



Dr. Bódi Nikolett

## Az idegrendszer felépítése és működése

Segédlet a BSc záróvizsgára való felkészüléshez

Jelen tananyag a Szegedi Tudományegyetemen készült az Európai Unió támogatásával.

Projekt azonosító: EFOP-3.4.3-16-2016-00014



# Az idegrendszer felépítése és működése

Segédlet a BSc záróvizsgára való felkészüléshez

Készítette: Dr. Bódi Nikolett

SZTE, 2020.

**Idegszövet:** idegsejtek és gliasejtek hálózatából, valamint **véredények**ből épül fel

- **idegsejtek:** az inger felvétele, feldolgozása, adekvát válasz kialakítása, ingerület vezetése és átadása más sejteknek; szinapszisok kialakítása
- **gliasejtek:** szigetelő-tápláló elemek; nem képeznek szinapszisokat, de kaphatnak szinaptikus végződéseket; felnőtt korban is jól osztódnak

Az idegsejtek és a gliasejtek egymástól elválaszthatatlan **morfo-funkcionális egységet** alkotnak (együtt fejlődnek, együtt működnek)!

- **véredények:** átjárhatóságuk erősen korlátozott: kapilláris endothelsejtek között szoros sejt kapcsolatok (tight junction) → **vér-agy gát (vér-ganglion gát)** a periférián) → idegsejtek számára állandó környezetet! biztosítanak (pl. ne jussanak be toxikus anyagok vagy a perifériás keringésben nagyobb koncentrációban jelenlevő anyagok az idegszövetbe; de számos gyógszermolekula bejutását is gátolják).

**Idegsejt felépítése: A neuron ultrastruktúrája magas metabolikus aktivitásra utal!!!**

- **sejttest** (=soma/perikaryon): Nissl-rögök (fejlett DER részletei, dendritekben is) → aktív fehérjeszintézis; fejlett Golgi → intenzív szekréciós tevékenység; mitokondriumok → energia; lizoszómák → sejttermelékek eltakarítása; eukromatikus mag → magas transzkripciós aktivitás
- **dendritek:** faágszerű nyúlványok, növelik a sejttest receptorfelületét!; **dendrittüskék:** bunkószerű kiemelkedések a dendriteken → fokozzák a kapcsolatteremtő képességet, fontosak a szinapszis alkotásban, tanulási- és memóriefolyamatokban
- **axon:** fontos az ingerület vezetésében; fő részei: iniciális szakasz, lefutási szakasz, terminálisok. Az *axon mindig elágazódik (kollateralizálódik)!* Kétirányú axonális transzport: • anterográd (gyors, sejttestből axonterminális felé, kinezin motorfehérjék segítségével, mikrotubulusok mentén); • retrográd (gyors, axonterminálístól sejttest felé; dinein motorfehérjék segítségével, mikrotubulusok mentén)

**Morfológia szerint** (nyúlványok számától függően):

- **unipoláris** (egy nyúlvány lép ki a sejttestből, az kollateralizálódhat)
- **pseudo-unipoláris** (sejttestből egy nyúlvány lép ki, majd hamar kettéágazik → centrális és perifériás nyúlvány; pl. hátsó gyöki ganglionban)
- **bipoláris** (két nyúlvány lép ki a sejttestből; pl. retina bipolaris sejtje)
- **multipoláris** (sejttestből sok nyúlvány lép ki; pl. gerincvelői motorneuronok, agykérgi piramissejt, kisagyi Purkinje-sejt)

**Funkció szerint:**

- **érzőneuron** (a perifériáról szállít szenzoros információt a központba, pseudo-unipoláris morfológiát mutat)
- **motorneuron** (axonjaikat a perifériára küldik, innerválják az izomrostokat; multipoláris morfológiát mutat)
- **interneuron** (érző és motoros funkciókat is közvetíthetnek; lokális interneuron (sok rövid kollaterális-helyi kapcsolatok) és projekciós interneuron (hosszan vezetik az impulzusokat))
- **neuroszekréciós sejt** (hormon termelés)

**A morfológia és a funkció között szoros kapcsolat van!!!**

## Neuronok funkcionális régiói (függetlenül a neuron típusától):

- Input - inger felvétele
- Integratív - információ feldolgozása
- Konduktív - ingerület tovavezetése
- Output - ingerület átadása (pl. másik neuronnak)

## Neuronok jeltovábbítása

- neuronok **nyugalmi membránpotenciálja** -70 mV (vagyis az axonban levő negatív töltések és az extracelluláris részen levő pozitív töltések közti elektromos potenciál különbség 70 mV)
- neuronok könnyen ingerelhetők, de csak megfelelő erősségű inger esetén alakul ki akciós potenciál („küszöbérték” elérése)
- **akciós potenciál** kialakulása „minden vagy semmi” elvet követi: az egyes akciós potenciálok amplitúdója megegyezik függetlenül a stimulus erősségétől
  - **Depolarizáció:** feszültség-függő ioncsatornákon keresztül nagy mennyiségű  $\text{Na}^+$  áramlik be a sejtbe (kis mértékű  $\text{K}^+$  kijutása), csökken a membránpotenciál negativitása, a neuron aktiválódik
  - **Repolarizáció:** feszültség-függő  $\text{Na}^+$  csatornák záródnak, fokozódik a  $\text{K}^+$  ionok kijutása, ismét fokozódik a membránpotenciál negativitása
- kábelszerű vezetés vs. **szaltatórikus vezetés** → evolúciósan sikeresebb ingerületvezetés; az információ „ugrálva” terjed egyik pontról a másikra; kitüntetett pontokon (=Ranvier-befűződések) kívül a többi rész nem vesz részt a vezetésben, ezek szigetelést (mielinizáció) kapnak; vékonyabb rostok lassabban, míg a vastagabb mielinizált rostok gyorsabban vezetnek az ingerületet

## Szinapszisok: sejtek közötti közvetlen kommunikációt biztosító speciális sejt-kapcsolatok

- interkaláris szinapszisok: két idegsejt kapcsolódik egymáshoz
  - **kémiai szinapszis:** ingerületátvitel kémiai mediátorokkal, az információ egy irányba terjed, lehet serkentő és gátló is; preszinaptikus sejt (szinaptikus vezikulák neurotranszmitterekkel) + posztzinaptikus sejt (receptorokkal) + szinaptikus rés = **szinaptikus triád**
  - **elektromos szinapszis** (=gap junction=nexus): két szomszédos sejt közötti makromolekuláris csatornarendszer, a két sejt közvetlen metabolikus kapcsolatban van egymással; az információ mindkét irányba terjed
- terminális szinapszisok: idegrendszer és periféria (pl. bőr, vázizom) kapcsolata
  - **receptorok** (extero-, intero-, és proprioceptorok)
  - **effektorok** (motoros végtag = neuromuszkuláris junkció)

## Gliasejtek

- **Központban:** **oligodendroglia** (mielinizáció), **asztroglia** (neuronok speciális anyagcseréjének ellátása, vér-agy gát kialakítása), **mikroglia** (fagocitózis, immunológiai védelem), **ependimasejtek** (központi idegrendszer üregeit bélelik; cerebrospinalis folyadék termelése), stb.
- **Periférián:** **Schwann-sejtek** (mielinizáció), **satellita-sejtek** (támasztó funkció), **enteroglia** (funkcionálisan és morfológiailag is az asztrocitákkal mutat hasonlóságot!)

## Idegrendszer embrionális fejlődése

- **ektodermális eredet;** régió-specifikus **neuronális indukció**, **organizátor központ(ok)** által termelt molekulák (BMP-, wnt-grádiens) → neuroektoderma → velőlemez → **velőcső** (agy és gerincvelő kialak.) és **dúcélcszejtek** (perifériás idegrendszer összes sejtjének kialak. + egebek)

## Idegrendszer törzsfejlődése - Alapelvek

- Protostom (összajú) állatok - **dúcidégrendszer** (garatideggyűrű, hasdúclánc), • Deuterostom (újszájú) élőlények - **dorzális csőidegrendszer**
1. **Centralizáció:** kialakul a központi és a perifériás rész (szoros kapcsolat!); a neuronok csoportokba tömörülnek
  2. **Szegmentáció:** szomiták szegmentáltsága; gerincvelői idegek szegmentált lefutása; agy szegmentáltsága (elő-, közép-, utóagy)
  3. **Kefalizáció:** az érzékszervek, az idegelemek a feji végen koncentrálnak, csoportosulnak

## Idegrendszer szerveződése

- **központi idegrendszer:** agy és gerincvelő (üregeiket a cerebrospinalis (agy-gerincvelői) folyadék tölti ki)
- **perifériás idegrendszer:** agyból kilépő agyidegek és gerincvelőből kilépő gerincvelői idegek; a periférián a sejtek ganglionokba szerveződnek (érező, autonóm és enterális ganglionok)

**Gerincvelő** (medulla spinalis): gerincsatornában helyezkedik el; rajta cervikális és lumbális megvastagodás; kívülről hártály védik (pia mater, arachnoidea, dura mater); keresztmetszeti képén kívül fehérállomány (nyúlványok, pályarendszerek), belül szürkeállomány (sejttestek)

- szürkeállományban dorzális (hátsó), ventrális (mellső) és laterális (oldalsó) szarv → **gerincvelői szarvakban a neuronok morfológiailag és funkcionálisan is szegregálódnak, a bemenő és a kimenő információk elkülönülnek egymástól!!!**  
(+ Rexed-féle laminák (I-X.) további dorso-ventrális szegregációt biztosítanak)
- **dorzális szarv:** kisebb érző interneuronok, ide érkeznek be a szenzoros információk
- **ventrális szarv:** nagy, primer motorneuronok, innen indulnak ki a motoros rostok a vázizmokhoz
- **oldalsó szarv:** preganglionális motorneuronok, az autonóm ganglionokhoz futnak
- 31 pár gerincvelői ideg (humán) → gerincvelő **hátsó gyökérén** az érző információk a hátsó gyöki érző ganglionon keresztül érkeznek be a hátsó szarvba; a **mellső gyökérén** a primer motorneuronok axonjai lépnek ki és viszik a mozgató információt a célszervekhez → gerincoszlopból való kilépés előtt a két gyökér egyesül → **kevert gerincvelői idegek (érező és motoros komponenseket is tartalmaznak)**

## Agyhólyagok

- **elsődleges agyhólyagok:** **prosencephalon**, mesencephalon, **rhombencephalon**
- **másodlagos agyhólyagok:** **telencephalon**, **diencephalon**, mesencephalon, **metencephalon**, **myelencephalon**

**Agytörzs:** területén **érező és motoros magcsoportok** (agyidegmagvak)!, **hosszú pályarendszerek!**, **formatio reticularis!** (= agytörzsi hálózatos állomány → kitölti az egész agytörzset, nyúlványaival behálózza az egész központi idegrendszert és szabályozza az életfolyamatokat!; parvo-, magnocelluláris sejtek és Raphe-oszlop)

- **nyúltvelő** (medulla oblongata): életfontosságú légző- és keringési központokat találunk itt
- **híd** (pons): szoros fejlődési és funkcionális kapcsolatban áll a kisaggyal; pályarendszerei kapcsolják össze a kisagyat a többi agyterülettel
- **középagy** (mesencephalon): alacsonyabb rendű gerinceseknél az érző pályák végső állomása

**Agyidegek:** I. nervus olfactorius (szaglóideg); II. nervus opticus (látóideg); III. nervus oculomotorius (szemmozgatóideg); IV. nervus trochlearis (sodorideg); V. nervus trigeminus (háromosztatú ideg); VI. nervus abducens (távolító ideg); VII. nervus facialis (arcideg); VIII. nervus acusticus/vestibulocochlearis (hallóideg/halló-egyensúlyozó ideg); IX. nervus glosso-pharyngeus (nyelv-garatideg); X. nervus vagus (bolygóideg); XI. nervus accessorius (járulékos ideg); XII. nervus hypoglossus (nyelv alatti ideg)

- lehetnek csak érzők (I., II., VIII.), csak motorosak (III., IV., VI., XI., XII.) és kevert (V., VII., IX., X.) is
- I. és II. agyidegnek nincs agytörzsi magja, ezek a szaglóhám és a retina területéről indulnak ki → „nem valódi” agyidegek

**Köztiagy:** szenzoros, vegetatív és neuroendokrin központok találhatóak itt; részei: **epitalamusz**, **talamusz** (dorzális talamusz lesz a szenzoros információk utolsó kéreg alatti átkapcsolódási helye!!), **hipotalamusz** (neuroendokrin szabályozás központja!, lásd: endokrin szabályozás)

**Kisagy** (cerebellum): motoros működéseket koordinálja, szabályozza!

- **fehérállomány:** **pályarendszerek és kisagyi mélymagvak** (ezek kapcsolják össze a kisagykéregt a központi idegrendszer többi területével, itt kapcsolódnak át a kisagykéregbe bemenő és onnan kimenő információk!! – nucl. dentatus, nucl. emboliformis, nucl. globosus, nucl. fastigii)

- **kéregállomány** → **rétegei:** • **str. granulosum** (szemcses sejtek rétege – axonjaik feljutnak a molekuláris rétegbe, ahol T-alakban elágaznak, így parallel rostok alakulnak ki); • **str. ganglionare** (Purkinje-sejtek rétege – nagy, multipoláris, GABAerg gátló neuronok hatalmas dendritfával); • **str. moleculare** (molekuláris réteg – itt főleg szinapszisok, dendritelágazódások, parallel rostok, ill. gátló kosár-, csillagsejtek)

**Nagyagy** (cerebrum): két hemiszférium; sulcusok és gyrusok (felületnövelés!); frontalis, parietalis, occipitalis, temporalis lebeny

- **cerebrális kéreg vertikális szerveződése** (6 réteg)

- I. Molekuláris réteg (pia mater alatt, itt: alacsonyabb rétegekben levő sejtek dendritjei)
- II. Külső szemcses sejtek rétege (itt: szemcses sejtek – kosár-, és csillarsejtek)
- III. Külső piramissejtek rétege (itt: közepes-nagy piramissejtek; axonjai intracorticalis kapcsolatokat alakítanak ki)
- IV. Belső szemcses sejtek rétege (itt: szemcses sejtek; főként a primer szenzoros kéreg területén fejlett, mivel a dorzális talamuszból kap közvetlen bemenetet)
- V. Belső piramissejtek rétege (itt: óriás piramissejtek; kéreg fő output része, főként a primer motoros kéreg területén fejlett)
- VI. Multiform réteg

- **cerebrális kéreg horizontális szerveződése:** különböző kérgi mezők/areák, bennük az egyes rétegek vastagsága, fejlettsége erősen eltérhet egymástól!; pl. primer szenzoros kéreg, primer motoros kéreg, stb.

**A központi idegrendszeri struktúrák hierarchikusan szerveződnek!:** 1. agykéreg – 2. agytörzs – 3. gerincvelő (legalsó szint; viszonylag nagy önállóság, itt ún. „végrehajtó parancsneuronok” vannak, nélkülük a magasabb agyi területek nem képesek szabályozni).

**Pályarendszerek**

- projekciós pályák: különböző „szintű” idegrendszeri területeket kapcsolnak össze; felszálló és leszálló pályák
- kommissurális pályák: a bilaterális központi idegrendszer két oldalát kapcsolják össze
- asszociációs pályák: az „azonos szintű” idegrendszeri területek között teremtenek kapcsolatot

**Agykamrák:** I. és II. oldalkamra, III. agykamra, aqueductus cerebri (középagyi kamra; nagyon beszűkült) és IV. agykamra (canalis centralisban folytatódik majd)

**Szenzoros rendszer:** környezet ingereinek felvétele; minden érzékelési folyamat egy privát, mentális élmény! (függ a korábbi élményektől, tanulási folyamatoktól, tapasztalatoktól!)

**Stimulus négy alaptulajdonsága:**

- **Modalitás:** a stimulus által közvetített energia (pl. tapintás, fájdalom – mechanikai energia; hőenergia; fényfelvillanások; hanghullámok) – különböző receptorok érzékelik (mechano-, termo-, foto-, kemo-, baroreceptorok, nociceptorok, stb.)
- **Térbeli elhelyezkedés:** ahol a stimulus képes elindítani egy folyamatot, a modalitás aktiválja a felületet (receptív mező)
- **Intenzitás:** a primer érző neuron tüzelési mintázata
- **Időtartam:** mennyi ideig marad fenn a tüzelési mintázat

**Szomatoszenzoros rendszer:** érző neuronjai a központi idegrendszeren kívül, érző ganglionban (hátsó gyöki ganglion) helyezkednek el, perifériás nyúlványuk a perifériára, míg centrális nyúlványuk a központba fut

- **Receptív mező:** egy primer érzőneuron axonterminálisa és az általa innervált bőrterület/bőrfelület; egymással átfednek (plaszticitás!)
- **Dermatóma:** egy hátsó gyöki ganglionhoz tartozó bőrterület/innervációs terület; szintén átfednek (plaszticitás!)  
(fej területéről is hasonló rendezettségben jutnak az információk (az agyidegek révén) a központba)

### Receptorok:

- exteroceptorok: test külső felszíne felől hozzák az információt; bőr kül. rétegeiben; sokféle típus (pl. tapintó-, hő- és fájdalomreceptorok...)
- interoceptorok: belső szervek falából viszik az információt, fiz. körülmények között nem tudatosulnak, de zavar esetén igen
- proprioceptorok: érzékelik az izmok mindenkori állapotát, megnyúlását, feszülését (pl. izomorsó, ínorsó)

**Lemniscus medialis pálya:** elsősorban a diszkriminatív tapintás központi pályája; a szenzoros afferensek belépve a gerincvelőbe azonos oldalon szállnak fel → agytörzsi magokban első átkapcsolódás projekciós neuronra (átkereszteződés) → dorzális talamuszon! → primer szomatoszenzoros kéreg

**Anterolateralis pálya:** főként a fájdalom- és hő érzékelés központi pályája; szenzoros afferensek a gerincvelő hátsó szarvában átkapcsolódnak egy projekciós neuronra (átkereszteződés) → agytörzs → dorzális talamusz! → primer szomatoszenzoros kéreg

**DE: A szenzoros pályák mindig párhuzamosak és nem kizárólagosak!!!**

**Nocicepció** (szöveti sérüléssel járó fájdalom érzékelése, pl. vágott seb): különböző kémiai anyagok szabadulnak fel (pl. bradikinin, prostaglandin, szerotonin), melyek szenzitizálják a receptort (várakoztatás!!), neuropeptidok szabadulnak fel (pl. P-anyag), mely a hízósejtekre hatva hisztamin felszabadulást idéz elő → közvetlenül aktiválja a szabad idegvégződéseket

- nociceptív fájdalmat vékonyabb vagy mielinizálatlan rostok szállítják a gerincvelőbe → lassabb vezetési sebesség, később érezzük!
- nem nociceptív fájdalmat vastagabb rost viszi a gerincvelőbe → gyorsabb vezetési sebesség, „azonnal” érezzük!
- ha a fájdalom nem túl nagy, akkor a gerincvelői helyi interneuronok által termelt endogén opioidok által legátolható
- ha az interneuronok továbbengedik az információt → átkapcs. projekciós interneuronra (átkereszteződés) → anterolateralis pálya!

**Kisugárzó fájdalom:** a viscerális szervek nociceptoraiból érkező bőrre vetülő fájdalom; zsigerek bántalmait jelzik; oka: a különböző receptorok (extero- és interoceptorok) centrális nyúlványai konvergálnak, vagyis amely primer afferensek egy helyre futnak be (pl. ugyanabba a laminába), azok az információk összekeveredhetnek

**Primer szomatoszenzoros kéreg (S1):** sulcus centralis mellett, a gyrus postcentralis területén van; további területekre (**Brodmann-areák:** 1, 2, 3a, 3b) osztható; a különböző areákba különböző információk érkeznek a dorzális talamusz felől

- a receptív mezők topográfiai rendezettsége a S1 területén is végig követhető, a **periféria minden pontja leképeződik a kéregben!!**
- DE: a **kül. szervek különböző arányban vannak reprezentálva** a szenzoros kéregben → **somatotópiás kérgi térkép (szenzoros homunculus)** → pl. embernél: kéz, száj, szem, nyelv területe; patkánynál a bajuszszőrök jobban reprezentálódnak (S1 - IV. rétegben **Barell-hordók**) → minden Barell egy bajuszszőrtől kap információt, a Barellek elhelyezkedése teljesen megfelel a bajuszszőrök elhelyezkedésének

**A szenzoros információk beérkezése szigorú topográfiai rendben történik (szigorú szegmentáltság miatt)!**

**Specializált érzékszervek:** a fej területén, a kefalizáció eredményeként alakulnak ki; receptorok: valódi idegsejtek (pl. látásnál) vagy érzékhámsejtek (ektodermális eredetű plakod sejtek; primer (pl. szaglópámsejt) vagy szekunder (ízlelősejtek, belső fül - szőrsejtek)

**Vizuális érzékelés:** szem részei: • 1. tunica fibrosa (sclera/ínhártya és cornea/szaruhártya)  
• 2. tunica vasculosa (coroidea/érhártya, corpus ciliare/sugártest és iris/szivárványhártya)  
• 3. tunica nervosa (= retina) (+ egyebek: üvegtest, szemlencse, pupilla, stb.)

- **Retina rétegei!!!:** I. **Pigmenthám réteg** (szorosan kapcsolódó nyúlványos pigmenthámsejtek); II. **Fotoreceptor sejtek rétege** (csapok és pálcikák kül- és beltágjai); III. **Külső határhártya** (Müller-glia nyúlványainak végtalpai); IV. **Külső szemcsesejtek rétege** (fotoreceptorsejtek sejtmagjai); V. **Külső szinaptikus réteg** (fotoreceptorsejtek-bipoláris sejtek-horizontális sejtek közötti szinapszisok); VI. **Belső szemcsesejtek rétege** (bipoláris sejtek, horizontális sejtek, Müller sejtek és amakrin sejtek sejtestjei); VII. **Belső szinaptikus réteg** (bipoláris sejtek-ganglionsejtek-amakrin sejtek közötti szinapszisok); VIII. **Ganglionsejtek rétege** (ganglionsejtek sejtestjei); IX. **Optikus rostok rétege** (ganglionsejtek nyúlványai összeszedődnek); X. **Belső határhártya** (Müller-gliák nyúlványainak végtalpai)

- a fény áthalad a retina minden rétegén, mielőtt eléri a fotoreceptor sejteket (kivétel a fovea közepe), ahol megtörténik a **fotokémiai reakció** (fény hatására (foton energia) a membránkorongokban levő rhodopsin átalakul...)

- a **vertikális információáramlás** (fotoreceptor sejtek → bipoláris sejtek → ganglionsejtek) a vizuális információ agyi (központi) feldolgozását, a **horizontális neuronrendszerek** (horizontális és amakrin sejtek révén) pedig az információ retinaszintű feldolgozását teszik lehetővé!

- **Látópálya:** mindkét szem esetén a nasalis retinafélből érkező rostok a **chiasma opticumban** átkereszteződnek (= **látóideg átkereszteződése**), míg a temporalis retinafélből érkező rostok (átkereszteződés nélkül) az azonos oldali **tractus opticusba** (**látópálya**) jutnak → **nucl. geniculatum laterale** (utolsó kéreg alatti átkapcs. hely a dorzális talamuszban) → **primer vizuális kéreg**

**Ízérezékelés:** a nyelv ízlelősejtjei **szekunder érzékhámsejtek**; ízlelőbimbókban hely. el, különböző ízekre érzékenyek (édes, sós, savanyú, keserű); a különböző íz-stimulusok különböző mechanizmusokkal alakulnak át elektromos jellé (ok: különböző ioncsatornákra hatnak)

- a nyelv különböző területéről érkező információk a térbeli elhelyezkedésnek megfelelően szegregáltan haladnak tovább is! → **agyitörzsi nucleus tractus solitarius** → talamikus magokon keresztül frontális és parietális kérgi területekre jut az információ

**Szaglás:** szaglőhámiban **primer érzékhámsejtek** (szaglősejtek) → érzékelik a folyadékban oldott molekulákat (szag-epitópok) → nyúlványaik összeszedődve alkotják a **szaglőideget** → rostacsonton átjutva a **bulbus olfactoriusba** (szaglőgumó) projektálnak, itt egy szinaptikus egységben (= **glomerulus**) végződnek → glomerulusban a szaglőhámsejt axonja különféle neuronokkal szinaptizál (mitrális sejtek, tufted/„pamacsos” sejtek, periglomeruláris interneuronok → **tractus olfactorius** (szaglőpálya) → **szaglőkéreg** (legnagyobb területét a piriform cortex adja, de része az anterior olfactoricus mag, az amygdala egy része és az entorhinális kéreg is)

**Hallás:** a **külső fül** a külső hallójáraton keresztül fókuszálja és továbbítja a hangrezgéseket → a **középfülben** a levegő rezgései a hallócsontokra tevődnek át, melyek a rezgéseket a folyadékkal töltött **belső fülbe** közvetítik!

- **csontos csiga** folyadékkal töltött üregei: scala vestibuli, scala timpani és scala media → a scala mediat plakod eredetű felületi érzékhám béleli = **Corti-féle szerv** → területén **szőrsejtek** (**szekunder érzékhámsejtek**) – 1 belső, 3 külső szőrsejtsor, rajtuk stereociliumok (rendezetten)

- ha a szőrsejtek aktiválódtak, az információt bipoláris neuronoknak adják át, melyek nyúlványai a **VIII. agyideg** cochlearis ágában haladnak a nucleus cochlearis magkomplexbe. Itt az afferensek szétágaznak → keresztezett rostköteg (**trapéztest**) halad tovább → **oliva superior** (híd) → **colliculus inferior** (középagy) → **nucleus geniculatum laterale** (dorzális talamusz, utolsó kéreg alatti átkapcsolódás) → **primer hallókéreg** (tonotópiásan rendezett!, az információk frekvencia szerint reprezentálódnak)

- **járulékos hallókérgi területek:** **Broca area** → **beszéd** motoros funkcióit szabályozza; **Wernicke area** → beszédértésben fontos; e két terület között kétirányú kapcsolat (fasciculus arcuatus); **gyrus cinguli** → limbikus rendszer része, a beszéd motivációs, érzelmi komponenseit adja

**Motoros rendszer:** a különböző ingerekre adott adekvát válasz végrehajtására specializálódott

**Szomatomotoros rendszer:** az elemi reflexek, testtartás, helyváltoztatás motoros komponenseit szabályozza (agykéreg szabályozza)

- motoros működések alapvető formája a reflex → anatómiai megjelenése a reflexív! - gerincvelői és agytörzsi reflexek nem tudatosulnak, az akaratlagos mozgásokat az agykéreg szervezi!; **motoros egység:** egy  $\alpha$ -motoneuron által beidegzett izomrostok összessége
- a motoros neuronok minden szinten az izmok anatómiai helyzete szerint helyezkednek el, funkcionális alapon is rendeződnek (medio-lateralis és dorso-ventralis rend), pl. medialisán levők törzsizmokat, lateralisan levők végtagizmokat innerválják → gazdaságossági elv (legrövidebb út)! → **szomatotópiás szerveződés** → a periféria minden pontja leképeződik a motoros kérgi területeken is (kül. területek külön mértékben reprezentálódnak) → **motoros szomatotópiás térkép (motoros homunculus)**
- **Gerincvelői reflexek:** egyidőben sok végtagizom koordinált kontrakcióját szabályozzák, néhány példa:
  - **Patella reflex:** két neuronos, monoszintaptikus reflexív; a quadriceps femoris extensor izom ínшалagjára mért ütés hatására az izom megnyúlik. A szenzoros információ a hátsó gyöki érző ganglionon keresztül bemegy a gerincvelőbe és szinaptizál egy extensor motorneuronnal és a m. quadriceps kontrahál. Ezzel egyidőben az érző neuron szinaptizál egy gátló interneuronnal, s ezen keresztül az antagonista hajlító izmot elemnyeszi.
  - **Hajlító és kereszttezett feszítő reflex** (pl. szögbe lépünk): poliszintaptikus reflexív; egy serkentő pálya aktiválja azokat a motorneuronokat, amelyek az azonos oldali hajlító izmokat innerválják, ez visszarántja a végtagot a fájdalmas stimulustól. Az ellenkező oldali feszítő izmokat innerváló motorneuronok is aktiválódnak, így biztosítják a láb elhúzásakor a stabilitást. A gátló interneuronok biztosítják azt, hogy az antagonista izmokat ellátó motorneuronok a reflexválasz során inaktívak maradjanak.
- A reflexeknek mindig van központi szabályozása, de vannak olyan automatikus szabályozások (pl. járás, futás), melyek kiesnek az agyi kontroll alól = **központi mintázatgeneráló rendszerek**. Az ezeket szabályozó neuronok pacemaker állapotban vannak (állandóan aktívak).
- **Primer motoros kéreg (M1):** sulcus centralis mellett, gyrus precentralis területén van; Brodmann 4. area; neuronjai adják a corticospinalis pályák axonjait (fejlett 5. rétegben Betz-féle óriás piramis sejtek axonjai → legfontosabb mozgatópálya)
- **Piramis pályarendszer:** az akaratlagos, finom mozgások és az újonnan tanult mozgások kialakítása!; több pálya alkotja:
  - **Corticospinalis medialis:** corticospinalis pályák 10%-a; kéregből gerincvelőbe, a törzsizmokat innerváló  $\alpha$ -motorneuronokhoz fut; abban a gerincvelői szegmentumban keresztteződik csak át, amelyikben majd ki is lép
  - **Corticospinalis lateralis:** corticospinalis pályák 90%-a; kéregből gerincvelőbe, a végtagizmokat innerváló  $\alpha$ -motorneuronokhoz fut; nyúltvelő szintjén keresztteződik
  - **Cortico-bulbaris:** kéregből agytörzsi motoros magvakhoz fut; pl. corticorubralis pálya (kéreg → nucl. ruber), corticoreticularis pálya (kéregből → formatio reticularis)
- **Extrapiramidális pályák:** automatizált, durvább, nagyobb kiterjedésű mozgások, izomtónus szabályozása; agytörzsből a gerincvelőbe futnak, pl. rubrospinalis pálya (nucl. ruber → gerincvelő), reticulospinalis pálya (formatio reticularis → gerincvelő)
- **Bazális ganglionok rendszere:** horizontálisan épül be a motoros szabályozásba (kérgi motoros körök!); közvetlenül nem projektálnak sem agytörzsi, sem gerincvelői mozgató struktúrákhoz, csak a cortexen keresztül hat a motoros működésekre!
  - magcsoportok: • striatum, • globus pallidus, • substantia nigra, • subthalamicus magok
  - **fő input mag** a striatum; inputok érkeznek ide a kéregből (corticostriatalis glutamaterg inputok), substantia nigra pars compacta területéről (nigrostriatalis dopaminerg inputok – Parkinson-kór esetén ezek eltűnnek!) és talamusz centromedialis magjaiból



- **fő output magok:** globus pallidus interna és substantia nigra pars reticulata; tónusos aktivitással rendelkeznek (ez nyugalomban tónusos gátlást biztosít); közvetlen GABAerg projekciók a talamuszba ill. agytörzsi területekre
- striatum két párhuzamos pályarendszeren keresztül projektál az output magokhoz: direkt és indirekt pályák
- **Direkt pálya:** striatum közvetlen GABAerg projekciói révén gátolja az output magok talamuszra kifejtett gátlását → talamusz aktiválja a motoros kérget
- **Indirekt pálya:** striatum GABAerg projekciói révén gátolja a globus pallidus externa GABAerg projekcióit, így a subthalamicus magok felszabadulnak a gátlás alól, s glutamaterg serkentő projekcióik révén aktiválják az output magokat → fokozódik a talamusz tónusos gátlása, s csökken a corticalis aktivitás

### • Cerebellum szerepe a motoros működésben

- mérete és fejlettsége összefügg az egyed/faj mozgáskoordinációs képességeivel!
- **komparátor szerv:** összehasonlítja a tervezett mozgásmintát (kérgi parancsot) a körülményekkel (ha a tervezett mozgásminta nem helyes, akkor gátolja azt, a kisagy a kéreg felé is visszaközvetíti az információt, így kialakulhat a végleges, kontrollált parancs!!)
- **Spinocerebellum:** gerincvelővel áll kapcsolatban, végtagok mozgásában és testtartásban fontos
- **Vestibulocerebellum:** vestibuláris rendszerrel áll kapcsolatban (egyensúly szabályozás!!! → félkörös ívjáratok: szemmozgás szabályozás, tekintet fixálása)
- **Neocerebellum:** emlős sajátosság!; nagyagykéreggel áll kapcsolatban (hídماغvakon keresztül); motoros tanulásban, kognitív funkciókban fontos!

**Autonóm motoros rendszer:** a belső környezet egyensúlyának fenntartásában fontos (hipotalamusz neuronális kimenetei szabályozzák)

- **Szimpatikus** („fight or flight” – szervezet tartalékainak mozgósítása)
- **Paraszimpatikus** („rest or digest” – nyugalmi állapot biztosítása)
- **Enterális** (bélcsatorna funkcióinak szabályozása; lásd emésztés tétel)

A **preganglionáris motoneuron** (központban!) axonja egy **perifériás autonóm ganglionban átkapcsolódik**, majd a **postganglionáris motoneuron axonja megy el az effektor sejtekhez (célszervekben)!!**

- szimpatikus preganglionáris motoneuronok: gerincvelő thoracalis és lumbalis régiójában (thoraco-lumbalis elhely.), oldalsó szarvban
- paraszimpatikus preganglionáris motoneuronok: agytörzsben és a sacralis gerincvelői szegmentumokban (cranio-sacralis elhelyezkedés)
- szimpatikus postganglionáris motoneuronok: gerincvelő közelében levő autonóm ganglionokban (szimpatikus lánc)
- paraszimpatikus postganglionáris motoneuronok: beidegzett szervek közelében vagy a szervek falában helyezkednek el

→ szimpatikus rendszerben: preganglionáris rostok rövidek, postganglionáris rostok hosszúak → *szimpatikus hatások sokfélék, keverednek!*

→ paraszimpatikus rendszerben: preganglionáris rostok hosszúak, postganglionáris rostok rövidek → *paraszimpatikus hatások differenciáltak, szerv-specifikusak!*

- **preganglionáris motoneuronok folyamatos tónusos aktivitását** a hipotalamo-spinalis és hipotalamo-bulbaris pályák biztosítják → nyugalomban ez biztosítja az autonóm reflexek afferenciációját (ha az egyensúlyi állapot megváltozik, változik a neuronoknak aktivitása is)
- **postganglionáris motoneuron axonja a célszervben varikoitásokban** („gyöngyszerű” képződmények) végződik → benne: neurotranszmitterek, nem szinaptikusan ürülnek!

**Minden szervnek van szimpatikus és paraszimpatikus innervációja nyugalomban is!!**

→→ **Kardio-vaszkuláris (baroreceptor)-reflex:** vérnyomás szabályozás!

- nyugalomban a paraszimpatikus rendszer a szívfrekvenciát alacsonyan tartja (lassítja), míg a szimpatikus bemenetek gyorsítják azt

- glomus caroticumban levő baroreceptorok (carotis elágazásnál) érzékelik a vérnyomás változását

- **ha a vérnyomás ↑**, a baroreceptor ezt érzékeli, és az információt egy primer érző neuronnak továbbítja (sejttestje a ganglion nodosában helyezkedik el) → agytörzsi nucl. tractus solitarius → nucl. ambiguus → szívhez projektálnak → csökkentik a szívfrekvenciát, s így a vérnyomást → **paraszimpatikus gátlás fokozódik!** + (gátló interneuron segítségével) **a szimpatikus stimuláció is csökken!** → **vérnyomás csökken, helyreáll!**

→→ **Pupilla-reflex:** szabályozza a retinára jutó fény mennyiségét

- **pupilla szűkítés (paraszimpatikus hatás):** a nucl. geniculatum laterale kollaterálisokat ad a preectalis area területére, melynek projekciós interneuronjai tónusos aktivitásban tartják a nucl. Edinger-Westfalban levő paraszimpatikus preganglionáris motorneuronokat. A postganglionáris motorneuronok a ggl. ciliareban találhatók, rostjaik a körkörös ciliáris izmokhoz futnak (kontrakció), így a pupilla szűkül

- **pupilla tágítás (szimpatikus hatás):** a hypothalamusból leszálló pályák tónusos aktivitásban tartják a gerincvelő thoracalis szegmentumában lévő preganglionális neuronokat → ezek a ggl. cervicale superiorba projektálnak, majd innen szimpatikus axonok futnak a szembe és innerválják a pupilla elernyesztő izmokat

→→ **Hólyag-reflex:** autonóm és akaratlagos szabályozása is van (szimpatikus, paraszimpatikus és szomatikus komponens)!

- **szimpatikus:** ingere a hólyag részleges telítődése; preganglionáris motorneuronok a gerincvelő thoraco-lumbalis régiójában, postganglionáris motorneuronok a ggl. mesenterica inferiorban helyezkednek el; gátolja a hólyag fal kontrakcióját, serkenti a belső záróizmot (zárva tart)

- **paraszimpatikus:** ingere a hólyag teljes telítettsége; preganglionáris motorneuronok a gerincvelő sacralis régiójában, postganglionáris motorneuronok a ggl. pelviciusban (hólyag közelében) ill. a hólyag falában vannak; hólyag falának izomzata kontrahál (hólyag ürül)

- **szomatikus:** akaratlagos szabályozás, gátolja a szimpatikus és paraszimpatikus rendszert is, külső és belső záróizom is ellazul, így a vizelet elkezd ürülni → ez aktiválja a paraszimpatikus neuronokat, így a hólyag izomzata kontrahál, s a hólyag teljesen kiürül

**INTEGRATÍV FUNKCIÓK:** **magasabb/mentális idegi tevékenység;** érző, mozgató vagy vegetatív működésekhez közvetlenül nem kapcsolódó idegi működés → motiváció, emóciók, beszéd, ébrenlét és alvás, tanulás, emlékezet, viselkedés, magatartás, öntudat, gondolkodás

• **Ébrenlét:** tudatos állapot; aktív szenzoros bemenet, teljes motoros kimenet; kognitív tevékenység (figyelem, memória, érzelem, stb.); EEG: deszinkronizáció (kis amplitúdó, magas frekvencia)

• **Alvás:** fizioológias tudatvesztés; bonyolultan szabályozott, aktív, átmeneti tudatállapot; /fekvő testhelyzet; szenzoros ingerlési küszöb emelkedett, kicsi motoros kimenet; egyedülálló viselkedés (álmodás) jellemzi; EEG: szinkronizáció (nagy amplitúdó, alacsony frekvencia)

- **ismétlődő ciklusokra** tagolódik (~4-5 ciklus/éjszaka; 90-100 min/ciklus), a ciklusok különböző mélységű stádiumokból állnak

- **REM** (mindig felületes alvási stádiumot követ): gyors szemmozgások; gyors EEG: deszinkronizáció; gyenge izom tónus; álmodás hosszabb és intenzív (ált. ezekre emlékezünk); szimpatikus aktiváció; spontán ébredés; külső ébresztés csak erős ingerekkel

- **nem-REM** (NREM): nincs szemmozgás; lassú EEG: szinkronizáció; mozgásképes állapot, csökkent tónus; álmodás rövidebb; paraszimpatikus aktiváció; spontán ébredés felületes alvásból; külső ébresztés: felületes alvásból gyenge, mély alvásból csak erős ingerekkel

- az alvás alapvető életszükséglet!, megvonása súlyos következményekkel járhat (ok: neuronális kapcsolatok stabilizálódása alvás alatt történik!, az agy alvás közben dolgozza fel az ébren kapott ingereket!, és tárolja az emléknymot a memóriában!)

-alvászavarok: narkolepszia (hirtelen alvás), obstruktív alvási apnoe (pharynx fizikai elzáródása, ~10s), parasomniák (alvajárás, alvási rémület)

## **Cirkadián** (napi) **ritmus központi szabályozása**

- 1. nucl. suprachiasmaticus** (hipotalamuszban): endogén alvás-ébrenléti ritmusért felelős (külső ingerek, táplálék hozzáférés, szociális interakciók, mozgás befolyásolják), tobozmirigy működését is irányítja (sötétben melatonin szekréció)
- 2. agytörzsi felszálló retikuláris ébresztő rendszer** (ARAS): feladata az éberség fokozása, az éber állapot fenntartása
- 3. hipotalamusz:** alvás/ébredés közti váltás (orexin serkenti, GABA gátolja az ébresztő rendszert)
- 4. talamo-corticalis hálózat:** alvási orsók generálása, kérgi neuronok szinkronizálása, kéreg felé futó szenzoros ingerek kapuzása

**Limbikus rendszer:** érzelmek/érzések központja, sérülése személyiségváltozást okozhat; asszociációs kérgi területekről érkező szenzoros információk magas szintű feldolgozását végzi; kiterjedt kölcsönös kérgi-, és kéreg alatti kapcsolatokkal rendelkezik

- **emóció:** automatikus, nagyrészt nem tudatos viselkedési és kognitív válaszok (pozitív vagy negatív töltetű, fontos inger hatására)
- **érzelem/ézés:** az emocionális válaszok tudatos reprezentációi
- **részei:** hippocampus, gyrus cinguli, amygdala, septum, középgagy egyes részei, bazális ganglionok egyes részei  
+ hozzá szorosan kapcsolódó struktúrák: hipotalamusz, szaglókéreg, nucleus acumbens
- **neurotranszmitterek:** noradrenalin, dopamin, serotonin
- **funkciói:** érzelmi működés, szexuális magatartás, félelem, düh, motiváció, tanulás, memória
- értelmezi a külvilág inger-együtteseit; korábbi tapasztalatoktól függően pozitív/negatív érzelmi töltetet ad; parancsot ad a hipotalamusznak a megfelelő autonóm idegrendszeri és viselkedési válasz reakciók kivitelezéséhez
- **amygdala szerepe:** ingerlésével vagy külvilágból származó fájdalmas ingerekkel/gondolati felidézéssel → félelem, düh, agresszió, kondicionált félelmi válasz; szerep az emocionális színezetű események tanulásában, memória kialakításában (érzelmi memória)

**Tanulás:** ismerkedés a világgal, tapasztalaton alapuló viselkedés változás; pl. perceptuális tanulás (megtanuljuk felismerni a korábban már tapasztalt ingereket), inger-válasz tanulás (kondicionálás), motoros tanulás, relációs tanulás

**Memória** (emlékezés): tanult tapasztalatok tárolása, visszaidézésére való képesség (kódolás, megerősítés/rögzülés, tárolás, visszaidézés)

- **Explicit (deklaratív) memória** („mit”): tények és események; tudatosan felidézhető, verbálisan kifejezhető, flexibilis

• bemenő információk → asszociációs kéregrészek → parahippocampalis és perirhinalis kéreg → **entorhinális kéreg!!** (hippocampus fő bemenete; sérülése súlyos memóriazavarokkal jár) → perforáns pályán keresztül gyrus dentatusba → moharostokon keresztül hippocampus CA3 régiójába → Schaffer-kollaterálisokon keresztül hippocampus CA1 régiójába → subiculum → entorhinális kéreg → parahippocampalis és perirhinalis kéreg → asszociációs kérgi areák (tárolás helye!!)

• deklaratív emléknym a neocortexben tárolódik, de a tartós tárolás helyére való eljuttatásban nélkülözhetetlen a **hippocampus!!**

- **Implicit (nem-deklaratív) memória** („hogyan”): visszaidézése nem tudatosan, verbálisan nehezen kifejezhető, ismétlődő kondicionálással, hosszabb tanulási folyamat során alakul ki → automatikus magatartás; fontos benne a neostriatum, amygdala, cerebellum

• ide tartozik: asszociatív memória (klasszikus/Pavlovi és operáns kondicionálás) és nem-asszociatív memória (procedurális emlékezet (pl. begyakorlott tevékenységek); priming (kezdeti jelzés megadására memóriatartalom kiegészítése); habituálódás (ingerre adott válasz nagysága az ismétlődésekkel fokozatosan csökken, pl. közömbös inger esetén); szenzitizálódás (ingerre adott válasz nagysága az ismétlődésekkel fokozatosan növekszik, pl. káros inger esetén))

**Memória kialakulásának celluláris alapjai**

- **LTP:** hosszútávú szinaptikus hatékonyság fokozódás a hippocampus szinapszisaiban

- **LTD:** tartós szinaptikus hatékonyság csökkenés