

**MASARYKOVA  
UNIVERZITA**

LÉKAŘSKÁ FAKULTA

# **Zraková dráha jako neuronová síť**

Bakalářská práce

VERONIKA KOŇAŘÍKOVÁ

Vedoucí práce: Mgr. Dušan Hemzal, Ph.D.

Katedra optometrie a ortoptiky  
Obor Optika a optometrie

Brno 2021

## Bibliografický záznam

<b>Autor:</b>	Veronika Koňářiková Lékařská fakulta Masarykova univerzita Katedra optometrie a ortoptiky
<b>Název práce:</b>	Zraková dráha jako neuronová síť
<b>Studijní program:</b>	Optika a optometrie
<b>Vedoucí práce:</b>	Mgr. Dušan Hemzal, Ph.D.
<b>Rok:</b>	2021
<b>Počet stran:</b>	56
<b>Klíčová slova:</b>	zraková dráha, neuron, perceptron, neuronová síť, synapse, sítnice, akční potenciál

## Bibliographic record

**Author:** Veronika Koňářiková  
Faculty of Medicine  
Masaryk University  
Department of Optometry and Orthoptics

**Title of Thesis:** Visual pathway as neural network

**Degree Programme:** Optics and Optometry

**Supervisor:** Mgr. Dušan Hemzal, Ph.D.

**Year:** 2021

**Number of Pages:** 56

**Keywords:** visual pathway, neuron, perceptron, neural network, synapse, retina, action potential

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá popisem a různým pojetím neuronu. V úvodní části se zaměřuji na anatomické struktury zrakové dráhy a přiblížení jejich patologií. Dále se zabývám popisem a vlastnostmi biologického neuron. Následně zjednodušeně přibližuji strukturu matematického neuronu včetně hledání a nalézání podobností mezi ním a jeho biologickým protějškem. V závěru práce vyhodnocuji funkci dopředné dvouvrstvé neuronové sítě ve spojitosti se zrakovou dráhou a její využití v problematice vidění.

## **Abstract**

The thesis deals with biological and artificial neural networks. First I deal with anatomical structures of the visual path including its pathologies. Further I describe the properties of biological neuron and compare them with behavior of their mathematical model, the artificial neuron. Finally, a two-layered forward neural network is used as a model of the visual path and possibilities of its application in sight understanding are discussed.

## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Zraková dráha jako neuronová síť** zpracovala sama. Veškeré prameny a zdroje informací, které jsem použila k sepsání této práce, byly citovány v textu a jsou uvedeny v seznamu použitých pramenů a literatury.

V Brně, 20. dubna 2021

.....  
Veronika Koňářiková

## Poděkování

Touto cestou bych chtěla poděkovat Mgr. Dušanu Hemzalovi, Ph.D., vedoucímu mé bakalářské práce, za návrh tématu práce, za poskytnutí odborných rad, cenných připomínek, a především za cenný čas, který práci věnoval.

## Obsah

<b>Seznam obrázků</b>	<b>10</b>
<b>Seznam vzorců</b>	<b>11</b>
<b>Seznam pojmů a zkratek</b>	<b>12</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>13</b>
<b>2 Zraková dráha</b>	<b>14</b>
2.1 1. neuron.....	15
2.1.1 Fotoreceptory .....	15
2.1.2 Sítňice a její zvláštní úseky .....	15
2.1.3 Fotochemie detekce světla.....	16
2.1.4 Orientace světločivé vrstvy .....	17
2.2 2. neuron.....	18
2.2.1 Bipolární buňky .....	18
2.2.2 Asociační buňky .....	18
2.2.3 Podpůrné buňky .....	19
2.3 3. neuron.....	20
2.3.1 Papila zrakového nervu .....	20
2.3.2 Zrakový nerv .....	21
2.3.3 Chiasma .....	21
2.4 4. neuron.....	22
2.4.1 Nucleus corporis geniculati lateralis .....	22
2.4.2 Optická radiace.....	23
2.4.3 Zraková centra .....	23
2.5 Onemocnění zrakové dráhy .....	24
2.5.1 Onemocnění zrakového nervu.....	25
2.5.2 Onemocnění chiasmatu .....	28
2.5.3 Poškození retrochiasmatické oblasti.....	28



---

<b>3</b>	<b>Biologický neuron</b>	<b>30</b>
3.1	Složení neuronu.....	31
3.2	Funkce synapse .....	31
3.2.1	Membrána neuronu.....	32
3.3	Přenos informace.....	34
3.3.1	Model Hodgkina a Huxleye.....	35
3.4	Akční potenciál .....	36
3.5	Zpracování informace na neuronech a synapsích .....	37
3.6	Historický přehled.....	39
<b>4</b>	<b>Matematický neuron</b>	<b>40</b>
4.1	Jednotlivý neuron .....	40
4.1.1	Vlastnosti neuronu.....	41
4.1.2	Technické přiblížení jednotlivých struktur.....	42
4.2	Neuronová síť .....	43
4.2.1	Perceptron.....	43
4.2.2	Vícevrstvé neuronové síť .....	43
4.2.3	Aplikace neuronových sítí ve zpracování signálů .....	45
<b>5</b>	<b>Perceptron jako model zrakového nervu</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>50</b>
	<b>Použité zdroje</b>	<b>51</b>
	<b>Rejstřík</b>	<b>54</b>

## Seznam obrázků

Obr. 1: Zobrazení základního křížení zrakové dráhy – upraveno z <sup>14</sup> .....	14
Obr. 2: Macula lutea, fovea a disk zrakového nervu – upraveno z <sup>16</sup> .....	16
Obr. 3: Histologické uspořádání sítnice – upraveno z <sup>13</sup> .....	17
Obr. 4: Zapojení jednotlivých buněk v sítnici – upraveno z <sup>26</sup> .....	19
Obr. 5: Papila nervi optici – upraveno z <sup>15</sup> .....	20
Obr. 6: Průběh nervových vláken chiasmatem <sup>1</sup> .....	21
Obr. 7: Area striata, parastriata, peristriata <sup>1</sup> .....	23
Obr. 8: Neuron – upraveno z <sup>19</sup> .....	30
Obr. 9: Synapse – upraveno z <sup>20</sup> .....	32
Obr. 10: Difúze iontů přes membránu – upraveno z <sup>18</sup> .....	33
Obr. 11: Koncentrace iontů uvnitř a vně buňky – upraveno z <sup>18</sup> .....	35
Obr. 12: Hodgkinův – Huxleyův model buněčné membrány – upraveno z <sup>18</sup> .....	36
Obr. 13: Chemická signalizace na synapsi – upraveno z <sup>18</sup> .....	37
Obr. 14: Neuron (s nulovým prahem) jako procesní prvek <sup>17</sup> .....	40
Obr. 15: Charakteristický průběh nelineární funkce <sup>17</sup> .....	41
Obr. 16: Uspořádání neuronu do vrstev v dopředné neuronové síti <sup>24</sup> .....	44
Obr. 17: Architektura perceptronu s jednou vrstvou variabilních spojení – upraveno z <sup>11</sup> . ..	46
Obr. 18: Reprezentace mluvicího obličejce gangliovými buňkami – upraveno z <sup>29</sup> .....	49

## Seznam vzorců

Matematické vyjádření jednotlivého neuronu <sup>11</sup> (4.1).....	40
Přijímaný vektor <sup>11</sup> (4.2) .....	42
Vzorec pro vážený součet <sup>11</sup> (4.3).....	42
Definice skalárních výstupů <sup>11</sup> (4.4) .....	42

## Seznam pojmů a zkratek

SLP	- singlelayer perceptron
MLP	- multilayer perceptron
CGL	- <i>corpus geniculatum laterale</i>
FFT	- Fast Fourier Transform = Rychlá Fourierova transformace
ATP	- adenosintrifosfát
RS	- roztroušená skleróza
CT	- Computed Tomography = výpočetní tomografie
MR	- magnetická rezonance
IIH	- idiopatická intrakraniální hypertenze
ON	- optická neuritida
LHON	- Leberova hereditární neuropatie optiku

## 1 Úvod

Zdá se, že život na naší planetě přímo dychtí po evoluci zraku. Proto není divu, že se oko nezávisle na organismech vyvíjelo 40 až 60krát (podle Dawkinse). Snaha o pochopení jeho funkcí vedla k potřebě vytvoření náležitého matematického modelu, který by mohl některé jeho funkce napodobit nebo dokonce nahradit.

Teorie neuronových sítí se zaměřuje na zpracovávání dat pomocí algoritmů, které přebírá od živých organismů. Vzorem chování neuronových sítí jsou odpovídající biologické struktury. Elementární jednotkou neuronové sítě je perceptron.

Práce čtenáře provede od nejobecnější tématiky postupně hlouběji danou problematikou potřebnou pro pochopení cíle práce. V první řadě bude představena anatomie zrakové dráhy i se svými patologickými stavy. Od patologií se práce přesune k základnímu složení neuronové sítě. Následovat bude popis struktur neuronové sítě, její vlastnosti a smysl utváření vícevrstevných tzv. dopředných neuronových sítí. V neposlední řadě přejdeme k biologickému neuronu. Popíšeme jeho stavbu, funkce a princip přenosu signálu.

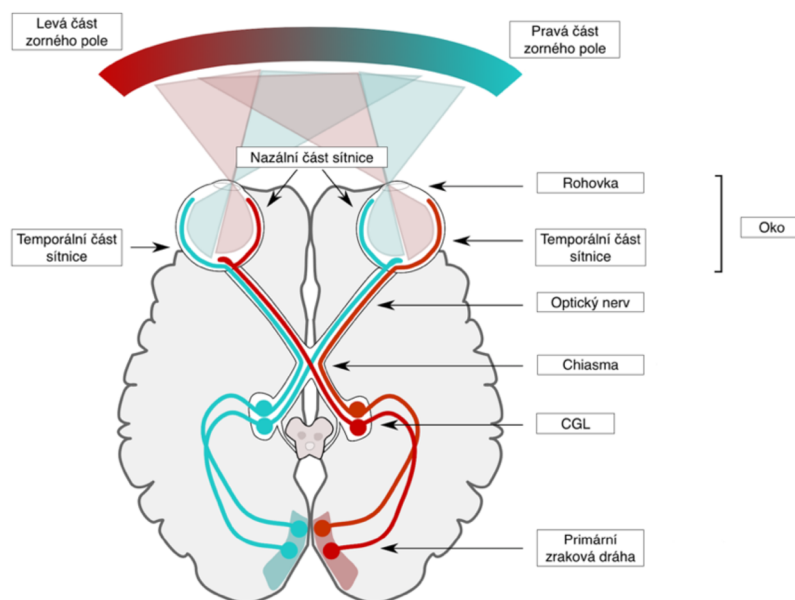
Cílem bakalářské práce je přiblížit problematiku neuronových sítí, a především hledání podobnosti mezi dopředným perceptronem a zrakovou dráhou.

Kromě námi studované problematiky našly neuronové sítě využití také ve vytváření umělé inteligence. V současné době bychom toto odvětví mohli zařadit mezi jednu z nejvíce lukrativních oblastí spojujících vědu a techniku.

## 2 Zraková dráha

Zraková dráha je v celé své délce tvořena řetězcem 4 neuronů. Průběh zrakové dráhy znázorňuje obrázek 1. Jako první přijímají signál fotoreceptory uložené v sítnici (*retina*), poté je informace vedena bipolárními buňkami ke gangliovým buňkám. Z tohoto místa pak dále pokračují vlákna gangliových buněk přes *chiasma* do postranního kolínkového tělesa (*nucelus corporis geniculati lateralis*), kde dochází k přepojení na poslední neuron zrakové dráhy. Zde pak nacházíme optickou radiaci (*radiatio optica*), která má své zakončení v *sulcus calcarinus*.<sup>2,3</sup>

Sítnice (*retina*) je spolu s pigmentovým epitelem (*stratum pigmentosum*) vnitřní vrstvou oka (*tunica interna*). Je rozdělena na dvě části – část optickou (*pars optica retinae*), kde se nacházejí světločivé elementy a slepou část (*pars coeca retinae*), která se táhne od vnitřní strany řasnatého tělíska (*corpus ciliare*) k zadní ploše duhovky (*iris*), ta již žádné světločivé buňky neobsahuje. Tyto dvě části jsou od sebe odděleny klikatě probíhající nervovou čarou, která se nazývá *ora serrata*.<sup>2,3</sup>



Obr. 1: Zobrazení základního křížení zrakové dráhy – upraveno z <sup>14</sup>

## 2.1 1. neuron

Na pozici prvního neuronu zrakové dráhy jsou fotoreceptory, ty svými výběžky zachycují světelné paprsky a předávají informaci dál druhému neuronu zrakové dráhy.<sup>2</sup>

### 2.1.1 Fotoreceptory

Světločivými elementy rozumíme tyčinky a čípky. Tyčinky slouží pro vidění za šera a za tmy a čípky pro vidění barevné. Dohromady jejich počet čítá okolo 130 milionů.<sup>2,3</sup>

Tyčinky se na sítnici nacházejí ve vzdálenosti 0,13 mm od *fovey centralis* až po *ora serrata*. Největší hustoty (160 000/mm<sup>2</sup>) dosahují 5-6 mm od středu fovey, kde vytvářejí prstenec. Počet tyčinek směrem do periferie ubývá. Celkem se jich v sítnici nachází asi 120 milionů. Každá tyčinka je složená z vnějšího a vnitřního segmentu. Vnější segment obsahuje světločivé elementy a můžeme jej dále rozdělit na vnější a vnitřní výběžek. Vnější výběžek má cylindrickou podobu, je složen z tisíce kulovitých disků (*vesikul*) s jemnými membránami. Zde se nachází zrakové barvivo (purpur) jménem *rhodopsin*. Tato na světlo citlivá substance mění po dopadu světelných paprsků mění svou barvu (bledne) a tím dochází k přeměně světelných impulsů na nervové vzruchy. Tyčinky slouží pro vidění za šera a za tmy, tzv. skotopické vidění.<sup>2,3</sup>

Nejvíce čípků se nachází v místě nejostřejšího vidění, ve *fovea centralis*, zde počtem dosahují asi 150 000/mm<sup>2</sup> a s postupem do periferie sítnice jejich počet klesá. Celkový počet čípků je okolo 6 až 7 milionů. Velikostně jsou čípky o něco menší než tyčinky, mají tvar břichaté láhve. Stavebně vykazují podobné uspořádání jako tyčinky. Na světlo citlivá substance obsažená v disku vnějšího výběžku čípku se nazývá *iodopsin*. Čípky zprostředkovávají barevné vidění za denního světla, tzv. fopické.<sup>2,3</sup>

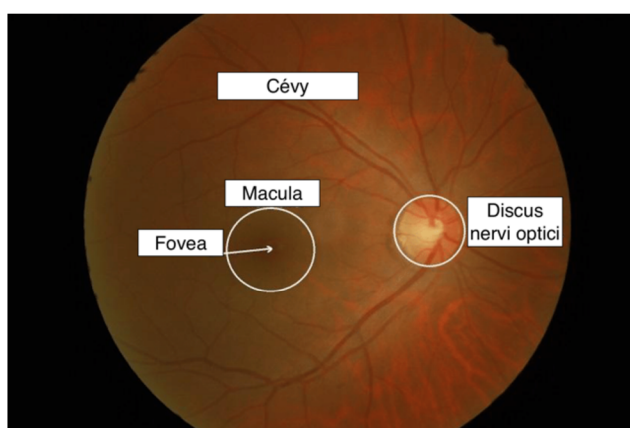
### 2.1.2 Sítnice a její zvláštní úseky

*Macula lutea* neboli žlutá skvrna je velká 3–5 mm. Nachází se na zadním pólu oka. Je složená pouze z čípků. V místě neprocházejí žádné větší cévy, proto má na rozdíl

od okolní sítnice nažloutlou barvu. Toto zbarvení je způsobeno pigmentem xantofylinem.<sup>1,3</sup>

Centrální částí maculy je *fovea centralis*, známá jako jamka nejostřejšího vidění, kterou prochází zorná osa oka (*linea visus*). Dosahuje velikosti 1,5 mm. V centrální části fovey leží *foveola* o velikosti 0,3 mm. V dolní části fovey je o 50% fotoreceptorů více než v horní polovině. Tato skutečnost odpovídá lepší zrakové ostrosti v horní polovině zorného pole.<sup>1,3</sup>

Všechny výše zmíněné struktury zobrazuje obrázek 2.



**Obr. 2: Macula lutea, fovea a disk zrakového nervu – upraveno z <sup>16</sup>**

*Ora serrata* je obloukovitá linie, která rozděluje sítnici na optickou a slepou část. Dochází zde k redukci smyslové a nervové části, sítnice se oplošťuje. Pigmentový epitel spolu s vnější a vnitřní hraniční membránou přetrvávají a volně přecházejí na řasnaté tělíčko a duhovku.<sup>1,3</sup>

### 2.1.3 Fotochemie detekce světla

V sítnici se nacházejí tři druhy čípků, které se od sebe liší maximální citlivostí pro vlnové délky dopadajícího světelného paprsku. Absorpční maximum pro modré světlo (krátkovlnné) je v rozmezí 440-450 nm, pro zelenou 535-555 nm a pro dlouhovlnné červené světlo 570-590 nm. Pigment tyčinek dosahuje maximální citlivosti při vlnové

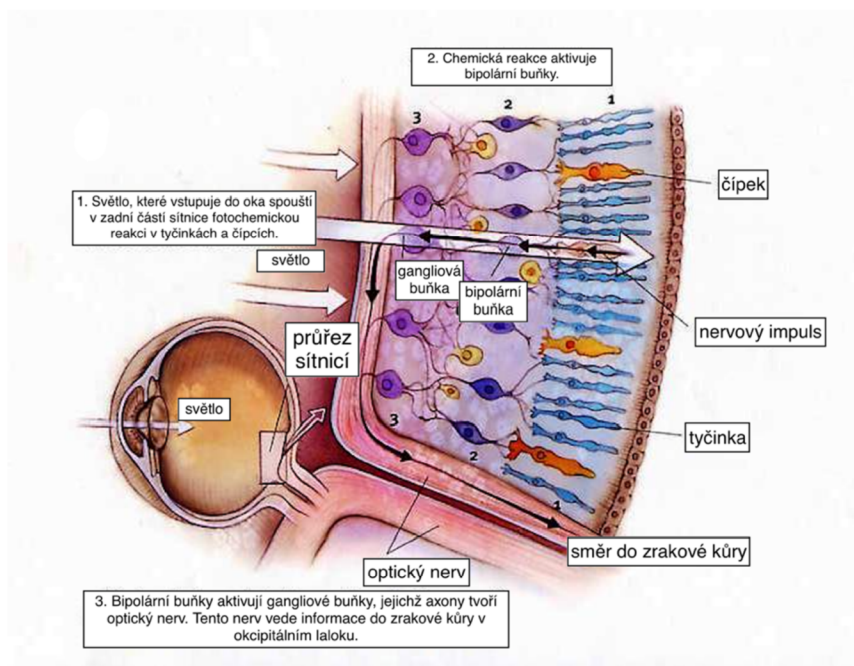


délce 500 nm. Změnou poměrů těchto tří základních barev můžeme vytvořit jakoukoliv barvu nebo její odstín z barevného spektra. Tento fyziologický stav nazýváme trichromázie.<sup>4,5</sup>

Oční pigment se skládá z cis-formy vitamínu A (all-trans-retinal) a molekuly opsinu. Cis-retinal se při pohlcení fotonu mění na all-trans formu, přičemž se z vazby uvolní spolu s opsinem. Následně dojde k elektrické změně potenciálu na membráně buňky. Poté následuje obnovná fáze. Dochází k syntéze pigmentu z opsinu a 11-cis retinalu, který vznikl předešlou změnou z all-trans formy. Předešlý mechanismus platí jak pro opsiny čípků, tak pro opsiny tyčinek.<sup>5</sup>

### 2.1.4 Orientace světločivé vrstvy

Světločivé elementy má sítnice ve své *pars optica* uspořádány ve vrstvách, jak ukazuje obrázek 3. Její nejdůležitější vrstvou je vrstva světločivých elementů, která je uložena distálně vůči nitroočnímu povrchu sítnice. Střední vrstvou sítnice jsou bipolární buňky tvořící druhý sítnicový neuron. Proximální vrstvu pak představují gangliové buňky, které jsou rovněž třetím neuronem zrakové dráhy. Neurity gangliových buněk se sbíhají na povrchu sítnice do *nervu opticus*. Místo sbíhání označujeme jako *discus nervi optici*.<sup>3</sup>



Obr. 3: Histologické uspořádání sítnice – upraveno z <sup>13</sup>

## 2.2 2. neuron

Druhý neuron zrakové dráhy je tvořen drobnými bipolárními buňkami. Bipolární buňky můžeme rozdělit do dvou skupin. Jedna část bipolárních neuronů sbírá informace pouze z čípků (jeden bipolární neuron na jeden čípek), část druhá z tyčinek (jeden bipolární neuron na 3-5 tyčinek). Obrázek 4 zobrazuje zapojení dále zmíněných buněk v sítnici.<sup>2</sup>

### 2.2.1 Bipolární buňky

Bipolární buňky představují druhý neuron zrakové dráhy. Jedná se o zprostředkovatele mezi gangliovými buňkami a smyslovými receptory. Spojení může být dvojího typu.<sup>1,2</sup>

Pokud se jedná o spojení mezi jedním receptorem a jednou bipolární buňkou, nazýváme spojení individuální. Takovéto napojení se nachází pouze v centru fovey u všech 2500 buněk. U tyčinek tato vlastnost nebyla prokázána.<sup>1,2</sup>

Je-li bipolární buňka napojena na několik smyslových buněk, hovoříme o spojení difúzním. Tímto způsobem se rovněž spojují buňky bipolární s gangliovými. Jsou i případy, kdy se jedna bipolární buňka napojuje na větší množství gangliových buněk. Na bipolární buňku se může připojit čípek spolu s tyčinkou.<sup>1,2</sup>

Spojení bipolární buňky spolu s receptorem představuje *ganglion retinae*.<sup>1,2</sup>

### 2.2.2 Asociační buňky

Asociační buňky jsou umístěné ve vnitřní jádrové vrstvě, stejně jako bipolární buňky. Jedná se o buňky horizontální a amakrinní.<sup>1</sup>

Horizontální buňky jsou takto označovány, neboť vedou vzruchy horizontálně tzn. že jejich vedení je kolmé ke svislému šíření vzruchů mezi neurony. Krátké dendrity horizontálních buněk tvoří synapse s čípkou. Jejich axon je znovu napojen na zakončení tyčinky nebo čípku. Horizontální buňky působí inhibičně, tím se podílejí na organizaci receptivních polí (oblast sítnice, která při osvětlení změní svůj membránový potenciál)

bipolárních a gangliových buněk. Zmíněná inhibice pomáhá vnímat rozdíly v osvětlení a rozeznávat kontrast.<sup>1,28</sup>

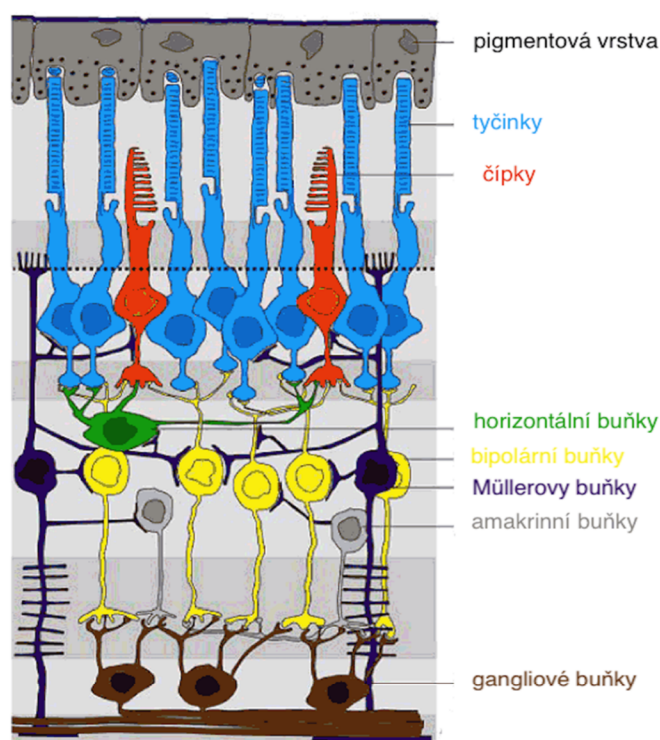
Dendrity amakrinních buněk se mohou spojovat s větším množstvím gangliových buněk. Tyto neurony pozbývají axon, vstupním i výstupním místem jsou dendrity. U amakrinních buněk se zjistilo, že se uplatňují při filtraci signálu, odstraňují šum a ovlivňují výstup bipolárních buněk. Podílejí se na utváření signálů z fotoreceptorů a bipolárních buněk, který směřuje do gangliových buněk. Dále mají amakrinní buňky podpůrnou funkci.<sup>1,27</sup>

### 2.2.3 Podpůrné buňky

Podpůrné buňky mají rovněž vyživovací úlohu. Jedná se o Müllerovy buňky a neuroglie.

Vlákna Müllerových buněk prostupují všemi vrstvami sítnice, tvoří uspořádanou síťovinu. Rozprostírají se od vnitřní hraniční membrány (*membrana limitans interna*) až po vnější hraniční membránu (*membrana limitans externa*).<sup>1</sup>

Neuroglie jsou obecně podpůrné buňky centrálního nervového systému. Vytvářejí bariéru mezi nervovou a cévní tkání pomocí perivaskulárních glií.<sup>1</sup>



Obr. 4: Zapojení jednotlivých buněk v sítnici – upraveno z <sup>26</sup>

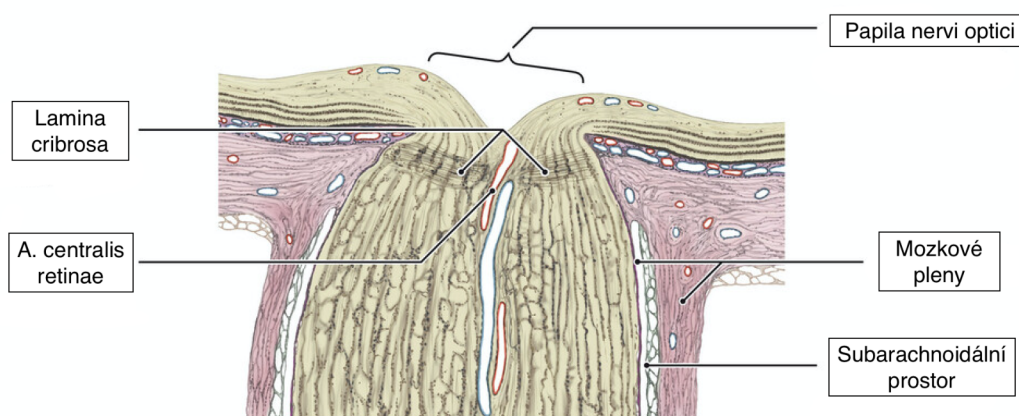
## 2.3 3. neuron

Třetí neuron zrakové dráhy je tvořen gangliovými buňkami neboli tzv. multipolárními neurony. Tyto neurony jsou uloženy ve vnitřním povrchu sítnice. Na jeden multipolární neuron připadá několik bipolárních neuronů, ze kterých sbírá informace. Jejich neurity se sbíhají na sítnici k papile zrakového nervu. Poté, co projdou oční stěnou vytvářejí vlastní zrakový nerv (*nervus opticus*). Soubor multipolárních neuronů nazýváme *ganglion nervi optici*.<sup>2</sup>

### 2.3.1 Papila zrakového nervu

Papila zrakového nervu (*papila nervi optici*) je místem výstupu nervových vláken (obrázek 5). Okraj papily je mírně nadzvednutý, neboť se jedná o místo, kde se sbíhají nervová vlákna. Střed papily je lehce prohlouben, jde o tzv. fyziologickou exkavaci. Centrem exkavace jsou vedeny retinální cévy (*arteria centralis retinae, vena centralis retinae*) Kromě vnitřní hraniční membrány všechny sítnicové vrstvy ustupují do ústraní.<sup>1,3</sup>

Skléra pokračuje přes papilu jako *area cribriformis sclerae*. Jedná se o proděravělou ploténku bělimy, kde se sbíhají nemyelinisovaná nervová vlákna gangliových buněk sítnice.<sup>1,3</sup>



Obr. 5: Papila nervi optici – upraveno z <sup>15</sup>

### 2.3.2 Zrakový nerv

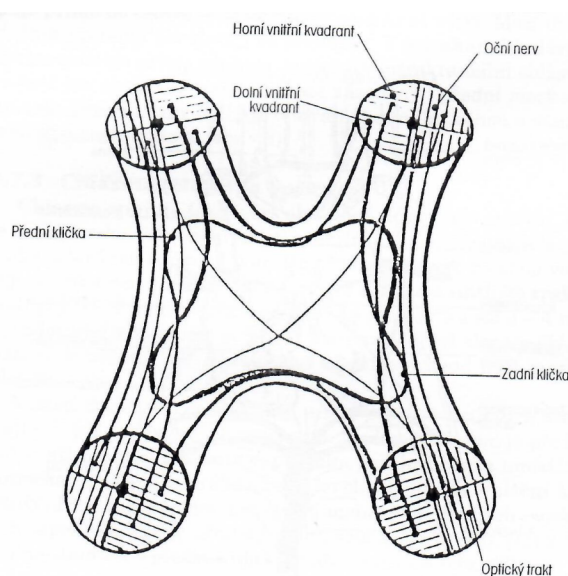
Zrakový nerv (*nervus opticus*) se prostírá od proděravělé sklerální ploténky až po chiasma. Je tvořený neurity gangliových buněk, které po průchodu *lamina cribri-formis sclerae* dostávají myelinové pochvy. Vlákná jsou obdobně jako mozek obklopeny mozgovými pleny. Nervus opticus je dlouhý přibližně 4,5 cm, z čehož 2,8 cm probíhá částí *pars orbitalis*, 0,7 cm *canalis opticus (pars canalis)*, 1 cm se nachází uvnitř lebky (*pars intracranialis*) a malá část se nachází v intrasklerální oblasti.<sup>1,3</sup>

### 2.3.3 Chiasma

Jedná se o bílou ploténku čtyřrohového tvaru, která je uložena ve střední jámě lební (*fossa cranii media*). Chiasma opticum je spojnicí obou očních nervů, zde se dráhy zrakových nervů částečně kříží. Z přední strany do něj oba oční nervy vstupují a na zadních rozích vystupují jako optické trakty. Jeho délka je přibližně 8 mm, šířka 12 až 14 mm a výška necelé 4 mm.<sup>1,3</sup>

Asi 4 cm před chiasmatem dochází k přeskupení vláken, přibližně 60% vláken zrakového nervu se v chiasmatu kříží.<sup>1,3</sup>

Na obrázku 6 je vidět, že vlákna, která se nekříží, přicházejí z temporální části sítnice a probíhají okrajem chiasmatu. Po průchodu do optického traktu zaujímají polohu,



Obr. 6: Průběh nervových vláken chiasmatem<sup>1</sup>

jakou měly v očním nervu. Vlákná z dolních temporálních kvadrantů probíhají dole a vlákna z horních temporálních kvadrantů probíhají nahoře.<sup>1</sup>

Vlákná z nazálních polovin sítnice se kříží. Procházejí přes chiasma široce rozvětveným svazkem a dostávají se do protilehlého optického traktu. Vlákná z dolního nazálního kvadrantu se dostávají do druhostranného očního traktu, přičemž před vstupem opisují přední kličku. Vlákná z horního nazálního kvadrantu vstupují do druhostranného optického traktu, před vstupem opisují zadní kličku.<sup>1</sup>

Vlákná pocházející z makuly se před chiasmatem rozdělí na dva svazky. Dolní svazek probíhá přímo a horní svazek se kříží.<sup>1</sup>

Optické trakty (*tractus opticus*) se rozkládají od zadní části chiasmatu až po *corpus geniculatum laterale*. Jejich délka je přibližně 20 mm. Každý trakt obsahuje vlákna z obou očí. Tractus opticus je složený z přímo probíhajících vláken stejnostranného (homolaterálního) oka a ze zkřížených vláken oka druhostranného (kontralaterálního). Vlákná pocházející z makuly se částečně kříží, částečně probíhají nezkřížená.<sup>1,2</sup>

## 2.4 4. neuron

Čtvrtý neuron zrakové dráhy je tvořen neurony v *nucleus corporis geniculati lateralis*. Jejich neurity procházejí optickou radiací (*radiatio optica*) do kortikálního zrakového pole v *sulcus calcarinus*, konkrétně do area 17, 18, 19.<sup>2</sup>

### 2.4.1 Nucleus corporis geniculati lateralis

Postranní kolínková tělesa (*corporis geniculati lateralis*) představují soubor gangliových buněk, které se zabořují do vnější hmoty mezimozku. Úlohou kolínkových těles je přepojování impulsů na následující neuron zrakové dráhy. Rovněž se jedná o místo přepojení mezi sítnicí a mozkovými centry.<sup>3</sup>

Z přední strany do laterálních genikulát vstupují optické trakty a zevně nahoru vystupují vlákna následující do Gratioletova svazečku.<sup>3</sup>

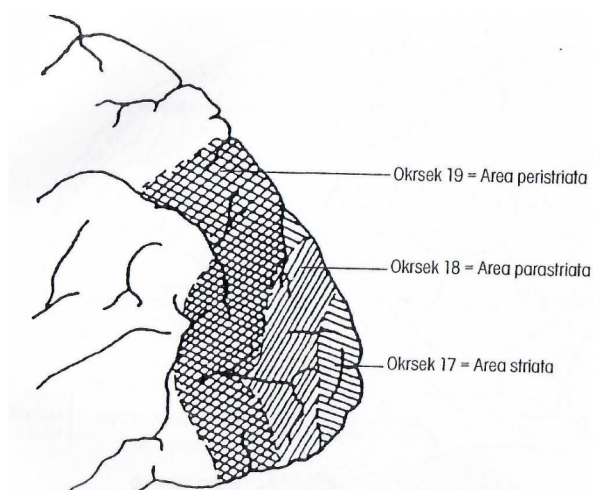
V postranním kolínkovém tělese rozlišujeme 6 vrstev šedé hmoty mozkové, která se v periferiích mění na jednolitou strukturu bez ohraničení. Vrstvy jsou označovány vzestupně od 1 do 6 směrem zesponu nahoru. Mezi vrstvami je prostor, který je zaplněný aferentními i eferentními vlákny. Zkřížená vlákna jsou spojena s vrstvou 1, 4, 6 a nezkřížená vlákna s vrstvami 2, 3, 5.<sup>2,3</sup>

### 2.4.2 Optická radiace

Optická radiace (*radiatio optica*) neboli Gratioletův svazek je vějíř tvořený vlákny, která vycházejí z *corpus geniculatum laterale*. Probíhá obloukovitou linií do primární zrakové korové oblasti. Část vláken, která vytvářejí tzv. Mayerovou kličku procházejí mimo hlavní svazek zrakové dráhy, prostupují temporálním lalokem a svůj průběh zakončí v *sulcus calcarinus*. Jedná se o soubor koncových neuronů tvořící zrakovou dráhu.<sup>2,3</sup>

### 2.4.3 Zraková centra

Zraková centra mají umístění v mozkové kůře okcipitálního laloku (*lobus occipitalis*). Zde rozlišujeme tři oblasti – *area striata* (17), *area parastriata* (18), *area peristriata* (19). Následující obrázek 7 schematicky rozděluje jednotlivé oblasti.<sup>1</sup>



Obr. 7: Area striata, parastriata, peristriata<sup>1</sup>

*Area striata* je konečným místem přijímání zrakových impulsů. Rozprostírá se kolem calcariny v centrální oblasti týlního laloku. Zaujímá oblast velkou 30 cm<sup>2</sup> mozkové kůry. Vlákna Gratioletova svazečku zde končí. Zrakové impulsy jsou zde zpracovávány a dochází k vyhodnocování zrakového počítka. Můžeme v ní rozlišit 6 vrstev, které mají specifické úlohy, avšak jejich funkce nebyla zatím objasněna.<sup>1</sup>

V *area striata* jsou přesná místa, která náleží jednotlivým úsekům sítnice. V přední části striaty leží vlákna z periferie sítnice. Makulárním vláknům je připisována pozice v zadní části striaty. Projekční pole těchto vláken z makuly je stejně velké jako projekční pole celé zbývající sítnice. Vlákna z makulární oblasti jsou spojována s větším množstvím buněk kůry mozkové, což vede k tomu, že dochází k přesné analýze podnětů. Redukovanou projekční plochu zaujímají vlákna z periferní oblasti sítnice.<sup>1</sup>

Přibližně 1 milion nervových vláken přichází k 1 milionu buněk do primárního zrakového centra. Naproti tomu je počet buněk v mozkové kůře mnohokrát větší. Místo ve fovee o průměru jedné úhlové sekundy, odpovídá 100 x větší šířce a 10 000 x větší velikosti. Foveolární oblast sítnice se promítá na ploše 5 cm<sup>2</sup> mozkové kůry, přičemž fovea je velká pouhých 1,5 mm.<sup>1</sup>

Vlákna z horních periferních částí sítnice jsou lokalizována nad fisurou calcarinou a vlákna z dolních periferních částí sítnice pod ní.<sup>1</sup>

## 2.5 Onemocnění zrakové dráhy

Na strukturu zrakové dráhy můžeme nahlédnout i z pohledu poruch, které se na ni objevují a tím získat další pohled na její funkci. Porucha zrakových funkcí bývá zaznamenána subjektivně. U pacienta vyšetřujeme především zrakovou ostrost a zorné pole, ale také nesmíme zapomínat na barvocit.<sup>20</sup>

Než se budeme zabývat o jakou chorobu zrakové dráhy se jedná, je důležité odlišit, zda jde o poškození jednostranné nebo oboustranné. Jednostranné léze bývají typické pro prechiasmatickou afekci – poškození zrakového nervu. Oboustranné léze pro afekci úseků počínajících chiasmatem. Při diagnostice je důležité znát počátek



a dobu trvání poruchy. Náhlý vznik je typický pro systematickou poruchu a při postupném vývoji se doptáváme, zda je progrese rychlá (hodiny či dny) nebo pomalá (týdny a měsíce).<sup>22</sup>

Několikaminutovou jednostrannou poruchu zraku označujeme jako *amaurosis fugax*. Také oftalmické migrény se projevují přechodným postižením zraku obou očí (až desítky minut), bývají spojovány se scintilujícím skotomem. Jednotlivé typy skotomů charakterizují určité úseky zrakové dráhy.<sup>22</sup>

Pro postchiasmatické léze jsou typické homonymní defekty zorného pole. Podle lokace a rozsahu hemianopie (= ztráta zraku, která postihuje jednu polovinu zorného pole) určujeme postiženou oblast.<sup>22</sup>

Onemocnění zrakové dráhy signalizuje nejen snížená zraková ostrost, výpadky v zorném poli, ale také změny zorníčkových reakcí. Pro vyšetření je přístupná pouze sítnice a terč zrakového nervu. Nezbytným vyšetřením je perimetrie, elektroretinografie a evokované potenciály.<sup>22</sup>

### 2.5.1 Onemocnění zrakového nervu

Zraková dráha začíná smyslovými buňkami v sítnici, pokračuje zrakovým nervem do střední jámy lební, kde je uložena chiasmatická ploténka, která je důležitá tím, že se zde část nervových vláken kříží. Všechny poruchy za chiasmatem postihují obě oči.<sup>21</sup>

Onemocnění optiku se projevuje poruchou zrakových funkcí, která je způsobena poškozením axonů zánětem, kompresí, oběhovou poruchou, toxickými vlivy demyelinizací, úrazem, degenerativním procesem a hereditárními faktory.<sup>22</sup>

#### Ischemická neuropatie optiku

Jedná se o druhé nejčastější onemocnění zrakového nervu hned za glaukomem. Typicky se objevuje u pacientů starších 50 let. Pro ischemickou neuropatii optiku je typický aferentní pupilární defekt, porucha zrakových funkcí a edém terče zrakového nervu.<sup>22</sup>

Onemocnění je akutní a probíhá bezbolestně. Příčinou je uzávěr jedné či více větví zadních ciliárních artérií. Byla prokázána souvislost s řadou celkových onemocnění: arterioskleróza, hypertenze, embolická nemoc a další. K nejčastějšímu projevu patří dolní altitudinální skotom (= výpadek v obou horních nebo obou dolních kvadrantech) a edém terče zrakového nervu. Průběh je buď stacionární nebo progresivní.<sup>22</sup>

Léčba je složitá, ale zakládá se na prevenci celkových onemocnění a odstranění rizikových faktorů, jako je např. diabetes mellitus, hypertenze či kouření.<sup>22</sup>

### **Neuritis nervi optici**

Nebo též optická neuritida (ON) je akutní zánětlivé onemocnění zrakového nervu lokalizované za okem (retrobulbárně neuritida).<sup>23</sup>

Toto onemocnění se vyskytuje u pacientů ve věku 15 až 45 let. Charakteristickým rysem je ztráta zrakových funkcí. Postiženy jsou všechny kvality zrakového vnímání – zraková ostrost, kontrast, barvocit i zorné pole. Centrální skotom se vyskytuje u 60% pacientů. Pacienti pociťují bolest při pohybech oka, která je lokalizována retro či periokulárně. Při léčbě nastává zlepšování zrakových funkcí po jednom i více týdnech či měsících.<sup>22</sup>

Zánět zrakového nervu bývá také prvním příznakem vzniku roztroušené sklerózy (RS).<sup>22</sup>

### **Městnavá papila**

Městnavá papila bývá způsobena vzestupem nitrolebního tlaku v kraniální oblasti. Nastává edém v důsledku kompresi nervových vláken v subarachnoidálním prostoru intraorbitální části zrakového nervu. Pokud není odstraněna příčina a edém papily progreduje, dochází k hemoragiím. Asi ve ¾ případů je přítomen nitrolební nádor.<sup>22</sup>

Zrakové funkce bývají často poměrně dlouho neporušeny, časnou známkou jejich poškození je rozšíření slepé skvrny. Také zornicové reakce jsou v normě.<sup>22</sup>

Nález při městnavé papile je většinou oboustranný a asymetrický. Pacient nemusí pociťovat žádné obtíže. Pokud se obtíže dostaví, většinou jde o již rozvinuté stádium.<sup>23</sup>

Při zvýšení nitrolebního tlaku bývá také přítomna diplopie. Příčinou diplopie bývá jedno či oboustranná paréza abducentu. Onemocnění často doprovází nauzea či zvracení.<sup>22</sup>

Nedílnou součástí vyšetření je CT či MR.<sup>22</sup>

### **Idiopatická intrakraniální hypertenze**

Onemocnění postihující pacienty všech věkových kategorií, nejčastěji však mladé, obézní ženy. Častým nálezem je paralytický strabismus. Příčina IIH není zcela známa, má však spojitost s mnoha celkovými onemocněními, užívání některých léků, metabolickými poruchami, anémie apod.<sup>22,23</sup>

Uvádí se, že dochází ke zvýšení nitrolebního tlaku a tím k rozvoji edému papil zrakového nervu.<sup>23</sup>

Léčba spočívá ve změně životního stylu a odbourání škodlivých faktorů. Pokud není medikamentózní léčba účinná a dochází k poškození zraku, přechází se k chirurgickému zákroku.<sup>22</sup>

### **Drúzová papila**

Drúzy jsou tvořeny shluky kalcifikovaného materiálu. Jedná se pravděpodobně o dědičné onemocnění, které je u 75-80 % pacientů oboustranné. U pacientů se vyskytují defekty zorného pole. Porucha centrální zrakové ostrosti je vzácná.<sup>22</sup>

### **Hereditární neuropatie optiku**

Leberova hereditární neuropatie optiku (LHON) je postižení postihující zejména mužskou populaci. Projevuje se poklesem zrakových funkcí na jednom oku, druhé oko onemocní o několik dnů, týdnů či měsíců později. Typická je rychlá ztráta zrakové ostrosti spolu s centrálním skotomem.<sup>22</sup>

### **Vrozené anomálie zrakového nervu**

Mezi nejčastější vrozené anomálie patří hypoplazie zrakového nervu, kolobom zrakového nervu a jamka terče zrakového nervu.<sup>22</sup>

U hypoplazie zrakového nervu bývá terč zrakového nervu zmenšen na třetinu až polovinu normálního průměru a bývá lemován dvojitým hypopigmentovým prstencem. Hypoplazie se může vyskytovat samostatně nebo v kombinaci s jinými mozkovými anomáliemi. Oboustranné postižení vede k praktické slepotě a nystagmu. Zraková ostrost kolísá od normálu až po světlocit. Dále můžeme zjistit poruchu barvocitu, kontrastní citlivosti a zorného pole.<sup>22,23</sup>

Kolobom terče zrakového nervu vzniká následkem nedokonalým uzávěrem fetální oční štěrby. Tím postihuje dolní část terče. Nervová vlákna bývají vytlačena do úzkého klínu v horních partiích. Projevuje se různorodě. Porucha zrakových funkcí se pohybuje od normálního vidění po závažné výpadky zorného pole.<sup>22,23</sup>

Jamka terče zrakového nervu (*optic disc pit*) je většinou jednostranná anomálie. Jamku nacházíme v temporální části okraje terče. Bývá okrouhlá či oválná s různou hloubkou a lokalizací. Pacienti nepociťují snížení zrakových funkcí, avšak mohou se vyskytnout výpadky v zorném poli či zamlžené vidění.<sup>22,23</sup>

## 2.5.2 Onemocnění chiasmatu

Poruchy chiasmatu jsou nejčastěji zapříčiněny útlakem (nádory, aneurysma aj.). Postižení se projevuje defekty zorného pole a oboustrannou subatrofií terčů zrakového nervu. Zasažena bývají jak vlákna senzorická, tak i pupilomotorická. Při diagnostice se využívá radiodiagnostika a endokrinologické vyšetření.<sup>22</sup>

Příkladnými nádory jsou nádory hypofýzy, supraselární meningeomy, kraniofaryngeom a gliom.<sup>22</sup>

## 2.5.3 Poškození retrochiasmatické oblasti

V důsledku křížení nervových vláken v chiasmatu léze lokalizované retrochiasmatické způsobují homonymní defekty zorného pole, tj. výpadky, které se vyskytují ve stejnostranných polovinách zorného pole obou očí. Postupem směrem od optických traktů

ke zrakovému kortexu se zvyšuje kongruence (shodnost) výpadů. To je dáno uspořádáním nervových vláken zrakové dráhy. Znamená to, že při perimetrii se nálezy zcela nepřekrývají.<sup>23</sup>

Léze optických traktů jsou celkem neobvyklé a většinou způsobují kontralaterální homonymní hemianopii. Mezi možné léze řadíme tumory, infarkty nebo demyelinizace.<sup>23</sup>

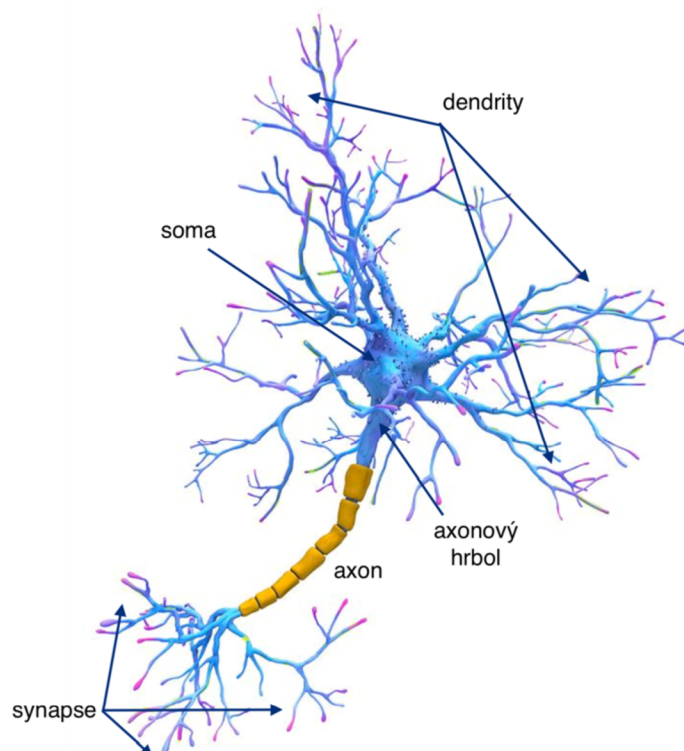
Částečné léze zrakových drah někdy způsobují tzv. makulární úsporu. To znamená, že při poškození jsou uchráněna vlákna pocházející z makul. Fovea má oproti svému okolí poměrně velké zastoupení od optického nervu po primární zrakový kortex.<sup>23</sup>

Oboustranná úplná homonymní hemianopii se nazývá korová slepota.<sup>23</sup>

### 3 Biologický neuron

Základním stavebním prvkem nervové soustavy je biologický neuron (obrázek 8). Jedná se o vysoce specializovanou buňku, která je schopna přijmout určité formy signálů, odpovědět specifickými signály, vést je a vytvářet specifické funkční kontakty (synapse) s ostatními neurony, efektory případně receptory. Nervové buňky vytvářejí v centrálním nervovém systému (CNS) komplikovanou a vzájemně mnohobuněčně propojenou prostorovou síť. Člověk jich má v mozkové kůře přibližně  $13$  až  $15 \times 10^9$ , přičemž každý neuron může být spojen s dalšími  $5000$  neurony.<sup>6,7,8</sup>

Nervový systém tvoří velmi složitá a proměnlivá architektura, ale všechny dílčí části jsou složeny z podobných stavebních složek – nervových buněk neboli neuronů. Každá z nich má unikátní funkční vlastnosti. Senzorické signály mohou být přenášeny přímo do čtvrté vrstvy a odtud je signál přeposílán dalším vrstvám ke zpracování.<sup>18</sup>



Obr. 8: Neuron – upraveno z <sup>19</sup>

### 3.1 Složení neuronu

Neuron je složen z vlastního těla (soma) a přenosných vláken. Rozeznáváme výběžky neuronu dvojího druhu. Dendrity slouží pro příjem vstupních informací, neuron jich má z pravidla více, bývají kratší a více se větví. Naproti tomu neurit (axon) je výběžek, který vede vzruch směrem od těla neuronu. Axon je zakončený výběžky (terminály), které jsou napojeny pomocí speciálního rozhraní (synapse) na dendrity jiných neuronů, což umožní přenos vedené informace z jednoho neuronu na druhý.<sup>6,7,8</sup>

Organely v těle nervové buňky produkují všechny potřebné chemické látky potřebné pro nepřetržitou práci neuronu. Mitochondrie dodávají buňce potřebnou energii ve formě molekuly ATP, ta je spotřebována jinými buněčnými strukturami.<sup>18</sup>

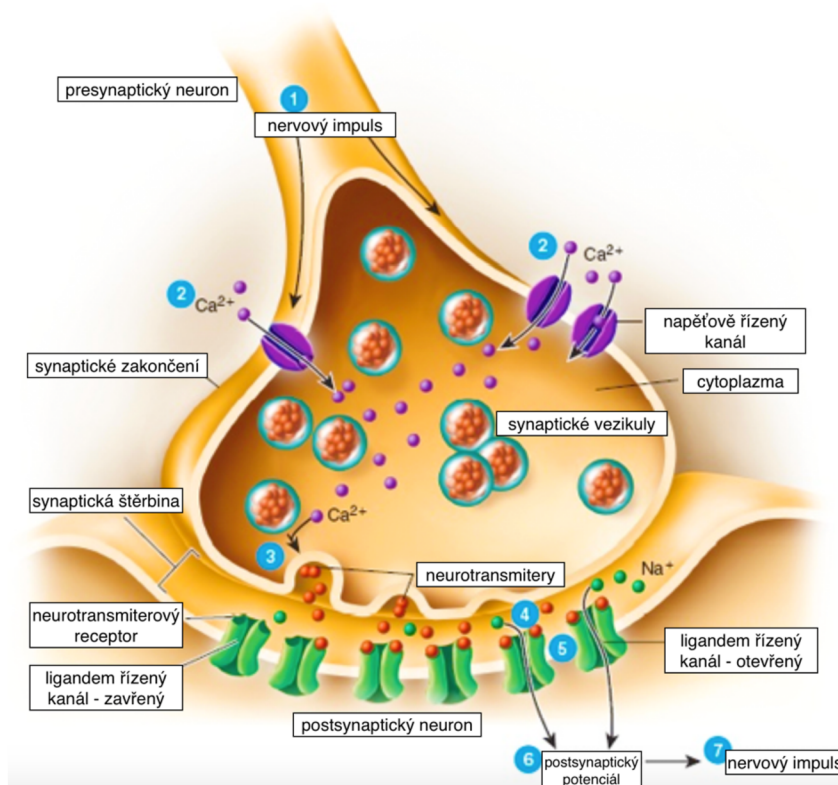
Existují buňky, které axon nemají. Jejich úlohou je pouze nastavit některé buňky do kontaktu s ostatními (například fotoreceptory v sítnici).<sup>18</sup>

Některá zvířata mají neurony s velmi odlišnou morfologií. U hmyzu dendrity vedou přímo do axonu a tělo buňky se nachází daleko od nich.<sup>18</sup>

Výše zmíněné čtyři prvky – dendrity, synapse, soma a axon, jsou minimální strukturou, kterou přijímáme z biologického modelu neuronu. V případě matematického neuronu pro výpočty užíváme vstupní kanály, tělo buňky a výstupní kanál. Synapse jsou nahrazeny kontaktními body mezi tělem buňky a vstupním nebo výstupním připojením; s těmito body je spojena tzv. váha.<sup>18</sup>

### 3.2 Funkce synapse

Komunikaci mezi neurony v CNS zprostředkovávají mezibuněčné kontakty zvané synapse. Podle schopnosti přenosu vzruchu se synapse dělí na elektrické a chemické. Elektrická synapse je v přenosu informace nejrychlejší. Většina synapsí v CNS jsou chemické. Jejich vzájemná interakce je realizována prostřednictvím uvolňované chemické

Obr. 9: Synapse – upraveno z <sup>20</sup>

substance (mediátoru) z presynaptické buňky, její vazba na receptor buňky postsynaptické a tím dojde k vyvolání toku elektrického proudu. Vedení těchto synapsí je jednosměrné a mohou být jak inhibiční, tak excitační. Inhibiční synapse tlumí šíření vzruchu nervovou soustavou na rozdíl od synapsí excitačních, které mají podporující účinek. Výše uvedený obrázek 9 zjednodušeně znázorňuje funkci synapse.<sup>6,7,8</sup>

### 3.2.1 Membrána neuronu

Biologové již více než 100 let vědí, že neurony přenášejí informace za pomoci elektrických signálů. V případě živočišného neuronu hovoříme o strukturách zahrnujících ionty a polopropustné membrány.<sup>18</sup>

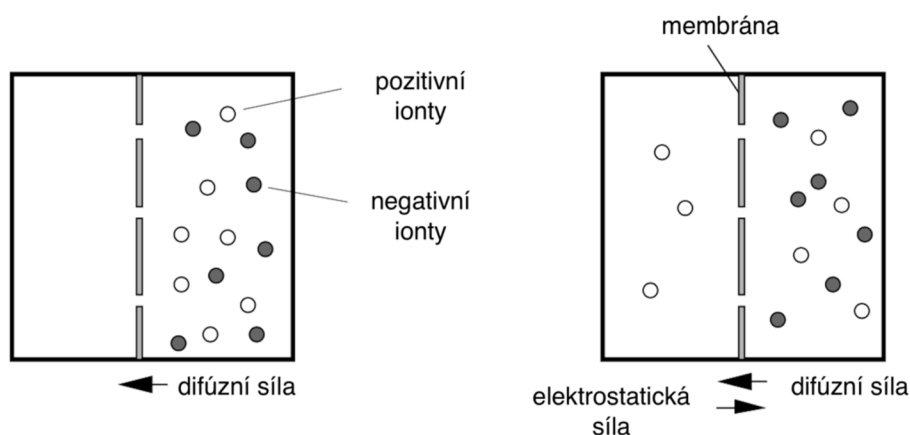
Signál přenášený neuronem má vždy stejnou povahu, vždy jde o změny elektrického potenciálu na membránách neuronů, kterou tvoří dvojitá vrstva. Membrána slouží jako difúzní bariéra. Soli, přítomné v našem těle se rozpouštějí v intracelulární a extracelulární tekutině, disociují na negativní a pozitivní ionty. Například chlorid



sodný se disociuje na pozitivní ionty sodíku ( $\text{Na}^+$ ) a negativní ionty chloru ( $\text{Cl}^-$ ). Dalšími pozitivními ionty přítomnými ve vnitřku nebo vnějšku buňky jsou draslík ( $\text{K}^+$ ) a vápník ( $\text{Ca}^{2+}$ ).<sup>18</sup>

Membrány buněk pro každý z těchto iontů vykazují různé stupně propustnosti. Ta je ovlivněna počtem a velikostí pórů v membráně, tzv. *iontovými kanály*. Jedná se o makromolekuly s určitými formami a náboji, které umožňují průchod pouze daným iontům z jedné strany buněčné membrány na druhou. Kanály jsou selektivně propustné pro ionty sodíku, draslíku a vápníku. Specifická permeabilita vede k různému zastoupení iontů ve vnitřku a vnějšku buňky, to souvisí s tím, že vnitřek neuronů je vzhledem k extracelulární tekutině negativně nabitý.<sup>18</sup>

Představme si krabici, která je rozdělena na dvě části oddělené membránou propustnou pouze pro kladné ionty tak, jako je ukázáno na obrázku 10. Na počátku je počet kladných a záporných iontů na pravé a levé straně vyrovnaný. Později se některé pozitivní ionty pohybují zprava doleva iontovými kanály v membráně. K pohybu iontů dochází vlivem difuze (= termodynamická tendence iontů a molekul se v prostoru přeskupovat). Je zaznamenán rozdíl potenciálů tzv. *reverzní potenciál*. V buňce je koncentrace iontů draslíku vyšší než mimo ni, vnitřek buňky je tedy vzhledem k okolí nabitý negativně, což vytváří rozdíl potenciálů mezi oběma stranami membrány. To vyžaduje difúzní potenciál, ten v určitém okamžiku pustí ionty draslíku přes membránu a potenciál klesne na nulu. Systém dosáhne ustáleného stavu.<sup>18</sup>



**Obr. 10: Difúze iontů přes membránu – upraveno z <sup>18</sup>**

### 3.3 Přenos informace

Schéma šíření informace neurony je následující: soma s axonem jsou obaleny membránou, která má schopnost generovat elektrické impulsy, ty jsou pak přenášeny na dendrity jiných axonů. Propustnost synaptických bran určuje intenzitu podráždění dalších neuronů. Při dosažení určité hraniční meze podráždění, tzv. prahu, neurony generují impuls a zajišťují tak šíření informace. Při každém průchodu signálu neuronem se propustnost synapse mění, což je předpokladem paměťové schopnosti neuronů.<sup>6</sup>

Ne všechny nervové buňky vykazují tyto typické charakteristické znaky. Některé neurony axony nemají. Axony jiných buněk mohou vést vzruchy a vytvářet spojení s konečnými buňkami. Elektrická aktivita ve fotoreceptorech nevzniká účinkem jiného receptoru, ale působením podnětu, tedy osvětlením. Další výjimkou v sítnici je to, že fotoreceptory axony nemají.<sup>8</sup>

Neuron je stimulován signálem, který je zaznamenán na konkrétním místě na jeho povrchu. Tento příchozí signál vyvolá v onom místě změnu membránového potenciálu. Vlivem signálu dojde k vyvolání akčního potenciálu, který způsobí místní depolarizaci plazmatické membrány (změnu membránového potenciálu). Podnět, který způsobí dostatečně velkou depolarizaci (překročením prahové hodnoty) přiměje napěťově řízené sodné kanály, aby se otevřely a umožnily iontům  $\text{Na}^+$  vstup do buňky po gradientu svého elektrochemického potenciálu. Klidový membránový potenciál se postupně mění z  $-60$  mV na  $+40$  mV. Membrána je stále depolarizována, sodné kanály jsou již inaktivní. Při návratu do klidového stavu se na membráně otevírají napěťově ovládané draselné kanály. Rychlý tok  $\text{K}^+$  způsobí návrat membrány do klidového stavu (repolarizace).<sup>10</sup>

Uvnitř a vně buňky existuje několik odlišných koncentrací iontů. Jejich zastoupení je uvedeno na obrázku 11. Záleží, jakého potenciálu buňka nakonec dostáhne. Přesný potenciál uvnitř buňky závisí na koncentraci. Potenciál dosahuje nejběžněji hodnoty  $-70$  mV, který je zapříčiněn ionty na následujícím obrázku. Hlavními ionty v buňce jsou sodík a draslík. Rovnovážný potenciál pro sodík je kolem  $58$  mV. Buňka dosahuje po

tenciálu mezi -80 mV a 58 mV. Rovnovážný stav buňky se blíží hodnotě vyvolané draslíkem, protože propustnost membrány pro draslík je větší než pro sodík. Při tomto potenciálu dochází k odtoku iontů draslíku a přítoku iontů sodíku. Sodné ionty jsou méně mobilní, protože mají menší množství otevřených kanálů než v případě iontů draslíku.<sup>18</sup>

V ustáleném stavu zažívá buněčná membrána dva proudy iontů, které se snaží dosáhnout rovnovážného stavu. Iontová pumpa zaručuje, že se koncentrace iontů s časem nemění.<sup>18</sup>

intracelulární tekutina (koncentrace v mM)	extracelulární tekutina (koncentrace v mM)
K <sup>+</sup> 125	K <sup>+</sup> 5
Na <sup>+</sup> 12	Na <sup>+</sup> 120
Cl <sup>-</sup> 5	Cl <sup>-</sup> 125
A <sup>-</sup> 108	A <sup>-</sup> 0

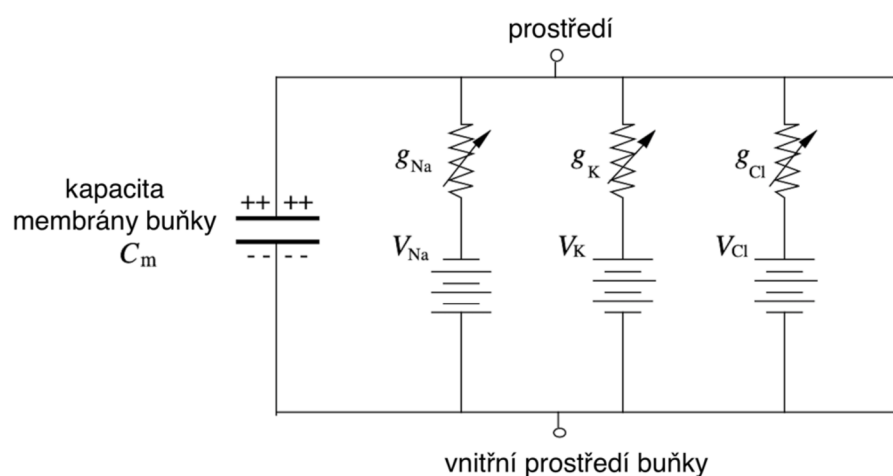
Obr. 11: Koncentrace iontů uvnitř a vně buňky – upraveno z <sup>18</sup>  
A<sup>-</sup> znázorňuje ostatní záporné ionty

### 3.3.1 Model Hodgkina a Huxleye

Britští vědci Alan Hodgkin a Andrew Huxley dokázali, že je možné postavit elektrický model buněčné membrány na základě velmi jednoduchých předpokladů. Membrána se chová jako kondenzátor vyrobený ze dvou izolovaných vrstev lipidů. Kondenzátor může být nabitý kladnými nebo zápornými ionty. Různé koncentrace několika tříd iontů ve vnitřku a vnějšku buňky poskytují zdroj energie schopný negativně polarizovat vnitřek buňky. Následující obrázek 12 ukazuje schéma modelu navrženého Hodgkinem a Huxleyem. Specifickou propustnost membrány pro každou třídu iontů lze modelovat jako vodivost (převrácená hodnota odporu).<sup>18</sup>

Model je založený na soutěživosti tří iontů o potenciální rozdíl mezi vnitřkem a vnějškem buňky. Vodivost  $g_{Na}$ ,  $g_K$  a  $g_{Cl}$  ukazuje propustnost membrány pro sodík,

draslík a úniky (tj. počet otevřených kanálů každé třídy). Signál může být produkován úpravou polarity článku změnami vodivosti  $g_{Na}$  a  $g_K$ . Zvětšením  $g_{Na}$  a mobilitou sodíkových iontů větší, než mobilitou draselných iontů se polarita změní z -70 mV na hodnotu okolo 58 mV, při které ionty sodíku dosáhnou rovnováhy. Pokud se pak vodivost  $g_K$  zvětší a  $g_{Na}$  klesne zpět na původní hodnotu, vnitřek buňky se opět stane záporným a dosáhne hodnoty nižší než -70 mV. K vybavení signálu je nezbytný mechanismus pro řízenou depolarizaci a polarizaci buňky.<sup>18</sup>



Obr. 12: Hodgkinův – Huxleyův model buněčné membrány – upraveno z <sup>18</sup>

### 3.4 Akční potenciál

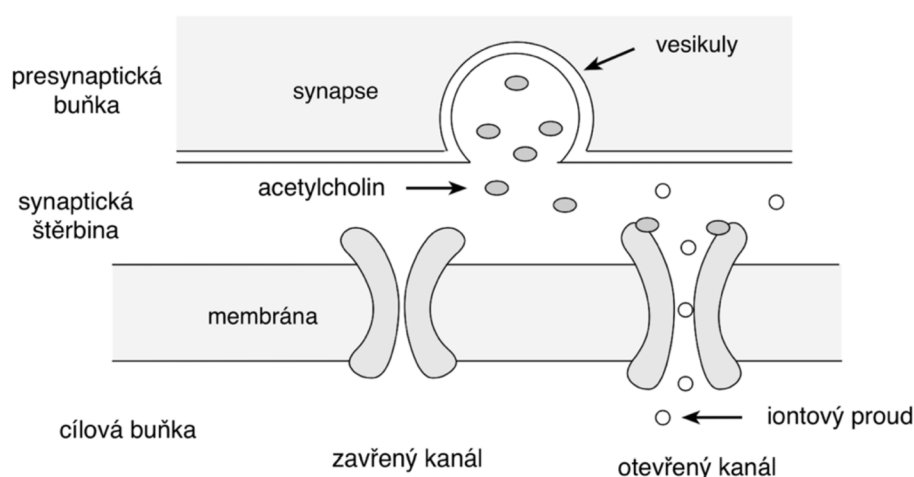
Vodivost a odporu buněčné membrány závisí na její propustnosti pro určité ionty. To je ovládáno otevřením nebo uzavřením excitovaných iontových kanálů. Kromě již zmíněných iontových kanálů existuje další typ, který je ovládaný elektricky. Tyto kanály reagují na depolarizaci buněčné membrány. Při tomto procesu dosáhne vnitřek buňky vzhledem k jejímu vnějšku prahové hodnoty, sodíkové kanály se automaticky otevřou a pozitivní sodíkové ionty proudí do buňky, tím je její vnitřek pozitivní. To vede k otevření kanálů pro draslík a pozitivní ionty draslíku proudí z vnějšku buňky a obnovují původní negativní polarizaci.<sup>18</sup>

Neurální signály jsou produkovány a přenášeny na buněčné membráně. Signály jsou reprezentovány depolarizačními vlnami, které procházejí axony. Tyto vlny nazýváme *akční potenciál*. Akční potenciál vzniká počáteční depolarizací buněčné membrány. Potenciál se zvyšuje z -70 mV na +40 mV. Po určité době se membránový potenciál opět stává záporným, dosahuje hodnoty až -80 mV. Buňka se postupně vrací k normálu a buněčná membrána v se vrací k původnímu potenciálu.<sup>18</sup>

### 3.5 Zpracování informace na neuronech a synapsích

Neurony přenášejí informace pomocí akčních potenciálů. Zpracovávání informací zahrnuje kombinaci elektrických a chemických procesů, které jsou regulovány z velké části na rozhraní mezi neurony – synapsemi.<sup>18</sup>

Synapse se jeví jako zesílení axonu. Malé vakuoly uvnitř (synaptické vezikuly) obsahují chemické přenašeče. Většina synapsí využívá právě chemickou signalizaci. Chemická signalizace je schematicky zobrazena na obrázku 13. Mezi synapsí a samotnou buňkou se nachází synaptická štěrbin. Když elektrický impuls dorazí k synapsi, synaptické vezikuly se spojí s buněčnou membránou. Signál proudí do synaptické mezery a některé se připojují k iontovým kanálům. Pokud je signál správného druhu, iontové kanály se otevřou a nyní může proudit více iontů z vnějška do vnitřku buňky.



Obr. 13: Chemická signalizace na synapsi – upraveno z <sup>18</sup>

Právě tímto způsobem se mění potenciál buňky. Pokud se potenciál uvnitř buňky zvýší, pomůže to vyvinout akční potenciál a synapse způsobí vybuzení vzruchu buňky. Pokud jsou negativní ionty transportovány do buňky, pravděpodobnost zahájení akčního potenciálu se na nějakou dobu sníží.<sup>18</sup>

Synapse určují směr přenosu informace. Signály proudí z jedné buňky do druhé přesně daným způsobem. Toho se využívá v modelech umělých neuronových sítí vložením výpočetního prvku do výpočetní jednotky. Dobře definovaný směr toku informací je základním prvkem každého výpočetního modelu a je implementován v digitálních systémech pomocí diod a směrových zesilovačů.<sup>18</sup>

Souhra mezi elektrickým přenosem informací v buňce a chemickým přenosem mezi buňkami je základem pro zpracování informací. Buňky zpracovávají informace integrací příchozích signálů a reakcí na inhibici. Tok transmiterů z excitační synapse vede k depolarizaci připojené buňky. Depolarizace musí překročit určitou prahovou hodnotu, to znamená, že je třeba otevřít dostatek iontových kanálů, aby se vytvořil akční potenciál. Toho lze dosáhnout několika pulsy, které přicházejí do buňky současně nebo v krátkém časovém intervalu. Pokud množství transmiterů dosáhne určité úrovně a aktivuje se dostatek iontových kanálů, buňka dosáhne svého aktivačního prahu. V tomto okamžiku se generuje akční potenciál na axonu příslušné buňky.<sup>18</sup>

Ve valné většině neuronů vzniká akční potenciál v tzv. *axonovém pahorku* (tj. část axonu nejbližší tělu buňky). V této oblasti je počet iontových kanálů větší a práh buňky nižší. Úlohou dendritů je elektrické signály shromažďovat a elektronicky přenášet, přesouvat cytoplazmou právě do zmiňovaného axonového pahorku. Při sběru signálů přicházejících z různých dendritů dochází k prostorovému součtu informací a k časovému sčítání, dojde ke vzniku jedné reakce.<sup>18</sup>

Počet požadovaných výpočetních jednotek lze snížit, pokud jsou informace nejen přenášeny, ale také váženy. Toho lze dosáhnout vynásobením signálu konstantou. Takový je druh zpracování, který najdeme na synapsích. Každý signál je událostí typu vše-nebo-nic, ale počet iontových kanálů spouštěných signálem se liší od synapse k synapsi. S každou synapsí  $i$  ( $1 \leq i \leq n$ ) tedy můžeme přiřadit číselnou váhu  $w_i$ . Pokud jsou

aktivovány všechny synapse současně, informace, které budou přenášeny, jsou  $w_1 + w_2 + \dots + w_n$ . Pokud je tato hodnota větší než prahová, buňka generuje pulz.<sup>18</sup>

Z předchozího popisu vyplývá, že neurony zpracovávají informace na membráně. Membrána reguluje přenos i zpracování informací. Součet signálů a srovnání s prahovou hodnotou je kombinovaným účinkem membrány a cytoplazmy. Je-li impuls generován, je vyslán a synapse uvolní některé molekuly transmitterů. Z toho popisu lze modelovat *abstraktní neuron*, který obsahuje dendrity, buněčné tělo a axon.<sup>18</sup>

### 3.6 Historický přehled

Současné znalosti o struktuře a fyziologii neuronu jsou výsledkem 100 let speciálního výzkumu. Fakta uvedená výše byla objevena v letech 1850 až 1950. Elektrickou povahu nervových impulsů předpokládali kolem roku 1850 Emil du Bois-Reymond a Hermann von Helmholtz. Ten dokázal měřit rychlost nervových impulzů a ukázal, že nejsou tak rychlé, jak si dříve vědci mysleli. Signály mohou být přenášeny v obou směrech axonu, ale kolem roku 1901 Santiago Ramón y Cajal předpokládal, že specifická síť nervových buněk určuje směr přenosu informací. Tento objev objasnil tím, že vazba neuronu představuje hierarchický systém.<sup>18</sup>

Ramón y Cajal byl také nejslavnějším obhájcem neuronové teorie. Také publikoval nejlepší diagramy neuronu své doby, tak dobré, že se stále používají.<sup>18</sup>

Chemický přenos informací na synapsích byl studován v letech 1920 až 1940. V letech 1945 až 1956 vysvětlili Hodgkin a Huxley mechanismus, kterým jsou v buněčné membráně vytvářeny depolarizační vlny.<sup>18</sup>

Současníci té doby jako Warren McCulloch a John von Neumann studovali matematické vlastnosti umělých neuronových sítí. Od té doby výzkum v neurobiologické oblasti postupoval v úzké spolupráci s matematiky a informatiky. Matematický model neuronu si představíme v nadcházející kapitole.<sup>18</sup>

## 4 Matematický neuron

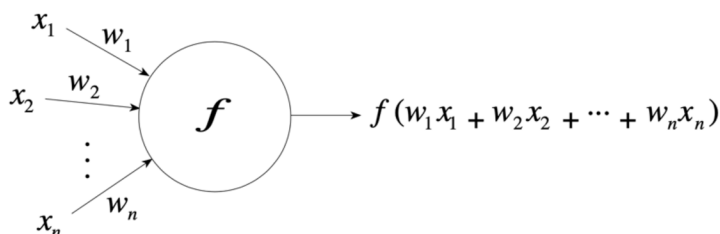
Při pochopení neuronové sítě bylo zapotřebí vytvořit zjednodušenou matematickou jednotku. Touto základní jednotkou matematického modelu neuronové sítě je matematický model neuronu, tzv. *formální neuron*. Tyto neurony jsou mezi sebou vzájemně propojeny spoji ohodnocenými váhami a tímto propojením. Váhy se vyznačují schopností adaptovat se – učit se (learning, training, adaptation, adaptive dynamics). Vedle schopnosti učit se, tedy nacházet závislosti v trénovacích datech a ty reprezentovat pomocí vah, také schopnost tzv. zevšeobecnování získaných poznatků (generalizace). Jinými slovy jde o schopnost správně reagovat i na neznámé vstupy, na které neuronová síť nebyla naučena.<sup>6,9</sup>

Inspirace, která dala vzniku umělé neuronové síti vychází z poznatků z oblasti neurofyzologie, tedy funkčnosti nervových buněk a mozku u živých organismů. Jedná se o převedení zjednodušené funkce fyziologického neuronu do matematického jazyka.<sup>6,9</sup>

### 4.1 Jednotlivý neuron

Neuron hodnotíme jako procesní prvek, který má  $N$  vstupů a jeden výstup (obrázek 14). Lze jej vyjádřit následující rovnicí:

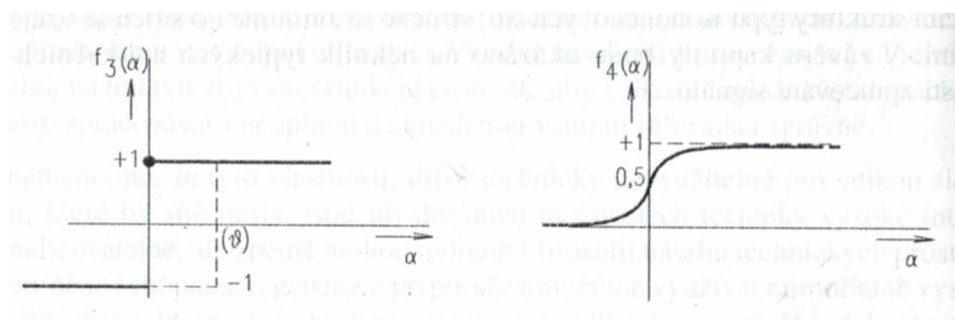
$$y = f\left(\sum_{i=1}^N w_i x_i - \vartheta\right) \quad (4.1)$$



Obr. 14: Neuron (s nulovým prahem) jako procesní prvek<sup>17</sup>



Rovnice udává jeho výstupy  $y$  pro vstupní vektor  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ , přičemž  $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$  je vektor vah,  $\vartheta$  je aktuální práh neuronu a  $f(\alpha)$  je navolená a neměnná nelineární funkce, kterou označujeme jako *charakteristiku neuronu*. Následující obrázek 15 zobrazuje charakteristickou nelineární funkci. Typickým příkladem je funkce  $\text{tg}(\alpha)$ .<sup>17</sup>



Obr. 15: Charakteristický průběh nelineární funkce<sup>17</sup>

#### 4.1.1 Vlastnosti neuronu

Následující popis se týká neuronu s binární charakteristikou. Při použití neuronu s charakteristikou binárních funkcí ... daném  $\mathbf{w}$  je prostor vstupujících vektorů rozdělen na dva poloprostory. Jeden poloprostor obsahuje všechny vektory  $\mathbf{x}$ , které jsou zakončeny na jednotkový výstup neuronu, druhý poloprostor obsahuje ostatní vektory. Dělicí plochou je nadrovina, která je dána vektorem vah ( $\mathbf{w}$ ), který se v procesu učení upravuje. Neuron dokáže řešit problémy, které jsou charakterizovány *lineárně separovatelnými* množinami vstupních vektorů.<sup>17</sup>

Konec 60. let dvacátého století bylo obdobím vzniku četných formulací řady příkladů tzv. nenaučitelných elementárních úloh, které nebyly lineárně separované. To mělo za následek pozastavení vývoje oboru zabývajícího se neuronovými sítěmi na téměř dvacet let. Poznatkem bylo zjištění existence vícevrstevnatých neuronových sítí a sítí se zpětnými vazbami.<sup>17</sup>

Řízené učení neuronu vychází z existence tzv. učební množiny dvojic  $(\mathbf{x}, y_d)$ , která reprezentuje požadovanou korespondenci;  $y_d$  zde vystupuje jako požadovaná odezva neuronu na vstupní vektor  $\mathbf{x}$ . Učení je založené na porovnávání skutečné odezvy neuronu s žádoucí odezvou a na základě těchto hodnot je upravován vektor vah  $\mathbf{w}$ .<sup>17</sup>

### 4.1.2 Technické přiblížení jednotlivých struktur

Vektorový vstup: vstup technického neuronu je složen z mnoha komponent, proto se označuje jako vektor.<sup>11</sup>

Skalární výstup: výstupem z neuronu je skalar, což znamená, že neuron je složený pouze z jediné složky. Několik skalárních výstupů pak zase tvoří vektorový vstup jiného neuronu. V neuronu dochází k sumaci tak, aby na konci zůstala pouze jedna výstupní složka.<sup>11</sup>

Synaptické měniče vstupu: technické neurony jsou zásobeny číslem (hmotností) – jsou váženy. Sada těchto vah představuje úložiště informací neuronové sítě.<sup>11</sup>

Hromadění vstupů: dochází k hromadění, vytvoření tzv. váženého součtu, který vystupuje jako jedna vážená hodnota = skalar místo vektoru.<sup>11</sup>

Nelineární charakteristika: vstupy technických neuronů nejsou úměrné jejich výstupům.<sup>11</sup>

Nastavitelé hmotnosti: váhy, které váží vstupy jsou variabilní, podobné chemickým procesům v synaptické štěrbině. To dodává síti velkou dynamiku, protože velká část „znalostí“ neuronové dráhy je uložena ve váhách a ve formě a síle chemických procesů v synaptické štěrbině.<sup>11</sup>

Jednoduchý neuronový model přijímá vektor:

$$\vec{x}, \quad (4.2)$$

se složkou  $x_i$  ty jsou vynásobeny příslušnými váhami  $w_i$  a hromaděny:

$$\sum_i w_i x_i \quad (4.3)$$

Výše uvedené se nazývá vážený součet. Následuje nelineární mapování  $f$ , které definuje skalární výstup  $y$ :

$$y = f\left(\sum_i w_i x_i\right) \quad (4.4)$$

Po tomto přechodu chceme přesněji specifikovat neuronový model a přidat nějaké šance a konce. Poté můžeme váhy upravovat.<sup>11</sup>

## 4.2 Neuronová síť

Neuronovou síť tvoří systém vzájemně propojených neuronů. Propojení je možné, když výstupní hodnota každého neuronu je přiváděna na vstup jiných neuronů (event. i na vlastní vstup). Například u dopředné vícevrstvé síti je výstup každého neuronu pro danou vrstvu přiváděn na vstup každého z neuronů následující vrstvy. Množství neuronů a jejich vzájemné propojení určuje tzv. architekturu neboli topologii sítě. Rozeznáváme neuronovou síť s cyklickou a acyklickou архитектурou.<sup>6</sup>

Cyklická neuronová síť obsahuje alespoň jednu smyčku. Pokud ji neobsahuje hovoříme o neuronové síti s acyklickou архитектурou. Acyklické sítě se dají uspořádat ve vrstvách.<sup>6</sup>

### 4.2.1 Perceptron

Nejjednodušší dopřednou neuronovou síť je jednovrstvý perceptron. Za perceptron je považována neuronová síť s  $n$  výstupy  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  a jedním pracovním neuronem, který je spojený se všemi svými výstupy. Každému spojení přísluší váhová hodnota  $(w_1, w_2, \dots, w_n)$ . Přenášený signál vstupními neurony má buď binární (tj. hodnota 0 nebo 1) nebo bipolární povahu (tj. hodnota -1, 0 nebo 1).<sup>17,12</sup>

Pevně stanovenou definici pro perceptron nemáme, nejčastěji se užívá označení dopředná síť se zkratovými připojeními. Perceptron prvně popsal Frank Rosenblatt v roce 1958.<sup>11</sup>

### 4.2.2 Vícevrstvé neuronové sítě

Neurony uspořádané do vrstev vytvářejí vícevrstvé neuronové sítě. Někdy se používá označení dopředné vícevrstvé neuronové sítě.<sup>6</sup>

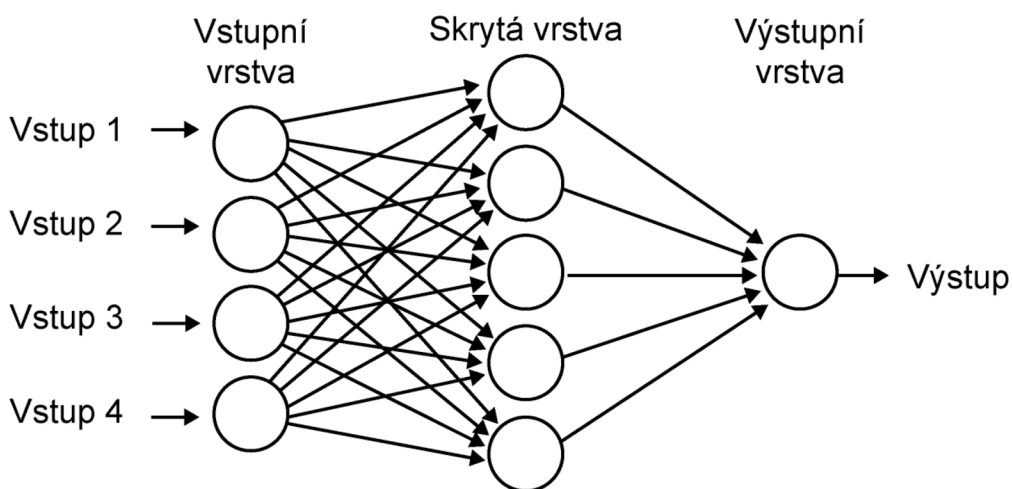
V tomto typu vícevrstvé sítě se výstupy každého neuronu přivádějí na vstupy všech neuronů ve vrstvě následující. Jedná se o spojení mezi neurony, což jsou myšlené orientační čáry, které spojují neurony v dané vrstvě s neurony ve vrstvě následující (obrázek 16). Spoj příslušného neuronu v dané vrstvě s neuronem ve vrstvě druhé je asociován s příslušnou vahou.<sup>6</sup>

Dle umístění rozlišujeme neurony vstupní, pracovní a výstupní. Vstupní neurony slouží k zavedení signálu do sítě, nepodílejí se nijak na výpočtech. Vstupní neurony jsou analogické k biologickým receptorům. Pracovní neurony slouží k přenášení a transformaci informace, která byla naposled zpracována neurony výstupními.<sup>6</sup>

Dopředné sítě jsou nejpoužívanějším typem neuronových sítí. Příchozí signály prostupují pouze jedním směrem od vstupní k výstupní vrstvě. Jednotlivé sítě vícevrstevných dopředných sítí se od sebe liší svou strukturou, tedy počtem vrstev a počtem neuronů v nich.<sup>17</sup>

Dalším důležitým vystupujícím ekvivalentem je pořadové číslo vrstvy. Pořadí vrstvy je dáno  $n = 1, 2, \dots, n_0$ , kde  $n_0$  je počet vrstev: Dále potřebujeme znát počet neuronů v  $n$ -té vrstvě  $N_n$  ( $N_{n_0} = M$ ),  ${}^n_j \mathbf{w}$  je vektor vah  $j$ -tého neuronu v  $n$ -té vrstvě a jeho  $i$ -tá složka = váha spojení s  $i$ -tým neuronem ve vrstvě předchozí.<sup>17</sup>

Soubor vah se v průběhu učení (popř. v případě zpracování dat) mění, není tedy konstantní. Tímto způsobem dochází k úpravě vstupně-výstupního přenosu sítě.<sup>17</sup>



Obr. 16: Uspořádání neuronu do vrstev v dopředné neuronové síti<sup>24</sup>

### 4.2.3 Aplikace neuronových sítí ve zpracování signálů

V oblasti zpracování signálů se nejvíce užívají dopředné neuronové sítě.<sup>17</sup>

Efektivitu učení neuronové sítě můžeme zvýšit, jestliže na vstup sítě přivedeme nějaký popis originálního signálu, ne samotný originál. Ten získáme vhodným transformačním postupem, jímž signál analyzujeme. Dochází k tomu v těch případech, kdy signál v originální oblasti vyžaduje mnoho dat. Vhodnou transformaci redukuje množství dat signálu, aniž by došlo k pozměnění jeho informační hodnoty. Síť má pak řádově méně vstupů, v důsledku snazšího rozpoznávání poklesne její potřebná složitost i délka učení a stává se mnohem spolehlivější.<sup>17</sup>

Nejčastěji užívaným typem transformace je spektrální analýza, protože velké množství prakticky důležitých úloh může být popsáno ve frekvenční oblasti. Využívá se především krátkodobých amplitud nebo výkonových spekter, která jsou odvozená od FFT (Fast Fourier Transform = Rychlá Fourierova transformace) z konečných úseků signálu, které na sebe navazují nebo se překrývají. Na bázi výkonového nebo amplitudového spektra lze např. podobnými metodami analyzovat akustické signály nebo mechanické chvění. Obdobnými metodami lze rozpoznávat charakteristiky zvuků, které vznikají v respiračním traktu člověka. Dobrých výsledků bylo dosaženo při provádění analýz elektromagnetického signálu při snímání zápěstí operátora. Vzniklá frekvenční analýza odpovídající přibližně akustickému pásmu, která poskytla vektory spektrálních koeficientů, které dopředná neuronová síť díky učení rozdělila do pěti tříd. Tyto nově vzniklé třídy znamenaly různé pohyby prstů. Neuronová síť je také schopna signál transformovat na deset složek výstupního vektoru, který vyjadřuje úhly článků prstů v deseti různých kloubech. Umělá ruka robota byla schopna kopírovat pohyby operátora.<sup>17</sup>

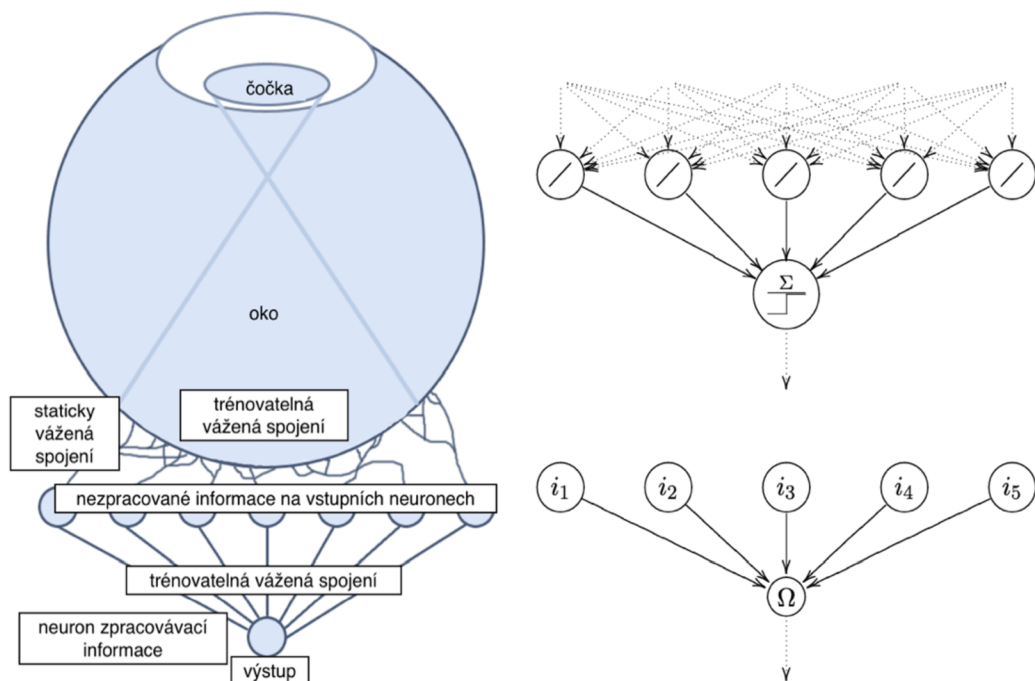
Velmi dobrým výsledkům se dostává při restauraci obrazů. Sítě jsou navrženy tak, aby svými stavy popisovaly přímo obraz – jednotlivé skupiny neuronů charakterizující jednotlivé obrazové prvky.<sup>17</sup>

## 5 Perceptron jako model zrakového nervu

V této kapitole se pokusíme propojit naše zjištění týkající se anatomie zrakové dráhy s vybudovaným matematickým modelem neuronové sítě. Jako pracovní hypotézu zvolíme model zrakové dráhy pomocí dopředného perceptronu.<sup>11</sup>

Z hlediska výše popsaného jsou vstupy zrakové dráhy tvořeny jednotlivými receptory sítnice – fotoreceptory. Ty se se staticky váženým spojením připojují k následující vrstvě – vstupní vrstva bipolárních buněk, viz obrázek 17. Pro vstupní vrstvu používáme model binárních neuronů, kdy každý neuron má dvě možné hodnoty výstupu ( $\{0,1\}$ , případně  $\{-1, 1\}$ ).<sup>11</sup>

Takto realizovaná část zrakové dráhy představuje jednovrstvý perceptron (singlelayer perceptron – SLP), který poskytuje pouze jednu tréninkovou váhovou vrstvu. Jedná se o zvláštní typ neuronové sítě s omezenými možnostmi zpracování vstupních signálů. Konkrétně je jednovrstvý perceptron schopen jednoduché klasifikace nepřekrývajících se množin.<sup>11,17</sup>



Obr. 17: Architektura perceptronu s jednou vrstvou variabilních spojení – upraveno z <sup>11</sup>

Obecnější strukturou je vícevrstvý perceptron (multilayer perceptron – MLP), který má větší počet tréninkových váhových vrstev a je více výkonný než SLP. V oku je druhá vrstva perceptronu realizována gangliovými buňkami, které jsou plně propojeny s předchozí vrstvou bipolárních buněk.<sup>11,17</sup>

S výhodou se nyní dá aplikovat Kolmogorovův teorém, který dokazuje, že jakoukoli funkci  $N$  proměnných lze vyjádřit pomocí lineárních kombinací a jedné, opakovaně použité nelineární funkce, která monotónně vzrůstá. Pokud bude síť dostatečně rozsáhlá, může na svých výstupech poskytovat libovolné funkce (transformace) vstupních proměnných.<sup>17</sup>

Konkrétně se zdá, že dvouvrstvý perceptron s  $N(2N+1)$  neuronů na vrstvu je principiálně schopen vytvářet libovolné funkce  $N$  proměnných. V případě, že bychom se rozhodli jednu vrstvu perceptronu přidat, bylo by možné celkový počet neuronů ve vrstvách snížit a zvýšit tak efektivitu učení a zpracovávání signálu sítí.<sup>17</sup>

Každopádně z předchozího vyplývá, že pro vytvoření dostatečně komplikované transformace vstupních signálů stačí užít perceptron o dvou vrstvách. Přesně této situace je evolučně dosaženo v oku, kdy sítnice představuje dvouvrstvé zpracování signálu z fotoreceptorů bipolární a gangliovou vrstvou a můžeme tedy očekávat poměrně komplikovaný výstup předávaný k dalšímu zpracování zrakovou dráhou.<sup>17</sup>

Popisované vertikální uspořádání sítnice je ovšem komplikováno horizontálními propojeními, které je nepostradatelné z hlediska správné funkce oka. Na jednu stranu jsou tato spojení integrální součástí struktury perceptronu, inhibiční charakter synapsí horizontálních buněk však již tuto strukturu přesahuje, stejně jako lokální působení amakrinních buněk, neobsahujících zřetelné axony. Díky horizontálním a amakrinním buňkám je tedy sítnice daleko více propojeným systémem, překračujícím vlastnosti perceptronu.<sup>17</sup>

Přes uvedené skutečnosti se však zdá, že dvouvrstvý perceptron představuje dobrý model zrakové dráhy. V jeho rámci je možné dobře vysvětlit kompresi signálu ve zrakovém nervu (přibližně 120 milionů fotoreceptorů přepojených na asi 1 milion

vláken). K získání takové kvality komprese je podle výše uvedeného zapotřebí právě struktura dvouvrstvého perceptronu, jakou ve zrakové dráze pozorujeme.<sup>17</sup>

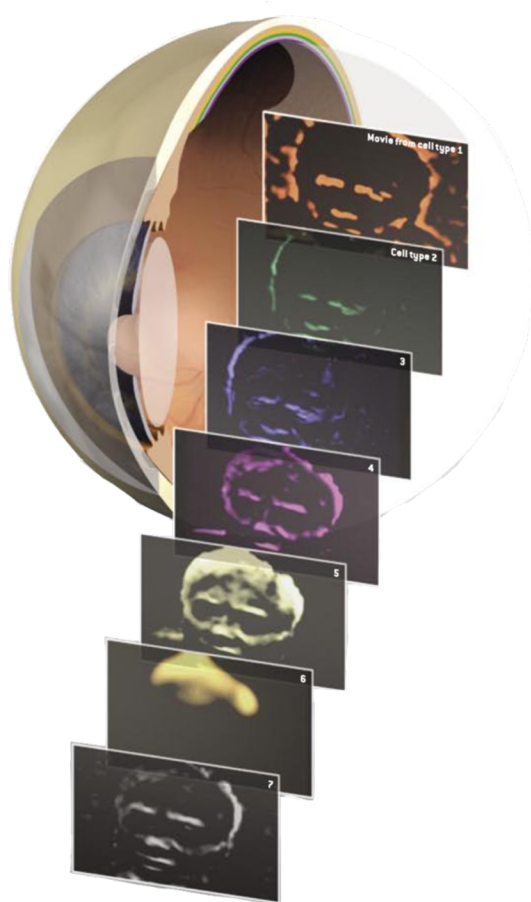
Sítnici o dvou vrstvách tak lze využít ke komplikovanému zpracování obrazové informace, odesílané do mozku. Z hlediska efektivity přenosu této informace je pro organismus výhodné, když je tato informace odesílána již předzpracovaná. V tomto ohledu je sítnice o dvou vrstvách schopná vytvářet jakékoli transformace. Jak se ukazuje, výstup zrakového nervu je navíc organizován tak, že informace důležité pro přežití nese odděleně, a k jejich zpracování v mozkové kůře není třeba dalšího dekódování.<sup>17,29</sup>

V práci F. Werblina bylo prokázáno, že oko zpracovává daleko více informací, než si kdokoli dokázal představit, a následně do mozku posílá množství různých obrazových reprezentací, které zde následně putují k interpretaci. K těmto výsledkům se dospělo na základě přímého studia sítnic králíka. Zjistilo se, že vybrané gangliové buňky produkují určité filmové stopy, které se od sebe liší různou měrou abstrakce signálu. Jedna stopa přenáší popis okrajů objektu, jiná reaguje na pohyb.<sup>29</sup>

Uvedený výzkum má značný význam pro obnovu zraku u nevidomých zavedením umělého senzoru před zrakový nerv, který by převzal funkci sítnice. V souladu s našimi zjištěními, bipolární a gangliové buňky nestačí pro vytvoření takového množství „filmových reprezentací“, které zobrazuje obrázek 18, k modulaci se přidávají amakrinní buňky.<sup>29</sup>

Interakce mezi bipolárními a amakrinními buňkami, které jsou čteny současně každou sadou gangliových buněk, tvoří data, která dostáváme k interpretaci vizuálního světa. Když čteme, uchopujeme předměty, rozeznáváme tváře a chodíme, různé kombinace abstraktních charakteristik pozorovaných scén jsou vizuální stopy, které mozek přijímá. Úkolem neurovědy je nyní pochopit, jak mozek interpretuje tyto informace, aby vytvořil nádherný a plynulý obraz reality.<sup>29</sup>





Obr. 18: Reprerentace mluvicího obličeje gangliovými buňkami – upraveno z <sup>29</sup>

## 6 Závěr

Mým cílem bylo co nejsrozumitelněji popsat jednotlivé struktury biologického a matematického neuronu, princip jejich fungování a nalézat spojitosti se zrakovou dráhou coby neuronovou sítí, která bývá jedním z mnoha článků problematiky umělé inteligence. Základem práce je přecházení od jednoduššího ke složitějšímu, tak aby byly souvislosti mezi živou buňkou a umělou strukturou co nejvíce patrné.

V první kapitole jsem se zaměřila na popis anatomických struktur zrakové dráhy. Podkapitoly jsou členěny podle návaznosti jednotlivých neuronů, tak aby odpovídaly reálnému uspořádání zrakové dráhy. Abychom mohli lépe porozumět fungování zrakové dráhy, je důležité do problematiky zahrnout i její patologické stavy.

Pochopení umělých neuronových sítí by se neobešlo bez znalosti biologického neuronu, jeho stavby, funkce a přenášení signálu. Druhá kapitola se proto věnuje nervové buňce našeho těla. Dnešní modely neuronu jsou v porovnání s mechanickým typem nesrovnatelně složitější, ať už jde o stavbu, transport látek nebo ku příkladu šíření vzruchů nervovými vlákny.

Ve třetí kapitole popisují složení a princip fungování matematického neuronu. Biologické poznatky jsme si osvojili natolik, abychom byli schopni jejich složení a princip fungování demonstrovat na umělých strukturách jako je nejčastěji popisována neuronová síť, jejímž nejběžněji používaným typem je vícevrstvá dopředná neuronová síť.

V práci se podařilo propojit matematický model neuronové sítě s jejím biologickým protějškem. V případě zrakové dráhy se jedná o strukturu dvouvrstvého perceptronu, který může být úspěšně použit jako model naší sítnice.

## Použité zdroje

1. Kvapilíková K. *Anatomie a embryologie oka: učební texty pro oční optiky a oční techniky, optometristy a oftalmology*. 1.vydání. Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví; 2000.
2. Synek S, Skorkovská Š. *Fyziologie oka a vidění*. 2., doplněné a přepracované vydání. Grada; 2014.
3. Čihák R, Grim M, Druga R. *Anatomie 3*. 2. upravené a doplněné vydání. Grada; 2004.
4. Rozsival P. *Oční lékařství*. První vydání. Galén; 2006.
5. Rokyta R. *Fyziologie*. Třetí, přepracované vydání. Galén; 2016.
6. Malý M, Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, Katedra fyziky. *Vícevrstvé dopředné neuronové sítě: úvod do teorie a aplikací*. Univerzita J.E. Purkyně, Přírodovědecká fakulta; 2007.
7. Kittnar O. *Lékařská fyziologie*. 1.vydání. Grada; 2011.
8. Nicholls J G, Martin R A, Wallace B G, Fuschs P A. *Od neuronu k mozku*. 1.vydání. Academia; 2013.
9. Mařík V, Štěpánková O, Lažanský J. *Umělá inteligence*. Academia; 2003.
10. Alberts B, Bray D, Johnson A, et al. *Základy buněčné biologie: Úvod do molekulární biologie buňky*. 2.vydání. Espero Publishing; 2005.
11. Kriesel D. A Brief Introduction to Neural Networks. Published online 2007. <http://www.dkriesel.com>
12. Volná E. *Neuronové sítě a genetické algoritmy*. Ostravská univerzita, Přírodovědecká fakulta; 1998.
13. Hall R. The Retina. AP Psychology. <http://www.rhsmpsychology.com/Handouts/retina.htm>
14. Perello Nieto M. Human visual pathway.svg. Wikimedia Commons. Published January 15, 2015. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human\\_visual\\_pathway.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Human_visual_pathway.svg)

15. Schünke M, Voll M, Wesker KH, Schulte E, Schumacher U. Papilla nervi optici („blinder Fleck“) und Lamina cribrosa. Thieme eRef. <https://eref.thieme.de/cock-pits/clAna0001/0/coAna00080/4-10059>
16. Egerton S, Basit A. Bio-medical imaging: Localization of main structures in retinal fundus images. ResearchGate. Published November 2013. [https://www.researchgate.net/figure/Retinal-structures-Optic-Disk-blood-vessels-and-Fovea-Macula\\_fig1\\_261017348](https://www.researchgate.net/figure/Retinal-structures-Optic-Disk-blood-vessels-and-Fovea-Macula_fig1_261017348)
17. Jan J. *Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů*. 2. upravené a rozšířené vydání. VUTIM; 2002.
18. Rojas R. *Neural Networks: A Systematic Introduction*. Springer; 1996. Accessed March 4, 2021. <https://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3093727>
19. Pasięka A. Pixels. <https://pixels.com/featured/4-neuron-alfred-pasiekascience-photo-library.html>
20. Kimberley B. St. Mark's School. [stmarksschool.instructure.com. https://stmarksschool.instructure.com/courses/5578/assignments/151737?module\\_item\\_id=181605](https://stmarksschool.instructure.com/courses/5578/assignments/151737?module_item_id=181605)
21. Kvapilíková K. *Přehled chorob zraťového ústrojí*. Národní centrum ošetravatelství a nelékařských zdravotnických oborů; 2003.
22. Rozsival P. *Oční lékařství*. Druhé, přepracované vydání. Galén; 2017.
23. Kuchynka P. *Oční lékařství*. 1. vydání. Grada; 2007.
24. Matematická biologie: e-learningová učebnice. Matematická biologie: e-learningová učebnice. <https://portal.matematickabiologie.cz/index.php?pg=analyza-a-hodnoceni-biologicky-ch-dat--umela-intelligence--neuronove-site-jednotlivy-neuron--uvod-do-neuronovych-siti--koncept-umele-neuronove-site>
25. Dawkins R. *Příběh předka: pouť k úsvitu života*. Vyd. 1. Academia; 2008.
26. sciphile.org science for everyone (not just for geeks). <http://sciphile.org/lessons/shades-inhibition-optical-illusions-lateral-inhibition>
27. Wikipedie Otevřená encyklopedie. cs.wikipedia.org. [https://cs.wikipedia.org/wiki/Amakrinn%C3%AD\\_buňka](https://cs.wikipedia.org/wiki/Amakrinn%C3%AD_buňka)
28. Wikipedie Otevřená encyklopedie. cs.wikipedia.org. [https://cs.wikipedia.org/wiki/Horizontáln%C3%AD\\_buňka](https://cs.wikipedia.org/wiki/Horizontáln%C3%AD_buňka)

29. Werblin F, Roska B. The Movies in Our Eyes. Published online 2007.

## Rejstřík

### A

akční potenciál, 34, 37, 38  
 amakrinní buňka, 19  
 anémie, 27  
*area cribiformis sclerae*, 20  
*area parastriata*, 23  
*area peristriata*, 23  
*area striata*, 23  
 architektura, 30  
 architektura sítě, 43  
 asociační buňka, 18  
 ATP, 31  
 axon, 31, 34, 37, 38, 39

### B

barevné spektrum, 17  
 barvocit, 24, 26, 28  
 bělima, 20  
 biologický neuron, 30  
 bipolární buňky, 17, 18  
 buňka, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 39

### C

*corpus ciliare*, 14  
*corpus geniculatum laterale*, 22, 23

### Č

čípky, 15, 16

### D

dendrit, 18, 31, 34, 39  
 depolarizace, 34, 36, 37, 38  
 diabetes mellitus, 26  
 difuze, 33  
 diplopie, 27  
*discus nervi optici*, 17  
 dopředná neuronová síť, 45  
 dopředná síť, 43, 44  
 dopředná vícevrstvá neuronová síť, 43  
 draslík, 33, 34, 36  
 duhovka, 14, 16

### E

edém, 25, 26, 27  
 elektroretinografie, 25  
 evokované potenciály, 25

### F

fisura calcarina, 24  
 foton, 17  
 fotopické vidění, 15  
 fotoreceptory, 15, 16, 34  
 Fourierova transformace, 45  
 fovea, 18  
*fovea centralis*, 15  
*foveola*, 16  
 fyziologická exkavace, 20  
 fyziologický neuron, 40

### G

ganglion retinae, 18  
 gangliové buňky, 17, 18  
 glaukom, 25  
 Gratiotelův svazeček, 22, 24

### H

hemianopie, 25, 29  
 hemoragie, 26  
 horizontální buňka, 18  
 hypertenze, 26

### Ch

charakteristika neuronu, 41  
 chiasma, 21, 28  
 chlor, 33

### I

iont, 32, 34, 36  
 iontová pumpa, 35  
 iontové kanály, 36  
 iontový kanál, 33  
 ischemická neuropatie optiku, 25

### J

jednotkový výstup, 41

jednotlivý neuron, 40  
jodopsin, 15

### **K**

kolobom, 28  
kontrast, 26  
korová slepota, 29

### **L**

*linea visus*, 16  
lipidy, 35

### **M**

*macula lutea*, 15  
makula, 22  
matematický neuron, 31, 40  
Mayerova klička, 23  
mediátor, 32  
membrána, 32, 34, 35, 36, 39  
mitochondrie, 31  
množina, 41  
Müllerova buňka, 19  
multilayer perceptron, 46

### **N**

nádor, 26, 28  
nadrovina, 41  
nauzea, 27  
nervová buňka, 40  
nervová soustava, 30  
nervové vzruchy, 15  
nervus opticus, 17, 20  
neurofyziologie, 40  
neuroglie, 19  
neuron, 15, 34, 43, 44, 45  
neuronová síť, 38, 40, 41, 43, 45, 46  
neuronový model, 42  
nystagmus, 28

### **O**

odpor, 35, 36  
opsin, 17  
optická radiace, 22, 23  
optické trakty, 21, 22  
*ora serrata*, 14, 15, 16

### **P**

papila zrakového nervu, 20  
paprsky, 15  
perimetrie, 25, 29  
pigment, 16, 17  
pigmentový epitel, 14, 16  
podpůrná buňka, 19  
polarizace, 35, 36  
poloprostor, 41  
postranní kolínková tělesa, 22  
potenciál, 32, 35, 37, 38

### **R**

radiodiagnostika, 28  
receptor, 18, 32, 34, 44  
repolarizace, 34  
*retina*, 14, 46  
rhodopsin, 15  
robot, 45

### **Ř**

řasnaté tělísko, 14, 16

### **S**

scléra, 20  
singlelayer perceptron, 46  
síť, 44  
sítnice, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 31, 34  
skalární výstup, 42  
skotom, 25, 26, 27  
skotopické vidění, 15  
slepá skvrna, 26  
sodík, 33, 34, 35  
soma, 31, 34  
strabismus, 27  
*stratum pigmentosum*, 14  
*sulcus calcarinus*, 22, 23  
sumace, 42  
světlocit, 28  
světločivé elementy, 15, 17  
synapse, 18, 30, 31, 37, 38, 39  
synaptická štěrbin, 37, 42

### **T**

*tractus opticus*, 22

transmitery, 38, 39  
trichromázie, 17  
*tunica interna*, 14  
tyčinky, 15, 16

**V**

váhy, 31, 38, 40, 42, 44, 46  
vakuola, 37  
vápník, 33  
vážený součet, 42  
vektor, 41, 42  
vektor vah, 41  
vektorový vstup, 42  
vlnová délka, 16  
vnější hraniční membrána, 19  
vnitřní hraniční membrána, 19

vodivost, 35, 36

**X**

xantofylin, 16

**Z**

zorná osa, 16  
zorné pole, 16, 24, 25, 26  
zrková dráha, 15, 22, 25  
zrková ostrost, 24, 26  
zrkové centrum, 24  
zrkový nerv, 21

**Ž**

žlutá skvrna, 15