

Razvoj imunološkog sustava u kralježnjaka

Soviček, Sanja

Undergraduate thesis / Završni rad

2011

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/um:nbn:hr:217:270923>

Rights / Prava: [In copyright/Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEU ILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO – MATEMATI CI FAKULTET
BIOLOŠKI ODSJEK

**RAZVOJ IMUNOLOŠKOG SUSTAVA U
KRALJEŽNJAKA**

**DEVELOPMENT OF THE IMMUNE SYSTEM IN
VERTEBRATES**

Sanja Sovi ek

Preddiplomski studij biologije

(Undergraduate Study of Biology)

Mentor: prof. dr. sc. Gordana Lackovi - Venturin

Zagreb, 2011.

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	
3	
2.	ORGANI I TKIVA IMUNOLOŠKOG SUSTAVA.....	4
2.1.	Primarni (središnji) limfni organi.....	5
2.1.1.	Timus.....	
	5	
2.1.2.	Koštana srž.....	6
2.2.	Sekundarni (periferni) limfni organi.....	7
2.2.1.	Limfni vorovi.....	7
2.2.2.	Slezena.....	
	9	
2.2.3.	Limfno tkivo pridruženo sluznicama.....	10
2.2.3.1.	Tonzile.....	11
2.2.3.2.	Peyerove plo e.....	11
2.2.3.3.	Difuzno limfno tkivo sluznica.....	12
3.	STANICE IMUNOLOŠKOG SUSTAVA.....	13
3.1.	Limfociti.....	13
3.1.1.	T- limfociti.....	15
3.1.2.	B- limfociti.....	15
3.1.3.	NK stanice.....	15
3.1.4.	Fagociti.....	1
	6	
3.1.4.1.	Monociti i makrofazi.....	16
3.1.4.2.	Neutrofilni leukociti.....	17
3.1.4.3.	Eozinofilni leukociti.....	17
3.1.5.	Predo ne stanice.....	18
3.1.5.1.	Dendriti ke stanice.....	18

4.	ANTIGENI I	
	ANTITIJELA.....	19
5.	IMUNOLOŠKI SUSTAV	
	KRALJEŽNJAKA.....	21
5.1.	Imunološki sustav riba.....	21
5.2.	Imunološki sustav vodozemaca.....	23
5.3.	Imunološki sustav gmazova.....	24
5.4.	Imunološki sustav ptica.....	24
5.5.	Imunološki sustav sisavaca.....	25
6.	LITERATURA.....	
26	
7.	SAŽETAK.....	
	...27	
8.	SUMMARY.....	
27	

1.UVOD

Imunologija je znanost koja proučava imunost (lat. *immunitas* – otpornost), tj. sposobnost organizma da se odupre djelovanju stranih tvari (antigena). U početku se imunologija svrstavala pod mikrobiologiju te su se pod stranim tvarima u organizmu podrazumijevali samo mikroorganizmi i njihovi toksini. 1796. godine u Engleskoj doktor Edward Jenner radio je pokus koji je obilježio početak imunologije. U to doba su se pojavile male boginje koje su bile smrtonosne, iznimka su bili samo ljudi koji su već ranije imali male boginje i preživjeli ih te mljekari. Jenner je uočio da su mljekari dobili mnogo blaži oblik boginja te ih je nazvao kravljе boginje. Promišljeno je inficirao ljudе s kravljim boginjama uzrokujući tako blaži oblik bolesti, jer je predviđao da će većina od njih biti imuna na male boginje. Jennerov postupak ubrizgavanja bezopasnih mikroba kako bi dobili rezistenciju na opasne bolesti nazvan je cijepljenjem. Pola stoljeća kasnije poznati francuski znanstvenik Louis Pasteur je pokazao da ubrizgavanjem dolazi samo do djelomične imunosti na bolesti. Pasteur je proučavao pticu koleru koja je, kako se danas zna, bila izazvana bakterijom. Izolirao je kulturu bakterija i staru kulturu bakterija ubrizgao je u zdrave ptice te se razvio slabiji oblik bolesti nakon kojega su se ptice oporavile. Ponovio je postupak sa svježom

kulturom bakterija te se bolest ponovno nije razvila. Ptice su ostale zdrave kada im je dao i ve u dozu bakterija kolere. Molekule na površini bakterijske stanice su druga ije od onih kod kralježnjaka i te molekule, odgovorne za razvoj bolesti, nazvane su antigenima, obzirom da kod kralježnjaka u imunološkom sustavu izazivaju proizvodnju proteina koji se nazivaju antitijela. Antitijela su specifi na za pojedini antigen. Proizvodnja antitijela usmjerena prema specifi nim antigenima naziva se imunološka reakcija. Imunoreakcija je važna za preživljavanje, jer bez nje neizbjegno nastupa smrt zbog infekcije.

Imunološki sustav je graen od organa i stanica razmještenih po cijelom tijelu. Stanice imunološkog sustava se najve im dijelom proizvode u koštanoj srži, gdje ve ina i sazrijeva te odlaze u periferna tkiva krvnim i limfnim žilama. Postoje dva obrambena mehanizma: nespecifi na (uro ena) te specifi na (ste ena) imunost. Nespecifi na imunost ve od ro enja osigurava vrlo dobru zaštitu od ve ine mikroba. Postoji bez prethodnog dodira organizma s odre enim antigenom i usmjerena je protiv svih antigena koji ulaze u organizam. Specifi na imunost se pokazuje tek nakon što organizam do e u dodir s nekim antigenom i usmjerena je specifi no protiv njega (Andreis, 2004).

2. ORGANI I TKIVA IMUNOLOŠKOG SUSTAVA

Organi imunološkog sustava se još nazivaju i limfnim organima. Limfni organi su strukture u kojima nastaju i sazrijevaju limfociti. Imaju posebno organiziranu cirkulaciju limfe i krvi pa to omogu uje gibanje stanica unutar pojedinog organa i izmjenu stanica me u razli itim organima. U limfna tkiva mogu se ubrojiti i one strukture u kojima su limfociti smješteni difuzno i to me u stanicama koje obavljaju druge fiziološke funkcije. Prema funkciji limfni organi i tkiva razvrstavaju se u primarne (središnje) i sekundarne (periferne). U primarne limfne organe pripadaju timus, koštana srž te Fabriciusova burza kod ptica. Primarni limfni organi imaju središnju ulogu u razvoju i kasnjem održavanju limfnog sustava. Specijalizirani su za sazrijevanje limfocita tj. predstavljaju mesta u kojima limfociti stje u specifi ne receptore i druge molekule koje im omogu uju funkciju zrelosti. Primarni organi osiguravaju mikrookolišne prilike u kojima pluripotentne mati ne stanice sazrijevaju u limfocite. Tijekom kratkog zadržavanja u timusu te hematopoeti ke stanice dozrijevaju u lozu limfocita T, odnosno u Fabriciusovoj burzi kod ptica ili koštanoj srži kod sisavaca, u lozu limfocita B. U sekundarne limfne organe i tkiva ubrajaju se limfni vorovi, slezena i limfno

tkivo pridruženo sluznicama dišnog, probavnog i spolno – mokra nog sustava (MALT, prema eng. *mucosal-associated lymphoid tissue*). Specijalizirani su za prikupljanje i koncentriranje antiga na pa su to mjesta u kojima limfociti prepoznaju specifične antigene i gdje započinje specifična imunoreakcija. Primarni i sekundarni limfnici organi se razlikuju u nekoliko značajki. U primarnim organima se nalaze i epitelne stanice, a ne samo limfociti. Dioba limfocita u primarnim organima je neovisna o prisutnosti tih antigena dok u sekundarnim organima dioba i proliferacija limfocita ovisi o prisutnosti tih antigena. (Abbas, 2007.; Andreis, 2004).

2.1. Primarni (središnji) limfni organi

2.1.1. Timus

Timus (lat. *thymus*) je limfoepitelni organ smješten u mediastinumu. Potpuno je razvijen u mladosti (Slika1). Za razliku od ostalih limfnih organa koji potječu od mezenhima (mezoderma), timus ima dvojako embrionalno podrijetlo. Limfociti u timusu nastaju od mezenhimskih stanica koje naseljavaju epitelnu osnovu nastalu od endoderma trećeg i četvrte ždrijelne vremenske (Junqueira, Carneiro 2005).

Timus se sastoji od dvaju režnjeva koji su u sredini povezani vezivnim tkivom. Potporu mu imaju vezivo koje tvori kapsulu (ovojnicu) i dijeli timus na manje režnjeve. Svaki režnjev sastoji se od vanjskog tamnog područja kore (cortex) i središnjeg svijetlog područja srži (medulla). Kora timusa sastoji se od brojne populacije T-limfocita, raspršenih epitelnih retikularnih stanica te nešto makrofaga. Kora se tamnije boji od srži jer sadrži puno malih limfocita. Proliferacijom limfocita u kori nastaju nezreli T-limfociti (timociti) koji se u njoj gomilaju i većina njih propada apoptozom. Nakon što propadnu odstranjuju ih makrofazi. Mali broj ih migrira u srž i ulazi u optok krvi gdje krvlju dospiju do ostalih limfnih organa te se nakupljaju na posebnim mjestima kao T-limfociti. Srž sadrži mnogo epitelnih retikularnih stanica koje se nazivaju Hassalova tjelešca. To su koncentrične naslage spljoštenih epitelnih retikularnih stanica koje degeneriraju. U srži se također nalazi i veći broj makrofaga u odnosu na koru. Timus je mjesto završne diferencijacije i selekcije T-limfocita koji sazrijevaju od kore prema srži te stoga u kori imaju najveći mitotski indeks. T-limfociti koji nastaju u timusu reagiraju na tvoje antigene i važni su u specifičnoj imunosti.

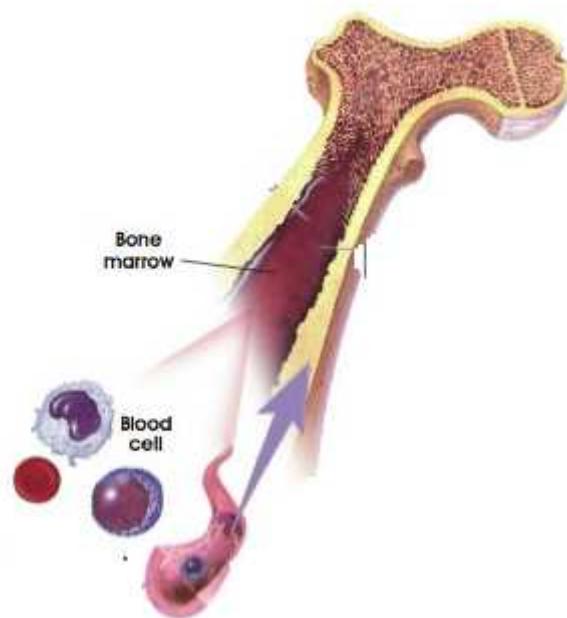


Slika 1. Svjetlosnomikroskopska slika režnjeva timusa, tamno područje kore (cortex) i svijetlo područje srži (medulla) (Abbas, 2007.)

2.1.2. Koštana srž

Koštana srž (lat. *medulla ossium*) je mjesto stvaranja svih krvotvornih stanica, uključujući i prastanice limfocita, ali i mjesto primarnog sazrijevanja limfocita B. Nalazi se u šupljini dugih kosti i u šupljinama spužvastih kostiju (Slika2). Prema vanjskom izgledu razlikuju se dvije vrste koštane srži: crvena ili hematogena u kojoj boja ovisi o prisutnosti krvi i krvotvornih stanica i žuta koštana srž u koje boja ovisi o broju masnih stanica (adipocita). Samu sržu imaju retikularna osnova sastavljena od stromalnih stanica među kojima su smještene krvotvorne stanice. Limfociti koji ostaju u koštanoj srži diferenciraju u B-limfocite i tada

migriraju u periferne limfne organe. Limfoblast je prva velika prepoznatljiva prastanica koja se nakon 2 – 3 diobe pretvara u prolimfocit. Te stanice su manje i sadržavaju nešto guš i kromatin, ali nemaju površinskih antigena na temelju kojih bi se mogli ozna iti kao T ili B-limfociti. Dalje te stanice u koštanoj srži sintetiziraju površinske receptore koji su specifi ni za B-limfocite. Uz B-limfocite koštana srž sadrži i T-limfocite i plazma stanice, ona je u sisavaca i važan sekundarni limfnji organ (Abbas, 2007; Andreis, 2004.).



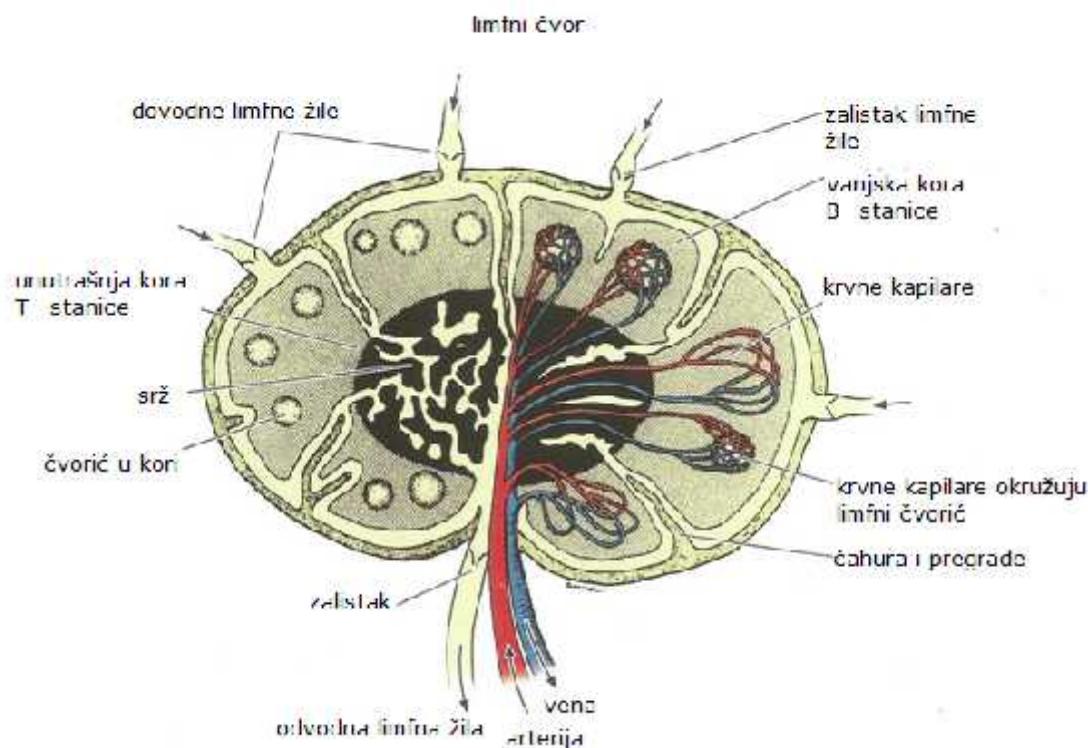
Slika 2. Koštana srž (www.google.com)

2.2. Sekundarni (periferni) limfni organi

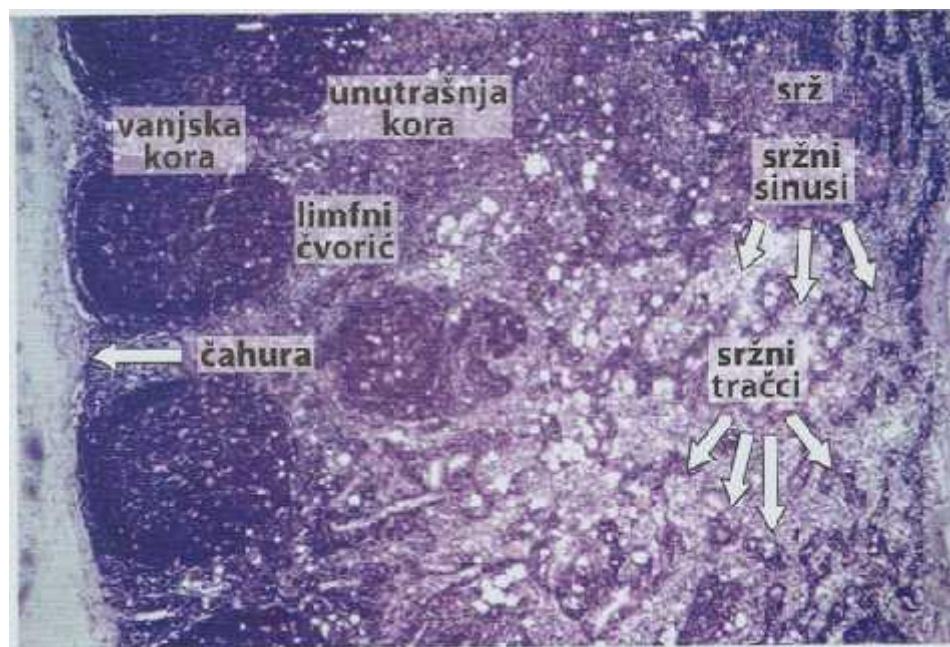
2.2.1. Limfni vorovi

Limfni vorovi (lat. *nodi lymphatici*) su u ahurenim okruglim ili bubrežastim organima raspoređeni od limfnog tkiva. Raspoređeni su po tijelu duž toka limfnih žila. Limfa prolazi izravno kroz limfne vorove, a oni djeluju poput filtra za strane tvari (antigene) i ćestice koje dolaze limfom. Limfni vorovi su mesta gdje započinje specifični (adaptivni) imunosni odgovor na antigene koje između ustani u tkivnih prostora donosi limfa (Slika 3).

U limfnom voru razlikujemo vanjsko podruje koje je bogato stanicama – kora i unutarnje podruje koje je siromašnije stanicama – srž. Limfni vorovi imaju konveksnu stranu i konkavno ulegnu, hilus, kroz koji ulaze arterije i živci, a izlaze vene i limfne žile. Vezivnotkivna ahura obavlja svaki limfni vor i stvara pregrade u njegovoju unutrašnjosti. Limfni vor je izgraen od vanjske i unutrašnje kore te srži. Na površini vanjske kore nalazi se subkapsularni sinus. Ispunjava ga rahla mreža makrofaga, retikularnih stanica i vlakana. Vanjska kora izgraena je od mreže retikularnih stanica i retikulinskih vlakana unutar kojih se nalaze B-limfociti. U limfnom tkivu kore nalaze se i okrugli limfni vori i s mnogo B-limfocita. Neki limfni vori i sadrže u svojem središtu svjetlu zonu – zametno središte koje sadrži stanice u diobi i imunocite od kojih će se razviti plazma-stanice koje sintetiziraju antitijela. Unutrašnja kora se nastavlja na vanjsku i sadrži malo limfnih vori a ili ih uopće nema, ali ima mnogo T-limfocita. Srž izgrađuje sržni traći koji sadrže B-limfocite i nešto plazma stanica. Sržni traći su odijeljeni proširenim, kapilarama slijnim tvorbama, sržnim (moždinskim) limfnim sinusima koji sadrže limfu. Limfociti napuštaju limfne vorove odvodnim limfnim žilama i dospijevaju u optok krvi (Slika 4). Neprestani kružni tok limfocita nadgleda sve dijelove tijela i obavještava imunološki sustav o prisutnosti stranih antigena. (Abbas, 2007 ; Junqueira, Carneiro 2005).



Slika 3. Shematski prikaz gra e limfnog vora. Vide se vanjska kora, unutrašnja kora, srž te limfni optok. Limfa ulazi u limfni vor na njegovoj konveksnoj strani i napušta ga u hilusu. Limfa te e kroz vor i izlaže svoj sadržaj djelovanju obrambenih stanice (makrofazi, limfociti, prednostne stanice) (Junqueira, Carneiro 2005.)

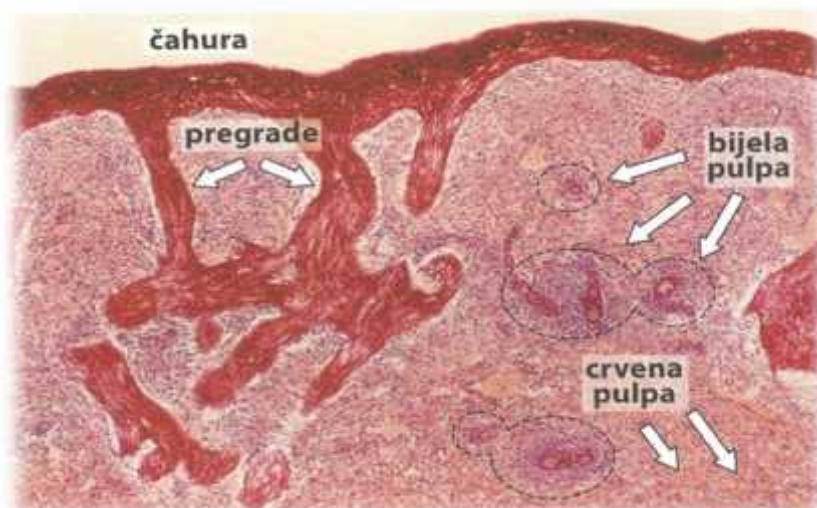


Slika 4. Na svjetlosnomikroskopskoj snimci limfnog vora vide se kora i srž. U srži se jasno vide sržni tračci i sržni sinus. Bojenje PT. Malo povećanje (Junqueira, Carneiro 2005.)

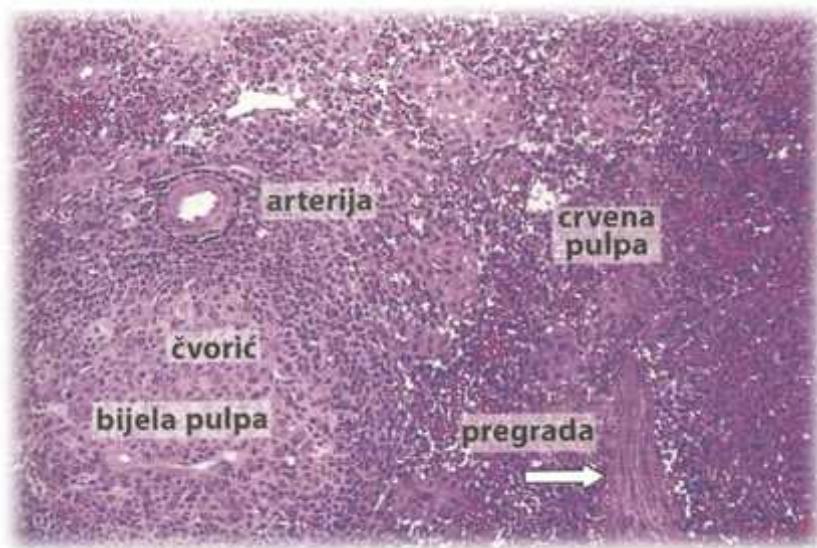
2.2.2. Slezena

Slezena (lat. *lien*, gr. *splen*) najveća je nakupina limfnog tkiva u organizmu. Zbog obilja fagocitnih stanica i njihova bliskog dodira s krvlju, slezena je važan organ u obrani protiv mikroorganizama koji prodiru u optok krvi. U slezeni kao i u ostalim limfnim organima, nastaju aktivirani limfociti koji ulaze u krv. Slezena brzo reagira na antigene koje se prenose krvlju te je važan imunosni krvni filter i organ koji stvara protutijela (Slika 5).

Slezena je obavijena ahurom od gustog vezivnog tkiva iz kojega izlaze trabekule koje dijele parenhim ili pulpu slezene. Pulpa slezene dijeli se na crvenu i bijelu pulpu. Bijelu pulpu izgrađuje limfno tkivo koje okružuje centralne arterije i limfne vori. Limfne stanice koje okružuju centralnu arteriju su uglavnom T-limfociti. U limfnim voriima nalaze se B-limfociti. Između bijele i crvene pulpe nalazi se marginalna zona s brojnim sinusima i rahnim limfnim tkivom koji sadržava malo limfocita, ali mnogo aktivnih makrofaga. Krv dolazi u bijelu pulpu središnjom arterijom od koje ogranci odlaze dijelom u crvenu pulpu, a dijelom završavaju u marginalnom sinusu koji okružuje bijelu pulpu. Stijenke tog sinusa su propusne pa je to mjesto gdje antigen i limfociti prelaze iz krvi u međustanične prostore slezene. Crvenu pulpu izgrađuju slezenski traci i sinusi. Tračci slezene sadrže makrofage, T i B-limfocite, plazma-stanice i mnoge sastojke krvi (eritrociti, trombociti i granulociti), (Slika 6). Sinusi slezene obloženi su izduženim endotelnim stanicama koje su postavljene usporedno s dugom osi sinusa (Abbas, 2007 ; Junqueira, Carneiro 2005.).



Slika 5. Snimka presjeka kroz slezenu na kojoj se vidi čahura od koje odlaze pregrade u unutrašnjosti organa. U bijeloj pulpi se vide arteriole, dok crvena pulpa ispunja preostali dio vidnoga mikroskopskog polja. Bojenje pikrosirijusom. Malo povećanje. (Junqueira, Carneiro 2005.).



Slika 6. Svjetlosnomikroskopska snimka slezene. Bijela pulpa s limfnim vorićem i centralnom arterijom (lijevo). Crvena pulpa i vezivna pregrada (desno). Bojenje PT. Malo povezanje. (Junqueira, Carneiro 2005.)

2.2.3. Limfno tkivo pridruženo sluznicama

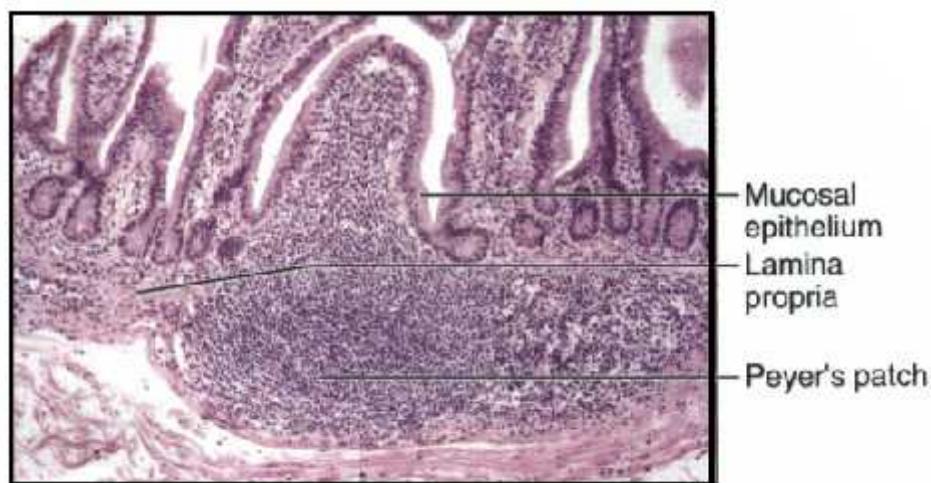
Limfno tkivo pridruženo sluznicama – MALT (prema eng. *mucosal-associated lymphoid tissue*) nemaju ovojnicu (kapsulu), a nalaze u probavnom, dišnom, mokranom i spolnom sustavu. U sluznici i podsluznici tih sustava u svrhu zaštite nalaze se limfni vorić i difuzno limfno tkivo. U nekim sustavima ono tvori uočljive tvorbe kao što su tonzile i Peyerove plove u tankom crijevu. Koža takođe sadrži mnogo stanica imunološkog sustava. Limfno tkivo u koži i sluznici čini uinkovit sustav obrane organizma od okolišnih patogena (Junqueira, Carneiro 2005).

2.2.3.1. Tonzile

Tonzile su organi izgraeni od nakupina nepotpuno oahurenog limfnog tkiva koje se nalazi ispod epitela po etnog dijela probavnog sustava. Smještene su u ustima i ždrijelu i nazivaju se nepana, ždrijelna i jezi na tonzila. Njihova je površina izbrazdana epitelnim kriptama ždrijelne sluznice. U dubini se nalaze limfni vori i sa zmetnim središtim koja sadrže B-limfocite. Oko vori a se nalaze T-limfociti, a prema epitelu B-limfociti i plazma-stanice koje sintetiziraju IgA. Tonzile su glavna obrana protiv mikroorganizama i štetnika koji dolaze preko sluznice nosa i usne šupljine. (Junqueira, Carneiro 2005; Andreis, 2004).

2.2.3.2. Peyerove ploče

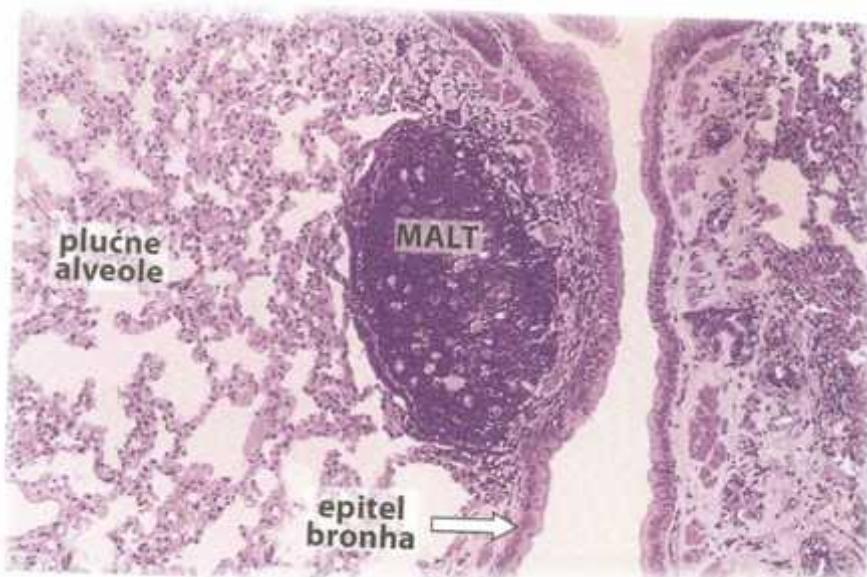
Peyerove su ploče nakupine limfnih stanica u submukozi tankog crijeva (Slika7). Sadrže limfne vore i oko 50% B-limfocita u tim voriima ima sintetizira IgA. Između vori a (prema epitelu) nalazi se zona T-limfocita. Epitelne stanice sluznice imaju važnu ulogu u prijenosu antiga iz šupljih organa do limfnih struktura. Za to su posebno specijalizirane M stanice (prema eng. *microfold cells*) koje stvaraju džepove na bazolateralnoj staničnoj membrani. Te stanice endocitozom upijaju antigene s površine sluznice nakon čega ih mjeđuima prenose do džepova u kojima se nalaze T i B-limfociti i makrofazi. Stanice M nalaze se na induktivnim mjestima tj. na području sluznica ispod kojih se nalaze organizirana limfna tkiva. Nakon što prođu kroz epitel, antigeni se predaju uju T-limfocitima koji nakon aktivacije odlaze u Peyerove ploče. U Peyerovim pločama proliferiraju, sazrijevaju i suraju uju s B-limfocitima u limfnim voriima. Aktivirani B-limfociti napuštaju limfni vori i odlaze u sluznicu gdje se diferenciraju u plazma-stanice i po injekciji izljučuju IgA, glavni imunoglobulin sluznih površina (Andreis, 2004).



Slika 7. Svjetlosnomikroskopska slika limfoidnog tkiva u ljudskom crijevu. (Abbas, 2007.)

2.2.3.3. Difuzno limfno tkivo sluznica

U sluznici probavnog, dišnog (Slika 8) i spolno – mokra nogu sustava nalaze se difuzno raspoređeni T-limfociti, B-limfociti i plazma-stanice koje izlučuju IgA. Te su stanice uglavnom smještene u lamini propriji¹, ali se nalaze i između epitelnih stanica te u mišićnom sloju sluznice. U lamini propriji pretežno se nalaze aktivirani T-limfociti (Andreis, 2004).



Slika 8. Svjetlosnomikroskopska snimka plućne alveole. Vidi se nakupina limfocita u vezivnom tkivu sluznice bronhiola, što predstavlja primjer limfnog tkiva udruženog sa sluznicom. Bojenje PT. Malo povećanje. (Junqueira, Carneiro 2005.)

¹ Lamina propria – sloj vezivnog tkiva koji je bazalnom membranom povezan s epitelom

3. STANICE IMUNOLOŠKOG SUSTAVA

Stanice koje sudjeluju u imunoreakciji nastaju iz pluripotentnih krvotvornih mati nih stanica dvama diferencijacijskim putevima: diferencijacijskim putem limfopoeze, pri emu nastaju sve vrste limfocita i diferencijacijskim putem mijelopoeze pri emi nastaju fagociti, dendriti ke stanice i razli ite posredni ke stanice. Zada a dendriti kih stanica je predo avanje proteinskih antigena limfocitima pa se ubrajaju u skupinu predo nih stanica. Limfociti su najvažnije stanice imunološkog sustava jer su nosioci svih vrsta specifi ne imunosti. Neke skupine limfocita kao što su NK stanice (prema eng. *natural killer* – prirodnoubila ka stanica) i intraepitelni limfociti ne pripadaju specifi noj imunosti ve imaju važnu ulogu u nespecifi noj imumosti. Fagociti u koje se ubrajaju monociti-makrofazi, neutrofilni i eozinofilni granulociti dobili su ime po tome što im je fagocitoza (proždiranje) stranih estica glavni mehanizam kojima sudjeluju u nespecifi noj obranin organizma od štetnika. Stanice koje predo uju antigen (predo ne stanice) smještene su na mjestima gdje antigeni ulaze u organizam. Osnovna im je zada a izlaganje antigena na svojoj površini ime pomažu limfocitima u prepoznavanju antigena i poti u njihovu aktivaciju.

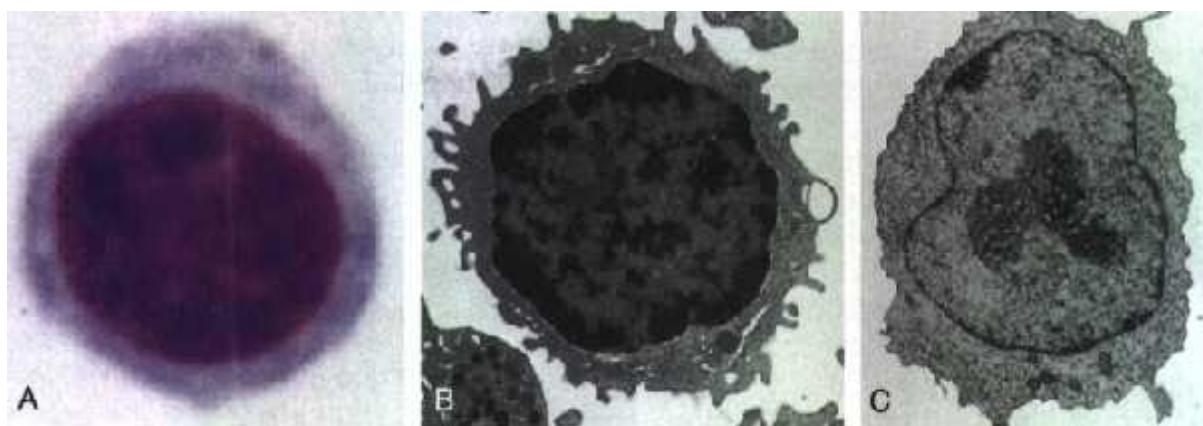
3.1. Limfociti

Limfocitne stanice su naziv za sve razvojne stadije limfocita od kojih neki nemaju izgled tipi nog limfocita (Slika 9.). Me u limfocitnim stanicama se razlikuju citomorfološki oblici: mali limfocit, srednje veliki i veliki limfociti, limfoblasti i plazma-stanice.

Mali limfociti ine ve inu limfocita u krvi. Imaju oskudnu citoplazmu pa stoga jezgra zauzima 90% volumena stanice. Izgled malog limfocita imaju svi nepodraženi T i B-limfociti kao i memorijski limfociti koji preostanu nakon imunoreakcije na odre eni antigen. Srednje veliki i veliki limfociti ine manje od 5% limfocita u perifernoj krvi. U pojedinim velikim limfocitima vidljivi su lizosomi u obliku crvenih zrnaca pa se stoga nazivaju veliki granulirani limfociti (LGL prema eng. *large granular lymphocytes*). Ve ina LGL pripada populaciji prirodnoubila kih stanica ili NK stanica koje imaju sposobnost liziranja drugih stanica. Limfoblast je morfološki naziv za bilo koji limfocit koji prolazi kroz proces diobe. Limfoblaste nalazimo kao nezrele stanice tijekom primarne diferencijacije limfocita u timusu i koštanoj srži, ali i me u populacijom zrelih limfocita podraženih antigenom tijekom sekundarne diferencijacije limfocita.

Limfociti koji nisu došli u dodir sa specifičnim antigenom nazivaju se naivnim limfocitima. Životni vijek nepodraženih limfocita razmjerno je kratak, nekoliko tjedana ili mjeseci. U susretu sa specifičnim antigenom limfociti prolaze kroz niz promjena (sekundarna diferencijacija limfocita). Kako bi podraženi limfociti osigurali veliki broj stanica za borbu protiv uljeza najprije se moraju umnožiti. Nakon umnažanja limfociti se diferenciraju u specifične efektorske (izvršne) stanice ija je uloga suzbijanje štetnika iz organizma, a njihovim suzbijanjem nestaje potreba za efektorskim stanicama te su stoga one koje stanice kratkog vijeka. Antigen potiče i stvaranje memorijskih limfocita koji ne sudjeluju izravno u borbi s uljezima. To su stanice dugog vijeka s pamćenjem koje ostaju u stanju mirovanja i nakon preboljene zaraze i služe za brzi imunosni odgovor pri ponovnom susretu s istim antigenom. Memorijski limfociti imaju vrlo izraženo svojstvo recirkulacije što im omogućuje imunosni nadzor u različitim dijelovima tijela. Veliki dio limfocita je stalno u pokretu tj. iz tkiva gdje nastaju (timus i koštana srž) prelaze u krv gdje cirkuliraju i dospjevaju u periferna limfna i druga tkiva i organe.

Razlikuju se tri osnovne populacije limfocita: T-limfociti, B-limfociti i NK stanice. Naziv T i B-limfocita potječe od kratice za limfni organ u kojem nastaju i sazrijevaju. U sisavaca su to timus (T-limfociti) i koštana srž (B-limfociti, prema eng. *bone marrow*). U ptica B-limfociti sazrijevaju u posebnom organu Fabriciusovoj burzi pa su limfociti izvorno dobili ime prema tom organu. Naziv NK nije vezan za mjesto nastanka (koštana srž) već za funkcionalno obilježje.



Slika 9. Morfologija limfocita. A – svjetlosnomikroskopska slika limfocita u razmazu periferne krvi B- slika elektroniskim mikroskopom malog limfocita C- slika elektroniskim mikroskopom velikog limfocita. (Abbas, 2007.).

3.1.1. T-limfociti

T-limfociti ine 65 – 75% limfocita u optoku. Nastaju u koštanoj srži i migriraju u timus gdje se umnažaju, sazrijevaju, diferenciraju i prenose krvlju te nasele druga limfna tkiva. Nositelji su stani ne imunosti. Receptore T-limfocita ine specijalne molekule TCR (engl. “T cell antigen receptor”). Prema vrsti receptora za antigen T-limfociti dijele se na etiri subpopulacije: pomaga ki T-limfociti, citotoksi ni T-limfociti, regulacijski T-limfociti, stanice NK-T. Pomaga ki T-limfociti pomažu B-limfocitima u proizvodnji protutijela i pomažu u aktivaciji makrofaga. Citotoksi ni T-limfociti nakon dodira s antigenom diferenciraju se u efektorske citotoksi ne T-limfocite koji u izravnom dodiru ubijaju ciljane stanice. Regulacijski T-limfociti ko e imunosni odgovor na vlastite i tu e antigene djeluju i na pomaga ke T-limfocite ili izravno na B-limfocite. NK-T stnice su važne u regulaciji diferencijaciji pomaga kih T-limfocita.

3.1.2. B-limfociti

B-limfociti nastaju i sazrijevaju u koštanoj srži ili kod ptica u Fabriciusovoj burzi, migriraju u sekundarne limfne organe gdje se nakon aktivacije proliferiraju i diferenciraju u plazma-stanice. B-limfociti ine 5 – 10% limfocita u optoku. Receptori za B-limfocite su imunoglobulini kao integralni dio membrane. Gra a receptora je ista kao i slobodnih protutijela, osim domene kojim je pri vrš en na membranu. B-limfociti prepoznaju slobodni (nativni) antigen.

3.1.3. NK stanice

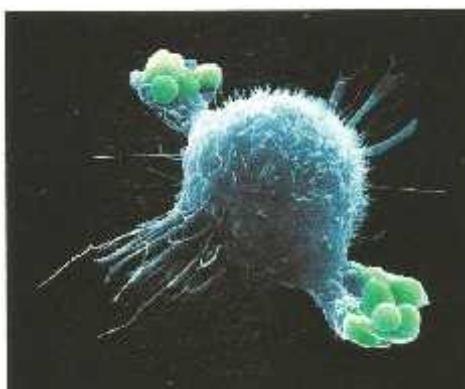
NK stanice su limfociti koji nemaju površinske antigene karakteristi ne ni za B ni za T-limfocite. Od sveukupnih limfocita u krvi samo je 10 – 15% NK stanica. U vrlo kratkom vremenu prepoznaje i lizira ciljanu stanicu. Pripadaju stanicama nespecifi ne imunosti i za razliku od T-limfocita ne izražavaju specifi ni receptor za antigen te stoga nemaju mogu nost specifi nog prepoznavanja antiga. NK stanice nastaju u koštanoj srži i nalaze se u svim perifernim limfnim organima posebice u slezeni. Morfološki ve ina NK stanica pripada skupini velikih granuliranih limfocita (LGL), ali se nalaze i me u malim limfocitima. Granula, koja su sekundarni lizosomi, sadržavaju proteoliti ke enzime.

3.1.4. Fagociti

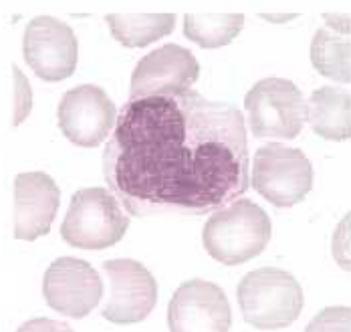
Fagociti (gr. *phagein* – jesti, žderati) su stanice koje me u prvima dolaze u dodir s mikroorganizmima ili tu im tvarima koje dospiju u organizam. Osnovni mehanizmi djelovanja fagocita su endocitoza i pinocitoza topljivih tvari te fagocitoza estica i mikoorganizama s posljedi nom enzimskom razgradnjom upijenih tvari i liziranjem mikroorganizama. Aktivnost fagocita je temeljni mehanizam nespecifične obrane organizma. Sve fagocitne stanice nastaju u koštanoj srži od zajedničke stanice mijeloidne loze. Za razliku od limfocita, fagociti ne izražavaju receptore za specifične antigene, pa je njihov mehanizam prepoznavanja stranoga nespecifičan. Većina fagocita je pokretna tj. imaju svojstvo ameboidnog kretanja što im omogućuje da dospiju do stranih estica i uljeza unesenih na bilo kojem mjestu u organizmu. U fagocite se ubrajaju monociti – makrofagi i granulociti i to neutofilni i eozinofilni granulociti.

3.1.4.1. Monociti i makrofazi

Monociti nastaju u koštanoj srži. Monociti u krvi borave jedan do pet dana i potom odlaze u tkiva gdje postaju tkivni makrofazi (Slika 11). Makrofazi su stanice koje se nalaze u različitim tkivima i seroznim šupljinama kao slobodne ili nepokretne stanice (Slika 10). Oni su glavni isti i tkivnih prostora budući da fagocitiraju apoptotične stanice, oštećene eritrocite i najrazličitije estice kao što su mikroorganizmi. Makrofazi su nosioci nespecifične imunosti. Različite endogene i egzogene tvari mogu aktivirati makrofage. Od endogenih tvari najvažniji su citokini koji luči aktivirani T-limfociti i NK stanice. Od egzogenih imbenika, makrofage najsnažnije aktiviraju proizvodi mikoorganizama ili sami mikroorganizmi koji specifično napadaju makrofage.



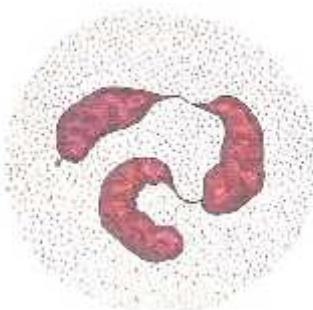
Slika 10. Makrofag x 9000 (Presson, Jenner, 2008.)



Slika 11. Svjetlosnomikroskopska snimka monocita. Jezgra je bubrežasta s nježno obojenim kromatinom, a citoplazma je umjerenog bazofilnosti. Veliko povećanje. (Junqueira, Carneiro 2005.)

3.1.4.2. Neutrofilni leukociti

Neutrofilni leukociti su fagociti koji se nalaze u krvi i mnogobrojnim tkivnim prostorima (Slika 12). Nastaju iz granulocitnih prastanica koštane srži. U krvi borave 6 – 10 sati , a u tkivima 1 – 2 dana. Njihova uloga u tkivima je traženje uljeza pa ako ga ne prona u propadaju apoptozom. Osnovna svojstva neutrofila su sposobnost spontanog gibanja, sposobnost prolaska kroz stijenke krvnih žila. Jedan dio neurofila ne cirkulira slobodno u krvi nego je prilijepljen za stijenke malih krvnih žila kao prijava pri poveanoj potrebi organizma kao npr. u stanju stresa ili zaraze.

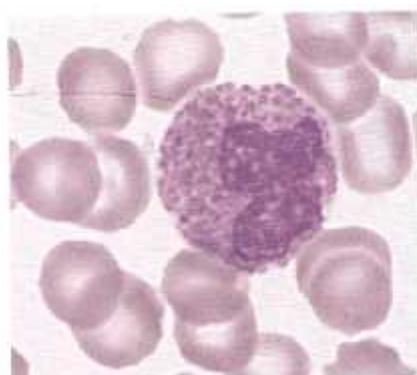


Slika 12. Neutrofilni granulirani leukocit
(Junqueira, Carneiro 2005.)

3.1.4.3. Eozinofilni leukociti

Eozinofilni leukociti takođe pripadaju skupini fagocita iako su važniji u obrani organizma od većih parazita i nastanku alergije (Slika 13). Nastaju u koštanoj srži. Udio eozinofilnih leukocita u krvi je samo 1- 5%. U krvi borave oko 13 sati, zatim odlaze u tkiva gdje ostaju i do nekoliko dana. Broj eozinofila u organizmu se povećava u parazitozama i alergijskim reakcijama. Njihova je glavna zada da oslobodi anje sadržaja zrnaca na nametniku kako bi se on oštetio i

eliminirao.



Slika 13. Eozinofil s jezgrom koja je podijeljena na dva režnja a. Veliko povećanje. (Junqueira, Carneiro 2005.)

3.1.5. Predo ne stanice

Predo ne stanice (APC, eng. antigen – presenting cells) su stanice koje predo uju antigen i imaju zada u da na svojoj membrani izlože antigen i time omogu e T i B-limfocitima njegovo prepoznavanje. Nastaju u koštanoj srži i nalaze se u veini tkiva. Predo ne stanice uzimaju na sebe strane bjelanevine, djelomi no ih razgra uju u lizosomima i odabrate proizvode razgradnje ponovno izlože na stani noj površini zajedno sa kompleksom tkivne podudarnosti (MHC, eng. *major histocompatibility complex*). MHC omogu uje da imunološki sustav razlikuje vlastito od tuge pomo u molekula na stani noj površini.

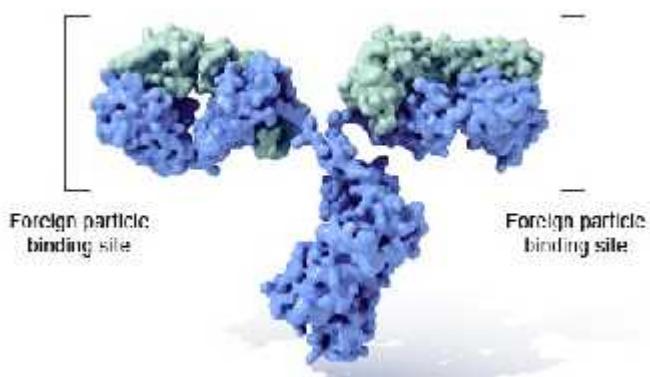
3.1.5.1. Dendriti ke stanice

Dendriti ke stanice (gr. *dendron* – drvo) su stanice koje imaju duge i razgranate citoplazmatske izdanke. Prete dendriti kih stanica dolaze putem krvi i naseljavaju limfne i druge organe te predstavljaju nezrele dendriti ke stanice. Glavna im je uloga hvatanje i obrada antiga. Upalne promjene poti u migraciju tih stanica iz koštane srži putem krvi i limfnih žila u podru ja ovisna i T-limfocitima perifernih limfnih organa.

4. ANTIGENI I ANTITIJELA

Antigeni (gr .*anti*-protiv + *genain*-stvarati) su složene molekule što ih imunološki sustav prepoznaće kao tu e. Specifi nost imunosnog odgovora (B-limfociti) odre uju mala podru ja molekule antiga – antigenske determinante ili epitopi. Antitijela (imunoglobulini) su glikoproteini koji se u krvnoj plazmi specifi no vežu s antigenskim determinantama koje su pobudile njihovo stvaranje. Izlu uju ih plazma-stanice koje nastaju proliferacijom i diferencijacijom B-limfocita. Poznato je pet razreda imunoglobulina IgG, IgA, IgM, IgE i IgD. (Tablica 1). IgG je najbrojniji razred imunoglobulina koji ini 75% serumskih imunoglobulina. Izgra uju ga dva jednala laka lanca i dva jednaka teška lanca povezana disulfidnim vezama i nekovalnetnim silama. IgG je jedini imunoglobulin koji prolazi kroz placentalnu barijeru, ulazu u optok krvi fetusa i štiti novoro ene od infekcije (Slika 14 i Slika 15).

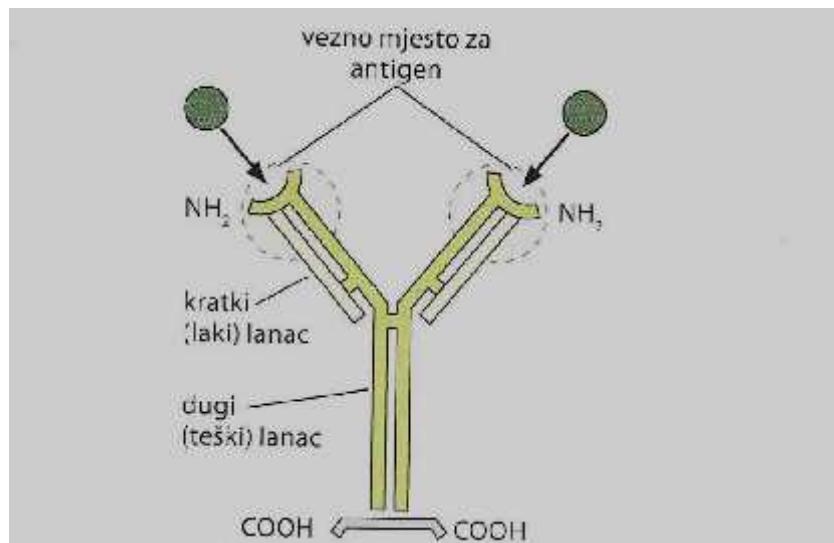
IgA se nalazi u malim koli inama u krvi. Najviše ga ima u suzama, kolostrumu, sekretu nosa, bronha i crijeva. U sekretima se nalazi kao dimer nazvan sekrecijski IgA. Budu i da je sekrecijski IgA otporan prema mnogim organizmima, on štiti tjelesne sekrete od umnažanja mirkoorganizama. IgM ini 10% serumskih imunoglobulina. Zajedno s IgD je glavni imunoglobulin koji se nalazi na površini B-limfocita. IgM i IgD vezani na membranu služe kao receptori za specifi ne antige. Rezultat tog me udjelovanja je proliferacija i diferencijacija B-limfocita od kojih nastaju plazma-stanice koje proizvode antitijela. IgE je imunoglobulin koji ima veliki afinitet prema receptorima stani e membrane bazofilnih leukocita. Neposredno nakon što ga izlu e plazma-stanice IgE se veže na te stanice i nastaje iz krve plazme. Prilikom ponovnog susreta s antigenom koji je uzrokovao nastanak IgE, na površini bazofilnih leukocita nastaje kompleks antigen-antitijelo, koji dovodi do stvaranja i oslobaanja nekoliko biološki aktivnih tvari kao što su histamin i heparin. Tako nastaje alergijska reakcija u kojoj sudjeluju IgE i antigeni koji poti u njegovo stvaranje. IgD se nalazi na stani noj membrani B-limfocita i sudjeluje u njihovoj diferencijaciji. Koncentracija IgD u krvnoj plazmi je samo 0,2% sveukupnih imunoglobulina.



Slika 14. Struktura imunoglobulina G – IgG
(www.google.com)

Tablica 1. Razredi antitijela (Junqueira, Carneiro 2005.)

	IgG	IgM	IgA	IgD	IgE
građa	monomer	pentamer	dimer sa sekrecijskim dijelom	monomer	monomer
postotak protutijela u serumu	80%	5 – 10%	10 – 15%	0,2%	0,002%
smještaj	krv, limfa, lumen crijeva	na površini B-limfocita (kao monomer)	proizvode ga B-limfociti u laminu propriji, kao dimer u sekretima (sлина, mlijeko, suze itd.)	prisutan samo na površini B-limfocita	vezan za površinu mastocita i bazofila
poznate funkcije	aktivacija fagocitoze, neutralizacija antiga, zaštita novorođenčeta	prva protutijela koja nastaju u početnom imunosnom odgovoru	štiti površinu sluznice, otporno na razgradnju	djeluje kao receptor za antigene i potiče aktivaciju B-limfocita	sudjeluje u alergiji i lizi crva nametnika

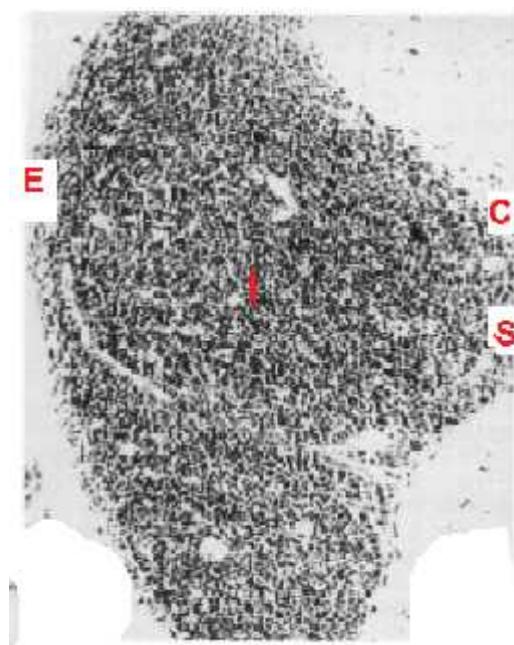


Slika 15. Shematski prikaz molekule imunoglobulina. Varijabilni dio NH₂- kraja molekule veže antigen. Sastoji se od dijela lakog i teškog lanca. COOH-kraj može se vezati s membranskim receptorom na stanicama. (Junqueira, Carneiro 2005.)

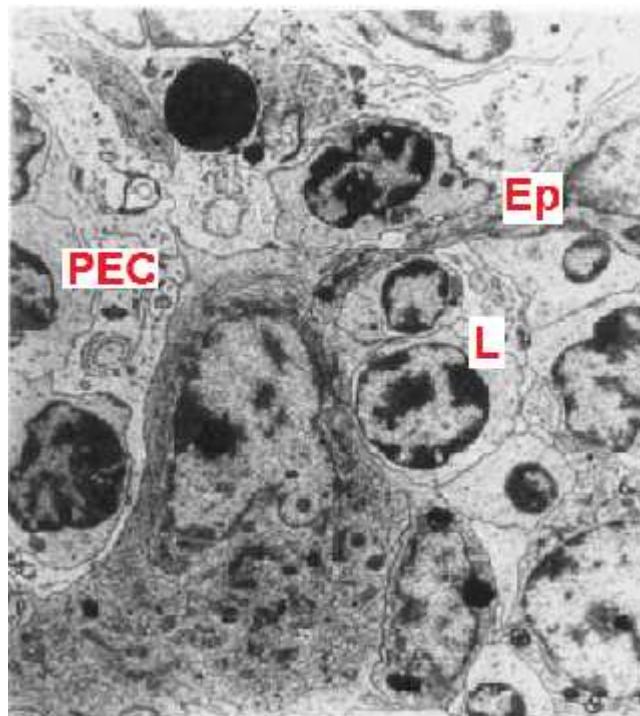
5. IMUNOLOŠKI SUSTAV KRALJEŽNJAKA

5.1. Imunološki sustav riba

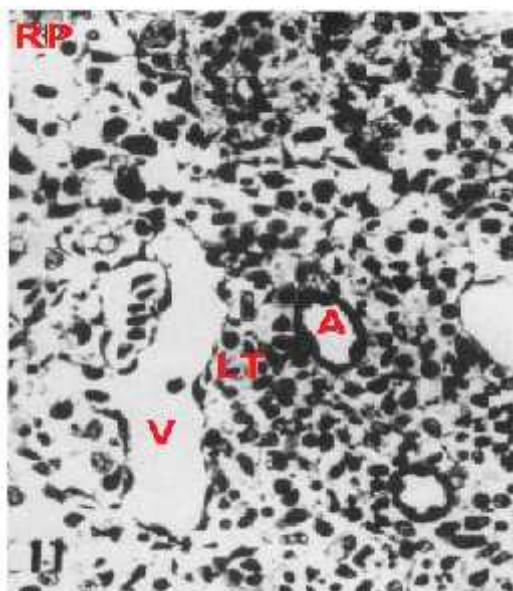
Ribe eljusnja e u koje spadaju hrskavi nja e i koštunja e imaju najjednostavniji imunološki sustav. Organi imunološkog sustava riba se razlikuju od organa kod sisavaca koji imaju najrazvijeniji imunološki sustav. Od limfnih organa imaju razvijen timus, slezenu, difuzno limfno tkivo u crijevu i to u spiralnom zalisku te limfnomijeloidno tkivo pridruženo bubregu i jetri. Limfni organi mogu se podjeliti na primarne i sekundarne. U primarne limfne organe ubrajaju se timus i ekvivalent koštanoj srži jer u koštanoj srži nemaju limfnog tkiva, ali je po strukturi i funkciji slična kao kod viših kralježnjaka. Hrskavi nja su prvi kralježnjaci kod kojih je utvrđeno prisustvo timusa (Slika 16 i Slika 17). U sekundarne limfne organe ubajaju se slezena i limfno tkivo pridruženo crijevnoj sluznici (GALT). Slezena (Slika 18) je najveća i periferni limfnii organ, ali se ne vidi podjela na koru i srž kao i kod viših kralježnjaka. Nemaju niti limfnih voraca. Stvaranje protutijela nije vezano za slezenu. Proizvode samo jednu vrstu imunoglobulina koji priradaju razredu IgM. Kod hrskavi nja nisu dokazani funkcionalni limfociti T. Morski psi proizvode normalnu količinu protutijela. Kod koštunja nisu postoje stanicice koje izgledaju i svojom aktivnošću nalikuju NK stanicama sisavaca (Iwama, Nakanishi 1996.; Andreis, 2004).



Slika 16. Timus 60 dana stare kalifornijske pastrve *Oncorhynchus mykiss*; C – vezivno tkivo kapsule, S – subkapsularna regija, E – vanjska zona, I – unutarnja zona (Courtesy of Dr. Ana Castillo, Univ. of Orense) x200
(Iwama, Nakanishi 1996.)



Slika 17. Srž timusa morskog psa, L – limfociti različite veličine, razmješteni između okolnih epitelnih stanica Ep, i staničnih procesa bijedog obojenih epitelnih stanica x 4100 (Iwama, Nakanishi 1996.)

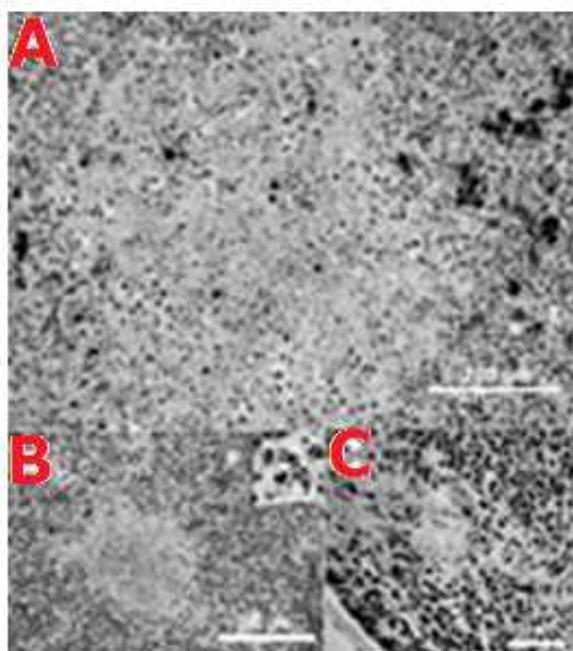


Slika 18. Arterija – A, vena – V, elipsoidne krvne žile u parenhimu slezene morskog psa, *Triakis scyllia*, limfoidno tkivo – LT, crvena pula – RP x500 (Iwama, Nakanishi 1996.)

5.2. Imunološki sustav vodozemaca

Kod vodozemaca je prisutna imunoreakcija već u stadiju ličinke, ali je slabo izraženo imunološko pamćenje. Fagocitna aktivnost je dobro razvijena te su prisutne i stanice koje nalikuju NK (natural killer) stanicama. Limfociti T su dobro razvijeni. Kod vodozemaca se stvaraju imunoglobulini IgM, IgY, IgX. Prepostavalja se da su imunoglobulini IgY prethodnici imunoglobulina IgG i IgE, a imunoglobulini IgX odgovaraju protutijelima IgA.

Timus je dobro razvijen i u njemu se razlikuju kora i srž. Slezena je svojim ustrojstvom slična slezeni kod sisavaca iako nema zmetnih središta, a nema ih niti u limfnim vorovima (Slika 19). U tankome crijevu nalaze se plazma – stanice koje luče IgM i IgX. U crijevnom epitelu se nalaze i limfociti T. Bubrezi su glavni limfomijeloidni organi, a tu funkciju jednim dijelom ima i jetra. Koštana srž kod nekih vodozemaca je važan izvor stanica koje proizvode protutijela. Također imaju sposobnost odbacivanja alogenih presadaka. Prisutna je sekundarna imunoerakcija i imunološko pamćenje, ali su slabo razvijeni (Andreis, 2004.)



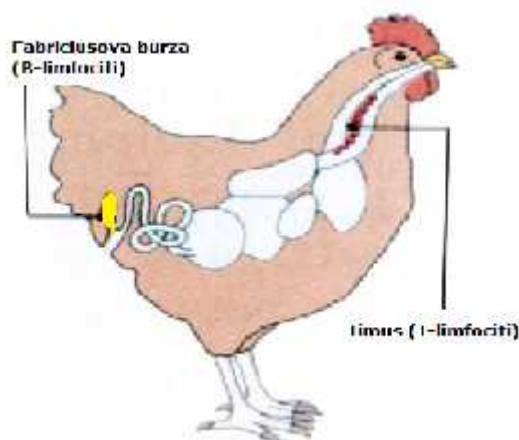
Slika 19. Slika svjetlosnim mikroskopom A- jetre, B- slzene, C- timus sa nekrozom tkiva žabe (*Rana catesbeiana*)
(<http://www.cdc.gov/eid/content/13/2/342.htm>)

5.3. Imunološki sustav gmazova

Imunoreakcija gmazova je ovisna o okolišnoj temperaturi. Nema izraženog imunološkog pam enja iako odbacuju alogeni no tkivo, ali vrlo sporo. Stvaraju protutijela koja pripadaju razredima IgM i IgY. Kod gmazova timus je dobro razvijen kao i slezena u kojoj se razlikuje crvena i bijela pulpa, ali nema zametnih središta. Limfni vorovi i limfno tkivo pridruženo bubregu i jetri nalikuje onima kod vodozemaca. Kod kornjače i zmija opisane su nakupine limfnog tkiva u području kloake. Te nakupine tijekom života postaju sve veće. (Andreis, 2004.)

5.4. Imunološki sustav ptica

Sekundarna reakcija odbacivanja je mnogo brža od primarne što dokazuje da je dobro razvijeno imunološko pam enje. Primarni limfni organi kod ptica su timus i Fabriciusova burza (Slika 20). Fabriciusova burza je limfni organ karakterističan samo za ptice. Smješten je u području kloake, a u njoj sazrijevaju B-limfociti. Timus je dobro razvijen, izgledom sliči na niz kuglica smještenih s obiju strana dušnika. Od sekundarnih limfnih organa prisutni su slezena i ždrijelne tonzile. Nemaju limfnih vorova. U slezeni postoje zametna središta koja ovise o Fabriciusovoj burzi. Prisutna su antitijela IgM, IgY te imunoglobulini male molekularne mase nazvani IgN. Evolucijski razvijenije ptice proizvode i IgA imunoglobuline. (Andreis, 2004.)



Slika 20. Primarni limfni organi kokoši (www.google.com)

5.5. Imunološki sustav sisavaca

Sisavci su filogenetski najrazvijenija skupina kralježnjaka pa tako je i imunološki sustav najrazvijeniji kod sisavaca, ali neke njegove znažajke ovise o stupnju filogenetske razvijenosti. Od primarnih limfnih organa imaju timus i koštanu srž. Timus je najrazvijeniji u fetalnom razdoblju. U kasnijem razdoblju dolazi do smanjenja aktivnog tkiva timusa jer masno tkivo zamjenjuje najprije koru a zatim i srž timusa. Od sekundarnog limfnog tkiva imaju limfne vorove, slezenu i limfno tkivo pridruženo sluznicama. Sisavci koji su na višem stupnju evolucijskog razvoja brže odbacuju presatke tueg tkiva i proizvode svih pet imunoglobulinskih razreda, dok oni sisavci koji su na nižem stupnju razvoja sporije odbacuju presaeno tkivo i stvaraju samo imunoglobuline IgM i IgG. (Andreis, 2004.)

LITERATURA

Abbas, K. Abul, Lichtman, H. Andrew, Pillai, Shiv (2007.): Cellular and molecular immunology, 6th edition, Saunders Elsevier

Andreis, I., i suradnici (2004.): Imunologija, 6.izdanje, Medicinska naklada, Zagreb

Iwama, G., Nakanishi, T. (1996.): The fish immune system, Academic press

Junqueira, C. Luiz, Carneiro, J.(2005.): Osnove histologije, Školska knjiga, Zagreb

Leake, D.Lucy (1975.): Comparative histology, Academic press

Presson, J., Jenner, J. (2008.): Biology – Dimensions of life, Mc Graw Hill

Raven, H. Peter, Johnson, B.George: Biology, 4th edition, Mc Graw Hill

www.daviddarling.info/encyclopedia

www.google.com

www.keratin.com

SAŽETAK

Imunologija je znanost koja proučava imunost (lat. *immunitas* - otpornost) tj. sposobnost organizma da se odupre djelovanju stranih tvari (antigena). Imunološki sustav je sastavljen od organa i stanica razmještenih po cijelom tijelu. Organi imunološkog sustava još se nazivaju i limfni organi. Limfni organi su strukture u kojima nastaju i razvijaju se limfociti. Limfne organe možemo podijeliti na primarne (središnje) i sekundarne (periferne). Primarni organi su timus i koštana srž te Fabriciusova burza kod ptica, a u sekundarne organe ubrajaju se limfni vorovi, slezna i limfno tkivo pridruženo sluznicama. Stanice prisutne u imunološkom sustavu su limfociti kod kojih razlikujemo T i B-limfociti i NK stanice, fagociti i dendriti te stanice. Imunološki sustav kralježnjaka razlikuje se ovisno o filogenetskom razvoju. Ribe imaju najjednostavniji imunološki sustav. Sisavci koji su evolucijski najrazvijenija skupina kralježnjaka imaju i najrazvijeniji imunološki sustav.

SUMMARY

Immunology is the science that studies immunity (lat. *immunitas* - resistance), that is the body's ability to resist the effects of foreign substances (antigens). Immune system is composed of organs and cells dispersed throughout the body. The organs of the immune system also can be called lymphoid organs. Lymphoid organs are structures which emerge and mature lymphocytes. Lymphoid organs can be divided into primary (central) and secondary (peripheral). The primary organs are the thymus and bone marrow, and bursa of Fabricius in birds, secondary organs include the lymph nodes, spleen and lymph tissue associated with mucous membranes. Cells present in the immune system are lymphocytes in which we distinguish T and B-lymphocytes and NK cells, phagocytes and dendritic cells. Vertebrate immune system differs depending on the phylogenetic development. Fish have the most simplest immune system. Mammals that are evolutionarily the most developed group of vertebrates have the most developed immune system.