

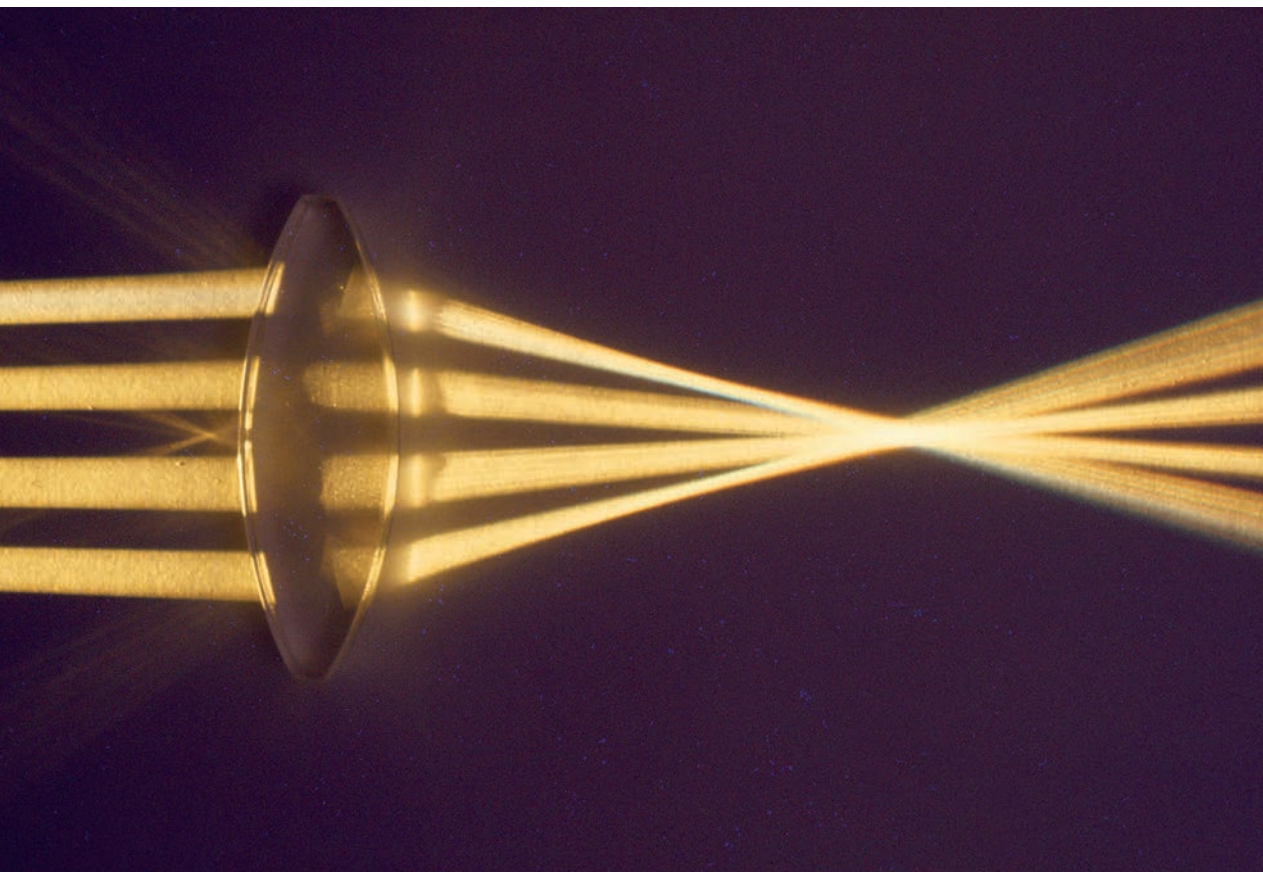
Svatopluk Synek, Šárka Skorkovská

---

# Fyziologie oka a vidění

2., doplněné a přepracované vydání

---





Svatopluk Synek, Šárka Skorkovská

---

# Fyziologie oka a vidění

2., doplněné a přepracované 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.*

**Doc. MUDr. Svatopluk Synek, CSc., doc. MUDr. Šárka Skorkovská, CSc.**

**FYZIOLOGIE OKA A VIDĚNÍ**  
**2., doplněné a přepracované vydání**

**Recenze:**

Prof. MUDr. Anton Gerinec, CSc.

Prof. MUDr. Jaroslav Řehůřek, CSc.

---

**TIRÁŽ TIŠTĚNÉ PUBLIKACE**

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

© Grada Publishing, a.s., 2014

Cover Photo © fotobanka allphoto, 2014

Obrázky 2, 9, 19, 23, 31, 46, 50, 51 podle předloh autorů překreslil MgA. Radek Krédl.

Obrázky 1, 3, 8, 10, 15–18, 20–22, 24, 26–28, 29, 32–35, 38, 42, 45, 47, 49, 52 převzaty z prvního vydání knihy.

Obrázky 4–7, 11–14, 25, 30, 36, 37, 39–41, 43, 44, 48 dodali autoři.

Vydala Grada Publishing, a.s.

U Průhonu 22, Praha 7

jako svou 5651. publikaci

Odpovědná redaktorka Mgr. Dita Váchová

Sazba a zlom Josef Pavlík

Počet stran 96 + 12 stran barevné přílohy

2. vydání, Praha 2014

Výtiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a. s.

*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 ale nevyplývají pro autory ani pro nakladatelství žádné právní důsledky.*

**ISBN 978-80-247-3992-2**

---

**ELEKTRONICKÉ PUBLIKACE**

**ISBN 978-80-247-8944-6 ve formátu PDF**

**ISBN 978-80-247-8499-1 ve formátu EPUB**

Úvod.....	7
<b>I Anatomie a biochemie zrakového ústrojí .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Oční koule .....</b>	<b>11</b>
1.1 Stěna oční koule .....	11
1.1.1 Zevní vazivová vrstva .....	12
1.1.2 Prostřední vrstva (tunica vasculosa – uvea) .....	19
1.1.3 Vnitřní vrstva oka (tunica interna nebo sensoria bulbi).....	21
1.2 Obsah oční koule .....	24
1.2.1 Čočka .....	24
1.2.2 Sklivec .....	26
1.2.3 Oční komory (camerae bulbi) .....	27
1.2.4 Komerový mok.....	29
<b>2 Přídavné oční orgány – organa oculi accessoria .....</b>	<b>31</b>
2.1 Očnicové svaly .....	31
2.1.1 Okohybné svaly .....	31
2.1.2 Hladké svaly očnice .....	33
2.2 Vazivový aparát očnice .....	33
2.2.1 Periorbita .....	33
2.2.2 Pochva oční koule .....	34
2.2.3 Očnicové tukové těleso .....	34
2.3 Víčka – palpebrae .....	34
2.3.1 Skladba víčka .....	34
2.4 Spojivka – tunica conjunctiva.....	36
2.4.1 Cévy a nervy víček a spojivky.....	37
2.5 Slzné ústrojí – apparatus lacrimalis .....	37
2.5.1 Slzná žláza .....	37
2.5.2 Vývodné slzné cesty.....	37
2.5.3 Struktura slzného filmu.....	39
2.5.4 Produkce slz .....	40
2.5.5 Dynamika slzného filmu.....	40
<b>3 Cévy oka, očnice a zraková dráha .....</b>	<b>41</b>
3.1 Tepny očnice .....	41
3.2 Žíly očnice.....	42
3.3 Cévy a nervy slzné žlázy .....	42
3.4 Zraková dráha.....	42
3.4.1 Pupilární reflex.....	43
<b>4 Funkční topografie mozkové kůry .....</b>	<b>45</b>
4.1 Senzitivní a senzorické korové oblasti.....	45
4.1.1 Zrakové korové oblasti .....	45
4.2 Frontální zrakové (motorické) pole.....	46
<b>II Fyziologie vidění .....</b>	<b>47</b>
<b>5 Refrakční vlastnosti oka .....</b>	<b>49</b>
<b>6 Fyziologie cévního systému oka .....</b>	<b>50</b>
<b>7 Nitrooční tekutina.....</b>	<b>51</b>
7.1 Chemické složení .....	51
7.2 Hematookulární bariéra .....	51
7.2.1 Komerová voda a osmotická výměna.....	51
7.2.2 Morfologie hematookulární bariéry .....	52
<b>8 Cévnatka a pigmentový epitel .....</b>	<b>53</b>
<b>9 Nitrooční tlak .....</b>	<b>54</b>
9.1 Impresní tonometrie .....	54
9.2 Aplanační tonometrie .....	54
9.3 Bezkontaktní pneumatická tonometrie.....	55
9.4 Vliv osmolarity krve.....	55

9.5	Kritický nitrooční tlak .....	56
9.6	Vliv nervového systému na sekreci nitrooční tekutiny a nitrooční tlak .....	56
9.7	Farmakologické účinky na nitrooční tlak .....	56
9.7.1	Adrenergní receptory .....	56
9.7.2	Parasympatomimetika .....	56
9.7.3	Inhibitory karboanhydrázy .....	57
9.7.4	Prostaglandiny .....	57
9.7.5	Vliv kortikosteroidů na nitrooční tlak .....	57
<b>10</b>	<b>Akomodace oka .....</b>	<b>58</b>
10.1	Stimulus akomodace .....	58
10.2	Presbyopie .....	58
<b>11</b>	<b>Rozlišování intenzity světla a duplicitní teorie vidění .....</b>	<b>60</b>
<b>12</b>	<b>Fotochemie zrakových pigmentů .....</b>	<b>61</b>
<b>13</b>	<b>Rozlišování barev a teorie barevného vidění .....</b>	<b>62</b>
13.1	Poruchy barvocitu .....	62
13.2	Elektrofyzologie barevného vidění .....	63
<b>14</b>	<b>Zraková ostrost .....</b>	<b>64</b>
<b>15</b>	<b>Elektrofyzologie sítnice .....</b>	<b>66</b>
15.1	Elektroretinogram .....	66
15.2	Elektrookulografie (EOG) .....	67
15.3	Receptorový potenciál .....	67
15.4	Aktivita horizontálních, bipolárních a amakrinních buněk .....	68
15.5	Funkce gangliových buněk .....	69
<b>16</b>	<b>Fyzologie vidění, psychofyzika zrakové ostrosti a vnímání kontrastů .....</b>	<b>70</b>
16.1	Stilesův-Crawfordův efekt, Machova pásma .....	70
16.2	Metakontrast čili zpětné maskování .....	70
16.3	Vnímání pohybu podnětu zrakem .....	71
<b>17</b>	<b>Fyzologie očních pohybů .....</b>	<b>72</b>
17.1	Analýza očních pohybů .....	72
17.1.1	Pohyby očí během fixace .....	73
17.1.2	Stabilizované obrazy na sítnici .....	73
17.1.3	Velké oční pohyby .....	73
17.2	Prostorové vidění .....	74
17.3	Binokulární vidění .....	74
17.4	Hlubkové, stereoskopické vidění .....	75
<b>18</b>	<b>Zorné pole .....</b>	<b>76</b>
<b>19</b>	<b>Psychofyzologie zraku – iluze a vyvolané odpovědi .....</b>	<b>77</b>
19.1	Entoptické fenomény .....	77
19.1.1	Entoptické obrazy vznikající v zevní plexiformní vrstvě sítnice: Haidingerovy svazky .....	79
19.2	Zrakové evokované potenciály .....	79
<b>20</b>	<b>Náhrady sítnice – sítnicové protézy .....</b>	<b>81</b>
	<b>Rejstřík .....</b>	<b>83</b>
	<b>Souhrn .....</b>	<b>87</b>
	<b>Summary .....</b>	<b>89</b>

## Úvod

Základy rozvoje fyziologie smyslů je třeba hledat v renesanční době. Podíleli se na nich Leonardo da Vinci, Johannes Kepler, Isaac Newton, Thomas Young a mnozí další. Základy fyziologie smyslů jako nového medicínského oboru položil v 19. století Jan Evangelista Purkyně. V dizertační práci „Příspěvky k poznání zraku z hlediska subjektivního“ formuloval základy experimentálních přístupů, které se používaly v průběhu 19. století. Mnohé smyslové jevy byly označeny jeho jménem: Purkyňovy obrázky, vznikající na přední a zadní ploše čočky, nebo Purkyňův fenomén – změna citlivosti zraku pro barvy vlivem mesopického vidění. K objasnění funkce zrakového orgánu přispěli i vědci z jiných medicínských oborů – anatomové, histologové, biochemici. V druhé polovině 19. století vynikli ve fyziologii zraku dva badatelé: Karl E. K. Hering, který studoval především pohyby oka a barevné vidění, a Hermann von Helmholtz, jenž formuloval trichromatickou teorii barevného vidění. Moderní vyšetřovací postupy ve 20. století přinesly nové poznatky o biochemii nervových přenosů, rodopsinu, nové elektrofyziologické vyšetřovací postupy, elektroretinografii, elektrookulografii, zrakové evokované potenciály či multifokální elektroretinografii. Výsledkem podrobných klinických zkoušek je náhrada sítnice implantátem, který v současné době umožňuje základní orientační vidění. Jinou cestou je nahrazení chybějící pigmentové vrstvy sítnice tkáňovými buňkami či implantací vlastních pigmentových buněk. Do klinické praxe byly zavedeny i nové vyšetřovací postupy, jako je trojrozměrná (3D) analýza zrakového nervu, polarografické měření tloušťky nervových vláken v sítnici, laserové zobrazení topografie sítnice, které se kvalitou blíží histologickému vyšetření (OCT), zobrazení cév v sítnici fluorescenční angiografií nebo cév v cévnatce pomocí indokyaninové zeleně. Na základě nových poznatků byl zkonstruován i sítnicový implantát, který dokáže stimulací nervových vláken částečně nahradit nefunkční sítnici. Monografie „Fyziologie oka a vidění“ je určena zájemcům o novinky v této oblasti.





# **I Anatomie a biochemie zrakového ústrojí**

Periferní část zrakového ústrojí je tvořena párem očí. Je to složitý orgán, který umožňuje vnímání světla a barev, zprostředkovává vnímání největšího množství informací o okolním prostředí a usnadňuje orientaci v prostoru. Zrakový orgán je umístěn v očnici a je tvořen **oční koulí (bulbus oculi)** a **přídavnými očními orgány (organa oculi accessoria)**.

# 1 Oční koule

Oční bulbus (bulbus oculi) má přibližně kulovitý tvar o průměru asi 23 mm (vertikální a příčný rozměr) x 24–26 mm (předozadní průměr). Je tvořen dvěma segmenty koule o různém poloměru křivosti. Menší – přední – oddíl (rohovka) má poloměr zakřivení 7–8 mm, zadní část (bělma) má poloměr zakřivení 11–12 mm. V oční štěrbině mezi otevřenými víčky je viditelný pouze menší, přední úsek oční koule, zatímco větší, zadní část je uložena v hloubi očnice.

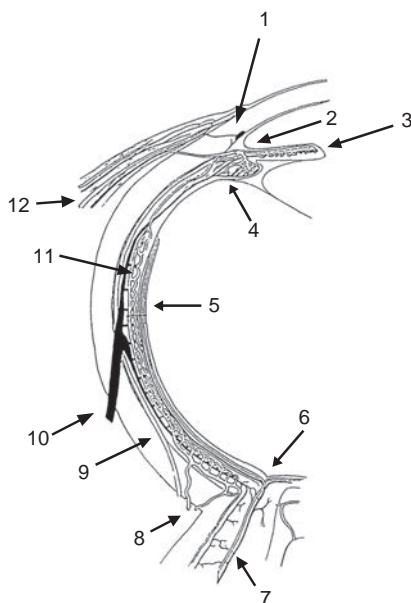
Na oční kouli rozlišujeme přední pól (**polus anterior**), který odpovídá vrcholu rohovky, a zadní pól (**polus posterior**). Mediálně od zadního pólu vystupuje z oční koule zrakový nerv (**nervus opticus**). Oba póly spojuje oční osa (**axis bulbi externus**). Tato geometrická osa oka není totožná se zornou osou oka (**linea visus**). Jednotlivé spojnice obou pólů na povrchu oční koule označujeme jako oční poledníky (**meridiani**). Největším obvodem oční koule orientovaným ve frontální rovině je rovník (**equator**). Pomocí ekvátoru je oční koule rozdělena na přední a zadní polovinu. Meridiány a ekvátorem se přesně lokalizují jednotlivé útvary na oční kouli.

Oční koule (bulbus oculi) je tvořena stěnou oční koule a obsahem oční koule.

## 1.1 Stěna oční koule

Stěna oční koule se skládá ze tří vrstev:

- zevní vazivové vrstvy (**tunica fibrosa bulbi**), která je tvořena bělmostí (**sclera**) a rohovkou (**cornea**),
- prostřední vrstvy (**tunica vasculosa bulbi**), již nazýváme žilnatka (uvea) a kterou tvoří v zadní části cévnatka (**chorioidea**), směrem dopředu řasnaté těleso (**corpus ciliare**) a duhovka (**iris**),
- vnitřní vrstvy (**tunica interna s. sensoria bulbi**), již tvoří sítnice (**retina**) – obr. 1.



**Obr. 1** Anatomie a cévní zásobení oka:  
 1 – rohovka, 2 – komorový úhel, 3 – duhovka,  
 4 – řasnaté těleso, 5 – sítnice, 6 – terč zrakového  
 nervu, 7 – arteria et vena centralis retinae,  
 8 – krátké ciliární arterie, 9 – dlouhá ciliární  
 arterie, 10 – vena vorticiosa, 11 – cévnatka,  
 12 – okohybný sval a přední ciliární arterie

### 1.1.1 Zevní vazivová vrstva

Zevní vazivová vrstva (**tunica fibrosa bulbi**) tvoří tuhý a pevný obal oční koule. Zajišťuje stabilitu jejího tvaru a je místem úponů šlach okoohybných svalů. Její přední částí vstupují do oka světelné paprsky (součást optického prostředí oka). Tvoří ji bělima (**sclera**) a rohovka (**cornea**).

#### Bělima

Bělima (**sclera**) je pevná tuhá vazivová blána, která je tvořena převážně lamelózně uspořádanými svazky kolagenních a elastických fibril a zaujímá zadních 5/6 oční koule. Je ochranným obalem pro hlubší oddíly oční koule a představuje pevnou oporu pro připojující se šlachy okoohybných svalů. Tloušťka skléry kolísá mezi 0,3 a 1,5 mm, v zadní části je silnější, nejslabší je těsně pod úpony okoohybných svalů. Bělima je prakticky bezcévná, a má proto bílou barvu (odstín „bílé“ barvy se s věkem mění). Je tvořena ze 70 % z vody (u malých dětí je obsah vody větší), dále fibroblasty, kolagenními vlákny typu I; u malých dětí pak tvoří bělimu větší množství elastických vláken, proto je částečně průhledná a prosvítající cévnatka ji zabarvuje lehce do modra, v dospělosti je porcelánově bílá, ve stáří je vlivem ukládání pigmentu z opotřebení nažloutlá. Prostor mezi kolagenními vlákny je vyplněn proteoglykany. Její povrchová strana se obrací do episklerálního prostoru (**spatium episclerale**), který je vyplněn řídkým vazivem. Tento prostor odděluje oční kouli od jejího vazivového obalu a nazýváme ho Tenonova fascie či Tenonovo pouzdro (**vagina bulbi**). Dutinová strana bělimy směřuje proti prostřední vrstvě (**tunica vasculosa bulbi**), od které ji odděluje vrstvička řídkého vaziva (**spatium perichoroideale**). Přední úsek skléry je kryt spojivkou (**tunica conjunctiva bulbi**).

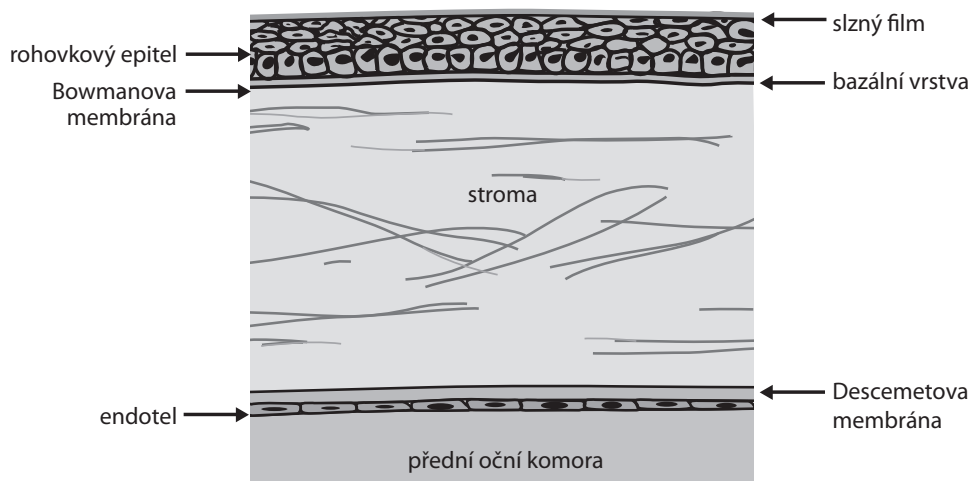
Na přední straně skléry je velký otvor (o průměru asi 12 mm), do jehož okraje (**limbus sclerae**) je jako hodinové sklíčko do svého kovového orámování vsazen lehce zkosený okraj rohovky (**limbus corneae**). Uvnitř skléry probíhá podél okraje otvoru pro rohovku prstencovitý žilní splav (**sinus venosus sclerae**). V zadním úseku skléry mediálně od zadního pólu je dírkovaná ploténka (**lamina cribrosa sclerae**), kterou z oka vystupují vlákna zrakového nervu a vstupují centrální sítnicová arterie a vena (arteria et vena centralis retinae). Kolem ní jsou četné drobné otvůrky pro prostup cév a nervů (nervi ciliares longi et breves, vasa ciliaria). Podél ekvátoru jsou otvory pro prostup venae vorticosae. V přední části skléry v místě úponů šlach přímých svalů jsou drobné otvory pro arteriae ciliae anteriores.

**Hojení skléry:** Je velice rychlé, již 2. den pozorujeme fibrovaskulární tkáň, která vrůstá do rány, od 7. dne pak poranění nelze detekovat.

#### Rohovka

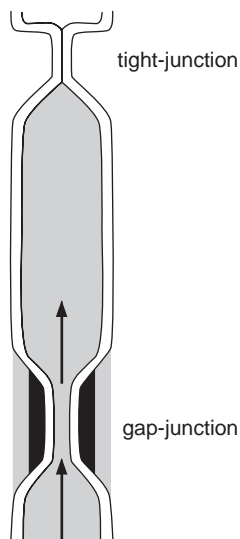
Rohovka (**cornea**) překlenuje a uzavírá kruhový otvor o průměru asi 12 mm v předním okraji skléry. Má tvar segmentu koule, který se vyklenuje konvexitou dopředu. Její klínovitě přihrocený okraj (**limbus corneae**) se připojuje k bělimě. Přední (konvexní) strana (**facies anterior**) vybíhá ve vrchol rohovky (**vertex corneae**). Zadní (konkávní) plocha rohovky (**facies posterior**) se obrací do přední komory oční. Rohovka zaujímá přední 1/6 oční koule.

Zevní plochu rohovky kryje vrstvička vrstevnatého dlaždicového epitelu (**epithelium anterius corneae**), který je pokračováním epitelu spojivky. V epitelu končí množství volných nervových zakončení, proto je povrch rohovky velmi citlivý na dotyk. V epitelu



**Obr. 2** Anatomie rohovky

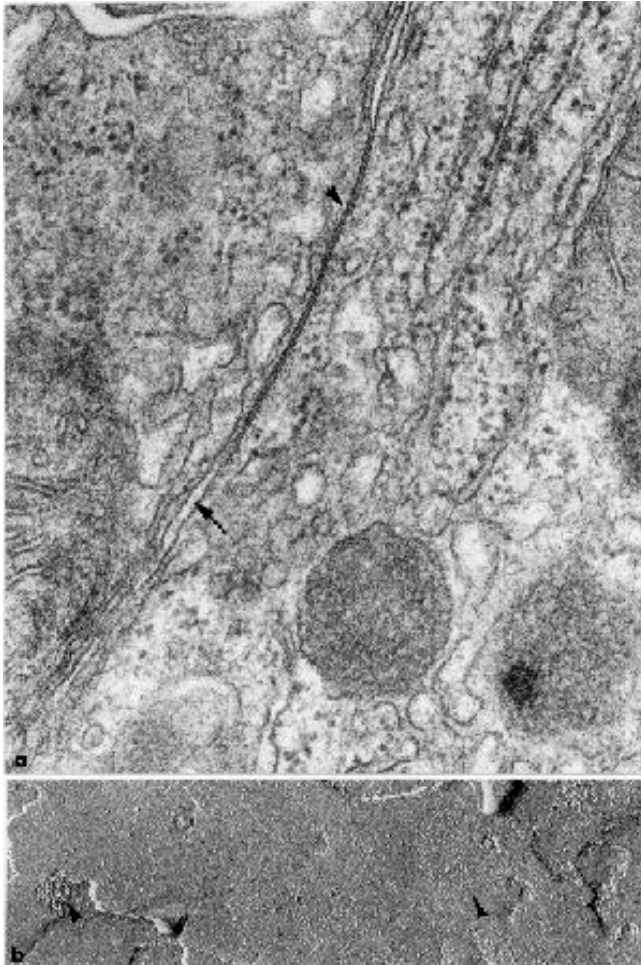
rozeznáváme bazální buňky, které mají kubický tvar a jsou schopny mitózy společně s kmenovými buňkami rohovkového limbu (obr. 2). Tyto buňky obsahují četné intracelulární orgány, mitochondrie, vlákna, tubuly a granule glykogenu. Bazální buňky vznikají z kmenových buněk rohovkového limbu a liší se od nich přítomností keratinu K12 a K3. Směrem k povrchu se buňky oplošťují, mají četné výběžky – křídlaté buňky – a vykazují pevná mezibuněčná spojení, tzv. junkční komplexy (obr. 3, 4). Nazýváme je zonula occludens nebo desmozomy a jedná se o spojení lipidové vrstvy sousedních membrán (obr. 5). Tímto způsobem povrchové buňky vytvářejí efektivní semipermeabilní membránu. Jejich přítomnost je nezbytná pro udržení jak mechanických, tak i optických vlastností rohovky. Povrchový rohovkový epitel je tvořen 4–6 vrstvami buněk. Bazální



**Obr. 3** Schematické znázornění membránových komplexů



**Obr. 4** TEM membránové desmozomy, junkční komplexy



**Obr. 5** TEM membránové junkční komplexy

buňky naléhající na Bowmanovu membránu jsou přibližně 18  $\mu\text{m}$  vysoké a 10  $\mu\text{m}$  široké. Směrem k povrchu se mění na 2–3 vrstvy křídlatých buněk, které jsou plošší a mají mnohočetné výběžky. Na povrchu pak leží ploché buňky, které jsou 4  $\mu\text{m}$  vysoké a jejichž průměr je asi 45  $\mu\text{m}$ . Obsahují velmi malý počet organel a chomáčky chromatinu v jádru. Při vyšetření skenovací mikroskopií vidíme vrstvu polygonálních buněk, které můžeme rozdělit na tmavé a světlé (obr. 6 – viz barevná příloha). Světlé buňky jsou mladší, tmavé pak zralé, postupně odumírající. Celý buněčný povrch je pokrytý mikrořasami, které u tmavých buněk postupně mizejí. Rohovkový epitel se kompletně vymění za 7–10 dnů. Vzhledem k velké regenerační schopnosti epitelu je zaručeno velmi dobré hojení drobných poranění rohovky, nesmí však být poškozena **Bowmanova membrána**, pak se poranění hojí jizvou, která snižuje průhlednost rohovky. Bazální buňky leží na Bowmanově bazální membráně silně 0,05  $\mu\text{m}$  a jsou s ní pevně spojeny hemidesmosomy, což jsou speciální membránové proteinové komplexy plazmatické membrány bazálních buněk. Jsou tvořeny keratinovými vlákny, která vytvářejí spojení s Bowmanovou membránou a sahají až do stromatu bazálních buněk. Je-li tato adherence poškozena, například fotorefrakterní keratektomií, vzniká recidivující eroze rohovky nebo nehojící se defekt epitelu. Bazální membrána je tvořena kolagenními vlákny typu IV, lamininem, proteoglykany, fibronectinem a fibrinem. V periférii epitelu se nachází Langerhansovy buňky, což jsou aktivní makrofágy, které v případě imunologické stimulace (například při rejekci štěpu po transplantaci rohovky) nacházíme i v jiných částech rohovky. Bazální, křídlaté a povrchové buňky jsou vzájemně spojeny desmosomy. V bazální vrstvě navíc můžeme pozorovat gap-junction, což jsou mikroskopické kanálky spojující buněčné membrány. Z uvedeného lze odvodit, že epitel rohovky tvoří funkční síťovinu, která je důležitá při koordinaci metabolismu rohovky, buněčné diferenciaci a migraci. Základní vrstvou rohovky je stroma (**substantia propria corneae**), které je tvořeno lamelózními vrstvami kolagenních fibril uspořádaných většinou paralelně s povrchem rohovky. Kolagenní vlákna jsou 2  $\mu\text{m}$  silná a 9–260  $\mu\text{m}$  dlouhá. Jsou rozprostřena od limbu přes celou rohovku, na limbu se stáčejí a tvoří prstenec široký 1,5–2,0 mm. Tento anulus udržuje zakřivení rohovky. Vlákna jsou tvořena především kolegenem typu I, méně V a VI. Mezi vlákny se nachází základní hmota stromatu, složená z proteoglykanů. Tato substance je tvořena fibroblasty (keratocyty), které jsou rozptýleny ve stromatu a tvoří asi 10 % jeho objemu. Stromální keratocyty za normálního stavu tvoří síť, ale v případě poškození rohovky ztrácí vzájemný kontakt a mění se ve fibroblasty (obr. 7 – viz barevná příloha). Na povrchu je stroma zahuštěno v amorfní Bowmanovu membránu o tloušťce 8–14  $\mu\text{m}$ . Vnitřní plochu rohovky kryje vrstva plochých, většinou hexagonálních buněk (**endothelium corneae**), které vystylají celou přední komoru oční. Endotel je od stromatu oddělen bazální membránou (**Descemetova membrána**), která má při narození tloušťku asi 3  $\mu\text{m}$  a postupně s věkem zesiluje až na 10–15  $\mu\text{m}$ . Descemetova membrána je tvořena endotelem. Má podobné složení jako Bowmanova membrána (kolagenní vlákna typu IV, laminin, fibronectin). V roce 2013 Dua se spolupracovníky definoval novou vrstvu v rohovce, oddělující rohovkové stroma od Descemetovy membrány. Šíře této vrstvy je 15  $\mu\text{m}$ , je acelulární, odděluje poslední vrstvu keratocytů od Descemetovy membrány. Endotel vytváří pravidelnou mozaiku, je 20  $\mu\text{m}$  široký a 5  $\mu\text{m}$  vysoký. Membrány endotelových buněk jsou spojené junkčními komplexy, které vytvářejí 2 nm široké kanálky gap-junction. Po narození se na  $\text{mm}^2$  nachází 3500–5500 endotelových buněk a jejich počet se snižuje průměrně o 0,5 % za rok. Poklesne-li jejich počet pod 700 buněk/ $\text{mm}^2$ , nestačí zbývající buňky odstraňovat vodu ze stromatu

a vyvíjí se edém rohovky a epitelu. Endotel obsahuje velké buněčné jádro, které vyplňuje většinu prostoru, dále mitochondrie, endoplazmatické retikulum a Golgiho komplex. Endotelie jsou spojeny gap-junction a tight-junction komplexy. Endotel vykazuje nízkou mitotickou aktivitu, proto při jeho poškození je toto místo překryto zvětšením okolních buněk. Tento poznatek má velký význam v hojení rohovky například u úrazů nebo po nitroočních operacích. Tloušťka rohovky kolísá kolem 1 mm, je silnější na okrajích než v oblasti vrcholu, kde měří zhruba 0,5 mm. Uspořádání jednotlivých vrstev rohovky zajišťuje její průhlednost neboli prostupnost pro světelné paprsky. Rohovka tak představuje vstupní oddíl tzv. **optického prostředí oka** a z hlediska indexu lomivosti světla je jeho nejvýznamnější součástí. Na celkové optické mohutnosti zdravého oka (+60 D) se rohovka podílí asi +40 D. Tato hodnota je konstantní po celou dobu života. Působením stresových faktorů se výrazně mění pravidelné uspořádání a nastává změna velikosti (polymegatismus) a tvaru endotelu (pleomorfismus).

Rohovka je bohatě inervována senzoryckými nervy vycházejícími z trojklaného nervu cestou nervus ophthalmicus. Nervy vstupují do rohovky v prostřední třetině stromatu, dále se šíří dopředu a centrálně v radiálním uspořádání. Pod Bowmanovou membránou tvoří subepiteliální plexus, pak nervy perforují Bowmanovu membránu a tvoří subbazální epiteliální plexus a končí v povrchových vrstvách epitelu. Rohovka je nejcitlivější tkáň. Kromě senzitivní funkce mají rohovkové nervy i funkci trofickou. Například u nemocných s diabetem a diabetickou neuropatií se mohou objevit eroze a ulcerace rohovky (neurotrofický vřed). Rohovkovou citlivost snižují některé zákroky, například LASIK, nebo nošení kontaktních čoček.

### **Biochemie rohovky**

Rohovka obsahuje 78 % vody a 22 % organického materiálu. Složení uvádí tabulka 1.

**Tab. 1** Biochemické složení rohovky

	%
<b>voda</b>	78
<b>kolagen</b>	15
<b>jiné bílkoviny</b>	5
<b>keratansulfát</b>	0,7
<b>chondroitinsulfát</b>	0,3
<b>solí (NaCl, KCl)</b>	1

Z tabulky je patrný vysoký obsah vody v rohovce. Další důležitou stavební součástí je kolagen. Kolagen v rohovce náleží převážně k typu I, méně k typu V a nejméně k typu III. Kolagenní vlákna jsou v rohovce pravidelně uspořádána a navzájem spojena molekulami keratansulfátu.

### **Hydratace a transparence rohovky**

Z okolního prostředí – tedy ze slzného filmu, komorové vody a limbu – proniká difuzí do rohovkového stromatu voda. Endotelové buňky svým uspořádáním a aktivním transportem  $\text{Na}^+$  iontů udržují rohovku v relativně dehydratovaném stavu. Tento mechanismus nazýváme endotelovou pumpou. Její činnost je závislá na  $\text{Na}^+/\text{K}^+$ -adenosin-



trifosfatáze. Její činnost negativně ovlivňují kardiotonika, a to blokádu výše uvedeného enzymu. Inhibitor karboanhydrázy – acetazolamid – snižuje účinnost endotelové pumpy o 30 % blokádu tvorby  $\text{HCO}_3^-$  iontů.

### **Permeabilita (propustnost) rohovky**

Permeabilita rohovky je důležitá pro klinickou praxi, protože významně ovlivňuje koncentraci léků jak v rohovce, tak i v přední komoře oční. Léčivá látka v kapkách nebo v masti musí projít rohovkou, spojivkou a sklérou na místo účinku, přičemž se její koncentrace snižuje nitroočním mokem, odtokem do cévního systému a ztrátou způsobenou slzením. Epitelové buňky jsou na povrchu kryté membránou lipoproteinů, přes kterou nejsnáze prochází látky lipidového charakteru. Navíc jsou epiteliální buňky navzájem spojeny pevnými intercelulárními membránovými komplexy, které nazýváme junkční komplexy (obr. 3). Morfologicky rozeznáváme zonulae occludentes nebo splývání intercelulárních membrán v tzv. tight-junction.

### **Farmakologie rohovky**

Prostupnost rohovky pro léky je ovlivněna mnoha faktory. Za fyziologických stavů je rohovkový epitel omýván slzným filmem, jehož se tvoří 7–9  $\mu\text{l}$  a v slzném váčku se ho nachází 20–30  $\mu\text{l}$ . Tedy asi 50  $\mu\text{l}$  kapek odtéká slznými kanálky po instilaci. V případě použití dráždivých kapek (hypertonické nebo neizoacidní), které vyvolávají zvýšené slzení, jsou tyto roztoky rychle naředěny.

Nejlépe pronikají do rohovkového epitelu hydrofobní léky, zatímco ionty a látky nerozpustné v lipidech pronikají hůře. Stroma a endotel rohovky naopak vytvářejí vysoce permeabilní membránu propustnou pro iontové látky. Jsou-li látky podané na rohovku organické povahy nebo se jedná o kyseliny, jejich průnik rohovkou přímo závisí na pH (kyseliny pronikají rohovkou lépe) a nepřímo na stupni disociace, protože látky nedisociované, například atropin, procházejí přes epitel lépe než látky disociované. Endotel je asi 100krát propustnější pro  $\text{Na}^+$  ionty a velice dobře jím také pronikají metabolicky důležité látky, například glukóza a aminokyseliny. Tato vlastnost je označována jako usnadněný transport. Menší molekuly prostupují endotelem snáze. Pro zlepšení průniku a zvýšení účinku očních léků se do kapek přidávají viskózní látky, masti nebo je možné použít nasycených kontaktních čoček či nosičů léků z kolagenu.

### **Transparence rohovky**

Transparencí rozumíme schopnost materiálu přenášet světlo. Použijeme-li například barevný filtr do brýlí, nastává redukce světla asi o 10 %, mléčné sklo způsobí odraz a rozptyl světla, takže není vidět žádný obraz. Rozptyl světla je tedy velice důležitá vlastnost, pokud chceme popsat optické vlastnosti rohovky. Zdravá rohovka rozptyluje pouze 1 % procházejícího světla. Pro vysvětlení optických vlastností rohovky existuje „mřížková teorie“. Tato teorie říká, že rovnoběžné uspořádání kolagenních vláken v rohovce a jejich jednotná velikost způsobují, že procházející paprsky nejsou rozptylovány; na rozdíl od bělimy, kde je kolagen uspořádán chaoticky. Tuto teorii Maurice z roku 1957 potvrdila celá řada autorů, například Smith (1969) nebo Twersky (1976). Při otoku stromatu rohovky nastává nehomogenní rozložení kolagenních vláken, což má za následek ztrátu průhlednosti rohovky.

### **Metabolismus rohovky**

Při otevřených víčkách rohovka dýchá atmosférický kyslík, který je rozpuštěn v slzném filmu, při zavřených víčkách a ve spánku rohovka využívá kyslík z krevního hemoglobinu prostřednictvím limbální cévní pleteně a menší množství i z komorové tekutiny. energii rohovka získává především metabolizmem glukózy z nitroočního moku. 85 % glukózy je anaerobní glykolýzou přeměněno na laktát a pouze 15 % je přeměněno v Krebsově cyklu na vodu a oxid uhličitý. Metabolismus rohovky klesá vlivem stárnutí. Významný je i vzestup anaerobních enzymů v závislosti na autolýze, například při získávání vhodných rohovkových štěpů při transplantaci rohovky.

### **Regenerace rohovky při poranění**

Nejčastěji bývá poraněn epitel rohovky. Za normálních okolností při ztrátě epitelu z rohovky nastává rychlá obnova během 24 hodin. Při poranění rohovky pozorujeme za několik minut zvýšení mitotické aktivity epitelii a defekt je překryt jednak novými buňkami a dále zvětšením a posunem okolních buněk. Tento buněčný pohyb je rychlý (dosahuje 60–80  $\mu\text{m}/\text{h}$ ) a je způsoben kontraktilními intracelulárními bílkovinami aktinem a vinkulinem, které byly nalezeny blízko buněčné membrány. V hojení zaujímají zvláštní místo kmenové buňky, což jsou pluripotentní buňky nacházející se v limbu rohovky, které slouží jako rezerva nových buněk při rozsáhlém poškození epitelu. Je-li eroze rozsáhlá, hojení může trvat i několik dnů. Během následujících několika týdnů se vytváří mnohvrstevný epitel. Harris (1985) hojivý proces dělí na několik fází: diferenciaci (24–72 hodin), reorganizaci (72 hodin až 1 týden) a diferenciaci (1–6 týdnů). Malé rány jsou zahojeny přesunem epitelu z okolní oblasti. Pro hojení je velice důležité, zda byla poraněna i bazální membrána. Nejhorší je postižení při poleptání a popálení rohovky. Regenerace bazální membrány začíná za jeden týden po poranění, nacházíme zde segmenty bazální membrány spojené hemidesmosomy s Bowmanovou membránou. Pro kompletní regeneraci epitelové bazální membrány je třeba až 6 týdnů. V regeneraci epitelu zaujímají zvláštní místo bílkoviny fibronectin a laminin. Jedná se o membránové glykoproteiny, které jsou při regeneraci epitelu uvolňovány z epitelu a urychlují hojivé procesy. Další důležitou bílkovinou urychlující hojení je růstový faktor (eye-derived growth factor), který urychluje syntézu fibronektinu.

### **Regenerace endotelu**

Při poranění je endotel rychle nahrazen posunem a zvětšením okolních buněk. Experimentálně byla zjištěna mitóza v buňkách po stimulaci endotelu růstovým faktorem fibroblastů (fibroblast growth factor). V případě rozsáhlejšího poranění nastává infiltrace endotelu a stromatu polymorfonukleárními leukocyty, posléze se transformují endotelové buňky ve fibroblasty za tvorby vazivové tkáně. Na zánětlivé a regenerační reakci rohovky se významně podílejí i prostaglandiny.

### **Regenerace stromatu**

Regenerace spočívá v produkci a zesíťování kolagenu, resyntéze proteoglykanů (keratinsulfát). Během hodin se v poraněném stromatu objeví neutrofilny, které jsou postupně nahrazeny monocyty. Keratocyty se mění ve fibroblasty produkující kolagen a proteoglykany.

### Neovaskularizace rohovky

Při metabolickém stresu, například po poranění, kdy nastává zánětlivá infiltrace rohovky leukocyty a fibroblasty, je metabolismus tkání neadekvátní. Výsledkem je vrůstání novotvořených cév z limbálního plexu. Experimentálně lze vznik rohovkové neovaskularizace způsobit například nedostatkem riboflavinu nebo esenciálních aminokyselin, jako jsou tryptofan, lyzin nebo methionin (obr. 8 – viz *barevná příloha*). V posledních letech se v léčbě neovaskularizací rohovky používají anti-VEGF preparáty.

Zakřivení rohovky není ve všech směrech stejné. Vertikální zakřivení je větší (vertikální průměr je 12 mm) než zakřivení horizontální (horizontální průměr je 11 mm). Také celkový tvar rohovky není zcela pravidelný. Zevní plocha má tvar oválu, kdežto vnitřní plocha má tvar kruhu. Důsledkem těchto nepravidelností je takzvaný **fyzio-  
logický rohovkový astigmatismus** do 0,5 dioptrie, který je vyrovnán opačným astigmatismem čočky. Přechod mezi sklérou a rohovkou není plynulý, protože oba segmenty oka mají jiný poloměr zakřivení. Mezi více dopředu vystupující rohovkou a bělímou je v místě sklerokorneálního přechodu mělký žlábek (**sulcus sclerae**). Tento prostor není při pohybech víček dostatečně očišťován a představuje tzv. **mrtvý prostor oka**, ze kterého se může šířit infekce na rohovku.

#### 1.1.2 Prostřední vrstva (tunica vasculosa – uvea)

Uvea (živnatka) leží pod povrchovou vrstvou a je poměrně tenká. Je tvořena převážně řídkým vazivem s hojnými pigmentovými buňkami. Obsahuje krevní cévy, ze kterých je zásobována převážná část oční koule. Vzhledem k obsahu pigmentu a mohutným cévám se uplatňuje také jako světelně a tepelně izolační vrstva. V některých jejích částech jsou nakupeny hladké svalové buňky, které se podílejí na regulaci množství vstupujícího světla a mění optickou mohutnost čočky (akomodace oka).

Tunica vasculosa se skládá ze tří oddílů: cévnatky (choroidea), řasnatého tělesa (corpus ciliare) a duhovky (iris).

#### Cévnatka

Cévnatka (**choroidea**) představuje nejrozsáhlejší část prostřední vrstvy stěny oční koule, protože zaujímá její zadní 2/3. Má podobu tenké (0,2–0,4 mm) černohnědé blány, která je bohatá na cévy. Povrchovou stranou se přikládá ke skléře. Je od ní oddělena vrstvičkou řídkého vaziva (**spatium perichoroideale**), ve které probíhají četné cévy. Dutinová strana cévnatky je hladká a naléhá na ni sítnice. Tato část cévnatky je bohatě pigmentovaná a pohlcuje světelné paprsky, zabraňuje jejich odrazům a přesvětlení oka. Je tvořena sítí kapilár. Cévnatka tak představuje tmavou komoru pro optickou vrstvu sítnice a navíc jsou z kapilární sítě vyživovány pigmentové buňky sítnice, čípky a tyčinky sítnice. Vzadu je v cévnatce otvor, kterým prostupují vlákna zrakového nervu, sítnicová tepna a žíla a který svou lokalizací odpovídá lamina cribrosa sclerae. Přední okraj cévnatky přechází plynule do řasnatého tělesa.

#### Řasnaté těleso

Řasnaté těleso (**corpus ciliare**) má tvar zřaseného prstence, který je přiložen na vnitřní stranu bělmy a v okolí sklerokorneálního rozhraní s ní srůstá. Na řezu má tvar trojúhelníku. Zadní okraj řasnatého tělesa se ztenčuje a plynule přechází do cévnatky (**pars plana**), směrem dopředu se řasnaté těleso ztlušťuje a spojuje se s duhovkou (**pars plicata**).