

Jiřina Bartůňková, Anna Šedivá a kolektiv

Imunodeficiencie

3., přepracované a doplněné vydání



Autoři a nakladatelství děkují společnostem AbbVie s.r.o.,
BENEPHARMA CZ, spol. s r.o., CSL BEHRING s.r.o.,
EWOPHARMA, spol. s.r.o. a S & D Pharma CZ, spol. s.r.o.
za podporu, která umožnila vydání publikace.

abbvie



CSL Behring
Biotherapies for Life™



Jiřina Bartůňková, Anna Šedivá a kolektiv

Imunodeficiency

3., přepracované a doplněné vydání

Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude trestně stíháno.

Prof. MUDr. Jiřina Bartůňková, DrSc., prof. MUDr. Anna Šedivá, DSc. a kolektiv

IMUNODEFICIENCE

3., přepracované a doplněné vydání

Editorky a hlavní autorky:

Prof. MUDr. Jiřina Bartůňková, DrSc., prof. MUDr. Anna Šedivá, DSc.

Spoluautoři:

MUDr. Markéta Bloomfield, MUDr. Adam Klocperk, Ph.D., MUDr. Tomáš Milota, Ph.D., MUDr. Michal Podrazil, Ph.D., MUDr. Marta Sobotková, MUDr. Zuzana Střížová, Ph.D.

Recenzenti:

Prof. MUDr. Terezie Fučíková, DrSc., prof. MUDr. Jiří Litzman, CSc.

Vydání odborné knihy schválila Vědecká redakce nakladatelství Grada Publishing, a.s.

© Grada Publishing, a.s., 2021

Cover Photo © depositphotos.com 2021

Vydala Grada Publishing, a.s.

U Průhonu 22, Praha 7

jako svou 8075. publikaci

Odpovědná redaktorka Bc. Gabriela Glezgová

Sazba a zlom Jan Šístek

Obrázky dodali autoři.

Počet stran 240

3. vydání, Praha 2021

Vytiskla TISKÁRNA V RÁJI, s.r.o., Pardubice

Publikace byla podpořena granty AZV NV18-05-00162 Moderní přístupy k primárním imunodeficiencím: uplatnění molekulární a funkční diagnostiky v terapii a AZV NU20-05-00282 Vysokokapacitní mapování povrchových molekul normálních a patologických T lymfocytů, hledání diagnostických a terapeutických cílů.

Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků, což není zvláštním způsobem vyznačeno.

Postupy a příklady v této knize, rovněž tak informace o lécích, jejich formách, dávkování a aplikaci jsou sestaveny s nejlepším vědomím autorů. Z jejich praktického uplatnění však pro autory ani pro nakladatelství nevyplývají žádné právní důsledky.

ISBN 978-80-271-4294-1 (ePub)

ISBN 978-80-271-4293-4 (pdf)

ISBN 978-80-271-1273-9 (print)

Obsah

Úvod a předmluva k 3. vydání	9
1 Fyziologie imunitního systému (Zuzana Střížová)	12
1.1 Lymfatické orgány a tkáň	12
1.1.1 Centrální lymfatické orgány	12
1.1.2 Periferní lymfatické orgány	16
1.2 Složky přirozené imunity	17
1.2.1 Humorální složky	17
1.2.2 Buněčné složky	20
1.3 Složky adaptivní imunity	28
1.3.1 Humorální složky	28
1.3.2 Buněčné složky	32
1.4 Komunikace mezi složkami imunity	38
1.4.1 Adhezivní molekuly	38
1.4.2 Cytokiny	39
1.5 Ontogeneze imunitního systému	41
1.5.1 Prenatální vývoj imunity	41
1.5.2 Postnatální vývoj imunity	44
1.6 Zpracování a prezentace antigenu	47
1.6.1 Zpracování a prezentace exogenních antigenů	47
1.6.2 Zpracování a prezentace endogenních antigenů	47
1.6.3 Prezentace antigenu nezávislá na HLA	48
1.7 Regulace imunitní reakce	49
2 Primární imunodeficience (Anna Šedivá)	51
2.1 Primární imunodeficience jako vrozené poruchy imunity	51
2.2 Genetika primárních imunodeficiencí	60
2.3 Diagnostika primárních imunodeficiencí	62
2.3.1 Rodinná anamnéza	62
2.3.2 Osobní anamnéza a klinické příznaky	62
2.4 Léčebné možnosti	63
2.4.1 Transplantace hematopoetických kmenových buněk, thymu a genová terapie	63
2.4.2 Substituční léčba imunoglobuliny	65
2.4.3 Cílené terapie	65
2.4.4 Očkování u pacientů s primární imunodeficiencí	66
2.4.5 Další opatření u pacientů s primárními imunodeficiencemi	67
3 Přehled primárních imunodeficiencí podle IUIS 2019	68
3.1 Imunodeficience postihující buněčnou a humorální imunitu (Adam Klocperk)	68

3.1.1	Těžké kombinované imunodeficiency (SCID – Severe Combined Immunodeficiency)	68
3.1.2	Kombinované PID méně závažné než SCID	70
3.2	Kombinované imunodeficiency spojené s dalšími či systémovými příznaky (<i>Adam Klocperk</i>)	73
3.2.1	Thymické poruchy s dalšími vrozenými abnormalitami	74
3.2.2	Poruchy opravy DNA	75
3.2.3	Anhidrotická ektodermální dysplazie s imunodeficiencí (EDA-ID)	76
3.2.4	Hyper-IgE syndromy	76
3.2.5	Imunodeficiency s vrozenou trombocytopenií	77
3.2.6	Poruchy metabolismu folátu	78
3.2.7	Poruchy kalciových kanálů	78
3.2.8	Imunooséální dysplazie	78
3.2.9	Ostatní	79
3.3	Převážně protilátkové deficiency (<i>Tomáš Milota</i>)	79
3.3.1	Agamaglobulinémie	80
3.3.2	Selektivní deficit IgA (SIGAD)	81
3.3.3	Selektivní deficit podtříd imunoglobulinů G (SIGGD)	82
3.3.4	Selektivní deficit specifických protilátek (SSAD)	82
3.3.5	Přechodná hypogamaglobulinémie v dětství (THI)	82
3.3.6	Běžná variabilní imunodeficiency (CVID)	82
3.4	Poruchy imunitní regulace (<i>Tomáš Milota</i>)	85
3.4.1	Chédiakův-Higashiho syndrom (CHS)	86
3.4.2	Familiární lymfohistiocytóza (FHL)	86
3.4.3	X-vázaný lymfoproliferativní syndrom typ 1 (XLP-1, Duncanova choroba)	87
3.4.4	X-vázaný lymfoproliferativní syndrom typ 2 (XLP-2, XIAP deficiency)	87
3.4.5	Autoimunitní lymfoproliferativní syndrom (ALPS)	88
3.4.6	IPEX syndrom	88
3.4.7	CTLA4 a LRBA deficiency	89
3.4.8	Deficit interleukinu 10 (IL-10) a jeho receptoru (IL-10R)	89
3.5	Poruchy fagocytózy (<i>Markéta Bloomfield</i>)	90
3.5.1	Těžká kongenitální neutropenie	91
3.5.2	Cyklická neutropenie	91
3.5.3	Chronická granulomatózní choroba (CGD)	92
3.5.4	Deficit myeloperoxidázy	93
3.5.5	Defekt adhezivních molekul I (LAD I)	93
3.5.6	Defekt adhezivních molekul II (LAD II)	94
3.5.7	Defekt adhezivních molekul III (LAD III)	94
3.5.8	GATA2 deficiency	94
3.5.9	Defekty dalších fagocytárních mechanismů	95
3.6	Poruchy vrozené imunity (<i>Markéta Bloomfield</i>)	96
3.6.1	Epidermodysplasia verruciformis (EV)	96
3.6.2	Vrozená vnímavost k mykobakteriálním onemocněním (Mendelian Susceptibility to Mycobacterial Diseases – MSMD) ..	97

3.6.3	Chronická mukokutánní kandidóza (CMC)	98
3.6.4	Zvýšená náchylnost k herpetickým infekcím CNS	98
3.6.5	Defekty TLR signalizace se zvýšenou bakteriální náchylností ..	99
3.6.6	Ostatní	99
3.7	Autoinflamatorní onemocnění (<i>Anna Šedivá</i>)	100
3.7.1	Hereditární periodické horečky, poruchy funkce inflamazomu	100
3.7.2	Interferonopatie a monogenní vaskulitidy	103
3.8	Poruchy komplementu (<i>Marta Sobotková</i>)	104
3.8.1	Defekty klasické cesty komplementu	105
3.8.2	Poruchy v alternativní cestě komplementu	106
3.8.3	Poruchy lektinové cesty	107
3.8.4	Defekty regulačních molekul komplementové kaskády	107
3.8.5	Diagnostika komplementových poruch	110
3.8.6	Léčba komplementových poruch	110
3.9	Selhání kostní dřeně (<i>Adam Klocperk</i>)	112
3.9.1	Fanconiho anemie	112
3.9.2	Dyskeratosis congenita	112
3.10	Fenokopie vrozených poruch imunity (<i>Markéta Bloomfield</i>)	113
3.10.1	Fenokopie primárních imunodeficitů asociované se somatickými mutacemi	114
3.10.2	Fenokopie primárních imunodeficitů s přítomností autoprotilátek	115
4	Sekundární imunodeficeience	118
4.1	Poruchy centrálních a periferních lymfatických orgánů	118
4.1.1	Dřeňová dysfunkce (<i>Michal Podrazil</i>)	118
4.1.2	Získané poruchy funkce thymu (<i>Adam Klocperk</i>)	125
4.1.3	Imunodeficeience po splenektomii a při hyposplenismu (<i>Michal Podrazil</i>)	129
4.2	Získané poruchy počtu a funkce periferních leukocytů	133
4.2.1	Choroby asociované s výskytem autoprotilátek proti neutrofilním leukocytům (<i>Michal Podrazil</i>)	133
4.2.2	Poruchy lymfocytů v důsledku autoimunitních mechanismů (<i>Tomáš Milota</i>)	138
4.2.3	Poruchy leukocytů v důsledku přítomnosti sérových faktorů jiných než autoprotilátky (<i>Tomáš Milota</i>)	140
4.2.4	Terapie leukocytárních poruch (<i>Tomáš Milota</i>)	140
4.3	Sekundární protilátkové imunodeficeience (<i>Tomáš Milota</i>)	142
4.3.1	Příčiny a patogeneze	142
4.3.2	Klinický obraz	143
4.3.3	Terapie	144
4.4	Metabolické choroby (<i>Michal Podrazil</i>)	144
4.4.1	Chronická renální insuficeience	144
4.4.2	Jaterní dysfunkce	149
4.4.3	Diabetes mellitus	152
4.4.4	Malnutrice a hypovitaminózy	154

4.5	Imunodeficiency po transplantaci kmenových buněk krvetvorby (<i>Adam Klocperk</i>)	158
4.5.1	Patogeneze	158
4.5.2	Rekonstituce imunitních funkcí po HSCT	159
4.5.3	Klinický obraz	160
4.5.4	Terapie	161
4.6	Imunodeficiency při imunosupresivní a cytostatické terapii (<i>Marta Sobotková</i>)	163
4.6.1	Patogeneze	163
4.6.2	Účinek kortikosteroidů	165
4.6.3	Účinek imunosupresiv zasahujících do metabolismu DNA	165
4.6.4	Účinek imunosupresiv selektivně inhibujících buněčné složky imunity a dalších novějších látek	166
4.6.5	Účinek biologických léků	167
4.6.6	Terapie a prevence	169
4.7	Imunodeficiency v chirurgických oborech a v intenzivní medicíně (<i>Michal Podrazil</i>)	172
4.7.1	Patogeneze	173
4.7.2	Diagnostika a monitorování imunitní dysregulace	176
4.7.3	Terapie a prevence	179
4.8	Imunodeficiency navozené infekčními činiteli (<i>Marta Sobotková</i>)	181
4.8.1	Syndrom získané imunodeficiency	181
4.8.2	Jiné imunodeficiency navozené viry	185
4.8.3	Imunodeficiency při bakteriálních a dalších infekčních chorobách	189
4.9	Imunitní systém a stres (<i>Jiřina Bartůňková</i>)	195
4.9.1	Akutní stres	196
4.9.2	Chronický stres	197
4.9.3	Chronický únavový syndrom	198
4.10	Imunita a nádorová onemocnění (<i>Michal Podrazil</i>)	201
4.10.1	Nádorové antigeny	202
4.10.2	Protinádorové imunitní mechanismy	204
4.10.3	Mechanismy obrany nádorů vůči imunitnímu systému	205
4.10.4	Imunodeficiency při nádorových onemocněních	206
	Zkratky	213
	Rejstřík	222
	Souhrn	236
	Summary	238

Úvod a předmluva k 3. vydání

Třetí přepracované vydání monografie Imunodeficiencie by se nejspíš ani nemělo jmenovat imunodeficiencie. Pod pojmem imunodeficiencie se totiž obvykle rozumí taková porucha imunity, která vede ke zvýšené náchylnosti k infekcím. Tak bylo pojata první i druhé vydání knihy. Pokroky v molekulární diagnostice ale zamíchaly tímto pojmem v oblasti primárních poruch imunity natolik, že dnes nějaká vada v genu účastnícím se imunitní reakce se vůbec nemusí projevit jako imunodeficit, ale jako komplexní porucha s projevy autoimunitními, alergickými či zcela odlišnými. Proto jsme do tohoto vydání zařadili podrobnější kapitoly 2 a 3, která se věnuje těmto vrozeným poruchám imunity, i když dosud představují minoritní část pacientů trpících imunodeficiencemi.

Stále ale platí, že poruchy imunity – ať již vrozené, nebo získané – patří mezi medicínsky, společensky a ekonomicky velmi závažnou a náročnou problematiku. Stoupající trend výskytu těchto stavů vede k tomu, že prakticky každý lékař jakékoliv specializace se setkává s těmito pacienty. Jako imunodeficiencie v klinice stále označujeme stavy, které vedou především k poruše jedné ze základních funkcí imunity, a to obranyschopnosti proti mikroorganismům. Proto je nejčastějším klinickým projevem imunodeficiencie zvýšená náchylnost k infekčním chorobám. Ale čím dál více se ukazuje, že poruchy imunitního systému, zejména vrozené, ale i získané, mohou vést k velmi rozmanitým klinickým manifestacím podle toho, jaká složka imunity je postižena, ve kterém věku k postižení dojde, jaké je prostředí, ve kterém pacient žije, jakými jinými chorobami trpí, jak a kde je porušen gen zodpovědný za určitý defekt a jakou jinou genetickou výbavu pacient má. Jedná-li se o vrozené imunodeficiencie, prvním ošetřujícím lékařem takového pacienta bývá pediatr, ale v závažných případech také lékaři jednotek intenzivní péče a jiní dětské specialisté. V dospělé medicíně se s imunodeficientními pacienty setkává jako první zejména praktický lékař, internista, pneumolog, otorinolaryngolog, infekcionista, mikrobiolog a další. Všichni uvedení odborníci jsou první, kteří vnesou podezření na imunodeficienci. Úlohou specialisty, klinického imunologa, je, aby stanovil správnou diagnózu, navrhl léčebný postup, pacienty dispenzarizoval a spolupracoval s příslušnými specialisty v léčbě těch komplikací, které mají orgánové projevy. Při diagnostice je důležitá i spolupráce s odborníky v genetice, molekulární biologii a dalšími pracovníky základního a aplikovaného výzkumu. Je-li imunodeficiencie výsledkem iatrogenního zásahu, není diagnóza imunodeficiencie obtížná – obvykle se o ní ví, ale v těchto případech je potřeba stanovit stupeň a závažnost imunodeficiencie a přijmout příslušná léčebná, nebo preventivní opatření. Bývá to opět obvykle praktický lékař, který má tyto pacienty v péči ve spolupráci se specializovanými centry a musí si vědět rady při zvládání průběžných problémů.

Tato kniha je průvodcem současnými poznatky v oblasti imunodeficiencí, je určena zejména praktickým lékařům a dále lékařům nejrůznějších specializací, kteří se mohou s imunodeficientními pacienty setkávat. Kniha má poskytnout všeobecný přehled o mechanismech imunity, základních jednotkách vrozených imunodeficiencí a stavech, které nejčastěji vedou k sekundárním imunodeficiencím.

Oblast primárních imunodeficiencí je rychle se rozvíjející disciplínou, ve které se nejvíce kloubí poznatky základního výzkumu s klinickou praxí. Obvykle se jedná o relativně vzácná onemocnění, jejichž objasnění na molekulární úrovni přispívá

k pochopení funkce imunitního systému. Úkolem co možná nejpřesnější diagnostiky je nejen adekvátní péče o pacienta, ale také poskytnutí možnosti prenatalní diagnostiky v postižených rodinách, aby k dalším případům narození dětí s těžkou imunodeficiencí nedocházelo. Oddíl primárních imunodeficiencí zastarává velmi brzy. Každoročně se objasňuje molekulová podstata dalších vrozených imunodeficiencí a přibývají případy nových, dosud nepopsaných poruch imunitních mechanismů. To je však problém spíše specialistů, klinických imunologů, aby si stále aktualizovali znalosti v této problematice. Pro lékaře ostatních odborností zůstanou delší dobu platit obecné poznatky o klinických projevech vrozených imunodeficiencí, které vedou k podezření na imunopatologický stav a nasměrování pacienta na specializované vyšetření. Přesto jsme tuto část na rozdíl od prvních dvou vydání rozšířili o popis jednotlivých poruch klasifikovaných podle IUIS spíše pro ilustraci, o jak komplexní problematiku se jedná a kam až pokročila molekulová diagnostika, která již v řadě případů má své dopady na terapeutické zásahy příslušných poruch.

Zatímco primární imunodeficiency jsou problematikou, která je ve světovém písemnictví dobře zpracována a existuje řada podrobných monografií a přehledů, sekundární imunodeficiency nejsou vzhledem ke své heterogenitě tak oblíbeným předmětem literárního zpracování v celkovém přehledu, ale spíše jen prací se zaměřením na určitou oblast. Sekundární imunodeficiency jsou přitom velmi častá onemocnění, se kterými se setkávají lékaři nejrůznějších odborností. Nejčastější příčinou sekundární imunodeficiency ve světovém měřítku je podvýživa, na dalším místě pak infekce virem HIV. Imunodeficiency různé závažnosti mohou způsobovat i jiné infekce, a to jak virové (spalničky, chřipka), tak chronické bakteriální nebo parazitární (malárie). V případě infekcí je však situace složitější, leckdy je obtížné určit, zda chronická infekce vede k imunodeficitu nebo zda je chronická infekce již výsledkem preexistující poruchy imunity. V každém případě se tyto dva faktory mohou prolínat a navzájem potencevat. V ekonomicky vyspělých zemích se na sekundárních imunodeficiencích podílejí velkou měrou iatrogenní zásahy – ozařování, imunosupresivní terapie po orgánových transplantacích, stavy po transplantaci kostní dřeně, cytostatická a imunosupresivní léčba. Jako imunodeficiency se mohou manifestovat i metabolické choroby, poruchy výživy a nádorová onemocnění. Ke zvýšené náchylnosti k infekcím vedou také poruchy přirozených bariér (popáleniny, poranění a toxická poškození kůže a sliznic, chronická zánětlivá onemocnění kůže a sliznic) a polytraumata. Poruchy imunity komplikují rozsáhlé chirurgické zákroky a postihují pacienty vyžadující z různých důvodů intenzivní a resuscitační péči.

U primárních imunodeficiencí se v současné době používá klasifikace IUIS zohledňující složky imunity, která je nejvíce postižena, kde dominují poruchy humorální a buněčné imunity, poruchy specifické a nespecifické imunity i různé poruchy regulační řídicí se zejména genetickým podkladem těchto chorob. Dělení sekundárních imunodeficiencí je obtížnější a je možné z různých hledisek. Získané poruchy obvykle postihují více složek imunity najednou. Na výsledném obrazu imunodeficiency se často současně podílí několik faktorů – například u nádorových chorob je imunodeficiency výsledkem kombinace vlivu samotného základního onemocnění, k němuž přistupuje vliv chemoterapie nebo radioterapie, případně poruchy výživy. V tomto textu jsou uvedeny sekundární imunodeficiency v celcích, které jsou relevantní pro klinickou praxi v českých podmínkách. Účelem publikace není podat vyčerpávající rozbor dané problematiky, ale pouze prezentovat pohled imunologa. Nejvíce pozornosti je

věnováno patogenezi imunodeficiency u jednotlivých stavů, která je východiskem pro adekvátní léčebné zásahy.

Monografie obsahuje úvodní stručnou aktualizovanou stat' o fyziologii imunitního systému. Ta má čtenáři posloužit k připomenutí a vysvětlení některých imunologických pojmů, se kterými se v kapitolách o imunodeficiencích setká. Žádná z kapitol si neklade nároky podat vyčerpávající přehled o dané problematice. V konkrétních situacích je dále třeba doplnit znalosti speciální literaturou zaměřenou na příslušnou oblast. Kniha může posloužit i pracovníkům základního výzkumu v oblasti imunologie. Choroby z poruch imunity jsou typickou oblastí, kde spolupráce základního a aplikovaného výzkumu s klinickou praxí může přinést obohacení diagnostických i terapeutických postupů, které vedou ke zlepšení péče o pacienty s poruchami imunity.

V knize jsou shrnuty i osobní poznatky z dlouholeté praxe v oboru klinické imunologie.

Děkujeme všem spolupracovníkům, kolegům z jiných imunologických pracovišť, včetně zahraničních, kolegům z jiných oborů, ale i studentům a pacientům za podněty, znalosti a zkušenosti, kterými přispěli do této monografie.

*za kolektiv autorů
Jiřina Bartůňková a Anna Šedivá*

1 Fyziologie imunitního systému

Zuzana Strážová

Imunitní systém je jedním ze základních homeostatických mechanismů lidského organismu. Zajišťuje integritu organismu likvidací všech potenciálně škodlivých struktur, čímž se také významně podílí na fyziologické obměně tkání. Složky imunitního systému – buňky, molekuly, tkáně a orgány – spolu vzájemně kooperují za účelem rozeznání a eliminace nebezpečných vnitřních, či vnějších podnětů. Podněty neškodné jsou naopak imunitním systémem tolerovány. Ohrožení zevního původu představují především patogenní mikroorganismy; vnitřní pak odumřelé, nádorově změněné či jinak poškozené buňky a tkáně vlastního organismu. Imunitní systém se tradičně dělí na složku přirozenou (evolučně starší) a adaptivní (evolučně mladší). Buňky, které společně vytvářejí adaptivní složku imunitního systému, jsou vysoce specializované a vyznačují se schopností učení a paměti. Poruchy ve funkcích imunitního systému mohou ve svých důsledcích vést u jedince ke snížené obranyschopnosti vůči infekcím, tedy k imunodeficienci, či mohou zvýšit náchylnost ke vzniku nádorového onemocnění. Porušená funkce imunity se však nemusí vždy vyznačovat sníženou reakcí vůči škodlivým podnětům. V některých případech se porucha funkce může projevit jako neadekvátní, přemrštěná reakce vůči běžným podnětům prostředí, tedy alergie, nebo vůči vlastním buňkám a tkáním, tedy autoimunita. Různé projevy imunitní dysfunkce se u jednotlivce mohou kombinovat. V následujícím přehledu je stručně podána fyziologie imunitního systému, zejména ve vztahu k imunodeficiencím.

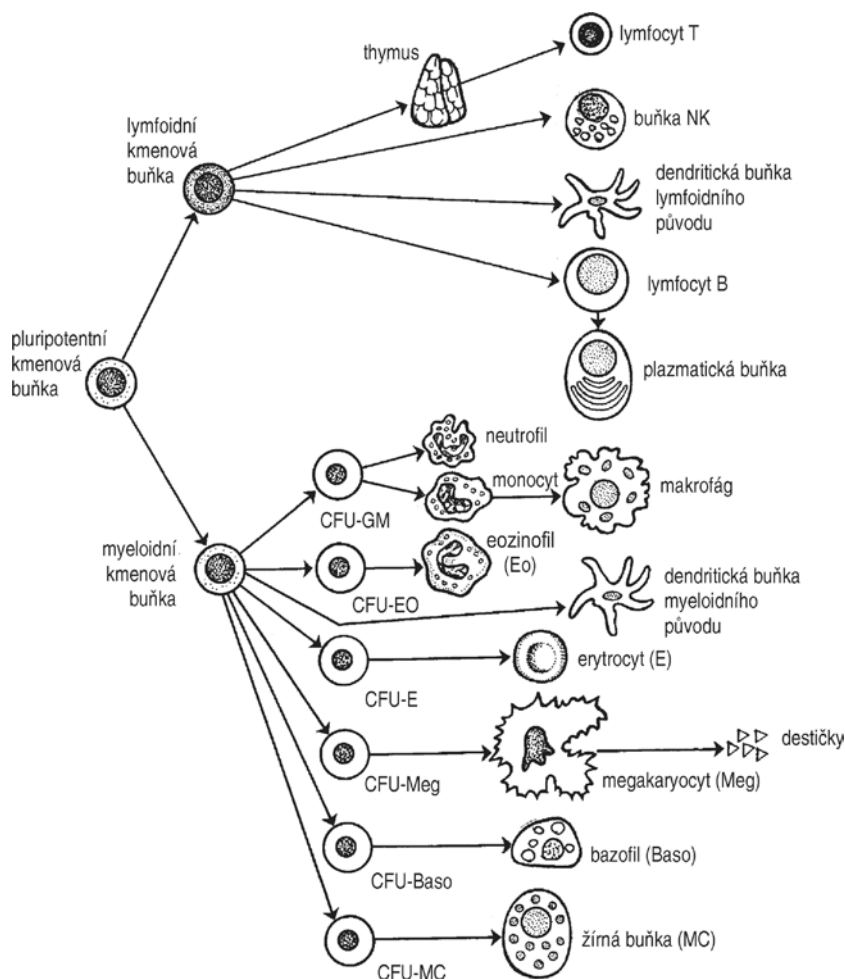
1.1 Lymfatické orgány a tkáně

Buňky imunitního systému spolu s pojivovými buňkami a dalšími strukturami tvoří anatomické a funkční celky – **lymfatické orgány a tkáně**.

1.1.1 Centrální lymfatické orgány

Centrální lymfatické orgány jsou **kostní dřeň** a **thymus (brzlík)**, v nichž dochází k množení, diferenciaci a zrání imunokompetentních buněk. Všechny buňky imunitního systému vznikají ze společného prekursoru v kostní dřeni. Tento prekursor nazýváme hematopoetická kmenová buňka (HSC – Hematopoietic Stem Cells) a kvantitativně se odhaduje její frekvence v kostní dřeni na 1 buňku na 10 až 100 tisíc buněk. Hematopoetická kmenová buňka se diferencuje směrem k **myeloidní** či **lymfoidní** linii (obr. 1.1). Diferenciace až do konečných stadií jednotlivých buněčných typů probíhá v kostní dřeni, pouze lymfocyty T ji opouštějí ve stadiu prekursorů a jejich diferenciace pak následuje v thymu. Část lymfocytů T se diferencuje extrathymicky, zejména ve slizniční střevní tkáni.

Kmenové buňky lze nalézt i mimo kostní dřeň a jedná se tedy o velmi heterogenní populaci buněk s různým potenciálem diferenciaci do jednotlivých linií. Tyto buňky



Obr. 1.1 Diferenciace hematopoetických kmenových buněk

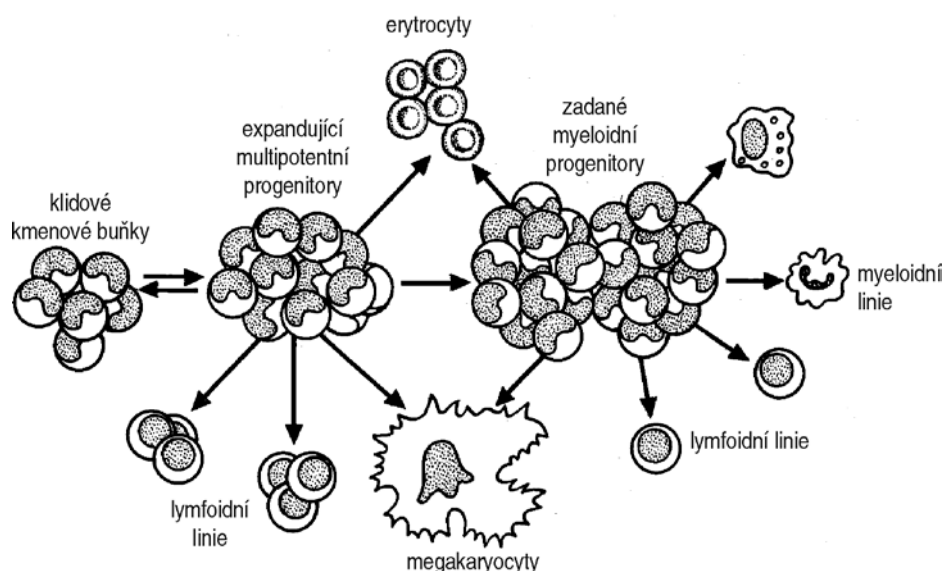
Z kmenové pluripotentní buňky vznikají myeloidní a lymfoidní prekursory, které se dále diferencují. Poznatek, že kmenová buňka se znakem CD34 může dát vznik celé krvetvorbě, umožnil léčbu závažných primárních imunodeficiencí a některých nádorových chorob transplantací kmenových buněk. Poruchy ve vývoji lymfoidní a myeloidní linie jsou podkladem vrozených imunodeficiencí.

CFU (Colony-Forming Unit) – prekursorové buňky, ze kterých se tvoří příslušná linie buněk

se schopností sebeobnovy byly identifikovány v řadě tkání. Popsány byly embryonální kmenové buňky, kmenové buňky plodové vody, embryonální kmenové buňky izolované z pupečnickové krve a řada dalších. Z funkčního hlediska platí, že z nejprimitivnějšího stadia je kmenová buňka schopná diferenciace do všech buněčných linií, ale zároveň má schopnost zachovat si potenciál nediferencované kmenové buňky. To je pravděpodobně zajištěno tím, že při dělení pokračuje v diferenciaci jen jedna dceřiná buňka

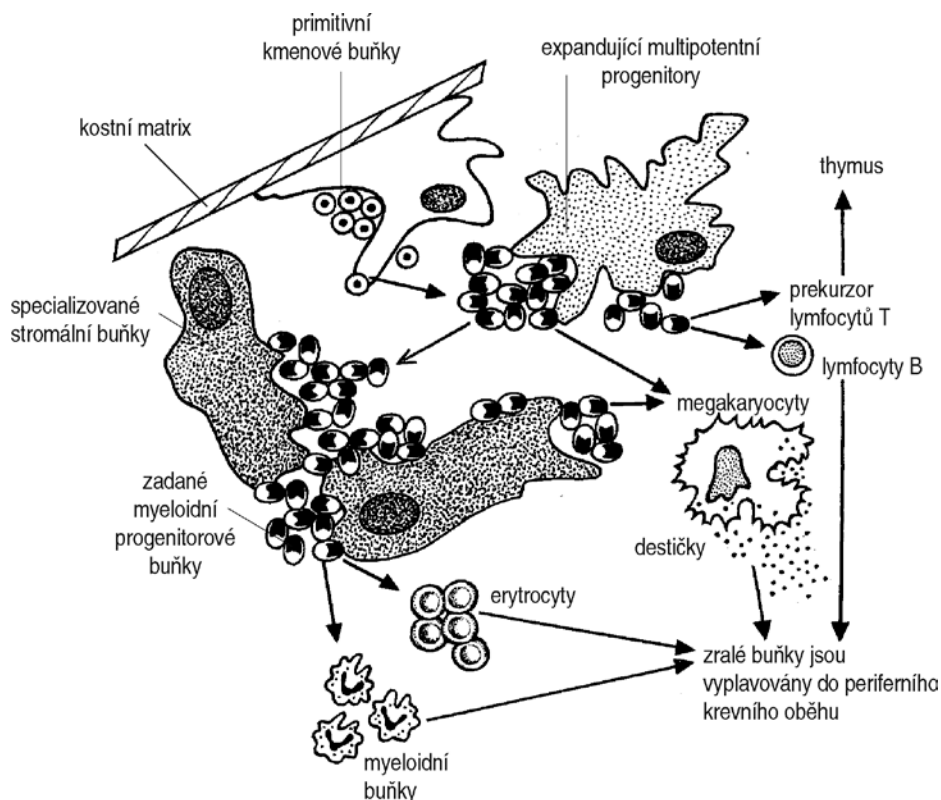
(ta dá vznik kolonii expandujících multipotentních progenitorů), zatímco druhá přejde do metabolicky neaktivního stavu a udržuje se v něm do doby potřeby znovudělení (obr. 1.2). Z experimentálních prací vyplývá, že schopnost obnovy jednotlivých HSC je časově limitována a udržení krve tvorby po celý život jedince je výsledkem sumace sebeobnovujícího potenciálu individuálních HSC. Expandující multipotentní progenitory si zachovávají schopnost diferenciace do všech hematopoetických linií, ale po určitém počtu dělení ztrácejí multipotenci a stávají se zadanými myeloerytroidními progenitory a lymfoidními progenitory.

Vývoj jednotlivých buněčných typů probíhá pod kontrolou řady transkripčních faktorů, které se aktivují a deaktivují vždy v určitých diferenciačních stadiích. Tyto transkripční faktory vznikají pod vlivem interakce receptorů na hematopoetických buňkách s ligandy na stromálních buňkách kostní dřeně nebo pod vlivem solubilních faktorů produkovaných různými buněčnými typy – cytokiny s funkcí faktorů stimulujících kolonie (CSF) (obr. 1.3). Většina cytokinů působí parakrinním způsobem, nicméně krev tvorba je regulována i endokrinně, a to jak pozitivně, tak negativně vlivem působků produkovaných v jiných orgánech: např. erythropoetin produkovaný v ledvinách výrazně ovlivňuje tvorbu červených krvinek, kortikoidy ovlivňují granulopoézu apod.



Obr. 1.2 Mechanismus obnovy kmenové buňky

Model hierarchie kmenových a progenitorových buněk. Klidové kmenové buňky představují pluripotentní buňky s potenciálem sebeobnovy a schopností diferenciace do jakékoliv krevní buňky. Tyto buňky příležitostně procházejí buněčným cyklem a přispívají do polu expandujících multipotentních progenitorových buněk. Dělení probíhá asymetricky: jedna dceřiná buňka se vrací do klidového stadia a zůstává nediferencovanou kmenovou buňkou, zatímco druhá dceřiná buňka se posléze diferencuje, a to buď přímo do lymfoidních nebo myeloidních linií, nebo přes zadané progenitory, které se dále dělí a diferencují se do prekursorových buněk s omezeným proliferacním potenciálem.



Obr. 1.3 Interakce hematopoetických buněk s mikroprostředím v kostní dřeni
 Mikroprostředí v kostní dřeni je tvořeno směsí parenchymových stromálních buněk, které sekrecí cytokinů a adhezivními interakcemi podporují vývoj a zrání jednotlivých linií.

Studium exprese povrchových molekul na jednotlivých buněčných typech umožnilo spolu s funkčními studiemi do určité míry charakterizovat jednotlivá diferenciatní stadia buněk. Je zřejmé, že jde o kontinuální proces, kdy se určitý znak ztrácí a jiný objevuje (totéž platí pro expresi transkripčních faktorů). Jednotlivá stadia buněčného vývoje jsou tedy vždy charakterizována jinými povrchovými molekulami.

Nejpřínosnějším zjištěním pro praxi byla identifikace znaku CD34, který na svém povrchu nese multipotentní kmenová buňka. Tento znak sice není exprimován výhradně na povrchu HSC a lze jej nalézt například i na endoteliích, avšak slouží v praxi k identifikaci HSC. Pro časně HSC jsou dále charakteristické molekuly Flt-3 a její ligand, c-kit a její ligand (Stem-cell factor). Ty jsou pro hematopoézu specifitější než CD34, jak dokumentují experimentální zvířata s vyrušenými příslušnými geny (myš s fenotypem CD34^{-/-} nemá poruchu v krvetvorbě, zatímco zásahy do molekul c-kit a Flt-3 znamenají podstatné poruchy v diferenciaci hematopoetických buněk).

V lékařství jsou nejhojněji užívány hematopoetické kmenové buňky, kmenové buňky pupečnickové krve a periferní kmenové buňky. Arteficiálně se dají kmenové buňky mobilizovat do periferního krevního oběhu po aplikaci cytotoxických léků

(cyklofosfamid) nebo cytokinů (G-CSF). Moderní klinické přístupy umožnily realizovat efektivní transplantaci kmenových buněk pacientům s vrozenými imunodeficiencemi či lymfoproliferativními chorobami. V preklinickém výzkumu je pak snahou nalézt uplatnění kmenových buněk v terapii onemocnění způsobených nevratným poškozením buněk a tkání. Důležitým bodem je přitom objasnění mechanismů a časových faktorů souvisejících s obnovováním kmenových buněk. Testováno je v současnosti užití kmenových buněk v léčbě míšních poranění či neurodegenerativních onemocnění. Studium procesu krvetvorby slouží také k pochopení leukemogeneze a je nezbytným krokem pro další diagnostická, terapeutická a snad i v budoucnu preventivní opatření.

Zatímco B-lymfocyty dozrávají již v kostní dřeni, T-lymfocyty procházejí diferenciací v thymu, kde jsou nejdříve při tzv. pozitivní selekci vybrány buňky schopné reagovat s MHC antigeny I. třídy (cytotoxické CD8⁺ T-lymfocyty) nebo s MHC antigeny II. třídy (pomocné CD4⁺ T-lymfocyty). Následně jsou v průběhu tzv. negativní selekce likvidovány T-lymfocyty, které reagují s MHC antigeny s příliš velkou afinitou, a jsou tudíž potenciálně autoreaktivní.

1.1.2 Periferní lymfatické orgány

Periferní lymfatické orgány a tkáně jsou místem, kde probíhají imunitní reakce a kde se terminálně diferencují lymfocyty T a B do efektorových populací. Patří sem slezina, lymfatické uzliny a lymfatická tkáň asociovaná se sliznicemi (MALT – Mucosa-Associated Lymphoid Tissue). MALT lze však řadit současně i mezi centrální lymfatické orgány, neboť v této slizniční lymfatické tkáni probíhá extrathymická diferenciací částí lymfocytů T.

Vnitřní anatomické uspořádání periferních lymfatických orgánů umožňuje optimální interakci lymfocytů B a T s buňkami prezentujícími antigen (Antigen-Presenting Cells, APC). Po styku lymfocytu s antigenem prezentovaným na APC dochází k aktivaci, proliferaci a diferenciaci do stadia efektorové buňky. Lymfatické orgány a tkáně jsou propojeny sítí lymfatických a krevních cév. Nově vzniklé lymfocyty se dostávají z centrálních do periferních lymfatických orgánů krevním řečištěm, odkud přestupují cévní stěnou v postkapilárních venulách vystlaných vysokým endotelem za účasti vzájemných interakcí adhezivních molekul exprimovaných na lymfocytech a endoteliích. Expres různých druhů chemokinů a jejich receptorů na jednotlivých buněčných populacích směřuje jejich migraci do příslušných zón lymfatických orgánů. Pro buňky T a jejich migraci do parafolikulárních zón lymfatických uzlin je nejdůležitější chemokinový receptor CCR7, který váže chemokiny CCL19 a CCL21. Migrace buněk B do lymfatických folikulů je zajišťována receptory CXCR4 a CXCR5, které váží chemokiny CXCL12 a CXCL13. Jiné spektrum adhezivních molekul a chemokinů exprimované na buňkách po jejich aktivaci pak způsobí, že lymfatický orgán opouštějí eferentními lymfatickými cévami, jimiž se dostávají krevní cirkulací do tkání, kde vykonávají své efektorové funkce. U efektorových buněk T sehrává významnou roli v atrahování do místa infekce receptor CXCR3, jiné receptory pak zabezpečují atrahování buněk T do kůže (CCR10) nebo například do střev (CCR9).

Pro imunitní reakce jsou důležité interakce imunokompetentních buněk s dalšími buňkami, které nepocházejí z krvetvorných kmenových buněk. Patří sem například folikulární dendritické buňky (FDC), endotelie, epitelové buňky sliznic a fibroblasty.

1.2 Složky přirozené imunity

Přirozená imunitní odpověď (neadaptivní, vrozená) se spouští řádově v minutách až hodinách po setkání s nebezpečným podnětem. Jedná se o evolučně starší typ imunitní reakce, který lze v určité míře nalézt ve všech žijících organismech. Buňky, které zajišťují přirozenou imunitní odpověď, reagují velmi rychle, nejsou však schopny si vytvořit specializovanou imunitní paměť tak, jako si ji vytvářejí buňky adaptivní imunity. Výzkum posledních let prokázal, že některé buňky přirozené imunity jsou schopné své imunitní odpovědi opakovaně trénovat (trained immunity) prostřednictvím nejrozličnějších epigenetických modifikací a změn metabolismu. Tím se rychlost a kvalita jejich odpovědi při opakované infekci zvyšuje. Rozdíl mezi přirozenou a adaptivní imunitní odpovědí se stále zmenšuje.

Přirozenou imunitu tvoří jak humorální, tak buněčné složky rozpoznávající cizorodé struktury, které jsou společné různým skupinám mikroorganismů, popřípadě apoptotickým nebo nádorově změněným buňkám. U mikroorganismů se tyto struktury označují termínem PAMPs (Pathogen-Associated Molecular Patterns). Příkladem může být endotoxin společný gramnegativním bakteriím, peptidoglykan charakteristický pro grampozitivní bakterie, glukany a manany typické pro fungální mikroorganismy. Pro apoptotické buňky savců jsou charakteristické fosfolipidy, které jsou u funkčních buněk na vnitřní straně membrány a při apoptóze se dostávají na vnější buněčnou membránu. Struktury rozpoznávající tyto molekuly jsou buď solubilní (představované humorálními složkami nespecifické imunity – proteiny akutní fáze, komplement, lektin vázající manózu), nebo membránově vázané, tedy receptory na buněčných složkách nespecifické imunity. Sem patří např. receptory fagocytů – lektinové receptory, receptor pro lipopolysacharid (CD14), Toll-like receptory aj. Aktivací těchto receptorů se spouští dereprese genových úseků kódujících prozánětlivé cytokiny nebo chemokiny (IL-1, IL-6, TNF, IL-8), popřípadě se objevují membránové znaky (exprese molekuly CD80/86 na APC). Jak sekrece cytokinů, tak indukce membránových receptorů jsou důležité pro interakci se specifickými složkami imunity.

Na obraně organismu a udržování jeho integrity vůči zevnímu okolí se podílejí i další součásti organismu. Patří k nim neporušený povrch kůže a sliznic a jejich přirozené obranné a mikrobicidní mechanismy. Ty lze rozdělit na mechanické (pohyb řasinek, distribuce toku vzduchu v dýchacích cestách, tekutiny v močových cestách), chemické (mastné kyseliny na kůži, enzymy – lysozym ve slinách, slzách a potu, pepsin v žaludku a střevě, antibakteriální peptidy – defenziny, nízké pH žaludeční šťávy a moč) a mikrobiální (normální nepatogenní flóra soutěží s patogenními mikroorganismy o živiny a o receptorová místa, která zprostředkují adhezi na epitelie, a produkuje antibakteriální látky). Porucha těchto obecných obranných mechanismů – ať již vrozená, nebo častěji získaná – vede ke klinickému obrazu zvýšené náchylnosti k infekcím a je nutné ji brát v úvahu při diferenciální diagnostice sekundárních imunodeficiencí.

1.2.1 Humorální složky

Humorální složky přirozené imunity tvoří komplementový systém, interferony, některé cytokiny a chemokiny, lektiny, pentraxiny a další sérové proteiny. Do přirozené imunity lze z funkčního hlediska zařadit i tzv. přirozené protilátky, které jsou produkovány B-lymfocyty typu B1 (viz dále).

■ Komplement

Komplementem je označován systém asi 30 plazmatických bílkovin, které spolu kaskádovitě reagují za účelem dosažení výsledné efektorové či regulační imunitní reakce. Základní složky komplementu tvoří devět bílkovin, které označujeme C1 až C9 a jsou produkovány především jaterními buňkami, z menší části makrofágy. Složky komplementu jsou přítomny v séru v neaktivní formě. Aktivují se třemi způsoby, tzv. klasickou, lektinovou a alternativní cestou (obr. 1.4). Klasická cesta je zahájena vazbou protilátky na mikrobiální povrch, vedoucí k odkrytí vazebného místa pro komplementový protein C1. Při alternativní cestě dochází k samovolnému štěpení komplementového proteinu C3 vytvářející proteiny C3a a C3b, které se váží na antigenní povrch. Lektinová cesta je iniciována sérovým lektinem, který je strukturálně i funkčně podobný komplementovému proteinu C1. Po aktivaci jednou z výše zmíněných cest vstupují počáteční proteiny do komplementové kaskády a každý následující protein je aktivován v kaskádě tak, že produkt jedné reakce aktivuje reakci další. Konečný komplex (MAC – Membrane Attack Complex) vazbou na buněčnou membránu způsobí lýzu a zničení buňky. V průběhu kaskády aktivace komplementu vznikají štěpy jednotlivých součástí (označované písmeny a, b, ...). Některé složky vykazují chemotaktickou aktivitu (C5a, C3a), jiné se účastní opsonizace (C3b). Pro jednotlivé součásti komplementu existují na buňkách komplementové receptory (CR1–4).

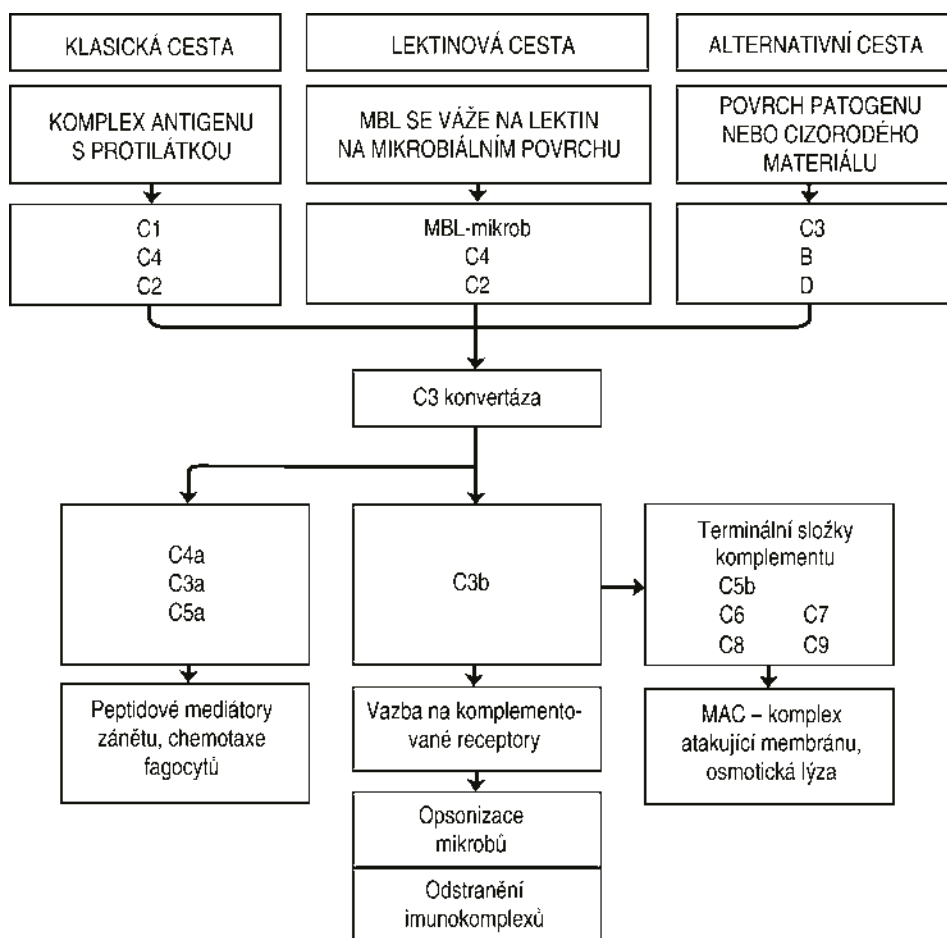
Prevence poškození vlastních tkání před účinky komplementu je zajišťována plazmatickými a membránovými inhibitory. Klasickou cestu již na počátku reguluje inhibitor složky C1, který blokuje její aktivaci. C3-konvertázy se rozpadají po interakci s membránovým proteinem DAF (Decay-Accelerating Factor, CD55) nebo se sérovým vázajícím se proteinem C4. Fragment C3b je štěpen sérovou proteázou – faktorem I v součinnosti s membránovým proteinem MCP (Membrane Cofactor Protein, CD46), komplementovým receptorem CR1 (CD35) nebo sérovým faktorem H. Závěrečnou, lytickou fázi blokuje membránový protein CD59 (protektin). Tato molekula se váže mezi složky C8 a první molekulu C9 lytického komplexu a brání další polymeraci C9 a vytvoření lytického póru.

Hlavní funkce komplementu jsou uvedeny v tabulce 1.1.

■ Lektin vázající manózu a další humorální faktory

Do humorálních nespecifických složek patří interferony, některé cytokiny a chemokiny (viz dále). Dále sem patří sérové proteiny ze skupiny lektinů – nejvýznamnější je lektin vázající manózu (MBL), který má výrazný opsonizační účinek vazbou na struktury bohaté na cukerné manózoové zbytky. Opsonizace je proces, který umožňuje složkám, jako je lektin či proteiny komplementu, označit cílovou buňku a usnadnit tím její fagocytózu. Procesem opsonizace může být označena například virem infikovaná buňka, ale i bakterie či plíseň. Lektin je produkován jaterními buňkami konstitučně a je důležitou součástí lektinové cesty aktivace komplementu. V rámci reakce akutní fáze se jeho syntéza zvyšuje.

Další složky jsou představovány proteiny zvanými pentraxiny, z nichž nejdůležitější je C-reaktivní protein (CRP) (rozpoznává např. DNA uvolněnou z buněk), sérový amyloidový protein (SAP) a další sérové proteiny převážně s opsonizační aktivitou.



Obr. 1.4 Způsoby aktivace komplementu – schematické znázornění tří cest aktivace komplementu a hlavní úlohy meziproduktů a terminálních komponent

■ Přirozené protilátky

Přirozené protilátky jsou polyreaktivní nízkoafinní protilátky třídy IgM, které jsou produkovány subpopulací peritoneálních lymfocytů B1 a slezinnými B-lymfocyty marginální zóny. Přestože jsou produktem lymfocytů B, řadíme je funkčně do nástrojů přirozené imunity. Mají afinitu k polysacharidovým a glykoproteinovým strukturám na povrchu mikroorganismů a po navázání na tyto struktury spouštějí komplementovou kaskádu prostřednictvím C1q složky komplementu.

Přirozené protilátky se začínají tvořit již před narozením, ale nejvíce postnatálně na podnět osídlování zažívacího traktu střevními bakteriemi. Patří mezi ně i protilátky proti krevním skupinám (hemaglutininy) a také fyziologické autoprotilátky.

Z funkčního hlediska mají přirozené protilátky homeostatickou funkci při udržování vnitřního prostředí (opsonizace vlastních poškozených buněk nebo tkání) a také

Tab. 1.1 *Funkce komplementu*

Transport antigenu	Složky C3b a C4b zajišťují transport antigenu vázaného v imunokomplexu vazbou na komplementový receptor na erytrocytech; tento komplex je degradován makrofágy ve slezině a játrech.
Prezentace antigenu	Složky C3b a C4b mají pomocnou funkci při prezentaci antigenu vazbou na folikulární dendritické buňky v mízních uzlinách.
Opsonizace	Složky C3b a C4b vazbou na cizorodou částici usnadňují její fagocytózu vazbou na komplementové receptory CR3 a CR4 na fagocytech.
Chemotaxe, anafylaxe	Složky C3a, C5a, komplex C567 mají chemotaktickou aktivitu; složky C3a, C5a působí jako anafylatoxiny (způsobují degranulaci žírných buněk, uvolnění histaminu, zvýšenou propustnost cév).
Cytolýza	Konečný membranolytický komplex (MAC) osmoticky lýzuje cílové buňky tvorbou membránových pórů.
Aktivace lymfocytů B	Složky C3b, d vázané na imunokomplex zajišťují přídatnou aktivaci lymfocytů B vazbou na komplementový receptor CR2; protilátková reakce je tímto způsobem mnohem účinnější.
Potenciace ADCC a NK aktivity	Komplementové složky potencují účinek protilátek v cytotoxické reakci zprostředkované protilátkami (ADCC) a v NK aktivitě.

se uplatňují v počátečních stádiích infekcí, než je aktivována tvorba vysoce afinních specifických protilátek procházejících afinitní maturací. Na druhé straně jsou přirozené protilátky překážkou xenotransplantací, neboť aktivaci komplementu vyvolávají hyperakutní rejekce xenotransplantátu.

1.2.2 Buněčné složky

Buňky přirozené imunity lze z funkčního hlediska rozdělit na buňky fagocytující a neschopné fagocytózy, kam řadíme přirozené lymfoidní buňky, NK-buňky, žírné buňky a basofilní leukocyty. Do skupiny profesionálních fagocytujících buněk se řadí neutrofilní a eozinofilní granulocyty, monocyty a z nich diferencující se makrofágy. Nezralé dendritické buňky jsou také schopny fagocytózy. Tato jejich schopnost se ztrácí s maturací buňky a následně se dendritické buňky specializují převážně na prezentaci antigenu.

Na pomezí buněk přirozené a adaptivní imunity potom stojí **lymfocyty T s receptorem typu γ/δ** . Tato subpopulace lymfocytů nemá obvykle na svém povrchu ani molekuly CD4 ani CD8 (CD4⁺CD8⁻). Lymfocyty γ/δ rozpoznávají lipidové, glykolipidové nebo polysacharidové antigeny buď v nativní formě, nebo předkládané neklasickým způsobem (nezávislým na klasických MHC molekulách) pomocí molekuly CD1 na buňkách prezentujících antigen. Přesný charakter antigenů rozpoznávaných lymfocyty

γ/δ doposud není znám, je však zjevné, že tyto buňky vykazují velkou funkční plasticitu. Popsána byla jejich schopnost produkovat četné cytokiny (IFN- γ , TNF- α , IL-17 aj.), chemokiny (RANTES/CCL5, IP-10/CXCL10, Gro-alfa/CXCL1 aj.), schopnost způsobovat cytolyzu prostřednictvím perforinů, granzymu či TRAIL ligandu (Tumor Necrosis Factor-Related Apoptosis-Inducing Ligand) a schopnost navazovat četné interakce s epiteliálními buňkami, monocytami, dendritickými buňkami, neutrofilními leukocyty a buňkami B. Recentní studie ukazují, že lymfocyty γ/δ mohou sloužit i jako profesionální APC a významně stimulovat T-buněčnou odpověď.

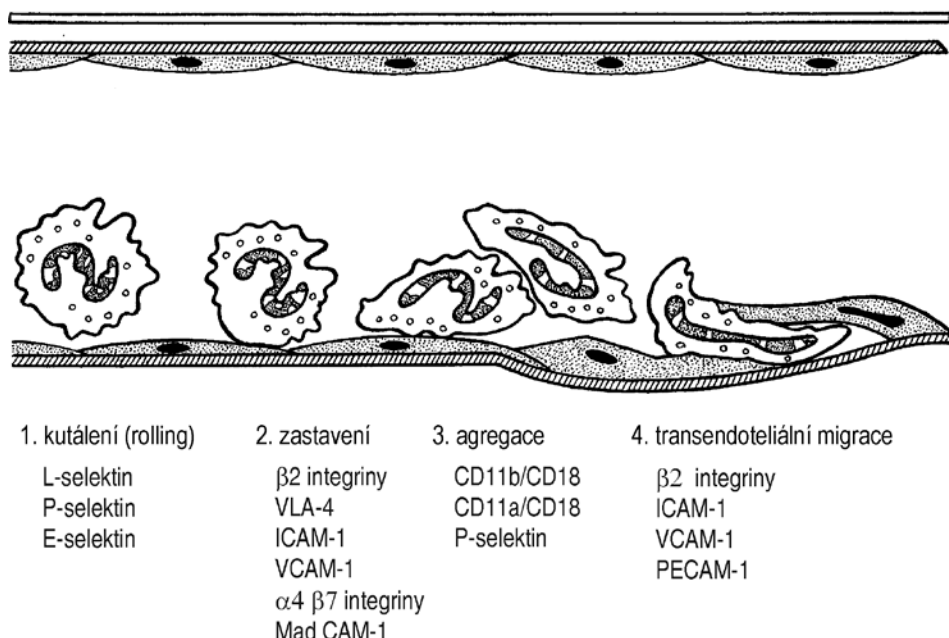
■ Fagocytující buňky

Monocyty, makrofágy a dendritické buňky se řadí mezi profesionální antigen prezentující buňky (APC), které jsou charakteristické expresí HLA receptorů II. třídy. Neutrofilní granulocyty (neutrofilny) tyto receptory neexprimují, recentní *in vivo* studie však naznačují, že neutrofilny mají také schopnost za určitých okolností prezentovat antigen, přestože je tato schopnost výrazně nižší než u profesionálních APC. Přes určité rozdíly v receptorové a enzymatické výbavě je většina charakteristik pro různé fagocytující buňky shodná. Zatímco granulocyty se uplatňují především v obraně proti extracelulárním bakteriím, makrofágy jsou určeny zejména k obraně proti intracelulárně žijícím mikroorganismům.

V případě onemocnění či zranění se do místa infekce či jiné zánětlivé afekce fagocyty dostávají diapedézou mezi endoteliálními buňkami za pomoci interakce různých adhezivních molekul (obr. 1.5). Zvýšená exprese adhezivních molekul je přitom ovlivňována chemokiny a cytokiny produkovanými v místě afekce. Za přirozených podmínek neutrofilny a monocytami cirkulují v krevním oběhu.

Neutrofilny představují fagocytární buňky se schopností produkce širokého spektra antimikrobiálních látek. Jsou nejpočetnějším druhem leukocytů cirkulujících v krvi (60–80 % u dospělých osob), přesto však z celkového počtu neutrofilů se jen asi 7 % nachází v periferní krvi. Kolem 93 % neutrofilů je v kostní dřeni a určitý podíl bývá vždy vyplaven pod vlivem zánětlivých cytokinů, hormonů a bakteriálních produktů, popřípadě léků. Hlavním chemokinem, který řídí mobilizaci neutrofilů a jejich přísun do místa afekce, je interleukin 8 (IL-8)/CXCL8.

Neutrofilny mají v periferní cirkulaci krátký poločas (6–8 hodin) a jejich koncentrace je udržována mezi $3\text{--}6 \times 10^9/\text{l}$. Tyto fagocytující antimikrobiální buňky obsahují celou řadu cytotoxických granúl, jimiž likvidují infikované či jinak poškozené buňky. Jejich azurofilní granula obsahují myeloperoxidázu, proteinázu 3, lysozym, defenziny a další látky. Specifická granula pak obsahují například kolagenázu, β_2 -mikroglobulin, α_1 -anti-trypsin a jiné. Kromě schopnosti fagocytózy a degranulace jsou neutrofilny schopné též produkce neutrofilních extracelulárních sítí (NET). Jedná se o mechanismus, při němž neutrofilní leukocyt během svého zániku uvolňuje jadernou DNA (rozvolněný chromatin a asociované proteiny) do extracelulárního prostoru, a vytváří tak baktericidní síť napomáhající eliminaci patogenních mikroorganismů. Další nově popsanou schopností neutrofilů je trogocytóza a trogoptóza. Prostřednictvím trogocytózy je neutrofil (ale i buňky T, B či NK) schopný pohltit povrchový receptor jiné buňky a následně jej prezentovat na svém povrchu. Opakovaná trogocytóza vede k apoptotické smrti poškozené cílové buňky. Tento jev se nazývá trogoptóza a uplatňuje se například v obraně organismu proti maligním buňkám.



Obr. 1.5 Adhezivní interakce neutrofilů s endoteliemi při extravazaci

Úloha adhezivních molekul v jednotlivých stadiích procesu migrace leukocytů z cév do místa zánětu. První, reverzibilní stupeň adherence se nazývá kutálení (rolling). Je zprostředkován zejména interakcí selektinů. Jsou-li v prostředí přítomny prozánětlivé cytokiny, jako např. interleukin 8, TNF nebo IL-1, dojde ke zvýšení afinity integrinů na leukocytech, které se ireverzibilně přichytí na stěnu cévní prostřednictvím molekul imunoglobulinové skupiny ICAM a VCAM a spustí komplexní děj, při kterém se rozšířenými póry mezi endoteliemi protáhnou neutrofilové z cévního řečiště do tkáně. Podobně pouze interakcí jiných párů adhezivních molekul se dostávají z krve monocyty a lymfocyty. Poruchy v expresi selektinů a integrinů jsou podkladem syndromů deficeience adhezivních glykoproteinů. Nadměrné adhezivní interakce neutrofilů s endoteliemi hrají úlohu také v sekvestraci při syndromu dechové tísně a při dalších stavech v akutní medicíně.

Monocyty cirkulující v periferní krvi představují asi 3–8 % všech leukocytů a jejich biologický poločas činí 1–3 dny. V kostní dřeni je zastoupení monocytů okolo 6×10^8 buněk/kg. Různé subpopulace monocytů lze rozlišit v periferní krvi na základě membránové exprese CD14 a CD16. Exprese znaku CD16 je charakteristická pro minoritní populaci monocytů, která je spojena s vyšší expresí HLA-DR a CD43, a její přítomnost je nejspíše spojena s opakovanou aktivací buněk. Specifikum monocytů je jejich schopnost opustit krevní řečiště a vcestovat do tkáně. V tkáni se monocyty diferencují v makrofágy a tato diferenciací je spojena s modulací více než 800 genů.

Makrofágy získaly různé názvy dle tkáňových lokalizací, ve kterých se nacházejí. Nazýváme je tedy mikroglie v mozku, Kupfferovy buňky v játrech, osteoklasty kostní dřeni, Langerhansovy buňky v kůži, mesangiólní buňky ledvin, alveolární nebo

intersticiální makrofágy v plicích, rezidentní makrofágy ve slezině, thymu, uzlinách, v pleurální, peritoneální a kloubní dutině. Makrofágy ve tkáních žijí velmi dlouho (až několik let) a mohou se diferencovat do prozánětlivého typu M1 nebo do reparačního a tlumivého typu M2. M1 makrofágy se uplatňují významně v obraně proti infekci a produkují celou řadu prozánětlivých cytokinů, jako jsou TNF- α , IL-12, IL-1 β . M2 makrofágy produkují především TGF- β a IL-10, napomáhají reparaci poškozených tkání, ale zároveň mohou podporovat tvorbu nádorových cév a růst nádorové hmoty.

Zatímco granulocyty jsou schopny vykonávat své efektorové funkce ihned, makrofágy se stávají plně funkčními až po aktivaci signály, které jim poskytují lymfocyty Th1 ve formě cytokinů (interferon γ , TNF aj.). Jde o vzájemné ovlivnění – signál k diferenciaci do podtypu Th1 dostanou Th0-lymfocyty od makrofágů prostřednictvím secernovaného interleukinu 12.

Monocyty se mohou diferencovat též do **dendritických** buněk. Klasické (myeloidní) dendritické buňky jsou profesionální antigen prezentující buňky, které se nacházejí ve větší, či menší míře ve všech tkáních lidského těla a aktivně migrují krví a lymfou. Největší množství dendritických buněk nacházíme v kůži a na sliznicích, kde pohlcují antigeny a zpracovávají je pro prezentaci v komplexu s povrchovými MHC proteiny naivním T-buňkám. Klasické dendritické buňky jsou charakteristické expresí TLR 2 a TLR 4 a svou tvorbou cytokinu IL-12 představují hlavní stimulatory Th1 buněčné imunitní odpovědi. Receptory TLR indukují rozdílné odpovědi dendritických buněk, a ovlivňují tak jejich proliferaci, migraci, sekreci cytokinů, expresi kostimulačních molekul a další buněčné vlastnosti. Proces předkládání antigenu se odehrává v sekundárních lymfatických orgánech a předchází mu vyzrání dendritické buňky. Zralé dendritické buňky se vyznačují zvýšenou expresí antigen prezentujících molekul (MHC I, MHC II) a kostimulačních molekul (CD40, CD80, CD86). Pouze zralé dendritické buňky mohou efektivně stimulovat naivní T-lymfocyty. Mimo klasických dendritických buněk se v lidském těle nacházejí též plazmocytoidní dendritické buňky (dříve zvané interferon produkující buňky), které vznikají z lymfoidní vývojové linie a na svém povrchu nesou především TLR 7 a TLR 9.

Ve tkáni se fagocyty po opuštění krevního řečiště při zánětu aktivně pohybují do místa poškození pod vlivem chemotaktických faktorů (chemotaxe). Jak již bylo zmíněno, pro neutrofile je hlavní chemotaktickou látkou IL-8. Pro monocyty jsou důležité chemotaktické faktory ze skupiny CC chemokinů (MIP-1 α , MCP-1, RANTES; dle nové klasifikace CCL3, CCL4, CCL5 aj.). Společnými chemotaktickými látkami jsou součástí komplementu C3a a C5a, leukotrien B4 (LTB4), faktor aktivující destičky (PAF) a chemotaktický tetrapeptid fMLP produkovaný řadou mikroorganismů. Pro všechny tyto látky mají fagocyty na svém povrchu příslušné receptory. Stimulace těchto receptorů vede nejen k chemotaxi, ale také ke zvýšení adhezivity, k degranulaci, aktivaci NADPH-oxidázy a reorganizaci cytoskeletu, nutně k procesu fagocytózy. Funkce fagocytů také pozitivně ovlivňuje tetrapeptid tuftsin. Tento peptid je součástí CH2 domény těžkého řetězce imunoglobulinové molekuly mezi aminokyselinovými zbytky 289–292. Odštěpuje se z nosičské molekuly endokarboxylázami produkovanými slezinou a pak přímo na fagocytech.

Mechanismus rozpoznávání cizorodých částic je založen na povrchových receptorech, které se váží na příslušný ligand. Ligandem mohou být mikrobiální motivy (PAMP) (viz výše) nebo opsoniny navázané na infekční agens.

Opsonizace je závislá na spolupůsobení protilátek, složek komplementu a dalších sérových proteinů (MBL, fibronektin, fibrinogen, proteiny ze skupiny tzv. pentraxinů – C-reaktivní protein a sérový amyloid P) a opsonizované částice se váží na příslušné receptory (Fc, komplementové, manózoový receptor).

Samotná fagocytóza se uskutečňuje interakcí mezi endogenními lektiny fagocytů a oligo- nebo monosacharidy, které jsou součástí mikrobiálních glykoproteinů a polysacharidů nebo se objevují na membránách apoptotických vlastních buněk, případně buněk nádorových. Může se odehrávat i opačná interakce, tedy vazba bakteriálních lektinů na cukry exprimované na povrchu fagocytů. Receptory na povrchu fagocytů, které slouží k rozpoznávání mikrobiálních či apoptotických motivů, označujeme pattern recognition receptors (PRR). PRR mohou být asociované s buněčným povrchem nebo solubilní (pentraxiny, collectiny, ficoliny a proteiny komplementu).

Velmi konzervovanou strukturou v rámci PRR jsou Toll-like receptory, jejichž analoga se vyskytují už i u *Drosophila melanogaster* a některých rostlin. V současnosti je popsáno jedenáct druhů TLR (u lidí je funkčních pouze deset), z nichž každý rozpoznává určitou mikrobiální strukturu. Aktivace jednotlivých TLR na dendritických buňkách a makrofázích vede k různému typu odpovědi, vedoucímu k aktivaci adekvátního směru imunitní reakce specifickými složkami. Dalšími důležitými receptory jsou NOD-like receptory (NLR; NOD z ang. Nucleotide-Binding Oligomerization Domain), které vážou zejména štěpné produkty mikrobiálních peptidoglykanů. Dalšími zástupci jsou RIG-like receptory vážící především virovou RNA či cytosolické DNA senzory vážící virovou či bakteriální DNA. Na povrchu fagocytyjících buněk nacházíme též C-lektinové receptory, které vážou mikrobiální manózu či fruktózu obsahující karbohydráty.

Buňky vlastního organismu, které hynou apoptózou, exprimují negativně nabitě fosfolipidy, které fagocyty rozpoznávají a pohlcují prostřednictvím dalších PRR, tzv. scavengerových receptorů.

Sama fagocytóza probíhá zipovým mechanismem postupným obhvacováním cizorodé částice pseudopodiemi za vzniku fagozomu. Tvorba fagozomu (a také chemotaxe) je mj. závislá na intracelulárním přeskupení kontraktálních proteinů (mikrofilamentový a mikrotubulový systém). Tento kontraktilní aparát je obdobný jako ve svalových buňkách. Cytoskeleton obsahuje aktin a myozin a strukturální protein tubulin. Spojování a rozpojování cytoskeletonu probíhá v dynamické a reverzibilní reakci tvorby gelu a solu. Tato gel/sol reakce je závislá na interakci ligandů s receptory a je regulována signalizačními systémy. Ty tvoří zejména malé G-proteiny, jako je Rho, Rac a Cdc42Hs. Posledně jmenovaný má GTPázovou aktivitu a indukuje polymerizaci aktinu. V tomto procesu se účastní také protein WASP tvořící spojení mezi Cdc42Hs a aktinovým cytoskeletem. Mutace v proteinu WASP pak vede k defektní cytoskeletové struktuře s poruchami agregace destiček a sníženou chemotaxí leukocytů. Deficit jednoho z proteinů Rho byl nedávno určen jako příčina imunodeficitu s projevy podobnými defektu adhezivních glykoproteinů (leukocytóza, omfalitida, flegmonózní záněty).

Po tvorbě fagozomu dojde k jeho splnutí s lysozomy, ve kterých je cizorodá částice degradována aktivací mikrobicidních systémů závislých, nebo nezávislých na kyslíku.

Ústřední úlohu v oxidačním vzplanutí neutrofilů hraje enzym NADPH-oxidáza. NADPH-oxidáza je komplex několika složek, které se postupně aktivují a vážou na sebe další enzymatické systémy, např. myeloperoxidázu (obr. 1.6).