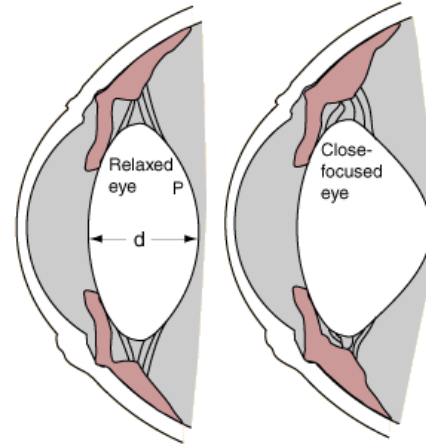
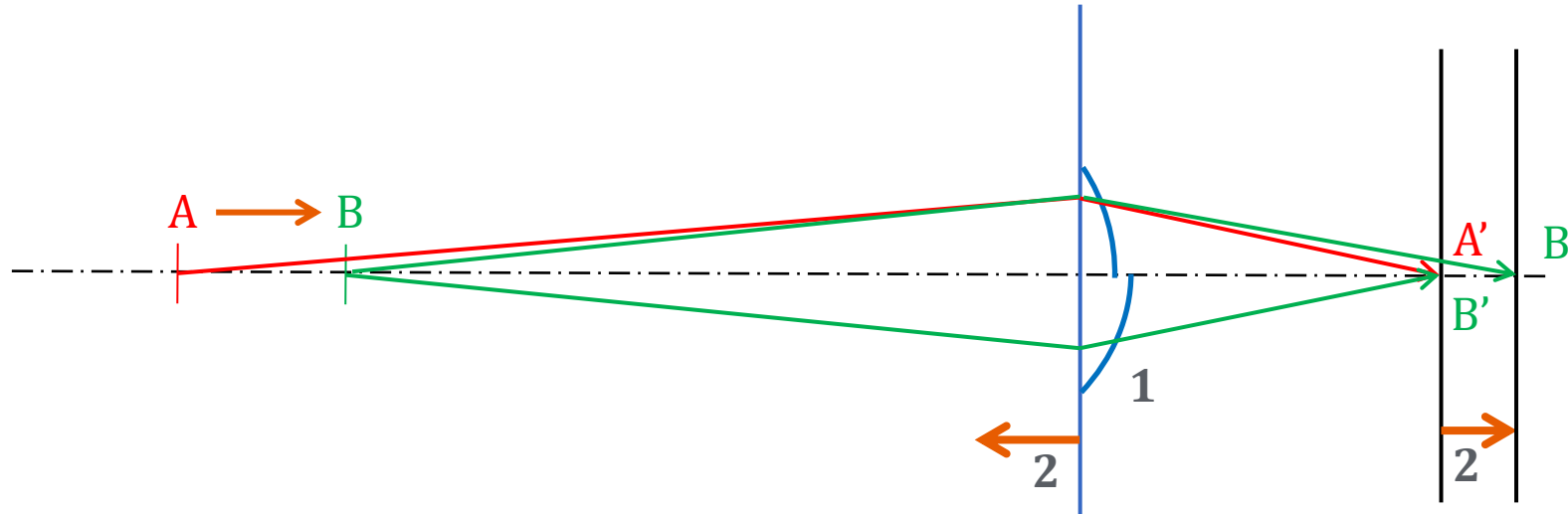


# Akomodace



# Možnosti přeastření

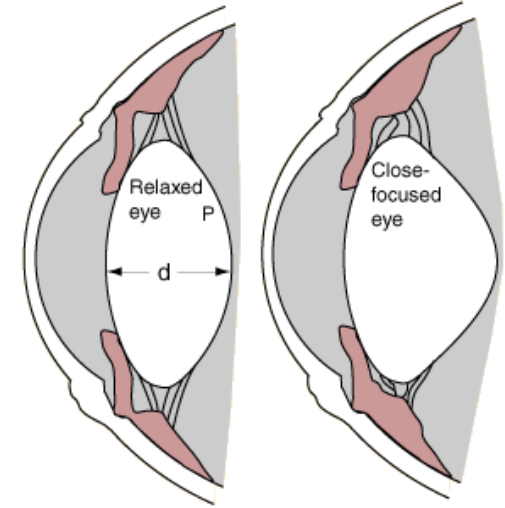


## možnosti přeastření z $A \rightarrow B$

1. změna optické mohutnosti  $\varphi'_o$  zobrazovací soustavy (u lidského oka a oka obratlovců převládá)
2. změna polohy optické soustavy nebo detektoru (jen v malé míře, obvyklé u ryb a obojživelníků)

# Akomodace

Akomodace je proces, při němž oko přizpůsobuje svou mohutnost, aby zaostřilo na objekty v různých vzdálenostech

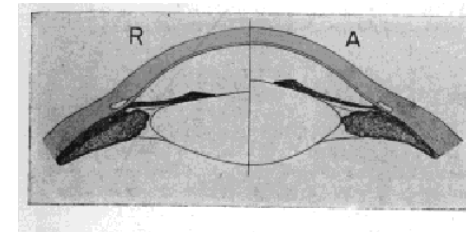


příklad emetropa:

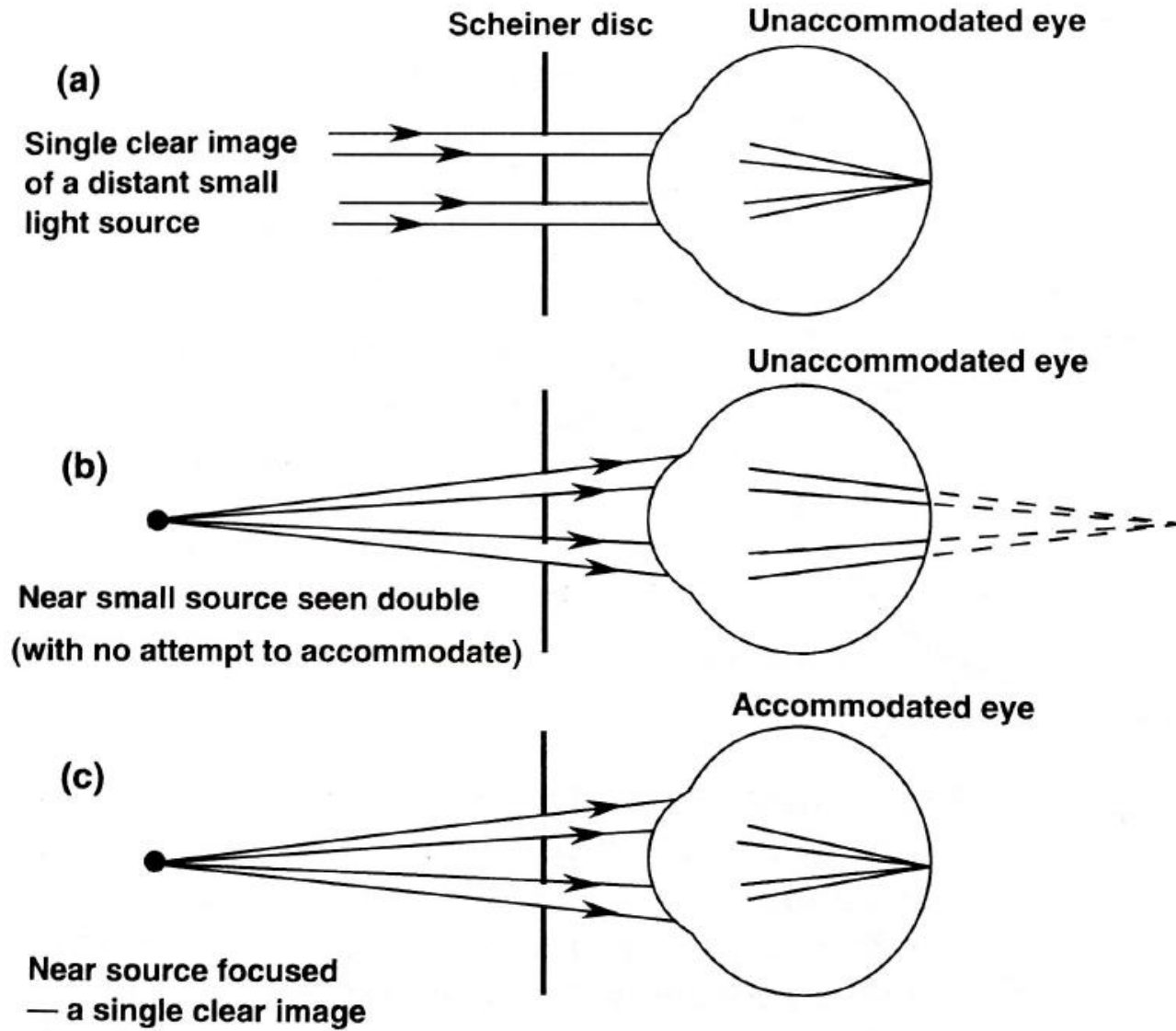
- zobrazuje neakomodovaným (relaxovaným) okem vzdálené objekty do středu makuly, přitom je vergence svazku dopadajícího na rohovku nulová
- pokud pozoruje bližší objekt ve vzdálenosti například 50 cm před okem, je vergence svazku dopadajícího na rohovku  $-2D$
- mohutnost oka tedy musí být zvýšena o  $+2D$  vzhledem k vrcholu rohovky

# Mechanismus akomodace

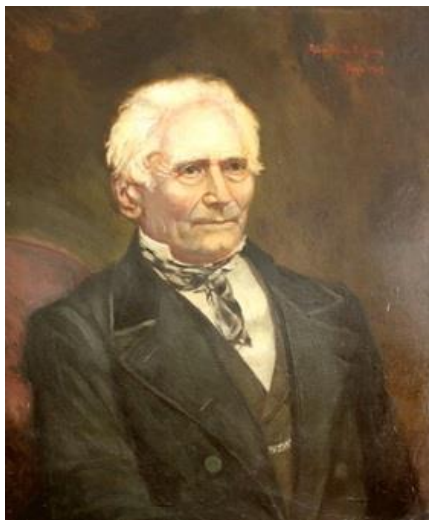
- Jan Kepler (1571 – 1630): v r. 1611 si uvědomil, že různě vzdálené objekty jsou zobrazovány na sítnici, tudíž je akomodace nezbytná
- Christoph Scheiner (1573 – 1650): v r. 1619 demonstroval schopnost oka akomodovat pomocí tzv. *Scheinerova disku*
- René Descartes (1596 - 1650): poprvé navrhl, že by akomodaci mohla působit změna tvaru oční čočky
- Thomas Young (1773 – 1829): eliminoval vliv rohovky skleněnou čočkou připevněnou k oku s vodní imerzí a stále byl schopen akomodovat, tj. prokázal, že rohovka neodpovídá za akomodaci; ukázal také, že akomodace nenastává změnou délky oka
- Purkyně, Langenbeck, Donders, Cramer: výzkum *Purkyňových obrazů*
- Herman von Helmholtz (1821 – 1894): *relaxační teorie*: napjatá zonulární vlákna udržují čočku v oploštělém tvaru, při uvolnění (relaxaci) vláken nabývá čočka tvaru s vyšší křivostí ploch
- Marius Tscherning (1854 – 1939)
- Edgar F. Fincham 1937: modifikovaná Helmholtzova teorie, takřka odpovídající dnešním poznatkům a moderní teorii



# Scheinerův experiment

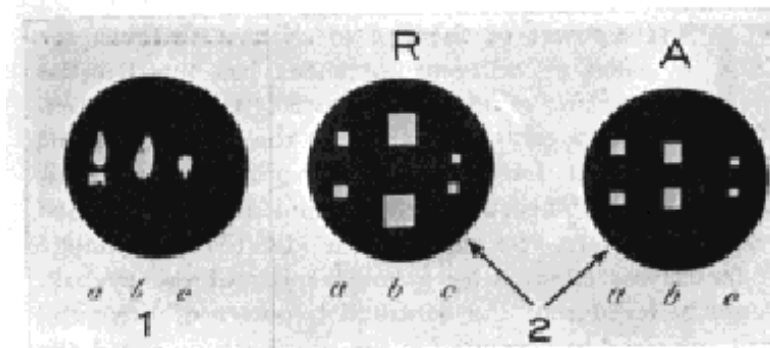
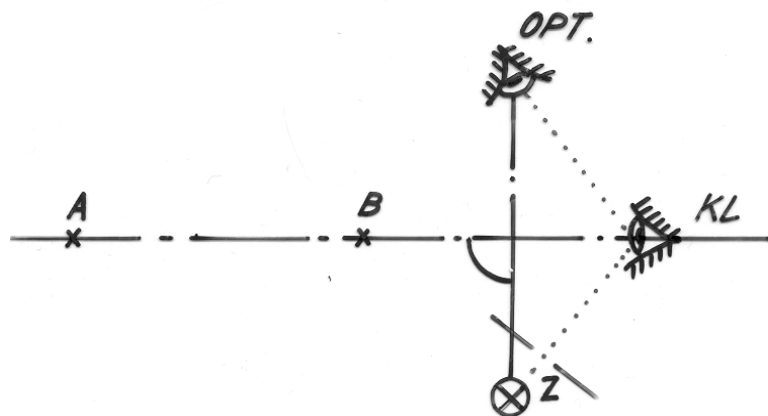


# Purkyňovy obrazy

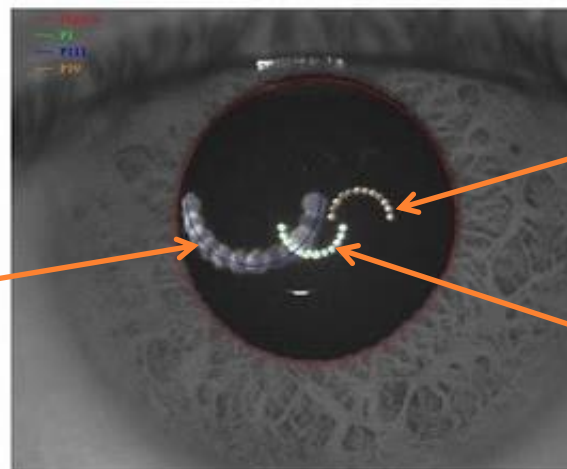


Jan Evangelista Purkyně  
(1787 - 1869)

v r. 1823 pozoroval nejen reflexi od rohovky, známou dříve, ale také dvě reflexe od oční čočky:



odraz na přední  
lámavé ploše čočky  
(P III)

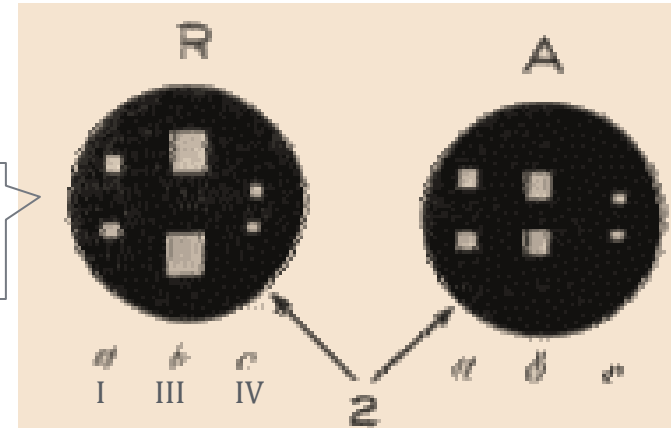


odraz na zadní  
lámavé ploše čočky  
(P IV)

odraz na přední  
lámavé ploše  
rohovky (P I)

# Purkyňovy obrazy

oko:  
neakomodované (R) – akomodované (A)



**Table 12.3** The Purkinje images (calculated from Le Grand's schematic eye)

| Image No. | Relative brightness | Unaccommodated eye  |               |                     |               | Eye accommodated 6.96 D (distant object) |               |
|-----------|---------------------|---------------------|---------------|---------------------|---------------|--|---------------|
|           |                     | Distant object      |               | Object at 500 mm    |               | Image position (mm)                      | Relative size |
|           |                     | Image position (mm) | Relative size | Image position (mm) | Relative size |  |               |
| I         | 1                   | +3.900              | 1             | +3.870              | 1             | +3.900                                   | 1             |
| II        | 0.010               | +3.605              | 0.820         | +3.585              | 0.821         | +3.605                                   | 0.820         |
| III       | 0.008               | +10.726             | 1.971         | +10.610             | 1.945         | +6.200                                   | 1.102         |
| IV        | 0.008               | +4.625              | -0.763        | +4.325              | -0.762        | +5.237                                   | -0.773        |

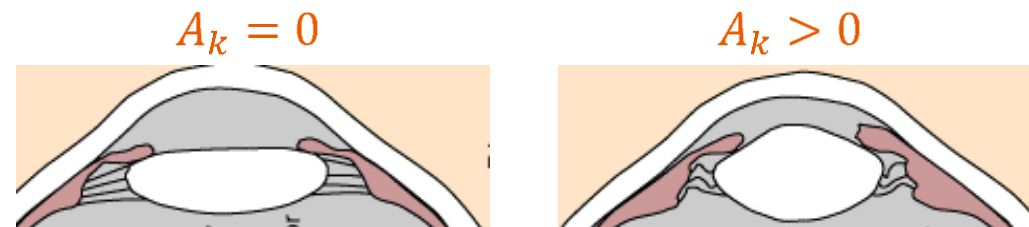
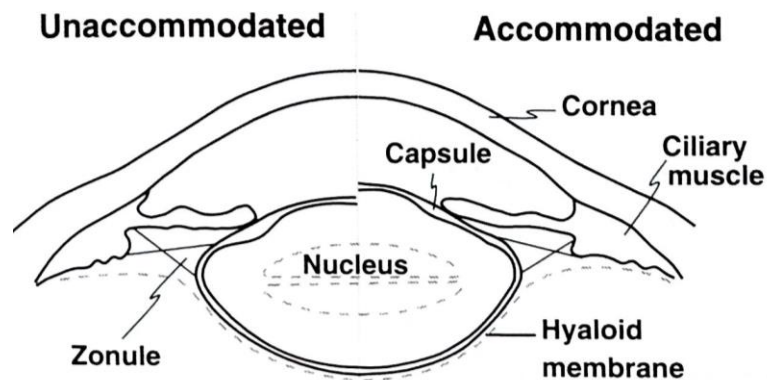
Image positions expressed as their distances from the anterior corneal vertex.

I, II ... lámavé plochy rohovky, III, IV ... lámavé plochy čočky

A. G. Bennett, R. B. Rabbetts: Clinical Visual Optics. Elsevier Health Sciences, 1998.

# Mechanismus akomodace

1. Je-li ciliární sval relaxován ( $A_k = 0$ ), udržuje elastická tkáň ciliárního tělíska zonulární vlákna napjata, pouzdro udržuje čočku v oploštělém tvaru (poloměry křivosti vnějších ploch čočky: +10 mm, -6 mm), oko má minimální mohutnost a vidí do dálky.
2. Při akomodaci do blízka ( $A_k > 0$ ) je ciliární sval stažen, ciliární tělísko se pohybuje vpřed a stahuje se ke středu, a tím je uvolněno napětí zonulárních vláken.
3. Elastický obal (kapsule) stlačuje čočku a za pomoci tlaku sklivce se první (přední) plocha čočky vydouvá do tvaru s vyšší křivostí – v místech, kde je kapsule nejtenčí (poloměry křivosti vnějších ploch čočky: +5,33 mm, -5,33 mm), oko zvyšuje mohutnost a vidí do blízka.
4. Při návratu k vidění do dálky ciliární sval relaxuje, elastická tkáň ciliárního tělíska napíná zonule a s pomocí elasticity čočky je čočka stažena do ploššího, tenčího tvaru.

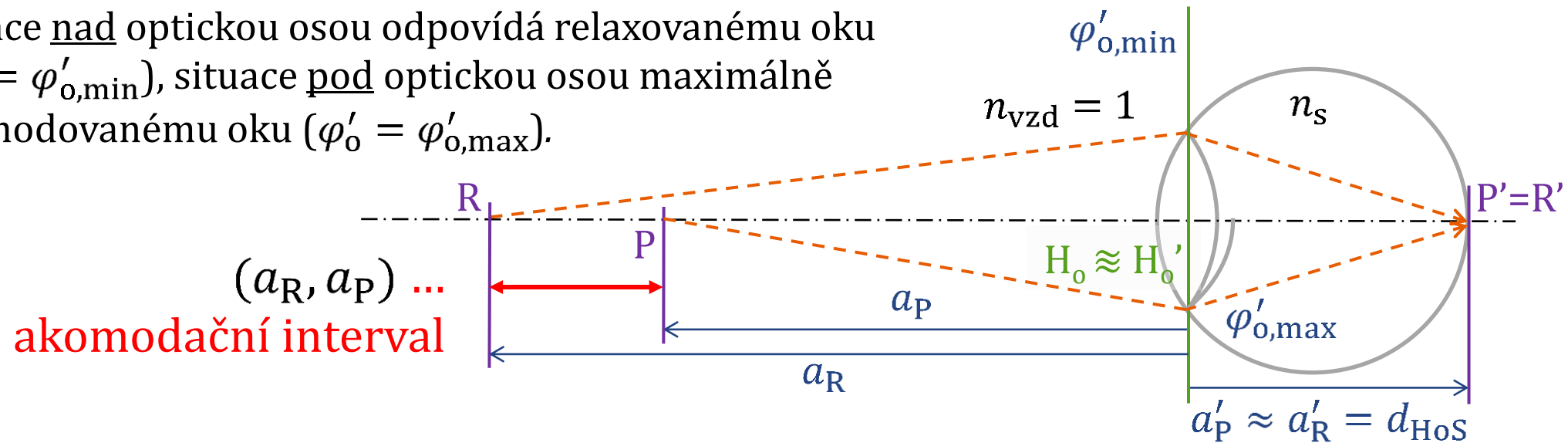


A. Tunnaclyffe: Introduction to Visual Optics, ABDO, Canterbury 1993.



# Akomodační interval a šíře

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



**akomodační šíře** (akomodační amplituda):

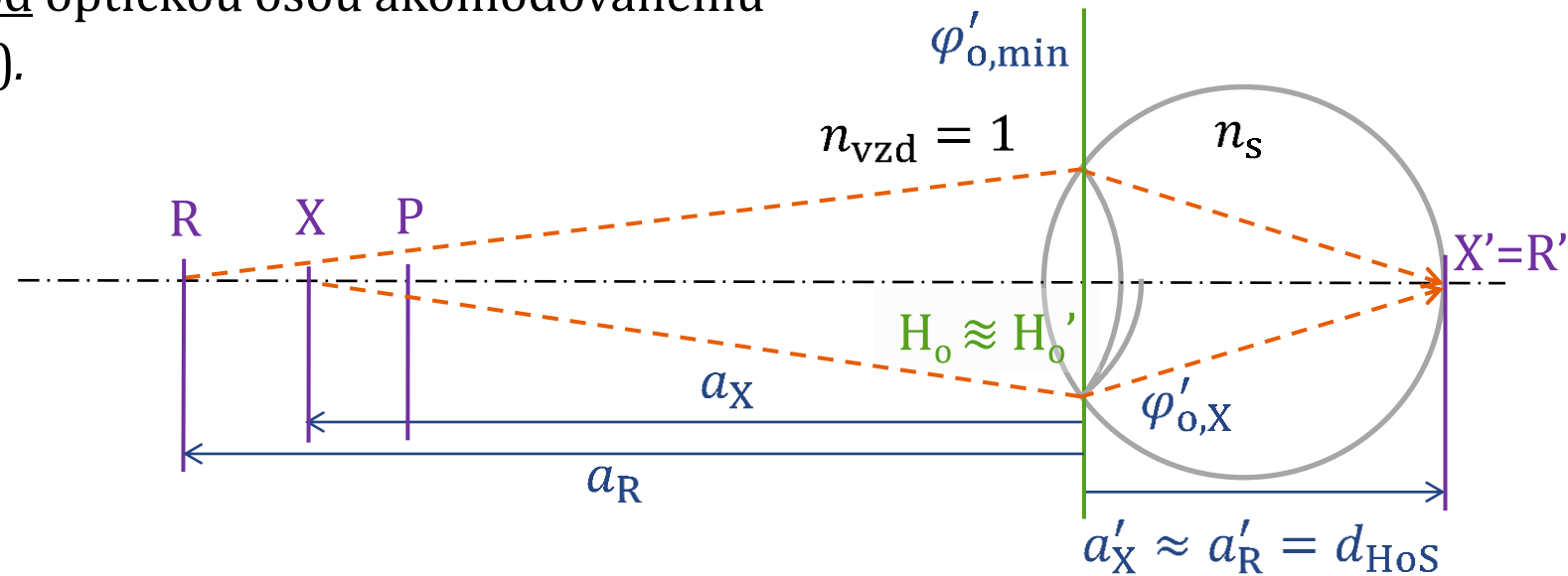
$$A_{\S} = A_R - A_P \approx (D_{HoS} - \varphi'_{o,\min}) - (D_{HoS} - \varphi'_{o,\max}) = \varphi'_{o,\max} - \varphi'_{o,\min}$$

*Pozn.* Přibližná rovnost platí za předpokladu  $a'_P \approx a'_R = d_{HoS}$  (obrazová vzdálenost pro akomodované i relaxované oko je přibližně stejná). Někdy se akomodační šíře naopak definuje primárně jako rozdíl mohutností  $\varphi'_{o,\max} - \varphi'_{o,\min}$ .

$D_{HoS} = n_s/d_{HoS}$  je vergence svazku konvergujícího do středu makuly, v obrazové hlavní rovině („dioptrická délka“).

# Akomodace jako veličina

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



**akomodace** (pro bod X):

$$A_{K,X} = \varphi'_{o,X} - \varphi'_{o,\min} \approx (D_{\text{HoS}} - A_X) - (D_{\text{HoS}} - A_R) = A_R - A_X$$

$D_{\text{HoS}} = n_s/d_{\text{HoS}}$  je vergence svazku konvergujícího do středu makuly, v obrazové hlavní rovině („dioptrická délka“).

# Relaxované Gullstrandovo oko (6 ploch)

rohovka:

$r_1 = 7,7 \text{ mm}$   
 $r_2 = 6,8 \text{ mm}$   
 $d_1 = 0,0 \text{ mm}$   
 $d_2 = 0,5 \text{ mm}$   
 $n = 1,376$

jádro čočky:

$r_4 = 7,911 \text{ mm}$   
 $r_5 = -5,76 \text{ mm}$   
 $d_4 = 4,146 \text{ mm}$   
 $d_5 = 6,565 \text{ mm}$   
 $n = 1,406$

čočka:

$r_3 = 10,0 \text{ mm}$   
 $r_6 = -6,0 \text{ mm}$   
 $d_3 = 3,6 \text{ mm}$   
 $d_6 = 7,2 \text{ mm}$   
 $n = 1,386$

sklivec:

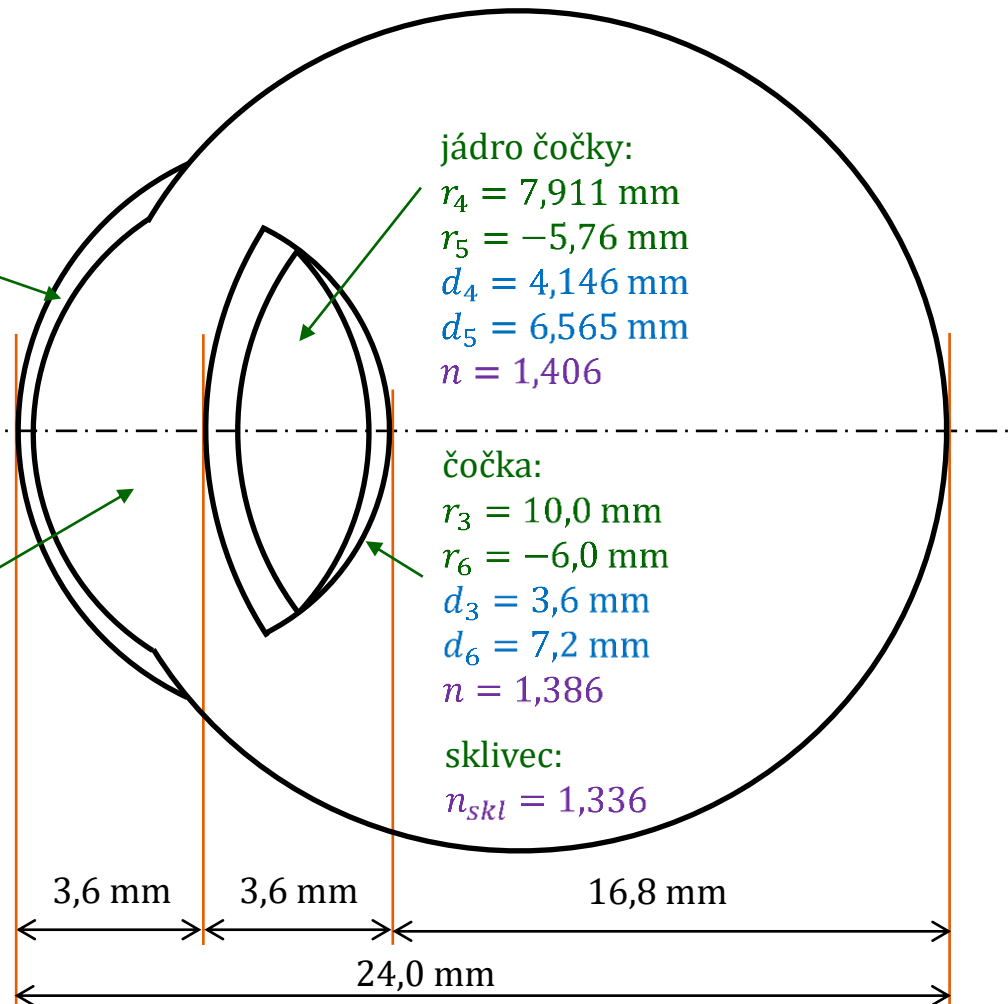
$n_{skl} = 1,336$

přední komora:  
 $n = 1,336$

$r_i$  ... poloměr plochy

$d_i$  ... vzdálenost plochy od přední plochy rohovky (1. plocha)

$n$  ... index lomu prostředí



# Akomodované Gullstrandovo oko (6 ploch)

rohovka:

$$\begin{aligned} r_1 &= 7,7 \text{ mm} \\ r_2 &= 6,8 \text{ mm} \\ d_1 &= 0,0 \text{ mm} \\ d_2 &= 0,5 \text{ mm} \\ n &= 1,376 \end{aligned}$$

jádro čočky:

$$\begin{aligned} r_4 &= 2,655 \text{ mm} \\ r_5 &= -2,655 \text{ mm} \\ d_4 &= 3,8725 \text{ mm} \\ d_5 &= 5,5275 \text{ mm} \\ n &= 1,406 \end{aligned}$$

$r_i$  ... poloměr plochy

$d_i$  ... vzdálenost plochy od přední plochy rohovky (1. plocha)

$n$  ... index lomu prostředí

přední komora:

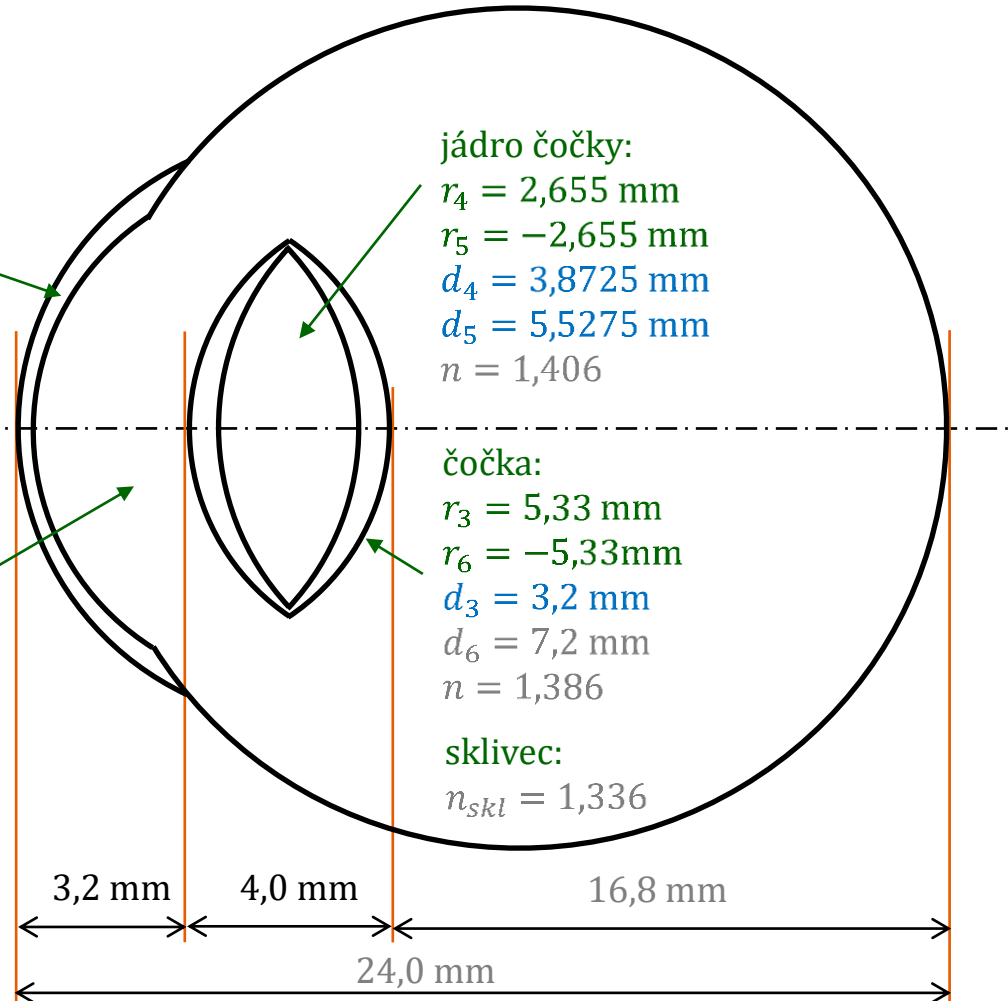
$$n = 1,336$$

čočka:

$$\begin{aligned} r_3 &= 5,33 \text{ mm} \\ r_6 &= -5,33 \text{ mm} \\ d_3 &= 3,2 \text{ mm} \\ d_6 &= 7,2 \text{ mm} \\ n &= 1,386 \end{aligned}$$

sklivec:

$$n_{skl} = 1,336$$



# Relaxované Gullstrandovo oko

| plocha č.            | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $n$                  | 1,376   | 1,336   | 1,386   | 1,406   | 1,386   | 1,336   |
| $n'$                 | 1       | 1,376   | 1,336   | 1,386   | 1,406   | 1,386   |
| $r$                  | 7,7     | 6,8     | 10      | 7,911   | -5,76   | -6      |
| $d$                  | 0,5     | 3,1     | 0,546   | 2,419   | 0,635   |         |
| $d_1$ (od 1. plochy) | 0       | 0,5     | 3,6     | 4,146   | 6,565   | 7,2     |
| $x$                  | nekon.  | 27,6787 | 27,3808 | 25,2193 | 22,0391 | 19,9691 |
| $n/x$                | 0       | 0,04971 | 0,04879 | 0,05496 | 0,0638  | 0,06941 |
| $\varphi = (n'-n)/r$ | 0,04883 | -0,0059 | 0,005   | 0,00253 | 0,00347 | 0,00833 |
| $n'/x'$              | 0,04883 | 0,04383 | 0,05379 | 0,05749 | 0,06727 | 0,07774 |
| $x'$                 | 28,1787 | 30,4808 | 25,7653 | 24,4581 | 20,6041 | 17,1854 |
| $x'-d$               | 27,6787 | 27,3808 | 25,2193 | 22,0391 | 19,9691 |         |
| $x'/(x'-d)$          | 1,01806 | 1,11322 | 1,02165 | 1,10976 | 1,0318  |         |

$$f'_R = 31,0314$$

$$\begin{aligned} x'(F') &= 17,1854\text{mm} \\ x'(H') &= -5,5992\text{mm} \\ x'(N') &= 0,13106\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f' &= 22,7846\text{mm} \\ \varphi'_c &= 58,6361\text{D} \end{aligned}$$

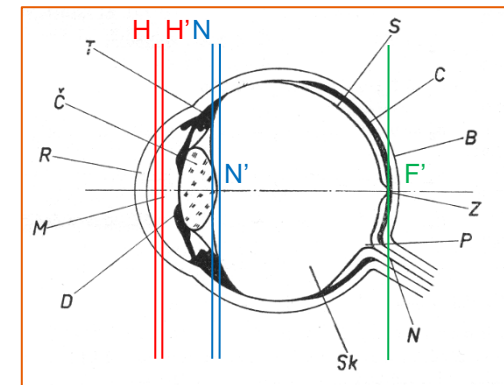
$$\begin{aligned} x_1(F') &= 24,3854\text{mm} \\ x_1(H') &= 1,6008\text{mm} \\ x_1(N') &= 7,33106\text{mm} \end{aligned}$$

|        | 6       | 5       | 4       | 3       | 2       | 1       |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|        | 1,386   | 1,406   | 1,386   | 1,336   | 1,376   | 1       |
|        | 1,336   | 1,386   | 1,406   | 1,386   | 1,336   | 1,376   |
|        | 6       | 5,76    | -7,911  | -10     | -6,8    | -7,7    |
|        | 0,635   | 2,419   | 0,546   | 3,1     | 0,5     |         |
|        |         |         |         |         |         |         |
| nekon. | 165,685 | 116,356 | 94,3094 | 64,73   | 92,7424 |         |
|        | 0       | 0,00837 | 0,01208 | 0,0147  | 0,02064 | 0,01484 |
|        | 0,00833 | 0,00347 | 0,00253 | 0,005   | -0,0059 | 0,04883 |
|        | 0,00833 | 0,01184 | 0,01461 | 0,0197  | 0,01476 | 0,06367 |
|        | 166,32  | 118,775 | 94,8554 | 67,83   | 93,2424 | 15,7065 |
|        | 165,685 | 116,356 | 94,3094 | 64,73   | 92,7424 |         |
|        | 1,00383 | 1,02079 | 1,00579 | 1,04789 | 1,00539 |         |

$$\begin{aligned} x(F) &= -15,706\text{mm} \\ x(H) &= 1,34786\text{mm} \\ x(N) &= 7,07811\text{mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f &= -17,054\text{mm} \\ \varphi'_c &= 58,6361\text{D} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_1(F) &= -15,706\text{mm} \\ x_1(H) &= 1,34786\text{mm} \\ x_1(N) &= 7,07811\text{mm} \end{aligned}$$



- R - rohovka
- M - komorová voda
- Č - čočka
- Sk - sklivec
- S - sítnice
- Z - žltá skvrna
- D - duhovka
- T - ciliárny sval
- C - cévnatka
- B - bĕlima
- P - papila, slepá skvrna
- N - oční nerv

# Akomodované Gullstrandovo oko

| plocha č.            | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $n$                  | 1,376   | 1,336   | 1,386   | 1,406   | 1,386   | 1,336   |
| $n'$                 | 1       | 1,376   | 1,336   | 1,386   | 1,406   | 1,386   |
| $r$                  | 7,7     | 6,8     | 5,33    | 2,655   | -2,655  | -5,33   |
| $d$                  | 0,5     | 2,7     | 0,6725  | 1,655   | 1,6725  |         |
| $d_1$ (od 1. plochy) | 0       | 0,5     | 3,2     | 3,8725  | 5,5275  | 7,2     |
| $x$                  | nekon.  | 27,6787 | 27,7808 | 23,4437 | 19,4392 | 15,6827 |
| $n/x$                | 0       | 0,04971 | 0,04809 | 0,05912 | 0,07233 | 0,08838 |
| $\varphi = (n'-n)/r$ | 0,04883 | -0,0059 | 0,00938 | 0,00753 | 0,00753 | 0,00938 |
| $n'/x'$              | 0,04883 | 0,04383 | 0,05747 | 0,06665 | 0,07986 | 0,09776 |
| $x'$                 | 28,1787 | 30,4808 | 24,1162 | 21,0942 | 17,3552 | 13,6663 |
| $x'-d$               | 27,6787 | 27,7808 | 23,4437 | 19,4392 | 15,6827 |         |
| $x'/(x'-d)$          | 1,01806 | 1,09719 | 1,02869 | 1,08514 | 1,10665 |         |

$$f'_R = 31,0314$$

$$\begin{aligned} x'(F') &= 13,6663 \text{ mm} \\ x'(H') &= -5,1912 \text{ mm} \\ x'(N') &= -0,4486 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f' &= 18,8575 \text{ mm} \\ \varphi'_c &= 70,8471 \text{ D} \end{aligned}$$

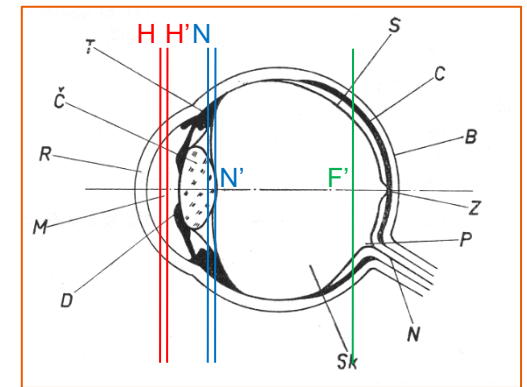
$$\begin{aligned} x_1(F') &= 20,8663 \text{ mm} \\ x_1(H') &= 2,0088 \text{ mm} \\ x_1(N') &= 6,75141 \text{ mm} \end{aligned}$$

|        | 6       | 5       | 4       | 3       | 2       | 1       |
|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|        | 1,386   | 1,406   | 1,386   | 1,336   | 1,376   | 1       |
|        | 1,336   | 1,386   | 1,406   | 1,386   | 1,336   | 1,376   |
|        | 5,33    | 2,655   | -2,655  | -5,33   | -6,8    | -7,7    |
|        | 1,6725  | 1,655   | 0,6725  | 2,7     | 0,5     |         |
|        |         |         |         |         |         |         |
| nekon. | 146,075 | 80,9477 | 54,9853 | 35,9265 | 43,4551 |         |
|        | 0       | 0,00949 | 0,01737 | 0,02521 | 0,03719 | 0,03166 |
|        | 0,00938 | 0,00753 | 0,00753 | 0,00938 | -0,0059 | 0,04883 |
|        | 0,00938 | 0,01702 | 0,0249  | 0,03459 | 0,0313  | 0,0805  |
|        | 147,748 | 82,6027 | 55,6578 | 38,6265 | 43,9551 | 12,423  |
|        | 146,075 | 80,9477 | 54,9853 | 35,9265 | 43,4551 |         |
|        | 1,01145 | 1,02045 | 1,01223 | 1,07515 | 1,01151 |         |

$$\begin{aligned} x(F) &= -12,423 \text{ mm} \\ x(H) &= 1,69193 \text{ mm} \\ x(N) &= 6,43454 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f &= -14,115 \text{ mm} \\ \varphi'_c &= 70,8471 \text{ D} \end{aligned}$$

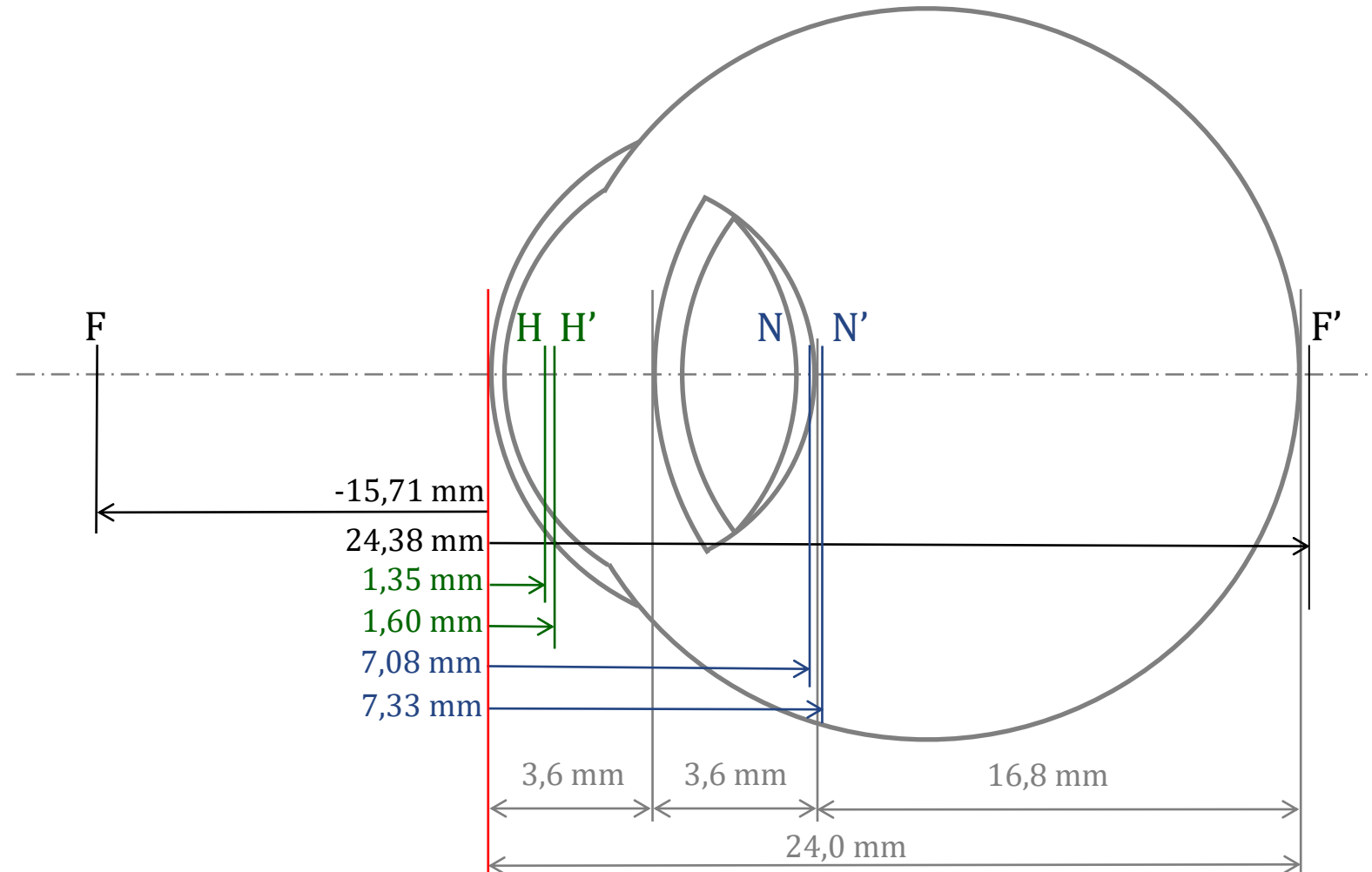
$$\begin{aligned} x_1(F) &= -12,423 \text{ mm} \\ x_1(H) &= 1,69193 \text{ mm} \\ x_1(N) &= 6,43454 \text{ mm} \end{aligned}$$



- R - rohovka
- M - komorová voda
- Č - čočka
- Sk - sklivec
- S - sítnice
- Z - žltá skvrna
- D - duhovka
- T - ciliárny sval
- C - cévnatka
- B - béliama
- P - papila, slepá skvrna
- N - očný nerv

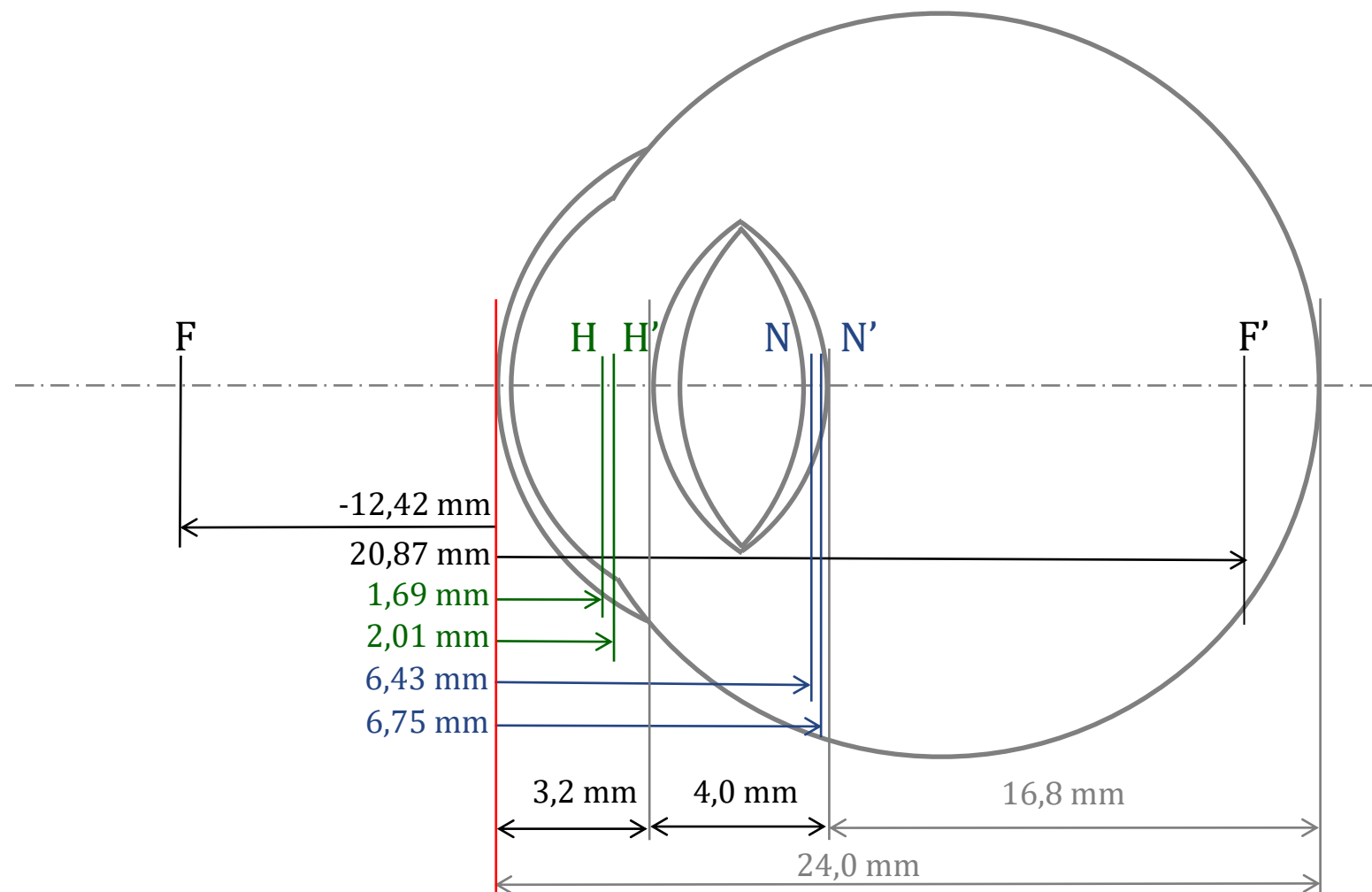
# Relaxované Gullstrandovo oko: kardinální body

| bod | poloha    |
|-----|-----------|
| H   | 1,35 mm   |
| H'  | 1,60 mm   |
| N   | 7,08 mm   |
| N'  | 7,33 mm   |
| F   | -15,71 mm |
| F'  | 24,38 mm  |



# Akomodované Gullstrandovo oko: kardinální body

| bod | poloha    |
|-----|-----------|
| H   | 1,69 mm   |
| H'  | 2,01 mm   |
| N   | 6,43 mm   |
| N'  | 6,75 mm   |
| F   | -12,42 mm |
| F'  | 20,87 mm  |





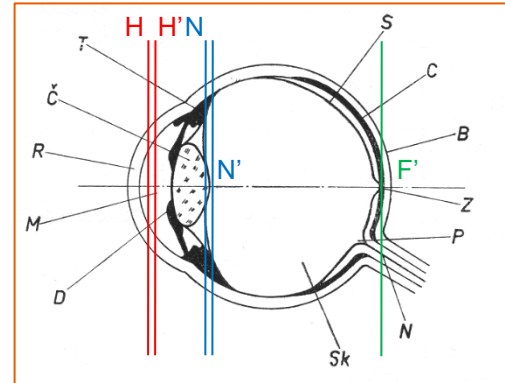
# Změna parametrů Gullstrandova oka při akomodaci

akomodační klid:

$$\begin{aligned} x_1(F) &= -15,71 \text{ mm} \\ x_1(H) &= 1,35 \text{ mm} \\ x_1(N) &= 7,08 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_1(F') &= 24,38 \text{ mm} \\ x_1(H') &= 1,60 \text{ mm} \\ x_1(N') &= 7,33 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f' &= 22,78 \text{ mm} \\ \varphi'_0 &= 58,64 \text{ D} \end{aligned}$$



čočka:

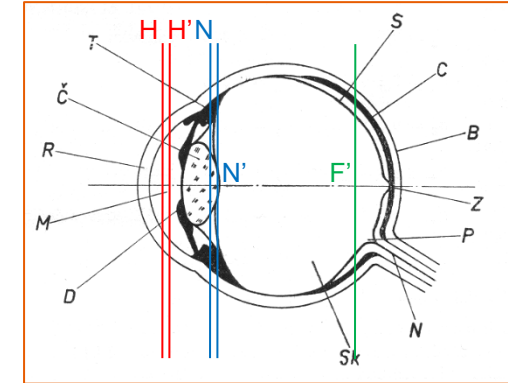
$$\varphi'_C = 19,11 \text{ D}$$

akomodační maximum:

$$\begin{aligned} x_1(F) &= -12,42 \text{ mm} \\ x_1(H) &= 1,69 \text{ mm} \\ x_1(N) &= 6,43 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x_1(F') &= 20,87 \text{ mm} \\ x_1(H') &= 2,01 \text{ mm} \\ x_1(N') &= 6,75 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f' &= 18,86 \text{ mm} \\ \varphi'_0 &= 70,85 \text{ D} \end{aligned}$$

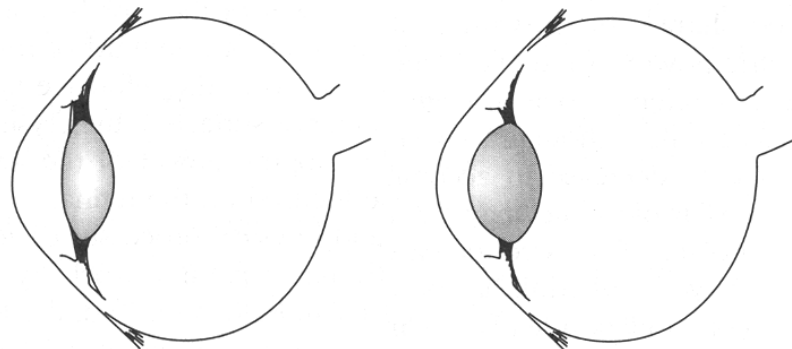


čočka:

$$\varphi'_C = 33,11 \text{ D}$$

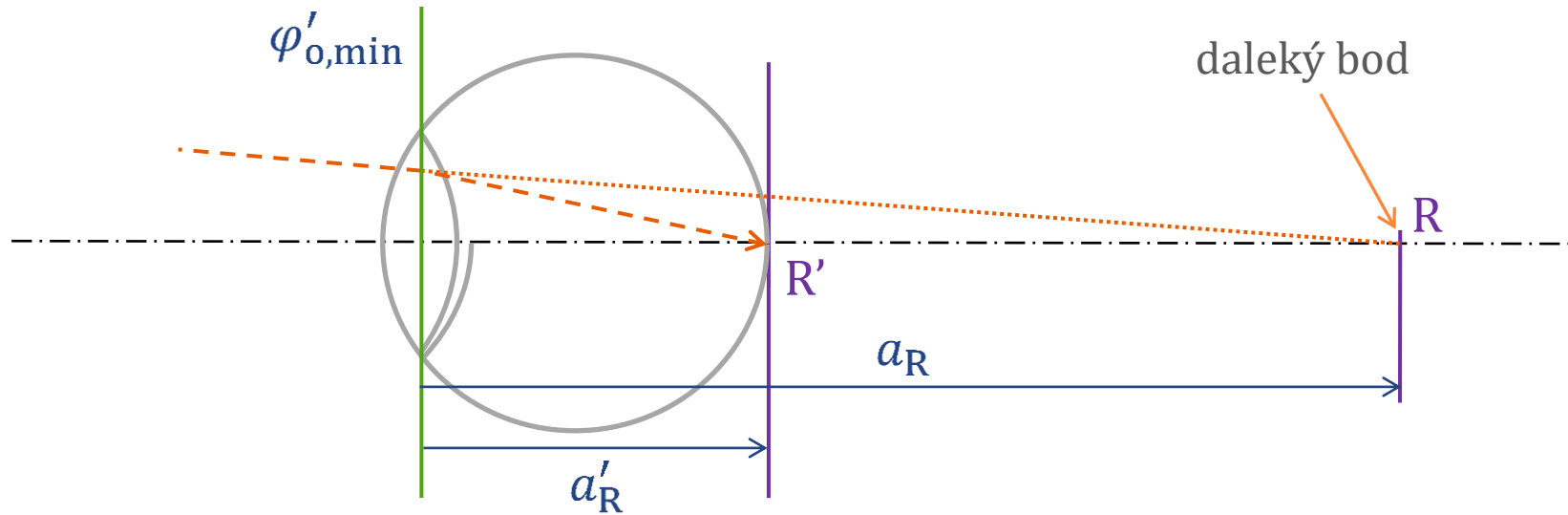
- **mohutnost čočky** se zvýší asi o +14,0 D
- **mohutnost oka** se zvýší asi o +12,2 D (21 %)
- **ohniskové vzdálenosti** se zkrátí asi o 17 %
- **hlavní roviny** se posunou směrem **od rohovky** asi o 0,35-0,40 mm
- **uzlové body** se posunou směrem **k rohovce** asi o 0,6 mm

# Změna parametrů Gullstrandova oka při akomodaci



|  | akom. klid | akom. max. |
|--|------------|------------|
| <b>Indexy lomu :</b>                   |            |            |
| rohovka .....                          | 1,376      | 1,376      |
| komorová voda a sklivce .....          | 1,336      | 1,336      |
| čočka ekvivalentní .....               | 1,406      | 1,406      |
| čočka .....                            | 1,386      | 1,386      |
| <b>Místo :</b>                         |            |            |
| první lámavá plocha rohovky .....      | 0          | 0          |
| druhé lámavé plochy rohovky .....      | 0,5        | 0,5        |
| první lám. plochy čočky .....          | 3,6        | 3,2        |
| první lám. pl. ekviv. čočky .....      | 4,146      | 3,8725     |
| druhé lám. pl. ekviv. čočky .....      | 6,565      | 5,5275     |
| druhé lám. pl. čočky .....             | 7,2        | 7,2        |
| optické centrum čočky .....            |            |            |
| <b>Poloměry zakřivení :</b>            |            |            |
| první lám. p. rohovky .....            | 7,7        | 7,7        |
| druhé lám. pl. rohovky .....           | 6,8        | 6,8        |
| ekviv. pl. čočky .....                 |            |            |
| první lám. pl. čočky .....             | 10,000     | 5,33       |
| první lám. pl. ekviv. čočky .....      | 7,911      | 2,655      |
| druhé lám. pl. ekviv. čočky .....      | -5,76      | -2,655     |
| druhé lám. pl. čočky .....             | -6,000     | -5,33      |
| <b>Optická mohutnost :</b>             |            |            |
| první lám. pl. rohovky .....           | 48,83      | 48,83      |
| druhé lám. pl. rohovky .....           | -5,88      | -5,88      |
| ekviv. pl. čočky .....                 |            |            |
| první lám. pl. čočky .....             | 5,000      | 9,375      |
| jádra čočky .....                      | 5,985      | 14,96      |
| druhé lám. pl. čočky .....             | 8,33       | 9,375      |
| <b>Rohovkový systém :</b>              |            |            |
| optická mohutnost .....                | 43,05      | 43,05      |
| místo předmětového hl. bodu .....      | -0,0496    | -0,0496    |
| místo obrazového hl. bodu .....        | -0,0506    | -0,0506    |
| předmětová ohnisková vzdálenost .....  | -23,227    | -23,227    |
| obrazová ohnisková vzdálenost .....    | 31,031     | 31,131     |
| <b>Čočkový systém :</b>                |            |            |
| optická mohutnost .....                | 19,11      | 33,06      |
| místo předmětového hl. bodu .....      | 5,678      | 5,145      |
| místo obrazového hl. bodu .....        | 5,808      | 5,255      |
| ohnisková vzdálenost .....             | 69,908     | 40,416     |
| <b>Celkový systém :</b>                |            |            |
| optická mohutnost .....                | 58,64      | 70,57      |
| místo předmětového hl. bodu .....      | 1,348      | 1,722      |
| místo obrazového hl. bodu .....        | 1,602      | 2,086      |
| místo předm. ohniska .....             | -15,707    | -12,397    |
| místo obraz. ohniska .....             | 24,387     | 21,016     |
| předm. ohnisk. vzdál. .....            | -17,055    | -14,169    |
| obraz. ohnisk. vzdál. .....            | 22,785     | 18,030     |
| místo fovey centralis .....            | 24,00      | 24,00      |
| axiální refrakce .....                 | 1,00       | -9,6       |
| místo blízkého bodu P .....            |            | -102,3     |
| skutečný střed otáčení oka C' .....    | 13,0       | 13,0       |
| místo předmětového uzlového bodu ..... | 7,078      | 6,533      |
| místo obraz. uzlového bodu .....       | 7,332      | 6,847      |
| místo vstupní pupily .....             | 3,047      | 2,668      |
| místo výstupní pupily .....            | 3,667      | 3,212      |

# Daleký bod Gullstrandova oka

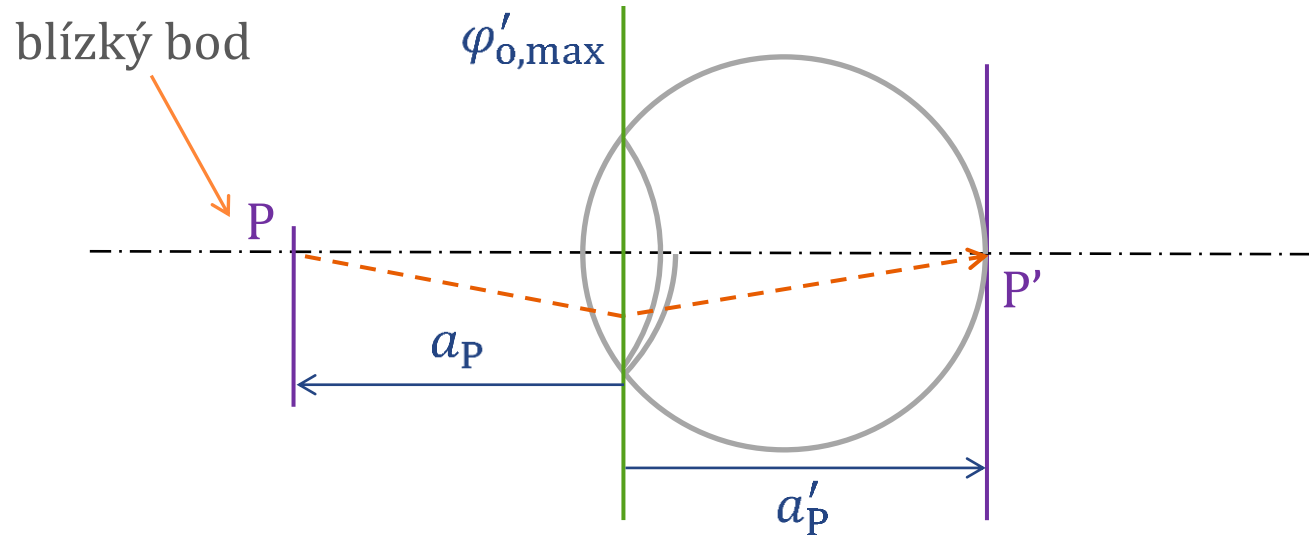


$$a_R = 1/A_R, A_R = A'_R - \varphi'_{o,min} = \frac{m_s}{a'_R} - \varphi'_{o,min} = \frac{m_s}{d_o - d_{RH_o}} - \varphi'_{o,min} = \frac{1,336}{0,024 - 0,0016} D - 58,6361 D$$

$$A_R = 1,01 D$$

$$a_R = 99 \text{ cm}$$

# Blízký bod Gullstrandova oka



$$a_P = 1/A_P, A_P = A'_P - \varphi'_{0,max} = \frac{n_s}{a'_P} - \varphi'_{0,max} = \frac{1,336}{0,024 - 0,002} D - 70,8471 D$$

$$A_R = 1,01 D$$

$$a_R = 99 \text{ cm}$$

$$A_P = -10,10 D$$

$$a_P = -9,9 \text{ cm}$$

$$A_{\check{s}} = A_R - A_P = 11,11 D$$

$$\varphi'_{0,max} - \varphi'_{0,min} = 70,85 D - 58,64 D$$

$$= 12,21 D$$

# Model oka s proměnnou akomodací (Arizona eye)

A .. accommodation in diopters

| Name     | Radius     | Conic      | Index      | Abbe | Thickness  |
|----------|------------|------------|------------|------|------------|
|          | 7.8 mm     | -0.25      |            |      |            |
| Cornea   | 6.5 mm     | -0.25      | 1.377      | 57.1 | 0.55 mm    |
| Aqueous  | $R_{ant}$  | $K_{ant}$  | 1.337      | 61.3 | $t_{aq}$   |
| Lens     | $R_{post}$ | $K_{post}$ | $n_{lens}$ | 51.9 | $t_{lens}$ |
| Vitreous | -13.4 mm   | 0.00       | 1.336      | 61.1 | 16.713 mm  |
| Retina   |            |            |            |      |            |

$$R_{ant} = 12.0 - 0.4A$$

$$K_{ant} = -7.518749 + 1.285720A$$

$$R_{post} = -5.224557 + 0.2A$$

$$K_{post} = -1.353971 - 0.431762A$$

$$t_{aq} = 2.97 - 0.04A$$

$$t_{lens} = 3.767 + 0.04A$$

$$n_{lens} = 1.42 + 0.00256A - 0.00022A^2$$

$$z = \frac{r^2 / R}{1 + \sqrt{1 - (K + 1) \frac{r^2}{R^2}}}$$

z = sag of surface

$$r^2 = x^2 + y^2$$

R = radius of curvature

K = conic constant

|              |                              |
|--------------|------------------------------|
| $K < -1$     | Hyperboloid                  |
| $K = -1$     | Paraboloid                   |
| $-1 < K < 0$ | Prolate Spheroid (Ellipsoid) |
| $K = 0$      | Sphere                       |
| $K > 0$      | Oblate Spheroid (Ellipsoid)  |

# Orientační měření akomodace

- nutný je (pseudo)emetropický stav oka
- testovací obrazec (Duaneův test, Glaserův test, zmenšená Snellenova tabule) se přibližuje k oku až do rozmazání, nebo vzdaluje od oka až do zaostření
- akomodační šíře je pak dána vergencí vzdálenosti blízkého bodu P od předmětové hlavní roviny oka takto:

$$A_{\check{s}} \approx A_R - A_P = \frac{1}{a_R} - \frac{1}{a_P} = \left| \frac{1}{a_P} \right|$$



## Relativní akomodace

- měříme schopnost oka akomodačně kompenzovat vliv (dodatečné) brýlové čočky
- **pozitivní relativní akomodace (PRA)** je absolutní hodnota nejnižší (záporné) vrcholové lámavosti *rozptylné* brýlové čočky, při níž je ještě předmět vnímán ostře
- **negativní relativní akomodace (NRA)** je absolutní hodnota nejvyšší vrcholové lámavosti *spojné* brýlové čočky, při níž je ještě předmět vnímán ostře
- při korekci presbyopie by korekční čočka měla zaručit PRA = NRA při pohledu do standardní pracovní vzdálenosti – pak je interval ostrého vidění dioptricky centrován kolem bodu pozorování
- platí:

$$A_{\check{s}} \approx \text{PRA} + \text{NRA}$$

# Definice blízkého bodu

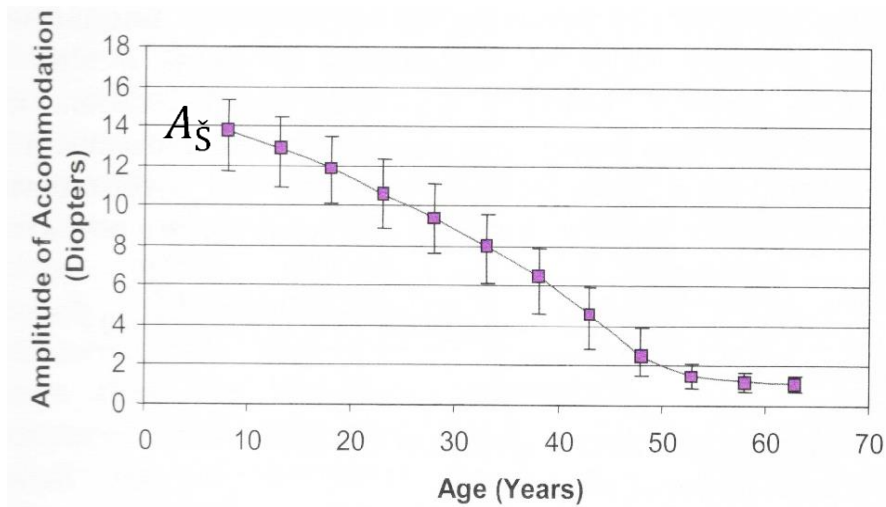
- akomodační šíře je v (pseudo)emetropickém stavu oka dána vergencí vzdálenosti blízkého bodu P od předmětové hlavní roviny oka
- **Fyzikální – manifestní blízký bod** = skutečně dosažitelný blízký bod (jak jej chápeme my)
- odpovídá mu manifestní akomodační šíře (akomodační šíře, jak ji chápeme my)
- **Fyziologický – latentní blízký bod** = bod, který by oko zobrazilo ostře při maximální kontrakci ciliárního svalu, pokud by to připustila elastická schopnost čočky
- odpovídá mu totální akomodační šíře

## Klidová (zbytková) akomodace

- při prázdném zorném poli nebo ve tmě má emetropické oko o 1,0 D – 1,5 D větší mohutnost, než minimální, což odpovídá ostrému zobrazení předmětu ze vzdálenosti 1 m – 2/3 m, tj. oko je efektivně myopické
- **noční myopie** je posun k myopii při nízkém osvětlení (cca o 1,5 D, ale i více) vlivem otvorové vady při zvětšené pupile oka, vlivem osově barevné vady při posuvu maximální spektrální citlivosti k 500 nm (Purkyňův posuv) a nadměrné akomodace
- **přístrojová myopie** je nadměrná akomodace po použití přístrojů s okuláry



# Závislost akomodační šíře na věku



J. Schwiegerling: Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics. SPIE, Bellingham 2004, s. 25.

TABLE 8-1. AMPLITUDE OF ACCOMMODATION AS A FUNCTION OF AGE

| Age (years) | $A_{\check{s}}$ | Typical Amplitude of Accommodation (diopters) <sup>a</sup> |
|-------------|-----------------|--|
| 10          |                 | 12.50  |
| 20          |                 | 9.75   |
| 30          |                 | 7.25   |
| 40          |                 | 4.00   |
| 50          |                 | 2.50   |
| 60          |                 | 1.25   |
| 70          |                 | 0.50   |
| 75          |                 | 0.00   |

<sup>a</sup>Extrapolated from the data of Donders (1864) and Duane (1912).

S. H. Schwartz : Geometrical and Visual Optics – A Clinical Introduction. McGraw Hill, New York 2002, s. 97.

- výsledky měření značně záleží na použité metodě
- akomodační šíře se zmenšuje asi o 0,25 D ročně od 20 let věku
- příčinou je zejména:
  - ztráta elasticity kapsule (asi od 30. roku věku začíná jádro čočky tuhnout)
  - růst čočky s věkem
  - redukce prostoru mezi ciliárním tělískem a okrajem čočky (růst čočky, hypertrofie ciliárního svalu), která vede ke snížení napětí zonulí

(Tunnacliffe)



# Přesný optický rozbor akomodace

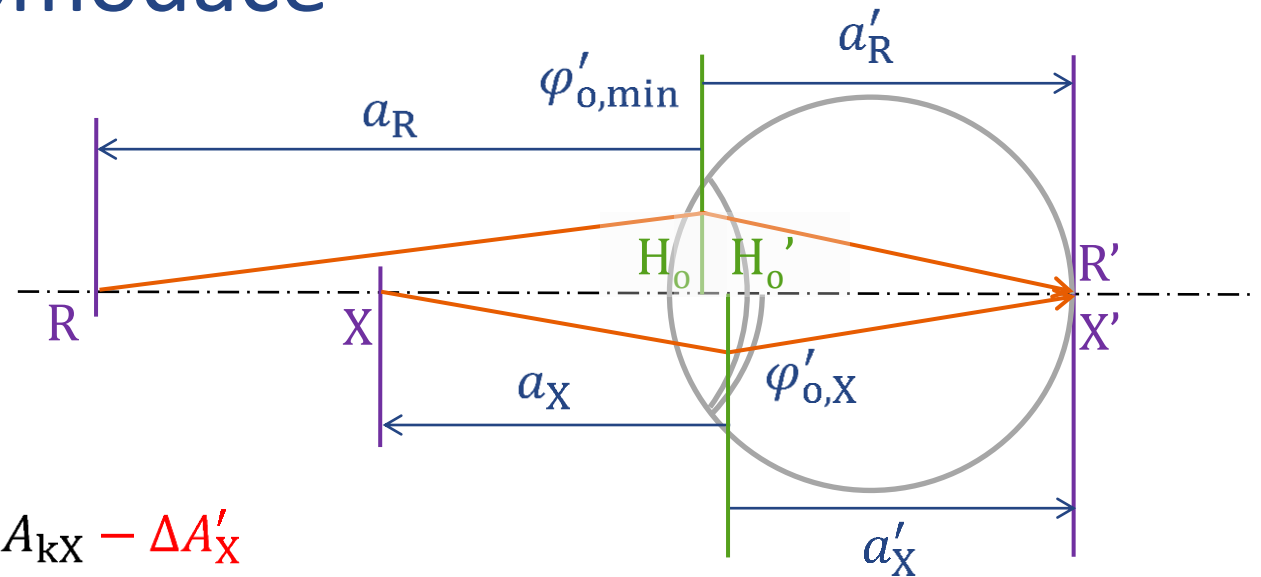
Gaussova rovnice:

$$A'_R = A_R + \varphi'_{o,\min}$$

$$A'_X = A_X + \varphi'_{o,X}$$

$$\Rightarrow A_R - A_X = \varphi'_{o,X} - \varphi'_{o,\min} - (A'_X - A'_R) = A_{kX} - \Delta A'_X$$

(**nezanedbáváme** posun hlavních rovin oka při akomodaci:  $a'_X = d_{H_0S} \neq \text{konst.}$ )



předpokládejme:

$$\Delta A'_X \approx \text{konst} \cdot A_{kX}$$

pro Gullstr. oko, X = P:

$$A_R - A_P \approx 11 \text{ D}$$

$$\varphi'_{o,\max} - \varphi'_{o,\min} \approx 12,2 \text{ D}$$

$$\Delta A'_P \approx 1,2 \text{ D}$$

$$\text{konst} \approx 0,1$$

$$\begin{aligned} A_R - A_X &= A_{kX} - 0,1 A_{kX} \\ &= 0,9 A_{kX} \\ &= 0,9 (\varphi'_{o,X} - \varphi'_{o,\min}) \end{aligned}$$

Graeffův faktor

# Akomodační interval s korekcí do dálky

Gaussova rovnice pro BČ:

$$\frac{1}{a_P + d} \approx \frac{1}{a_{PD} + d} + S'_D$$

přepočet:

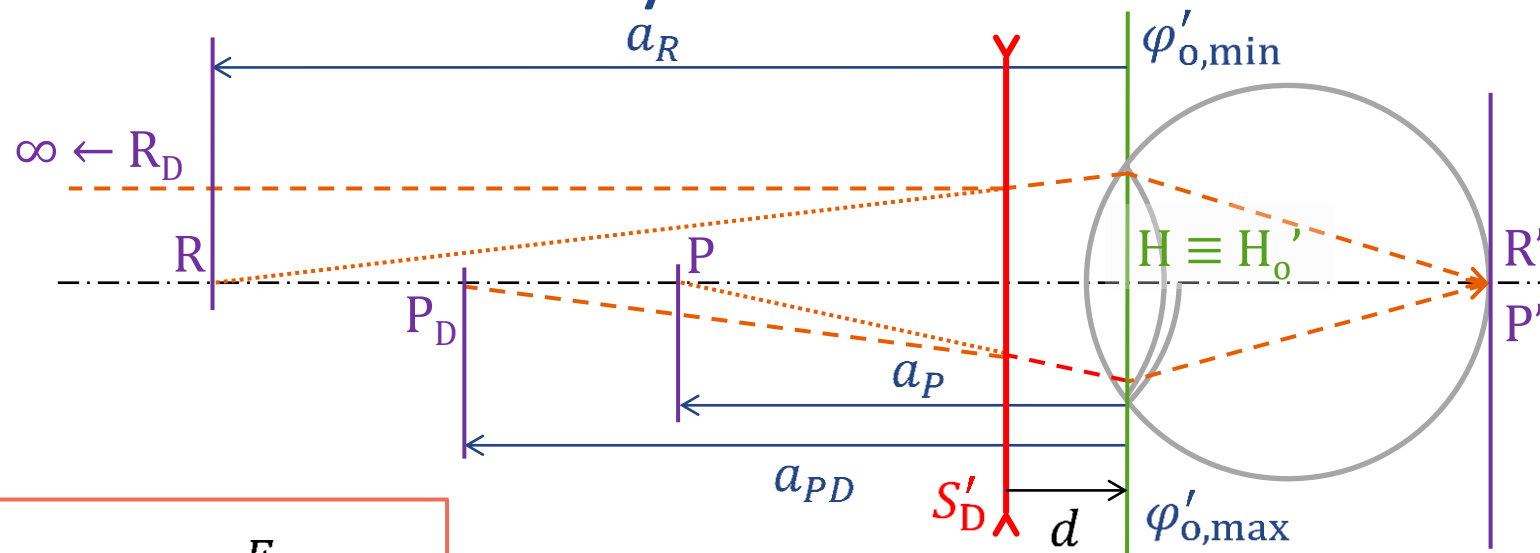
$$S'_D = \frac{A_R}{1 + A_R d}$$

akomodační šíře:

$$A_{\xi} \approx A_R - A_P = \frac{1}{a_R} - \frac{1}{a_P}$$

emetrop téže ak. šíře:

$$a_P^E \approx -\frac{1}{A_{\xi}}$$



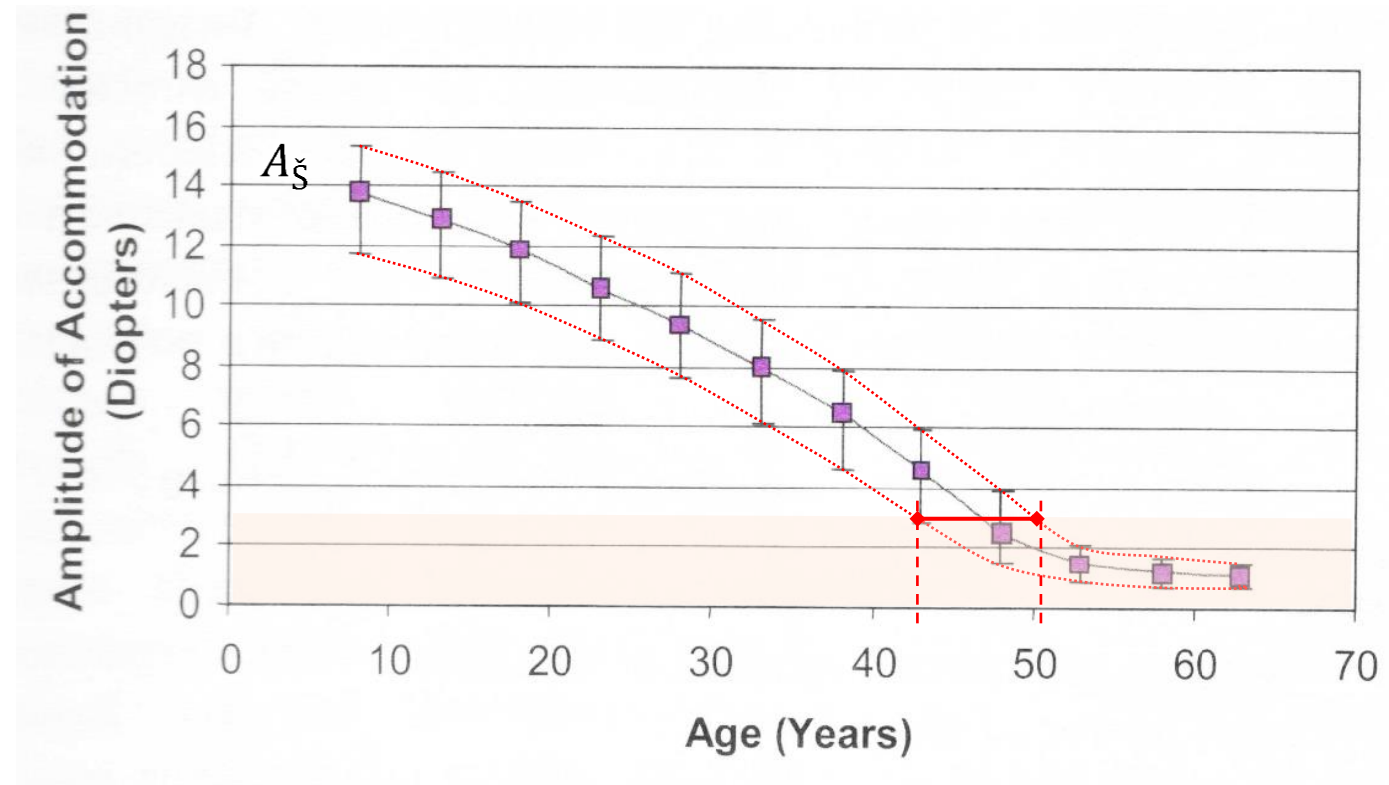
$$a_{RD} = a_R^E \rightarrow \infty$$

$$a_{PD} = a_P^E [1 + 2A_R d + (A_R d)^2] + A_R d^2 \approx a_P^E (1 + 2A_R d)$$

**Myop (hypermetrop)** má s korekcí do dálky blízký bod **blíže k oku** (dále od oka) ve srovnání s **emetropem** téže akomodační šíře.

Pro  $d = 12 \text{ mm}$  platí  $a_{PD} \approx a_P^E (1 + 0,024 A_R)$ . Vzdálenost  $a_{PD}$  umělého blízkého bodu pro korekci do dálky ( $P_D$ ) se tedy liší od hodnoty  $a_P^E$  pro emetropické oko se stejnou akomodační šíří o  $\pm 2,4 \%$  na každou dioptrii axiální refrakce.

# Presbyopie



J. Schwiegerling: Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics. SPIE, Bellingham 2004, str. 25.

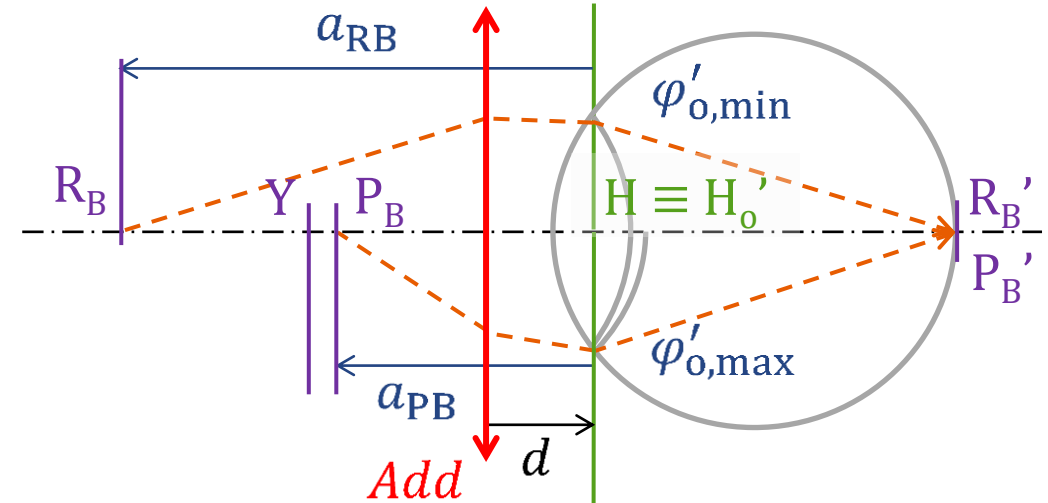
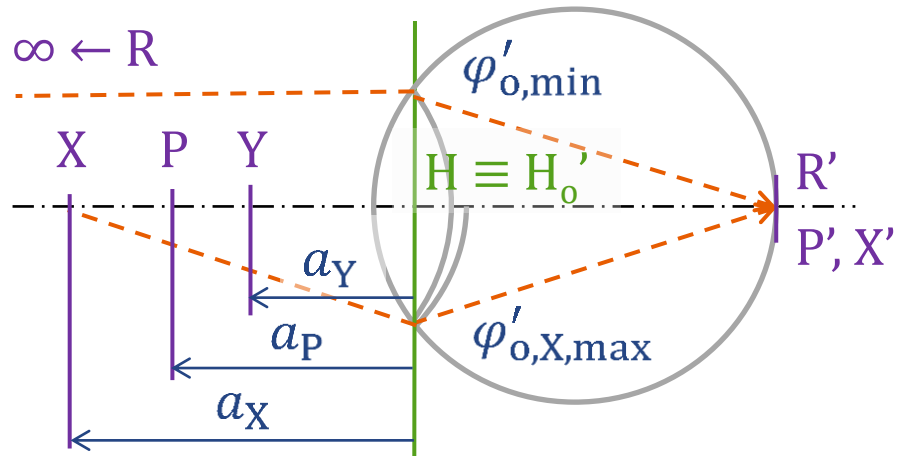
- **starozrakost, vetchozrakost:** fyziologický úbytek akomodační šíře, po 40. roce života
- pokud se blízký bod vzdálí o více než 33 cm (Tunnacliffe), příp. 25 cm od oka, tj.  $A_{\xi} < 3 \text{ D}$  (4 D)
- koriguje spojnou čočkou s mohutností  $Add$  (přídavek do blízka, adice), o níž se zvyšuje akomodace oka:  $A'_k \approx A_k + Add$
- postačuje přibližný výpočet – nepře počítáváme lámavost podle vzdálenosti brýlové čočky

# Korekce presbyopie, korekce do blízka

## Technické možnosti korekce presbyopie:

- spojná (pozitivní) brýlová čočka
- bifokální brýlové čočky (pro ametropa, dolní část obsahuje přídavek do blízka)
- trifokální brýlové čočky (s mezidílem, nepříliš rozšířené, nahrazovány progresivními)
- progresivní brýlové čočky (čočky s progresivní adicí, brýlové čočky s mohutností proměnnou ve vertikálním směru)
- kontaktní čočky, případně v kombinaci s brýlovými (monofokální, bifokální, monovision – jedna čočka koriguje do dálky, druhá do blízka, simultánní design – v oblasti pupily je zóna pro vidění do blízka i do dálky, translační design – posouvá se vůči pupile)
- multifokální či akomodující nitrooční čočky (změna tvaru)

# Akomodační interval s korekcí do blízka pro emetropa



$A_{kX} = A_R - A_X = -A_X = -1/a_X$   
 Pro emetropa ( $A_R = 0$ ) je akomodace rovna  
 záporně vzaté vergenci pro příslušný bod.

Tedy vzdálenost  $a_X = -1/A_{kX}$ .

Pro blízký bod platí  $a_P = -1/A_\zeta$ .

Pro ještě bližší bod Y je nutné akomodaci  $A_k$   
 zvýšit o adici  $Add$ , aby  $A_k + Add > A_\zeta$ , a pak

$$a_Y = -1/(A_k + Add) > -1/A_\zeta = a_P$$

Přídavek  $Add$  posune blízký bod P do nové polohy  
 $a_{PB} = -1/(A_\zeta + Add)$ . Jde o **umělý blízký bod  $P_B$**   
**pro korekci do blízka.**

Relaxované oko ( $A_k = 0$ ) s adicí  $Add$  pak pozoruje  
 ostře **umělý daleký bod  $R_B$  pro korekci do blízka**  
 v konečné vzdálenosti  $a_{RB} = -1/Add$ .

Akomodační interval je tedy:

$$(a_{RB}, a_{PB}) = \left( -\frac{1}{Add}, -\frac{1}{Add + A_\zeta} \right)$$

# Volba adice

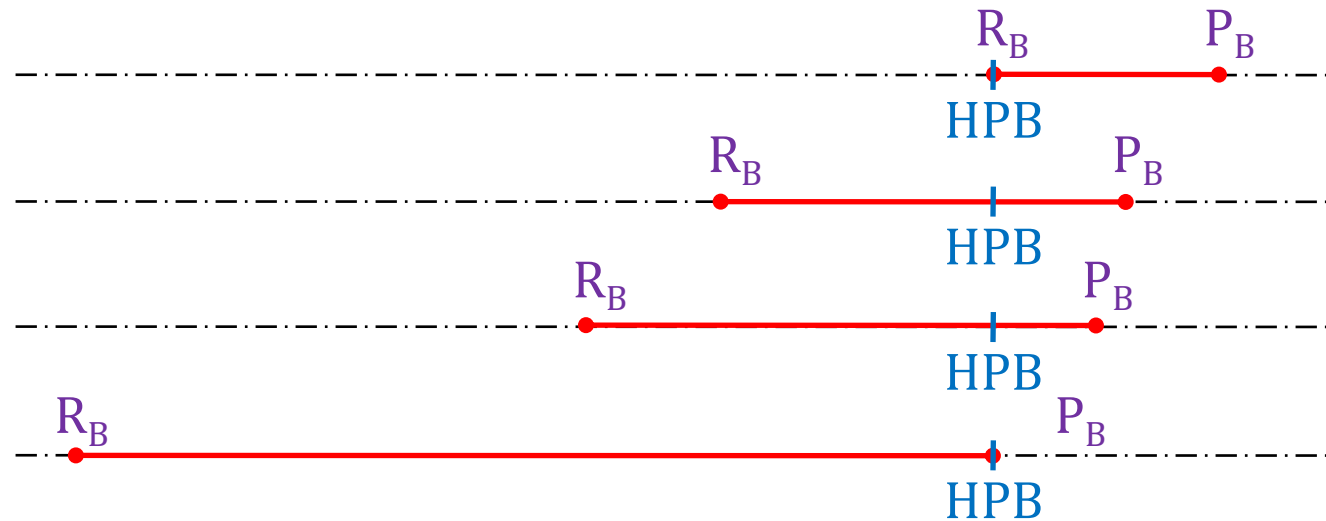
Adici volíme vzhledem k individuálně pojímané poloze hlavního pracovního bodu (HPB), do nějž umísťujeme předměty pozorované na blízko, a k jeho vzdálenosti  $h$  od oka. Přitom necháváme rezervu na krátkodobé pozorování bližších předmětů.

$$Add = -1/h \quad (\text{extrém})$$

$$Add = -1/h - A_{\xi}/2$$

$$Add = -1/h - 2A_{\xi}/3$$

$$Add = -1/h - A_{\xi} \quad (\text{extrém})$$



$$(a_{RB}, a_{PB}) = \left( -\frac{1}{Add}, -\frac{1}{Add + A_{\xi}} \right) \quad (h = -20 \text{ cm} \quad A_{\xi} = 3,0 \text{ D})$$

Pro zajímavost, podle W. F. Longa 1992 za předpokladu pracovní vzdálenosti 40 cm:  $Add (D) \approx age (Y) / 8 - 5,00 \pm 0,25$

# Korekce presbyopie pro ametropické oko

## Myopické oko

K záporné vrcholové lámavosti  $S'_D$  korekční čočky do dálky přičítáme adici  $Add$ , tím dostáváme celkovou vrcholovou lámavost  $S'_B$  brýlové čočky pro korekci do blízka  $S'_B = S'_D + Add$ .

Mohou nastat tři situace:

1.  $Add < |S'_D|$ , pak  $S'_B < 0$  (korekce do blízka slabší rozptylkou)
2.  $Add = |S'_D|$ , pak  $S'_B = 0$  (do blízka bez korekce)
3.  $Add > |S'_D|$ , pak  $S'_B > 0$  (korekce do blízka spojkou)

## Hypermetropické oko

Ke kladné vrcholové lámavosti  $S'_D$  korekční čočky do dálky přičítáme adici  $Add$ , tím dostáváme celkovou vrcholovou lámavost  $S'_B$  brýlové čočky pro korekci do blízka, pro níž vždy platí

$$S'_B = S'_D + Add > S'_D.$$

# Akomodační intervaly (intervaly ostrého vidění)

## Bez korekce

Akomodační interval je vymezen (přirozeným) dalekým a blízkým bodem oka R a P:

$$a_R = \frac{1}{A_R} \quad a_P = \frac{1}{A_R - A_\xi}$$

## S korekcí do dálky

Akomodační interval je vymezen umělým dalekým a blízkým bodem oka  $R_D$  a  $P_D$ , jejichž polohu udávají předchozí vztahy pro  $A_R \rightarrow 0$  (pseudoemetropie):

$$a_{RD} \rightarrow \infty \quad a_{PD} = -\frac{1}{A_\xi}$$

## S korekcí do blízka

Akomodační interval je vymezen umělým dalekým a blízkým bodem oka  $R_B$  a  $P_B$ , jejichž polohu udává vztah, který lze odvodit ze vztahu pro  $a_{PD}$  tak, že uvažujeme nulovou či plnou akomodaci zvýšenou o adici  $Add$  (korekce do blízka při pseudoemetropii):

$$a_{RB} = -\frac{1}{Add} \quad a_{PB} = -\frac{1}{Add + A_\xi}$$