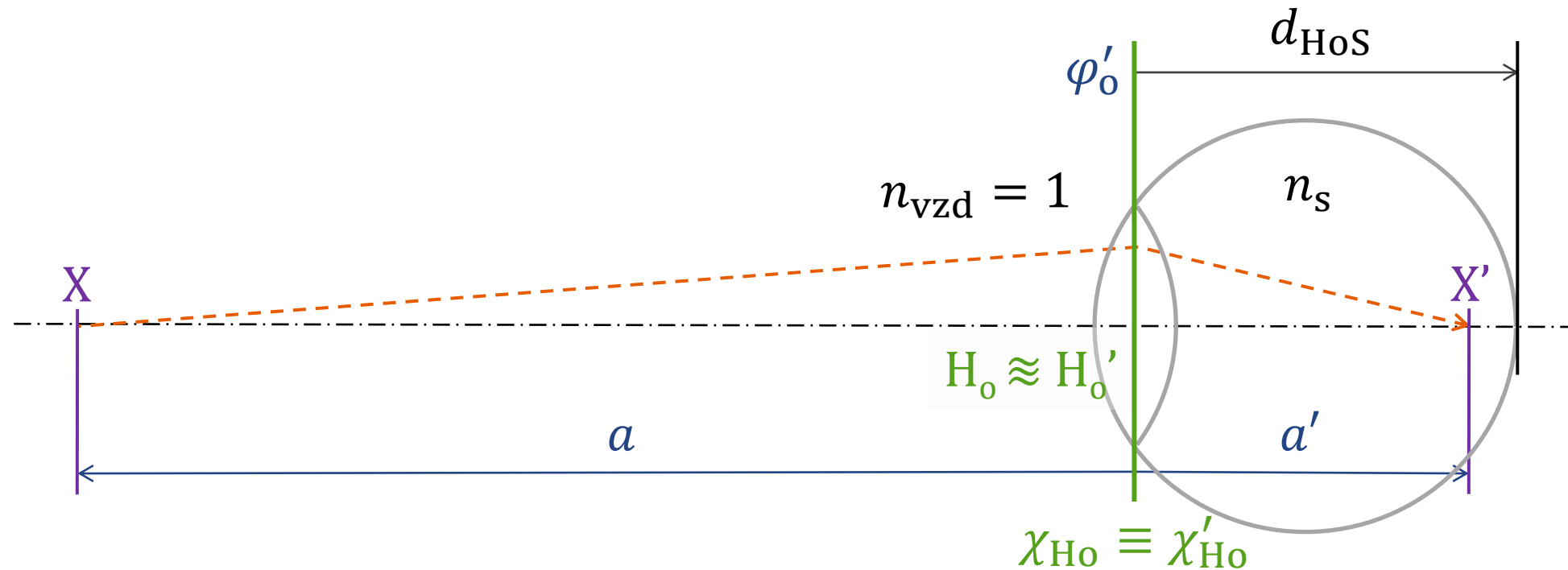


Ametropie

Zobrazení optickým systémem oka



Gaussova rovnice:

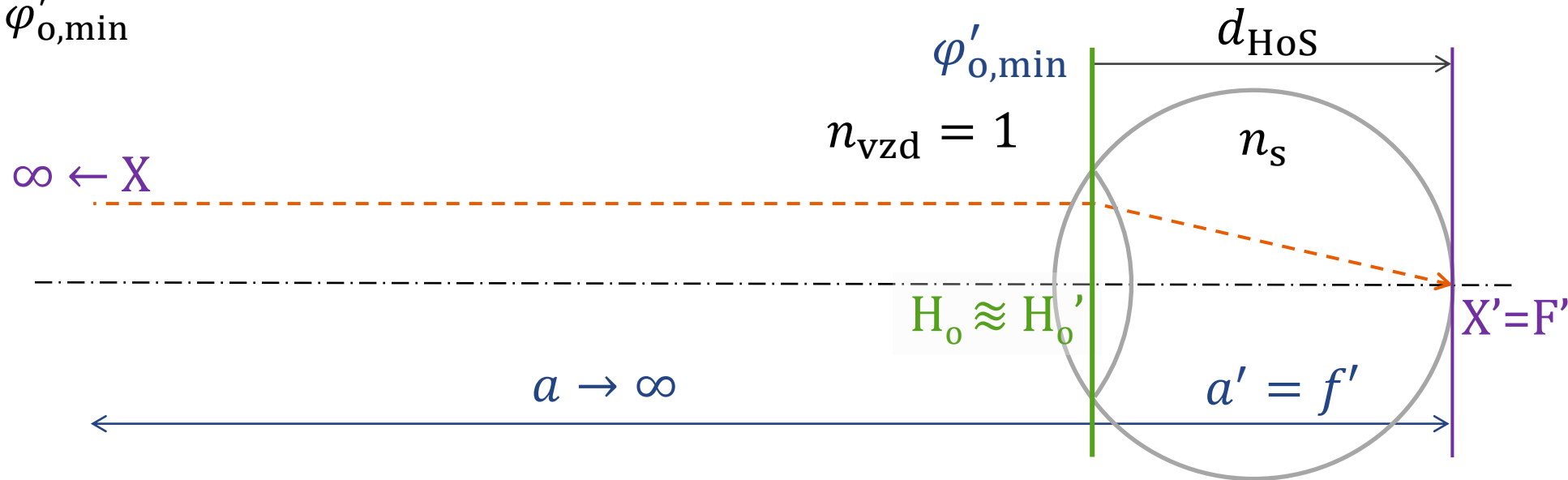
$$\frac{n_s}{a'} = A' = A + \varphi'_0 = \frac{1}{a} + \varphi'_0$$

d_{HoS} ... vzdálenost obrazové hlavní roviny od sítnice

Emetropické oko

Zobrazení bodu na optické ose v nekonečnu při *minimální akomodaci* (relaxované oko):

$$\varphi'_o = \varphi'_{o,\min}$$



Předmětový bod v nekonečnu se při minimální akomodaci zobrazí na sítnici oka, tedy **obrazové ohnisko leží na sítnici** a platí:

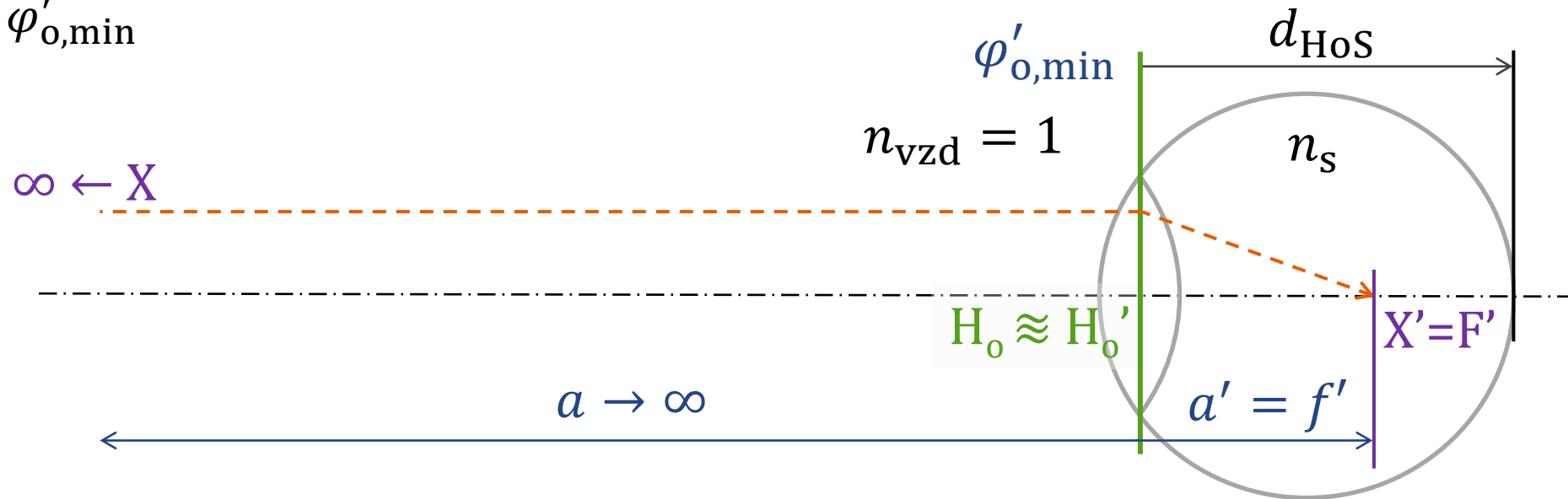
$$d_{\text{HoS}} = f' \Rightarrow \frac{n_s}{f'} = \varphi'_{o,\min} = \frac{n_s}{d_{\text{HoS}}} = D_{\text{HoS}}$$

D_{HoS} ... vergence svazku konvergujícího do bodu sítnice, v obrazové hlavní rovině („dioptrická délka“)

Ametropické oko

Zobrazení bodu na optické ose v nekonečnu při *minimální akomodaci* (relaxované oko):

$$\varphi'_o = \varphi'_{o,\min}$$



Předmětový bod v nekonečnu se při minimální akomodaci **nezobrazí** na sítnici oka, tedy **obrazové ohnisko neleží na sítnici** a platí:

$$d_{HoS} \neq f' \Rightarrow \frac{n_s}{f'} = \varphi'_{o,\min} \neq \frac{n_s}{d_{HoS}} = D_{HoS}$$

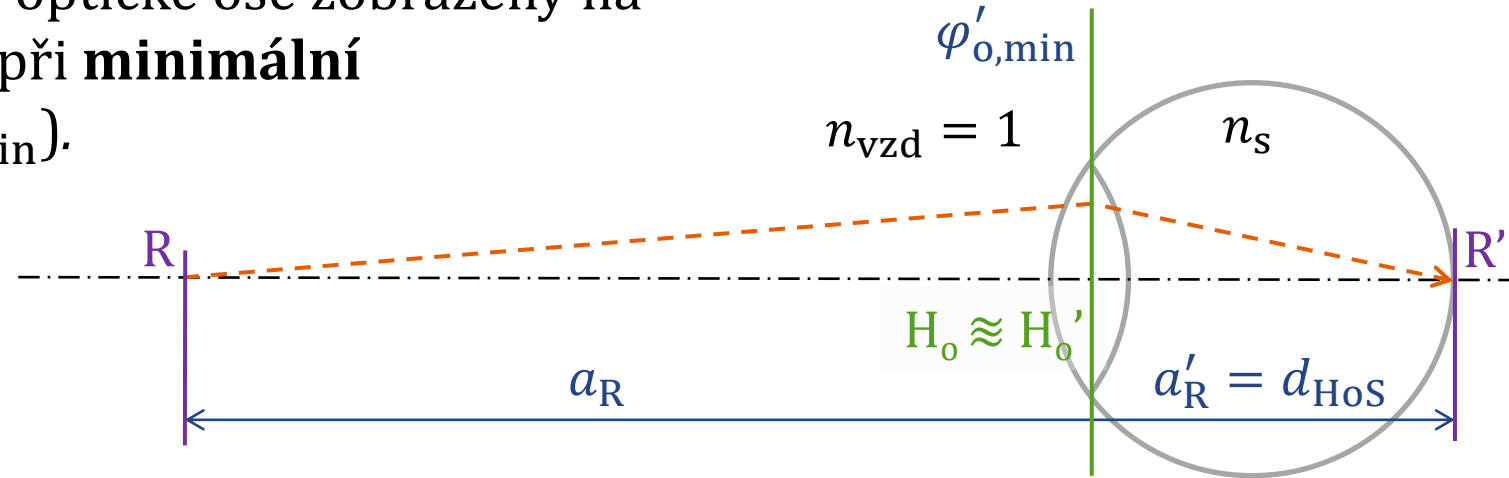
sférická ametropie ... optický systém oka má ve všech řezech (meridiánech) shodné optické vlastnosti (nejde o astigmatismus); lze ji korigovat sférickými korekčními členy

Příklad: Gullstrandovo oko

Vypočtete parametry D_{HoS} a d_{HoS} pro Gullstrandovo oko a zjistěte, zda je emetropické nebo ametropické.

Daleký bod oka (punctum remotum)

Daleký bod R je bod na optické ose zobrazený na sítnici oka ($a'_R = d_{\text{HoS}}$) při **minimální akomodaci** ($\varphi'_o = \varphi'_{o,\text{min}}$).



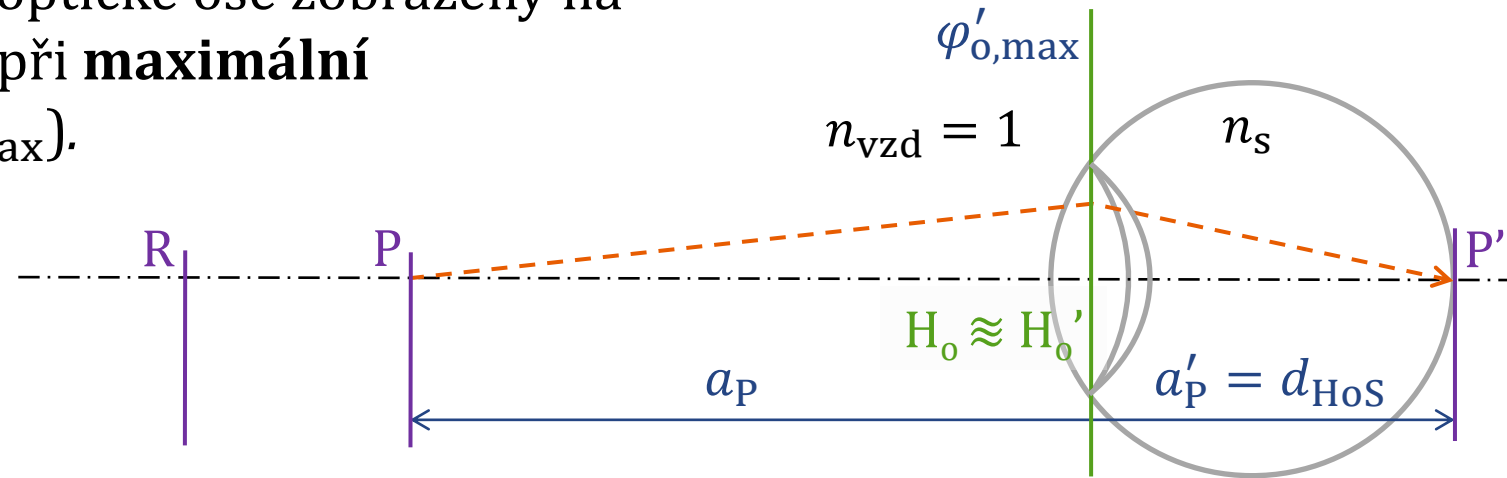
(podle Gaussovy rovnice):

$$\frac{n_s}{a'_R} = \frac{n_s}{d_{\text{HoS}}} = D_{\text{HoS}} = \frac{n_{\text{vzd}}}{a_R} + \varphi'_{o,\text{min}} = \frac{1}{a_R} + \varphi'_{o,\text{min}} = A_R + \varphi'_{o,\text{min}}$$

$A_R = 1/a_R$... *axiální refrakce* (též: *ametropie*, „dioptrická vzdálenost“ dalekého bodu),
... udává, co je nutno přičíst k $\varphi'_{o,\text{min}}$, aby se součet rovnal D_{HoS} (emetropický stav)

Blízký bod oka (punctum proximum)

Blízký bod P je bod na optické ose zobrazený na sítnici oka ($a'_P = d_{\text{HoS}}$) při **maximální akomodaci** ($\varphi'_0 = \varphi'_{0,\text{max}}$).



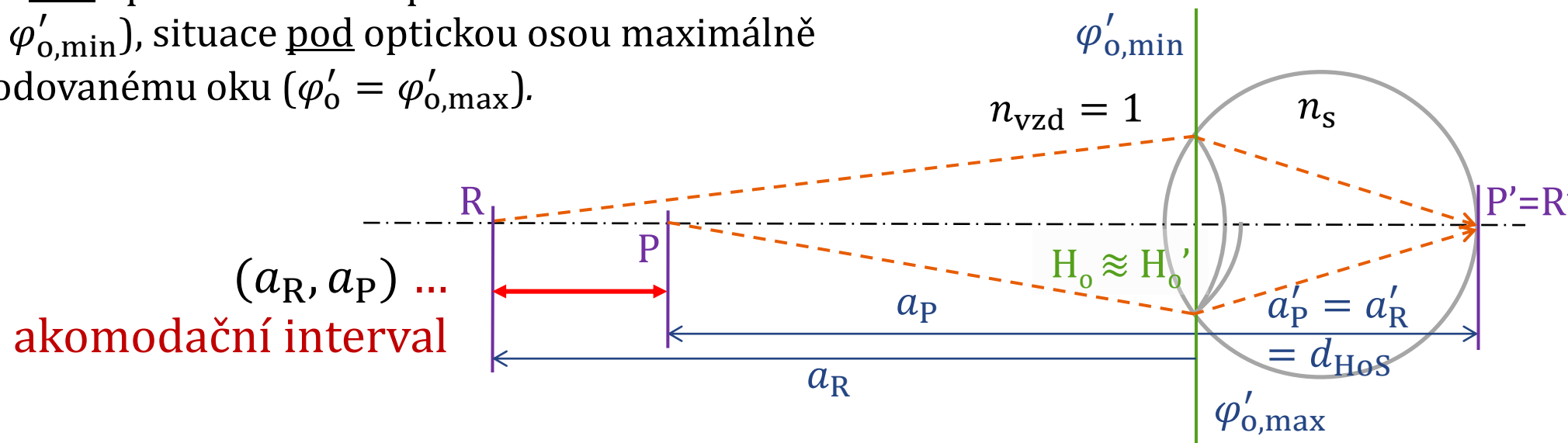
(podle Gaussovy rovnice):

$$\frac{n_s}{a'_P} = \frac{n_s}{d_{\text{HoS}}} = D_{\text{HoS}} = \frac{n_{\text{vzd}}}{a_p} + \varphi'_{0,\text{max}} = \frac{1}{a_p} + \varphi'_{0,\text{max}} = A_P + \varphi'_{0,\text{max}}$$

$A_P = 1/a_P$... „dioptrická vzdálenost“ blízkého bodu,vergence svazku vycházejícího z blízkého bodu P, v předmětové hlavní rovině

Akomodační interval a šíře

Situace nad optickou osou odpovídá relaxovanému oku ($\varphi'_o = \varphi'_{o,\min}$), situace pod optickou osou maximálně akomodovanému oku ($\varphi'_o = \varphi'_{o,\max}$).



$$A_{\check{s}} = A_R - A_P \approx (D_{\text{HoS}} - \varphi'_{o,\min}) - (D_{\text{HoS}} - \varphi'_{o,\max}) = \varphi'_{o,\max} - \varphi'_{o,\min} = A_{k,\max}$$

$A_{\check{s}}$... akomodační šíře (akomodační amplituda)

$A_{k,\max}$... maximální akomodace

Pozn.: $A_R \approx \varphi'_{o,\max} - \varphi'_{o,\min} + A_P \Rightarrow A_R \geq A_P$

Příklad: Gullstrandovo oko (pokračování)

Určete **axiální refrakci** a **polohu dalekého bodu** pro Gullstrandovo oko.

Dále určete parametry D_{HoS} a d_{HoS} pro maximálně akomodované Gullstrandovo oko, které má celkovou optickou mohutnost $\varphi'_{\text{o,max}} = 70,85$ D a vzdálenost obrazového hlavního bodu od rohovky $d_{\text{RH0}} = 2,01$ mm. Pak určete vergenci A_{P} a **polohu blízkého bodu**.

Nakonec vypočtete **maximální akomodaci**, **akomodační šíři** a stanovte **akomodační interval** Gullstrandova oka.

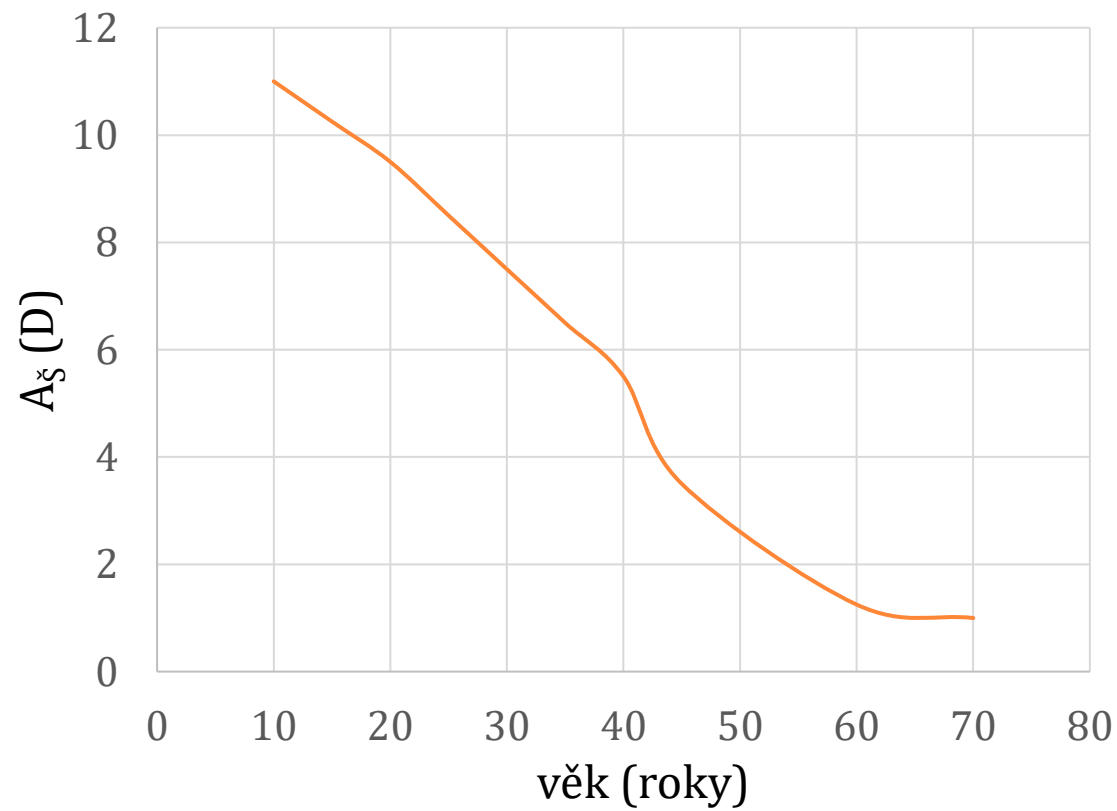
Akomodační šíře (amplituda) podle věku

$$A_{\zeta} = A_R - A_P \approx \varphi'_{o,\max} - \varphi'_{o,\min}$$

věk	A_{ζ}
10	11,00
15	10,25
20	9,50
25	8,50
30	7,50
35	6,5
40	5,50
45	3,5
60	1,25
70	1,00

věk	$A_{\zeta} < 5 \text{ D}$	
	Myop	Hyperop
38	0 %	17 %
40	23 %	67 %
42	57 %	70 %
44	75 %	92 %
45	82 %	100 %

akomodační šíře v závislosti na věku

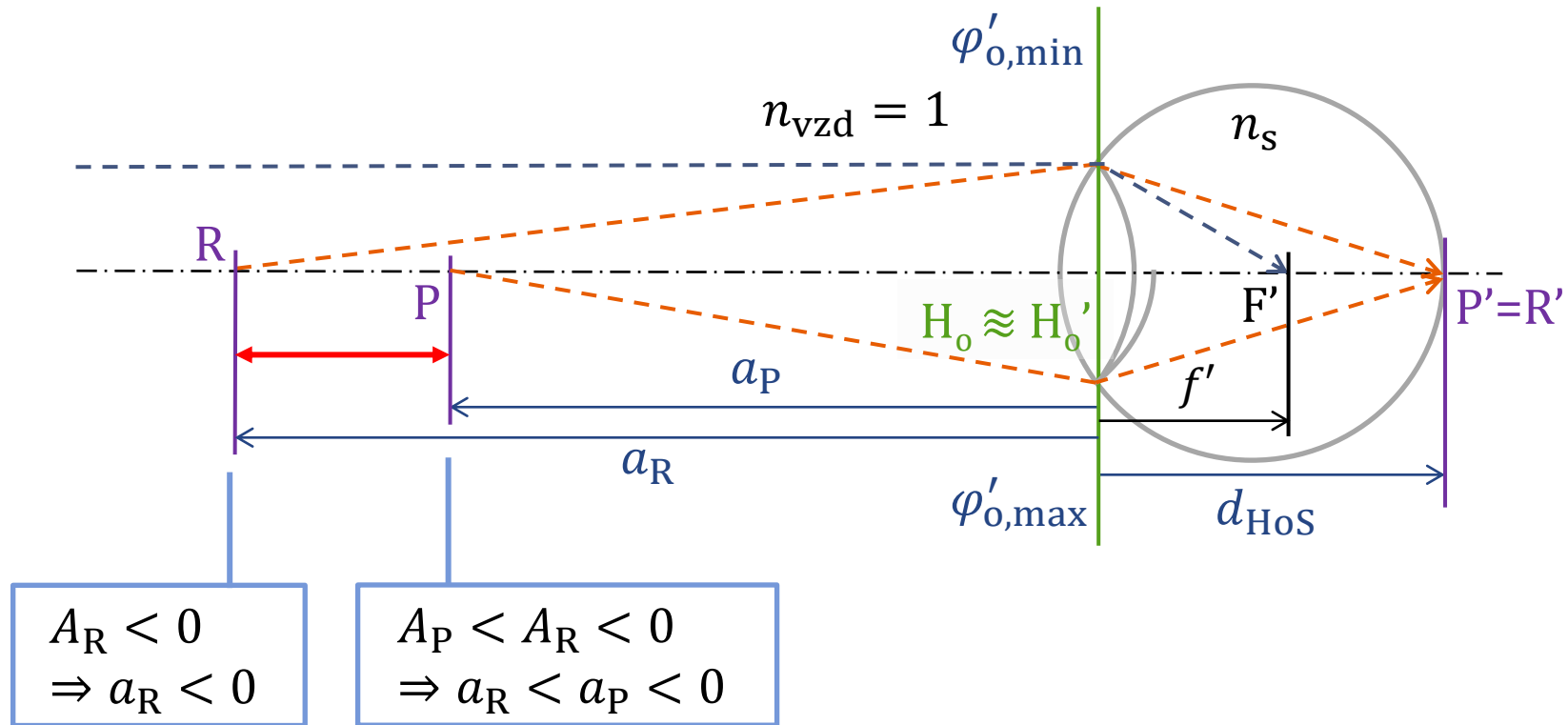


Myopie (krátkozrakost)

$$\varphi'_{o,\min} = \frac{n_s}{f'} > D_{\text{HoS}} = \frac{n_s}{d_{\text{HoS}}}$$

$$\Rightarrow A_R = D_{\text{HoS}} - \varphi'_{o,\min} < 0 \Rightarrow a_R < 0$$

$$\Rightarrow f' < d_{\text{HoS}}$$

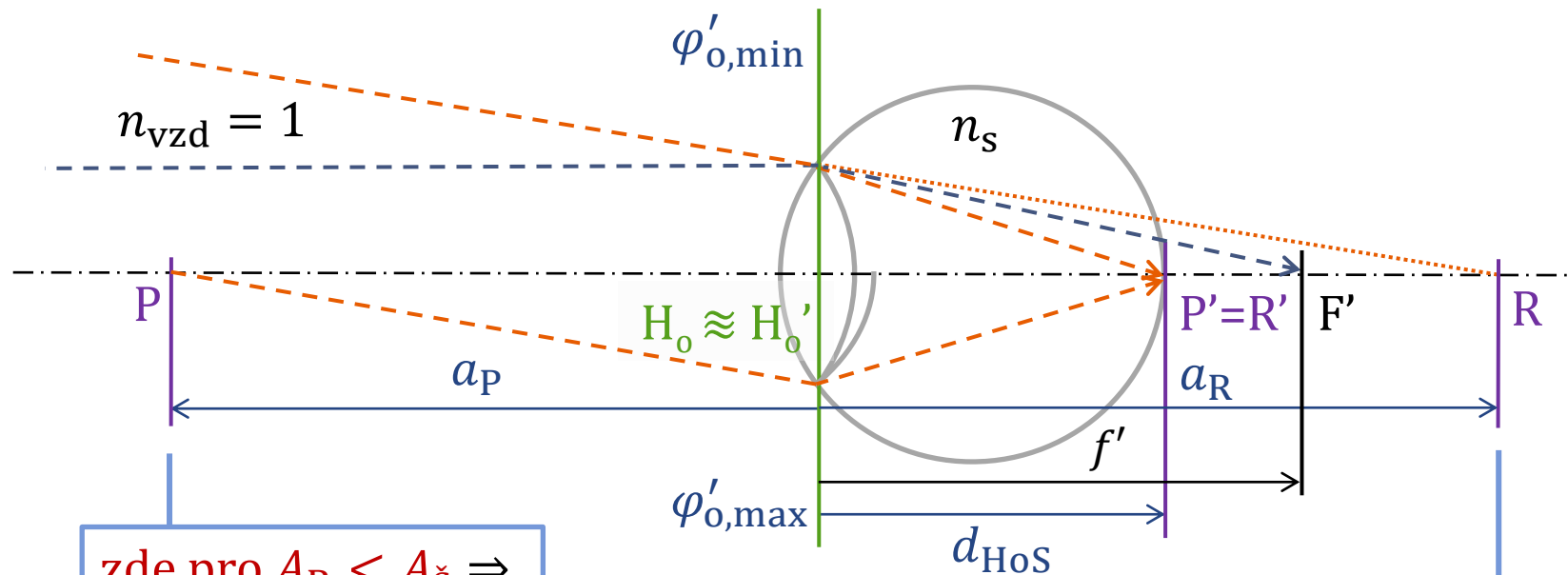


Hypermetropie (hyperopie, dalekozrakost) I

$$\varphi'_{o,\min} = \frac{n_s}{f'} < D_{\text{HoS}} = \frac{n_s}{d_{\text{HoS}}}$$

$$\Rightarrow A_R = D_{\text{HoS}} - \varphi'_{o,\min} > 0 \Rightarrow a_R > 0$$

$$\Rightarrow f' > d_{\text{HoS}}$$



$$\begin{aligned} \text{zde pro } A_R < A_\xi &\Rightarrow \\ A_P = A_R - A_\xi &< 0 \\ \Rightarrow a_P &< 0 \end{aligned}$$

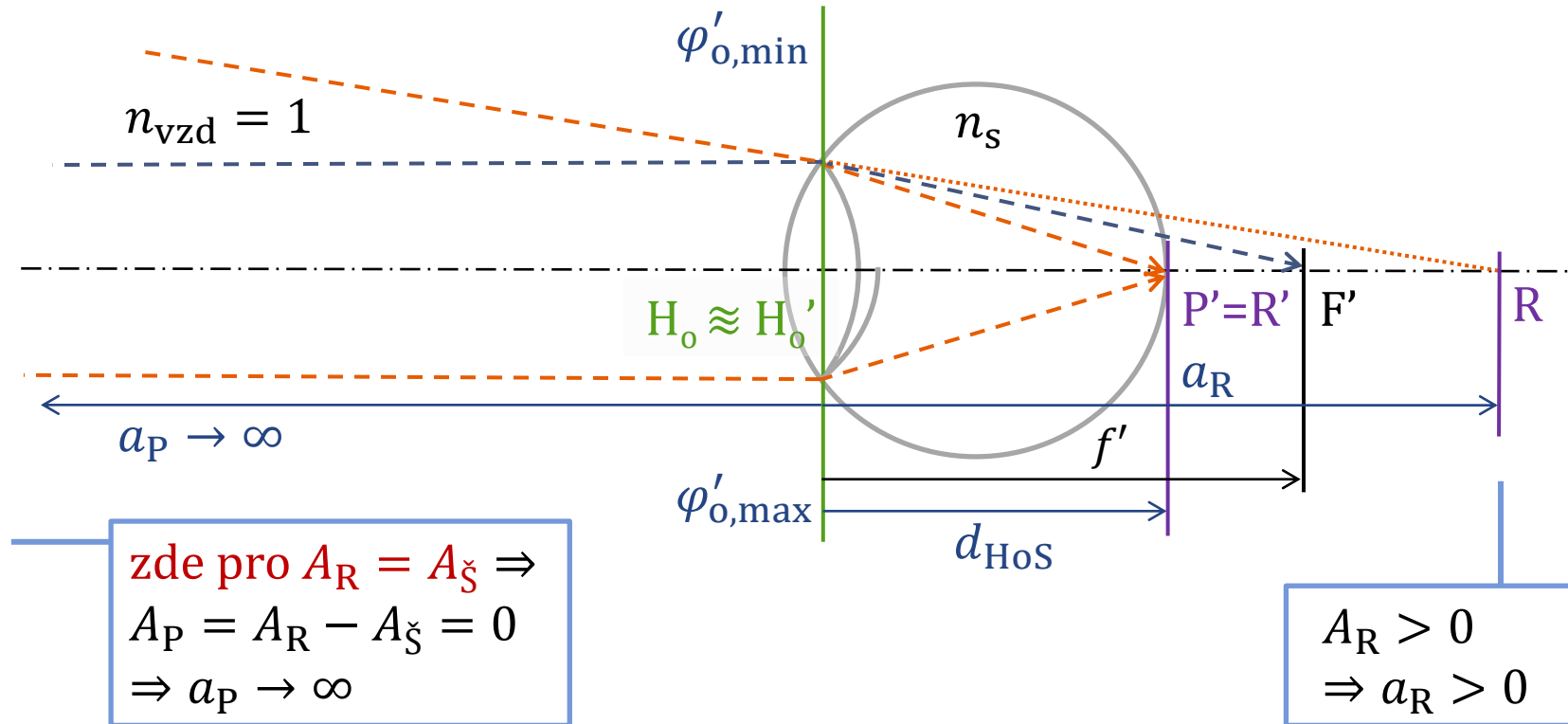
$$\begin{aligned} A_R &> 0 \\ \Rightarrow a_R &> 0 \end{aligned}$$

Hypermetropie (hyperopie, dalekozrakost) II

$$\varphi'_{o,\min} < D_{\text{HoS}}$$

$$\Rightarrow A_R > 0 \Rightarrow a_R > 0$$

$$\Rightarrow f' > d_{\text{HoS}}$$

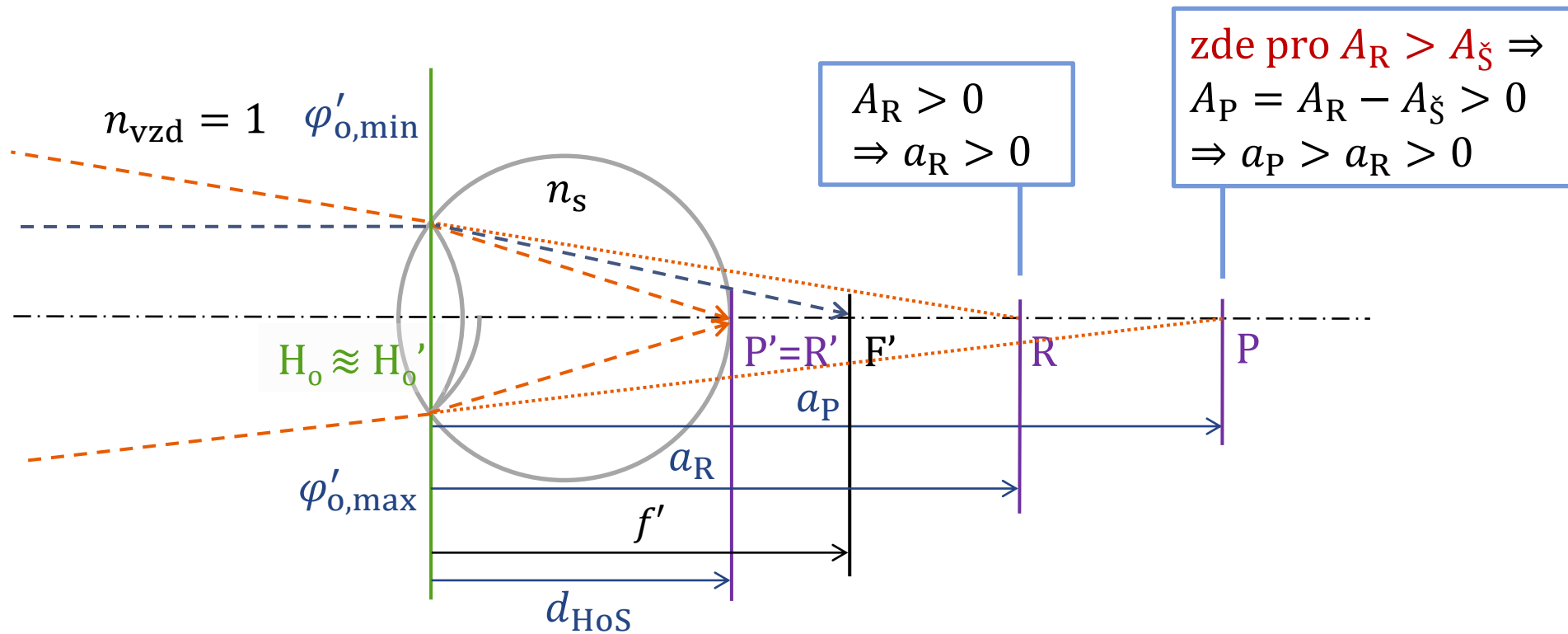


Hypermetropie (hyperopie, dalekozrakost) III

$$\varphi'_{o,\min} < D_{HoS}$$

$$\Rightarrow A_R > 0 \Rightarrow a_R > 0$$

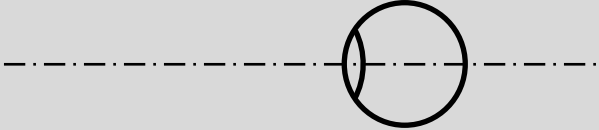
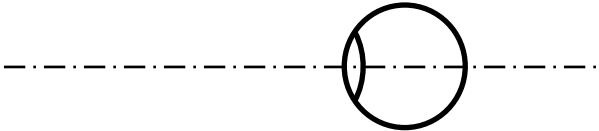
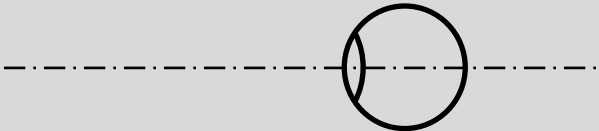
$$\Rightarrow f' > d_{HoS}$$



Příklad: Intervaly ostrého vidění

Vypočtete a graficky znázorněte intervaly ostrého vidění pro a) emetropa ($A_R = 0$), b) myopa s $A_R = -4$ D, a c) hypermetropa s $A_R = +4$ D, ve všech případech pro tři akomodační šíře: 2 D, 4 D a 6 D.

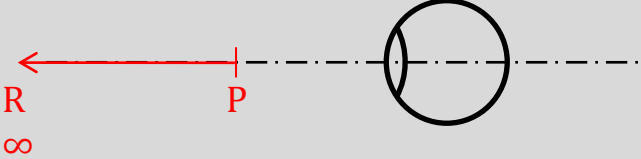
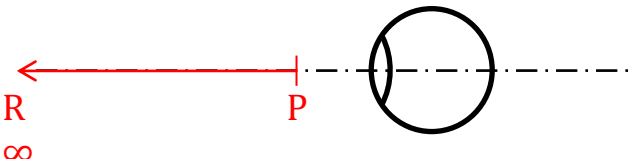
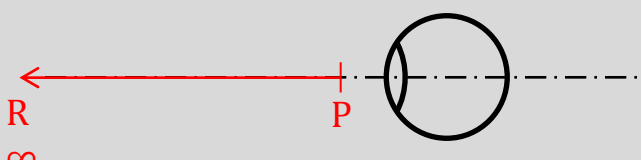
$$a_R = 1/A_R, A_{\check{s}} = A_R - A_P \rightarrow A_P = A_R - A_{\check{s}}, a_P = 1/A_P$$

	$A_R = 0, a_R = ?$ cm	$A_R = -4$ D	$A_R = +4$ D
$A_{\check{s}} = 2$ D	$A_P = ?$ D, $a_P = ?$ cm		
			
$A_{\check{s}} = 4$ D	$A_P = ?$ D, $a_P = ?$ cm		
			
$A_{\check{s}} = 6$ D	$A_P = ?$ D, $a_P = ?$ cm		
			

Příklad: Intervaly ostrého vidění

Vypočtete a graficky znázorněte intervaly ostrého vidění pro a) emetropa ($A_R = 0$), b) myopa s $A_R = -4$ D, a c) hypermetropa s $A_R = +4$ D, ve všech případech pro tři akomodační šíře: 2 D, 4 D a 6 D.

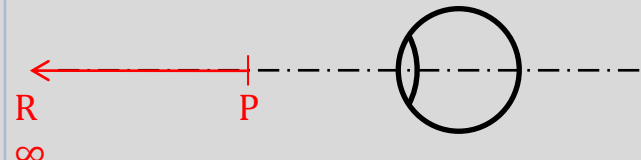
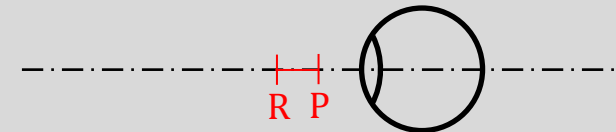
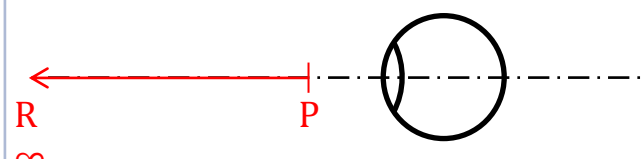
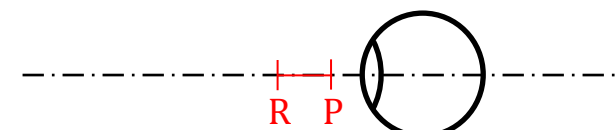
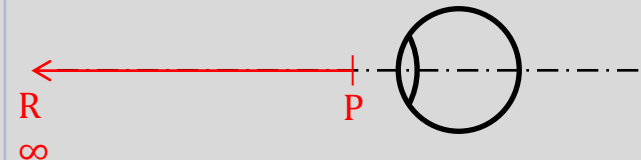
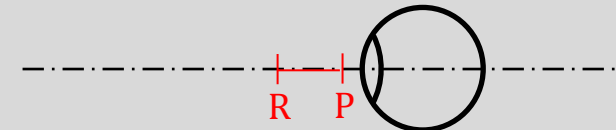
$$a_R = 1/A_R, A_{\check{s}} = A_R - A_P \rightarrow A_P = A_R - A_{\check{s}}, a_P = 1/A_P$$

	$A_R = 0, a_R \rightarrow \infty$	$A_R = -4$ D	$A_R = +4$ D
$A_{\check{s}} = 2$ D	$A_P = -2$ D, $a_P = -50$ cm		
			
$A_{\check{s}} = 4$ D	$A_P = -4$ D, $a_P = -25$ cm		
			
$A_{\check{s}} = 6$ D	$A_P = -6$ D, $a_P = -17$ cm		
			

Příklad: Intervaly ostrého vidění

Vypočtete a graficky znázorněte intervaly ostrého vidění pro a) emetropa ($A_R = 0$), b) myopa s $A_R = -4$ D, a c) hypermetropa s $A_R = +4$ D, ve všech případech pro tři akomodační šíře: 2 D, 4 D a 6 D.

$$a_R = 1/A_R, A_{\check{s}} = A_R - A_P \rightarrow A_P = A_R - A_{\check{s}}, a_P = 1/A_P$$

	$A_R = 0, a_R \rightarrow \infty$	$A_R = -4$ D, $a_R = -25$ cm	$A_R = +4$ D
$A_{\check{s}} = 2$ D	$A_P = -2$ D, $a_P = -50$ cm	$A_P = -6$ D, $a_P = -17$ cm	
			
$A_{\check{s}} = 4$ D	$A_P = -4$ D, $a_P = -25$ cm	$A_P = -8$ D, $a_P = -13$ cm	
			
$A_{\check{s}} = 6$ D	$A_P = -6$ D, $a_P = -17$ cm	$A_P = -10$ D, $a_P = -10$ cm	
			

Příklad: Intervaly ostrého vidění

Vypočtete a graficky znázorněte intervaly ostrého vidění pro a) emetropa ($A_R = 0$), b) myopa s $A_R = -4$ D, a c) hypermetropa s $A_R = +4$ D, ve všech případech pro tři akomodační šíře: 2 D, 4 D a 6 D.

$$a_R = 1/A_R, A_{\check{s}} = A_R - A_P \rightarrow A_P = A_R - A_{\check{s}}, a_P = 1/A_P$$

	$A_R = 0, a_R \rightarrow \infty$	$A_R = -4$ D, $a_R = -25$ cm	$A_R = +4$ D, $a_R = +25$ cm
$A_{\check{s}} = 2$ D	$A_P = -2$ D, $a_P = -50$ cm	$A_P = -6$ D, $a_P = -17$ cm	$A_P = +2$ D, $a_P = +50$ cm
$A_{\check{s}} = 4$ D	$A_P = -4$ D, $a_P = -25$ cm	$A_P = -8$ D, $a_P = -13$ cm	$A_P = 0$ D, $a_P \rightarrow \infty$
$A_{\check{s}} = 6$ D	$A_P = -6$ D, $a_P = -17$ cm	$A_P = -10$ D, $a_P = -10$ cm	$A_P = -2$ D, $a_P = -50$ cm

Refrakční vada podle věku a v populaci

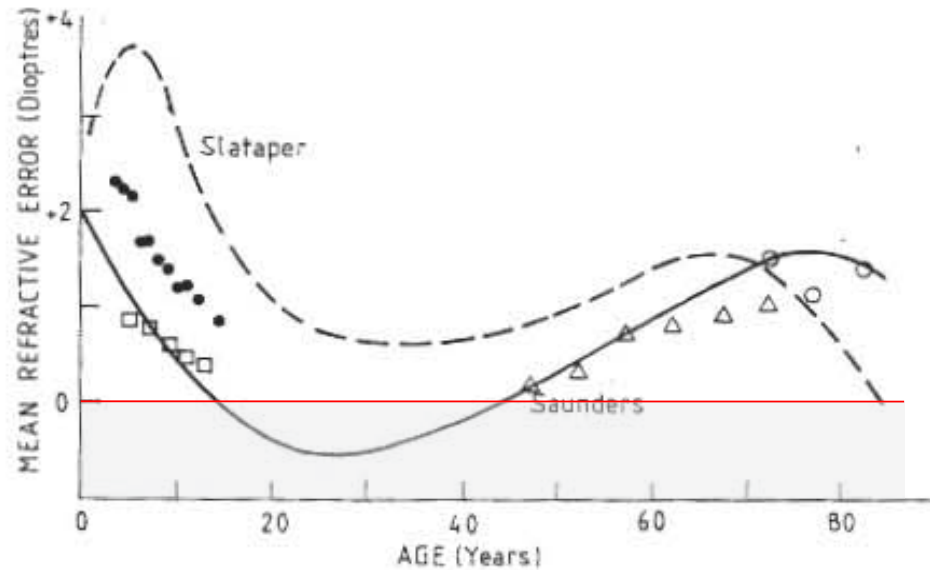
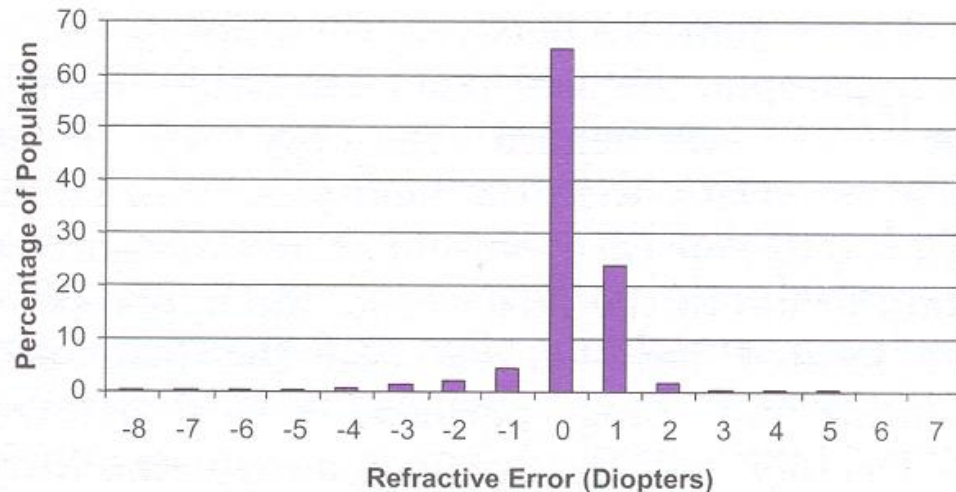


Fig. 2.2 Changes in ocular refraction with age. The smooth broken and unbroken curves are due to Slataper (1950) and Saunders (1981) respectively, and are largely based on results for self-selecting clinical patients. The isolated symbols are data for mainly unselected, non-clinical groups, as collected by the following authors: filled circles, mean ocular refraction in vertical meridian, Sorsby et al. (1961); open squares, mean equivalent sphere, Hirsch (1952); open triangles, mean equivalent sphere, Hirsch (1958); open circles, mean equivalent sphere, Lavery et al. (1988).



Rozdělení četnosti refrakčních vad v populaci (J. Schwiegerling: Visual and Ophthalmic Optics. SPIE Press, Bellingham 2004)

Novější studie:

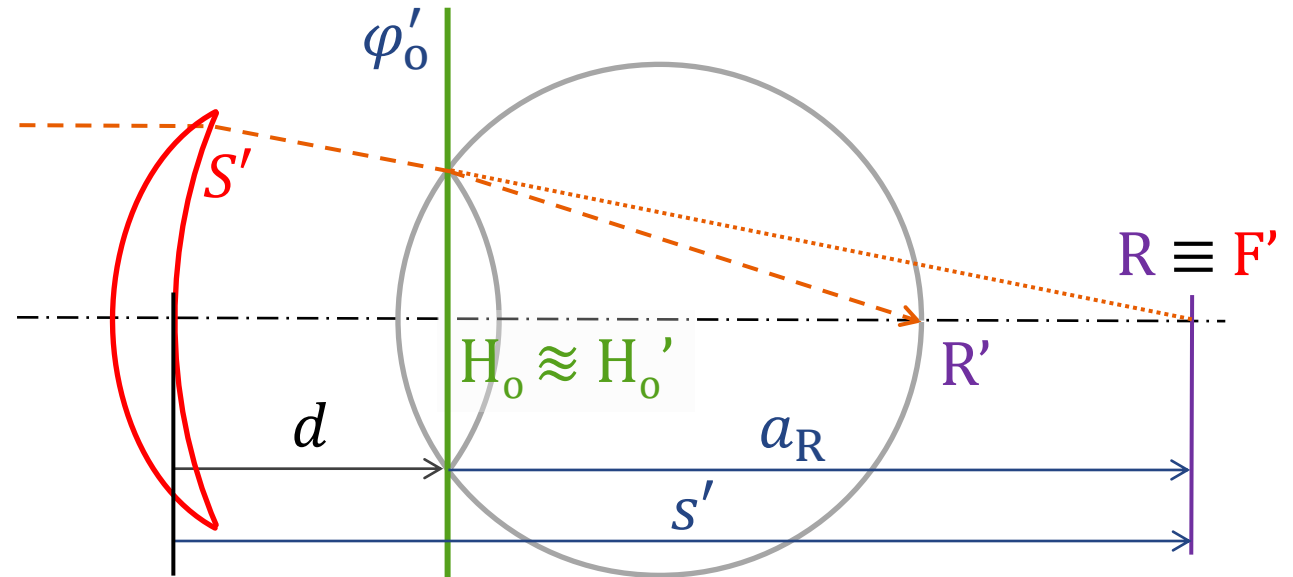
H. Hashemi et al. Global and regional estimates of prevalence of refractive errors: Systematic review and meta-analysis. *J Curr Ophthalmol* 30 (2018) 3.

[doi: 10.1016/j.joco.2017.08.009](https://doi.org/10.1016/j.joco.2017.08.009)

Korekce ametropie I

Obrazové ohnisko F' korekční čočky leží v dalekém bodě R oka (**korekční podmínka**).

Předmětový bod na optické ose v nekonečnu je proto korekční čočkou zobrazen do dalekého bodu R oka a pak optickým systémem oka na jeho sítnici.



$$s' = d + a_R \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{s'} = S' = \frac{1}{a_R + d}$$

$$S' = \frac{A_R}{1 + dA_R}$$

$$A_R = \frac{S'}{1 - dS'}$$

Vzdálenost s' je sečná obrazová ohnisková vzdálenost korekční čočky, d je vrcholová vzdálenost (vertex distance) brýlové čočky, kterou měříme od vrcholu zadní plochy korekční čočky k předmětové hlavní rovině oka (přibližně k vrcholu přední plochy oka)

Korekce ametropie II

Rovnoběžný svazek z osového předmětového bodu v nekonečnu je korekční (brýlovou) čočkou transformován na svazek, který má v předmětové hlavní rovině oka vergenci A_R . Na obrazové hlavní rovině oka je pak vergence svazku rovna $A_R + \varphi'_{o,\min}$. Protože platí

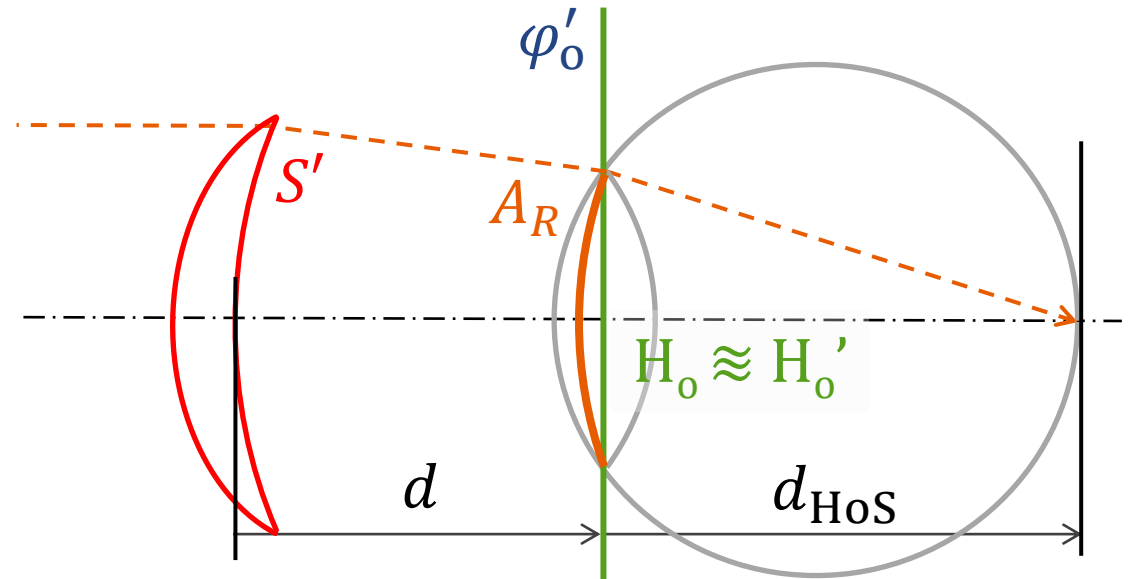
$$A_R + \varphi'_{o,\min} = D_{\text{HoS}},$$

odpovídá tato vergence optické délce D_{HoS} a bod z nekonečna je ostře zobrazen na sítnici.

Potřebnou vrcholovou lámavost S' korekční čočky stanovíme zpětnou propagací ($-d$) svazku z předmětové hlavní roviny oka na zadní lámavou plochu korekční čočky.

Platí i opačný vztah (přímá propagace svazku), kterým lze určit axiální refrakci oka A_R z vrcholové lámavosti S' .

Vzdálenost d měříme od vrcholu zadní plochy korekční čočky k předmětové hlavní rovině oka, přibližně k přední ploše oka.



$$\Rightarrow S' = \frac{A_R}{1 + dA_R}$$

$$\Rightarrow A_R = \frac{S'}{1 - dS'}$$

Příklad: Přepočet ametropie na lámavost brýlové čočky

Korekční brýlová čočka má vrcholovou lámavost $S' = \pm 10,0$ D a vrchol její zadní plochy leží ve vzdálenosti $d = 15$ mm od vrcholu přední plochy rohovky oka. Vzdálenost předmětového hlavního bodu oka od vrcholu přední plochy rohovky je $d_{\text{RHp}} = 1,35$ mm.

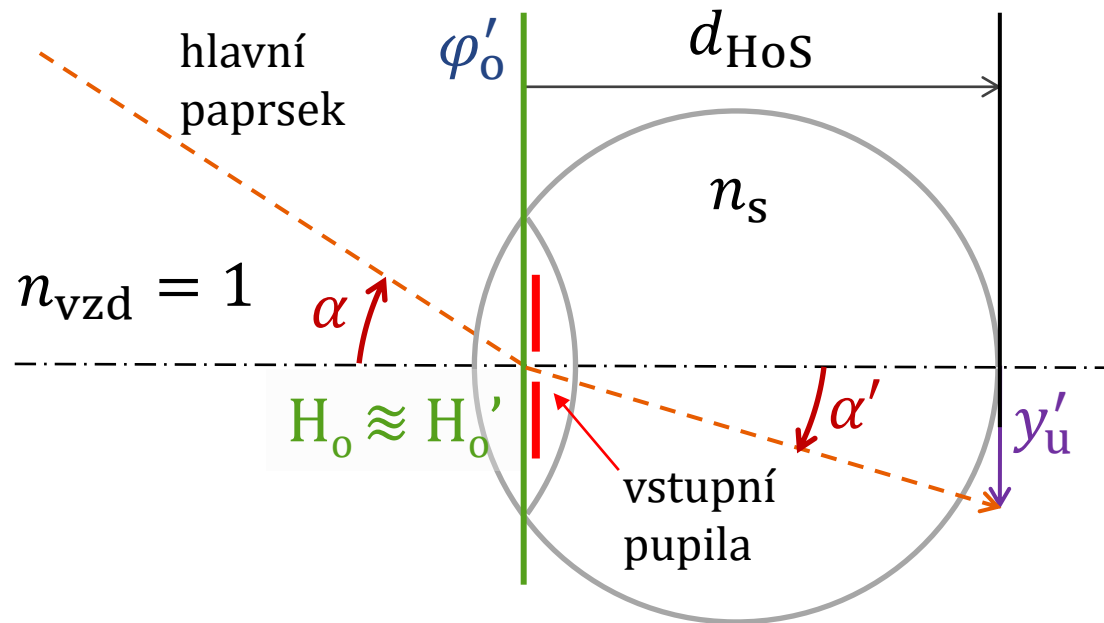
Určete **axiální refrakci** a **polohu dalekého bodu** výpočtem pomocí

- sečné ohniskové vzdálenosti brýlové čočky a její vzdálenosti od oka
- vztahu pro přepočet vrcholové lámavosti brýlové čočky a axiální refrakce oka

Počítejte nejprve *přesně* (vzdálenost brýlové čočky vztahujte předmětovému hlavnímu bodu oka) a pak *přibližně* (vzdálenost vztáhněte k přední ploše oka, nepřepočítávejte).

Velikost obrazu na sítnici nekorigovaného oka

Velikost y'_u rozostřeného sítnicového obrazu (pro nekorigované ametropické oko) se určí jako vzdálenost mezi body, kde hlavní paprsky vycházející z krajních bodů předmětu protínají sítnici.



$$y'_u = d_{\text{HoS}} \operatorname{tg} \alpha'$$

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{n_s}$$

$$\Rightarrow y'_u = \frac{d_{\text{HoS}}}{n_s} \operatorname{tg} \alpha$$

emetrop:

$$\frac{d_{\text{HoS}}}{n_s} = \frac{f'}{n_s} = -f$$

$$y'_u = -f \operatorname{tg} \alpha$$

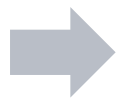
Velikost obrazu na sítnici korigovaného ametropického oka

předmět o úhlové velikosti α se zobrazí do ohniska korekční čočky s tloušťkou d_K a indexem lomu n_K a mohutností první plochy φ'_{K1} a vznikne obraz o výšce

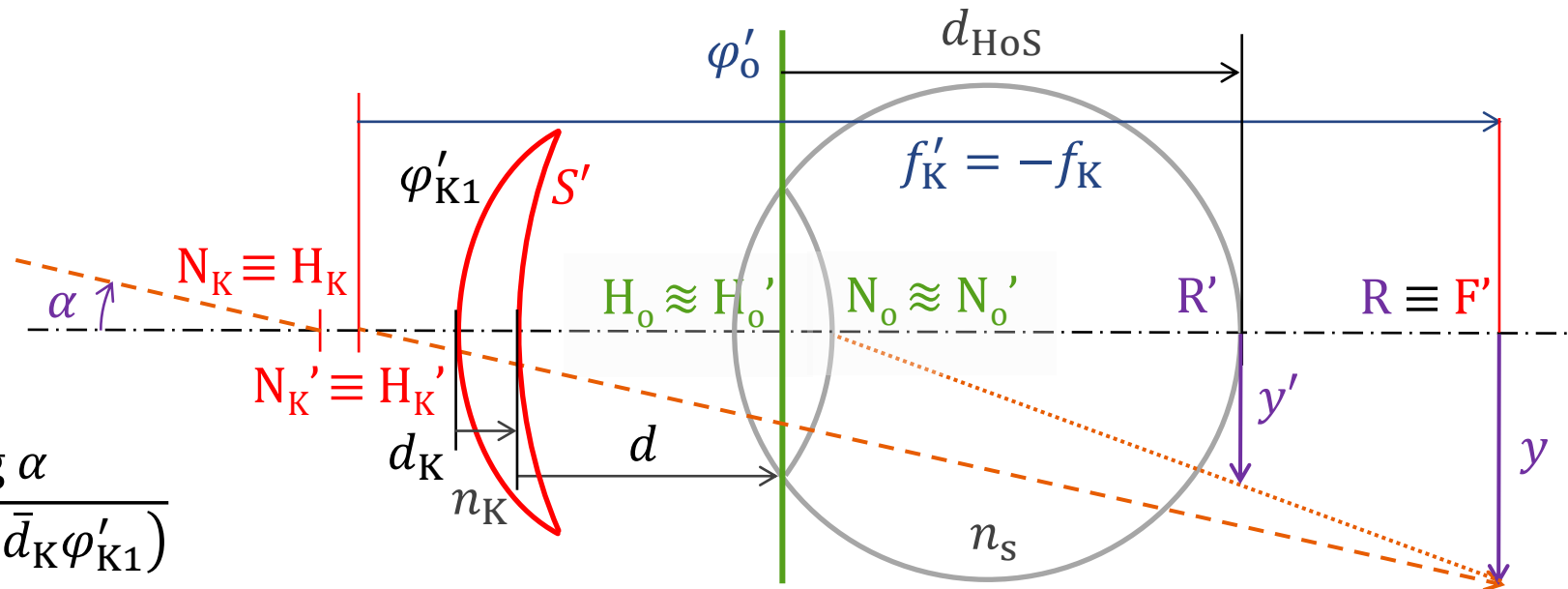
$$y = -f_K \operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\varphi'_K} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{S'(1 - \bar{d}_K \varphi'_{K1})}$$

ten je dále okem zobrazen na sítnici, vznikne obraz o výšce y' a platí:

$$\frac{A_R}{S'} = (1 + dA_R) = \frac{1}{(1 - dS')}$$



$$y' = \frac{1}{(1 - dS')} \frac{1}{(1 - \bar{d}_K \varphi'_{K1})} \frac{d_{HoS}}{n_s} \operatorname{tg} \alpha$$



$$y' = \frac{A_R}{A'_R} y = \frac{a'_R A_R}{n_s} y = \frac{d_{HoS} A_R}{n_s} y = \frac{d_{HoS} A_R}{n_s S'(1 - \bar{d}_K \varphi'_{K1})} \operatorname{tg} \alpha$$

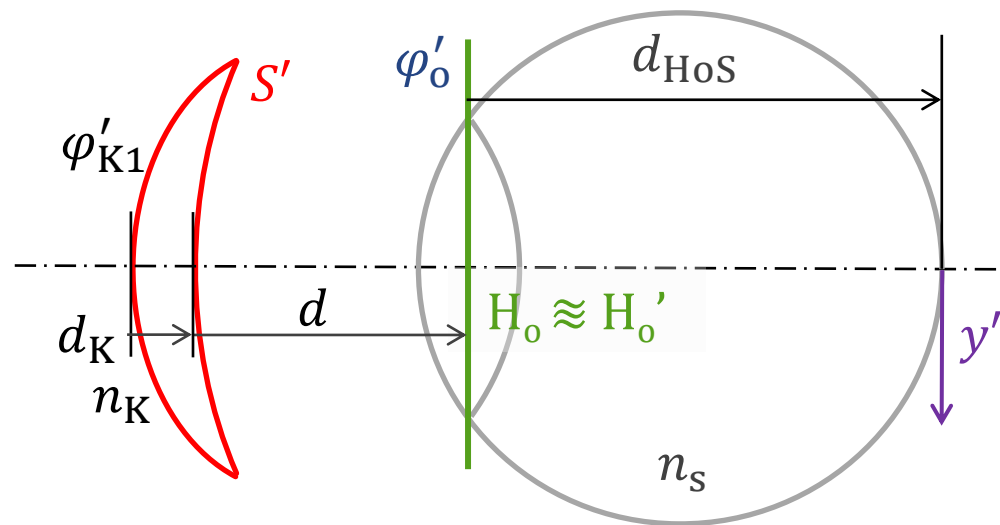
Velikost obrazu na sítnici ametropického oka

$$y' = \frac{1}{(1 - dS')} \frac{1}{(1 - \bar{d}_K \varphi'_{K1})} \frac{d_{HoS}}{n_s} \operatorname{tg} \alpha = F_P \times F_F \times y'_u \approx \frac{1}{(1 - dS')} \frac{d_{HoS}}{n_s} \operatorname{tg} \alpha$$

zvětšení
korekční
čochky

bez
korekce

aproximace tenké
korekční čochky



Mohutnostní (Power) faktor:

$F_P = 1/(1 - dS') = (1 + dA_R) = A_R/S'$
... zásadní vliv na zvětšení korekční čochky

Tvarový (Form) faktor: $F_F = 1/(1 - \bar{d}_K \varphi'_{K1})$

... přední plocha obvykle spojná, zvětšení její mohutnosti nebo centrální tloušťky **zvětší** tvarový faktor a tím i sítnicový obraz
... rozptylky mají velmi malou redukovanou centrální tloušťku, tvarový faktor je blízký jedné

Příklad: Velikost sítnicového obrazu

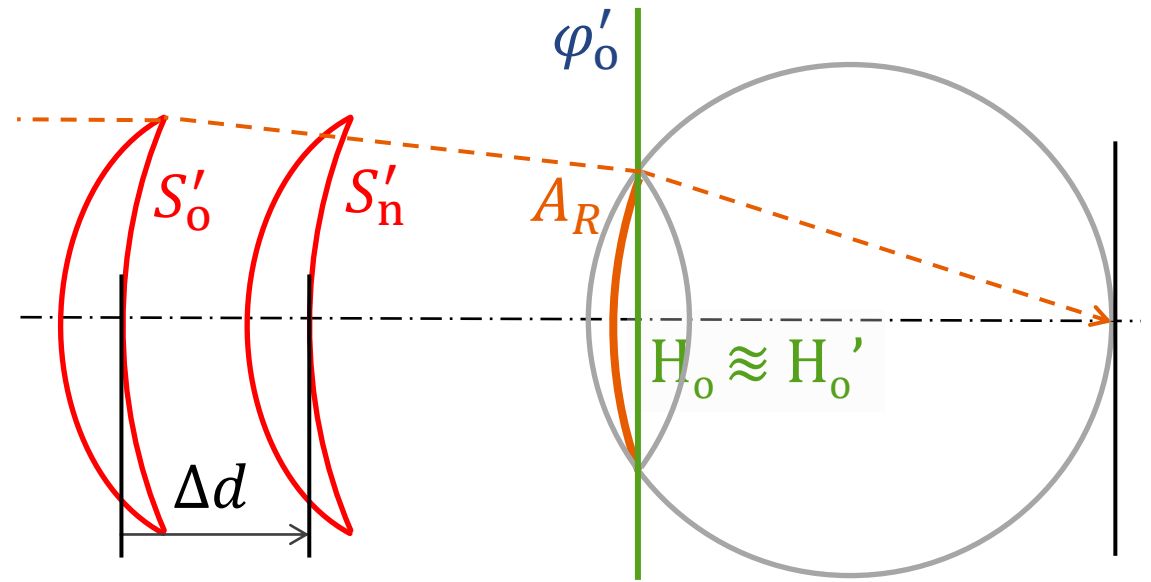
Oko s refrakční vadou pozoruje postavu o výšce 1,7 m stojící ve vzdálenosti 6,0 m. Vypočtete:

- a) **velikost sítnicového obrazu** pro nekorigované oko (použijte parametry Gullstrandova oka),
- b) **zvětšení brýlové čočky** a **velikost sítnicového obrazu** pro oko korigované brýlovou čočkou ve vzdálenosti $d = 15$ mm od oka a s vrcholovou lámavostí $S' = \pm 5,0$ D (použijte aproximaci tenké brýlové čočky),
- c) **zvětšení brýlové čočky** a **velikost sítnicového obrazu** pro oko korigované tlustou brýlovou čočkou s následujícími parametry: $S' = +5,0$ D, $\varphi'_{K1} = +6$ D, $d_K = 5$ mm, $n_K = 1,5$, případně $S' = -5,0$ D, $\varphi'_{K1} = +6$ D, $d_K = 1$ mm, $n_K = 1,5$.
- d) O kolik procent se liší velikosti obrazu v případě a), b) a c)?
Pomůcka: je vhodné počítat zvlášť y'_u , F_P a F_F .

Přepočet vrcholové lámavosti při změně vzdálenosti

Vrcholová lámavost korekční čočky v původní poloze je S'_0 . Při změně polohy (vzdálenosti) korekční čočky o Δd je nutno změnit také její vrcholovou lámavost na S'_n , a to tak, aby odpovídala vergenci svazku za původní čočkou v místě zadní plochy nové čočky. Pak bude na předmětové hlavní rovině oka opět dosaženo požadované vergence svazku A_R .

Požadovanou vergenci S'_n proto určíme z původní vergence S'_0 propagací vergence o vzdálenost Δd měřené od vrcholu zadní plochy korekční čočky v původní poloze k vrcholu zadní plochy čočky v nové poloze.



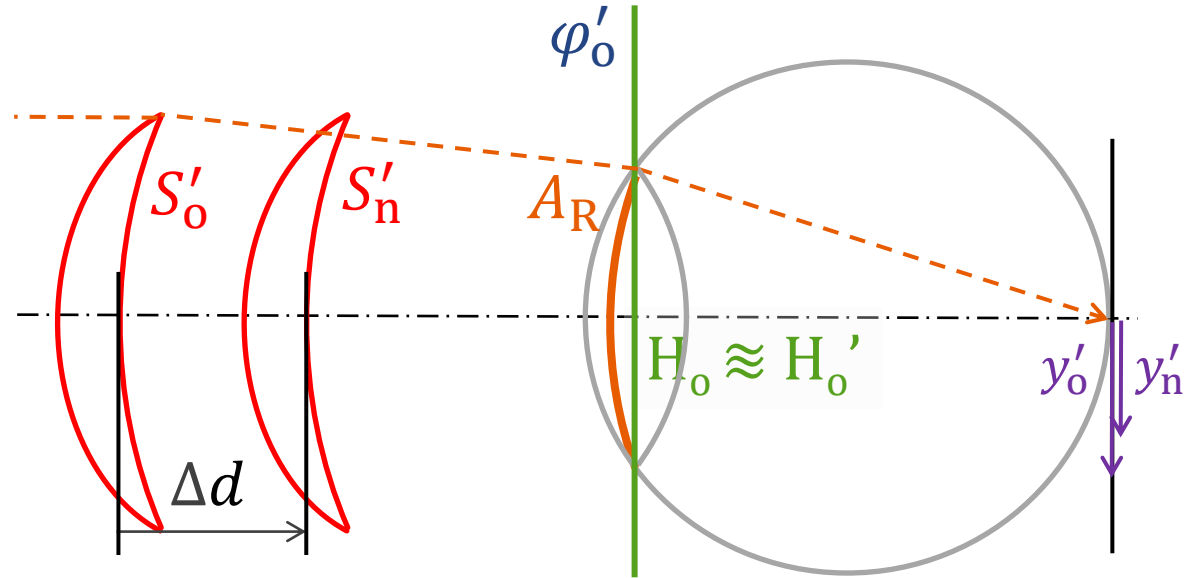
$$\Rightarrow S'_n = \frac{S'_0}{1 - \Delta d S'_0}$$

$\Delta d = d_o - d_n$ je kladné při posunutí korekční čočky směrem k oku a záporné při posunutí od oka

Přepočet velikosti obrazu na sítnici při změně vzdálenosti

Při změně polohy (vzdálenosti) korekční čočky se změní také velikost obrazu (téhož předmětu) na sítnici.

Pro poměr β_{no} velikostí nového a původního sítnicového obrazu platí:



$$\beta_{no} = \frac{y'_n}{y'_0} = \frac{F_{Pn}}{F_{Po}} = \frac{A_R}{S'_n} \frac{S'_0}{A_R} = \frac{S'_0}{S'_n} = S'_0 \frac{1 - \Delta d S'_0}{S'_0} = 1 - \Delta d S'_0$$

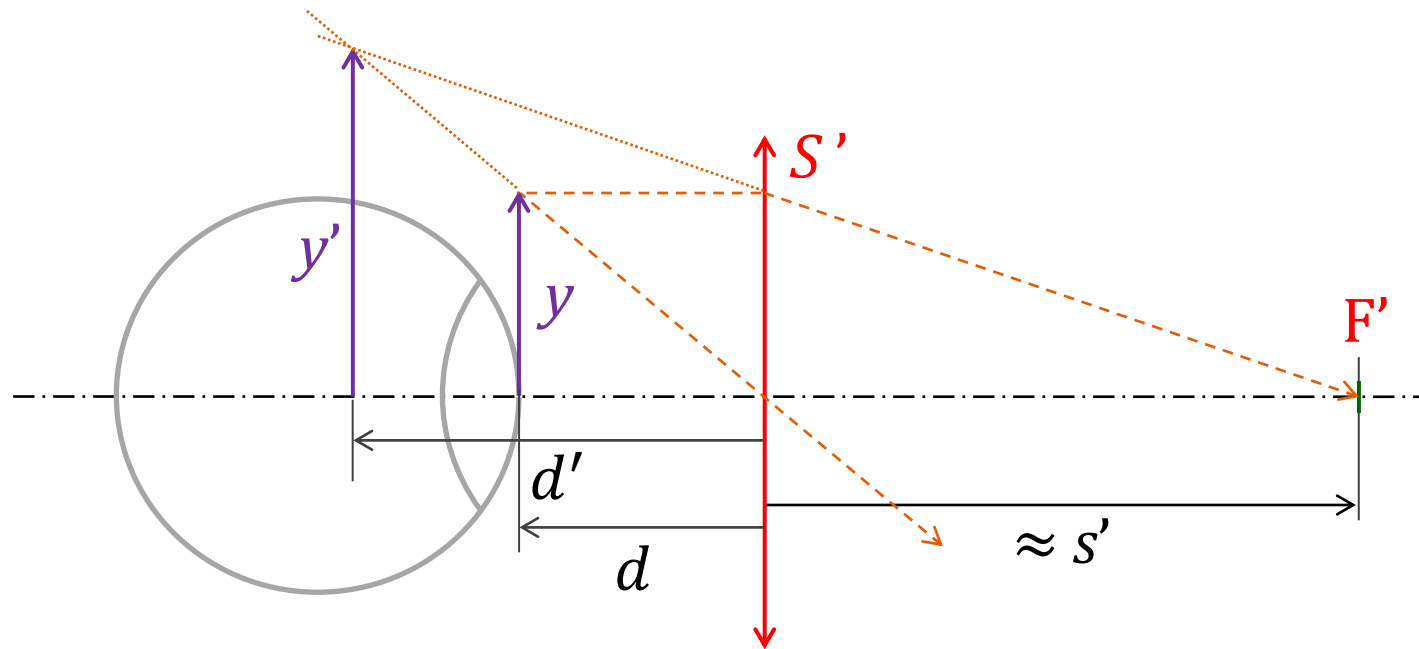
$\Delta d = d_o - d_n$ je kladné při posunutí korekční čočky směrem k oku a záporné při posunutí od oka

Příklad: Přepočet korekce

Oko s refrakční vadou je korigované brýlovou čočkou s vrcholovou lámavostí $S' = \pm 6,0$ D ležící ve vzdálenosti $d = 20$ mm od oka. Určete **novou hodnotu vrcholové lámavosti** a **změnu velikosti sítnicového obrazu** (poměrem i procentuálně)

- a) pro vzdálenost $d = 12$ mm,
- b) pro kontaktní čočku.

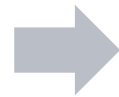
Zdánlivá velikost oka za brýlovou čočkou



Podle Gaussovy rovnice:

$$\frac{1}{d'} = \frac{1}{d} + \varphi' \approx \frac{1}{d} + S'$$

$$(d, d' < 0)$$



velikost obrazu oka y' za brýlovou čočkou:

$$y' = \frac{d'}{d} y = \frac{y}{1 + dS'}$$