centrální oblasti. Maximální amplitudy dosahuje na Cz elektrodě a je proto také někdy označována jako vertexový potenciál (Sur, Sinha, 2009). Na parietálních elektrodách jde o **komponentu specificky citlivou na prezentaci nesymbolické matematiky a číselného zpracování**, která dosahuje vrcholu okolo 150 ms po prezentaci stimulu (např. Dehaene, 1996; Templová, Posner, 1998). Nicméně dle Hydea a Spelke (2012) jde o komponentu, jež koreluje pouze s nízkými počty objektů v množině (1 až 5). V souvislosti s touto komponentou existuje tzv. paradigma filtrace (Luck et al., 2000), které tvrdí, že se komponenta vyskytuje v případě, kdy proband filtruje vizuální stimul od přebytečných informací.

#### P200 nebo P2

Jde o vlnu s pozitivní deflekcí dosahující vrcholu amplitudy okolo 100 až 200 ms po prezentaci stimulu. Podle Sura a Sinhy (2009) existuje evidence, že je tato vlna spojena s fenoménem sensation seeking. Jde o osobnostní rys, kdy jedinec vyhledává nové nebo intenzivní zkušenosti a prožitky, a to i za cenu rizika (Zuckerman, 2009).

#### P2p

Opět jde o komponentu **citlivou na nesymbolické matematické zpracování** (např. Dehaene, 1996; Templová and Posner, 1998; Libertus et al., 2007; Hyde and Spelke, 2009), která se na parietálních elektrodách objevuje 200 ms až 450 ms po prezentaci stimulu. V minulosti byla spojována (např. Gebuis and Reynvoet, 2013) s vizuálním zpracováním, nicméně moderní studie (např. Gouet, et al., 2018) toto tvrzení vyvrací a naopak uvádí, že změny v amplitudě P2p reflektují důležité aspekty numerického zpracování. Někdy je ji obtížné oddělit (Soltész, Szucs, 2014) od komponenty P2, nicméně vodítkem může být vrchol amplitudy (v  $\mu\text{V}$ ) a čas, P2p bývá u pětiletých dětí zhruba 400 ms po prezentaci stimulu (Templová, Posner, 1998).

## N200 nebo N2

Jde opět o vlny s negativní deflekcí, dosahující vrcholu amplitudy okolo 200 ms po prezentaci stimulu. Primárně se objevuje v anteriorních oblastech skalpu. Můžeme rozlišovat několik podskupin této vlny:

### N2a / Mismatch negativity (MMN)

Jde o negativní komponentu, která se objevuje ve chvíli, kdy dochází ve stimulu ke změně pozadí auditivní stimulace (Sur, Sinha, 2009). Jde tedy o automatickou mozkovou aktivitu, která zpracovává změnu stimulu.

### N2b

Podle Sur a Sinhy (2009) jde o vlnu s pozdější latencí, než je tomu u N2a, která se objevuje v případě, když se mění fyzické aspekty stimulu a tyto změny jsou relevantní ve vztahu k úloze.

### N2c

Tato vlna se vyskytuje frontálně nebo centrálně během klasifikačních úloh.

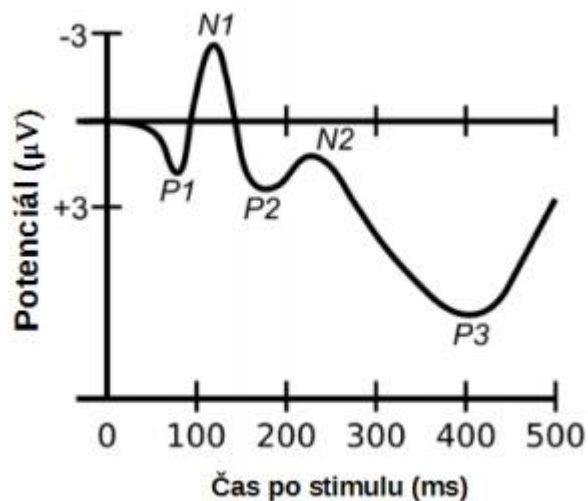
Komponenta N200 se obecně váže k inhibiční kontrole exekutivního procesu (Heil et al., 2000).

## N300

Tato křivka se podle Sur a Sinhy (tamtéž) pojí se sémantickou. Autor dokonce spojuje odlišnosti v této křivce u zdravých a dyslektických dětí s určitým diagnostickým potenciálem.

## P300 nebo P3

Tato vlna byla objevena v roce 1965 Suttrenom a kolegy a jde o jednu z významných komponent na poli výzkumu ERP. Prohlédnout si ji můžeme na obrázku číslo 8. Pro auditivní stimuly dosahuje latence pásma mezi 250 a 400 ms, a to u většiny dospělých mezi 20 a 70 lety (Sur, Shindy, 2009). Polich (1989) dokonce uvádí pásma 250 až 500 ms, přičemž kratší latence by podle Sura a Shindy (2009) měla poukazovat na superioritu mentálního zpracování, zároveň vyšší amplitudy dosahují jedinci s lepší pozorností. Lze tak očekávat, že u dětí může jít o pozdní komponentu. Polich (1989) na skupině 50 zdravých dětí ve věku od 4 do 6 let naměřil latenci v rozmezí 250 až 600 ms. Jde o vlnu, která se pojí s tvorbou úsudku. Existuje celá řada výzkumných paradigmat, která se používají k elicitaci této vlny. Nejpoužívanější je dle Sura a Shindy (2009) takzvané *oddball* paradigma, kde jsou různé stimuly prezentovány, kde jeden ze stimulů se liší vůči ostatním a je prezentován méně často. Proband je instruován reagovat kupříkladu stiskem klávesy právě na tento podnět a nereagovat na standardní podněty. Podle Patricka (et al., 2006; in Sur, Shindy, 2009) je tato křivka velmi zranitelná při požití drog nebo alkoholu, ale také u antisociálního chování.



Obrázek 17 Ukázka komponenty P300.

## N400

Jde o negativní vlnu, která byla prvně popsána Kutasovou a Hillyardem (1980) v kontextu sémantické inkongruence. Vrcholu amplitudy dosahuje okolo 300 až 600 ms po prezentaci stimulu. N400 se nepřímo týká očekávání daného slova, které má dokončit větu. Kutasová a

Federmeier (2000) v pozdějším článku uvádějí, že typicky lze tuto aktivitu pozorovat zejména v oblasti centro-parietální kůry.

## P600

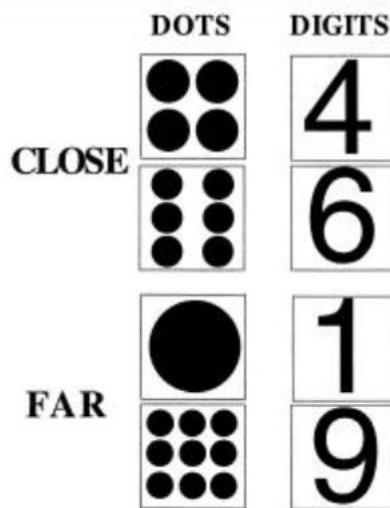
Stejně jako u N400 jde o vlnu spojovanou se zpracováním jazyka. P600 se objevuje ve chvíli, kdy člověk slyší nebo čte gramatickou chybu nebo syntaktickou anomálii. Přesněji pak dochází k elicitaci ve chvíli, kdy věta buď obsahuje syntaktickou chybu, má nevhodnou syntaktickou strukturu nebo je syntaktická struktura věty složitá (Osterhout and Holcomb, 1992; in Sur, Shindy, 2009). P600 je vlna s pozitivní deflekcí a vrcholu amplitudy dosahuje okolo 500 ms.

## Pozdní posteriorní komponenty

Objevují se zejména v centroparietální oblasti zhruba 600 až 640 ms po prezentaci stimulu u dospělých (Soltész, Szucs, 2014). Opět jsou citlivé na numerické zpracování. Konkrétně se vyskytují, je-li numerická vzdálenost mezi množinami objektů větší rozdíl.

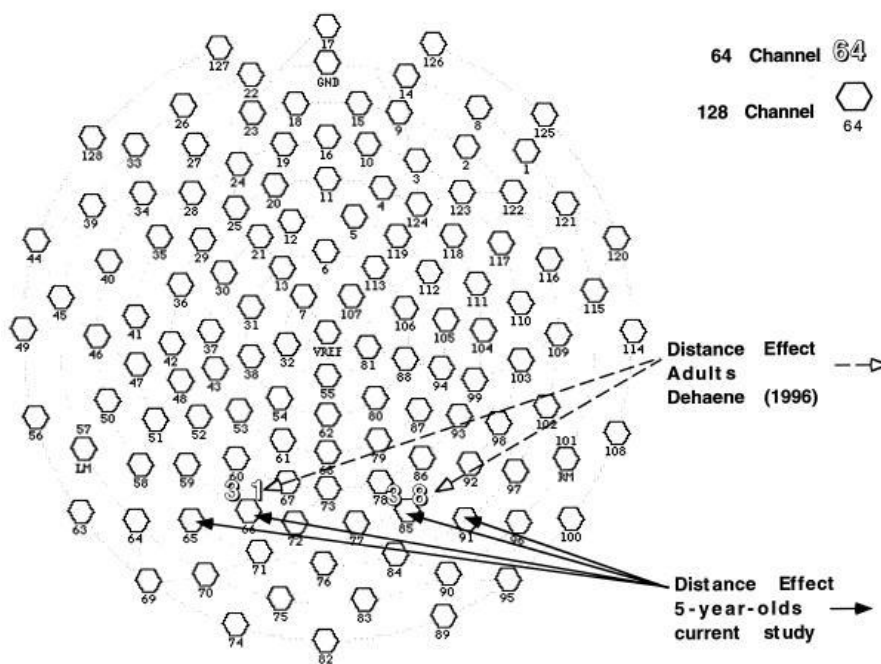
### 4. 1 EEG studie u předškolních dětí

Významným přínosem je práce Templové a Posnera (1998) na dvaatřiceti (n=13) pětiletých dětech (mean 5.4 let). Autoři provedli studii za použití elektroencefalografie (128 elektrod). Použité úlohy si můžeme prohlédnout na obrázku č. 18. Děti byly dotazovány, zda jsou prezentované množiny teček nebo arabské číslice větší nebo menší než číslo 5. Celkem bylo 160 trialů, každá obtížnost po dvaceti úlohách. Celkem však bylo zařazeno 129 epoch. Zbytek byl vyřazen pro velké množství artefaktu.



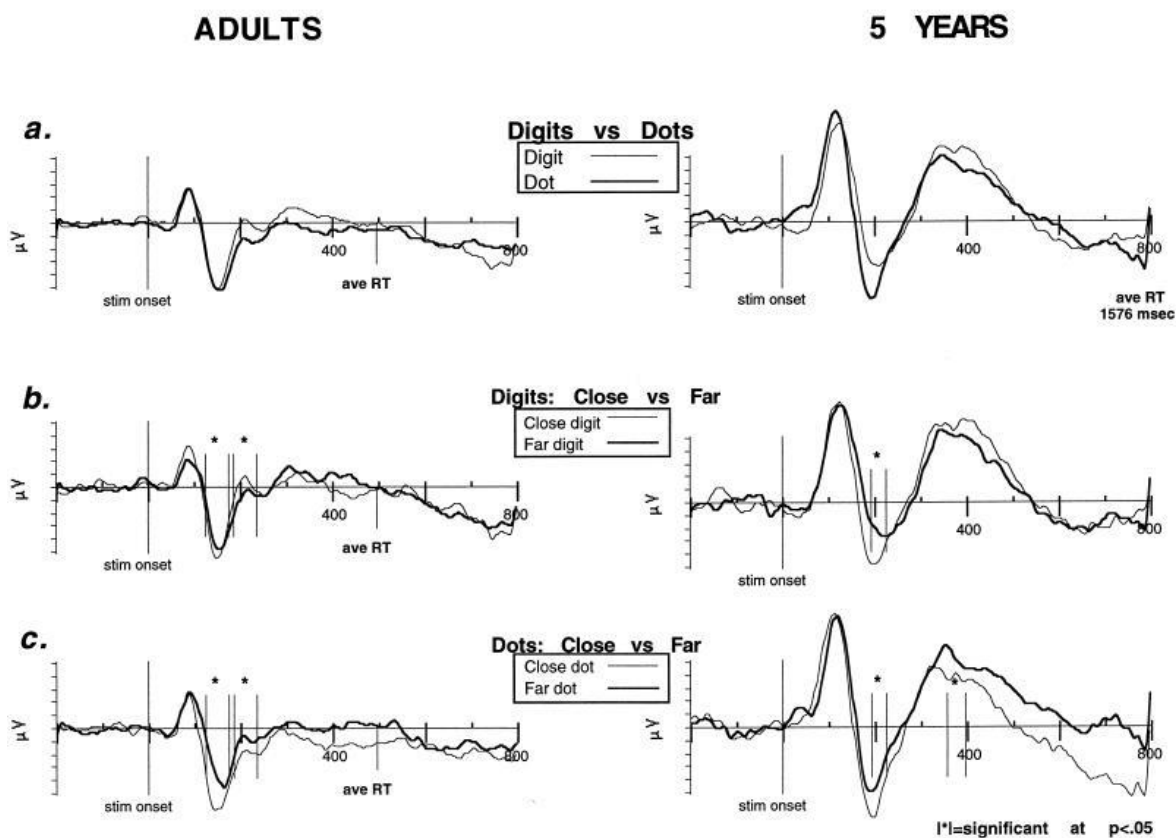
Obrázek 18 Ukazka úlohy (In Templová, Posner, 1998).

Výsledky ukázaly, že reakční čas u úloh, které byly blízko číslu pět, byl podstatně delší ( $p < 0.0001$ ) než u úloh, které byly vzdálené (1,665 ms ku 1,495 ms). U ERP výsledků (viz obrázek č. 21) pak je potřeba brát na zřetel zvolené elektrody (viz obrázek č. 19), na kterých byla zvolena analýza (v našem zařízení pak jde o elektrody P3 a P4). EEG data v oblasti c) (jde pouze o úlohy s množinami teček) ukazují signifikanci ( $p < 0.05$ ) komponent P1 (124 ms po prezentaci stimulu) N1 (194–224 ms po prezentaci stimulu) a P2p (412 ms po prezentaci stimulu).



Obrázek 19 Elektrody (In Templová, Postner, 1998).



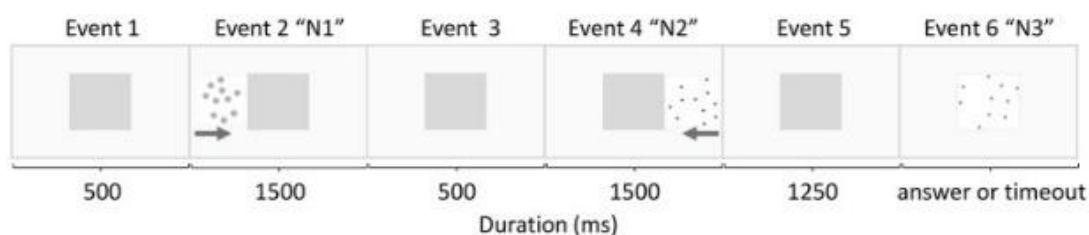


Obrázek 20 Získané ERP u dospělých (vlevo) a dětí (In Templová, Posner, 1998).

Z moderních studií se hodí zmínit práce Hydea a Spelke (2012) a dále potom Goueta (et al., 2018). Hyde a Spelke (2012) věnovali rozsáhlou studii lokalizaci neurální aktivity během nesymbolického zpracování čísla. Pro naši práci je důležitá lokalizace komponenty P2p (200–250 ms po prezentaci stimulu) u dospělých primárně vpravo.

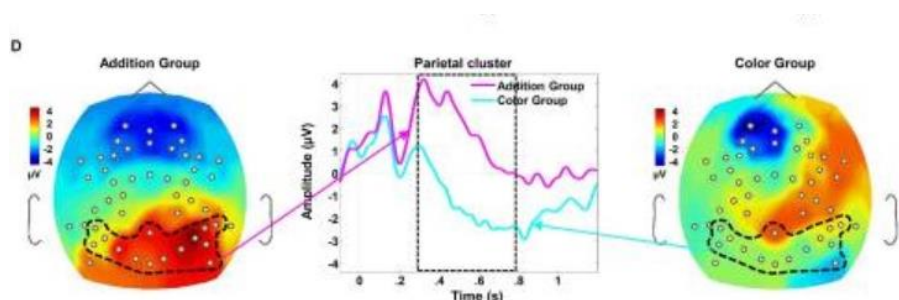
Gouetova (et al., 2018) studie se věnuje kognitivnímu a neurálnímu efektu krátkého aproximálního aritmetického tréninku (AAT). Výzkumné úlohy (viz obrázek č. 21) spočívaly v tom, že děti měly říct, zda součet teček v N1 a N2 je větší nebo menší než skupina teček v N3. Autoři (tamtéž) děti rozdělili do tří skupin a prezentovali jim totožné úlohy s jinou mírou barevné saturace stimulů. První dvě skupiny měly předchozí AAT (celkem 7 sezení), přičemž kontrolní neměla žádný.

Do výsledné EEG analýzy bylo zařazeno 21 dětí (n=21, mean 6.03 let) s běžnou mírou barevné saturace a 14 (n=14, mean 6.05 let) dětí s vysokou mírou saturace a třicet dětí (n=33, mean 6.06 let) v kontrolní skupině.



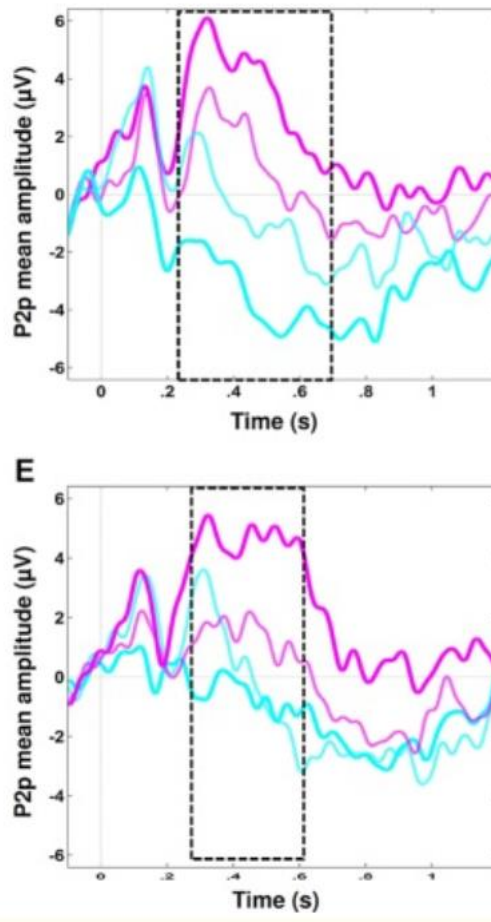
Obrázek 21 Ukazka stimulu (In Gouet, et al., 2018).

Zároveň u dětí byly naměřeny standardizované matematické testy zaměřené na aritmetiku a také test verbální inteligenci (slovník). Autoři (tamtéž) zjišťovali změny na komponentách N1 a P2p, které jsou citlivé na nesymbolickou numerickou operaci. Obě skupiny s předchozím tréninkem dosáhly stejných výsledky, ale u kontrolní skupiny signifikantně ( $p=0.002$ ) narostla pozitivní amplituda u P2p. Zároveň nárůst v amplitudě P2p pozitivně koreloval ( $p < 0.05$ ) se zlepšením v matematicky zaměřených behaviorálních testech. Na obrázku č. 22 (omlouváme se za špatnou grafickou úroveň, autoři poskytli obrázek v nízkém rozlišení) vidíme rozdíl signifikantní ( $p < 0.001$ ) v P2p mezi skupinou bez tréninku (vlevo) a oběma skupinami s tréninkem (obě úrovně barevné saturace).



Obrázek 22 Komponenta P2p. Modře skupina s AAT tréninkem, fialově bez tréninku (In Gouet. 2018).

Na obrázku č. 23 pak vidíme komponentu N1 a P2p, kde je modrou barvou zobrazena skupina s předchozím aproximální aritmetickým tréninkem a fialovou skupina bez tréninku.

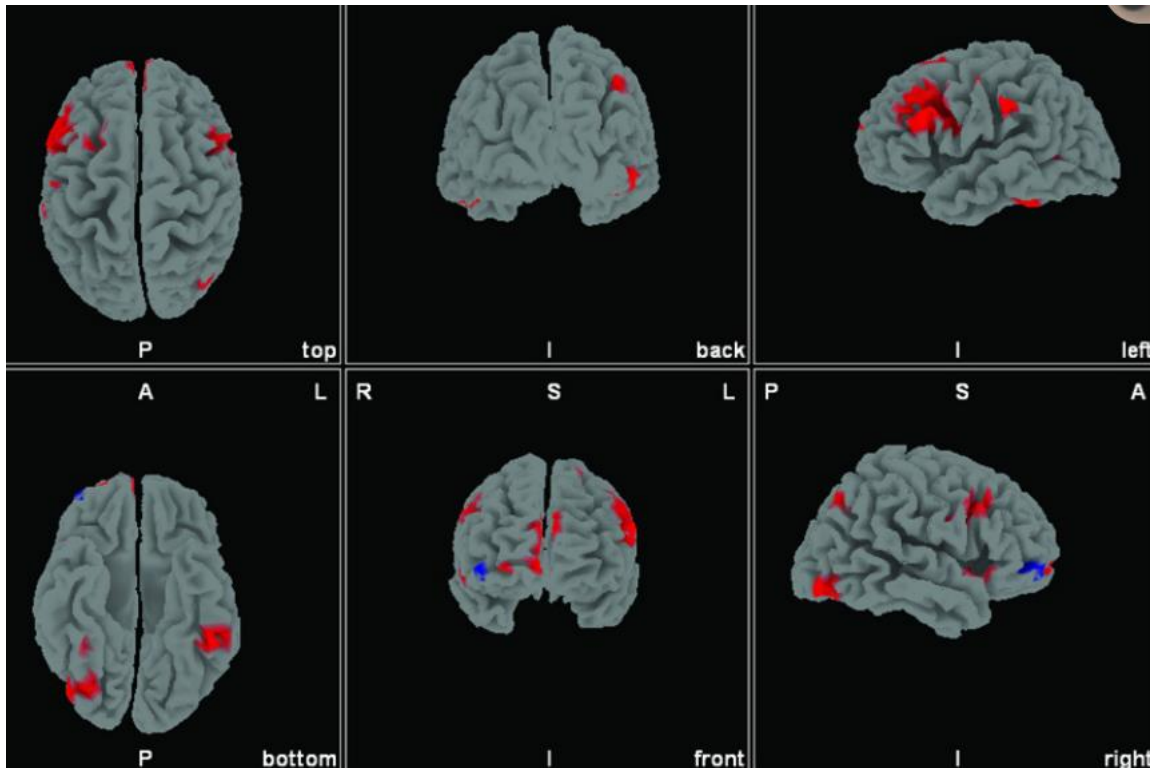


Obrázek 23 Komponenta P2p. Modře skupina s AAT tréninkem, fialově bez tréninku (In Gouet. 2018).

Z hlediska neuroanatomické lokalizace je stěžejní práce Hydea (et al., 2010) na 18 kojencích (n=18), která ukazuje, že z hlediska ontologického vývoje je aktivace IPS při reprezentaci nesymbolického vyjádření čísla prvně vpravo a až posléze se stává bilaterální.

Cantlonová (et al., 2006) na osmi čtyřletých (mean 4.75 let) dětech (n=8) a dvanácti dospělých (n=12) pomocí funkční magnetické rezonance porovnávala aktivitu dětí a dospělých během nesymbolického číselného zpracování. Autoři specificky zařadili předškolní děti, aby viděli aktivitu IPS před tím, než by ji mohlo modulovat formální vzdělávání. Výsledky ukázaly dle autorů až zarážející podobnost aktivace parietálního kortexu u dětí i dospělých. Rozdíl pak představovala větší pravostranná aktivace (586 versus 112 voxelů) u dospělých.

Hyde a Spelke (2014) našli u komponenty P2p aktivaci ve fronto-temporální oblasti u dospělých. Podobnou aktivaci našla i Cantlonová (et al., 2006) u dětí, ale pouze pravostranně (viz obrázek č. 24 vlevo, P).



Obrázek 24 Aktivní části fronto-temporálního kortexu (In Cantlonová et al., 2006).

## 5. Vývoj vizuospaciálního (vizuoprostorové) zpracování u dětí

Pod pojmem vizuospaciální zpracování se skrývá celá varieta nejrůznějších schopností a dovedností, a to od schopnosti sledovat pohybující se objekt až po schopnost chápat, analyzovat a pamatovat si vizuospaciální vztahy mezi objekty a zároveň s objekty mentálně manipulovat. Vizospaciální zpracování zároveň tvoří fundamentální aspekt lidské kognice (Stilesová, Paulová, Arková, 2008).

Neuropsychologické studie (např. Van Essen, Anderson, and Felleman, 1992; Ungerleider, Mishkin, 1982; Kravitz, Saleem, Baker and Mishkin, 2011) vizuospaciálního systému identifikovaly množství propojených vizuálních oblastí v posteriorním kortexu. Tyto oblasti zajišťují určité části zpracování. Pro naši práci jsou stěžejní oblasti dorsálního a ventrálního proudu, poté oblasti zpracovávající barvu a poté kortikální i subkortikální struktury zajišťující vizuální zpracování.

Kortikální vizuální systém může být funkčně i anatomicky rozdělen právě na dorzální a ventrální proud (Stilesová, Paulová, Arková, 2008). Dorzální proud zprostředkovává prostorové zpracování spojené s pozorností pro pohyb a lokalizaci objektu. Ventrální proud je poté primárně zapojen do zpracování o podobě objektu (např. barva objektu, jeho textura) (Ungerleider, Mishkin, 1982). Milner a Goodale (1995) přisoudili ventrálnímu proudu schopnost rozpoznat sledovaný objekt a dorzálnímu řízení vizuomotorické aktivity. Norman (2002) pak navrhl velmi podobný model, který si můžeme prohlédnout v tabulce č. 3.

Co se týče neuroanatomie, pak dorzální proud začíná v sítnici, odkud se přes nukleus genikulat laterale (LGN) v thalamu dostává do oblasti primární zrakové kůry v oblasti V1 v okcipitálním laloku. Následně se tok informací posouvá do oblasti V2 a V3 a dorzálně do mediálních (V5) a mediálně superiorních oblastí temporálního laloku. Poté proud pokračuje do ventrálního inferio-parietálního laloku. Vizuální input v dorzálním proudu pochází zejména z velkých M sítnicových (retinálních) ganglionových buněk, které vysílají signál do magnoceulárních buněk v LGN a poté do vrstvy 4C alfa v oblasti V1 (Stilesová, Paulová, Arková, 2008; Šikl, 2012).

Ventrální proud je významně propojen s mediálním temporálním lalokem (kde se nachází dlouhodobá paměť) a limbickým systémem. Začíná též na sítnici a pokračuje do LGN v thalamu, kde z parvoceulárních buněk pokračuje do oblasti V1. Poté pokračuje do oblasti vizuálního kortexu V2 a V4. Z těchto oblastí pak informace proudí do inferiorních oblastí temporálního laloku. Vizuální input pochází zejména z P buněk v retině

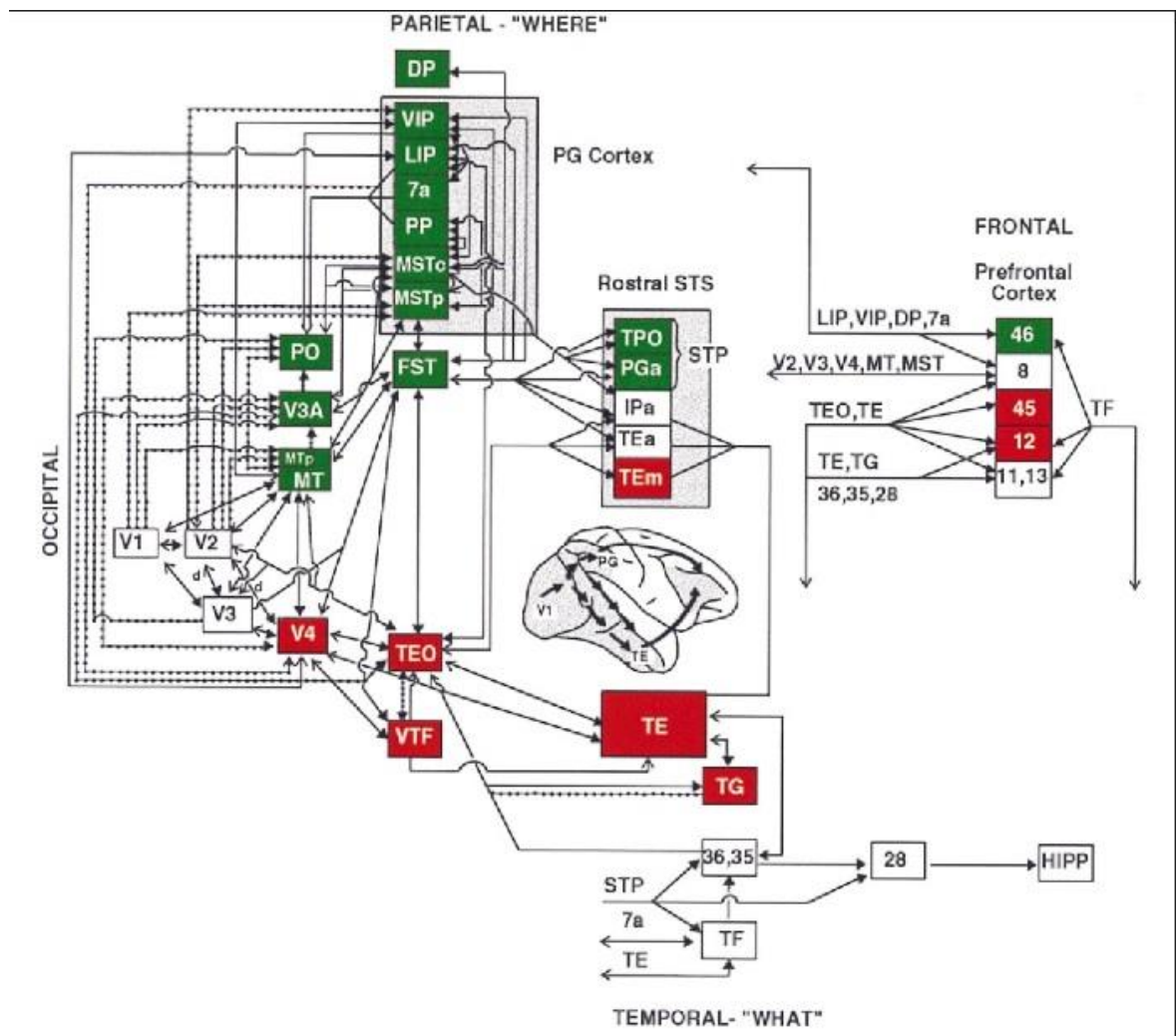
a následně parvocelulárních buněk LGN v thalamu, proud pak pokračuje do vrstvy 4C beta v oblasti vizuálního kortexu V (tamtéž).

Tabulka 3 Dvousystémový model zrakového zpracování (Norman, 2002).

<b>Faktor</b>	<b>Ventrální proud</b>	<b>Dorzální proud</b>
<i>Funkce</i>	Rekognice/identifikace	Zrakově vedené chování
<i>Senzitivita</i>	Vysoké spaciální frekvence - detaily	Vysoké temporální frekvence - pohyb
<i>Paměť</i>	Mentální reprezentace ukládané do dlouhodobé paměti	Krátkodobá paměť
<i>Rychlost</i>	Relativně pomalá	Relativně rychlá
<i>Úroveň vědomí</i>	Typicky vysoká	Typicky nízká
<i>Frame of reference</i>	Alocentrický nebo zaměřený na objekt	Egocentrický nebo zaměřený na pozorovatele
<i>Vizuální input</i>	Fovea centralis	Celá retina
<i>Monokulární vidění</i>	Relativně nízký efekt	Často velmi výrazný efekt, kupříkladu paralaxa

Jak dorzální, tak i ventrální proud vede rostrálně (od spodního konce míchy doslova k nosu) do hlavních i přilehlých oblastí prefrontálního kortexu. Existuje množství evidence dokazující, že oba proudy se částečně překrývají, a to jak u zralého vizuálního systému, tak u dětí (např. Thiele, Dobkins and Albright, 2001; Dobkins and Anderson, 2002; Stilesová, Paulová, Arková, 2008). Nicméně neuroanatomické dělení vizuoprostorového zpracování na ventrální a dorzální proud poskytuje relativně výhodné organizační schéma. Ungerlieder (1995) navrhl model vizuospeciálního zpracování u opic, který si můžeme prohlédnout na obrázku č. 25, kde nepřerušované čáry indikují spojení z centrálního i periferního vizuálního pole. Tečkované linie představují spojení pouze v periferním poli. Červená pole představují oblasti ventrálního proudu související primárně s vnímáním objektu. Zelená pole představují oblasti dorzálního proudu spojené primárně s prostorovým vnímáním. Bílá pole pak

představují oblasti, jež nejsou primárně spojené s žádným z proudů. Zašedlé oblasti zobrazují rozsah kortexu zapojeného do diagramu.



Obrázek 25 Vizuelní zpracování u opice. Zkratky pak znamenají: DP, dorsální gyrus prelunat; FST, fundus superiorní oblasti; HIPP, hippocampus; LIP, oblast laterálně intraparietální; MSTc, mediální superiorní temporální oblast; MT, oblast středně temporální; MTp, oblast středně temporální, jež zajišťuje reprezentaci periferního vidění; PO, parieto-okcipitální oblast; PP, posteriorní parietální sulkus; STP, superiorní temporální polysenzorická oblast; V1, V2, V3 a V4, oblasti vizuelního kortexu; VIP, ventrální intraparietální oblast 7a; prefrontální oblast 8, 11, 13, 45 a 46; perirhinální oblasti kůry mediálního temporálního laloku 35 a 36; entorhinální oblast kůry 28. Inferiorní temporální oblast TEO a TE, parahipokampální oblast TF, temporální oblast TG a inferiorní parietální oblast PG. Rostální superiorní temporální sulkus STS a VTF představuje vizuelně responsivní části parahipokampální oblasti (In Ungerleider, 1995).

## 5.1 Vývoj prostorového (spaciálního) zpracování

Podle Stilsové, Paulové a Arkové (2008) lze mezi celou řadu procesů, jež zajišťuje dorzální proud, distinktivně rozlišit tři hlavní větve, a to (1) prostorová lokalizace, (2) prostorová pozornost a (3) mentální rotace. Ty si nyní jednotlivě představíme.

### 5. 1. 1 Prostorová lokalizace

Jde o vysoce komplexní multimodální proces, na němž se podílí široká škála kortikálních, ale i subkortikálních systémů. Nejvýznamnější je kortikální dorzální proud, ale zapojují se kupříkladu i bazální ganglia, jež jsou spojována s lokalizací odměny. Konkrétně jde o studii Hadj-Bouzianeové, Meuniera a Boussaouda (2003) provedenou na primátech, která navrhuje bazální ganglia jako spojovací článek mezi senzorickými a motorickými informacemi a informacemi o odměně, které jsou nutné pro tzv. *arbitrární mapování*. Pod tímto pojmem hledejme asociaci mezi externí událostí a chováním, které samo o sobě nemá žádný přímý vztah. Příkladem může podle autorů být třeba naučení se zastavit na přechodu, pokud nám jako chodci svítí červená, nebo položit telefon, pokud slyšíme obsazený tón.

Kritickou roli pro vizuální mapování a epizodickou prostorovou paměť hraje hipokampus (Stilesová, Paulová, Arková, 2008). Časné vizuální zpracování je přisuzováno (Haxby et al., 2000; in Stilesová, Paulová, Arková, 2008) oblastem extrastriálního kortexu, konkrétně pak dorzolaterální okcipitální oblasti, sulku calcarinu a mediálním a laterálním oblastem okcipitálního laloku. Parietálnímu laloku připadá proces lokalizace objektu. Bilaterální aktivace může být pozorována v posteriorním superiorním parietálním laloku, ta se protahuje rostálně do intraparietálního sulku. Frontální regiony jsou pak spojovány s prostorovou pracovní pamětí (Stilesová, Paulová, Arková, 2008).

U dětí se schopnost zapamatovat si lokalizaci objektu vyskytuje zhruba kolem čtvrtého roku života a až kolem roku desátého vykazují prostorového kódování objektu jako dospělí. Pomocí pediatrického neurozobrazování, zaměřujícího se na prostorovou pracovní paměť, se podařilo zdokumentovat změny v neurálním substrátu u dětí a dospívajících, které korelují s věkem probanda. Přičemž čím starší děti byly, tím větší aktivace se objevovala v oblastech prefrontální a posteriorní parietální kůry (tamtéž).

### 5. 1. 2 Prostorová pozornost a mentální rotace

Prostorová pozornost souvisí s neurálními systémy, které subjektu umožňují vnímat a pamatovat si lokace různých objektů a střídání zaměření pozornosti mezi těmito objekty. Právě při změně zaměření pozornosti z objektu na jiný objekt děti vykazují, podobně jako dospělí, aktivaci v oblasti parietálního kortexu, nicméně u dětí je tato aktivace více rozptýlená. Podle dostupných dat (např. Arková, Haist a Stilesová in preparation; in Stilesová, Paulová, Arková, 2008) existují důkazy, že v případě mentální rotace jsou i u



desetiletých dětí značné odlišnosti, kdy zhruba polovina dětí není v případě úloh s mentální rotací úspěšná, a dokonce se pomocí funkční magnetické resonance podařilo prokázat, že aktivace jejich mozku neodpovídá aktivaci dětí úspěšných a dospělých. Ve zkratce poté vyplývá, že kupříkladu schopnost mentální rotace je během vývoje protrahovaná a značně individuální. Ačkoli podle výše uvedených autorů existují studie prokazující mentální rotaci i u mladších dětí, pouze polovina z nich vykazovala mozkovou aktivitu, která odpovídá obrazu aktivace u dospělých (tamtéž).

## 5. 2 Vývoj zpracování ve ventrálním proudu, porozumění částem i celku

Jak jsme již uvedli v předchozím textu, hlavní funkce ventrálního proudu spočívá v analýze jednotlivých částí objektu, jejich organizaci a vztahu, které tyto části mají k objektu jako celku. Proto se ventrální proud sestává ze schopnosti rozložit objekt na jednotlivé části (neboli identifikace jednotlivých částí), což můžeme označit jako *lokální úroveň zpracování*, a dále pak ze schopnosti určit, jak jsou tyto jednotlivé části integrovány do objektu jako celku, což můžeme nyní označit jako *globální úroveň zpracování*. Obě tyto schopnosti mají systematické odlišnosti v tom, jak jsou distribuované v mozkových hemisférách, přičemž pravé posteriorní temporální oblasti jsou dominantní pro globální úroveň zpracování a levé posteriorní temporální oblasti pro lokální úroveň zpracování.

## 6. Metodologie výzkumu

V následující kapitole se budeme věnovat metodologii našeho výzkumu, designu experimentu, který byl vytvořen, a výzkumným otázkám a hypotézám, které jsme si stanovili.

### 6.1 Výzkumný problém a cíl experimentu

Naši motivaci věnovat se numerické kognici jsme nastínili již v úvodu této práce, nicméně nyní se podívejme na tvrzení „nemám na matematiku buňky“ trochu pragmaticky.

Ideálně bychom měli pro ověření takového tvrzení použít spíše morfometrii. Vzhledem k našim technickým možnostem jsme tak otázku pozměnili, aby byla měřitelná pomocí elektroencefalografu, a zároveň jsme se pokusili brát zřetel i na problematiku behaviorálního testování u předškolních dětí.

Výsledkem je následující výzkumná otázka: **Je rozdíl mezi neurální aktivitou během aproximálního aritmetického tréninku u předškolních dětí dle jejich výkonu v inteligenčním testu?**

Předškoláky jsme zvolili z důvodu minimalizace vlivu školního vzdělávání. Vzhledem k literatuře (Tempelová, Posner, 1998; Gouet, et al., 2018) se pak soustředíme na výšku amplitudy v  $\mu V$ , jelikož vyplynulo, že existuje spojitost mezi výškou amplitudy při AAT u dospělých a u dětí, kdy dospělí měli nižší amplitudu. Zároveň pak ve studii Goueta (et al., 2018) byl statistický signifikantní rozdíl mezi výškou amplitudy u dětí, které podstoupily AAT trénink, a u dětí, které trénink nepodstoupily. Rozdíl v amplitudě byl zároveň závislý na chybovosti v AAT, kdy děti s předchozím tréninkem měly nižší celkovou aktivaci, amplitudu i chybovost.

Dále se zaměříme na práce Hydea (et al., 2006) a Hydea a Spekle (2012), které naznačují, že existuje rozdíl v lokalizaci a míře neurální aktivity IPS během řešení nesymbolického číselného zpracování v průběhu maturace mozku. Nabízí se k tomu i Tempelová a Posner (1998), kteří našli vyšší amplitudu v pravé hemisféře u dětí oproti dospělým. Stejně tomu tak bylo i u Lussierové a Cantlonové (2017), kteří našli vyšší množství aktivace v levé hemisféře u dospělých oproti dětem.

## 6. 2 Hypotézy

V rámci testování námi zvoleného výzkumného cíle byly stanoveny následující hypotézy:

H1a: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **P2p** na elektrodě P3 u lehkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

H1b: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **P2p** na elektrodě P4 u lehkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

H2a: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **P2p** na elektrodě P3 u středně těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

H2b: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **P2p** na elektrodě P4 u středně těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

H3a: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **P2p** na elektrodě P3 u těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

H3b: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **P2p** na elektrodě P4 u těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

H4a: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **N200** na elektrodě P3 u lehkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

H4b: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **N200** na elektrodě P4 u lehkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

H5a: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **N200** na elektrodě P3 u středně těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

H5b: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **N200** na elektrodě P4 u středně těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

H6a: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **N200** na elektrodě P3 u těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

H6b: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **N200** na elektrodě P4 u těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

H7a: Existuje statisticky významná korelace mezi **reakčním časem** odpovědí u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a náročností AAT úloh.

H7b: Existuje statisticky významná korelace mezi **reakčním časem** odpovědí u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu průměru** a náročností AAT úloh.

H7c: Existuje statisticky významný rozdíl mezi **reakčním časem** odpovědí mezi dětmi skórujícími v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a v **pásmu průměru** ve všech úlohách.

### 6.3 Výběr vzorku a sběr dat

Experiment byl rozdělen na dvě části, první částí byla přípravná **pilotáž**. Tu jsme provedli pouze na 4 dětech ( $n=4$ ) ve věku od 4 do 6 let (mean 5,45 let), a to z důvodu velké obtížnosti najít předškolní děti do experimentu a minimalizaci odpadu dat při potřebě změny designu. Pomocí pilotáže vyšlo najevo, že v původním experimentu Parka a Brannonové (2014) byly obtížnosti na dospělých lidech pro děti příliš obtížné (log 1.5 až 1.1). Proto jsme přidali další středně obtížné a lehké úlohy (až k logu 2.4). Data z pilotáže pro absenci středně těžkých a lehkých úloh musela být vyřazena.

Nyní si představíme způsob výběru vzorku. Ten byl totožný pro pilotáž i samotný experiment.

Pomocí veřejně dostupných informací<sup>2</sup> o všech mateřských školách, které se nacházejí na území města České Budějovice, byl vytvořen seznam 59 mateřských škol. Pořadí mateřských školek bylo následně randomizováno a posléze byly mateřské školy oslovovány podle nového pořadí, a to ve třech vlnách po čtyřech školách. Školky byly oslovovány standardizovaným způsobem, který obsahoval zaslání úvodního e-mailu se základními informacemi a žádostí o možnost rozdat rodičům připravené informační letáky a následně samotné rozdávání informačních letáků rodičům. Z oslovených školek v seznamu nás odmítla pouze Waldorfská škola České Budějovice – mateřská škola, základní škola a střední škola o. p. s., jinak nám ředitelé a ředitelky mateřských škol vycházeli vstříc.

Důvodem zvoleného postupu, kdy jsme neoslovili všechny mateřské školy najednou, byly technické možnosti Neuropsychologické laboratoře Jihočeské univerzity, která disponuje omezeným počtem elektrodových svazků. Je tedy možno měřit v jeden okamžik pouze jednoho probanda a zároveň byla potřeba přihlédnout k volnému měřicímu času v laboratoři, kde měří i další členové katedry Pedagogiky a psychologie Jihočeské univerzity a její studenti a studentky.

Samotné měření probíhalo od roku 2016 do roku 2018. Do experimentu bylo celkově zařazeno 29 dětí ( **$n=29$** ), bohužel však z důvodu velkého množství svalových artefaktů bylo celkem 8 záznamů vyřazeno a další 4 signály ze sondy nešly z důvodu odlišných podmínek obtížnosti použít. Do analýzy pak šla data ze 17 dětí ( $n=17$ ), kde bylo 10 chlapců a 7 dívek a průměrný věk byl 5,86 let (**mean 5,86 let**). Do výzkumu byly zařazeny děti ve věkovém rozpětí 5 až 6,5 let. Všechny děti byly zdravé, rodiče vyvrátili jakoukoli psychologickou

---

<sup>2</sup> Seznam mateřských škol na území města České Budějovice [online]. Dostupné online <http://www.seznamskol.eu/typ/materska-skola/?kraj=jihocesky&okres=ceske-budejovice> [Cit. 16.5.2018].

poruchu, včetně poruch pozornosti nebo učení. Sledovány byly i oční vady a v případě její přítomnosti měly děti během měření brýle. Měření probíhalo ve dvou sezeních, při prvním byl snímán Stanford-Binetův inteligenční test a ve druhém probíhalo EEG měření. Zvoleno tak bylo, aby děti nebyly příliš unavené. V Stanford-Binetově inteligenčním testu následně došlo k rozdělení do skupin podle získaného IQ pásma. Skupiny jsme rozdělili na děti s výsledky v pásmu nadprůměru (G) a děti v pásmu průměru (N). Uvádíme pouze děti zařazené do další EEG analýzy. Děti tak byly zpravidla rozděleny podle pouze jedné směrodatné odchylky.

*Tabulka 4 Rozdělení probandů do skupin podle pásma výsledky S-B testu.*

<b>Skupina a číslo subjektu</b>	<b>G (S1)</b>	<b>G (S2)</b>	<b>G (S3)</b>	<b>N (S4)</b>	<b>N (S5)</b>	<b>N (S6)</b>	<b>N (S7)</b>	<b>N (S8)</b>	<b>N (S9)</b>
<b>IQ pásmo</b>	120-130	120-130	120-130	90-100	110-120	90-100	110-120	90-100	90-100
<b>Skupina a číslo subjektu</b>	<b>N (S10)</b>	<b>G (S11)</b>	<b>G (S12)</b>	<b>N (S13)</b>	<b>N (S14)</b>	<b>G (S15)</b>	<b>G (S16)</b>	<b>G (S17)</b>	
<b>IQ pásmo</b>	110-120	120-130	120-130	110-120	110-120	120-130	120-130	120-130	

#### 6. 4 Etické ošetření

Vzhledem k faktu, že jsme ve výzkumu pracovali s předškolními dětmi, cítili jsme morální povinnost se vyvarovat situacím, které by děti nebo jejich rodiče mohly jakkoli poškodit. Všem jsme poskytovali konkrétní a pravdivé informace o povaze a cílech experimentu. Tyto informace byly sumarizovány na informovaném souhlasu, který rodiče dostali před zahájením vzájemné spolupráce. Dále jsme dbali na možné poškození dítěte při sdělování výsledku inteligenčního testu rodičům, z tohoto důvodu jsme se rozhodli nesdělovat naměřený inteligenční kvocient, ale pouze inteligenční pásmo. Brali jsme samozřejmě ohled na celou problematiku testování u předškolních dětí, do které jsme zasvěcovali i rodiče. Ti byli poučeni o tom, že měření je pouze orientační a je potřeba přihlídnout k míře spolupráce

dítěte s experimentátorem, aktuálnímu rozpoložení dítěte, jeho případné ostýchavosti nebo strachu.

Získaná EEG data jsme rodičům neinterpretovali vůbec, a to z důvodu, že k této interpretaci jsou oprávněni pouze lékaři s příslušným vzděláním a akreditací. Informace byly poskytnuty pouze k tomu, jak si dítě vedlo na základně správných a špatných odpovědí při řešení.

Během experimentu bylo dětem poskytnuto občerstvení a byly zařazovány časté pauzy. Dítě bylo vždy během pauzy dotazováno, jak se cítí a nebyl na něj vyvíjen tlak, aby pokračovalo. Tlak jsme vnímali jako nepřijatelný, tudíž jsme ho nahradili kombinací vnější a vnitřní motivace, kdy dítěti byla za účast v experimentu slíbena odměna a zároveň byly do samotného designu experimentu komplementovány pochvaly a povzbuzování.

## 7. Design experimentu

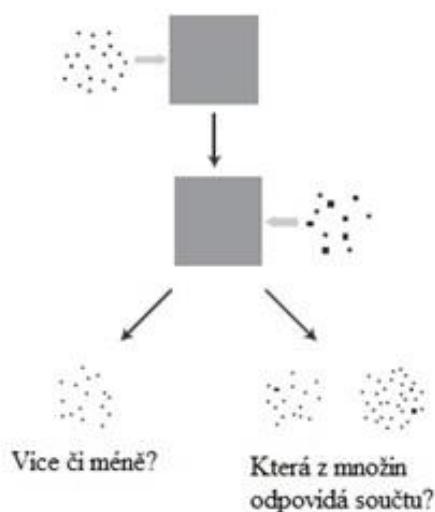
Níže uvedený design EEG experimentu byl vytvořen na předloze výzkumných úloh Parka a Brannonové (2014). Autoři byli kontaktováni a dotázáni na další podrobnosti, s jejich svolením jsme pak jejich úlohy převzali a přetransformovali do podoby vhodné pro EEG experiment. Původní podobu obrázku si můžeme prohlédnout na obrázcích číslo 26 a 27. V jisté obměně ale můžeme tento druh úloh najít v dalších studiích (např. Mazzocco, Feigenson, & Halberda, 2011a; Mazzocco, Feigenson, & Halberda, 2011b; DeWind & Brannonová, 2012; Plassová, 2017). Dále jsme poté použili Stanford-Binetův inteligenční test vhodný pro předškoláky, který bude popsán v podkapitole 8.2.

### 7.1 Tvorba EEG experimentu

V námi předkládané práci z metodologických důvodů používáme pouze typ úlohy, ve které je probandovi prezentovaná pouze jedna množina, v níž jsou bílé a černé tečky (viz obrázek č. 26, dolní část). Ačkoli jsme si v teoretické části naší práce zpochybnili schopnost konzervace počtu až u školně zralých dětí, což by tedy nemělo bránit použití úloh z obrázku číslo 27, pak jsme však chtěli minimalizovat vliv prostorové pracovní paměti a přizpůsobit naše úlohy co nejvíce těm, které měly podobný design pro porovnání (viz celá kapitola číslo 1). Dalším důvodem byl pak vliv prostorové architektury úlohy na EEG signál, konkrétně pak na větší výskyt artefaktů díky očním pohybům. Prezentujeme-li totiž na monitoru počítače dvě různé množiny (např. vpravo bílé tečky a vlevo černé) a po probandovi chceme, aby určil, kterých teček je víc, pak musí hýbat očima zleva doprava (popř. zprava doleva), aby si obě množiny prohlédl. Tyto typy očních pohybů představují množství svalových artefaktů, kdy úloha umístěna do středu obrazovky představuje mnohem výhodnější prostorový design – tedy pro zvolený druh neurozobrazovací metody.



### (A) Aproximální aritmetika



Obrázek 26 Podoba úlohy pro testování aproximální aritmetiky (Park, Brannonová, 2014)

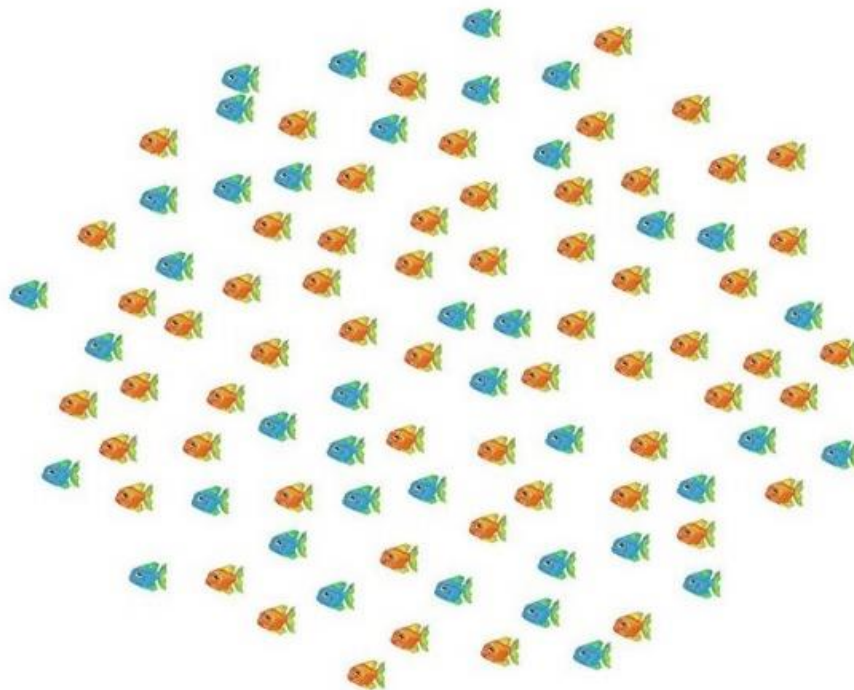
### Aproximální porovnávání počtu



Obrázek 27 Podoba úlohy pro aproximální porovnávání počtu (Park, Brannonová, 2014).

Samotný popis experimentu jsme publikovali v našem článku z roku 2017. Dovolíme si ho tedy v následujících řádcích parafrázovat s aktualizacemi, jež během uplynulé doby proběhly. Výzkumné úlohy jsme původně naprogramovali v programu Presentation, nicméně pro následné zvolení více podmínek došlo k přepsání v programu **OpenSesame 3,1**, který je přímo určen pro testování v oblasti neurověd a psychologie (Mathôt, Schreij &

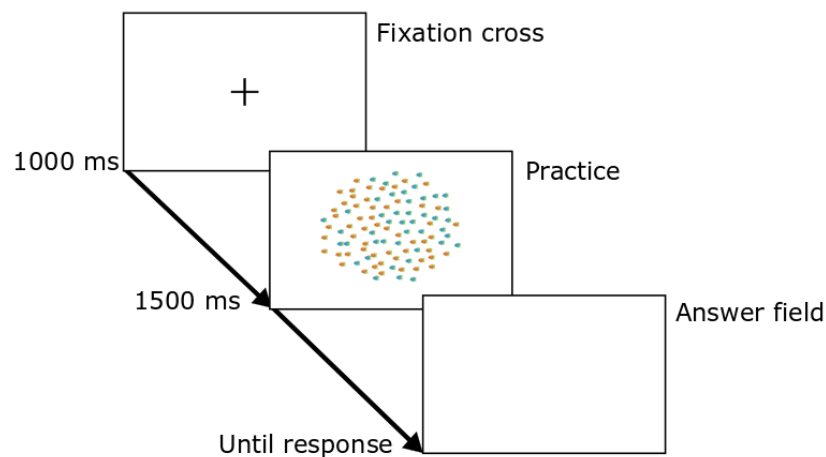
Theeuwes, 2012). Prvně se podíváme na prostorovou architekturu námi vytvořených úloh. Výše zmíněným očním pohybům se snažíme předejít rozdělením plochy pomocí středového kříže. V programu **Matlab** jsme vytvořili generátor, jenž generuje randomizované množiny rybek. Ačkoli je celkový počet rybek konstantní, generátor zajišťuje, aby se počet modrých a oranžových rybek průběžně měnil dle zvolené obtížnosti a aby se lišilo umístění rybek v prostoru. K rozmístění rybiček na ploše používáme Fibonacciho grid, přičemž jsme plochu podle tohoto gridu rozdělili na 100 pozic, ze kterých generátor randomizovaně vybírá pozice a ty obsazuje stovkou objektů, které se liší barvou. Velikost i počet ryb je konstantní. Konkrétní podobu našich vizuálních stimulů ilustrujeme na obrázku č. 28. Jedná se o dětský motiv, který jsme vytvořili specificky podle našich potřeb. Autorkou všech kreseb je známá ilustrátorka bc. Lenka Šimečková. Barva ryb byla zvolena zcela náhodně, rozhodli jsme se ale použít tmavé barvy na světlém podkladě, což by nemělo mít podstatný vliv na odhad (Anobile, Cicchini, & Burr, 2016). Šlo nám zejména o dobrou rozlišitelnost ryb, což by v případě světlých barev mohlo způsobovat dětem potíže.



Obrázek 28 Ilustrace výzkumné úlohy pro logaritmus obtížnost 1.5.

Úlohy dětem prezentujeme jako hru s podmořskou tematikou. Za pomoci našich kolegů z amatérského divadla jsme namluvili celé sekvence, kde se hovoří o králi Tritonovi a magické rybářské síti, do které mohou děti chytat rybky jedné barvy. Děti jsou zaúkolovány nachytat co nejvíce rybek, za které jim král Triton daruje kouzelnou mapu k pokladu. Cílem pohádky je v dětech navodit zájem a motivaci k řešení úloh.

Samotná podoba úlohy je ilustrována na obrázku číslo 29. Na úvod je dětem umožněn zácvik, kdy není snímán EEG záznam. V zácviku mají děti vybrat, která množina ryb je početnější, stejně jako je tomu u experimentálních úloh, nicméně jsme pro potřebu zácviku zvolili menší počet ryb (1 až 6). Děti jsou následně informovány, že v dalším kroku bude v množinách objektů více. Po zácviku dochází k prezentaci středového kříže na černém poli po dobu 1000 ms, následuje vizuální stimul, který je prezentován po dobu 1500 ms, a následně pak černá obrazovka, kdy dítě mačká tlačítko. Tlačítka jsme pomocí polepů pro snadnější orientaci překryli oranžovou a modrou barvou.



Obrázek 29 Časová posloupnost experimentu.

V původní práci Parka a Brannonové (2014) na studentech vysoké školy se vyskytovalo pouze pět úrovní obtížnosti úlohy. Obtížnost vycházela v poměru jednotlivých objektů v množinách, kterou lze vyjádřit pomocí logaritmu. Kupříkladu při logaritmu 1.1 se množiny liší pouze o dva prvky, tj. je kupříkladu 51 oranžových rybek a 49 modrých. Park a Brannonová používali obtížnost od logaritmus 1.5 po logaritmus 1.1. V našem případě jsme

byli nuceni, jak jsme již zmínili, obtížnost přizpůsobit předškolákům. Měříme tak obtížnost od logaritmu 2.4 (respektive 2.5) až po logaritmus 1.1.

Důvodem bylo zajistit vysokou úspěšnost a zabránit zkreslení výsledků měření náhodnými typy. Tomu jsme se zároveň rozhodli pomoci vytvořením následujícího mechanismu. Po vyřešení každých deseti úloh počítač přepočítává, jak si dítě vede, a podle toho mění obtížnost úlohy, tj. při úspěšnosti dítěte > 60% se obtížnost zvyšuje, při úspěšnosti < 50% se snižuje a v rozmezí 51-59% se udržuje aktuální obtížnost. Z toho vyplývá, že pokud si dítě nevede dobře již při první obtížnosti úloh (log. 2.4), pak je mu ještě umožněno zkusit lehčí obtížnost (log. 2.5), pokud však nezvládne ani tuto obtížnost, pak je systémem vyřazeno. Stejně tak tomu je, pokud dítě více než dvakrát po sobě opakuje tu samou obtížnost. Po splnění deseti úloh nastala krátká pauza, kterou vyplňovala motivační pochvala. Po splnění pěti bloků (5x10 úloh) následovala delší pauza, kdy mělo dítě prostor k občerstvení, protáhnutí nebo k dotazům. Experimentátor měl během pauzy možnost přegelovat zašuměné elektrody a zkontrolovat stav dítěte. Dítě bylo během měření z důvodu eliminace vnějších podnětů v počítačové kukani. Jde o prostor s dětskou židlí a monitorem počítače, který probanda dveřmi odděluje od prostoru zbytku laboratoře. Dětskou židli jsme zakoupili specificky pro naše potřeby, aby předškoláci měli vhodnou pozici u monitoru počítače (zhruba 50 cm od obrazovky). Měřící místnost byla vždy před samotným měřením vyvětrána. Následně byla okna zavřena, abychom eliminovali rušivé vlivy okolí.

## 7.2 Stanford-Binetův inteligenční test

Stanford-Binetův inteligenční test je s oblibou používán u předškolních dětí a dětí mladšího školního věku. Námi používaná čtvrtá revize testu byla standardizována na více než 100 dětech pro každou věkovou kohortu a byly vytvořeny statistické normy pro děti od 2 do 14 let. Pro naše potřeby používáme zkrácenou formu testu, kdy by měření nemělo přesáhnout 60 minut. Tato zkrácená forma se skládá ze subtestů *Slovník*, kdy se testuje počet obecných slov a testuje verbální inteligenci dítěte. V tomto subtestu dítě dostává za úkol kupříkladu pojmenovat obrázky, definovat slova nebo identifikovat tzv. absurdní obrázky (příkladem je obrázek polévky, kterou si osoba lžící lije na hlavu místo do pusy). Dále testujeme abstraktně-vizuální myšlení pomocí *Analýzy vzorů*, kdy je dítě instruováno, aby vkládalo geometrické tvary do desky. Dále testujeme kvantitativní myšlení pomocí *Počtů*. Zde po dítěti chceme, aby doplňovalo číselné řady nebo řešilo základní početní úlohy. Konečně pak testujeme krátkodobou paměť pomocí subtestu *Paměť na korálky*. Dítěti jsou na krátký čas

prezentovány obrazce z korálek různé barvy, které má následně reprodukovat (Svoboda, Krejčířová, Vágnerová, 2001).

Samotné měření probíhalo v deponátní knihovně katedry Pedagogiky a psychologie PF JCU. Místo jsme zvolili cíleně, protože je příjemné, jsou v něm velká okna směřující do přilehlého parku a pohodlná sedací souprava, prostor je vzdušný a relativně neformální. Testy byly administrovány v dopoledních hodinách bez přítomnosti rodičů dítěte. Dítě opět sedělo na dětské ortopedické židli, aby mu byl zajištěn potřebný komfort, a místnost byla vždy před testováním znovu vyvětraná. Zaznamenávány byly i klinické údaje o aktuálním stavu dítěte, jeho rozpoložení, míře spolupráce, případné ostýchavosti, neukázněnosti a celkovém dojmu z měření.

Zajímavou testovou komponentu pro nás představovaly práce Vernona (1983) a dalších (např. Sheppardová, Vernon, 2008; Der, Deary, 2017), které poukazují na silný vliv reakčního času a obecně rychlosti kognitivního zpracování jakožto určitých moderátorů obecné inteligence. Přesněji pak byly měřeny reakční časy u Wechslerova testu inteligence, Ravenových maticí a dalších. Bohužel se nám nepodařilo časy s dostatečnou reliabilitou měřit, což přikládáme nedostatku předchozí zkušenosti s měřením inteligence u dětí. V prezentovaných výsledcích však vyhodnocujeme reakční časy u aproximálních aritmetických úloh.

### 7.3 Použitý EEG přístroj

V Neuropsychologické laboratoři Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích disponujeme 64-kanálovým ActiveTwo EEG od firmy Biosemi. Jde o multikanálové zařízení umožňující snímat biologické potenciály ve vysokém rozlišení a jde o jeden z prvních komerčně dostupných přístrojů nabízející aktivní elektrody. Použité aktivní elektrody jsou tzv. „pin-type“. Jde o typ elektrody, která se zasouvá do elektrodové čepice, kterou má proband na hlavě. Špice elektrod jsou speciálně upraveny pomocí použitých materiálů (Ag-AgCl), aby co nejvíce zamezovaly zašumění signálu. Vodivost mezi skalpem hlavy a elektrodou je podpořena pomocí elektrovedivého gelu, který se pomocí speciální stříkačky aplikuje do kanálů elektrodové čepice, do kterého se následně vkládá elektroda. Pro naše účely jsme použili dětské elektrodové čepice o velikosti od 48 do 45 cm. Tyto čepice a elektrody byly po každém měření pečlivě čištěny. Zvolený elektrovedivý gel je hypoalergenní a dětem bylo po skončení umožněno si umýt vlasy hypoalergenním

šampónem. Též se hodí zmínit, že rodiče dětí byli instruováni, aby v předvečer měření dětem nemyli vlasy, aby bylo dosaženo co nejlepší vodivosti.

## 8. Předzpracování (preprocessing) EEG dat a epochování

V první řadě chceme v úvodu této kapitoly upozornit na problém, který při zpracování EEG dat vyvstává, a tím je jistá subjektivita preprocessingu, zejména pak v případě manuálního čištění *raw* (nezpracovaného) signálu. Z naší osobní zkušenosti vyplývá, že na některých českých pracovištích (např. Národní ústav duševního zdraví v Klecanech), věnujících se zpracování EEG signálu, existují tendence data čistit automaticky, a to pomocí vhodných nástrojů (kupříkladu Artifact Subspace Reconstruction). Domníváme se, že důvodem je především obrovská časová náročnost na manuální čištění často mnohahodinových signálů a pak již zmíněná problematika subjektivity manuálního čištění. Podobné myšlenky uvádí i Luck (2014), který přímo manuální čištění nedoporučuje z důvodu obrovské časové náročnosti a subjektivitě. Autor doporučuje vyhledat kvalitní automatický algoritmus pro čištění *raw* dat. Jistou výjimku připouští u kojenců, dětí nebo těžce sehnatelných skupin respondentů, kde je z důvodu nižší udržitelnosti probanda nižší počet opakování (tzv. *trials*). Luck (tamtéž) však doporučuje, aby byl ten, kdo signál vizuálně čistí, neseznámen se skupinami a podmínkami experimentu, aby nedocházelo ke zkreslení.

V naší práci jsme se rozhodli vzhledem k povaze našich dat použít kombinaci obou postupů, tj. čistíme data manuálně a zároveň používáme Artifact Subspace Reconstruction (ASR), který následně vizuálně kontrolujeme. Nyní si představme jednotlivé kroky zpracování. Dle Cohena (2014) můžeme rozlišit čtyři fáze práce s EEG daty. První fáze obsahuje následující kroky: import dat, rereferenci, filtraci, epochování, baselinu, trial rejection a interpolaci. V druhé fázi odstraňujeme špatné nezávislé komponenty, ve třetí pak přicházejí na řadu v našem případě evokované potenciály a v poslední fázi pak tvorba statistik a plotů.

### 8.1 Zpracování EEG dat první fáze

Náš postup s *raw* daty byl následující – import dat, manuální čištění od artefaktů, downsampling, rereference, channel location (BESA), highpass, lowpass, ASR, ICA, MARA a následně epochy. Tento postup je zvolen dle doporučení Cohena (2014) a oproti Luckovi (2014) se liší zejména v době, kdy jsou data rereferencovaná. Cohen (tamtéž) doporučuje rereferenci ještě před epochováním a Luck (tamtéž) až po epochování.

### 8. 1. 1 Formát EEG dat a software

Data měřená na EEG Biosemi se zapisují v \*bdf formátu, ve kterém jsme s nimi i nadále pracovali. Samotné zpracování probíhalo v programu Matlab. Matlab je interaktivní programové prostředí a skriptovací jazyk čtvrté generace. Konkrétně byla využita verze R2017a. Do Matlabu následně byl nainstalován volně přístupný toolbox EEGlab, který umožňuje zpracování EEG dat do podoby námi zvolených evokovaných potenciálů.

### 8. 1. 2 Downsampling

Naměřená data jsou zaznamenávána při vzorkovací frekvenci 2048 Hz, znamená to tedy, že za jednu vteřinu přístroj zaznamená mozkovou aktivitu probanda 2048x. Tato vzorkovací frekvence má sice vysokou kvalitu digitálního signálu, nicméně má ale také vyšší paměťové nároky na použitou výpočetní techniku. Z tohoto důvodu jsme vycházeli z Nyquistova teorému (Krajča, Mohylová, 2011), kde  $f_s$  je vzorkovací frekvence a  $f_{max}$  je maximální hodnota frekvence obsažené v signálu.

$$f_s = 2 \cdot f_{max}$$

Pro naše účely jsme tedy zvolili vzorkovací frekvenci 256 Hz, která nám umožňuje analyzovat frekvence obsažené v signálu do 128 Hz.

### 8. 1. 3 Filtrace

U našich dat používáme filtraci ve frekvenční oblasti, specificky filtr *highpass* a filtr *lowpass* (česky potom *filtry horní a dolní propustnosti*), konkrétně pak data filtrujeme na 0,1 až 120 Hz. Nastavení highpass na 0,1 Hz doporučuje Luck (2014) specificky u dětí, jelikož část šumu v signálu je způsobena pohybem hlavy nebo těla, které se u dětí vyskytuje častěji než u dospělých probandů. Zároveň pak Luck (2014) uvádí, že filtrace na vyšších úrovních (např. 0.5 až 1 Hz) mohou u úloh náročných na pozornost způsobit výraznou distorzi signálu. Dle Cohena (2014) filtr horní propustnosti nastavený na 0,1 Hz umožňuje odstraňovat pomalé drifty, zejména pak na nenaepochovaných, kontinuálních datech. Podle Lucka



(2014) je potom u highpassu nastaveného na 0,1 Hz nepravděpodobné, aby způsobil distorzi na relativně pozdních komponentách, včetně P300.

Lowpass jsme nastavili na 120 Hz, ačkoli podle Lucka (tamtéž) stačí pro ERP pouze 30 Hz, nicméně autor uvádí, že je možné v případě potřeby udělat ještě jednu filtraci na 30 Hz bez distorze signálu. Zvolili jsme tak širší pásmo, abychom mohli v případě potřeby interpretovat i vyšší frekvence, než je beta.

#### 8. 1. 4 Re-reference a chanel location

Re-referenci jsme dle Lucka (2014) i podle Cohena (2014) nastavili na avagage a v případě chanel location používáme besasferický model (BESA)

#### 8. 1. 5 Čištění artefaktů

Po výše uvedených krocích následovalo manuální i automatické čištění signálu od artefaktů. Artefakty byly zejména biologické povahy (mrknutí, pohyb víček, pohyb, pocení, mluvení). Děti jsme proto požádali, aby se pokusily nehýbat a nemluvit.

Manuální čištění probíhalo v prostředí EEGLab, a to tak, že byl celý záznam vizuálně prohlédnut a detekované artefakty byly manuálně vystříhány, abychom parafrázovali Lucka (2014) – za dobrá data není náhrada a čas strávený eliminací artefaktů je čas, který je později odměněn v samotné analýze. Po manuálním čištění následovalo čištění pomocí nástroje ASR.

#### 8. 2 Epochování a baseline

Před samotným epochováním jsme eventy (události v EEG signálu) rozdělili na správné a špatné odpovědi. Epochovali jsme pouze správné odpovědi, a to tak, že epochy byly vytvořeny separátně pro každou úroveň obtížnosti (2.4 až 1.1) v délce 0.5 až 1 s. Korekci baselinou jsme použili -100 0 ms. Zde jsme nepoužili baselinu z výzkumu Tempelové a Posnera (1998) z důvodu doporučení Lucka (2014), který tvrdí, že u často se měnících vizuálních kognitivních stimulů může být špatně nastavená baselina kontaminovaná prekognicí.

### 8.3 Jitter

V naší práci musíme adresovat problém Neuropsychologické laboratoře Jihočeské univerzity, která nemá změřenou latenci. Nás zajímá jitter dvojího druhu – prvně prodleva mezi tím, kdy je vizuální stimul HDMI kabelem z měřicího počítače přenesen na monitor v měřící kukani a dále pak prodleva v přenosu odpovědi probanda optickým kabelem z EEG do měřicího počítače. Spencer, Abad a Donchin (2000) uvádí, že bez změřeného jitteru a jeho korekce může v různých obtížnostech úlohy dojít k tomu, že se ERP ukazuje pokaždé v jiném čase a zároveň při našem typu analýzy (shlukování obtížností viz kapitola 9) dochází k snižování vrcholu amplitudy.

## 9. Výsledky

V následujícím textu prezentujeme odděleně získané EEG i behaviorální výsledky našeho experimentu.

### 9.1 EEG výsledky

V této podkapitole prezentujeme získané evokované potenciály, které jsme získali v programu EEGLab, který je součástí programu Matlab. Na úvod chceme zdůraznit, že od předškolních probandů bylo možné získat jen omezené množství dat a tím pádem i nízké počty opakování úloh o stejné obtížnosti. Pro vyřazení špatných odpovědí (dítě stisklo tlačítko jiné barvy, než byla početnější skupina objektů na obrazovce), a zejména po vyčištění dat od velkého množství svalových artefaktů, nám zůstaly relativně nízké počty opakování (viz tabulka č. 3). Jde o počet trialů se správnou odpovědí ve stejné obtížnosti úlohy. V tabulce č. 5 vidíme součty těchto odpovědí od všech dětí ve stejné skupině. Děti byly do skupin G a N rozděleny podle výsledků v testu S-B (viz kapitola 9.2)

*Tabulka 5 Tabulka počtu trialů pro každou obtížnost (L24 = úroveň obtížnosti 2.4). Modrou barvou jsou označeni chlapci, černou dívky. Písmeno G označuje děti, které jsou ve skupině s nadprůměrnými S-B výsledky, písmeno N je skupina dětí s výsledky podprůměrnými.*

Subjekt	Skupina	L24	L23	L22	L21	L20	L19	L18
1	G	9	10	10	10	10	10	10
2	G	9	13	9	0	0	0	0
3	G	9	12	9	10	9	10	8
4	N	5	14	0	0	0	0	0
5	N	20	12	32	26	2	0	0
6	N	8	5	17	15	4	0	0
7	N	10	7	18	15	4	0	0
8	N	11	8	8	9	15	14	0
9	N	4	0	0	0	0	0	0
10	N	9	10	10	10	10	10	10
11	G	10	10	10	8	9	10	9
12	G	6	2	6	4	12	6	9

13	N	10	9	10	10	9	10	10
14	N	10	10	9	10	15	10	9
15	G	10	10	9	9	9	9	10
16	G	10	9	10	9	10	10	10
17	G	10	10	9	10	8	10	10

Tabulka 6 Tabulka počtu trialů pro každou obtížnost (L17 = úroveň obtížnosti 1.7). Modrou barvou jsou označeni chlapci, černou dívky. Písmeno G označuje děti, které jsou ve skupině s nadprůměrnými S-B výsledky, písmeno N je skupina dětí s výsledky podprůměrnými.

Subjekt	Skupina	L17	L16	L15	L14	L13	L12	L11
1	G	9	10	9	9	8	23	16
2	G	0	0	0	0	0	0	0
3	G	9	9	10	7	10	10	10
4	N	0	0	0	0	0	0	0
5	N	0	0	0	0	0	0	0
6	N	0	0	0	0	0	0	0
7	N	0	0	0	0	0	0	0
8	N	7	8	30	16	36	0	0
9	N	0	0	0	0	0	0	0
10	N	10	10	10	10	10	10	9
11	G	10	12	8	18	14	15	11
12	G	10	9	7	9	8	6	4
13	N	10	10	10	9	12	33	9
14	N	8	8	7	9	9	14	4
15	G	8	7	8	9	7	9	26
16	G	10	10	9	10	9	9	14
17	G	9	8	9	10	10	8	24

Tabulka 7 Součty trialů pro každou úroveň.

Úroveň obtížnosti	Počet opakování pro děti s nadprůměrnými výsledky v S-B testu	Počet opakování pro děti s podprůměrnými výsledky v S-B testu
2.4	68	51

2.3	72	79
2.2	68	109
2.1	57	99
2.0	56	61
1.9	59	50
1.8	56	45
1.7	56	44
1.6	53	44
1.5	53	64
1.4	66	50
1.3	58	75
1.2	74	63
1.1	100	27

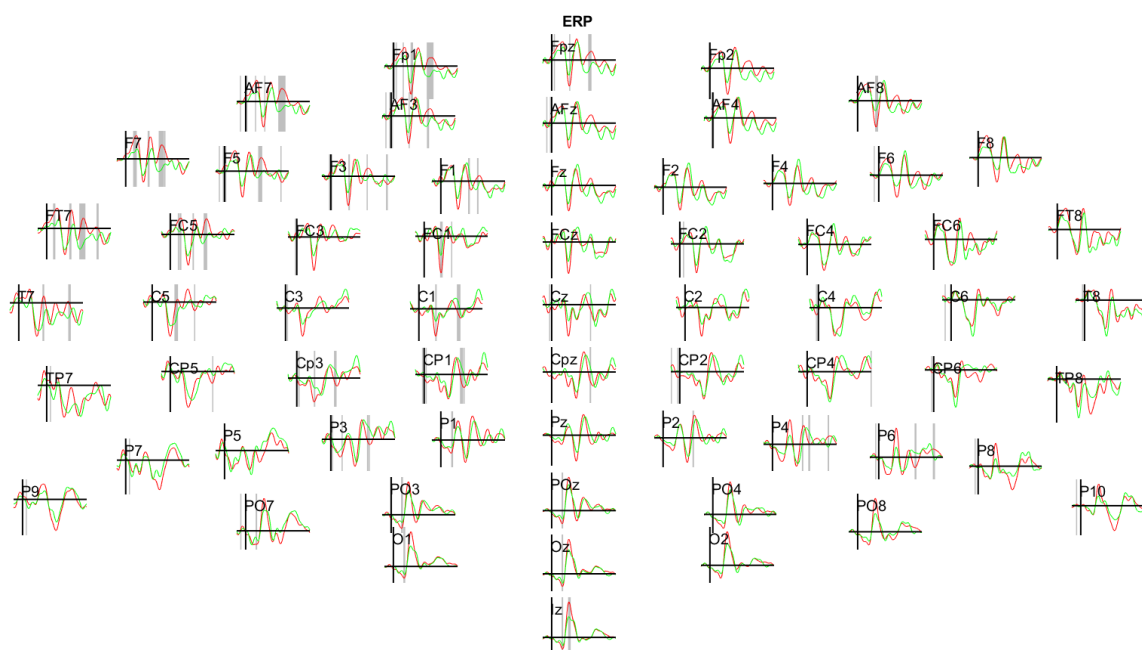
S problémem nízkého počtu opakování jsme se rozhodli pracovat pomocí shlukování obtížností do tří základních úrovní: **lehké**, **středně obtížné** a **obtížné**. Pro lehkou úroveň jsme použili obtížnosti 2.3 až 2.0, pro středně obtížné pak 1.9 až 1.5 a pro těžké 1.4 až 1.1. Úroveň obtížnosti 2.4 jsme vyřadili, jelikož se ukázala jako zácvičná.

V prezentaci výsledků budeme využívat následující postup, který zde pro snazší orientaci popíšeme. V rámci jednotlivých obtížností prvně zobrazujeme ERP z celého skalpu, následně interpretujeme již zmíněné elektrody v parietálních oblastech (zpravidla pak elektrody P3 a P4). Následně u každého shluku obtížnosti přidáváme pro názornost i skalpové topografie v časech sledovaných komponent získaných komponent, opět používáme elektrody z celého skalpu, případně elektrody z parietální a okcipitoparietální oblasti.

### 9. 1. 1 Lehké obtížnosti AAT

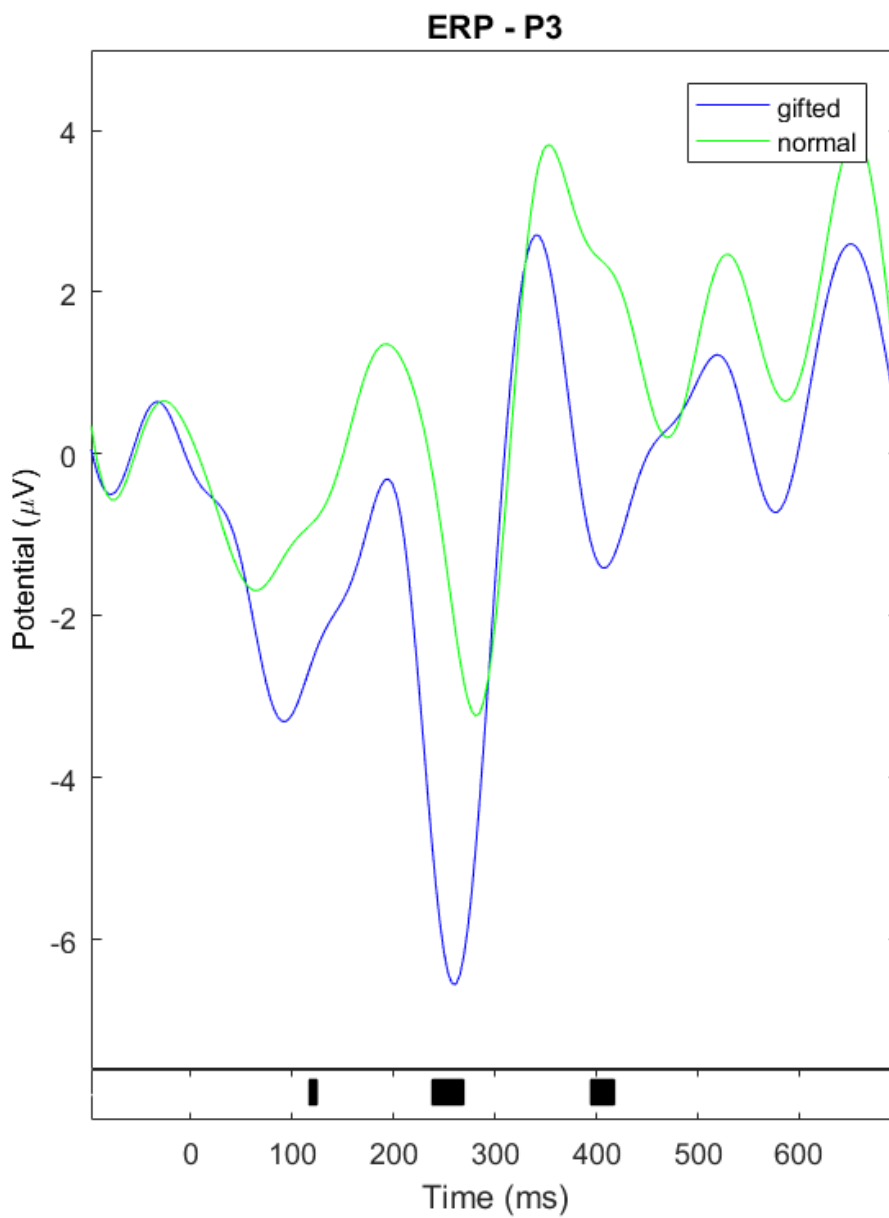
Prvně si na obrázku č. 30 můžeme prohlédnout vizualizaci získanou na 253 trialech od skupiny dětí s nadprůměrnými výsledky v S-B testu (G,  $n=8$ ) a 348 trialech od dětí ze skupiny s podprůměrnými výsledky v S-B testu (N,  $n=7$ ). Vizualizace je získaná ze všech elektrod na hladině významnosti  $p < 0.05$  bez korekce. Vidíme, že v parietálních oblastech se objevuje statistický signifikantní rozdíl mezi skupinami na parietálních elektrodách. **Nejvýrazněji na P3** (zhruba 250 ms po prezentaci stimulu a dále 400 ms po prezentaci stimulu) a **P2** (zhruba 320 ms po prezentaci stimulu). Na **P4** v časech zhruba 320, 400 a 600 ms po prezentaci stimulu. Na elektrodě **P6** zhruba 400 ms po prezentaci stimulu a posléze 600 ms po prezentaci stimulu.

Obrázek 30 Vizualizace lehkých úloh z celého skalpu. Červeně je skupina N a zeleně pak G.

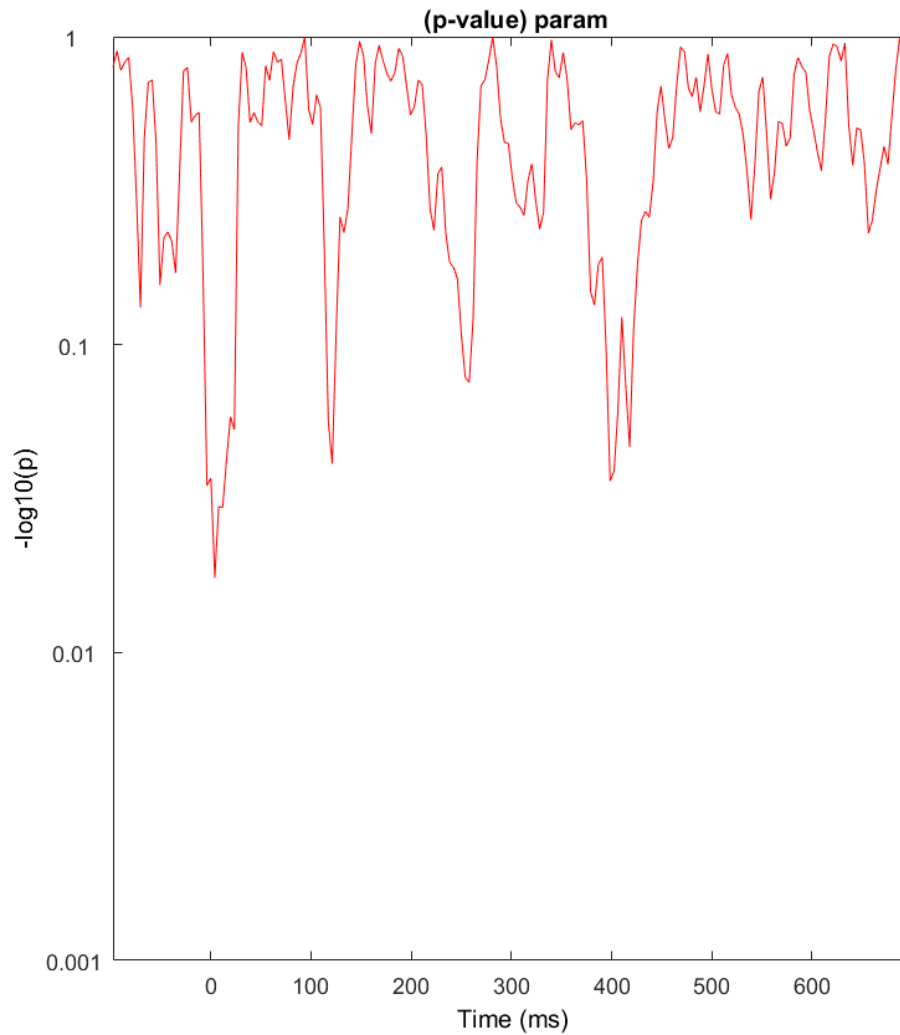


Přehledněji si pak výsledky můžeme prohlédnout v následujících obrázcích na skupině G ( $n=8$ ) a N ( $n=7$ ). Z **elektrody P3** vidíme získané ERP na obrázku číslo 31 a 32. Vidíme signifikantní rozdíl mezi skupin G a N v zhruba 120 ms ( $p < 0.05$ ) po prezentaci stimulu, což odpovídá komponentě **N1**. Dále pak zhruba 250 ms po prezentaci stimulu ( $p < 0.05$ ), což odpovídá komponentě **N2**. A konečně pak 400 ms ( $p < 0.05$ ) po prezentaci stimulu, což odpovídá komponentě **P2p**. U dosažení vrcholu amplitudy komponenty P2p není mezi

skupinou G a N žádný významný časový rozdíl (obě skupiny zhruba 380 ms po prezentaci stimulu).



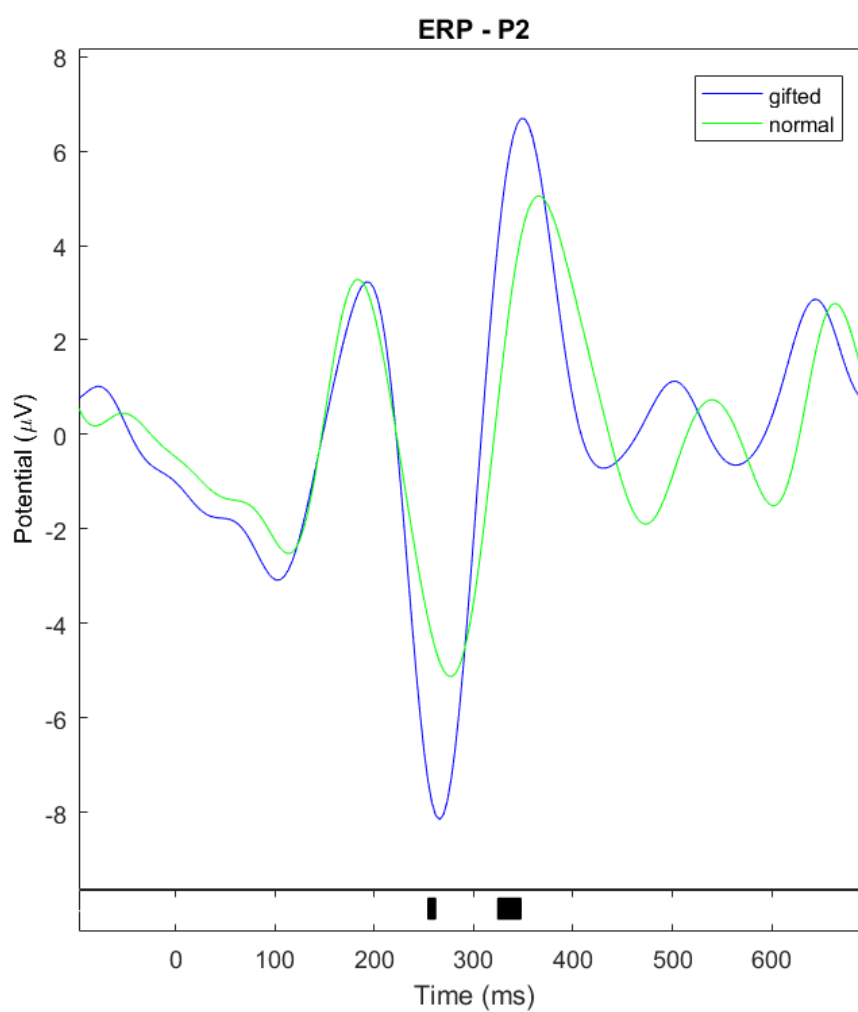
Obrázek 31 Lehká obtížnost úloh, elektroda P3,  $p < 0.05$ . Skupina G modře, skupina N zeleně.



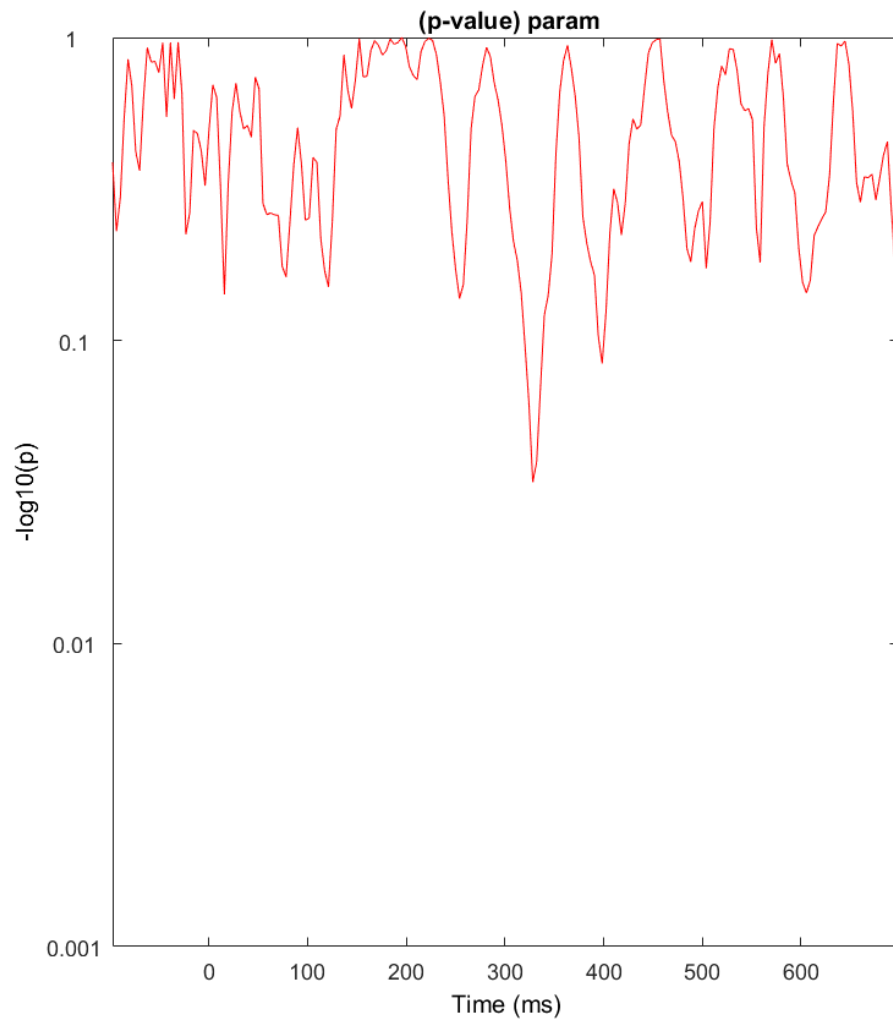
Obrázek 32 Exaktní hodnota  $p$  pro čas -100 700 na elektrodě P3.

Na **elektrodě P2** (viz obrázek č. 33 a 34) vidíme rozdíl mezi skupinami 250 ms ( $p < 0.05$ ) po prezentaci stimulu, což odpovídá **komponentě N2**. Dále potom zhruba 320 ms ( $p < 0.05$ ) po prezentaci stimulu, což odpovídá **komponentě P2p**. U dosažení vrcholu amplitudy komponenty P2p mezi skupinou G (zhruba 320 ms) a N (zhruba 340 ms) můžeme pozorovat nevýznamný časový rozdíl v rozmezí zhruba 20 ms.



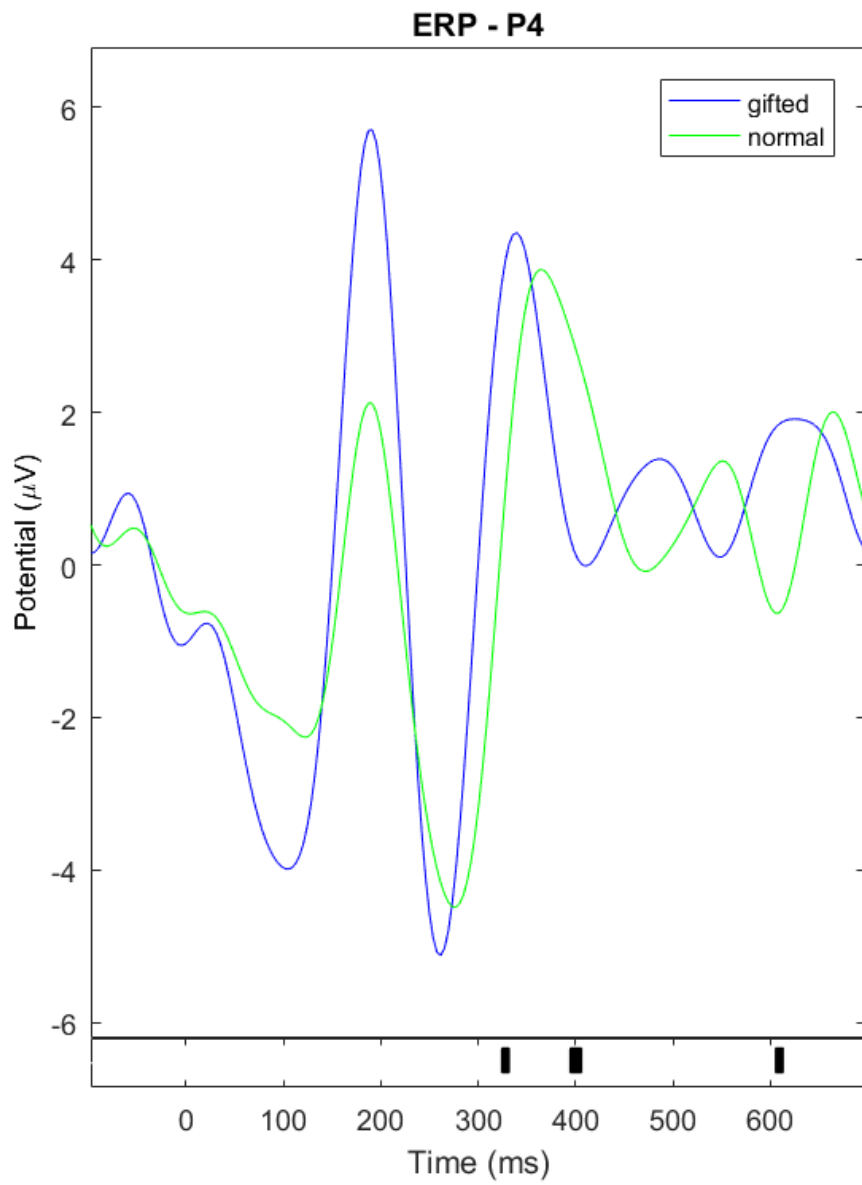


Obrázek 33 Lehké obtížnosti na elektrodě P2,  $p < 0.05$ , G modře, N zeleně.

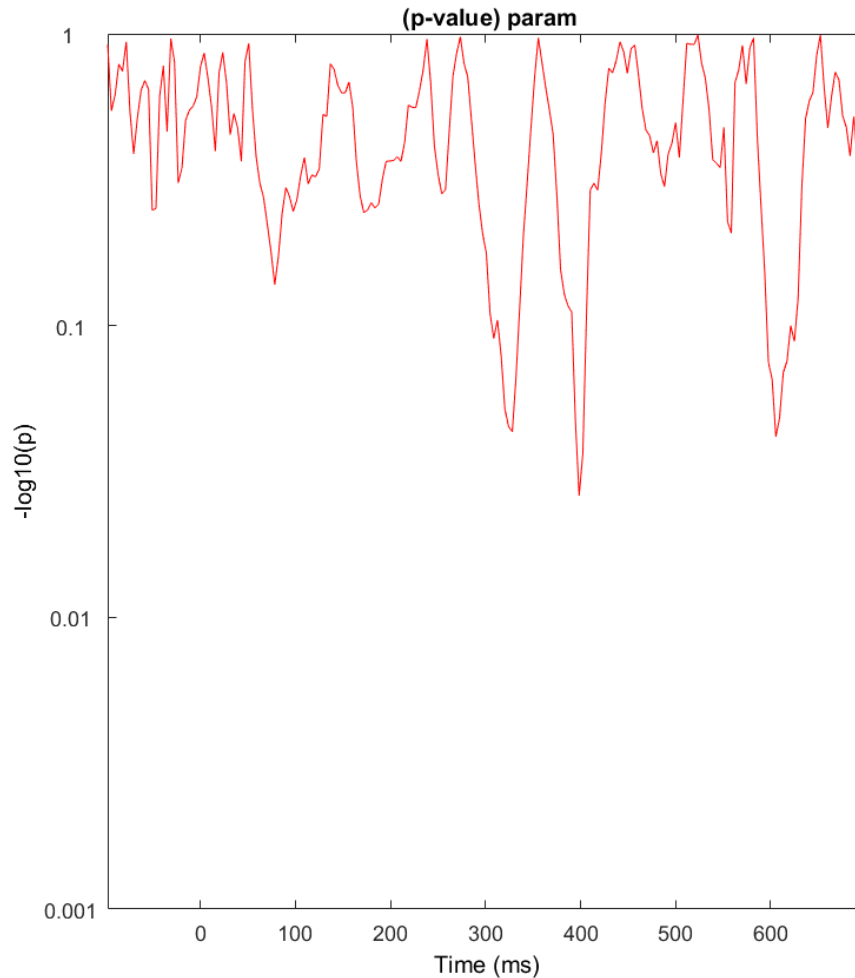


Obrázek 34 Exaktní  $p$  hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P2.

Na **elektrodě P4** (obrázek č. 35 a 36) vidíme statisticky signifikantní rozdíl ( $p < 0.05$ ) v amplitudě **P2p** v časech zhruba 320 až 410 ms a posléze rozdíl v pozdní posteorionních komponentách v čase zhruba 600 ms.

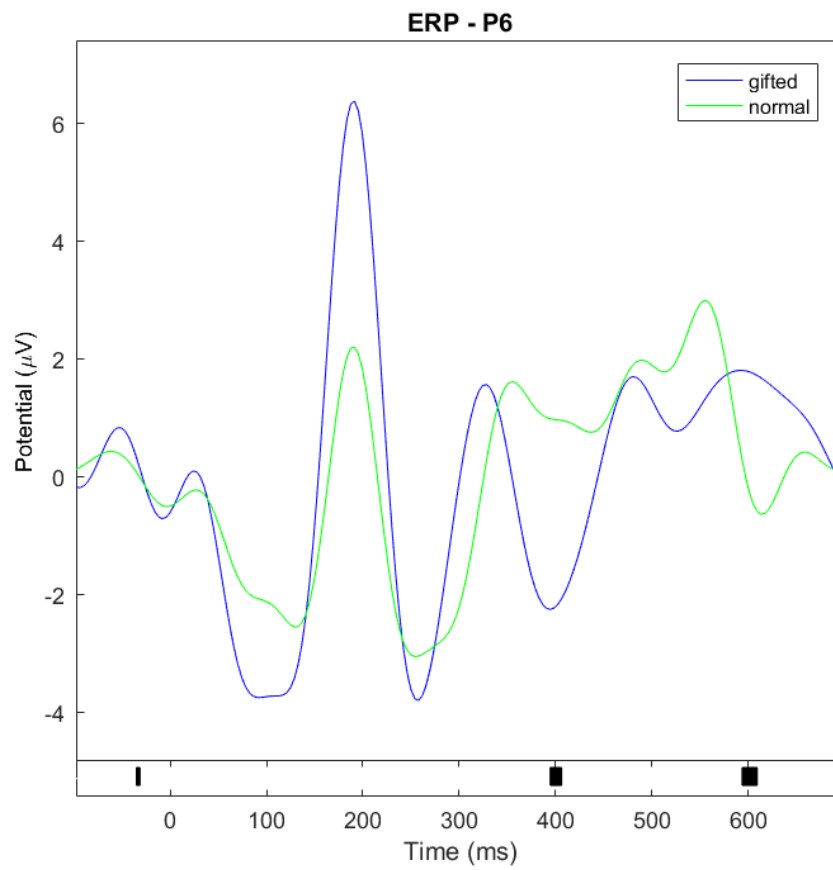


Obrázek 35 Lehké obtížnosti AAT na hladině významnosti  $p < 0.05$ . G modře, N zeleně.

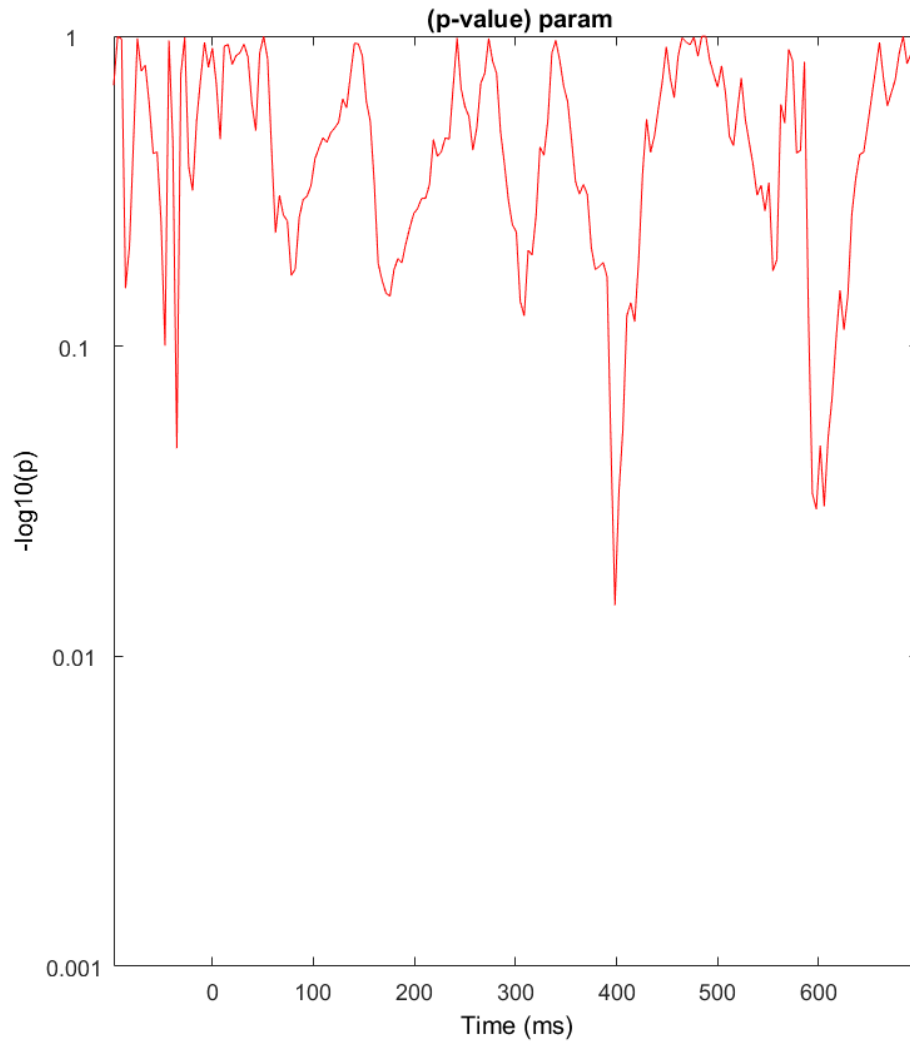


Obrázek 36 Exaktní p hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P4.

Na **elektrodě P6** můžeme vidět (obrázek č. 37 a 38) statisticky signifikantní rozdíl ( $p < 0.05$ ) zhruba 20 ms před prezentací stimulu, což může ukazovat na **rozdíl v prekognici mezi skupinami**. Posléze 400 ms po prezentaci stimulu vidíme negativní amplitudu zhruba a 600 ms po prezentaci stimulu můžeme opět vidět rozdíl mezi skupinami G a N. Rozdíl okolo 600 ms odpovídá **pozdním posteriorním komponentám**. U dosažení vrcholu amplitudy komponenty P2p mezi skupinou G (zhruba 320 ms) a N (zhruba 360 ms) můžeme pozorovat časový rozdíl v rozmezí zhruba 40 ms.

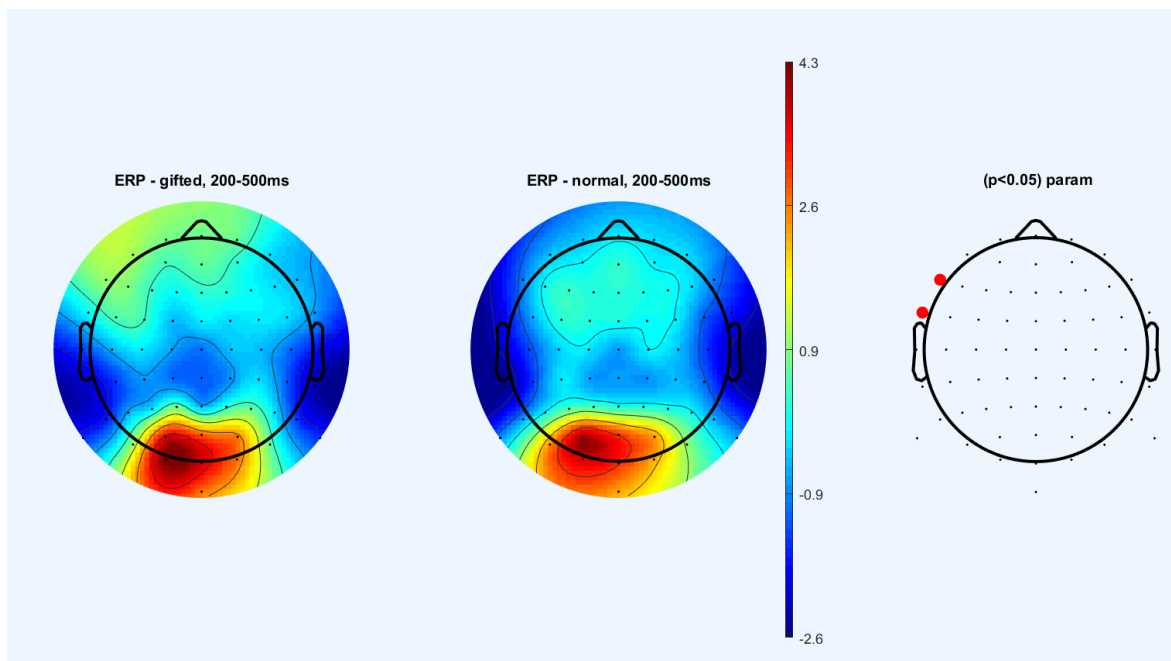


Obrázek 37 Lehké obtížnosti AAT na hladině významnosti  $p < 0.05$ . G modře, N zeleně.



Obrázek 38 Exaktní  $p$  hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P6.

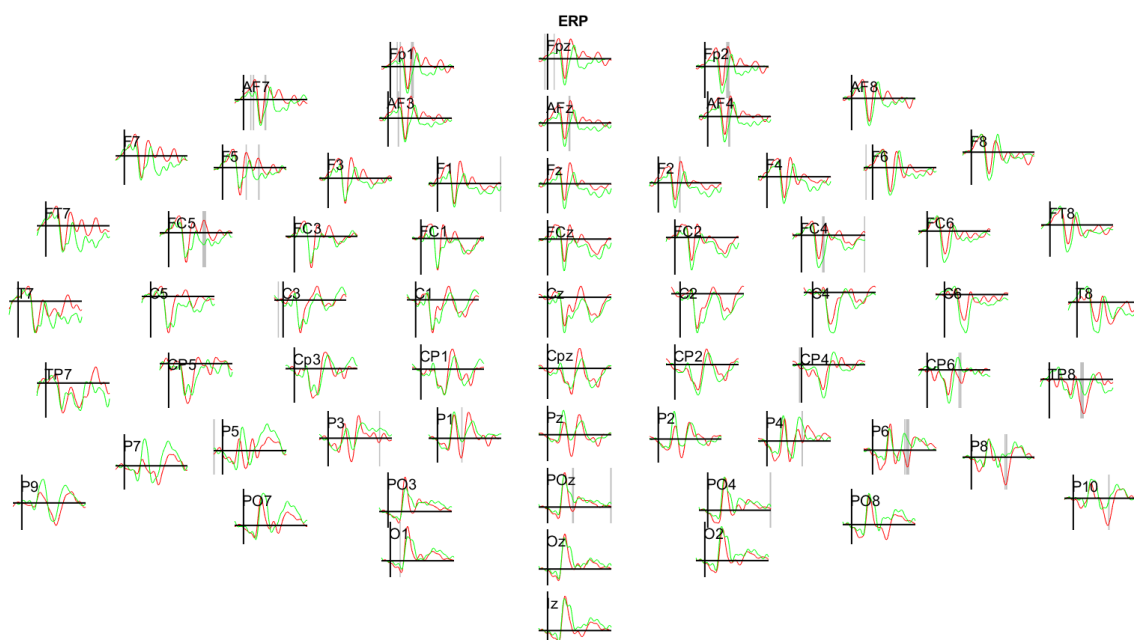
Na topografii skalpu získanou zahrnutím všech elektrod (viz obrázek č. 39) v čase 200 až 500 ms se nám podařilo získat statisticky signifikantní rozdíl ( $p < 0.05$ ) na elektrodách F7 a FT7, což by v případě aktivity vyšší ( $\mu\text{V}$ ) ukazovalo na **frontotemporální komponentu P2p** u skupiny G, nicméně v našem případě přičítáme spíše zrakovým artefaktům.



Obrázek 39 Topografie skalpu u lehkých úloh AAT v čase 300 až 500 ms po prezentaci stimulu.  $P < 0.05$ . Skupina G vlevo.

### 9. 1. 2 Středně těžké obtížnosti AAT

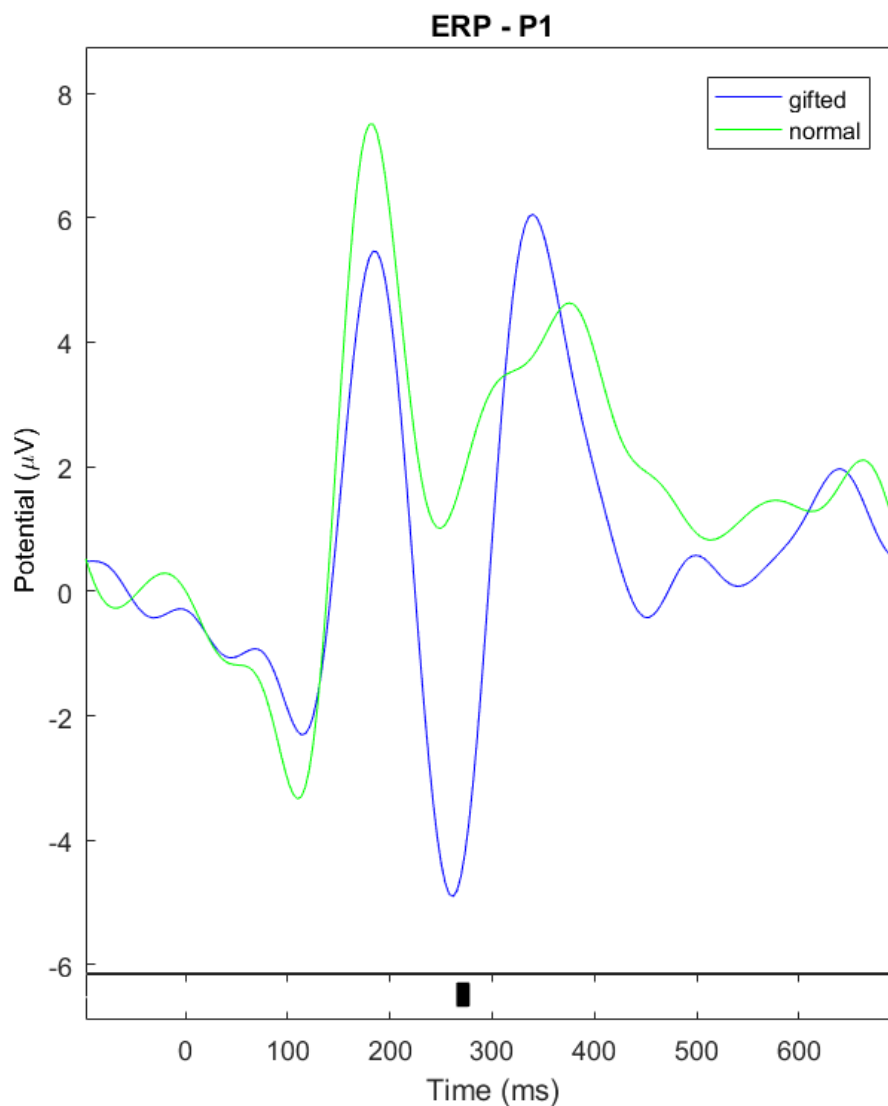
Na obrázku č. 40 vidíme vizualizaci získanou na 277 trialech od skupiny dětí s nadprůměrnými výsledky v S-B testu (G, n=7) a 247 trialech od dětí ze skupiny s podprůměrnými výsledky v S-B testu (N, n=4). Vizualizace je získaná ze všech elektrod na hladině významnosti  $p < 0.01$  bez korekce. Vidíme, že v parietálních oblastech se objevuje statistický signifikantní rozdíl mezi skupinami G a N na elektrodě **P1** (zhruba 250 ms po prezentaci stimulu), **P3** (zhruba 560 ms po prezentaci stimulu) a **P4** (zhruba 350 až 400 ms po prezentaci stimulu). Na elektrodách **P6** a **P8** (zhruba 400 ms po prezentaci stimulu).



Obrázek 40 Vizualizace středně těžkých úloh z celého skalpu. Červeně je skupina N a zeleně pak G,  $p < 0.01$ .

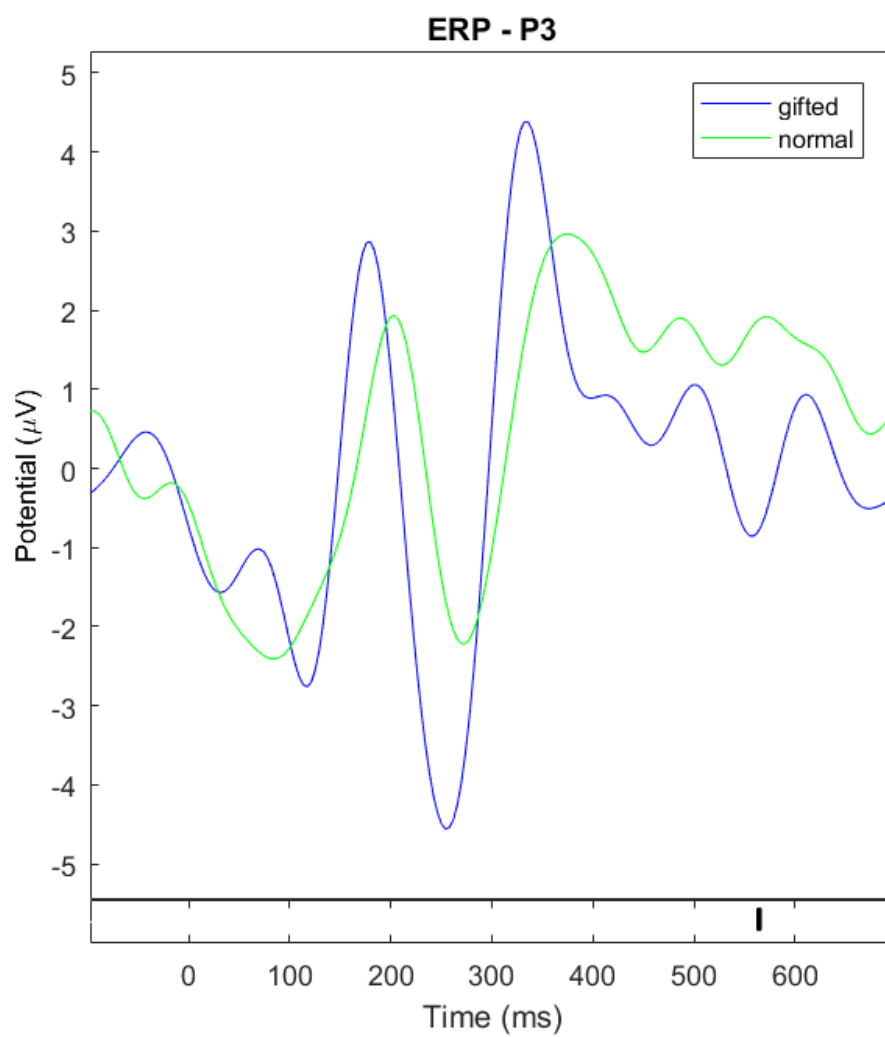
Opět pro přehlednost si zobrazíme jednotlivé elektrody samostatně pro skupinu G (n=7) a skupinu N (n=4). Na **elektrodě P1** (viz obrázek č. 41) můžeme vidět statisticky významný rozdíl ( $p < 0.01$ ) mezi skupinou G a N zhruba 250 ms po prezentaci stimulu, kdy nadané děti ze skupiny G vykazují vyšší negativní amplitudu, což odpovídá **komponentě N2**. U dosažení vrcholu amplitudy komponenty P2p mezi skupinou G (zhruba 340 ms) a N (zhruba můžeme pozorovat časový rozdíl v rozmezí zhruba 50 ms).



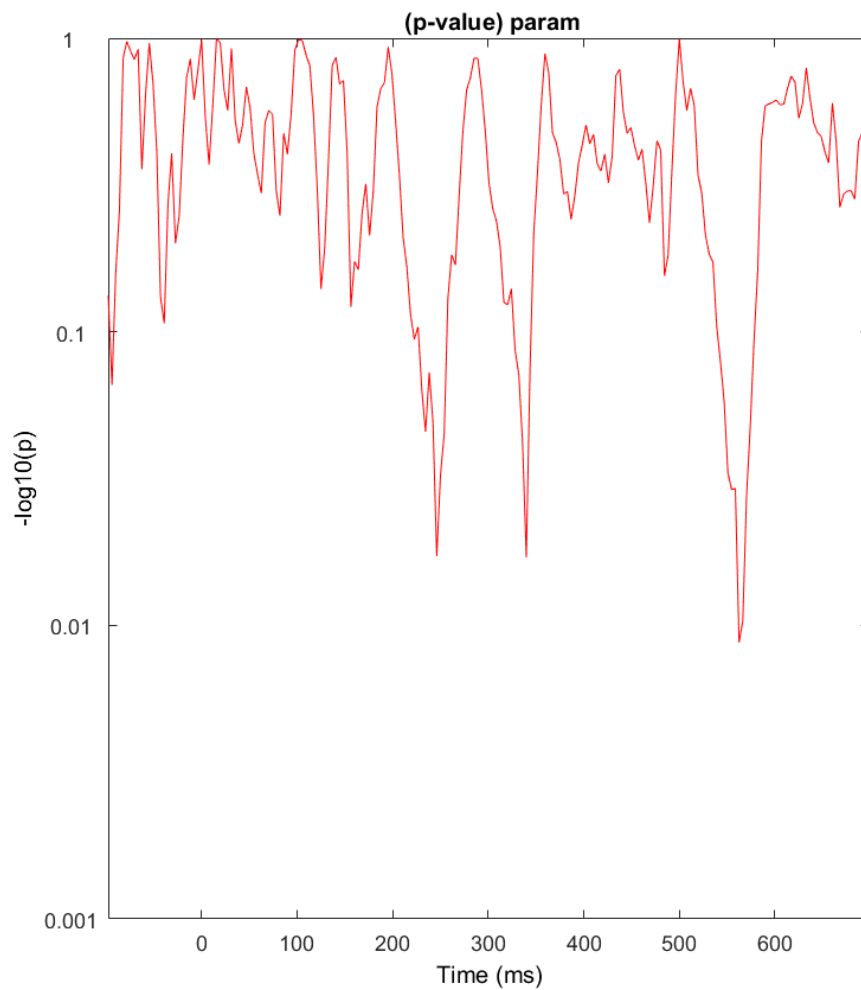


Obrázek 41 Středně těžké úlohy AAT,  $p < .01$ . G modře, N zeleně.

Na **elektrodě P3** vidíme (obrázek č. 42 a 43) signifikantní rozdíl v pozdním zpracování zhruba 550 ms po prezentaci stimulu, což odpovídá **pozdním posteriorním komponentám**. Nicméně vidíme rozdíl v dosažení vrcholu amplitudy komponenty P2p u skupiny G (zhruba 350 ms po prezentaci stimulu) a skupiny N (zhruba 380 ms). U dosažení vrcholu amplitudy komponenty P2p mezi skupinou G a N můžeme pozorovat časový rozdíl v rozmezí zhruba 50 ms.

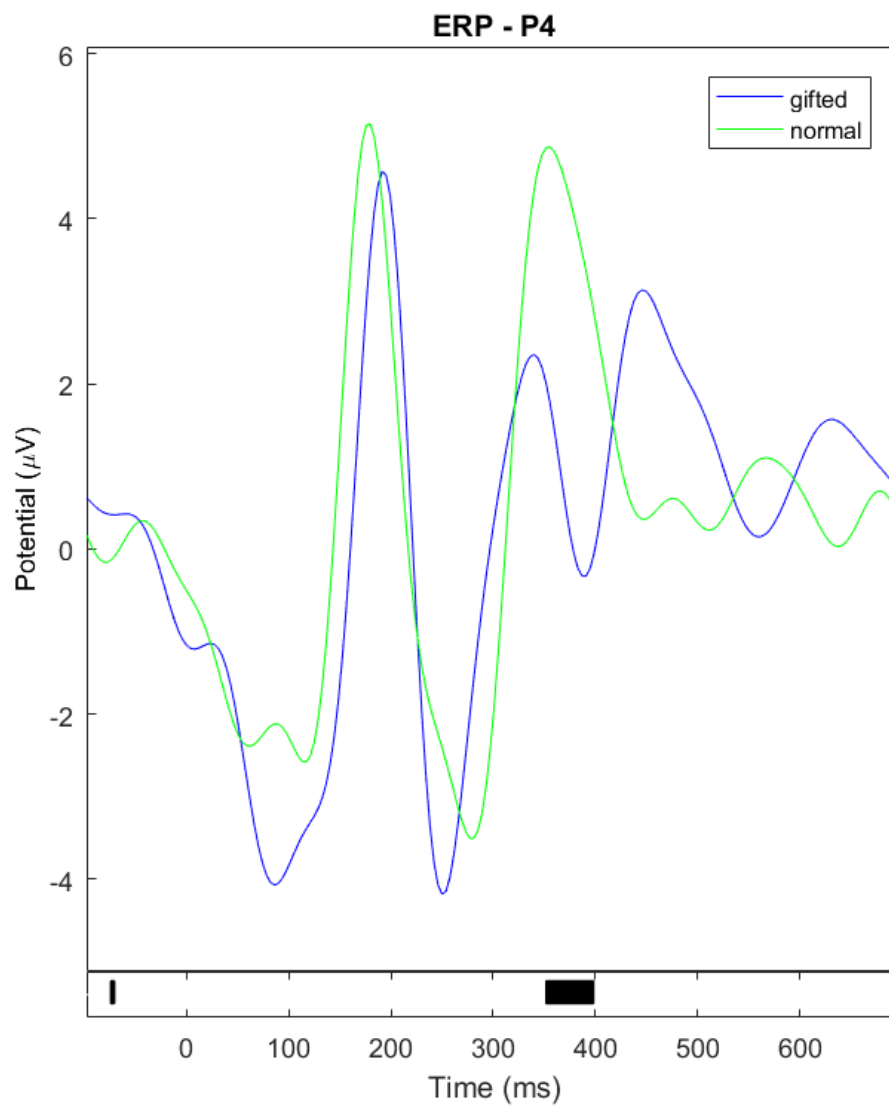


Obrázek 42 Středně těžké úlohy AAT,  $p < .01$ . G modře, N zeleně.

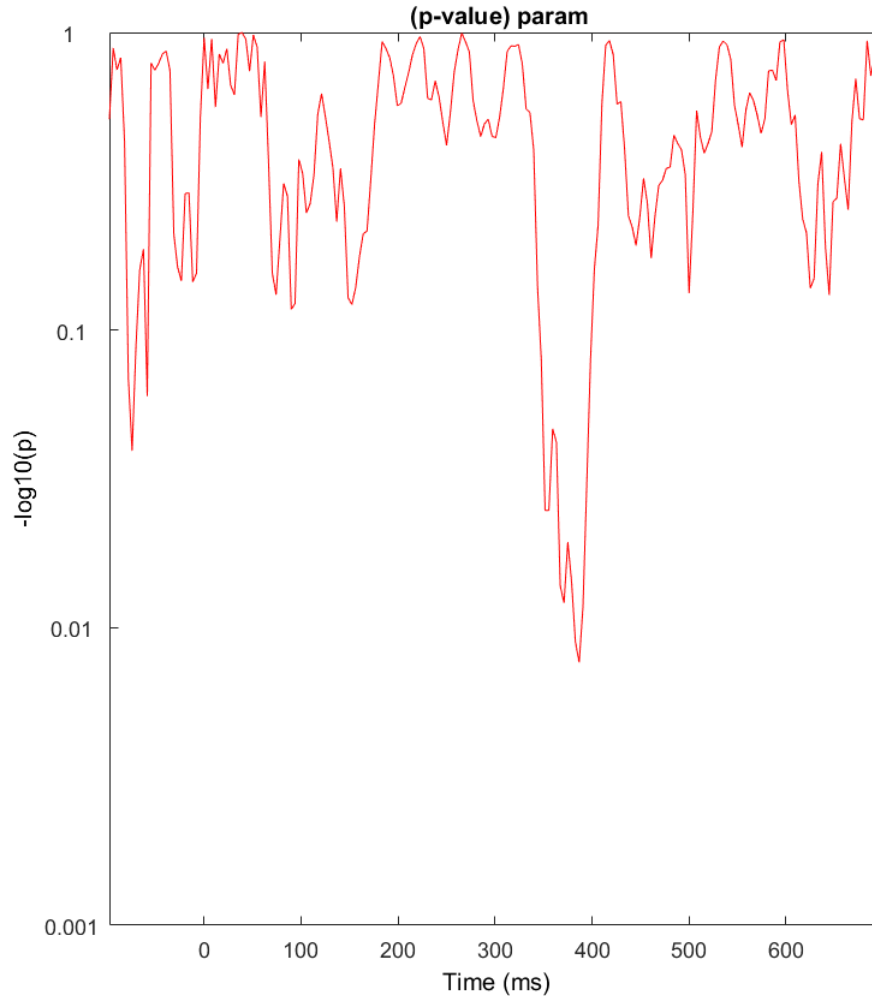


Obrázek 43 Exaktní p hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P3.

Na **elektrodě P4** (obrázek č. 44 a 45) vidíme signifikance ( $p < 0.05$ ) zhruba 50 ms před prezentací stimulu a následně pak výraznou signifikanci ( $p < 0.05$ ) pro komponentu **P2p**, kde skupina N dosahuje vyšší amplitudy.

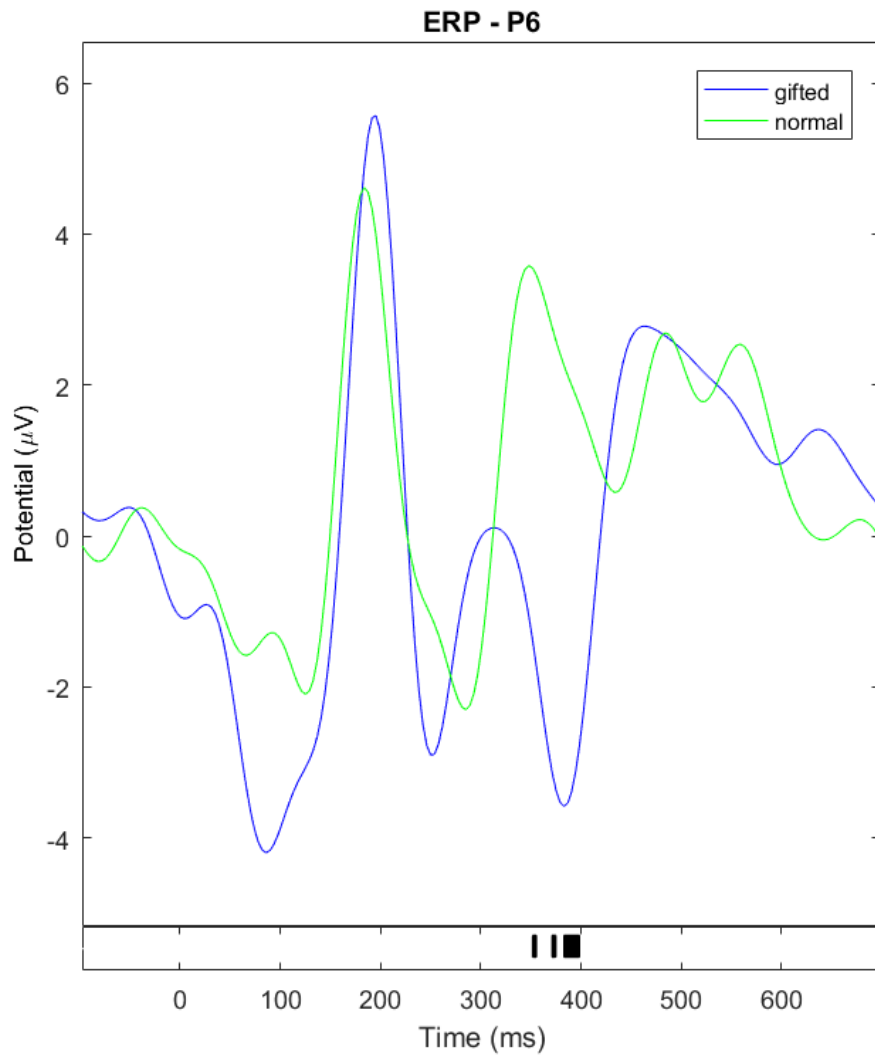


Obrázek 44 Středně těžké úlohy AAT,  $p < 0.05$  bez korekce. G modře, N zeleně.

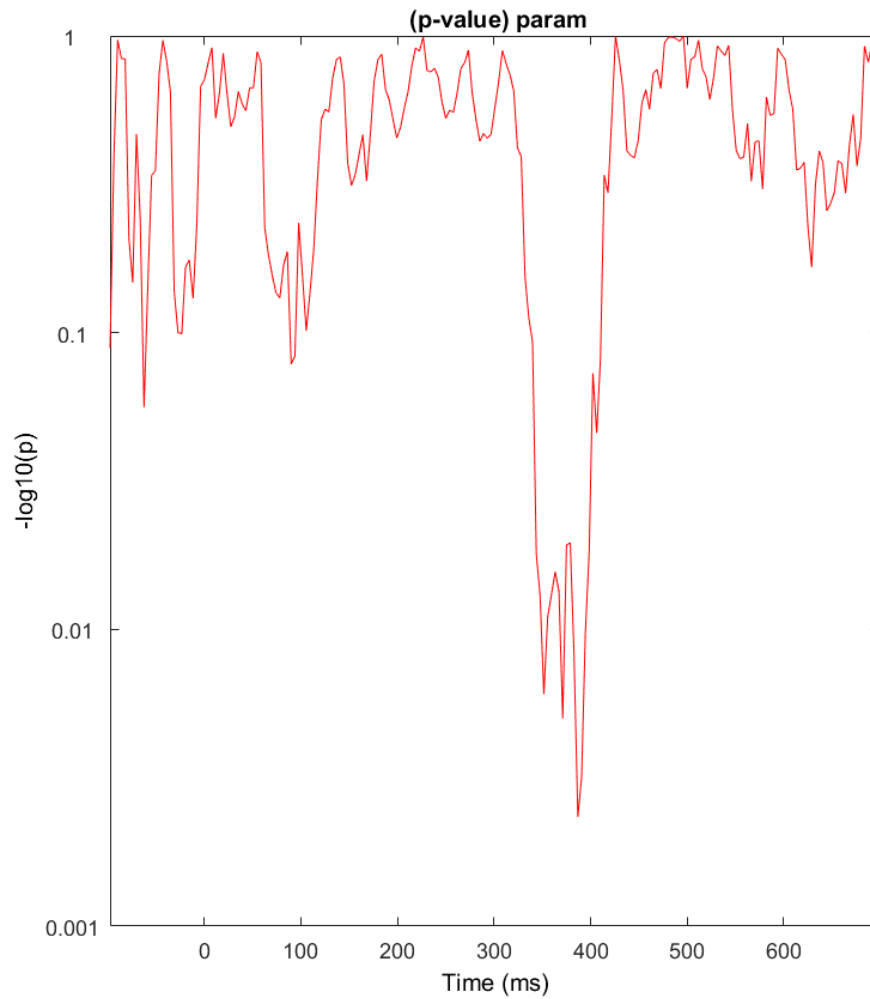


Obrázek 45 Exaktní  $p$  hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P4.

Na **elektrodě P6** vidíme (obrázek č. 46 a 47) statisticky signifikantní rozdíl ( $p < 0.01$ ) v **komponentě P2p** zhruba 350 až 400 ms po prezentaci stimulu, kdy komponenta P2p dosahuje vrcholu amplitudy u skupiny G zhruba 300 ms po prezentaci stimulu a u skupiny N až zhruba 350 ms po prezentaci stimulu. U dosažení vrcholu amplitudy komponenty P2p mezi skupinou G (zhruba 320 ms) a N (zhruba 380 ms) můžeme pozorovat časový rozdíl v rozmezí zhruba 60 ms.

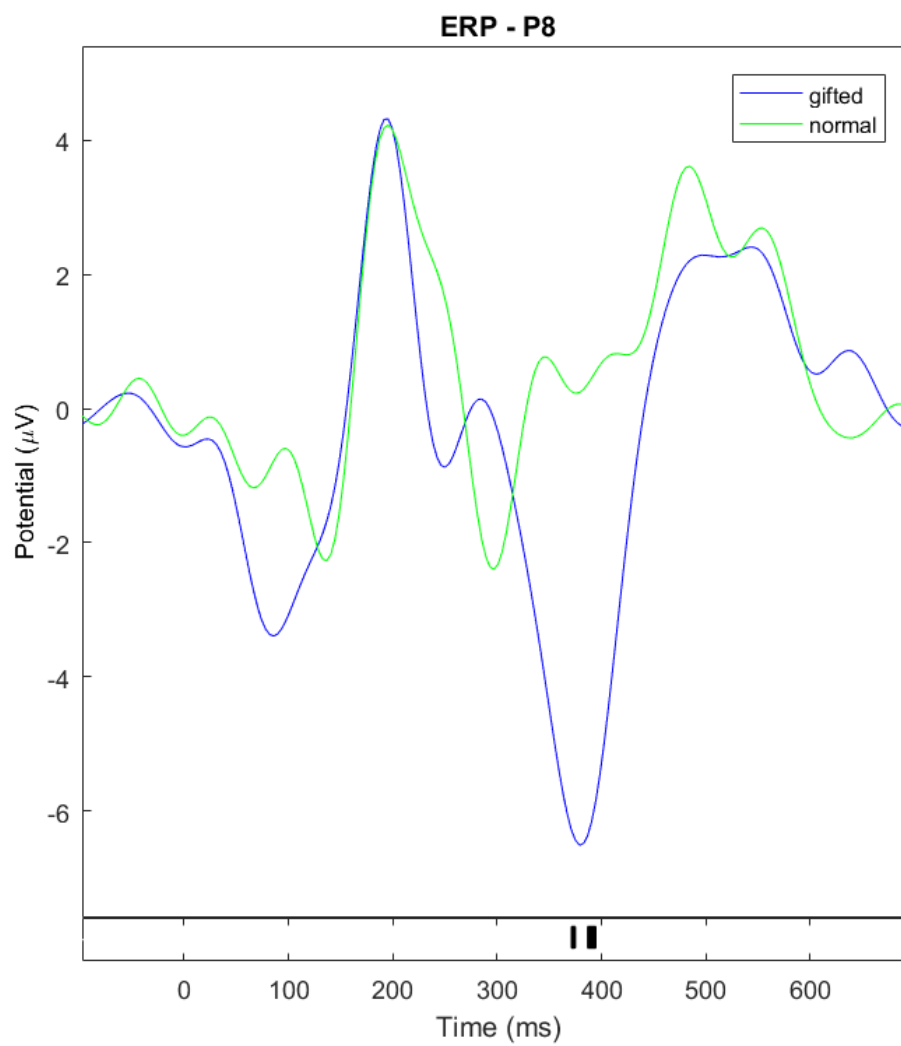


Obrázek 46 Středně těžké úlohy AAT,  $p < 0.01$  bez koefce. G modře, N zeleně.



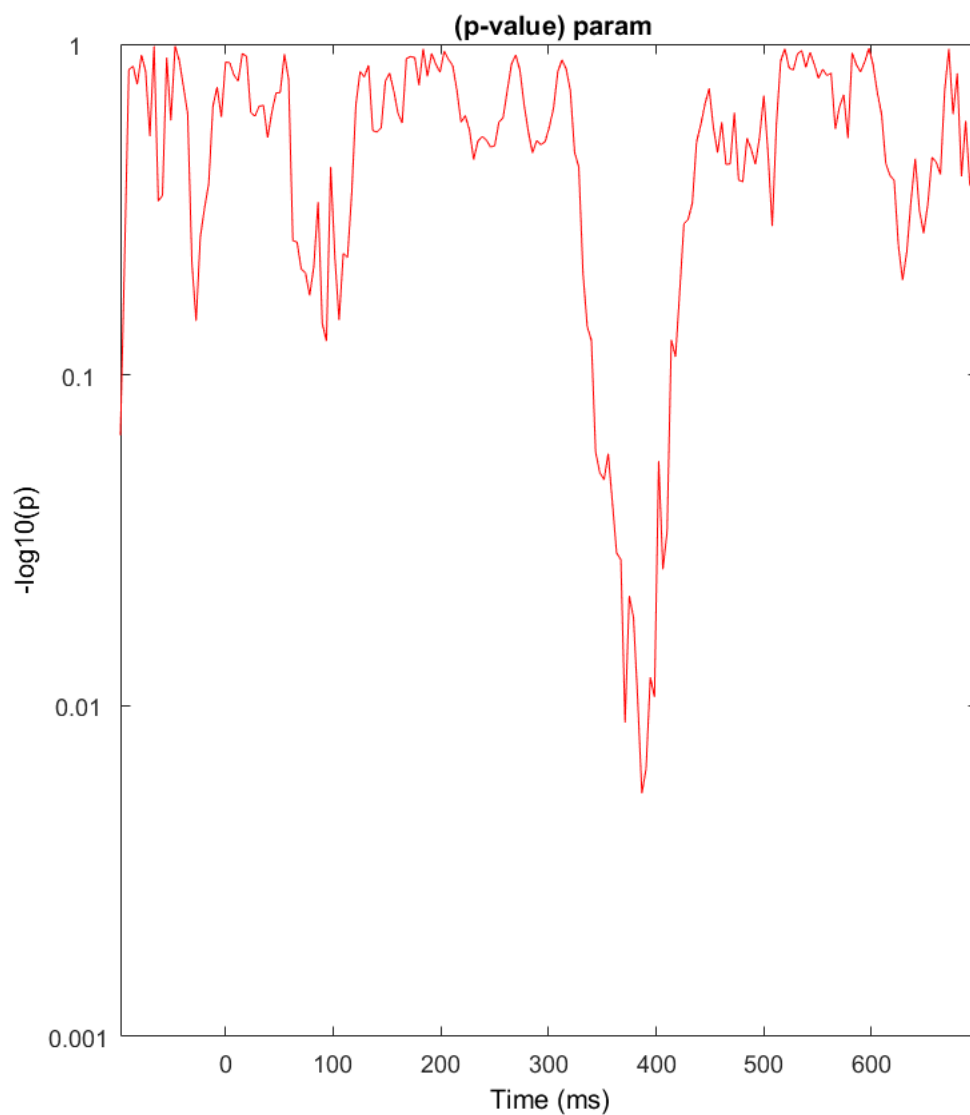
Obrázek 47 Exaktní  $p$  hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P6.

Na **elektrodě P8** vidíme (obrázek č. 48 a 49) výrazný rozdíl ( $p < 0.01$ ) negativní amplitudu zhruba 370 až 400 ms po prezentaci stimulu.



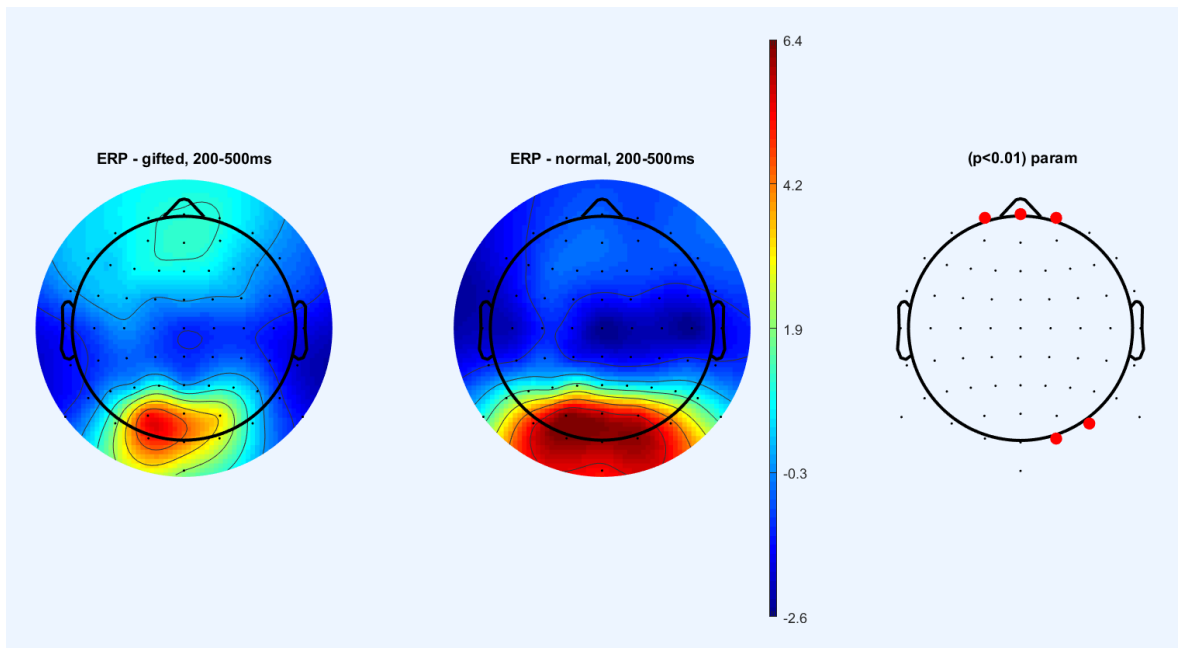
Obrázek 48 Středně těžké úlohy AAT,  $p < 0.01$  bez koefce. G modře, N zeleně.





Obrázek 49 Exaktní  $p$  hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P8.

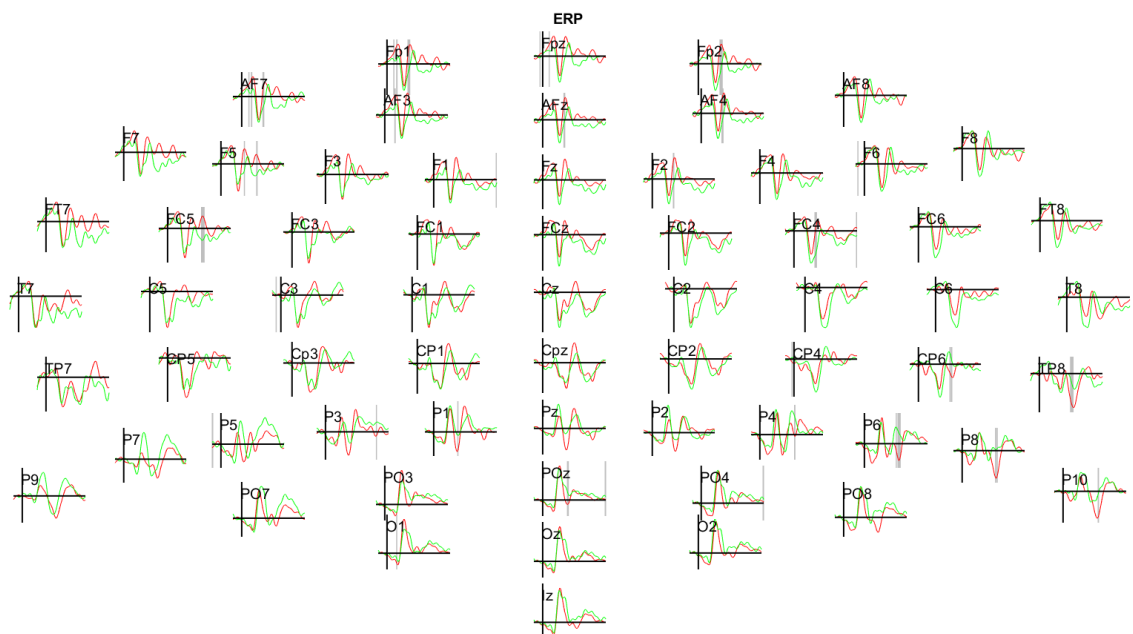
Na topografii skalpu získanou zahrnutím všech skalpových elektrod (viz obrázek č. 50) se nám podařilo získat signifikantní rozdíl ( $p < 0.01$ , bez korekce) v čase 200 až 500 na elektrodách P6 a P8. Také vidíme signifikanci ve frontálním laloku, tu ale vnímáme jako zrakové artefakty.



Obrázek 50 Topografie skalpu u středně těžkých úloh AAT z času 200 až 500 ms po prezentaci stimulu. Hladina významnosti  $p < 0.01$  bez korekce. Skupina G vlevo.

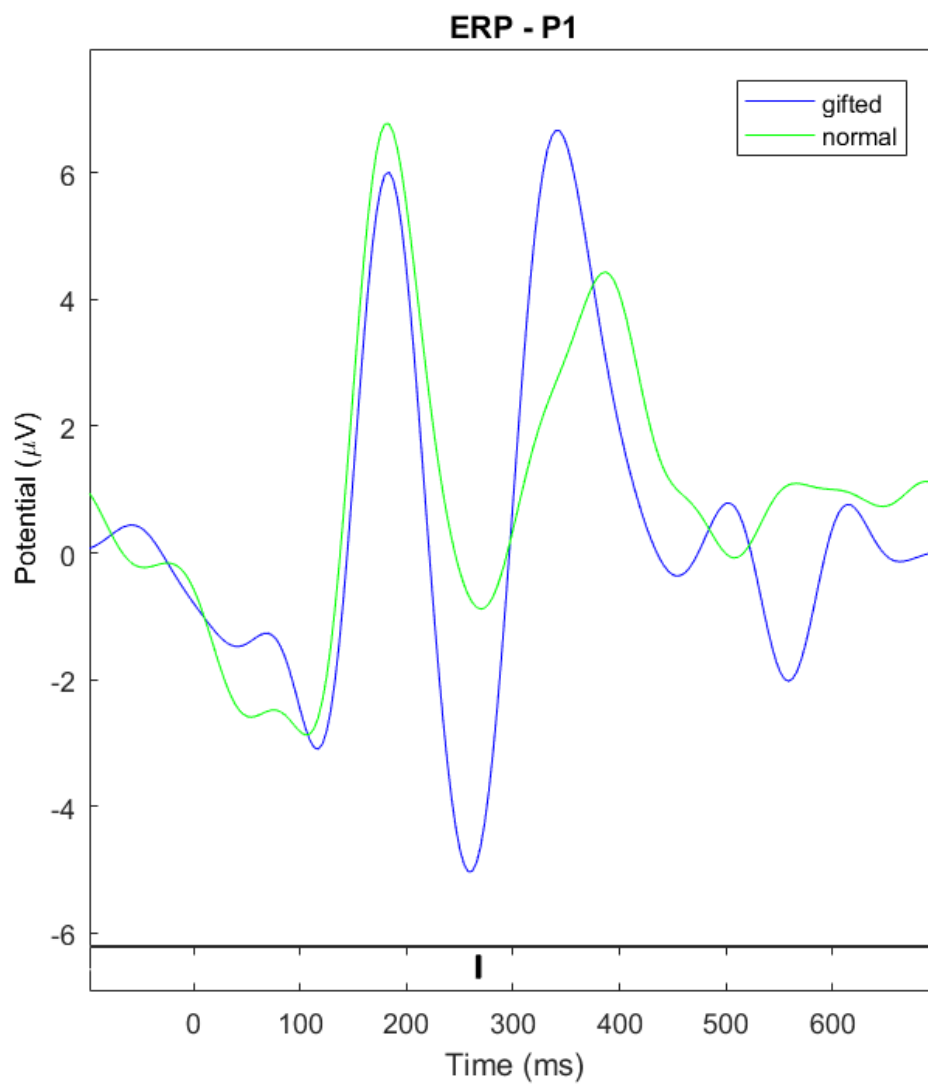
### 9. 1. 3 Těžké úlohy AAT

Na obrázku č. 51 vidíme vizualizaci získanou na 298 trialech od skupiny dětí s nadprůměrnými výsledky v S-B testu (G, n=7) a 215 trialech od dětí ze skupiny s podprůměrnými výsledky v S-B testu (N, n=3). Vizualizace je získaná ze všech skalpových elektrod a můžeme vidět rozdíl mezi skupinou G a N na hladině významnosti  $p < 0.01$  bez korekce. Na **elektrodě P1** můžeme vidět statisticky signifikantní rozdíl zhruba 260 ms po prezentaci stimulu. Na **elektrodě P3** v časech 250, 350 a 550 ms po prezentaci stimulu. Na elektrodě **P4** pak zhruba 370 ms po prezentaci stimulu. Podobně je tomu i na **elektrodě P6** a **P8**.

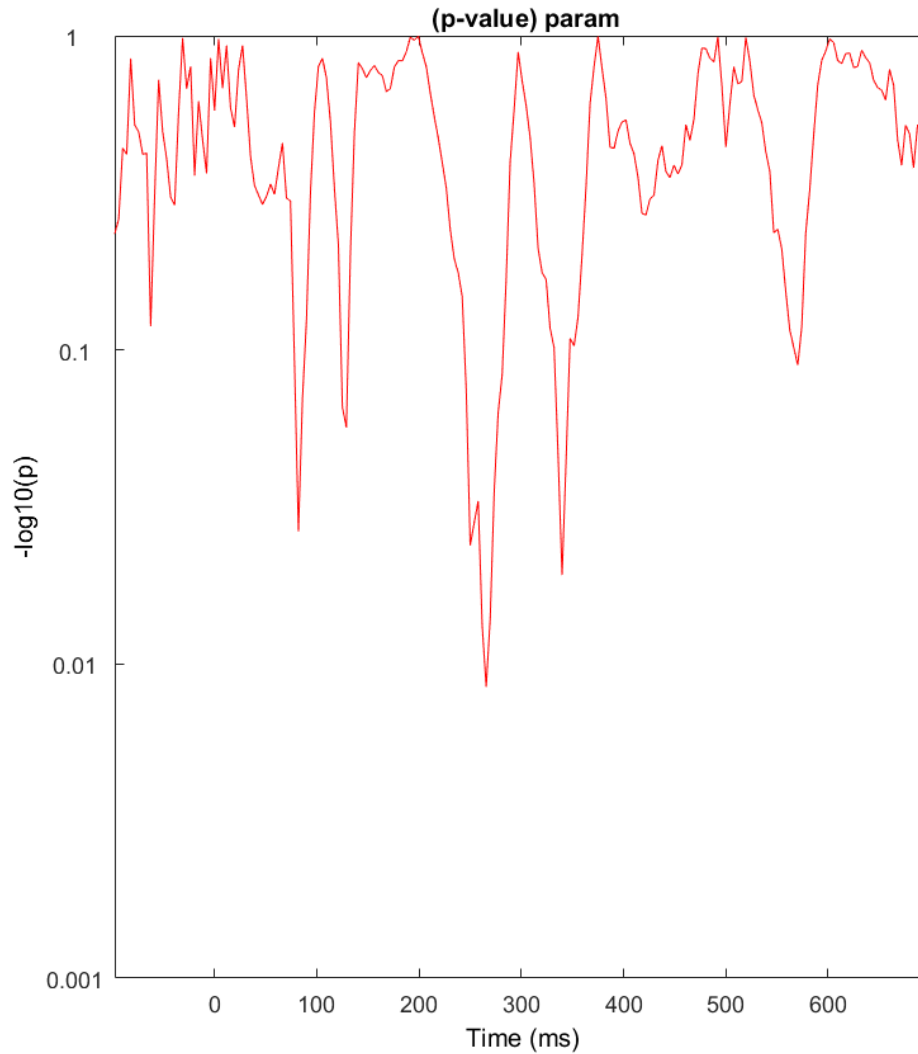


Obrázek 51. Vizualizace rozdílu skupin G (červeně) a N (zeleně) pro těžké úlohy AAT na hladině významnosti  $p < 0.05$ .

Nyní si opět zobrazíme elektrody jednotlivě. Na **elektrodě P1** (obrázek č. 52 a 53) vidíme statisticky signifikantní ( $p < 0.01$  bez korekce) rozdíl v negativní amplitudě zhruba 260 ms po prezentaci stimulu u skupiny N a G, což odpovídá **komponentě N2**. Dále na obrázku vidíme P2p dosahující vrcholu amplitudy zhruba 350 ms po prezentaci stimulu u skupiny G a zhruba 380 ms u skupiny N.

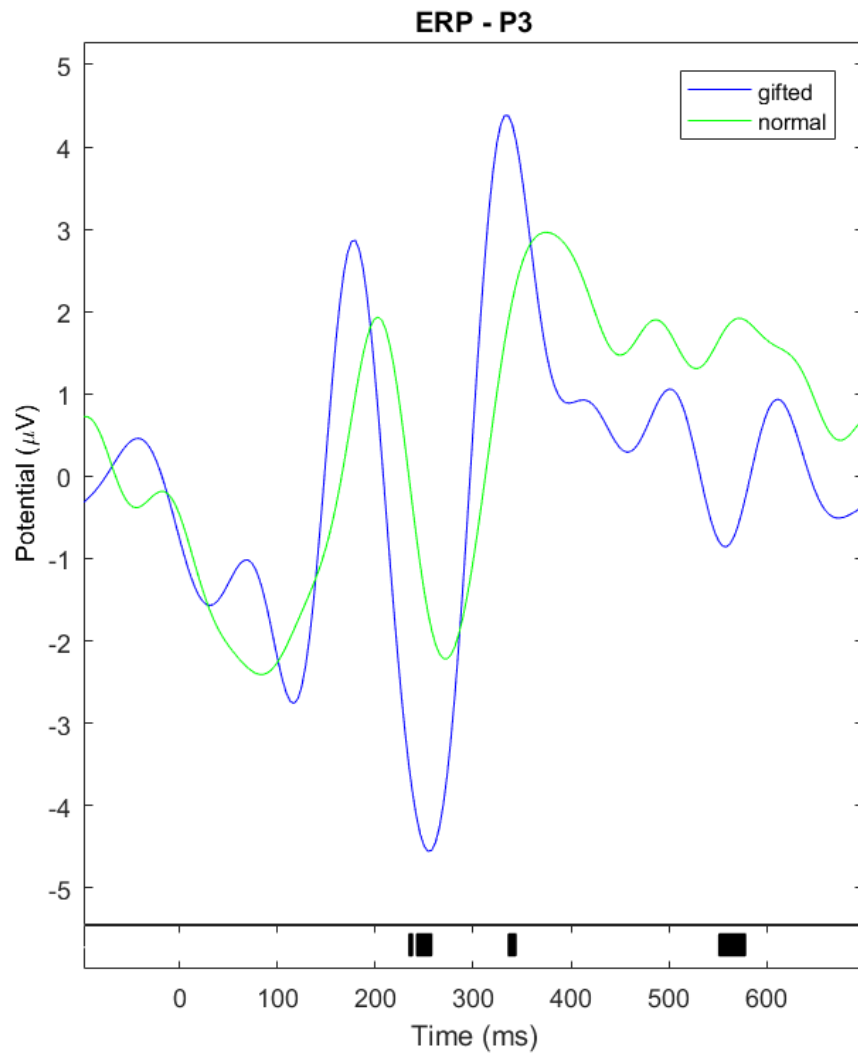


Obrázek 52 Těžké úlohy AAT,  $p < 0.01$  bez korekce. G modře, N zeleně.

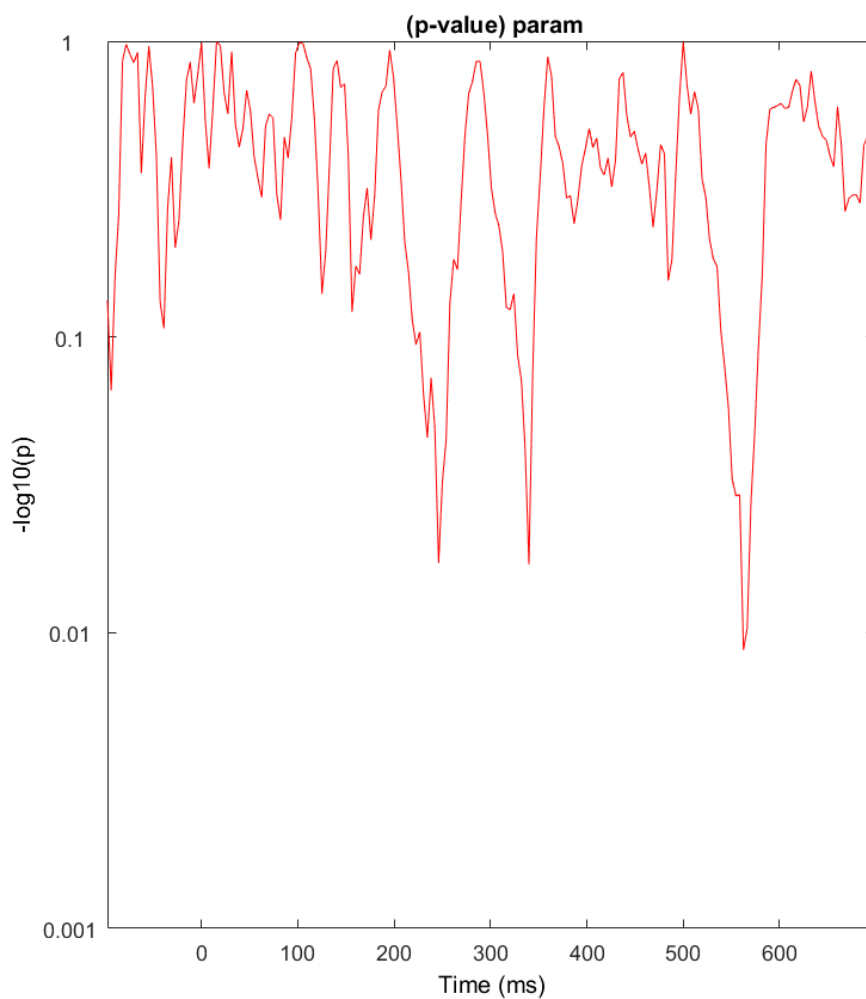


Obrázek 53 Exaktní p hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P1.

Na **elektrodě P3** (obrázek č. 54 a 55) vidíme statisticky signifikantní rozdíl (**p < 0.05**) mezi skupinami na komponentě **N2** (zhruba 250 ms po prezentaci stimulu). Dále **P2p** (zhruba 350 ms) a v **pozdních posteriorních komponentách** (zhruba 550 po prezentaci stimulu), **kde p < 0.01**.

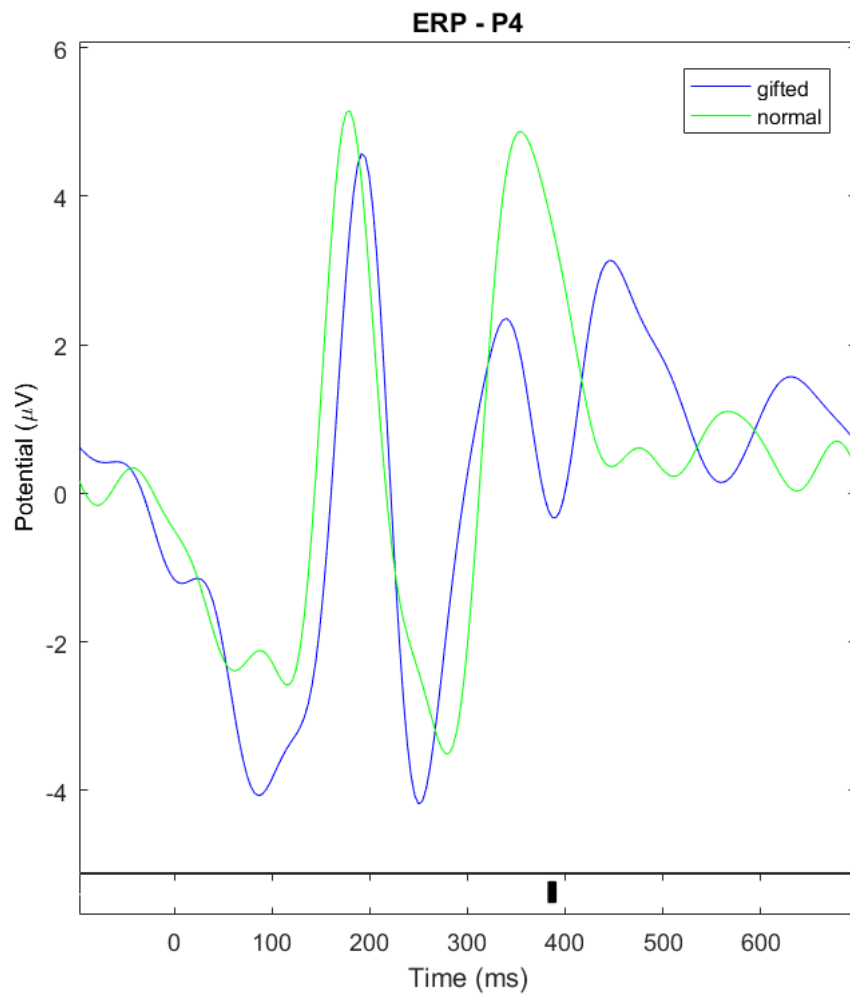


Obrázek 54 Těžké úlohy AAT,  $p < 0.05$  bez korekce. G modře, N zeleně.



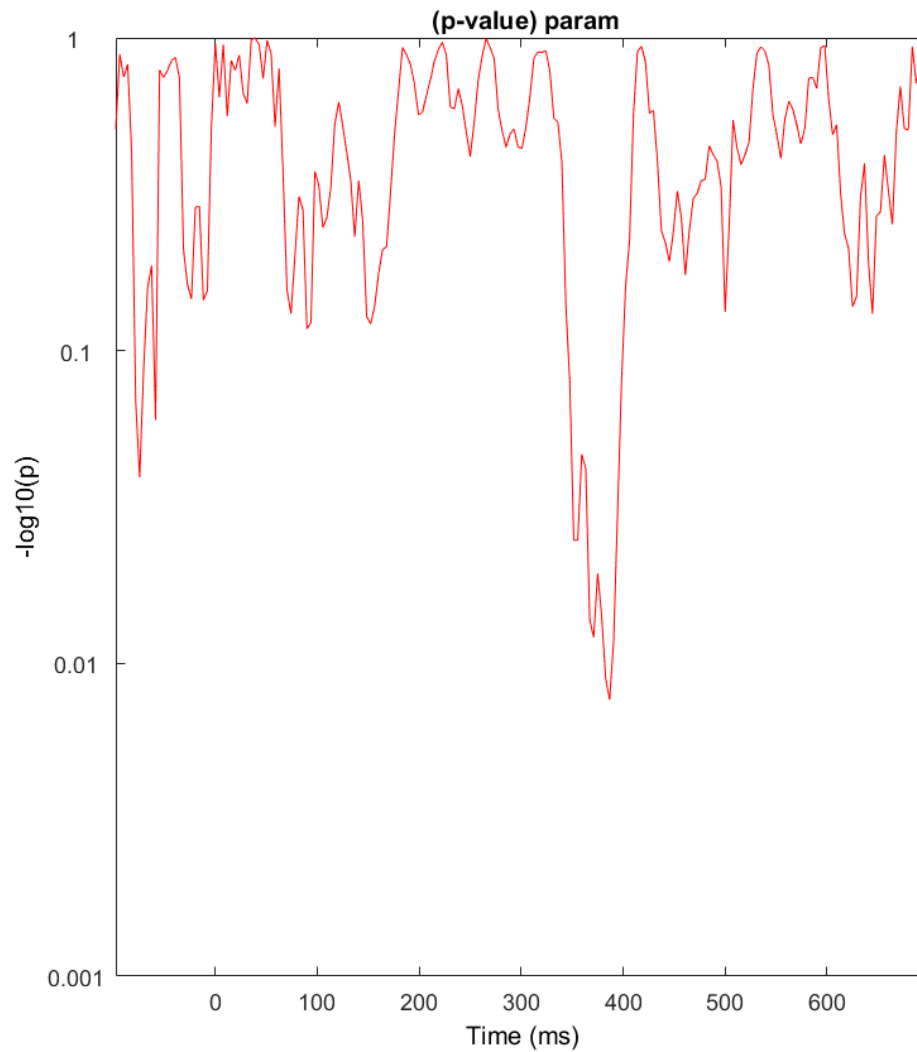
Obrázek 55 Exaktní  $p$  hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P3.

Podobně je tomu na **elektrodě P4**, kde vidíme (obrázek č. 56 a 57) statisticky signifikantní rozdíl ( $p < 0.01$  bez korekce) zhruba 380 ms po prezentaci stimulu, kdy skupina G dosahuje vrcholu **komponenty P2p** zhruba 350 ms po prezentaci stimulu a skupina N kolem 380 ms.



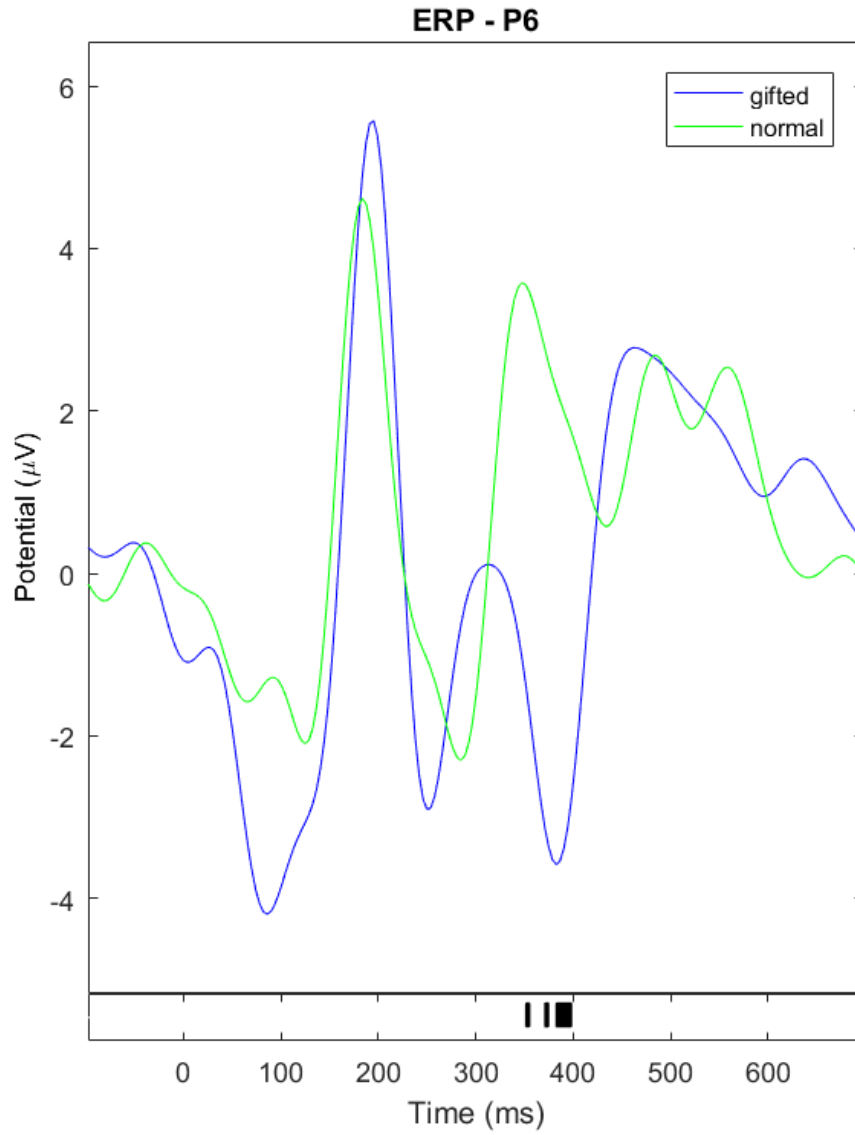
Obrázek 56 Těžké úlohy AAT,  $p < 0.01$  bez korekce. G modře, N zeleně.



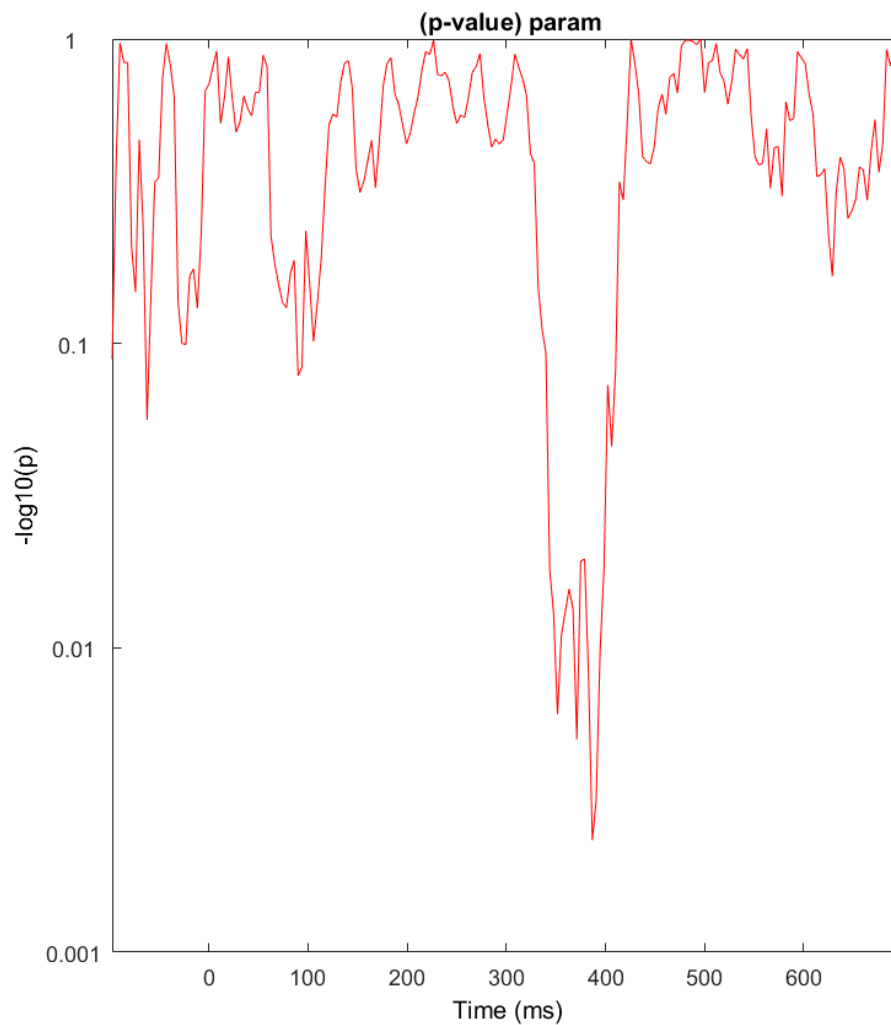


Obrázek 57 Exaktní p hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P3.

Na **elektrodě P6** (obrázek č. 58 a 59) statisticky signifikantní rozdíl ( $p < 0.01$  bez korekce) na **komponentně P2p** mezi 350 ms až 400 ms po prezentaci stimulu, kdy opět dochází k rychlejšímu dosažení vrcholu amplitudy komponenty u skupiny G (zhruba 330 ms) oproti N (zhruba 380 ms).

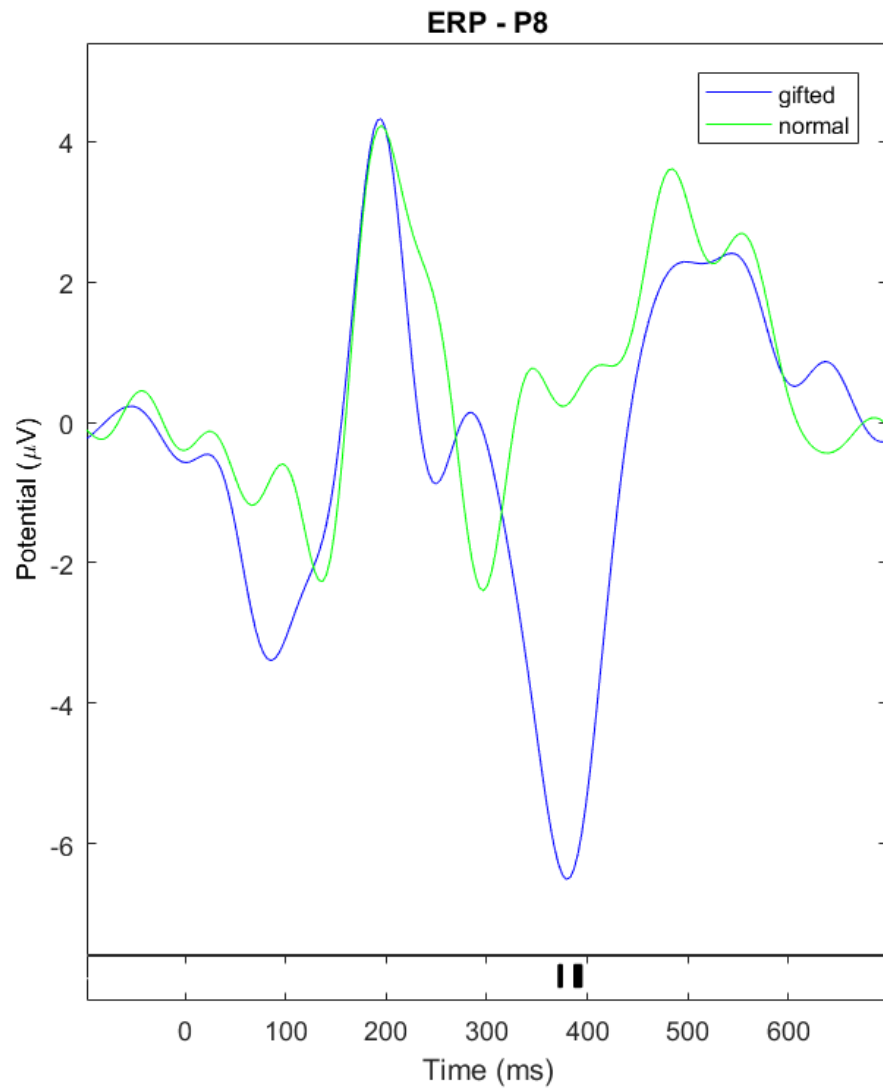


Obrázek 58 Těžké úlohy AAT,  $p < 0.01$  bez korekce. G modře, N zeleně.

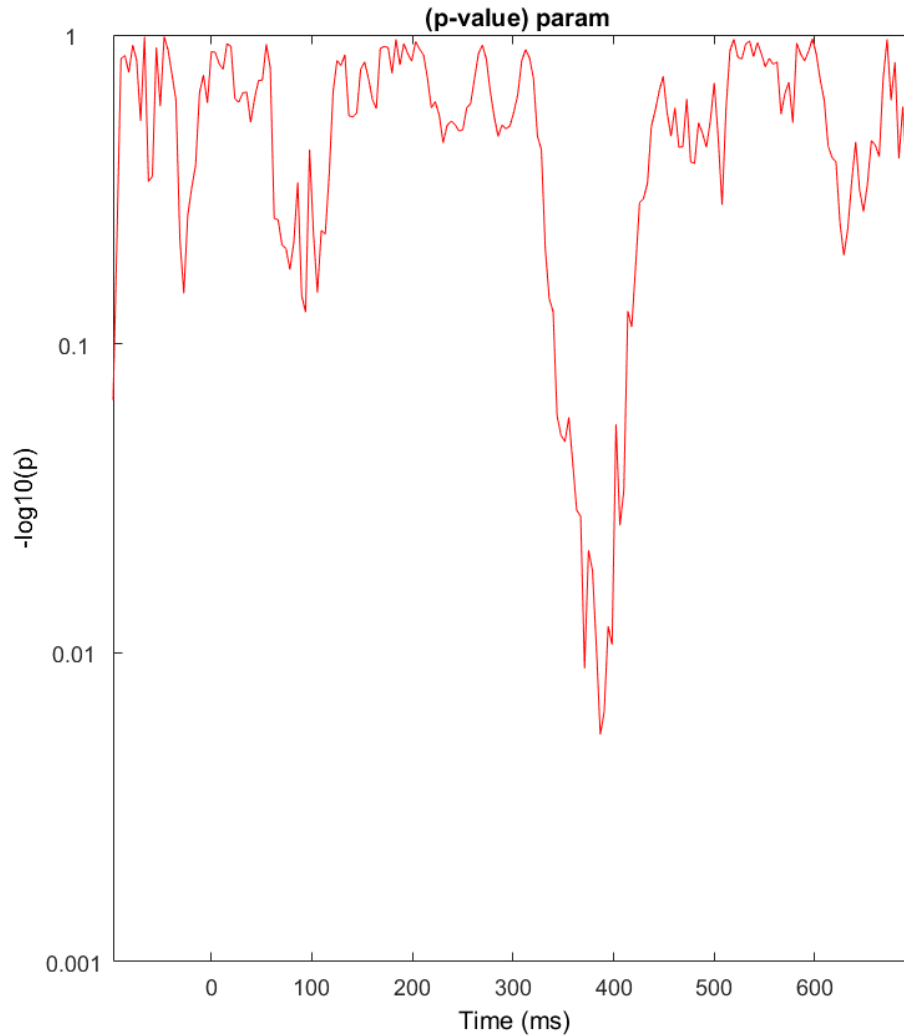


Obrázek 59 Exaktní  $p$  hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P6.

Na **elektrodě P8** (obrázek č. 60 a 61) vidíme rozdíl ( $p < 0.1$  bez korekce) v negativní amplitudě u skupin G a N zhruba kolem 380 ms až 400 ms po prezentaci stimulu.

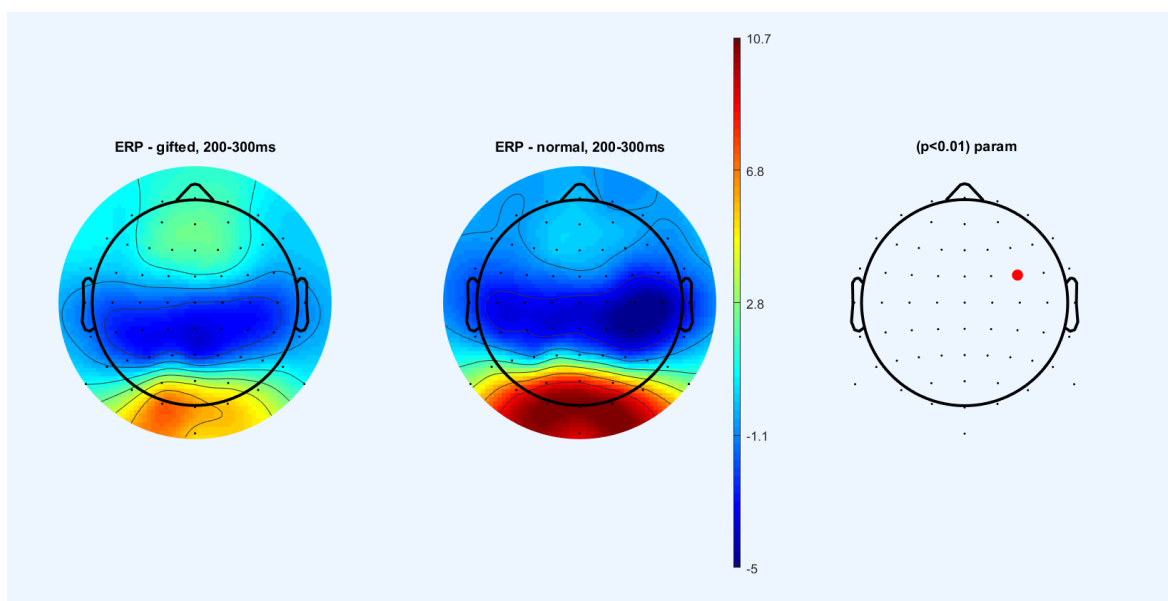


Obrázek 60 Těžké úlohy AAT,  $p < 0.01$  bez korekce. G modře, N zeleně.



Obrázek 61 Exaktní  $p$  hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P8.

Na obrázku č. 62 vidíme výraznou bilaterální parietální a okcipito-parietální aktivaci u obou skupin. Na hladině významnosti  $p < 0.01$  se nám ukazuje jako signifikantní elektroda FC6, což vzhledem k síle aktivity (v  $\mu\text{V}$ ) přikládáme spíše zřetelným artefaktům. Můžeme si ale povšimnout, že u skupiny G je výraznější aktivita spíše vlevo, kdežto u skupiny N je aktivita vyvážená.



Obrázek 62 Topografie skalpu u těžkých úloh AAT z času 200 až 500 ms po prezentaci stimulu. Hladina významnosti  $p < 0.01$  bez korekce. Skupina G vlevo.

## 9.2 Behaviorální výsledky

V úvodu se podíváme na průměrné reakční časy (RT) pro každou úroveň obtížnosti v tabulce č. 8.

Tabulka 8 Průměrné RT pro každou úroveň obtížnosti AAT u skupin G a N.

Úroveň obtížnosti AAT	Skupina G (mean RT)	Skupina N (mean RT)
2.3	1265 ms	1861 ms
2.2	1215 ms	1235 ms
2.1	1094 ms	1407 ms
2.0	1081 ms	1236 ms
1.9	997 ms	1023 ms
1.8	963 ms	1002 ms
1.7	954 ms	1046 ms
1.6	936 ms	1048 ms
1.5	932 ms	1057 ms
1.4	930 ms	1148 ms
1.3	921 ms	1116 ms

<b>1.2</b>	927 ms	1154 ms
<b>1.1</b>	936 ms	1003 ms
<b>mean</b>	<b>1161, 6 ms</b>	<b>1176, 7 ms</b>

Abychom uzpůsobili stupně náročností úloh AAT pro další analýzu, vyjádřili jsme jednotlivé obtížnosti rozdílem počtu prvků mezi množinami v testových úlohách (např. u obtížnosti 2.4 se množiny lišily o 26 prvků a u obtížnosti 1.1 pak pouze o 2 prvky (viz tabulka č. 9).

Tabulka 9 Počet lišících se prvků v závislosti na obtížnosti úloh AAT

Obtížnost	2.3	2.2	2.1	2.0	1.9	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
Rozdíl	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2

Pro zjištění vztahu mezi počtem prvků množiny a RT jsme použili **Pearsonovu korelaci**. U skupiny G bylo  $r = 0.866$  ( $p < 0.001$ ), u skupiny N bylo  $r = 0,662$  ( $p < 0.014$ ). P hodnotu si můžeme prohlédnout na obrázku č. 63 v programu Statistica.

Correlation Matrix

		Gifted	Normal	Log
Gifted	Pearson's r	—		
	p-value	—		
Normal	Pearson's r	0.833 ***	—	
	p-value	< .001	—	
Log	Pearson's r	0.866 ***	0.662 *	—
	p-value	< .001	0.014	—

Note. \*  $p < .05$ , \*\*  $p < .01$ , \*\*\*  $p < .001$

Obrázek 63 P hodnota souvislosti RT a úrovně obtížnosti úlohy.

U párového t-testu jsou výsledky v obrázku č. 64 v programu Statistica.

## Paired Samples T-Test

Paired Samples T-Test

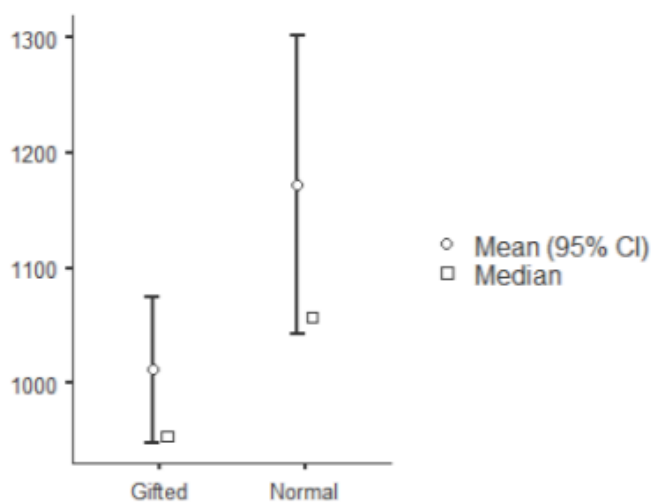
			statistic	df	p	Mean difference	SE difference	Cohen's d
Gifted	Normal	Student's t	-3.73	12.0	0.003	-160	43.0	-1.03

Descriptives

	N	Mean	Median	SD	SE
Gifted	13	1012	954	117	32.3
Normal	13	1172	1057	238	66.0

## Plots

Gifted - Normal



Obrázek 64 Párový t - test pro RT a obtížnost úlohy.



#### 9. 4 Shrnutí výsledků

Nyní si přehledně shrneme získané výsledky a ověříme postulované hypotézy.

H1a: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **P2p** na elektrodě P3 u lehkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

**H1a: Platná ( $p < 0.04$ ).**

H1b: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **P2p** na elektrodě P4 u lehkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

**H1a: Platná ( $p < 0.04$ ).**

H2a: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **P2p** na elektrodě P3 u středně těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

**H2b: Platná ( $p < 0.02$ ).**

H2b: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **P2p** na elektrodě P4 u středně těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

**H2b: Platná ( $p < 0.01$ ).**

H3a: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **P2p** na elektrodě P3 u těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

**H3a: Platná ( $p < 0.02$ ).**

H3b: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **P2p** na elektrodě P4 u těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

**H3b: Platná ( $p < 0.008$ ).**

H4a: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **N200** na elektrodě P3 u lehkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

**H4a: Neplatná.**

H4b: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **N200** na elektrodě P4 u lehkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

**H4b: Platná ( $p < 0.05$ ).**

H5a: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **N200** na elektrodě P3 u středně těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

**H5a: Platná ( $p < 0.02$ ).**

H5b: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **N200** na elektrodě P4 u středně těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

**H5b: Neplatná.**

H6a: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **N200** na elektrodě P3 u těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

**H6a: Platná ( $p < 0.02$ ).**

H6b: Existuje statisticky signifikantní rozdíl mezi **silou amplitudy** (v  $\mu\text{V}$ ) komponenty **N200** na elektrodě P4 u těžkých AAT úloh u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a dětmi skórujícími v **pásmu průměru**.

**H6b: Neplatná.**

H7a: Existuje statisticky významná korelace mezi **reakčním časem** odpovědí u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a náročností AAT úloh.

**H7a: Platná ( $r = 0.866, p < 0.001$ ).**

H7b: Existuje statisticky významná korelace mezi **reakčním časem** odpovědí u dětí skórujících v **SB IQ** testu v **pásmu průměr** a náročností AAT úloh.

**H7b: Platná ( $r = 0.662$ ,  $p < 0.014$ ).**

H7c: Existuje statisticky významný rozdíl mezi **reakčním časem** odpovědí mezi dětmi skórujícími v **SB IQ** testu v **pásmu nadprůměru** a v **pásmu průměru** ve všech úlohách.

**H7c: Platná (rozdíl 160 ms, Cohen  $d = 1.03$ ,  $p < 0.003$ ).**

## 10. Diskuze

Kvalitní vědecká práce by měla být prezentována s pokorou, proto začínáme diskuzi uvedením nedostatků, kterých jsme si v naší práci vědomi. Těch výrazných nedostatků je hned několik. Za nejpalcivější považujeme nízký počet probandů ve skupině dětí s nadprůměrným výkonem v Stanford-Binetově inteligenčním testu (S-B) a ještě nižší ve skupině dětí s výsledky v pásmu průměru. Dále potom kompletní absenci kontrolní skupiny. Důvod je bohužel jednoduchý – nepodařilo se nám získat dostatečný počet předškolních probandů. Vliv měl především fakt, že jsme výkon v S-B testu i měření EEG prováděli pouze v dopoledních hodinách, aby děti nebyly unavené. Pro rodiče to zpravidla představovalo uvolňování se ze zaměstnání, kvůli čemuž nás spousta rodičů odmítla. Pokud jsme již probandy sehnali, měli jsme problémy najít dostatečně široký rozptyl v naměřené inteligenci (viz tabulka č. 3 v kapitole 6. 3). Obecně se k nám hlásili rodiče, kteří se domnívali, že mají nadané děti.

Hodí se ale zmínit, že nízký počet dětských probandů je v rámci srovnatelných studií běžný. Například Cantlonová (et al., 2006) zařazuje pouze 8 dětských probandů ( $n=8$ ), Templová a Posner (1998) potom 13 dětských probandů ( $n=13$ ). Co se týče kontrolních skupin – Gouet (et al., 2018) má sice 3 skupiny dětských probandů (21, 14 a 33 dětí), ale ani jedna ze skupin nemůže být považována za kontrolní, stejně je tomu i u Cantlonové (et al., 2006) a Lussierové a Cantlonové (2017).

Další problém pak představuje samotný design experimentu, který jsme převzali ze studie Parka a Brannonové (2014). Nespornou výhodou výběru tohoto konkrétního experimentu byla možnost komunikovat s autory a získat tak přesné informace týkající se jednotlivých stimulů. Nicméně experiment obsahoval pouze 5 úrovní obtížnosti a v rámci naší sondy (Plassová, 2017) jsme se potýkali s tím, že předškolní děti takové nastavení úloh nezvládaly. Přidali jsme proto lehké a středně těžké obtížnosti.

Vzhledem k možnostem práce s předškolními dětmi jsme též nemohli zadat velké počty opakování každé úrovně obtížnosti aproximálního numerického tréninku. Od každého dítěte jsme v průměru získali zhruba 30 minut signálu. Luck (2014) nicméně uvádí příklady ERP s podobně dlouhými signály. Při tvorbě výzkumného designu jsme se s těmito metodologickými problémy výrazně potýkali a zvažovali jsme práci naměřit na dospělých lidech (což mimochodem již v současné době provádíme). Drželi jsme se však povzbudivého tvrzení Cohena Kadoshe a Dowkerové (2015), kteří ve své knize *Oxfordská příručka numerické kognice* (v orig. Oxford Handbook of Numerical Cognition) přímo uvádí, že

studií zaměřených na aproximální numerický systém u dětí je opravdu málo, natož u těch předškolních. Existuje tak vysoká poptávka po nových datech.

Experiment jsme dále upravovali, jelikož původní nekontroloval hustotu prvků v množině. Z literatury (např. Anobile, Cicchini, & Burr, 2016) vyplývá, že v případě vysoké hustoty prvků v množině nenarůstá intenzita smyslového vjemu lineárně, ale odmocninou. Problém jsme vyřešili převedením experimentu do programu OpenSesame 3. 1. Zde jsme hustotu nastavili za pomoci Fibonacciho gridu tak, aby byla během celého experimentu konstantní. Do EEG analýzy jsme se pro maximalizaci relevantní neurální aktivity spojené s nesymbolickým numerickým zpracováním rozhodli zařadit pouze správné odpovědi, což ve srovnatelných studiích není běžný postup. Zpravidla je zvykem vyřadit signály, které mají chybovost vyšší než 50%. Nepříjemným, ale očekávaným důsledkem, byly rozdílné počty trialů od každého dítěte. Na tom se však podílel i velký výskyt svalových artefaktů, kdy jsme z celkově naměřených 29 dětí (**n=29, mean 5,86 let**) museli 8 signálů kompletně vyřadit a další 4 signály ze sondy nešly z důvodu odlišných podmínek obtížnosti použít. Téměř všechny děti nám během měření povídaly, některé se i výrazně hýbaly a obecným problémem bylo dívání se po prezentaci stimulu na myš, což představovalo výrazný pohyb hlavy a s ním související svalové artefakty u odpovědi a jistá prodleva v reakčním čase. Ve výsledku pak u lehkých úloh máme 17 probandů (n=17), u středně těžkých už jen 11 (n=12) a u těžkých pouze 10 (n=10), nicméně pro každou ze tří úrovní obtížnosti se nám však podařilo zajistit počty trialů v rámci stovek, což odpovídá podobným EEG studiím (viz např. Templová, Posner, 1998; Hyde, Spelke, 2012). **Stále však počet probandů a nedostatečně odlišné skupiny z hlediska výkonu v S-B testu představují zásadní limitaci pro interpretaci výsledků.** Další významný problém je pak počet trialů, kdy Cohen (2014) uvádí, že ideální je 50 trialů pro každou podmínku na subjekt. Nicméně Larson (et al., 2010; in Cohen, 2014) uvádí, že statisticky robustní a s rozumnou reliabilitou se jeví i 14 trialů na subjekt, což u všech subjektů splňujeme (a zpravidla výrazně převyšujeme).

Nyní přejdeme přímo k interpretaci získaných výsledků. U **lehkých úloh aproximálního aritmetického tréninku (AAT)** můžeme vidět komponentu **N1** na elektrodě P3, kde se skupina dětí s nadprůměrnými výsledky v S-B testu (G) oproti dětem s výsledky pod hranicí průměru (N) dokonce signifikantně liší ( $p < 0.05$ ), a to tak, že G skupina dosahuje vyšší úrovně amplitudy (téměř 4  $\mu V$  oproti 1  $\mu V$ ). Dle Hydea a Spelke (2012) jde o komponentu, která na parietálních elektrodách koreluje s nízkými počty objektů v množině. To dokládá i výskyt **pozdních posteriorních komponent**, které se podle Soltésze a Szucse (2014)

objevují ve chvíli, kdy je absolutní numerická vzdálenost objektu výrazná. U lehkých úloh se množiny objektů liší 20 až 26 prvky, což se jeví jako výrazná numerická vzdálenost. Zdá se tedy, že i v případě většího množství prvků v množině je rozhodující celková plocha, kterou prvky množiny zabírají, což potvrzuje stejné zjištění Olmsteada a Kuhlmeiera (2015). Vyšší amplitudu u skupiny G potom vysvětlujeme výraznějším vlivem paradigmatu filtrace. Luck (2000) uvádí, že slouží k odfiltrování „přebytečných“ informací z vizuálního stimulu. Stejně zjištění jako my učinil i Gouet (et al., 2018), který prezentoval vyšší amplitudu komponenty N1 u skupiny s předchozím AAT tréninkem a nižší chybovostí. Také jinak děti, které si v testu vedly lépe, měly zároveň vyšší amplitudu. U Templové a Posnera (1998) amplituda N1 dosahovala vyšší hodnoty u dětí oproti dospělým. Můžeme tak soudit, že **amplituda N1 se v průběhu ontogeneze mění a s maturací se výška amplitudy zmenšuje.**

Dále u lehkých úloh AAT vidíme statisticky signifikantní ( $p < 0.05$ ) rozdíl mezi skupinou G a N u komponenty N2 na elektrodě P4 (na P3 nesignifikantní). To lze interpretovat jako vyšší úroveň inhibiční kontroly exekutivních funkcí u skupiny G. Polich (1989) uvádí, že amplituda této komponenty s přibývajícím věkem narůstá. Vyšší amplituda N2 tak může odrážet vyšší maturaci mozku u skupiny G.

**U komponenty P2p vidíme odlišné výsledky oproti literatuře (např. Templová, Posner, 1998; Gouet et al., 2018) v průběhu celého experimentu, kdy se výška amplitudy na jednotlivých parietálních elektrodách mění ve prospěch skupiny G nebo skupiny N. To dle našeho názoru spočívá zejména v malém rozptylu naměřené inteligence.** Připomeneme proto práci Templové a Posnera (1998), kde byla amplituda P2p vyšší u dětí oproti dospělým a zároveň práci Goueta (et al., 2018), který prezentoval vyšší amplitudu u skupiny dětí bez předchozího AAT tréninku. Jeví se tak, že amplituda P2p klesá spolu s maturací mozku. Navíc musíme podotknout metodologický problém, kdy **vrchol amplitudy P2p konstantně nastupoval v rámci desítek milisekund dříve u skupiny G.** Signifikance by tak bylo vhodné spočítat manuálně. Na druhou stranu rychlejší nástup P2p u skupiny G v rámci celého experimentu naznačuje existenci vztahu mezi rychlostí nesymbolického numerického zpracování a výkonem v námi zvoleném inteligenčním testu. V úvahu však připadá i fakt, že testování inteligence u předškolních dětí je velmi obtížné a slouží pouze k orientačnímu odhadu. Z naší zkušenosti byly některé děti velmi ostýchavé, což mohlo mít výrazný vliv na výsledky testu. Hodilo by se zde proto komplexnější psychologické testování, abychom zajistili lepší reliabilitu. Vrátime-li se nicméně k získaným výsledkům, pak jsme v tabulce číslo 4 poskytli informace o naměřeném

intelligenčním pásmu dětí a v tabulkách 5 a 6 skóre v aproximálních aritmetických úlohách. Čísla probandů ve všech tabulkách označují stejnou osobu. Ze srovnání vyplývá, že úlohy řešily úspěšně i děti, které si v intelligenčním testu vedly průměrně. I přes výše uvedené problémy se přesto podařilo ukázat, že **reakční čas byl u dětí ze skupiny N signifikantně pomalejší ( $p < 0.003$ ) oproti skupině G**. Z uvedené studie Dera a Dearyho (2017), ale i dalších (např. Vernon, 1983; Sheppardová, Vernon, 2008), vyplývá, že rychlost kognitivního zpracování a reakční čas významně korelují s obecným faktorem inteligence. Zdá se tedy, že aproximální aritmetické úlohy jsou schopné, jak v rámci reakčního času, tak v rychlosti nástupu amplitudy P2p, poukazovat na rozdíl mezi probandy z hlediska jejich obecné inteligence. Pro budoucí testování doporučujeme měřit reakční časy i během behaviorálního testování a manuálně spočítat signifikanci rychlosti nástupu amplitudy P2p.

**Ve středně těžkých úlohách AAT** se podařilo najít statisticky signifikantní ( $p < 0.01$ ) rozdíl v komponentně **N2** na P3 (na P4 nedosahuje signifikance), který se shoduje se zjištěním u lehkých úloh, tj. děti ve skupině G vykazují vyšší inhibiční kontrolu exekutivních funkcí. Zároveň je na elektrodách P4 a P6 pozorovatelný statisticky významný ( $p < 0.01$ ) rozdíl mezi komponentou **P2p** u skupiny G a N, kdy skupina N dosahuje vyšší amplitudy. Opět se ale potýkáme s opačným zjištěním na elektrodě P3, kde má vyšší amplitudu P2p skupina G. Stejně jako u lehkých úloh se opět vyskytují **pozdní posteriorní komponenty**, kde je statisticky významný ( $p < 0.01$ ) rozdíl mezi skupinami G a N, kdy skupina N dosahuje vyšší amplitudy. Je tudíž možné, že **rozpoznání absolutní numerické vzdálenosti představuje pro děti ze skupiny N vyšší kognitivní zátěž**. Toto zjištění opět potvrzuje práce Goueta (et al., 2018), kdy pozdní posteriorní komponenty dosahovaly vyšší amplitudy u dětí bez předchozího AAT tréninku. Bohužel Gouet (tamtéž) neposkytuje EEG data u dětí před tréninkem a není tak možné zjistit, zdali má AAT vliv na výšku amplitudy pozdních posteriorních komponent.

U **těžkých úloh** je interpretace výsledků vzhledem k počtu probandů velmi limitovaná, nicméně jsme od skupiny G nasbírali 298 trialů a od skupiny N 215 trialů, což by případně mohlo zajistit vyšší statistickou robustnost. Znovu se zde opakují jevy jako u předchozí úrovně obtížnosti AAT. U komponenty N2 (na elektrodách P1 a P3, na elektrodě P4 nevýrazné) je opět vyšší amplituda ( $p < 0.01$ ) u skupiny G. U komponenty P2p je amplituda vyšší u skupiny N ( $p < 0.01$ ) na elektrodách P4 a P6, ale opačně je tomu opět i elektrody P3. Opět se vracíme k problému s nízkým rozptylem inteligence výzkumného souboru, nicméně

lze uvažovat i o vlivu lateralizace na komponentu P2p. Dále zde již není patrná komponenta N1, což by odpovídalo velkému množství objektů v množině.

U středně těžké i těžké obtížnosti pak vizuálně můžeme porovnat rozložení aktivity parietálního a parieto-okcipitálního kortexu pomocí skalpových topografií v kapitole 9. 1. Laicky se jeví, že skupina G vykazuje aktivitu spíše levostranně, přičemž skupina N výrazně bilaterálně. Do další analýzy by se hodilo statisticky porovnat a potvrdit tak zjištění Lussierové a Cantlonové (2017), kde na levé straně IPS vykazovali aktivitu spíše dospělí (až 5x více) oproti dětem.

Z prezentovaných výsledků dále vyplývá, že mezi probandy v obou skupinách nebyl nalezen statisticky signifikantní rozdíl v komponentě P2, která souvisí s vizuálním zpracováním. Ta se zpravidla objevovala 200 ms po prezentaci stimulu a u obou skupin byla prakticky totožná.

Z behaviorálních výsledků jsme pracovali pouze s reakčním časem, jelikož výsledky S-B testů je potřeba vzhledem k věku dětí vnímat pouze orientačně. Navíc máme nedostatek zkušeností v práci s inteligenčním testem u dětí. V rámci získaného reakčního času nacházíme již uvedenou výraznou korelaci mezi délkou RT a obtížností úlohy u obou skupin, kdy rozdíl mezi skupinami (rozdíl 160 ms, Cohen  $d = -1.03$ ,  $p < 0.003$ ) přispívá k již nastíněnému vztahu rychlosti nesymbolického numerického zpracování s výkonem v inteligenčním testu.

Přínos práce je v poskytnutí nových poznatků o povaze rozdílu nesymbolického numerického zpracování u předškolních dětí z hlediska jejich naměřené inteligence. Potvrzujeme zjištění vlivu komponent N1, N2, P2p a pozdních posteriorních komponent u nesymbolického numerického zpracování. Zároveň poukazujeme nejen na vliv maturace u všech zjištěných komponent, ale i rozdílu v jejich amplitudě a rychlosti nástupu jako potenciální indikátor inteligence u předškolních dětí. Výsledky je však potřeba brát s ohledem na výše uvedené limitace a další výzkumné šetření by se mělo pokusit tyto limity odstranit. Zároveň se nabízí otázka vlivu AAT na schopnost diferenciací mezi množinami objektů a podobu pozdních posteriorních komponent.



## 11. Závěr

Disertační práce s názvem „Neurální koreláty aritmetických funkcí“ se věnuje deskripci vztahu mozkové aktivity s evolučně vyvinutými kognitivními mechanismy umožňující nesymbolické zpracování čísla a zároveň tvoří *sine qua non* pro následné symbolické zpracování, tedy včetně aritmetiky. Zmíněné evolučně vyvinuté mechanismy jsou dva – *system sledování objektu* a *aproximální numerický systém*. Po rešerši literatury a získání výrazné výzkumné evidence jsme ve výzkumné části zvolili úlohy zaměřené na aproximální numerický systém. Ten představuje stěžejní mechanismus pro rozvoj symbolické matematiky a četné studie dokonce uvádí, že jeho tréninkem dochází k transferu do oblasti symbolické matematiky.

Získané výsledky naší práce poskytují nové poznatky o povaze rozdílu nesymbolického numerického zpracování u předškolních dětí z hlediska jejich naměřené inteligence. Zároveň potvrzujeme současné paradigma vlivu komponent N1, N2, P2p a pozdních posteriorních komponent na nesymbolické numerické zpracování.

## 12. Shrnutí

Teoretická část této práce se zabývala numerickou kognicí a nesymbolickým numerickým zpracováním. Představili jsme si historické hledisko a porovnali ho s moderním výzkumem. Identifikovali jsme si neurální substrát, který dle rešerše literatury umožňuje jedinci nesymbolické numerické zpracování, ale zároveň jsme pozornost věnovali i symbolickému zpracování a konkrétně potom aritmetice. Specificky jsme v teoretické části vymezili prostor pro srovnání numerické kognice u dospělých a u dětí. Stejně tomu bylo i v kapitolách pojednávajících o elektroencefalografii a studiích založených na evokovaných potenciálech. Vzhledem k použitým vizuálním stimulům jsme i krátce pojednali o vývoji vizuoprostorového zpracování u dětí.

V empirické části jsme posléze představili zvolenou metodologii výzkumu, kde jsme stanovili cíl výzkumu a postulovali celkem 9 výzkumných hypotéz. Dále jsme se věnovali představení designu experimentu. Velký prostor jsme věnovali tvorbě aproximálních aritmetických úloh a posléze představení Stanford-Binetova testu. V další kapitole empirické části jsme popsali kompletní postup zpracování naměřených dat od jejich čištění, filtrace po tvorbu epoch. V kapitole Výsledky jsme postupně prezentovali zjištění získané analýzou EEG dat a v další části jsme uvedli výsledky z behaviorálních dat. Získané výsledky jsme následně intepretovali v diskuzi, kde jsme je porovnali se srovnatelnými studii a potvrdili tak většinu současných paradigmat v této oblasti. Zároveň jsme přispěli vlastními závěry, které naznačují roli nástupu komponent (v ms) pro nesymbolické numerické zpracování a amplitudu těchto komponent (v  $\mu\text{V}$ ) jako potenciální indikátor inteligence u předškolních dětí. Přesněji pak zejména k rychlosti kognitivního zpracování, která vykazuje významnou korelaci s obecným faktorem inteligence.

## Seznam literatury

1. Andres, M., Pelgrims, N., Michaux, N., Olivier, E., Pesenti, M. (2011). Role of distinct parietal areas in arithmetic: An fMRI-guided TMS study. *Neuroimage*, 54 (4).
2. Anobile, G., Cicchini, G., M., Burr, D. C. (2016). Number As a Primary Perceptual Attribute: A Review. *Perception*; 45 (1-2), 5–31.
3. Ansari, D., Garcia, N., Lucas, E., Hamon, K., Dhital, B. (2005). Neural correlates of symbolic number processing in children and adults. *NeuroReport*, 16, 1769–1773.
4. Au, J., Jaeggi, S. M., and Buschkuhl, M. (2018). Effects of non-symbolic arithmetic training on symbolic arithmetic and the approximate number system. *Acta Psychologica*. 185, 1–12.
5. Aydin, K., Ucar, A., Oguz, K. K., Okur, O. O., Agayev, A., Unal, Z., et al. (2007). Increased gray matter density in the parietal cortex of mathematicians: a voxel-based morphometry study. *American Journal of Neuroradiology*. 28 (10), 1859–1864.
6. Barriga-Paulino, C. I., Flores, A. B., & Gómez, C. M. (2011). Developmental changes in the EEG rhythms of children and young adults: Analyzed by means of correlational, brain topography and principal component analysis. *Journal of Psychophysiology*, 25 (3), 143–158.
7. Bastos, A. M., Vezoli, J., Bosman, C. A., Schoffelen, J. M., Oostenveld, R., Dowdall J. R., De Weerd, P., Kennedy, H., Fries, P. (2015). Visual areas exert feedforward and feedback influences through distinct frequency channels. *Neuron*, 85 (2), 390–401.
8. Benasich, A. A., Gou, Z., Choudhury, N., Harris, K. D. (2008). Early Cognitive and Language Skills are Linked to Resting Frontal Gamma Power Across the First Three Years. *Behavioural Brain Research*, 195 (2), 215–222.
9. Berger, H. (1926). Über Rechenstorunger bei Herderkraunkunger des Grosshirns. *Arch. Psychiatr. Nervenker.*, 78, 236–263.
10. Berlová, M. M., Dukeová, E. S., Mayová, J., Rosenbergerová, L. R., Moore, E. N., VanMeter, J., et al. (2010). Functional Anatomy of Listening and Reading Comprehension during Development. *Brain and Language*. 114 (2), 115–125.
11. Binterová, H., & Hošpesová, A. (2003). Objevování v matematickém vyučování podporované Excelem. *Univ. S. Boh. Dept. Math. Rep.*, 10, 267–273.
12. Binterová, H., Milota, J., & Vaníček, J. (2005). Global School – virtuální prostředí pro výuku matematiky na ZŠ formou e-learningu. *Univ. S. Boh. Dept. Math. Rep.*, 13.

13. Boller, F., Grafman, J. (1983). Acalculia: Historical development and current significance. *Brain and Cognition*, 2 (3), 205–223.
14. Brannonová, E. M. (2006). The representation of numerical magnitude. *Current Opinion in Neurobiology*, 16, 222–229.
15. Brannonová, E. M., & Terrace H. S. (1998). Ordering of the numerosities 1 to 9 by monkeys. *Science*, 282, 746–749.
16. Bressler, S. L., Richter, C. G. (2014). Interareal oscillatory synchronization in top-down neocortical processing. *Curr Opin Neurobiol.*, 31C, 62–66.
17. Bressler, S. L., Seth, A. K. (2011). Wiener–Granger Causality: A well established methodology. *NeuroImage*. 58 (2), 323–329.
18. Britz, J., Van De Ville, D., Michel, C. M., (2010). BOLD correlates of EEG topography reveal rapid resting-state network dynamics. *Neuroimage*, 52 (4), 1162–1170.
19. Buschman, T. J. et al. (2007). Top-Down Versus Bottom-Up Control of Attention in the Prefrontal and Posterior Parietal Cortices. *Science*, 315 (5820), 1860–1862.
20. Buzsáki, G. (2006). *Rhythms of the Brain*. New York: Oxford University Press. 4.
21. Cantlonová, J. F., Brannonová, E. M., Carter, E. J., & Pelphrey, K. A. (2006). Functional imaging of numerical processing in adults and 4-y-old children. *PLoS Biology*, 4 (5), e125.
22. Cantlonová J. F., Libertus, M. E., Pinel, P., Dehaene, S., Brannonová, E. M., Pelphrey, K. A. (2009). The neural development of an abstract concept of number. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 21 (11), 2217–2229.
23. Castelli, F., Glaser, D. E., & Butterworth, B. (2006). Discrete and analogue quantity processing in the parietal lobe: a functional MRI study. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA*, 103, 4693–4698.
24. Castronovo, J., & Gobel, S. M. (2012). Impact of high mathematics education on the number sense. *PLoS ONE*, 7 (4), e33832.
25. Cohen Kadosh R., Cohen Kadosh K., & Henik A. (2008). When brightness counts: the neuronal correlate of numerical luminance interference. *Cerebral Cortex*, 18, 337–343.
26. Cohen Kadosh, R., Dowkerová, A. (2015). *The Oxford Handbook of Numerical Cognition*. Oxford: Oxford University Press.
27. Čihák, R. (1997). *Anatomie 3*. Praha: Grada.

28. Davis, H., & Perusse, R. (1988). Numerical competence in animals: definitional issues, current evidence, and a new research agenda. *Behavioral and Brain Sciences*, 11, 561–615.
29. Dehaene, S. (1999). *The number sense: How the mind creates mathematics*. New York: Oxford University Press.
30. Dehaene, S. (2011). *The number sense: How the mind creates mathematics*. 2. vyd. New York: Oxford University Press.
31. Dehaene, S., & Brannonová, E. (Eds.). (2011). *Space, time and number in the brain: Searching for the foundations of mathematical thought*. San Diego, CA, US: Elsevier Academic Press.
32. Dehaene S.; Cohen L. (1991). "Two mental calculation systems". *Neuropsychologia*. 29 (11), 1045–1074.
33. Dehaene, S., & Changeux, J. P. (1996). Cerebral networks for number processing: Evidence from a case of posterior callosal lesion. *NeuroCase*, 2, 155–174.
34. Dehaene, S., Izard, V., & Piazza, M. (2005). *Control over non-numerical parameters innumerosity experiments*. Dostupné z [www.unicog.org/publications/piazza\\_tuningcurves\\_neuron2004.pdf](http://www.unicog.org/publications/piazza_tuningcurves_neuron2004.pdf)
35. Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20, 487–506.
36. Der, G., Deary, I. J. (2017). The relationship between intelligence and reaction time varies with age: Results from three representative narrow-age age cohorts at 30, 50 and 69 years. *Intelligence*, 64, 89–97.
37. D’Errico, F. et al. (2012). Early evidence of San material culture represented by organic artifacts from Border Cave, South Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 109 (33), 13214–13219.
38. De Smedt, B., Noël, M. P., Gilmore, C., and Ansari, D. (2013). How do symbolic and non-symbolic numerical magnitude processing skills relate to individual differences in children’s mathematical skills? A review of evidence from brain and behavior. *Trends Neurosci. Educ.*, 2, 48–55.
39. D’Esposito, M. (2002). *Neurological Foundations of Cognitive Neuroscience*. MIT Press.
40. DeWind, N. K., & Brannonová, E. M. (2012). Malleability of the approximate number system: Effects of feedback and training. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6.

41. Dobkins, K. R., Anderson, C. M. (2002). Color-based motion processing is stronger in infants than in adults. *Psychol. Sci.* 13, 76–80.
42. Eger, E., Sterzer, P., Russ, M. O., Giraud, A. L., & Kleinschmidt, A. (2003). A supramodal number representation in human intraparietal cortex. *Neuron*, 37, 719–725.
43. Eisermann, M., Kaminska, A., Berdougo, B., Brunet, M. L. (2010) Melatonin: experience in its use for recording sleep EEG in children and review of the literature. *Neuropediatrics*, 41 (4), 163–166.
44. Emerson, R. W., Cantlonová, J. F. (2012). Early math achievement and functional connectivity in the fronto-parietal network. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2 (S1), S139–S151.
45. Faber, J. (2001). *EEG atlas do kapsy*. Praha: Triton.
46. Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8 (7), 307–314.
47. Flombaum, J. I., Santos, L. R., and Hauser, M. D. (2002). Neuroecology and psychological modularity. *Trends in Cognitive Sciences*, 6 (3), 106–108.
48. Fodor, J. A. (1983). *The Modularity of Mind*. Bradford Books. MIT Press, Cambridge, MA.
49. Folta, J. (1997). Věstonická vrubovka. Sloužil paleolitický předmět k bijekci mezi prvky dvou množin? *Vesmír*, 76, 310.
50. Fuhs, M. W., & McNeil, N. M. (2013). ANS acuity and mathematics ability in preschoolers from low-income homes: Contributions of inhibitory control. *Developmental Science*, 16 (1), 136–148.
51. Gallistel, C. R., 2011 In Dehaene, S., & Brannonová, E. (Eds.). (2011). *Space, time and number in the brain: Searching for the foundations of mathematical thought*. San Diego, CA, US: Elsevier Academic Press.
52. Gallistel, C. R., & Gelman, R. (2000). Non-verbal numerical cognition: From reals to integers. *Trends in Cognitive Sciences*, 4 (2), 59–65.
53. Gebuis T., Reynvoet B. (2013). The neural mechanisms underlying passive and active processing of numerosity. *Neuroimage*, 70, 301–307.
54. Gelman, R. & Gallistel, C. R. (1978). *The child's understanding of number*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
55. Gerstmann, J. (1940). Syndrome of finger agnosia, disorientation for right and left, agraphia, acalculia. *Archives of Neurology and Psychology*, 44, 398–408.

56. Gilmore, C. K., McCarthy, S. E., & Spelke, E. S. (2007). Symbolic arithmetic knowledge without instruction. *Nature*, 447, 589–591.
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, 394–406.
58. Gobel, S. M., Watson, S. E., Lervag, A., & Hulme, C. (2014). Children’s arithmetic development: It is number knowledge, not the approximate number sense, that counts. *Psychological Science*, 25 (3), 789–798.
59. Gordon, P. (2004). Numerical cognition without words: Evidence from Amazonia. *Science*, 306, 496–499.
60. 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, 28.
61. Hadj-Bouziane, F., Meunier, M., Boussaoud, D. (2003). Conditional visuo-motor learning in primates: a key role for the basal ganglia. *Journal of Physiology-Paris*, 97 (4-6), 567-579.
62. 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, 804–826.
63. Halberda, J., & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the “Number Sense”: The approximate number system in 3-, 4-, 5-, and 6-year olds and adults. *Developmental Psychology*, 44, 1457–1465.
64. Halberda, J., Ly, R., Wilmer, J. B., Naiman, D. Q., & Germine, L. (2012). Number sense across the lifespan as revealed by a massive Internetbased sample. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA*, 109, 11116–11120.
65. Halberda, J., Mazocco, M. M., & Feigenson, L. (2008). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, 455, 665–668.
66. Hasko, S., Bruder, J., Bartling, J., Schulte-Körne, G. (2012). N300 indexes deficient integration of orthographic and phonological representations in children with dyslexia. *Neuropsychologia*, 50 (5), 640–654.
67. Hauser, M. D., Carey, S., & Hauser, L. B. (2000). Spontaneous number representation in semifree-ranging rhesus monkeys. *Proceeding of the Royal Society of London B*, 267, 829–833.

68. Hécaen, H., Angelergues, R., & Houllier, S. (1961). Les variétés cliniques de acalculies au cours de lésions retrorolandiques: Approche statistique du problème. *Revue Neurologique*, 105, 85–103.
69. Heil, M., Osman, A., Wiegelmann, J., Rolke, B., & Henninghausen, E., (2000). N200 in the Eriksen-task: Inhibitory executive process?. *Journal of Psychophysiology*, 14, 218–225.
70. Henschen, S. E. (1920). *Klinische und anatomische Beiträge zur Pathologie des Gehirns*. Stockholm: Nordiska Bokhandeln.
71. Henschen, S. E. (1919). Über Sprach-, Musik- und Rechenmechanismen und ihre Lokalisation im Großhirn. *Zeitschrift für die gesamte neurologie und psychiatry*, 52, 273–298.
72. Hittmair-Delazer, M., Sailer, U., Benke, T. (1995). Impaired arithmetic facts but intact conceptual knowledge--a single-case study of dyscalculia. *Cortex*, 31 (1), 139–147.
73. Holloway, I. D., & Ansari, D. (2009). Mapping numerical magnitudes onto symbols: The numerical distance effect and individual differences in children's mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103 (1), 17–29.
74. Hrazdira, I. a Mornstein, V. (2001). *Lékařská biofyzika a přístrojová technika*. Brno: Neptun.
75. Hubbard, E. M., Diester, I., Cantlon, J. F., Ansari, D., vanOpstal, F., Troiani, V. (2008). The Evolution of Numerical Cognition: From Number Neurons to Linguistic Quantifiers. *Journal of Neuroscience*, 28 (46), 11819-11824.
76. Hyde, C. D. (2011). Two Systems of Non-Symbolic Numerical Cognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, 150.
77. Hyde, C. D., Boas, D. A., Blair, C, Carey, S. (2010). Near-infrared spectroscopy shows right parietal specialization for number in pre-verbal infants. *Neuroimage*. 53, 647–652.
78. Chochon, F., Cohen, L., van de Moortele, P. F., & Dehaene, S. (1999). Differential contributions of the left and right inferior parietal lobules to number processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11, 617–630.
79. Chou, T. L., Chen, C. W., Wu, M. Y., Booth, J. R. (2009). The role of inferior frontal gyrus and inferior parietal lobule in semantic processing of Chinese characters. *Exp Brain Res.*, 198 (4), 465–475.



80. Inglis, M., Attridge, N., Batchelor, S., & Gilmore, C. (2011). Non-verbal number acuity correlates with symbolic mathematics achievement: But only in children. *Psychonomic Bulletin and Review*, 18 (6), 1222–1229.
81. Isaacs, E. B., Edmonds, C. J., Lucas, A., & Gadian, D. G. (2001). Calculation difficulties in children of very low birthweight: A neural correlate. *Brain*, 124 (9), 1701–1707.
82. Izard, V., Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (2008). Distinct cerebral pathways for object identity and number in human infants. *PLoS Biology*, 6, e11.
83. Izard, V., Sann, C., Spelke, E. S., & Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106 (25), 10382–10385.
84. Jacky, A., Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M. (2018). Effects of non-symbolic arithmetic training on symbolic arithmetic and the approximate number system. *Acta Psychologica*. 185, 1–12.
85. Kahnová, H., Whitaker, H. (1991). Acalculia: An historical review of localization. *Brain and Cognition*, 17 (2), 102–115.
86. Kaku, M. (2014). *The future of the mind: The scientific quest to understand, enhance, and empower the mind*. Doubleday; 1st edition.
87. Karmiloff-Smith, A. (1998). Development itself is the key to understanding developmental disorders. *Trends in cognitive sciences*, 2 (10), 389–398.
88. Kaufman, E. L., Lord, M. W., Reese, T. W., & Volkman, J. (1949). The discrimination of visual number. *American Journal of Psychology*, 62 (4), 498–525.
89. Kaufmannová, L., Vogel, S. E., Starke, M., Kremser, C., Schocke, M., & Wood, G. (2009). Developmental dyscalculia: compensatory mechanisms in left intraparietal regions in response to nonsymbolic magnitudes. *Behavioral and Brain Functions*, 5, 35.
90. Kaufmannová, L., Wood, G., Rubinsten, O., Henik, A. (2011). Meta-analyses of developmental fMRI studies investigating typical and atypical trajectories of number processing and calculation. *Developmental neuropsychology*, 36 (6), 763–787.
91. Kersey, A. J., Cantlonová, J. F. (2017). Primitive Concepts of Number and the Developing Human Brain. *Lang Learn Dev.*, 13 (2), 191–214.
92. Knops, A., Thirion, B., Hubbard, E. M., Michel, V., & Dehaene, S. (2009). Recruitment of an area involved in eye movements during mental arithmetic. *Science*, 324, 1583–1585.

93. Kopell, N., Ermentrout, G. B., Whittington, M. A., Traub, R. D. (2000). Gamma rhythms and beta rhythms have different synchronization properties. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 97 (4), 1867-1872.
94. Krajča, V., Mohylová, J. (2011). *Číslíkové zpracování neurofyziologických signálů*. ed. 1. ČVUT Praha, 167 s.
95. Kravitz, D. J., Saleem, K. S., Baker, C. I., Mishkin, M. (2011). A new neural framework for visuospatial processing. *Nature reviews. Neuroscience*, 12 (4), 217–230.
96. Kropotov, J. D. (2009). *Quantitative EEG, Event-Related Potentials and Neurotherapy*. Academic Press.
97. Kutasová, M., Federmeier, K. D. (2000). Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension. *Trends in Cognitive Sciences*. 4 (12), 463–470.
98. LeFevre, J. A. (2016). Numerical cognition: Adding it up. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 70 (1), 3–11.
99. Lemer, C., Dehaene, S., Spelke, E., Cohen, L. (2003). Approximate quantities and exact number words: dissociable systems. *Neuropsychologia*, 41 (14), 1942–1958.
100. Levin, H. S. & Spiers, P. A. (1985). Acalculia. In Heilman, K. M. & Valenstein, E. (Eds.) *Clinical Neuropsychology* (2012). New York: Oxford University Press.
101. Lewandowsky, M., Stadelmann, E. (1908). Über einen bemerkenswerten Fall von Hirnblutung und über Rechenstörungen bei Herderkrankung des Gehirns. *Journal für Psychologie und Neurologie*, 11, 249–265.
102. Libertus, M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2013). Numerical approximation abilities correlate with and predict informal but not formal mathematics abilities. *Journal of Experimental Child Psychology*, 116 (4), 829–838.
103. Libertus, M. E., Odic, D., & Halberda, J. (2012). Intuitive sense of number correlates with math scores on college-entrance examination. *Acta Psychologica*, 141 (3), 373–379.
104. Light, G. A., Williams, L. E., Minow, F., Sprock, J., Rissling, A., Sharp, R., Swerdlow, N. R., Braff, D. L. (2010). Electroencephalography (EEG) and Event-Related Potentials (ERP's) with Human Participants. *Curr Protoc Neurosci*, 52 (1), 6.25.1–6.25.24.

105. Lo, Y. H., Liang, W. K., Lee, H. W., Wang, C. H., Tzeng, O. J., Hung, D. L., Cheng, S. K., Juan, C. H. (2013). The neural development of response inhibition in 5- and 6-year-old preschoolers: an ERP and EEG study. *Dev Neuropsychol*, 38 (5), 301–316.
106. Luck, S. J. (2014). *An Introduction to the Event-Related Potential Technique*. MIT Press.
107. Luck, S. J., Woodman, G. E., Vogel, E. K. (2000). Event-related potential studies of attention. *Trends in Cognitive Sciences*, 4, 432–440.
108. Luria, A. R. (1973). *The working brain*. New York: Basic Books. Mazzocco, M. M. M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011a). Impaired acuity of the approximate number system underlies mathematical learning disability (dyscalculia). *Child Development*, 82 (4), 1224–1237.
109. Lussierová, C. A., Cantlonová, J. F. (2017). Developmental bias for number words in the intraparietal sulcus. *Dev Sci.*, 20(3), 201.
110. Malmivuo, J., Plonsey, R. (1995). *Bioelectromagnetism*. Oxford University Press, New York.
111. Matousek, M., Peterson, I. (1973). Frequency analysis of the EEG in normal children and adolescents. In P. Kellaway, I. Peterson (Eds.), *Automation of Clinical Electroencephalography*. Raven Press, New York, 75–102.
112. Mazzocco, M. M. M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011b). Preschoolers' precision of the approximate number system predicts later school mathematics performance. *PLoS ONE*, 6 (9), 1–8.
113. McCloskey, M. (1992). Cognitive mechanisms in numerical processing: Evidence from acquired dyscalculia. *Cognition*, 44, 107–157.
114. McCloskey, M., Caramazza, A., Basili, A. et al. (1985). Cognitive mechanisms in number processing and calculation: Evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition*, 4, 171–196.
115. McCloskey, M., Harley, W., & Sokol, S. M. (1991). Models of arithmetic fact retrieval: An evaluation in light of findings from normal and brain-damaged subjects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17 (3), 377–397.
116. McCrink, K., & Wynn, K. (2007). Ratio abstraction by 6-month-old infants. *Psychological Science*, 18, 740–745.

117. Merritt, D. J, DeWind, N. K., & Brannonová, E. M. (2012). Comparative cognition of number representation. In T. R. Zentall & E. A. Wasserman (Eds.), *The oxford handbook of comparative cognition* (s. 451–476). 2. vyd. New York: Oxford University Press.
118. Milner, A. D., Goodale, M. A. (1995). *The Visual Brain in Action*. New York: Oxford University Press.
119. Misra, U. K., Kalita, J. (2005). *Clinical Electroencephalography*. Elsevier, India.
120. Moeller, K., Fischer, U., Nuerk, H. C., and Cress, U. (2015). Computers in mathematics education – Training the mental number line. *Comput. Human Behav.* 48, 597–607.
121. Moráň, M. (1995). *Praktická elektroencefalografie*. Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví.
122. Mussolin, C., Mejias, S., & Noël, M. P. (2010). Symbolic and nonsymbolic number comparison in children with and without dyscalculia. *Cognition*, 115 (1), 10–25.
123. Myers, T. (2015). Arithmetic Memory Is Modality Specific. *PLoS ONE* 10(12).
124. Mysliveček, J. (2009). *Základy neurovědy*. 2. vydání. Praha: Triton.
125. Negen, J., & Sarnecka, B. W. (2015). Is there really a link between exact-number knowledge and approximate number system acuity in young children? *British Journal of Developmental Psychology*, 33, 92–105.
126. Newton, I. (1687). *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. High-resolution presentation of the Gunnerus Library's copy.
127. Nieder, A. (2013). Coding of abstract quantity by ‘number neurons’ of the primate brain. *Journal of Comparative Physiology A*, 199, 1–16.
128. Nieder, A. & Dehaene, S. (2009). Representation of number in the brain. *Annual Review of Neuroscience*, 32, 185–208.
129. Nieder, A., Freedman, D. J., Miller, E. K. (2002). Representation of the quantity of visual items in the primate prefrontal cortex. *Science*, 297 (5587), 1708-11.
130. Norman, J. (2002). Two visual systems and two theories of perception: An attempt to reconcile the constructivist and ecological approaches. *Behav Brain Sci.*, 25, 73–144.
131. Novikova, S. I., Malakhovskaya, E. V., Pushina, N. P., Tsetlin, M. M., Filatov, A. I., Posikera, I. N., Stroganova, T. A. (2009). Relationships between EEG  $\theta$  and  $\alpha$  spectral amplitudes and cognitive ability in preschool children. *Human Physiology*, 35 (4), 409–415.

132. Ogawa, T., Sonoda, H., Ishiwa, S., Goto, K., Kojou, M., Sawaguchi, H., Wakayama, K., Suzuki, M. (1989). Developmental characteristics of the beta waves of EEG in normal healthy children. *No to Hattatsu*, 21, 417–423.
133. Orekhova, E. V., Stroganova, T. A., Posikera, I. N., Elam, M. (2006). EEG theta rhythm in infants and preschool children. *Clinical Neurophysiology*, 117, 1047–1062.
134. Owen, A. M., Hampshire, A., Grahn, J. A., Stenton, R., Dajani, S., Burns, A. S., Howard, R. J. & Ballard, G. C. (2010). Putting brain training to the test. *Nature*, 465 (7299), 775–778.
135. Park, J., Bermudez, V., Roberts, R. C., & Brannonová, E. M. (2016). Non-symbolic approximate arithmetic training improves math performance in preschoolers. *Journal of Experimental Child Psychology*, 152 (12), 278–293.
136. Park, J., Brannonová, E. M. (2013). Training the approximate number system improves math proficiency. *Psychological Science*, 24, 2013–2019.
137. Park, J., Brannonová, E. M. (2014). Improving arithmetic performance with number sense training: an investigation of underlying mechanism. *Cognition*, 133, 188–200.
138. Paulino, C., Flores, A., Gomez, C. M. (2011). Developmental Changes in the EEG Rhythms of Children and Young Adults Analyzed by Means of Correlational, Brain Topography and Principal Component Analysis. *Journal of Psychophysiology*, 25 (3), 143–158.
139. Piaget, J. (1954). *The construction of reality in the child*. New York: Ballentine.
140. Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A. N., Berteletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., et al. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia. *Cognition*, 116 (1), 33–41.
141. 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.
142. 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.
143. Piazza, M. (2011). Subitizing reflects visuo-spatial object individuation capacity. *Cognition*, 121 (1), 147–153.
144. Pinel, P., Dehaene, S., Riviere, D., & LeBihan, D. (2001). Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *Neuroimage*, 14, 1013–1026.

145. Plassová, M., Stuchlíková, I., Vavrečka, M. (2017). Úvod do aproximálního numerického systému. *Pedagogika: časopis pro pedagogickou teorii a praxi*. Praha: Státní nakladatelství učebnic 1951-, 2017, 67(2), 161-176.
146. Plassová, M., Tesař, M., Vavrečka, M., & Valuchová, K. (2016). Approximate number systém in children. In M. McGreevy & R. Rita (Eds.), *Proceedings of the 6th Biannual CER Comparative European Research Conference* (182–187). London: Science.
147. Plháková, A. (2009). *Učebnice obecné psychologie*. Praha: Academia.
148. Polich, J., Ladish, C., Burns, T. (1990). Normal variation of P300 in children: age, memory span, and head size. *International Journal of Psychophysiology*, 9 (3), 237–248.
149. Polich, J. (1989). Updating P300: An Integrative Theory of P3a and P3b. *Clin Neurophysiol.* 118 (10), 2128–2148.
150. Popescu, T., Sader, E., Schaer, M., Thomas, A., Terhune, D. B., Dowkerová, A., Mars. R. B. (2019). The brain-structural correlates of mathematical expertise. *Cortex*, 114, 140–150.
151. Price, G. R., Palmer, D., Battista, C., & Ansari, D. (2012). Nonsymbolic numerical magnitude comparison: Reliability and validity of different task variants and outcome measures, and their relationship to arithmetic achievement in adults. *Acta Psychologica*, 140 (1), 50–57.
152. Quiaquinto, M. (2015). *Philosophy of Number*. In Cohen Kadosh, R., Dowkerová, A. (2015). *The Oxford Handbook of Numerical Cognition*. Oxford: Oxford University Press.
153. Rangaswamy, M., Porjesz, B., Chorlian, D. B., Wang, K., Jones, K. A., Bauer, L. O., Rohrbaugh, J., O'Connor, S. J., Kuperman, S., Reich, T., Begleiter, H. (2002). Beta power in the EEG of alcoholics. *Biological Psychology*. 52 (8), 831–842.
154. Redick, T. S., Shipstead, Z., Harrison, T. L., Hicks, K. L., Fried, D., Hambrick, D. Z., Kane, M. J. & Engle, R. W. (2013). No evidence of intelligence improvement after working memory training: a randomized, placebo-controlled study. *Journal of Experimental Psychology*, 142, 359–379.
155. Roitman, J. D., Brannonová, E. M., & Platt, M. L. (2012). Representation of numerosity in posterior parietal cortex. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 6, 25.
156. Rotzer, S., Kucian, K., Martin, E., von Aster, M., Klaver, P., & Loenneker, T. (2008). Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia. *Neuroimage*, 39, 417–422.

157. Rotzer, S., Loenneker, T., Kucian, K., Martin, E., Klaver, P., & von Aster, M. (2009). Dysfunctional neural network of spatial working memory contributes to developmental dyscalculia. *Neuropsychologia*, 47, 2859–2865.
158. Rusconi, E., Pinel, P., Eger, E., LeBihan, D., Thirion, B., Dehaene, S., Kleinschmidt, A. (2009). A disconnection account of Gerstmann syndrome: functional neuroanatomy evidence. *Annals of Neurology*, 66 (5), 654–662.
159. Rykhlevskaia, E., Uddin, L. Q., Kondos, L., & Menon, V. (2009). Neuroanatomical correlates of developmental dyscalculia: combined evidence from morphometry and tractography. *Frontiers in Human Neuroscience*, 3 (51), 1–13.
160. Samková, L. (2013). Využití programu GeoGebra při nácviu odhadů. Sborník 6. konference *Užití počítačů ve výuce matematiky*, 323–336.
161. Sasanguie, D., Defever, E., Maertens, B., & Reynvoet, B. (2013). The approximate number system is not predictive for symbolic number processing in kindergartners. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 1–26.
162. Sasanguie, D., Gobel, S. M., Moll, K., Smets, K., & Reynvoet, B. (2013). Approximate number sense, symbolic number processing, or number-space mappings: What underlies mathematics achievement? *Journal of Experimental Child Psychology*, 114 (3), 418–431.
163. Sella, F., Hartwrightová, Ch., Cohen Kadosh, R., (2018). *The Neurocognitive Bases of Numerical Cognition*. In book: Stevens' Handbook of Experimental Psychology and Cognitive Neuroscience.
164. Sheppard, L., Vernon, P. A. (2008). Intelligence and speed of information-processing: A review of 50 years of research. *Personality and Individual Differences*, 44 (3), 535–551.
165. Schacter, D. L., Gilbert, D. T., & Wegner, D. M. (2010). *Psychology* (2. vyd.). New York: Worth.
166. Schneider, M., Beeres, K., Coban, L., Merz, S., Schmidtová, S., Stricker, J., et al. (2017). Associations of non-symbolic and symbolic numerical magnitude processing with mathematical competence: a meta-analysis. *Dev. Sci.* 20, e12372.
167. Soltész F., Szücs D. (2014). Neural adaptation to nonsymbolic number and visual shape: an electrophysiological study. *Biol. Psychol.* 103, 203–211.
168. Sousa, D. (2010). Mind, brain, and education: *Neuroscience implications for the classroom*. Bloomington, IN: Solution Tree.

169. Spaepen, E., Coppola, M., Spelke, E. S., Carey, S. E., & Goldin-Meadow, S. (2011). Number without a language model. *Proceeding of the National Academy of Sciences of the USA*, 108, 3163–3168.
170. Spencer, K., Abad, E. & Donchin, E. (2000). On the search for the neurophysiological manifestation of recollective experience. *Psychophysiology*, 37, 494–506.
171. Starkey, P., & Cooper, R. G. (1980). Perception of numbers by human infants. *Science*, 210, 1033–1035.
172. Stiles, J., Paul, B., & Ark, W. (2008). *The development of visuospatial processing*. In C. A. Nelson & M. Luciana (Eds.), *Handbook of developmental cognitive neuroscience* (2nd ed., pp. 521–540). Cambridge, MA: The MIT Press.
173. Sturzeneker Trés, E., Dozzi Brucki, S. M. (2014). Visuospatial processing: A review from basic to current concepts. *Dementia & Neuropsychologia*, 8 (2), 175–181.
174. Sur, S., Sinha, V. K. (2009). *Event-related potential: An overview*. *Indian Psychiatry Journal*. 18 (1), 70–73.
175. Šíkl, R. (2012). *Zrakové vnímání*. Praha: Grada.
176. Templová, E., Posner, M. (1998). Brain mechanisms of quantity are similar in 5-year-olds and adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 95 (13), 7836–7841.
177. Thiele, A., Dobkins, K. R., Albright, T. D. (2001). Neural correlated of chromatic motion perception. *Neuron*, 32, 351–358.
178. Tibber, M. S., Manasseh, G. S., Clarke, R. C., Gagin, G., Swanbeck, S. N., Butterworth, B., et al. (2013). Sensitivity to numerosity is not a unique visuospatial psychophysical predictor of mathematical ability. *Vision Research*, 89, 1–9.
179. Trojan, S. et al. (2003). *Lékařská fyziologie*. 4. vydání. Praha: Grada.
180. Ungerleider, L. G. (1995). Functional brain imaging studies of cortical mechanisms for memory. *Science*, 270, 769–775.
181. Ungerleider, L. G., Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In Ingle, D. J., Goodale, M. A., Mansfield, R. J. W., eds., *Analysis of Visual Behavior*, 549–586. Cambridge, MA: MIT Press.
182. Van Essen, D. C., Anderson, C. H., Felleman, D. J. (1992). Information processing in the primate visual system: An integrated systems perspective. *Science*, 255, 419–423.
183. Van Marle, K., Chu, F. W., Li, Y., Geary, D. C. (2014). Acuity of the approximate number system and preschoolers' quantitative development. *Developmental science*. 17 (4), 492–505.



184. Vernon, P. A. (1983). Speed of information processing and general intelligence. *Intelligence*, 7 (1), 53–70.
185. Von Aster, M. G., Shalev, R. (2007). Number development and developmental Dyscalculia. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 49, 868–873.
186. Wadsworth, B. J. (1989). *Piaget's Theory of Cognitive and Affective Development*. Psychology Press Ltd; 4th Revised edition.
187. Wang, A. L., Mouraux, A., Liang, M., Iannetti, G. D. (2008). The Enhancement of the N1 Wave Elicited by Sensory Stimuli Presented at Very Short Inter-Stimulus Intervals is a General Feature across Sensory Systems. *PLoS ONE*. 3 (12).
188. Wang, J., Odic, D., Halberda, J. & Feigenson, L. (2016). Changing the precision of preschoolers' approximate number system representations changes their symbolic math performance. *Journal of Experimental Child Psychology*, 147, 82–99.
189. Wei, W., Deng, W., Chen, C., He, J., Qin, J., Kovas, Y. (2018). A Mechanistic Study of the Association Between Symbolic Approximate Arithmetic Performance and Basic Number Magnitude Processing Based on Task Difficulty. *Front Psychol.*, 9 (1551).
190. Welford, A. T. (1960). The measurement of sensory-motor performance: survey and reappraisal of twelve years' progress. *Ergonomics*, 3, 189–230.
191. Wilson, M. L., Hauser, M. D., & Wrangham, R. W. (2001). Does participation in intergroup conflict depend on numerical assessment, range location, or rank for wild chimpanzees? *Animal Behaviour*, 61, 1203–1216.
192. Winkler, I., Haufe, S. and Tangermann, M. (2011). Automatic Classification of Artifactual ICA-Components for Artifact Removal in EEG Signals. *Behavioral and Brain Functions*, 7 (30).
193. Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358, 749–750.
194. Xu, F., Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74, B1–B11.
195. Xu, G. Q., Lan Y., Huang D. F., Rao D. Z., Pei Z., Zeng J. S. (2010). Visuospatial attention deficit in patients with local brain lesions. *Brain Res.*, 1322, 153–159.
196. Yiyun, Z., Tianjiao, L., Chuansheng, Ch., Xinlin, Z. (2019). Visual form perception supports approximate number system acuity and arithmetic fluency. *Learning and Individual Differences*. 71, 1–12.
197. Zhang, X. et al. (2019). Young Chinese Children's Academic Skill Development: Identifying Child-, Family-, and School-Level Factors. *New Directions for Child and Adolescent Development*. 163, 9–37.

198. Zheng, Ch., Colginová, L. L. (2015). Beta and gamma rhythms go with the flow. *Neuron*, 85 (2), 236–237.
199. Zuckerman, M. (2009). Sensation seeking. In Leary, M., Hoyle, R. H. (2009). *Handbook of Individual Differences in Social behavior*. New York/London: The Guildford Press. 455–465.

## Seznam obrázků

Obrázek 1 Model trojího kódu (In Myers, 2015).....	22
Obrázek 2 Ukázka stimulu (In Cantlon, 2006).....	24
Obrázek 3 Aktivace IPS při různých druzích aktivity u dětí od 4 do 8 let (In Kersey, Cantlon, 2017). .....	24
Obrázek 4 Aktivita intraparietálního sulku u dětí ve věku od 4 do 11 let při řešení intraparietálních úloh. S fdr korekcí ( $q < 0.05$ ) (In Emerson, Cantlonová, 2012).....	25
Obrázek 5 Aktivace během posuzování "větší x menší" u arabských číslic a množin teček u dětí a dospělých (In Cantlonová et al., 2009).....	26
Obrázek 6 Ukázka úloh experimentu (In Lussierová., Cantlonová, 2017).....	26
Obrázek 7 Aktivita mozku při porovnávání dvou množin teček (In Lussierová., Cantlonová, 2017). .....	27
Obrázek 8 Aktivní levý a pravý intraparietální sulkus během reprezentace kontinuální numerické magnitudy u dospělých (in Brannonová, 2006).....	28
Obrázek 9 Nárůst density šedé kůry u matematiků oproti nematematikům (In Aydın, et al., 2007). 30	
Obrázek 10 Horizontální segment intraparietálního sulku při řešení aritmetických úloh, $p < 0.001$ . fMRI experiment (In Andres, 2011).....	30
Obrázek 11 Tři režimy pro numerickou percepce: subitance; numerický odhad a hustota stimulů. (In Anobile, Cicchini, Burr, 2016).....	36
Obrázek 12 Ukázka experimentu (A) a (B) reakčního času a chybovosti (na ose X velikost setu, na ose Y počet kódovaných objektů) (In Piazza, 2011).....	38
Obrázek 13 Potlačení rolandického beta rytmu motorickou aktivitou u adolescentů při řešení Go/NoGo tasku (Kropotov, 2009).....	42
Obrázek 14 Frontální beta rytmus. (a) Fragment 19ti kanálového EEG záznamu při otevřených očích. (b) Spektra alfa a beta rytmu (In Kropotov, 2009).....	43
Obrázek 15 Ukázka frekvenčních pásem (In Malmivuo, Plonsey, 1995).....	45
Obrázek 16 Grande average power spektra u předškolních dětí. Modrá křivka je vizuální pozornost (baseline); zelená křivka je objevování nové hračky a červená křivka reprezentuje pozornost vůči sociální stimulaci (In Orekhova et al., 2006).....	50
Obrázek 17 Ukázka komponenty P300.....	54
Obrázek 18 Ukazka úlohy (In Templová, Posner, 1998).....	56
Obrázek 19 Elektrody (In Templová, Postner, 1998).....	56
Obrázek 20 Získané ERP u dospělých (vlevo) a dětí (In Templová, Posner, 1998).....	57
Obrázek 21 Ukazka stimulu (In Gouet, et al., 2018).....	58
Obrázek 22 Komponenta P2p. Modře skupina s AAT tréninkem, fialově bez tréninku (In Gouet. 2018).....	58

Obrázek 23 Komponenta P2p. Modře skupina s AAT tréninkem, fialově bez tréninku (In Gouet. 2018).	59
Obrázek 24 Aktivní části fronto-temporálního kortexu (In Cantlonová et al., 2006)	60
Obrázek 25 Vizualizace zpracování u opice (In Ungerleider, 1995)	63
Obrázek 26 Podoba úlohy pro testování aproximální aritmetiky (Park, Brannonová, 2014)	73
Obrázek 27 Podoba úlohy pro aproximální prorovnávání počtu (Park, Brannonová, 2014)	73
Obrázek 28 Ilustrace výzkumné úlohy pro logaritmus obtížnost 1.5.	74
Obrázek 29 Časová posloupnost experimentu	75
Obrázek 30 Vizualizace lehkých úloh z celého skalpu. Červeně je skupina N a zeleně pak G.	86
Obrázek 31 Lehká obtížnost úloh, elektroda P3, $p < 0.05$ . Skupina G modře, skupina N zeleně.	87
Obrázek 32 Exaktní hodnota $p$ pro čas -100 až 700 na elektrodě P3.	88
Obrázek 33 Lehké obtížnosti na elektrodě P2, $p < 0.05$ , G modře, N zeleně.	89
Obrázek 34 Exaktní $p$ hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P2.	90
Obrázek 35 Lehké obtížnosti AAT na hladině významnosti $p < 0.05$ . G modře, N zeleně.	91
Obrázek 36 Exaktní $p$ hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P4.	92
Obrázek 37 Lehké obtížnosti AAT na hladině významnosti $p < 0.05$ . G modře, N zeleně.	93
Obrázek 38 Exaktní $p$ hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P6.	94
Obrázek 39 Topografie skalpu u lehkých úloh AAT v čase 300 až 500 ms po prezentaci stimulu. $P < 0.05$ . Skupina G vlevo.	95
Obrázek 40 Vizualizace středně těžkých úloh z celého skalpu. Červeně je skupina N a zeleně pak G, $p < 0.01$ .	96
Obrázek 41 Středně těžké úlohy AAT, $p < .01$ . G modře, N zeleně.	97
Obrázek 42 Středně těžké úlohy AAT, $p < .01$ . G modře, N zeleně.	98
Obrázek 43 Exaktní $p$ hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P3.	99
Obrázek 44 Středně těžké úlohy AAT, $p < 0.05$ bez korekce. G modře, N zeleně.	100
Obrázek 45 Exaktní $p$ hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P4.	101
Obrázek 46 Středně těžké úlohy AAT, $p < 0.01$ bez korekce. G modře, N zeleně.	102
Obrázek 47 Exaktní $p$ hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P6.	103
Obrázek 48 Středně těžké úlohy AAT, $p < 0.01$ bez korekce. G modře, N zeleně.	104
Obrázek 49 Exaktní $p$ hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P8.	105
Obrázek 50 Topografie skalpu u středně těžkých úloh AAT z času 200 až 500 ms po prezentaci stimulu. Hladina významnosti $p < 0.01$ bez korekce. Skupina G vlevo.	106
Obrázek 51. Vizualizace rozdílu skupin G (červeně) a N (zeleně) pro těžké úlohy AAT na hladině významnosti $p < 0.05$ .	107
Obrázek 52 Těžké úlohy AAT, $p < 0.01$ bez korekce. G modře, N zeleně.	108
Obrázek 53 Exaktní $p$ hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P1.	109
Obrázek 54 Těžké úlohy AAT, $p < 0.05$ bez korekce. G modře, N zeleně.	110

<i>Obrázek 55 Exaktní p hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P3.</i>	<i>111</i>
<i>Obrázek 56 Těžké úlohy AAT, <math>p &lt; 0.01</math> bez korekce. G modře, N zeleně.</i>	<i>112</i>
<i>Obrázek 57 Exaktní p hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P3.</i>	<i>113</i>
<i>Obrázek 58 Těžké úlohy AAT, <math>p &lt; 0.01</math> bez korekce. G modře, N zeleně.</i>	<i>114</i>
<i>Obrázek 59 Exaktní p hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P6.</i>	<i>115</i>
<i>Obrázek 60 Těžké úlohy AAT, <math>p &lt; 0.01</math> bez korekce. G modře, N zeleně.</i>	<i>116</i>
<i>Obrázek 61 Exaktní p hodnota pro čas -100 až 700 na elektrodě P8.</i>	<i>117</i>
<i>Obrázek 62 Topografie skalpu u těžkých úloh AAT z času 200 až 500 ms po prezentaci stimulu. Hladina významnosti <math>p &lt; 0.01</math> bez korekce. Skupina G vlevo.</i>	<i>118</i>
<i>Obrázek 63 P hodnota souvislosti RT a úrovně obtížnosti úlohy.</i>	<i>119</i>
<i>Obrázek 64 Párový t - test pro RT a obtížnost úlohy.</i>	<i>120</i>

## Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 Čtyřfázový model vývoje numerické kognice (In von Aster, 2007).....</i>	<i>23</i>
<i>Tabulka 2 Srovnání beta pásem u předškoláků a u dospělých (Ogawi, 1989; Rangaswamy et al., 2002).....</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 3 Dvousystémový model zrakového zpracování (Norman, 2002).....</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 4 Rozdělení probandů do skupin podle pásma výsledky S-B testu. ....</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 5 Tabulka počtu trialů pro každou obtížnost (L24 = úroveň obtížnosti 2.4). Modrou barvou jsou označeni chlapci, černou dívky. Písmeno G označuje děti, které jsou ve skupině s nadprůměrnými S-B výsledky, písmeno N je skupina dětí s výsledky podprůměrnými.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabulka 6 Tabulka počtu trialů pro každou obtížnost (L17 = úroveň obtížnosti 1.7). Modrou barvou jsou označeni chlapci, černou dívky. Písmeno G označuje děti, které jsou ve skupině s nadprůměrnými S-B výsledky, písmeno N je skupina dětí s výsledky podprůměrnými.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabulka 7 Součty trialů pro každou úroveň.....</i>	<i>84</i>
<i>Tabulka 8 Průměrné RT pro každou úroveň obtížnosti AAT u skupin G a N. ....</i>	<i>118</i>
<i>Tabulka 9 Počet lišících se prvků v závislosti na obtížnosti úloh AAT .....</i>	<i>119</i>

## Seznam příloh

Příloha č. 1 Leták

Příloha č. 2 Měřicí protokol



Katedra  
pedagogiky a psychologie  
Department of Pedagogy  
and Psychology



Pedagogická  
fakulta  
Faculty  
of Education

## MATEMATICKÉ NADÁNÍ U PŘEDŠKOLÁKŮ



Hledáme rodiče s předškolními dětmi, kteří by se chtěli podílet na vývoji nové vzdělávací metody v oblasti předškolní matematiky.

V rámci Neuropsychologické laboratoře Jihočeské univerzity vyvíjíme počítačovou hru zaměřenou na trénink mozku.

Tato hra pomáhá zlepšovat matematické schopnosti u dětí i dospělých. V rámci výzkumu děti hrají tuto specifickou hru, která má pohádkovou tematiku a zároveň je pomocí encefalografu (EEG) zcela bezbolestně měřena aktivita mozku.

Po skončení experimentu je pro účastníky připravená menší pozornost. Zároveň, v případě zájmu, rodičům sdělujeme výsledky inteligenčního testu, který je součástí experimentu.

---

Mgr. Michala Plassová

Email: [mplassova@pf.jcu.cz](mailto:mplassova@pf.jcu.cz)  
Adresa: Dukelská 9, České Budějovice





## Měřicí protokol EEG studie

NEUROLAB, Neuropsychologická laboratoř KPE JU

**Typ studie:** EEG 32 kanálů  EEG 64 kanálů  Behaviorální  Eye-tracker

Název studie: \_\_\_\_\_ ID: \_\_\_\_\_ EEG čepice: S / M / L

### Vyplňuje participant výzkumu

Datum měření: \_\_\_\_\_ Věk: \_\_\_\_\_ Hodin spánku: \_\_\_\_\_

Pohlaví: muž  žena  Korekce zraku: \_\_\_\_\_ Pravák / levák: \_\_\_\_\_

*Souhlasím s dobrovolnou účastí na této studii bez nároku na odměnu. Máte právo kdykoli bez udání důvodu svou účast na studii ukončit. Vaše osobní údaje slouží pouze pro zpracování dat ve studii. Tato data neposkytujeme dalším stranám a vaše záznamy jsou anonymní.*

Datum: \_\_\_\_\_ Podpis: \_\_\_\_\_

*Požadují zaslat výsledky studie:*

*Pokud chcete zaslat výsledky studie, vyplňte svou emailovou adresu.*

E-mail: \_\_\_\_\_

### Vyplňuje experimentátor

Měření provedl/a: \_\_\_\_\_ Název souboru BDF: \_\_\_\_\_

NEUROLAB  
Neuropsychologická laboratoř  
D214 (2. patro)



Katedra pedagogiky a psychologie  
Dukelská 9  
370 01 České Budějovice