

# UČEBNÍ TEXTY VYSOKÝCH ŠKOL

---

Universita Palackého v Olomouci

Fakulta přírodovědecká

## Teorie optických přístrojů

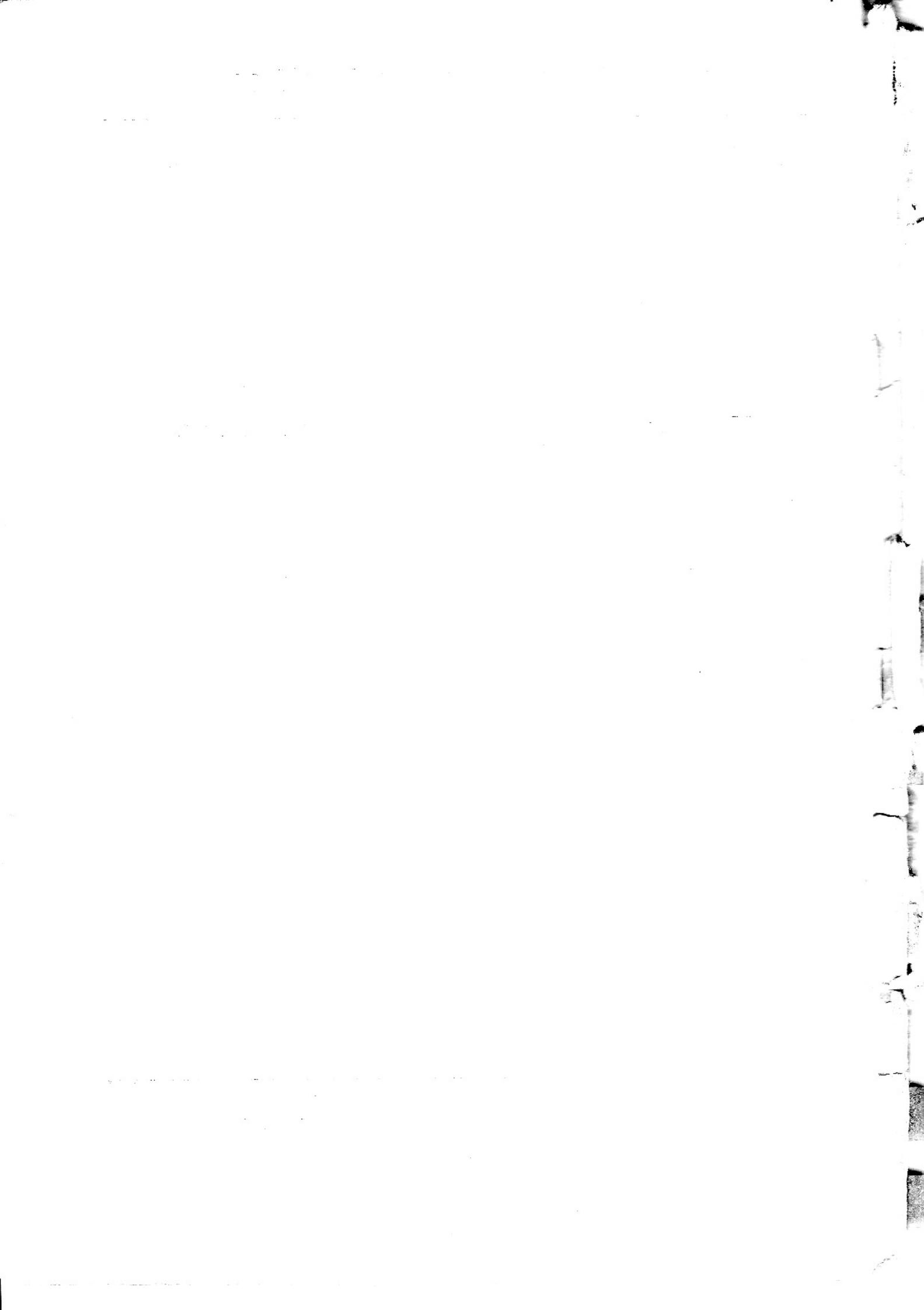
I.

Teorie a konstrukce dalekohledů a zaměřovačů

Prof. dr. Eng. Keprt

---

Státní pedagogické nakladatelství  
Praha



## 1. ÚVOD

Lidské vidění je omezeno rozlišovací mezi oka. Normální oko může od sebe rozlišit dva různé detaily, které jsou úhlově vzdáleny o 1 - 2 minuty. Např. na milimetrovém měřítku je možno rozlišit jednotlivé čárky dělení pouze potud, pokud vzdálenost 1, měřítko nebude větší než hodnota

$$L = \frac{1 \text{ mm}}{\text{arc } 1'} = 3438 \text{ mm} = 3,5 \text{ m}.$$

Podobně na Měsici, jehož vzdálenost je rovna přibližně 384.000 km, může normální pozorovatel rozlišit předměty o rozměrech, které jsou větší než hodnota

$$384.000 \cdot \text{arc } 1' = \frac{384.000}{\rho'} = 110 \text{ km}. \text{x})$$

Pozorujeme-li malé předměty, přiblížujeme je k oku až na takovou vzdálenost, ze které ještě oko vidí zřetelně pozorované předměty při maximální akomodaci. Pokud tato vzdálenost neklesne u pozorovatele průměrného věku pod 25 cm, vidí oko předměty zřetelně, aniž je třeba vyvinout zvláštní úsilí. Na předmětech, nacházejících se v této vzdálenosti, rozliší oko detaily vzájemně od sebe vzdálené o

$$\frac{250}{\rho'} = 0,07 \pm 0,1 \text{ mm}.$$

Chceme-li pozorovat předměty s jemnějšími detaily, musíme je přiblížit k oku do vzdálenosti menší než 25 cm. Abychom viděli z této vzdálenosti předměty zřetelně, musíme k jejich pozorování použít lupy, které je zobrazí do takové vhodné vzdálenosti, ve které vidí již oko předměty zřetelně. Tím se úhlová vzdálenost jednotlivých detailů předmětu zvětší, takže rozlišíme i takové detaily, které se při pozorování neozbrojeným okem jevily pod úhlem menším než 1 minuta.

Pozorujeme-li např. nebeská tělesa, nemůžeme se k nim zatím přiblížit tak, aby bychom vhodně zvětšili úhy, pod kterými se nám jeví jednotlivé jejich detaily. Zbývá nám proto pouze jediná cesta, zobrazit tato tělesa vhodnou optickou soustavou - objektivem a pozorovat příslušné jejich obrazy tak, že k nim přiblížíme oko co nejbližše s využitím lupy - okuláru. Usporádání obou optických soustav, objektivu a okuláru, tvoří princip dalekohledu, který nám umožňuje pozorovat detaily na vzdálených předmětech, které nejsou viditelné při pozorování neozbrojeným okem. Je možno říci, že toto je první úloha dalekohledu.

Dalekohled má však i druhou úlohu. Průměr oční pupily lidského oka dosahuje v úplné tmě hodnoty 6 - 8 mm. Tímto malým otvorem přichází do oka jen velmi málo světla. Proto např. může oko pozorovat pouze hvězdy do 6-té velikosti. Průměr objektivu dalekohledu často převyšuje mnichokráte, zvláště u dalekohledů astronomických, průměr oční pupily. To znamená, že objektivem prochází do oka pozorovatelskova mnohonásobně více světla. Situace je taková, jako kdybychom si při pozorování dalekohledem zvětšily průměr oční pupily na průměr objektivu. Proto je možno dalekohledem pozorovat i hvězdy menší velikosti než 6.

Je tedy možno říci, že dalekohled umožňuje přivést do oka pozorovatelskou z po-

x)  $\rho' = 3438$

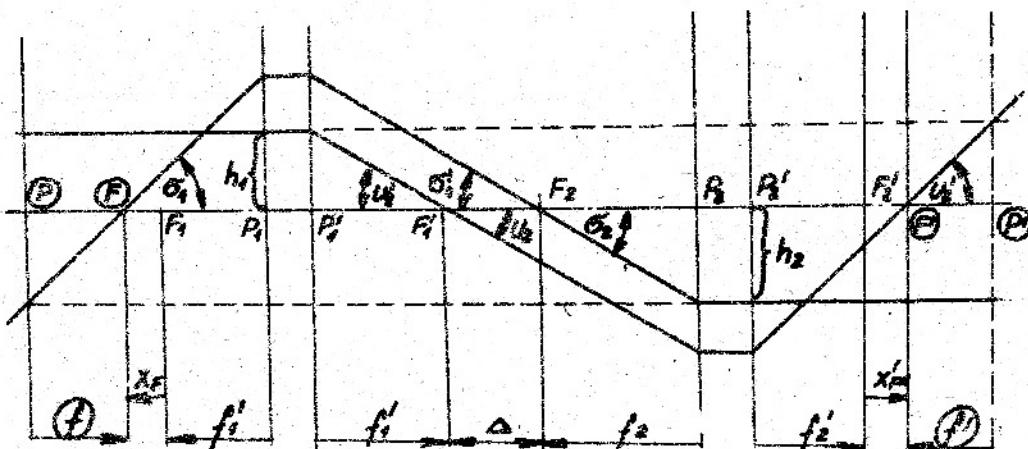
zorovaného předmětu větší množství světla než je tomu v případě jeho pozorování ne-zbrojeným okem. To je druhá úloha dalekohledu.

Z uvedeného je vidět, že princip dalekohledu je velmi jednoduchý a že možno vyjádřit tento princip jedinou větou: Obráz velmi vzdáleného předmětu vytvořený objektivem se pozoruje okulárem jako lupou.

Přesto, že princip dalekohledu je tak jednoduchý, byl dalekohled objeven teprve počátkem 17. století. Za 350 roků existence dalekohledu doznala jeho konstrukce pouze záhy souvisící s rozvojem teorie objektivu a okuláru a s rozvojem konstrukce jeho mechanické části.

## 2. APOKÁLMÍ (TELESKOPIČKÁ) SOUSTAVA

Uvažujme optickou soustavu složenou ze dvou jiných soustav. Nechť tyto soustavy jsou určeny hlavními body  $P_1, P'_1, P_2, P'_2$ , ohniskovými vzdálenostmi  $f_1, f'_1, f_2, f'_2$  a vzdáleností  $\Delta$  obrazového ohniska  $P'_1$  první soustavy a předmětového ohniska  $P_2$  druhé soustavy.



Obr. 2.1. Schéma optické soustavy složené ze dvou jiných optických soustav.

Určeme ohniskovou vzdálenost této soustavy. Podle Newtonovy zobrazenovací rovnice plynne pro druhou soustavu

$$(-\Delta), \quad x_{P'_1} = f_2 + f'_2 \quad \text{čili}$$

$$x_{P'_1} = - \frac{f_2 f'_2}{\Delta} \quad (2.1)$$

Podobně vychází pro první soustavu

$$x_{P'_1} = + \frac{f_1 f'_1}{\Delta} \quad (2.2)$$

Podle obrázku 2.1 můžeme většak psát

$$f' = \frac{h_1}{\tan u_2} \quad \text{a} \quad f = \frac{h_2}{\tan u_1}, \quad (2.3)$$

při čemž

$$n_1 = f'_1 \cdot \tan u'_1 = f'_1 \cdot \tan u_2 \quad . \quad (2.4)$$

Konečně podle obr. 2.1 plyne dál:

$$(f'_2 + x'_F) \cdot \tan u'_2 = -(\Delta - f'_2) \cdot \tan u_2 \quad . \quad (2.5)$$

Dělme-li příslušné strany rovnice (2.4) odpovídajícími stranami rovnice (2.5), dostaneme

$$\frac{h_1}{(f'_2 + x'_F) \tan u'_2} = -\frac{f'_1}{\Delta - f'_2}$$

takže

$$\frac{h_1}{\tan u'_2} = -\frac{(f'_2 + x'_F) \cdot f'_1}{\Delta - f'_2} \quad .$$

Pomocí (2.3) a (2.1) odtud pak plyne

$$\begin{aligned} f'' &= -\frac{\left(f'_2 - \frac{f'_2 f'_1}{\Delta}\right) f'_1}{\Delta - f'_2} = -\frac{\frac{f'_2 \Delta - f'_2 f'_1}{\Delta} \cdot f'_1}{\Delta - f'_2} \\ &= -\frac{f'_1 f'_2 (\Delta - f'_2)}{\Delta (\Delta - f'_2)} = -\frac{f'_1 f'_2}{\Delta} \quad . \end{aligned} \quad (2.6)$$

Přiblížme-li obě uvažované soustavy k sobě tak, aby obrazové ohnisko  $F'_1$  první soustavy splynulo s předmětovým ohniskem  $F_2$  druhé soustavy, pak  $\Delta = 0$  a ze vztahu (2.6) vychází, že  $f'' = \infty$ .

To znamená, že ohniska této soustavy leží v nekonečnu. Takovou soustavu nazýváme afokální nebo teleskopickou.

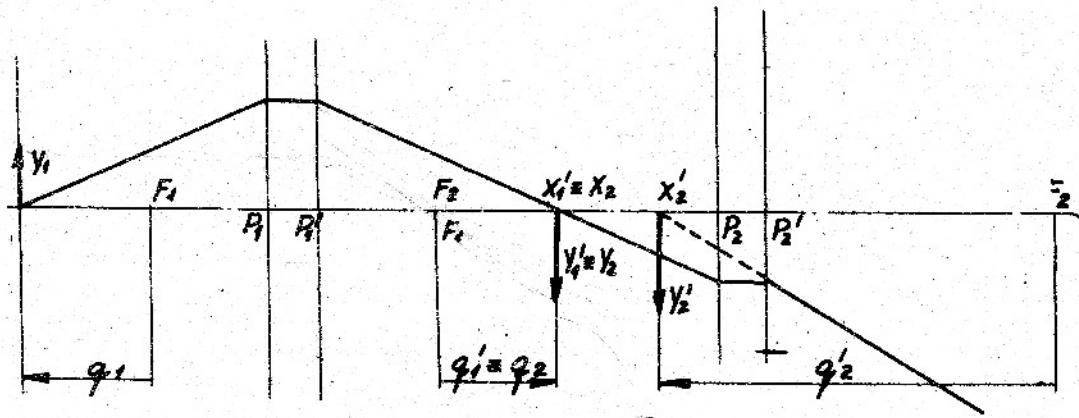
Uvažujme na optické osi této soustavy předmětový bod  $X_1$  a v něm kolmou vlničku  $y_1$ . Soustava nám zobrazí tento bod do bodu  $X'_2$  a vlničku  $y_1$  do vlničky  $y'_2$ .

Nechť  $n_1, n_2$  značí příční světložení obou soustav a nechť  $n_1$  je index lomu prostředí před první a  $n'_j$  index lomu prostředí za druhou soustavou. Potom pro světlení uvažované soustavy plyne

$$\left. \begin{aligned} m &= n_1 \cdot n_2 \\ a &= \frac{n'_1}{n_1} \cdot m^2 \\ f' &= \frac{n_1}{n'_j} \cdot \frac{1}{m} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

Podle obr. 2.2 (viz str. 6 nahoře) plyne

$$\left. \begin{aligned} n_1 &= -\frac{q'_1}{f'_1} \\ n_2 &= -\frac{q'_2}{f'_2} = -\frac{f_2}{q_2} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$



Obr. 2.2 Ke zvětšení afokální soustavy.

Z první rovnice 2.7 pak vychází

$$m = m_1 \cdot m_2 = \frac{q'_1}{f'_1} \cdot \frac{f'_2}{q'_2} .$$

V případě teleskopické soustavy je

$$q'_1 = q_2$$

$$n'_j = n_1 = 1 ,$$

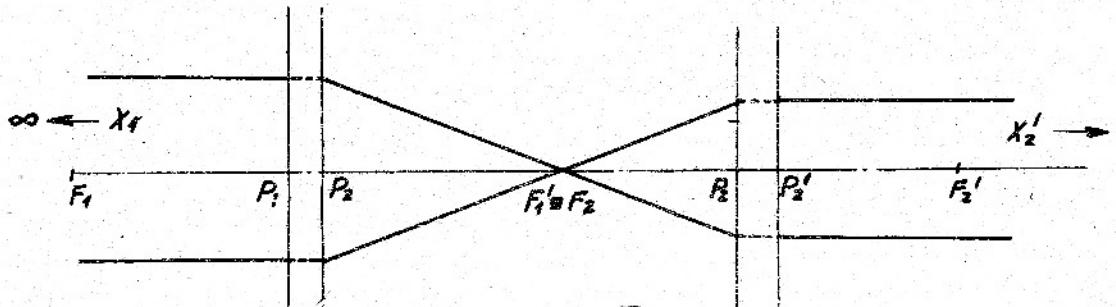
takže

$$\left. \begin{aligned} m &= \frac{f'_2}{f'_1} = -\frac{f'_2}{f'_1} \\ a &= \left( \frac{f'_2}{f'_1} \right)^2 \\ f' &= -\frac{f'_1}{f'_2} \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Ze vztahů (2.9) vyplývá, že u teleskopické soustavy jsou všechna tři uvažovaná zvětšení nezávislá na souřadnicích  $q$  a  $q'$  sdruženého páru bodů  $X_1$  a  $X'_2$ , nebo jinak řečeno, že uvažovaná zvětšení jsou stejná pro každý libovolný pár bodů a že proto tvoří charakteristické konstanty soustavy.

### 3. DALEKOHLED

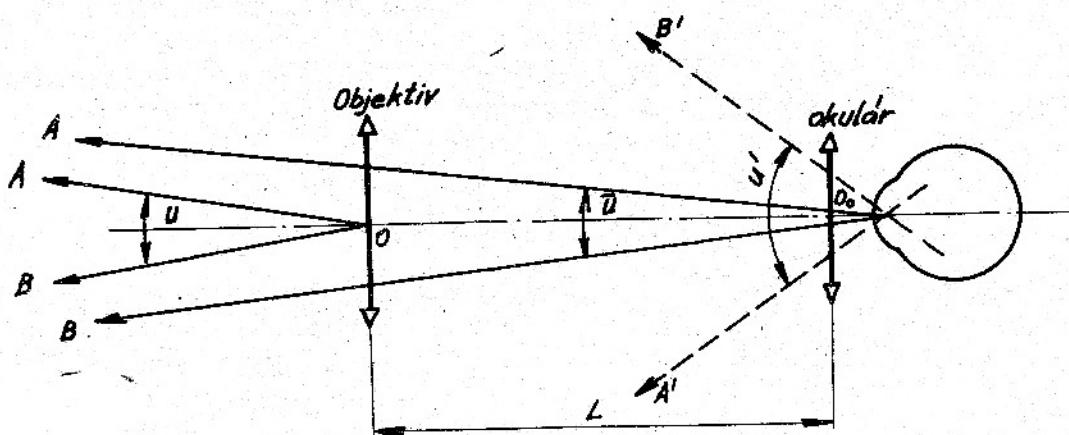
Předpokládejme nyní, že předmětový bod  $X_1$  leží v nekonečnu. Potom i jeho obraz bude ležet v nekonečnu. Jinak řečeno, paprsky, vstupující do dalekohledu jako rovnoběžný paprskový svazek, vystupují z dalekohledu opět jako rovnoběžný paprskový svazek, jak je to patrné z obr. 3.1. (viz str. 7 nahoře). Přiložíme-li za okulár oko, bude vidět obraz předmětu vytvořený dalekohledem bez akomodace. V tomto případě bude pracovat teleskopická soustava jako dalekohled. Dalekohledu se používá, jak již bylo uvedeno, k pozorování velikých, velmi vzdálených, často nedostupných předmětů. Proto nelze stanovit jejich příčné rozměry a jejich velikost se měří pak úhly, pod kterými se jeví našemu oku. Z toho důvodu se charakterisuje také zvětšení dalekohledu zvětšením úhlovým  $f'$ , na rozdíl od mikroskopů, kde se jejich zvětše-



Obr. 3.1. Peprskový svazek procházející dalekohledem.

ní vyjadřuje příčným zvětšením  $m$ . Nechť  $u'$  značí úhel, pod kterým se jeví ze středu oční pupily obraz  $A'B'$  úsečky  $AB$  vytvořený dalekohledem a  $\bar{u}$  úhel, pod kterým se jeví tato úsečka při pozorování neozbrojeným okem. Potom poměr  $\frac{u'}{\bar{u}}$ , nebo jemu blízký poměr tangent těchto úhlů, je zvětšením  $\Gamma$  dalekohledu a platí

$$\Gamma = \frac{\tan u'}{\tan \bar{u}} \quad (3.1)$$



Obr. 3.2. Ke zvětšení dalekohledu.

Zvětšení  $\Gamma$  dané vztahem (3.1) prakticky souhlasí s úhlovým zvětšením dalekohledu, daným vztahem

$$\Gamma' = \frac{\tan u'}{\tan \bar{u}} \quad , \quad (3.2)$$

kde  $u$  značí úhel, pod kterým se jeví tatáž předmětová úsečka při pozorování neozbrojeným okem ze středu objektivu (přesněji z bodu, který je obrazem středu oční pupilly vytvořeným dalekohledem). Jak je vidět z obr. 3.2, úhly  $u$  a  $\bar{u}$  se liší jen velmi málo, neboť jejich vrcholy jsou od sebe vzdáleny o délku  $L$  dalekohledu, která je vždy zanedbatelná vzhledem ke vzdálenostem pozorovaných předmětů. Je tedy možno psát

$$\Gamma = \Gamma' \quad (3.3)$$

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, jsou všechna zvětšení teleskopické soustavy nezávislá na poloze předmětu. Tato vlastnost teleskopických soustav, které platí i pro dalekohledy, se často s výhodou využívá při určování zvětšení dalekohledu. Umístíme-li v jakékoli rovině kolmé na optickou osu před objektivem nedale-

ko od objektivu skleněnou desátku a lineární stupnice (např. milimetrovou), pak je možno vždy najít za okulárem skutečný obraz této stupnice. Změříme-li velikost dílku obrazu stupnice vzhodným zvětšením, např. mikroskopem nebo dynametrem, určíme příčné zvětšení soustavy jako poměr dílku obrazu stupnice s dílkom zobrazované stupnice. Hledané zvětšení dalekohledu je pak rovna pěvrcené hodnotě načteného příčného zvětšení.

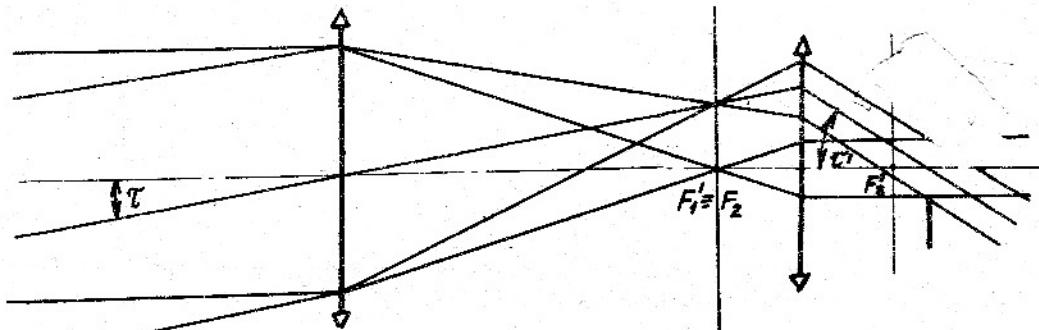
Jak plyne ze vztahu (2.3), je možno zvětšení dalekohledu chápát takto: Předmět je dalekohledem  $\Gamma$ -krát příčně zmenšen s  $\Gamma^2$ -krát přiblížen. Proto jeho obraz se jeví  $\Gamma$ -krát uhlově zvětšen.

#### 4. ROZDÍLNÉ FUNKCE OBJEKTIVU A OKULÁRU DALEKOHLEDU

Jak bylo v první kapitole uvedeno, skládá se každý dalekohled ze dvou částí - objektivu a okuláru. Funkce obou těchto částí jsou podstatně rozdílné, když zvětšení dalekohledu je velké, jak tomu bývá zvláště u dalekohledů astronomických.

Na obr. 4.1 je vidět, že průměry osové i šikmých paprskových svazků procházejících objektivem jsou velké a úhly příslušných hlavních paprsků s optickou osou jsou malé. U okuláru je tomu naopak. Průměry paprskových svazků procházejících okulárem jsou malé, zatím co úhly hlavních paprsků s optickou osou jsou veliké. Z této skutečnosti pak vyplývají podmínky na korekci objektivu a okuláru. Proto u objektivu není třeba dbát na pečlivém vykorigování optických vad závisajících na zorném poli. Stačí dobré vykorigovat otvorovou vadu, komu, tj. odchylku od sínové podmínky a barevnou vadu polohy.

U okuláru je třeba naopak dobré vykorigovat barevnou vadu velikosti, astig-



Obr. 4.1. Průchod osového a šikmých paprskových svazků dalekohledem.

tismus a zklenutí pole a pokud možno i zkreslení. Otvorová vada a barevná vada polohy se u okuláru málo projevují vzhledem k malému průměru příslušných parsových svazků.

Věsimme si ještě požadavků kladených na objektiv a okulér z hlediska výroby. V tomto případě je situace obrácená než v případě korekce. Objektiv musí být vyroben přesněji než okulár, neboť vady způsobené na zobrazení nepřesnosti výroby objektivu jsou pozorovány okulárem o poměrně velkém zvětšení a mohou být proto okem viditelné. U okuláru je tomu naopak, neboť za okulárem stojí lidské oko, které je jako optický přístroj velmi nedokonalé, takže vady způsobené nepřesností výroby okuláru nejsou tak snadno zjistitelné. Z těchto důvodů se nekladou na výrobu okuláru tak přísné požadavky jako na výrobu objektivu.

Doposud jsme uvažovali případ dalekohledu o velkém zvětšení. Vášněm si proto nyní ještě případu dalekohledu s malým zvětšením. V tomto případě nelze rozdělit požadavky na korekci optických vad tak jednoduše mezi objektiv a okulár. U dalekohledů o zvětšení menším než 10x, je možno optické vady obou částí dalekohledu vzájemně kompenzovat. Optická soustava dalekohledu se musí korigovat jako celek, tj. průchod paprsků se sleduje početně celým dalekohledem. Kompenzace vad obou částí dalekohledu se však nemůže provést ve všech případech. Je-li např. nutno umístit v zorném poli dalekohledu sámerný obrazec nebo stupnice, které zaujmají větší část zorného pole, je nutno umístit v obrazové rovině objektivu nebo v předmětové rovině okuláru planparallelní skleněnou desítku, na které je vyryt nebo fotochemicky nanesen tento sámerný obrazec nebo stupnice. Potom je nutno korigovat objektiv nebo okulár jako samostatný celek tak, aby příslušný obraz byl rovný. Proto v těchto případech je korekce dalekohledů o malém zvětšení daleko obtížnější, zvláště, když je požadováno velké zorné pole.

## 5. ROZDĚLENÍ DALEKOHLEDŮ

Objektiv každého dalekohledu je tvořen spojnicí soustavou. Okulár může být tvoren spojnou nebo rozptylnou soustavou. Podle toho dělíme dalekohledy na:

- a) Keplerovy (hvězdářské) se spojním okulárem,
- b) Galileovy (holandské) s rozptylným okulárem.

Objektiv dalekohledu může být tvoren buď soustavou čoček nebo zrcadlem. Podle toho dělíme pak dalekohledy na:

- a) refraktory s čočkovými (lámovými) objektivy,
- b) reflektory se zrcadlovými (odrazenými) objektivy.

Vlastnosti dalekohledů Keplerových a Galileových budou podrobně probrány dál. Vášněm si proto na tomto místě blíže vlastnosti refraktorů v porovnání s vlastnostmi reflektorů.

Přednosti refraktorů spočívají v tom, že

- a) jakost objektivu se nemění s časem, jak je tomu v případě reflektorů, kdy odrazená kovová plocha slepne a to i v případech novějších zrcadel používajících stálejší hliníkových odrazených vrstev,
- b) centrování čočkového objektivu je stálejší než centrování zrcadlového objektivu, zvláště u velkých astronomických dalekohledů,
- c) deformace čočkového objektivu vyvolané vlastní váhou jsou méně nebezpečné než je tomu u zrcadlových objektivů velkých rozměrů, neboť deformace jedné plochy čočky je kompenzována opačnou deformací druhé plochy čočky, zatím co u zrcadlového objektivu může mít deformace jediné odrazené plochy značný vliv na jakost obrazu,
- d) u refraktorů není mezi objektivem a okulárem umístěna pomocná plocha, jak je tomu u zrcadlových dalekohledů, u nichž např. bývá umístěna hyperboloidická nebo elipsoidická odrazená plocha, jejíž objímka vyvolává změny ohybového obrazce, které často mají podstatný vliv na jakost obrazu,
- e) konečně refraktor je možno konstruovat jako celek uzavřený přístroj, čímž jsou jeho jednotlivé části chráněny nejen před prachem, ale čímž se především zabrání proudění vzduchu mezi objektivem a okulárem, které vyvolává snížení jakosti obrazu.

K nedostatkům refraktorů patří především:

a) barevná veda. Je sice možno potlačit sekundární spektrum použitím zvláštních skel, ale to vede současně k snížení relativního otvoru, a ke snížení životnosti objektivu s ohledem na menší chemickou odolnost použitych speciálních skel,

b) větší nestejnorođost skla použitého k výrobě objektivu vede k snížení jakosti obrazu,

c) sklo objektivu pochltí značnou část světla zvláště v oblasti ultrafialové. Tato nepřijemná vlastnost čočkových objektivů vzrůstá s průměrem, neboť současně narůstá tloušťka čoček,

d) ke ztrátám světla dochází i při odrazu na jednotlivých plochách čoček objektivu,

e) tubus dalekohledu bývá nežádoucne dlouhy.

Všimneme-li si přednosti zrcadlového objektivu, můžeme říci, že spočívají především:

a) v úplné achromasii objektivu,

b) s ohledem na úplnou achromasiu je možno dosáhnout u zrcadlových objektivů až relativních otvorů 1:3, zatím co u čočkových objektivů větších dalekohledů dosahuje relativní otvor hodnot 1:15 až 1:18,

c) velké relativní otvory zrcadlových objektivů umožňují poměrně krátkou konstrukci celého dalekohledu,

d) na materiál, ze kterého je zhotoven objektiv nejsou kladený žádné požadavky z hlediska optických konstant, nýbrž pouze z hlediska mechanických vlastností,

e) zvětšení průměru objektivu nevede k růstu ztrát světla, jak je tomu u objektivů čočkových,

f) při vhodné volbě materiálu pro zhotovení odrazené vrstvy se může dosáhnout dobré odraživosti pro libovolnou oblast včetně oblasti ultrafialové,

g) výroba zrcadlového objektivu si vyžádá menších nákladů než výroba objektivu čočkového.

K hlavním nedostatkům zrcadlového objektivu patří:

a) zrcadlový objektiv není vhodný pro přesné měření,

b) na odrazenou plochu jsou kladený poměrně vysoké požadavky z hlediska její pravidelnosti,

c) objektiv je velmi citlivý na tepelné a mechanické deformace,

d) odrazená vrstva poměrně rychle slepne a je jí nutno periodicky obnovovat,

e) dalekohled nelze zabudovat do uzavřeného tubusu a není možno tedy vyloučit nepříznivé vlivy proudění vzduchu mezi objektivem a okulárem,

f) pomocná zrcadla umístěná mezi objektivem a okulárem zvětšují ztráty světla a ovlivňují jakost obrazu,

g) zorné pole zrcadlových dalekohledů jscou menší než zorná pole čočkových dalekohledů.

Na základě uvedených přednosti a nedostatků obou typů dalekohledů je možno podle úkolu, který má být řešen, se rozhodnout pro volbu vhodnějšího typu dalekohledu.

Před úkolem volit vhodný typ dalekohledu jsou často postaveni astronomové amateri, kteří jsou ve většině případů odkázáni při zajišťování vhodného dalekohledu na vlastní výrobu.

Pro amatérskou astronomii se vystačí s dalekohledem o průměru objektivu do 250 mm.

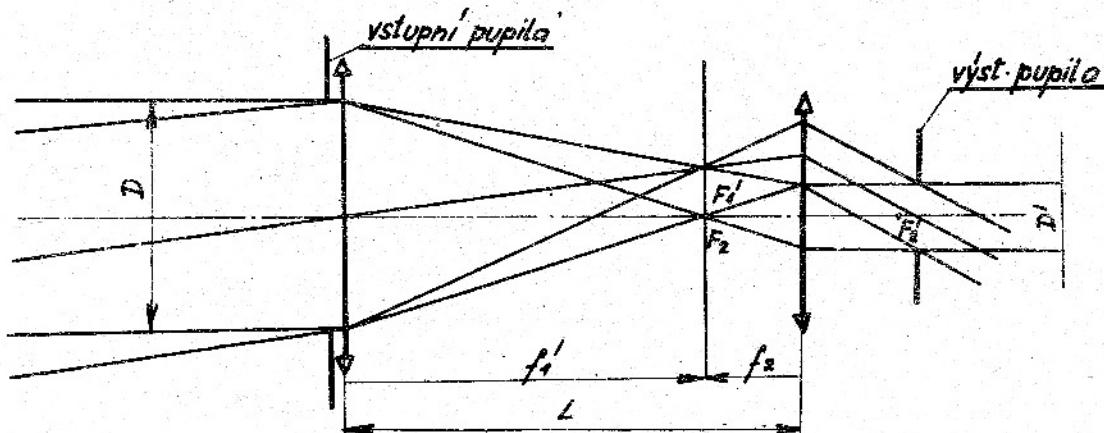
Má-li se astronom amatér rozhodnout, který typ dalekohledu do průměru 250 mm má volit, musí zvážit podle předchozích úvah, že:

- a) u zrcadlových objektivů do průměru 250 mm dochází k větším ztrátám světla než u čočkového objektivu stejného průměru. Dobrý refraktor umožnuje vidět hvězdy o 1/2 světelné velikosti slabší než reflektor stejného průměru s čerstvě postříbenou odraznou plochou,
- b) zorné pole reflektoru je menší než zorné pole refraktoru,
- c) refraktor je snadněji demontovatelný a proto snadněji přenosný,
- d) reflektor do uvažovaného průměru dává jasnější a čistější obraz, zvlášt v případě protáhlých předmětů,
- e) reflektor má nesrovnatelně menší rozměry než refraktor stejného průměru,
- f) reflektor je možno vyrobít i v amatérských podmínkách,
- g) materiál pro objektiv reflektoru se snadněji zajistí než vhodné optické sklo potřebných optických konstant pro čočkový objektiv.

Zvážíme-li uvedené skutečnosti, pak pro astronoma amatéra zbývá jediné rozhodnutí pro volbu reflektoru.

## 6. KEPLEROV (HVĚZDÁŘSKÝ) DALEKOHLED

Jak již bylo uvedeno, objektiv i okulár Keplerova dalekohledu je tvořen spojou soustavou. Z obr. 6.1 vyplývá, že obrazové ohnisko  $F'_1$  objektivu splývá s předmětovým ohniskem  $F_2$  okuláru. V obrazové ohniskové rovině objektivu vzniká tedy sku-



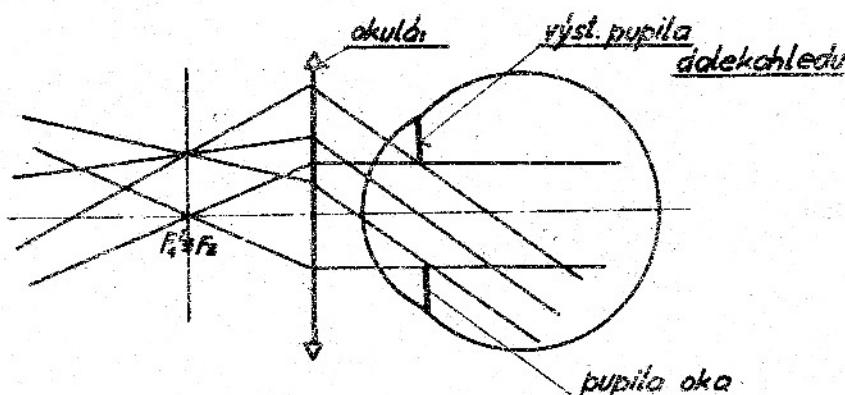
Obr. 6.1. Průchod paprsků Keplerovým dalekohledem.

tečný obraz předmětu a je tedy možno v této rovině umístit zámernou ploténku s vhodnou osnovou. Proto Keplerov dalekohled je možno použít pro zaměřování. Obraz je sice převrácený, což při velké většině měření (např. geodetických nebo labora-

torních apod.) není na závadu. Zámerné latě, pokud jsou opatřeny dělením a číselováním, je možno orientovat tak, aby jejich obraz se pozorovateli jevil vzpřímený.

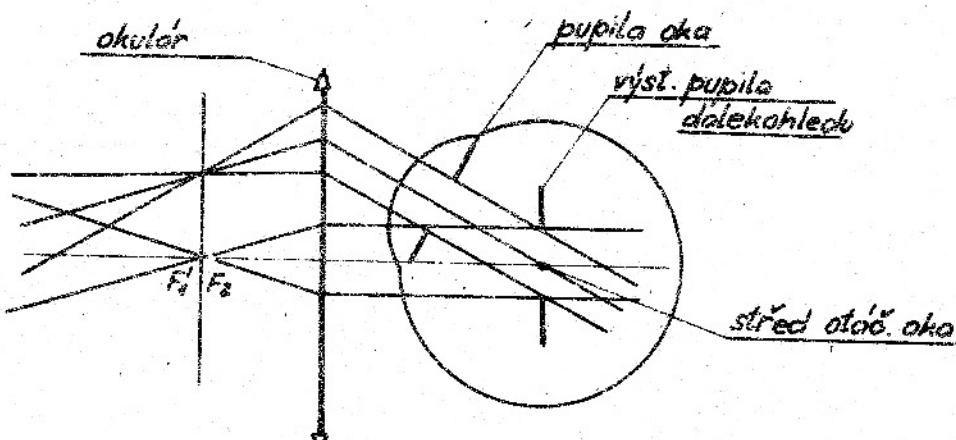
Důležitým parametrem každého dalekohledu je vstupní a výstupní pupile. O těchto pupilech bude podrobně pojednáno později. Na tomto místě stačí jenom uvést, že vstupní pupila Keplerova dalekohledu je vždy tvořena objímkou objektivu. Její obraz, vytvořený okulárem, je pak výstupní pupilou.

Má-li oko pozorovateleco přehlédnout celé zorné pole, je nutné, aby pupila oka splynula s výstupní pupilou dalekohledu, jak je to naznačeno na obr. 6.2.



Obr. 6.2. Umístění oka vzhledem k poloze výstupní pupily dalekohledu.

Je-li zorné pole okuláru větší než je zorné pole klidného oka, tj. větší než  $70^\circ$ , potom je nutné k přehlédnutí celého zorného pole okem v očním důlku otěžet. Proto v těchto případech je výhodné umístit oko vzhledem k výstupní pupile dalekohledu tak, aby střed jeho otěžení splynul se středem výstupní pupily dalekohledu, jak je to naznačeno na obr. 6.3.

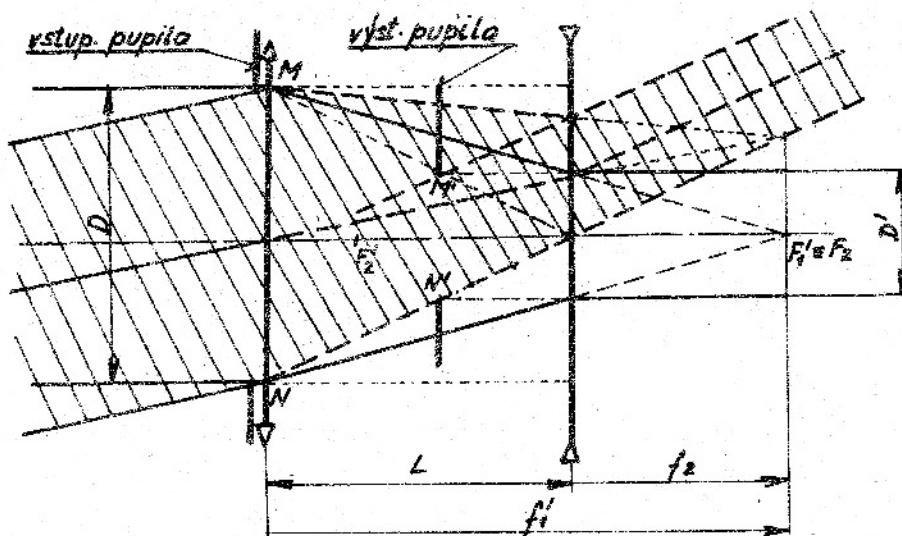


Obr. 6.3. Umístění oka vzhledem k poloze pupily dalekohledu, je-li zorné pole okuláru větší než  $70^\circ$ .

Jak je patrné z obr. 6.1, je celková délka dalekohledu Keplerova, nepřihlížíme-li k tloušťce objektivu a okuláru, rovna součtu ohniskových vzdáleností objektivu a okuláru.

## 7. GALILEOV (HOLANDSKÝ) DALEKOHLED

Jak bylo uvedeno, holandský dalekohled má opět spojny objektiv, ale okulár je tvořen rozptylnou soustavou. Jak je patrné z obr. 7.1, splývá opět obrazové ohnisko  $F_1$  objektivu s předmětovým ohniskem  $F_2$  okuláru. Vzhledem k tomu, že okulár je tvo-



Obr. 7.1. Průchod paprsku holandským dalekohledem.

řen rozptylnou soustavou, není možné v obrazové ohniskové rovině objektivu umístit závěrnu plotáku a není proto možné holandský dalekohled použít k zaměřování.

Na rozdíl od Keplerova dalekohledu dává holandský dalekohled vzpřímený obraz a je ho možné proto s výhodou použít jako pozorovacího dalekohledu. Jeho délka  $L$  je rovna rozdílu ohniskové vzdálenosti objektivu a ohniskové vzdálenosti okuláru.

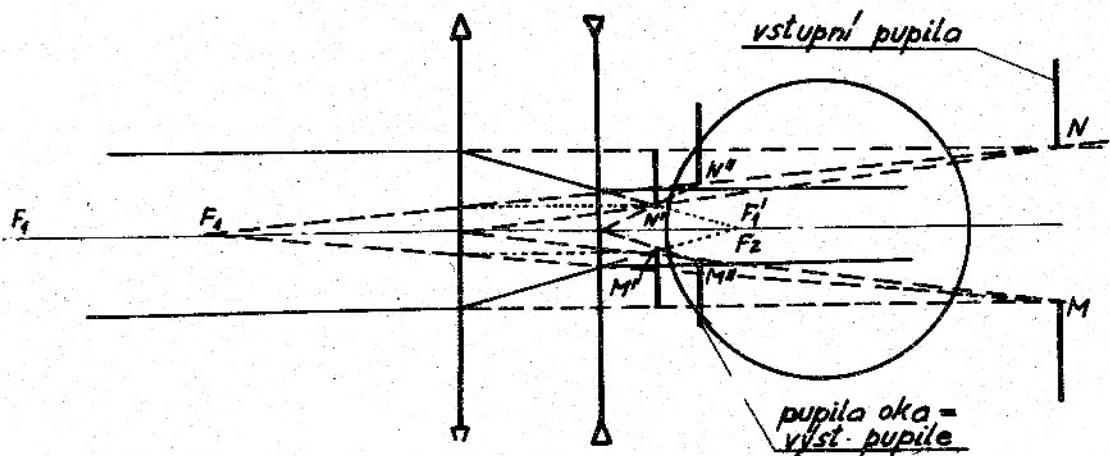
Vstupní pupila holandského dalekohledu splývá také s objímkou jeho objektivu. Výstupní pupila, která je obrazem této objímky, vytvořeným rozptyleným okulárem, je neskutečná a leží uvnitř dalekohledu, jak je to vidět na obr. 7.1.

Proto není možno umístit za holandským dalekohledem oko tak, aby jeho pupila splynula s výstupní pupilou dalekohledu. Proto paprskové svažky vystupující z dalekohledu jsou omezeny pupilou oka, která tvoří výstupní pupilu dalekohledu. Její obraz, vytvořený dalekohledem jako celkem, je neskutečný a tvoří vstupní pupilu dalekohledu ve spojení s okem, jak je to naznačeno na obr. 7.2. (viz str. 14). Jak plyne z obr. 7.3 (viz str. 14), tvoří vlastní výstupní pupila samotného dalekohledu jako clona zorného pole. Objímka objektivu pak tvoří vstupní průzor.

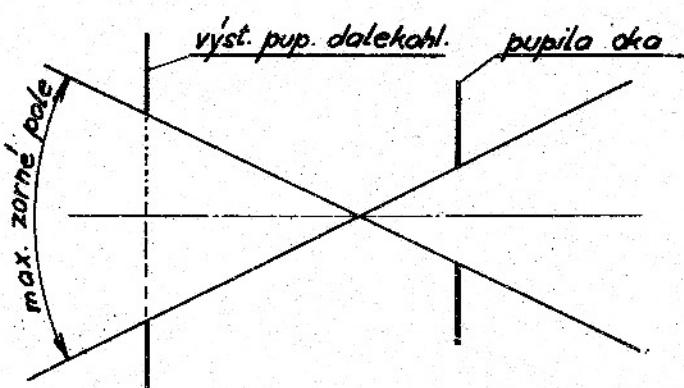
Z obr. 7.1 plyne, že výstupní pupila holandského dalekohledu je tím větší, čím větší relativní otvor má jeho objektiv.

Porovnáme-li holandský dalekohled s hranolovými dalekohledy, je možno říci, že holandský dalekohled má tyto přednosti:

- a) jednoduchá konstrukce z hlediska optického i mechanického a s tím související nízká cena,



Obr. 7.2. Poloha pupil holandského dalekohledu ve spojení s okem.



Obr. 7.3. Řešení výstupní pupily holandského dalekohledu jako člony zorného pole.

b) velmi malé světelné ztráty odrazem, které nepřevyšují 15 - 20%. Tato poslední vlastnost umožňuje používání dalekohledu za šera při velmi špatných světelných podmínkách.

Holandský dalekohled má však také své nedostatky:

- a) malé zorné pole
- b) rychlé ubývání světla ke krajům zorného pole
- c) nemožnost vložit do dalekohledu zámernou osnovu.

Uvedené přednosti i nedostatky holandského dalekohledu vymezily přesně oblast jeho použití jako divadelního kukátka, nebo v některých případech jako jednoduché afokální převracející soustavy.

#### 8. ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI DALEKOHLEDŮ

Každý dalekohled je charakterisován řadou optických vlastností. K základním optickým vlastnostem dalekohledů patří:

- a) zvětšení
- b) zorné pole

- c) velikost a poloha výstupní případně vstupní pupily
- d) světelnost
- e) praktické nekonečno
- f) rozlišovací schopnost
- g) paralaxe
- h) nastavení okuláru.

Všimněme si nyní podrobněji jednotlivých vlastností.

### 8.1. Zvětšení dalekohledu

Podle (3.1) je (úhlové zvětšení dalekohledu  $\Gamma$ ) definováno poměrem

$$\Gamma = -\frac{\tan \Gamma'}{\tan \Gamma} .$$

Z obr. 8.1.1 plyne

$$\tan \Gamma = \frac{y'}{f_1} ,$$

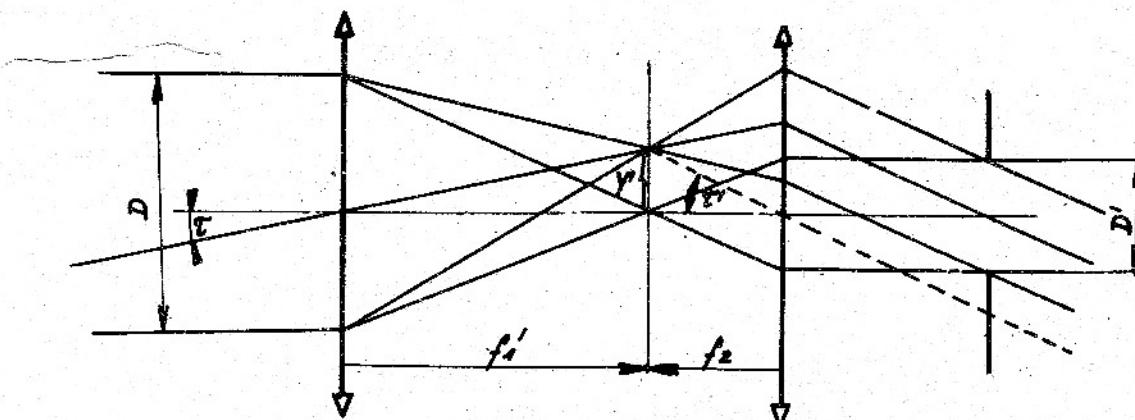
$$\tan \Gamma' = \frac{y'}{f_2} ,$$

takže pro zvětšení  $\Gamma$  dalekohledu plyne dále

$$\Gamma = -\frac{\frac{y'}{f_2}}{\frac{y'}{f_1}} = -\frac{f_1}{f_2} = -\frac{f_1}{f_2} . \quad (8.1.1)$$

Z téhož obrázku plyne dále

$$-\frac{D}{D'} = -\frac{f_1}{f_2} = -\frac{f_1}{f_2} = \Gamma , \quad (8.1.2)$$



Obr. 8.1.1 Ke zvětšení dalekohledu.

kde  $D$  a  $D'$  značí průměr vstupní a výstupní pupily dalekohledu. Můžeme tedy psát

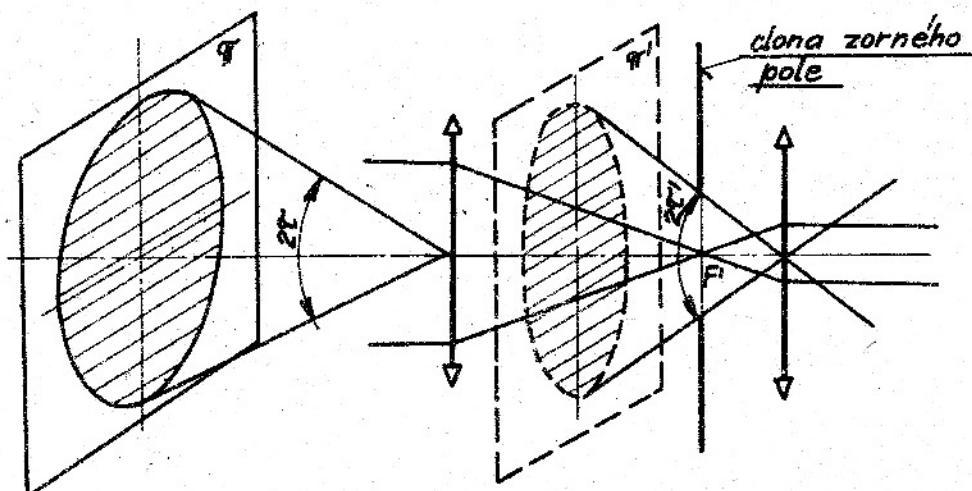
$$\Gamma = -\frac{f_1}{f_2} = -\frac{D}{D'} . \quad (8.1.3)$$

### 8.2. Zorné pole dalekohledu

Zorným polem dalekohledu rozumíme úhel  $2\Gamma$ , jehož vrchol leží ve středu objektivu (lépe ve středu jeho vstupní pupily) a jehož sáčkovna je tvořena kružnicí,

Poznámka: Kružnice v rovině  $W$  resp.  $W'$  tvoří vstupní respektive výstupní průzor dalekohledu.

která omezuje v předmětové rovině  $W$  její část, kterou dalekohledem přehlédneme. Prostor vymezený tímto kuželem tvoří tzv. skutečné zorné pole, na rozdíl od zdán-



Obr. 8.2.1 K zornému poli dalekohledu.

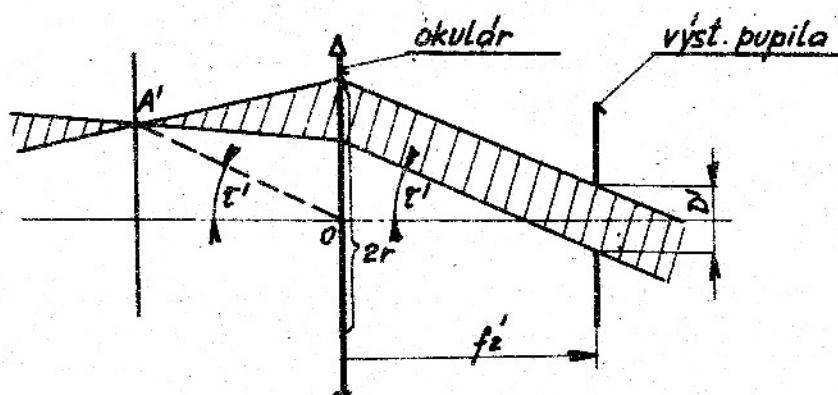
livého zorného pole, které je tvořeno vrcholovým úhlem  $2\Gamma'$  kužela, jehož vrchol leží ve středu okuláru a jehož základna je tvořena okrajem clony zorného pole.

Z obr. 8.1.1 a vztahu (8.1) plynne, že obě zorná pole jsou spolu vázána tak, že poměr tangent příslušných úhlů  $\Gamma'$  a  $\Gamma$  je roven zvětšení  $f$  dalekohledu. V praxi pro návrhové výpočty vystačíme s přibližným vztahem

$$\Gamma' = f \cdot \Gamma \quad (8.2.1)$$

Zorné pole dalekohledu musíme uvažovat zvlášt pro dalekohled Keplerův a zvlášt pro dalekohled holandský.

Uvažujeme proto nejdříve jednoduchý Keplerův dalekohled, jehož okulár je tvořen jednoduchou čočkou o průměru  $2r$ .



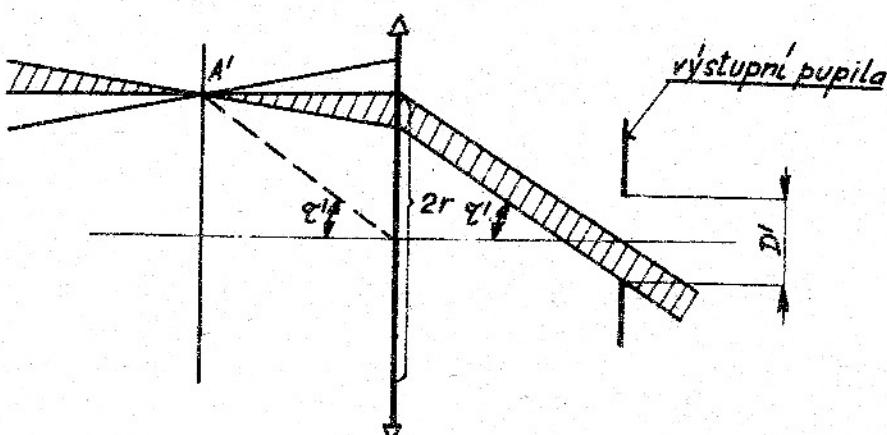
Obr. 8.2.2 K zornému poli okuláru.

Nechť objektiv dalekohledu zobrazí nějaký mimoosový bod  $A$  do bodu  $A'$  jeho ohnisko-vé roviny, jak je to naznačeno na obr. 8.2.2. Z toho obrázku je vidět, že všechny

paprsky, které z bodu A prošly objektivem, byly také zachyceny okulárem a prošly tedy výstupní pupilou dalekohledu, která leží přibližně v obrazové ohniškové rovině okuláru. Paprsek A'O určuje základní pole dalekohledu (okuláru). Podle tohoto obrázku pro toto pole vychází

$$\operatorname{tg} U' = \frac{r - \frac{D'}{2}}{f'_2} . \quad (8.2.2)$$

Uvažujme nyní případ, kdy bod A' padne poněkud dále od osy, tj. případ o větším skutečném zorném poli, jak je to naznačeno na obr. 8.2.3.



Obr. 8.2.3 K zornému poli okuláru.

V tomto případě při stejném průměru okuláru projde z bodu A' pouze asi polovina světelného svazku. Budeme-li tolerovat ubytok světla do kraje zorného pole hodnotou 50%, potom pro zorné pole jednoduché čočky jako okuláru plyne

$$\operatorname{tg} U' = \frac{r}{f'_2} . \quad (8.2.3)$$

Připusťme-li, že v případě achromatické stmelené soustavy můžeme volit relativní otvor okuláru  $2r : f'_2 = 1 : 3$ , vychází ze vztahu (8.2.3)

$$\operatorname{tg} U' = \frac{1}{6} = 0,17 \quad \text{čili}$$

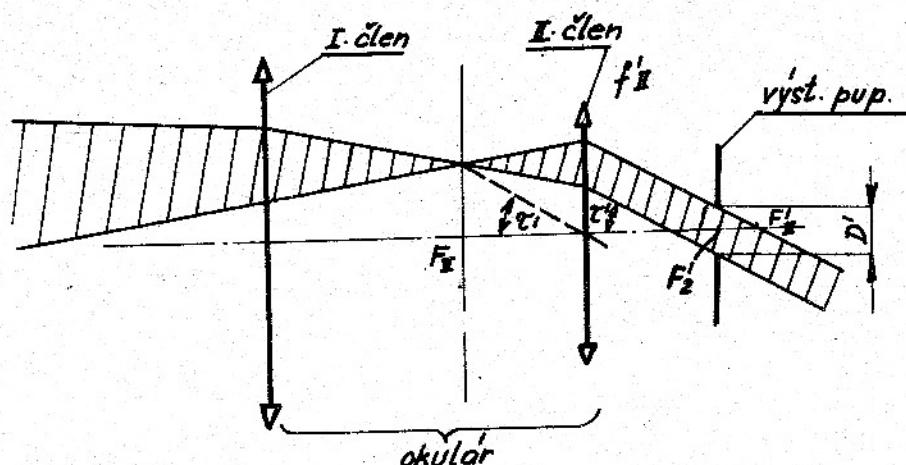
$$U' = 10^\circ .$$

Tedy celé zorné pole okuláru bude  $2U' = 20^\circ$ .

Skutečné zorné pole dalekohledu pak dostaneme, budeme-li dělit hodnotu  $2U'$  jeho zvětšením.

Jednoduchých okulárů se používá jen výjimečně. Obyčejně se používá soustav složených ze dvou členů oddělených vzduchovou mezerou. Přitom oba členy mohou být opět jednoduché čočky nebo některý z nich může být tvořen dvěma stmelenými čočkami, jak bude uvedeno v odstavci pojednávajícím o okulárech.

Výhodou těchto okulárů je skutečnost, že obrazové ohniško, v jehož blízkosti se nachází výstupní pupila, leží mezi druhým členem a jeho obrazovým ohniškem, jak je patrné z obr. 8.2.4 (viz str. 18). To umožňuje, aby čočkou, tvořící druhý člen okuláru, prošly paralelové svazky skloněné pod větším úhlem  $U'$ , i když relativní otvor tohoto člena zůstane stejný jako v případě jednočlenného okuláru.



Obr. 8.2.4 K vysvětlení zorného pole dvojčekových okuláru.

Např. u Huygenvova okuláru leží jeho obrazové ohnisko  $F'_2$  uprostřed mezi druhým jeho členem a jeho obrazovým ohniskem  $f'_{II}$ , takže ohnisková vzdálenost Huygenvova okuláru  $r'_{II}$  je rovna  $\frac{f'_{II}}{2}$ , značí-li  $f'_{II}$  ohniskovou vzdálenost jeho druhého členu. Označíme-li  $2 r'_{II}$  průměr druhého členu, pak pro zorné pole Huygenvova okuláru vyhází

$$\tan \Gamma' = \frac{r'_{II} - \frac{D'}{2}}{\frac{f'_{II}}{2}} = 2 \frac{r'_{II} - \frac{D'}{2}}{f'_{II}} . \quad (8.2.4)$$

Tolerujeme-li opět 50% úbytek světla do kraje zorného pole, pak pro úhel  $\Gamma'$  vychází mezní hodnota

$$\tan \Gamma' = \frac{2 r'_{II}}{f'_{II}} . \quad (8.2.5)$$

Je to prakticky dvojnásobná hodnota než v případě jednočlenného okuláru, jak to vyplývá ze srovnání se vztahem (8.2.3). Jinak řečeno, zorné pole Huygenvova okuláru  $2 \Gamma'$  může dosáhnout hodnoty  $40^\circ$ .

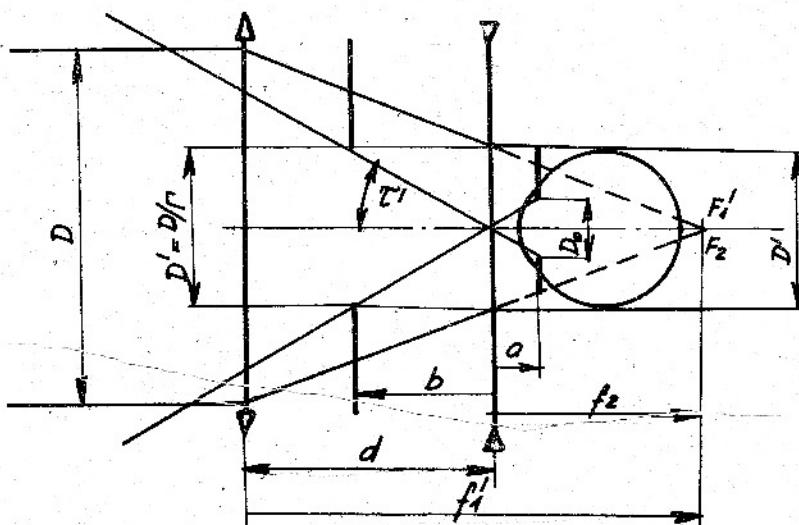
Z uvedených příkladů je vidět, že zorné pole dalekohledu závisí především na zorném poli okuláru. V průběhu historie dalekohledu byla vyvinuta celá řada okuláru, jejichž zorná pole dosahují  $70 - 90^\circ$  nebo i více. K těmto okuláru se vrátíme později na vhodnějším místě.

Věinneme si nyní ještě problému zorného pole holandských dalekohledů. Jak bylo uvedeno dříve, je zorné pole holandského dalekohledu omezeno jeho výstupní pupilou.

Určeme proto polohu výstupní pupily holandského dalekohledu. Protože je obrazem objímky objektivu vytvořeným okulárem, plynne podle obr. 8.2.5 pro její vzdálenost  $b$  od okuláru

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f'_2} \quad \text{čili}$$

$$b = \frac{d f'_2}{d - f'_2} = \frac{d f'_2}{f'_1} = - \frac{d}{f'} .$$



Obr. 8.2.5 K určení zorného pole holandského dalekohledu

Označíme-li  $a$  vzdálenost pupily oka od okuláru, vychází pro vzdálenost pupily dalekohledu od pupily oka

$$a - b = a + \frac{d}{f} = \frac{a\Gamma + d}{\Gamma}$$

Pro zdánlivé zorné pole dalekohledu pak plyne podle předešlého obrázku

$$\tan \tau' = \frac{\frac{D}{\Gamma} + D_0}{\frac{2}{\Gamma}} = \frac{D + D_0 \Gamma}{2(a\Gamma + d)} \quad (8.2.6)$$

Pro skutečné zorné pole plyne pak dále

$$\tan \tau = \frac{D + D_0 \Gamma}{2\Gamma(a\Gamma + d)} \quad (8.2.7)$$

Z posledního vztahu je patrné, že zorné pole holandského dalekohledu je tím větší, čím je větší průměr  $D$  objektivu a tím je menší délka  $d$  dalekohledu. Délka dalekohledu  $d$  bude při daném zvětšení  $\Gamma$  a předepsané výstupní pupile  $D'$  tím menší, čím bude menší ohnisková vzdálenost objektivu, nebo jinak řečeno, čím bude větší jeho relativní otvor. Protože s rostoucím relativním otvorem roste otvorová vada objektivu, není možno zorné pole holandského dalekohledu stupňovat přes určitou mez.

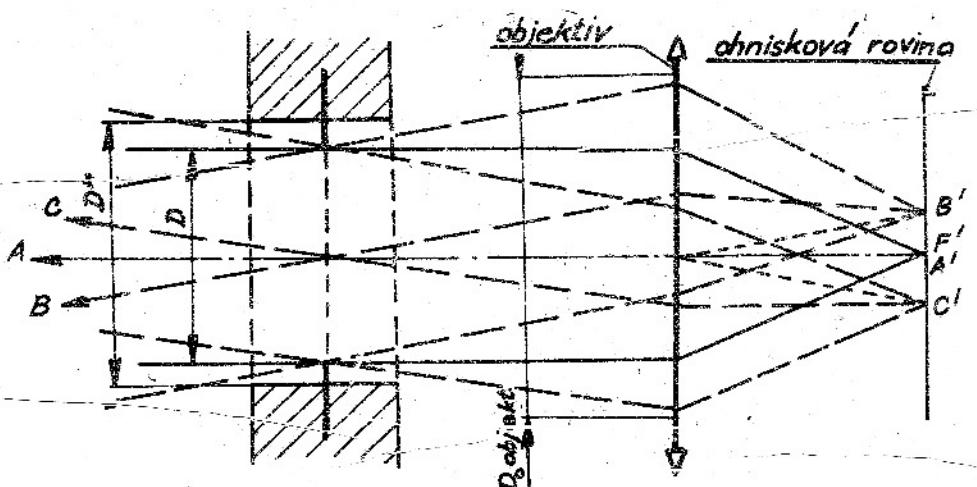
Na druhé straně je možno při dané délce  $d$  dalekohledu volit větší průměr  $D$  jeho objektivu. Nepřihlížíme-li k tomu, že i tento zásah vede k růstu relativního otvora, nutno zvážit i to, že průměr  $D$  objektivu nelze volit větší než 50 mm, neboť holandský dalekohled se konstruuje obyčejně jako binokulární kukátko, kdy průměr objektivu je dán nejmenším očním rozestupem.

### 8.3. Pupily dalekohledu

O pupilách dalekohledu byla přehledně pojednáno v souvislosti s Keplerovým a holanským dalekohledem. Na tomto místě stačí snad pouze uvést, že u jednoduchých Keplerových dalekohledů, kde je použito hranolových převracejících soustav, jak je tomu např. u triestrů nebo některých zaměřovacích dalekohledů, je vstupní pupila dalekohledu tvořena objímkou objektivu. Výstupní pupila je pak obrazem objímky objektivu vytvořeným okulárem a leží vždy blízko jeho obrazové ohniskové roviny.

V některých případech zaměřovacích dalekohledů používaných v tancích, kdy je před dalekohledem umístěn silný pancíř, je nutno tento pancíř opatřit vhodným otvorem. Z důvodu menší zranitelnosti je žádoucí, aby průměr tohoto otvoru byl co nejmenší a nepřekročil o mnoho průměr paprskových svažek zobrazujících osové body.

Jak je patrné z obr. 8.3.1, je nutné, aby průměr objektivu  $D_o$  byl větší než je



Obr. 8.3.1 Předsunutá vstupní pupila

průměr  $D$  zmíněných paprskových svažek, aby objektivem byly zachyceny i paprskové svažky přicházející z okrajů zorného pole. Proto se obyčejně volí konstrukce objektivu příslušného dalekohledu tak, že jeho soustava začíná dutou plochou.

V tomto případě nesplývá vstupní pupila dalekohledu s objímkou jeho objektivu, nýbrž je předsunuta před objektiv. Nutno si však uvědomit, že vstupní, stejně jako výstupní pupila není součástí objektivu nebo okuláru a že jejich poloha je určována celou optickou soustavou dalekohledu. Aby bylo možno pro daný dalekohled zajistit předepsanou polohu vstupní resp. výstupní pupily, musí být do optické soustavy dalekohledu zařazeny další optické prvky. Tuto funkci obyčejně přejímají převracející soustavy a tzv. kolektivy. V jiných případech, např. u puškových dalekohledů, je žádoucí, aby výstupní pupila ležela 80 - 100 mm za poslední plochou okuláru a to ze dvou důvodů. Při výstřelu dostává puška silný zpětný náraz, který by mohl způsobit zranění oka, kdyby se oko při zaměřování s střelbou opíralo o očnice okuláru. Mimoto zaměřovač je na pušce upevněn tak, že u konca okuláru zečinná nábojová komora, ze které po výstřelu jsou automaticky vyhazovány upotřebené nábojnice. Proto mezi okulárem a okem musí být rezervováno potřebné místo.

Také poloha výstupní pupily se ovlivní vhodnou stavbou celé optické soustavy dalekohledu.

K problému převracejících soustav a jejich vlivu na polohu pupil se vrátíme dále na vhodnějším místě.

Nutno se ještě zmínit o velikostech pupil. Velikost vstupní pupily  $D$  závisí na předepsané velikosti výstupní pupily  $D'$  a zvětšení  $\Gamma$  dalekohledu. Průměr výstupní pupily rozhoduje o světlnosti dalekohledu. Má se proto volit tak, aby byl větší nebo roven pupile oka  $D_o$ . Průměr oční pupily však závisí na světelných podmínkách, za kterých se provádí pozorování a dosahuje za šera a v noci až 8 mm. Proto např. puškové zaměřovače, které se používají i za šera, se musí konstruovat tak,

aby jejich výstupní pupila byla 8 - 10 mm. Velký průměr výstupní pupily puškových zaměřovačů je však žádoucí ještě z druhého důvodu. Při nízení se blána střelcové mírně pohybuje vzhledem k pušce. Je proto nutné, aby pupila zaměřovatele byla poněkud větší než pupila oka, aby při tomto pohybu nevybíhala oční pupila z paprskového svazku.

U běžných zaměřovačů používaných za normálních světelných podmínek se volí jejich výstupní pupila 3 - 5 mm. U geodetických přístrojů, které pracují pouze za dobrých denních podmínek, se volí výstupní pupila 1 - 1,5 mm a ohledem na jejich velké zvětšení je nutno snížit jejich mechanickou konstrukci na minimum.

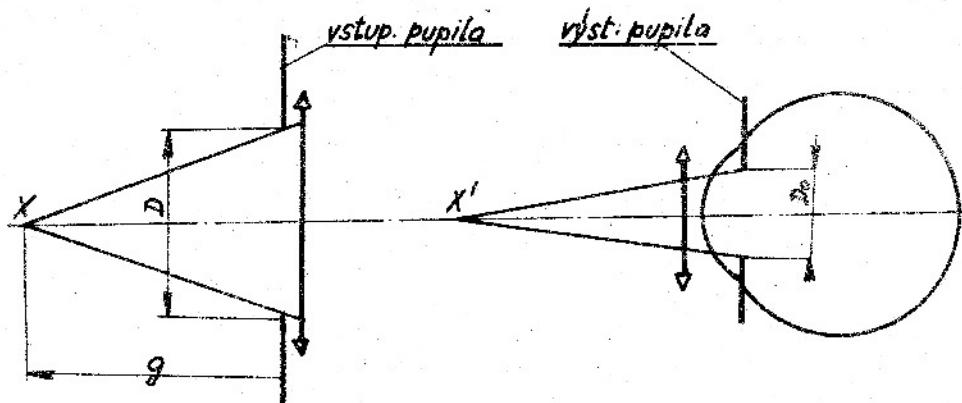
#### 8.4. Světelnost dalekohledu

Světelny tok, dopadající z bodového nebo plošného předmětu do objektivu dalekohledu je přenášen dalekohledem až do oka pozorovatele, kde se soustředí na čitnici buď v bodovém obrazu příslušného bodového předmětu, nebo kde vyvolá určité osvětlení obrazu plošného předmětu. Tento tok resp. osvětlení jsou obecně jiné v případě, že příslušný bodový nebo plošný předmět je pozorován pouhým nezbrojeným okem. Poměr příslušných toků resp. osvětlení určuje pak světelnost dalekohledu vzhledem k bodovým resp. plošným předmětům.

Z této krátké definice světelnosti dalekohledu je patrno, že je nutno metody sledovat zvlášť světelnost pro bodové a zvlášť pro plošné předměty.

##### 8.4.1 Světelnost dalekohledu vzhledem k bodovým předmětům

Uvažujeme bodový předmět umístěný v bodě X na optické osi dalekohledu a předpokládejme, že oko pozorovatele je umístěno za dalekohledem tak, že jeho pupile splyvá s výstupní pupilou dalekohledu, jak je to naznačeno na obr. 8.4.1.1.



Obr. 8.4.1.1 K určení světelnosti dalekohledu vzhledem k bodovým předmětům.

Nechť  $g$  značí vzdálenost bodového předmětu X od výstupní pupily.

Světelny tok vstupující objektivem do dalekohledu je dán vztahem

$$F = \frac{\pi D^2 J}{4 g^2} , \quad (8.4.1.1)$$

kde  $J$  značí svítivost uvažovaného bodového předmětu.

Tento tok je přenášen dalekohledem tak, že z dalekohledu vystupuje tok  $F'$ , pro který platí

$$F' = \frac{\pi D^2 J}{4 g^2} \cdot T , \quad (8.4.1.2)$$

kde  $T$  značí propustnost dalekohledu. Světelný tok  $F'$  přicházející na sítnici pozorovatelova oka (tzv. subjektivní jas obrazu v oku) je pak dále dán vztahem

$$F_o = \frac{\pi D^2 J T}{4 g_o^2} \cdot T_o , \quad (8.4.1.3)$$

kde  $T_o$  značí propustnost oka.

V případě, že tentýž bodový předmět pozorujeme pouhým neozbrojeným okre, pak do oka dopadá světelný tok  $F_o$  určený vztahem

$$F_o = \frac{\pi D_o^2 J}{4 g_o^2} , \quad (8.4.1.4)$$

kde  $D_o$  značí průměr oční pupily a  $g_o$  vzdálenost téhož bodového předmětu  $X$  od pupilly oka.

Na sítnici dopadá tok  $F'_o$  (tzv. subjektivní jas obrazu) dáný vztahem

$$F'_o = \frac{\pi D_o^2 J}{4 g_o^2} \cdot T_o . \quad (8.4.1.5)$$

Světelnost dalekohledu  $S_b$  vzhledem k bodovým předmětům je pak podle definice dána poměrem  $\frac{F'_o}{F'_c}$ , takže můžeme psát

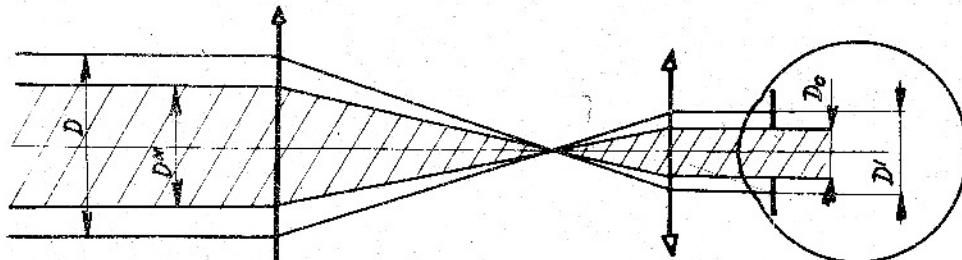
$$S_b = \frac{F'_o}{F'_c} = \frac{\frac{\pi D_o^2 J T_o}{4 g_o^2}}{\frac{\pi D_o^2 J T_o}{4 g_o^2}} = \left(\frac{D}{D_o}\right)^2 \cdot \left(\frac{g_o}{g}\right)^2 \cdot T \quad (8.4.1.6)$$

Při pozorování vzdálených předmětů je  $g_o = g$ , takže pro světelnost  $S_b$  vychází jednoduchý vztah

$$S_b = T \left(\frac{D}{D_o}\right)^2 = T \cdot r^2 . \quad D_o \equiv D \quad (8.4.1.7)$$

Tento vztah byl odvozen za předpokladu, že průměr  $D'$  výstupní pupily dalekohledu je shodný s průměrem  $D_o$  pupily oka.

Předpokládejme nyní, že  $D_o \neq D'$  a sice, že nejdříve je  $D_o < D'$ . V tomto případě bude situace stejná, jako kdyby dalekohledem procházel svazek o průměru  $D'' = D_o \sqcap$ , jak je to naznačeno na obr. 8.4.1.2.



Obr. 8.4.1.2. K určení světelnosti dalekohledu vzhledem k bodovým předmětům.

To znamená, že vztah (8.4.1.7) bude platit v plném rozsahu i pro dalekohled s objektivem o průměru  $D^*$ . Můžeme tedy psát

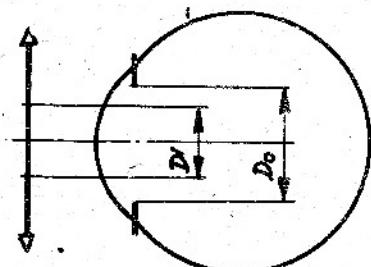
$$S_b = T \left( \frac{D^*}{D_o} \right)^2 = T \cdot r^2$$

$D_o < D^*$

Předpokládejme nyní, že  $D^* < D_o$ , jak je to naznačeno na obr. 8.4.1.3. O světelnosti  $S_b$  dalekohledu bude nyní rozhodovat průměr  $D_o$  oční pupily a sice z tohoto důvodu: Subjektivní jas obrazu samotného oka bude růst s průměrem oční pupily  $D_o$ . Protože podle definice světelnosti  $S_b$  dalekohledu je tato určena poměrem subjektivních jasů obrazů na sítnici při pozorování předmětu dalekohledem s neozbrojeným okem, bude se světelnost  $S_b$  a rostoucím průměrem  $D_o$  zmenšovat. Proto bude v tomto případě světelnost dalekohledu určena vztahem

$$S_b = T \left( \frac{D}{D_o} \right)^2 . \quad D_o > D^* \quad (8.4.1.8)$$

Obr. 8.4.1.3 K určení světelnosti  $S_b$ .



Předchozí úvahy můžeme tedy shrnout takto:

Je-li výstupní pupila  $D'$  dalekohledu menší než pupila  $D_o$  oka, pak světelnost dalekohledu  $S_b$  je přímo úměrná čtverci poměru  $\frac{D}{D_o}$ .

Je-li výstupní pupila  $D'$  dalekohledu větší než pupila oka, pak je světelnost dalekohledu  $S_b$  přímo úměrná čtverci jeho zvětšení.

#### 8.4.2. Světelnost dalekohledu vzhledem k plošným předmětům

Uvažujme v blízkosti optické osy dalekohledu plošný předmět velikosti  $S$  a jasu  $L$ . Tento předmět vysílá do objektivu dalekohledu světelny tok

$$\begin{aligned} F &= 2\pi L S \int_{-\sigma_k}^{\sigma_k} \sin \sigma \cos \sigma d\sigma = \\ &= \pi L S \sin^2 \sigma_k , \end{aligned} \quad (8.4.2.1)$$

kde  $\sigma_k$  je poloviční sperturní úhel, jak je to vidět na obr. 8.4.2.1 (viz str. 24).

Nechť dalekohled zobrazí tento předmět na plochu o velikosti  $S'$  a jasem  $L'$ . Potom odpovídající světelny tok přicházející do tohoto obrazu je dán vztahem

$$F' = \pi L' S' \sin^2 \sigma'_k , \quad (8.4.2.2)$$

při čemž jas

$$L' = T \cdot L \cdot \frac{n'^2}{n^2} , \quad (8.4.2.3)$$

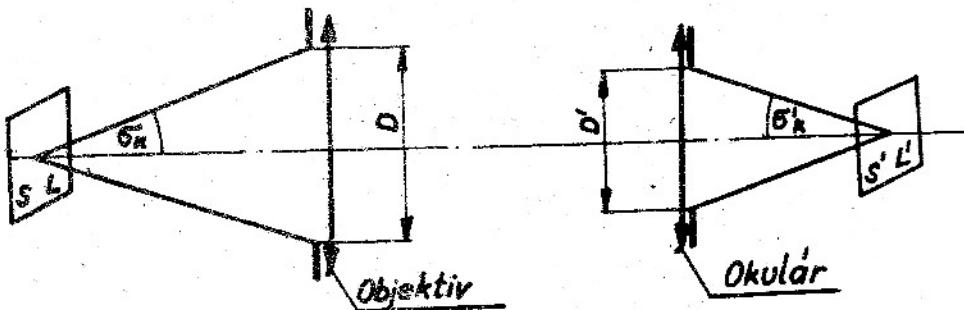
kde  $n$  resp.  $n'$  značí index lomu prostředí před a za dalekohledem. Protože v běžné praxi je

$$n' = n = 1 ,$$

vychází pro světelny tok

$$F' = \pi T L S' \sin^2 \sigma'_k , \quad (8.4.2.4)$$

kde  $T$  značí opět propustnost dalekohledu.



Obr. 8.4.2.1 K vysvětlení světelnosti dalekohledu vzhledem k plošným předmětům.

Světelny tok  $P^*$  dopadajici na sítnici oka umístěného za dalekohledem je obdobně dán vztahem

$$P^* = \pi L^* S^* \sin^2 \alpha_{ok}^* , \quad (8.4.2.5)$$

kde  $S^*$  značí plochu a  $L^*$  je obrazu na sítnici oka. Přitom platí

$$L^* = L' T_o \frac{n_o^2}{n^2} , \quad (8.4.2.6)$$

kde  $T_o$  značí propustnost oka a  $n_o$  resp.  $n'$  indexy lomu prostředí před okem resp. uvnitř oka.

Vyjádříme-li ve vztahu (8.4.2.6) tok  $L'$  pomocí toku  $L$  dopadajícího do dalekohledu, můžeme psát dále

$$L^* = T T_o L \cdot \frac{n_o^2}{n^2} , \quad (8.4.2.7)$$

takže vztah pro světelny tok  $P^*$  je možno psát ve tvaru

$$P^* = \pi T T_o L S^* \frac{n_o^2}{n^2} \sin^2 \alpha_{ok}^* . \quad (8.4.2.8)$$

U oka je však přibližně

$$\sin \alpha_{ok}^* = \frac{D'}{2 f_o} , \quad (8.4.2.9)$$

kde  $D'$  je průměr výstupní pupily dalekohledu (předpokládáme, že  $D' < D_o$ ).

Uvažíme-li ještě, že

$$f_o^* = - \frac{n_o'}{n_o} f_o , \quad (8.4.2.10)$$

můžeme psát konečně

$$P^* = \pi T T_o L S^* \cdot \frac{D'^2}{4 f_o^*} . \quad (8.4.2.11)$$

Tento tok vyvolá v obrazu na sítnici osvětlení

$$R^* = \frac{P^*}{S^*} = \frac{\pi T T_o L D'^2}{4 f_o^*} . \quad (8.4.2.12)$$

Předpokládáme nyní, že tentýž předmět posorujeme neosbrojeným okem. Světelny

tok přicházející do obrazu  $S'_o$  na sítnici je dán podobně vztahem

$$F'_o = \pi T_o L \frac{n_o'^2}{n_o^2} \cdot S'_o \cdot \sin^2 \sigma'_{ok} \quad (8.4.2.13)$$

Pro oko je však

$$\sin \sigma'_{ok} = \frac{D_o}{2 f'_o} ; \quad (8.4.2.14)$$

dosaďme-li z (8.4.2.10), (8.4.2.14) do (8.4.2.13), dostaneme

$$F'_o = \pi T_o L S'_o \cdot \frac{D_o^2}{4 f_o^2} . \quad (8.4.2.15)$$

Tento světelny tok vyvolá v příslušném obrazu na sítnici osvětlení

$$E'_o = \frac{F'_o}{S'_o} = \frac{\pi T_o L D_o^2}{4 f_o^2} . \quad (8.4.2.16)$$

Podle definice vychází tedy ze vztahů (8.4.2.12) a (8.4.2.16) pro světelnost  $S_p$  dalekohledu vzhledem k pločným předmětům

$$S_p = \frac{E'_o}{E_o} = \frac{\frac{\pi T_o L D_o^2}{4 f_o^2}}{\frac{\pi T_o L D_o^2}{4 f_o^2}} \cdot T \left( \frac{D'}{D_o} \right)^2 = T \left( \frac{D'}{D_o F} \right)^2 . \quad (8.4.2.17)$$

Z tohoto vztahu plyne v případě, že průměr  $D_o$  oční pupilly je menší než průměr  $D'$  výstupní pupily dalekohledu

$$S_p = T < 1 , \quad (8.4.2.18)$$

neboť poměr  $\frac{D'}{D_o} = 1$ , tj. dalekohled pracuje tak, jako by měl objektiv průměr  $D_o \cdot F$ .

V případě, že  $D' < D_o$ , platí pro světelnost  $S_p$  vztah (8.4.2.17) v plném rozsahu. Protože  $S_p$  závisí také na zvětšení  $F$ , existuje zvětšení  $F_n$  takové, při kterém je  $S_p = 1$ , tj. při tomto zvětšení je subjektivní jas obrazu oku ve spojení s dalekohledem stejný jako subjektivní jas obrazu téhož předmětu pozorovaného nezbrojeným okem.

Z podmínky

$$S_p = T \left( \frac{D'}{D_o F_n} \right)^2 = 1$$

pak vychází pro zvětšení  $F_n$

$$F_n = \frac{D}{D_o} \sqrt{T} . \quad (8.4.2.19)$$

Toto zvětšení se nazývá normální.

Porovnáme-li obě světelnosti dalekohledu  $S_p$  a  $S_o$ , vidíme, že svítící body se jeví v dalekohledu jeasněji než při pozorování pouhým okem, zatím co pločné předměty se jeví naopak méně jeasně než při pozorování nezbrojeným okem.

Tím je možno vysvětlit, proč je možno vidět hvězdy ve dne dalekohledem o velkém zvětšení, jako svítící body na tmavém pozadí.

Nalezené výsledky je možno shrnout takto:

a) Je-li zvětšení dalekohledu větší než normální, tj. je-li průměr výstupní pupily dalekohledu menší než průměr oční pupily, je osvětlení obrazu, nebo subjektivní jas obrazu menší než v případě pozorování neozbrojeným okem, neboť pupila oka není zcela zaplněna světlem.

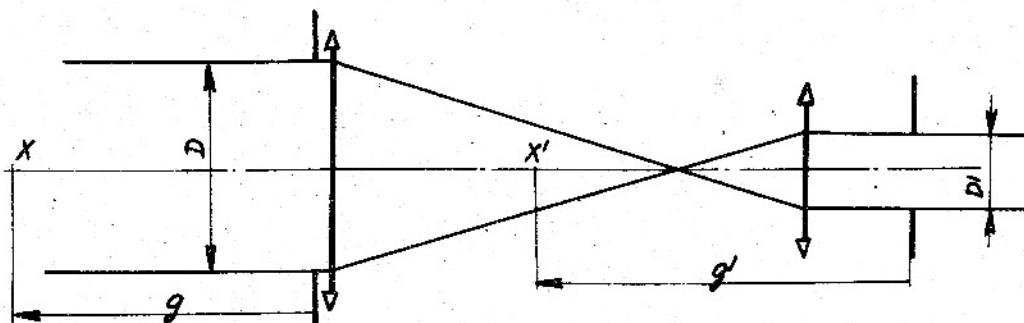
b) Je-li zvětšení dalekohledu rovno nebo menší než je normální zvětšení, tj. je-li průměr výstupní pupily dalekohledu stejný nebo větší než průměr oční pupily, pak subjektivní jas obrazu na sítnici je stejný jako při pozorování předmětu vlastním okem (přitom zanedbáváme absorpci v dalekohledu).

### 8.5. Praktické nekonečno dalekohledu

Dalekohled bývá obyčejně nastaven jako afokální soustava na nekonečně vzdálené předměty. To znamená, že v jeho zorném poli by měly být ostře zobrazeny pouze předměty nekonečně vzdálené. Prakticky se však pozorovateli jeví ostře zobrazené i předměty bližší, až do určité vzdálenosti před dalekohledem. Této vzdálenosti říkáme praktické nekonečno dalekohledu.

Určeme proto pro daný dalekohled vztah, který umožňuje vypočítat tuto vzdálenost.

Uvažujme předmět  $X$  na optické ose dalekohledu, jehož vzdálenost od vstupní pupily dalekohledu je  $g$  a hledejme vzdálenost  $g'$  příslušného obrazu  $X'$  od výstupní pupily.



Obr. 8.5.1 K určení praktického nekonečna dalekohledu.

Podle Gullstrandovy zobrazovací rovnice platí obecně

$$\frac{D'^2}{g'} - \frac{D^2}{g} = \frac{D D'}{f'}, \quad (8.5.1)$$

kde  $D$  a  $D'$  značí průměr vstupní a výstupní pupily a  $f'$  ohniskovou vzdálenost dalekohledu jako celku.

Protože u afokální soustavy je  $\frac{1}{f'} = 0$ , platí pro dalekohled

$$\frac{D'^2}{g'} - \frac{D^2}{g} = 0 \quad (8.5.2)$$

čili

$$g' = g \left( \frac{D'}{D} \right)^2 = \frac{g}{f'^2}. \quad (8.5.3)$$

Aby oko umístěné za dalekohledem vidělo obraz bodu  $X'$  ostře, je nutné, aby vzdálenost  $g$  podle do akomodační oblasti oka.

Nechť  $p$  resp.  $r$  značí vzdálenost blízkého resp. vzdáleného bodu oka. Musí tedy platit

$$p \leq \frac{g}{\Gamma^2} \leq r . \quad (8.5.4)$$

Protože  $r$  je velké, bude podmínka

$$\frac{g}{\Gamma^2} \leq r$$

splněna prakticky pro všechny pozorovatele.

Je však nutné, aby byla splněna i druhá podmínka

$$p \leq \frac{g}{\Gamma^2} ,$$

čili

$$g \geq p \cdot \Gamma^2 . \quad (8.5.5)$$

U pozorovatele, jehož věk se pohybuje v rozmezí od 40 do 50 let, je vzdálenost  $p$  blízkého bodu

$$p = -20 \text{ až } -40 \text{ cm}, \quad r = 60.$$

Pro dalekohled o zvětšení  $\Gamma = 6x$  tedy vychází

$$g \geq -20 \cdot 6^2 = -720 \text{ cm}$$

nebo

$$g \geq -40 \cdot 6^2 = -1440 \text{ cm} .$$

Protože triedr mívá obyčejně zvětšení  $6x$ , je možno říci, že pozorovatel mezi 40 - 50 rokem věku vidí triedrem ostře všechny předměty od vzdálenosti 7 - 14 m až do nekonečna. Tedy praktické nekonečno triedru pro zvoleného pozorovatele leží ve vzdálenosti 7 - 14 m před dalekohledem.

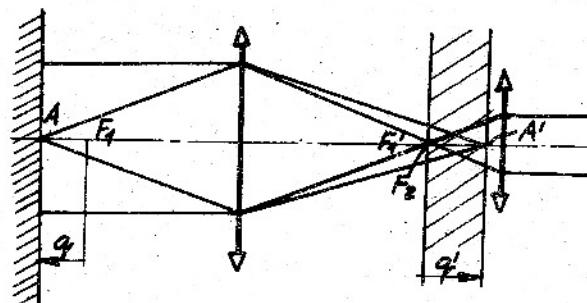
Závěrem nutno zdůraznit, že praktické nekonečno závisí jednak na zvětšení dalekohledu a jednak na věku pozorovatelově.

Předpokládejme podle obr. 8.5.2., že bod  $A$  na optické osě dalekohledu je zobrazen do bodu  $A'$ . Z obrázku je jasné, že celý předmětový prostor, od nekonečna až k rovině procházející kolmo na optickou osu bodem  $A$ , je zobrazen do prostoru ohrazeného dvěma rovinami procházejícími body  $F_1$  a  $F_2$  kolmo na optickou osu.

Má-li pozorovatel vidět současně ostře celý předmětový prostor od nekonečna až do bodu  $A$ , musí akomodační schopnost oka ve spojení s okulárem umožnit přehlédnout obrazový prostor ležící mezi uvedenými dvěma rovinami.

Je známo, jak bude ještě v dalším ukázáno, že oko při akomodaci o 1 dioptrií přehlédne ve spojení s okulárem obrazový prostor o hloubce  $\frac{f_2^2}{1000}$ , kde  $f_2^2$  značí ohniskovou vzdálenost okuláru.

Poznámka: Vztah (8.5.5) můžeme snadno odvodit i použitím Newtonovy zobrazovací rovnice.



Obr. 8.5.2. K odvození vztahu pro určení praktického nekonečna dalekohledu.

Budeme-li předpokládat, že pozorovatel průměrného věku kolem 40 má ještě akomodační schopnost 5 dioptrií, přehlédne jeho oko prostor o hloubce

$$5 \cdot \frac{f_1^2}{1000} = \frac{f_2^2}{200} .$$

Tomuto prostoru musí v předmětovém prostoru odpovídat prostor nacházející se mezi nekonečnem a rovinou procházející bodem A, pro jehož vzdálenost  $q$  resp.  $d$  vychází podle Newtonovy zobrazovací rovnice

$$q = d \cdot \frac{\frac{f_1^2}{f_2^2}}{\frac{f_1^2}{200}} = 200 \cdot \Gamma^2,$$

nebo vyjádříme-li tuto vzdálenost místo v milimetrech v metrech, vychází

$$d = \frac{\Gamma^2}{5}, \quad (8.5.6)$$

což je v podstatě vztah (8.5.5).

### 8.6. Rozlišovací schopnost dalekohledu

Jak vyplývá z teorie chybu, objektiv dalekohledu zobrazí odděleně dva blízké body, jestliže jejich uhlová vzdálenost dosahuje následující hodnoty

$$\gamma = \frac{120}{D} \text{ vteřin}, \quad (8.6.1)$$

kde  $D$  značí průměr objektivu vyjádřený v milimetrech. Tato hodnota tedy určuje rozlišovací mezu objektivu.

Aby se u dalekohledu plně využilo rozlišovací meze objektivu, je nutno volit zvětšení dalekohledu tak, aby úhel rozlišený objektivem byl dalekohledem zvětšen tak, aby padl do oblasti rozlišovací meze pozorovateľova oka, tj. aby byl v mezích 1 - 4 minuty.

Musí tedy platit

$$60^\circ \leq \Gamma \cdot \gamma \leq 4 \times 60^\circ,$$

tj. tedy

$$60^\circ \leq \frac{\Gamma \cdot 120}{D} \leq 4 \times 60^\circ$$

tj. tedy

$$\frac{D}{2} \leq \Gamma \leq 2D. \quad (8.6.2)$$

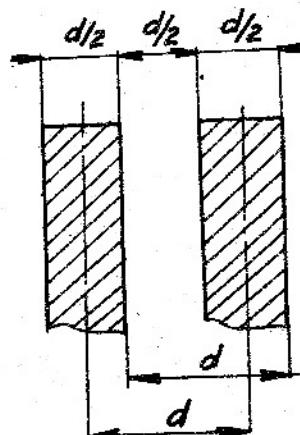
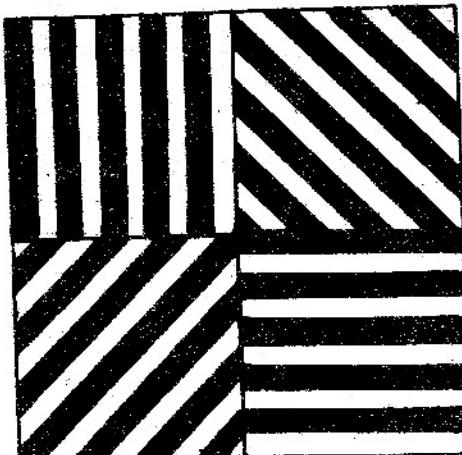
Tato nerovnost určuje rozsah užitečného zvětšení dalekohledu. Je vidět, že zvětšení dalekohledu má být větší než poloviční průměr a menší než dvojnásobný průměr objektivu vyjádřený v milimetrech.

Je-li zvětšení  $\Gamma > 2D$ , nepřináší dalších informací o struktuře předmětu a proto se nazývá prázdným zvětšením. U astronomických dalekohledů se volí jako nejpříznivější zvětšení velikosti rovné průměru jeho objektivu vyjádřenému v milimetrech. Ze těchto podmínek je od pozorovateľova oka požadováno, aby rozlišilo  $120^\circ$ , což je hodnota, které dosáhne každé oko bez většího vypětí, takže takový dalekohled umožňuje provádění dlouhých pozorování bez většího namáhání oka.

U běžných dalekohledů používaných jako divadelních kukátek, nebo triédru apod., nebývá nikdy využito plně rozlišovací schopnosti objektivu, neboť jejich zvětšení je vždy menší než  $\frac{D}{2}$ . Např. u triédru  $6 \times 30$ , který má zvětšení  $\Gamma = 6 \times$

a průměr objektivu  $D = 30$  mm, je  $\Gamma = 6 < \frac{D}{2} = 15$  mm.

Rozlišovací schopnost astronomických dalekohledů se zkouší pozorováním dvou hvězd, jejichž úhlová vzdálenost je známa. U ostatních dalekohledů a zaměřovačů, používaných pro pozemní pozorování, se určuje jejich rozlišovací meze pomocí zvláštních testů, především Foucaultových, znázorněných na obr. 8.6.1. Foucaultovy testy



Obr. 8.6.1 Foucaultův test.

jsou tvořeny čtyřmi soustavami světlých a tmavých proužků, které mají stejnou šířku a jsou vzájemně natočeny tak, jak je to neznačeno na předchozím obrázku.

Každý test je ve svém středu označen číslem 4,5,6,...,50. Tato čísla vyjadrují vzdálenost  $d$  středu dvou sousedních světlých nebo tmavých proužků vyjádřenou v  $\frac{1}{20}$  - nách milimetru. Např. vzdálenost  $d$  čar testu číslo 50 je  $50 \cdot \frac{1}{20} = 2,5$  mm.

Jsou-li tyto testy pozorovány ze vzdálenosti 10 m, vyjadřují tato čísla testů příslušnou úhlovou vzdálenost dvou sousedních tmavých nebo světlých proužků ve vteřinách. Např. v případě testu čís. 50 vychází pro tento úhel

$$\gamma = \frac{2,5}{10 \cdot 10^3} \cdot \rho'' = \frac{2,5 \cdot 2 \cdot 10^5}{10^4} \cdot 50'' =$$

Je-li test pozorován ze vzdálenosti  $L$  metrů, změní se úhlová hodnota  $\alpha$  v poměru  $\frac{10}{L}$ . Např. testu č. 50 bude při pozorování ze vzdálenosti  $L = 20$  m odpovídat úhel

$$\gamma = 50 \cdot \frac{10}{20} = 25'' .$$

V laboratořích se používá v poslední době k měření rozlišovací meze dalekohledů kolimátorů, které jsou upraveny tak, že v ohniskové rovině jejich objektivů jsou umístěny výmenné Foucaultovy testy, nebo kolimátor je vybaven pankratickou soustavou umožňující plynulou změnu velikosti testu optickou cestou. Objektiv těchto kolimátorů musí být velmi dobře korigován.

Zkušenosti s měřením rozlišovací meze dalekohledu ukazují, že rozlišovací meze ve středu zorného pole dobře korigovaného dalekohledu se mnoho nelisí od rozlišovací meze nalezené ve středu zorného pole u dalekohledu s většími vadami. Vyplyná to především z toho, že otvorová veda nemá vlivu na velikost průměru světlých nebo tmavých kroužků ohybového obrazce tvořícího obraz bodu. Vede pouze k přemístění světla z centrální plášťky na vedlejší maxima, což má za následek vytvoření pozadí.

To se projeví snížením kontrastu bez vlivu na rozlišovací schopnost. Proto nelze jakost optických soustav jednoznačně posuzovat podle rozlišování kontrastních černobílých testů.

Správnějších výsledků by bylo možno dosáhnout jedině tím, že by se dalekohledem pozorovaly různé testy s odlišným kontrastem jejich proužků. Těmito měřeními se zabývá ve Francii prof. Arnulf.

Přece však je možno říci, že měření rozlišovací meze dalekohledů je důležité při posuzování jakosti montáže a justáže apod. Špatně smontované dalekohledy mají menší rozlišovací mez i ve středu zorného pole v pozorování se správně smontovanými a sjustovanými přístroji.

Při určování rozlišovací meze dalekohledu je vždy nutné, aby příslušný pozorovatel provedl současně měření rozlišovací meze svého oka za jinak stejných podmínek.

Příklad. Nivelační stroj je vybaven dalekohledem o zvětšení  $f=28 \times$  objektivem o průměru  $D = 40$  mm. Pozorovatel s rozlišovací mezí oka  $70''$  zjistil, že dalekohled rozlišuje na vzdálenost  $L = 50$  m Foucaultův test s číslem 45. Jaká je rozlišovací mez zkoušeného dalekohledu?

Z nalezeného ještě rozlišeného testu č. 45 vyplývá, že dalekohled rozliší v předmětovém prostoru úhel

$$\gamma = 45 \cdot \frac{10}{L} = 45 \cdot \frac{10}{50} = 9''.$$

Za okulárem bude tento úhel

$$\gamma' = 9'' \times 28 = 252''.$$

Teoretická rozlišovací mez objektivu je

$$\frac{120''}{40} = 3''$$

a za okulárem odpovídá této hodnotě úhel  $3'' \times 28 = 84''$ .

Porovnáme-li teoretickou hodnotu s naměřenou vidíme, že jakost proměřovaného dalekohledu není dobrá, neboť jeho rozlišovací mez je pouze  $252''$ , pěsto, že teoreticky může být  $84''$ . Přitom není nijak omezena rozlišovací schopností oka, jehož mez se předpokládá  $70''$ .

#### 8.7. Paralaxe dalekohledu

S pojmem paralaxe se setkáváme u těch dalekohledů, které mají v obrazové rovině objektivu nebo převracející soustavy umístěn záměrný kříž, záměrné značky nebo stupnice apod. Paralaxe se pak projevuje tím, že při příčném pohybu pozorovatele oka od jednoho okraje výstupní pupily ke druhému se obraz pozorovaného předmětu pohybuje vzhledem k záměrným značkám.

Je to způsobeno tím, že dalekohled je např. seřízen jako afokální soustava na nekonečně vzdálené předměty, zatím co zaměření se provádí na předměty nacházející se v konečné vzdálenosti. Obraz tohoto předmětu leží v jiné rovině než záměrný obrazec, jak je to naznačeno na obr. 8.7.1. (viz str. 31 nahoře).

Aby se v praxi paralaxe sminula na minimální míru, neboť má značný vliv na přesnost zaměření, nastavují se některé zaměřovací dalekohledy na konečnou vzdálost a tím, že se poněkud poruší afokálnost dalekohledové soustavy.

Uvažujme proto dalekohled o zvětšení  $f$  a průměru  $D$  vstupní pupily. Neboť tento dalekohled je nastaven na bod  $B$  ležící ve vzdálenosti  $x_1$  a zaměřen na bod  $A$  ve vzdálenosti  $x_2$ .

Paralaxa bodu A vzhledem k bodu B bude stejná, jako když budeme oba body pozorovat neocstrojeným okem umístěným v okraji vstupní pupilly, jak je to naznačeno na obr. 8.7.2.

Podle tohoto obrázku platí

$$\alpha = \frac{D}{2x_1} - \frac{D}{2x_2} = \frac{D(x_2 - x_1)}{2x_1 x_2} . \quad (8.7.1)$$

Za okulárem bude mít tato paralaxe úhlovou hodnotu  $\alpha'$ , pro kterou platí

$$\alpha' = \alpha \cdot \Gamma = \frac{D(x_2 - x_1)}{2x_1 x_2} \cdot \Gamma . \quad (8.7.2)$$

Zvážme-li, že průměr  $D'$  výstupní pupilly dalekohledu je vázán vztahem

$$D' = \frac{D}{\Gamma} ,$$

vychází pro paralaxu  $\alpha'$  za okulárem vztah

$$\alpha' = \frac{D'(x_2 - x_1)}{2x_1 x_2} \cdot \Gamma^2 . \quad (8.7.3)$$

v míře obloukové, nebo

$$\alpha' = \frac{D'(x_2 - x_1) \cdot \Gamma^2}{x_1 x_2} \cdot 10^5 \text{ ve vteřinách} . \quad (8.7.4)$$

Někdy bývá třeba zjistit o jakou hodnotu, vyjádřenou v milimetrech, se bude pohybovat obraz předmětu vzhledem k značce, když se oko pošine do kraje výstupní pupilly. Označme-li tento posuv  $\ell'$ , pak pro něj platí

$$\ell' = g' \cdot \alpha' ,$$

kde  $g'$  je vzdálenost obrazu od výstupní pupily. Pro tuto vzdálenost však podle dřívějšího platí

$$g' = \frac{x_1}{\Gamma^2} ,$$

takže

$$\ell' = \frac{x_1}{\Gamma^2} \cdot \alpha' = \frac{D'(x_2 - x_1)}{2x_2} . \quad (8.7.5)$$

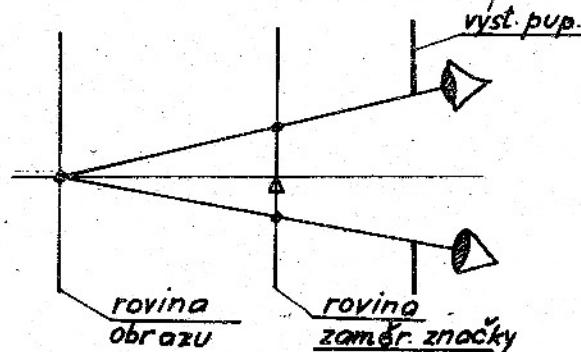
Příklad: Uvažujme dalekohled o zvětšení  $\Gamma = 2,6x$  a výstupní pupile  $D' = 5 \text{ mm}$ . Nechť tento dalekohled je nastaven na vzdálenost  $x_1 = 200 \text{ cm}$ . Jaká bude paralaxe při zaměření na cíl ve vzdálenosti  $x_2 = 1000 \text{ m}$ ?

Podle vztahu (8.7.4) vychází pro paralaxu za okulárem

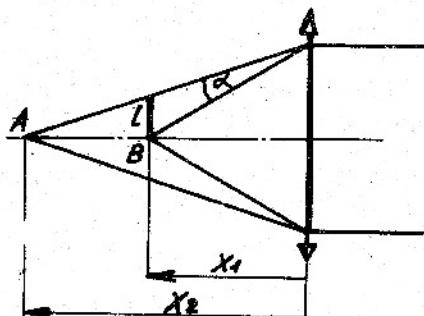
$$\alpha' = \frac{0,005 \cdot 800 \cdot 2,6^2}{200 \cdot 1000} \cdot 10^5 = 2,676 = 13,50'' .$$

Pro posuv  $\ell'$  vychází pak

$$\ell' = \frac{0,005 \cdot 800}{2 \cdot 1000} = 0,002 \text{ m} = 2 \text{ mm} .$$



Obr. 8.7.1 Vznik paralaxy.



Obr. 8.7.2. K určení paralaxy dalekohledu.

Zamíříme-li dalekohled na cíl ve vzdálenosti  $x_2 = \infty$ , pak ze vztahu (8.7.4) plyne

$$\alpha' = \frac{D' (x_2 - x_1)^2}{x_1 x_2} \cdot 10^5 = \frac{D' (1 - \frac{x_1}{x_2})^2}{x_1} \cdot 10^5$$

čili pro  $x_2 = \infty$

$$\alpha' = \frac{D' f'^2}{x_1} \cdot 10^5 \quad (8.7.6)$$

Příklad: V našem předchozím případě, kdy dalekohled je nastaven na vzdálenost  $x_1 = 200$  mm, vychází paralaxe na nekonečně vzdálený cíl

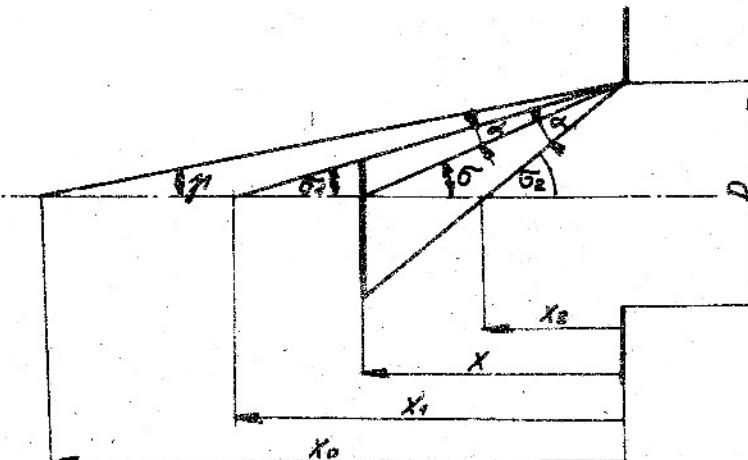
$$\alpha' = \frac{0,005 \cdot 2,5^2}{200} \cdot 10^5 = 2,5 \cdot 6,76 = 16,8''$$

$x_2 = \infty$

Pokud je paralaxe  $\alpha'$  za okulárem menší než rozlišovací mez oka, tj. 1 minuta, není pohyb obrazu vzhledem ke značce pozorování a paralaxe se nedá nijakým způsobem ani zjistit ani odstranit.

Proto při konstrukci zaměřovače bývá často kladen požadavek, aby zaměřovač byl při justáži nastaven na takovou vzdálenost  $x$ , aby pro cíle obsažené mezi vzdálenostmi  $x_1$  a  $x_2$  byla paralaxe nepozorovatelná, tj. menší než 1 minuta.

Podle obr. 8.7.3 plyne pro příslušné paralaxy  $\alpha$  před dalekohledem



Obr. 8.7.3 K určení nevhodnosti vzdálenosti nastavení dalekohledu.

$$\alpha = \sigma_2 - \sigma = \sigma - \sigma_1 ,$$

kde

$$\sigma_1 = \frac{D}{2x_1} , \sigma_2 = \frac{D}{2x_2} , \sigma = \frac{D}{2x} ,$$

takže

$$\alpha = \frac{D}{2x_2} - \frac{D}{2x} = \frac{D}{2x} - \frac{D}{2x_1} . \quad (8.7.7)$$

Uhel  $\alpha$  má být menší než  $1^\circ$ . Jek je patrné z předchozího obrázku, existuje vzdálenost  $x_0$  taková, že pro ni platí

$$-\frac{1}{\Gamma} \cdot \beta = -\frac{D}{2x_0} . \quad (8.7.8)$$

Je to vzdálenost, ze které se jeví průměr  $D$  vstupní pupily dalekohledu pod úhlem  $2 \text{ minuty}$

Můžeme tedy psát

$$\frac{D}{2x_0} = \frac{D}{2x_2} - \frac{D}{2x} \text{ resp. } \frac{D}{2x_0} = \frac{D}{2x} - \frac{D}{2x_1}$$

čili

$$\frac{1}{x_0} = \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x} \text{ resp. } \frac{1}{x_0} = \frac{1}{x} - \frac{1}{x_1} , \quad (8.7.9)$$

přitom

$$x_0 = -\frac{D \cdot \Gamma}{2 \cdot 3 \cdot 10^4} = -\frac{D \cdot \Gamma}{6} \cdot 10^4 .$$

Vzhledem k tomu, že

$$D = D' \cdot \Gamma , \text{ můžeme psát dále}$$

$$x_0 = -\frac{D \cdot \Gamma}{6} \cdot 10^4 = -\frac{D' \cdot \Gamma^2}{6} \cdot 10^4 . \quad (8.7.10)$$

Potom ze vztahu (8.7.9) plyne pro hledanou vzdálenost

$$x = \frac{x_0 + x_2}{x_0 - x_2} = \frac{x_0 + x_1}{x_0 + x_1} . \quad (8.7.11)$$

a pro vzdálenosti  $x_1$  a  $x_2$

$$x_1 = \frac{x_0 + x}{x_0 - x} \text{ resp. } x_2 = \frac{x_0 + x}{x_0 + x} . \quad (8.7.12)$$

Příklad: Nechť je dán dalekohled o zvětšení  $\Gamma = 6x$  a průměru vstupní pupily  $D = 30 \text{ mm}$ . Určeme vzdálenost  $x_0$ , volme vzdálenost  $x$  a určeme k ní vzdálenosti  $x_1$  a  $x_2$ .

Pro vzdálenost  $x_0$  plyne podle (8.7.10)

$$x_0 = -\frac{D \cdot \Gamma}{6} \cdot 10^4 = -\frac{30 \cdot 6}{6} \cdot 10^4 = -3 \cdot 10^5 \text{ mm} = -300 \text{ m} .$$

Volme vzdálenost  $x = -200 \text{ m}$  a určeme vzdálenosti  $x_1$  a  $x_2$ .

$$x_1 = \frac{-300 + (-200)}{-300 - (-200)} = \frac{60.000}{-100} = -600 \text{ m}$$

$$x_2 = \frac{-300 + (-200)}{-300 + (-200)} = \frac{60.000}{500} = -120 \text{ m} .$$

Je-li např. vzdálenost  $x_2$  velká, postupujeme obráceně. Volime vzdálenost  $x_2$ , např.  $-80 \text{ mm}$  a určíme příslušnou vzdálenost  $x$ . V našem případě dostaneme

$$x = \frac{x_0 \cdot x_2}{x_0 - x_2} = \frac{-300 \cdot (-80)}{-300 - (-80)} = \frac{24.000}{-220} = -108 \text{ m} .$$

Nyní k nalezené hodnotě  $x$  určíme druhou hranici  $x_1$ . Dostaneme

$$x_1 = \frac{-300 + (-108)}{-300 - (-108)} = \frac{-32.400}{-198} = -170 \text{ m} .$$

Je-li  $x_1$  malé, je nutno zvětšit  $x_2$  a hledat kompromis.

### 8.8. Nastavení okuláru a jeho vliv na zvětšení dalekohledu

V předchozích úvahách jsme mlčky předpokládali, že za dalekohledem je umístěno normální oko pozorovatele. Všimněme si nyní případu, kdy oko pozorovatele je ametropické, tj. krátkozraké nebo dalekozraké. Má-li takový pozorovatel vidět dalekohledem stejně jako pozorovatel normální, musí si příslušnou ametropii korigovat brýlovým sklem a pozorovat dalekohledem s takto ozbrojeným okre. K tomu je však nutné, aby výstupní pupila dalekohledu byla dostatečně vzdálena, aby oční pupila mohla splynout s výstupní pupilou dalekohledu. Protože brýlové sklo se umisťuje cca 13 mm před rohovkou, je nutné, aby výstupní pupila byla vzdálena od poslední plochy okuláru alespoň 18 mm, jak to vyplývá z obr. 8.8.1.

V případě jednoduchých zaměřovacích dalekohledů není vždy snadné a jednoduché provést konstrukci dalekohledu tak, aby tato podmínka byla splněna.

V těchto případech se postupuje tak, že se dalekohled konstruuje s posuvným okulárem, kterým se zobrazí pozorovaný předmět do vzdáleného bodu  $R$  pozorovatele oka, aniž by tento musil pozorovat s brýlovým sklem. V případě krátkozrakého oka se posune okulár k objektivu, v případě dalekozrakého oka od objektivu. Pro příslušné pošinutí s plyne podle obr. 8.8.2 pomocí Newtonovy zobrazovací rovnice

$$\frac{1000}{D} \cdot s = - f_2^2$$

čili

$$s = \frac{-f_2^2}{1000} \cdot D \quad (8.8.1)$$

Obr. 8.8.1 Umístění oka ozbrojeného brýlovým sklem za okulárem.

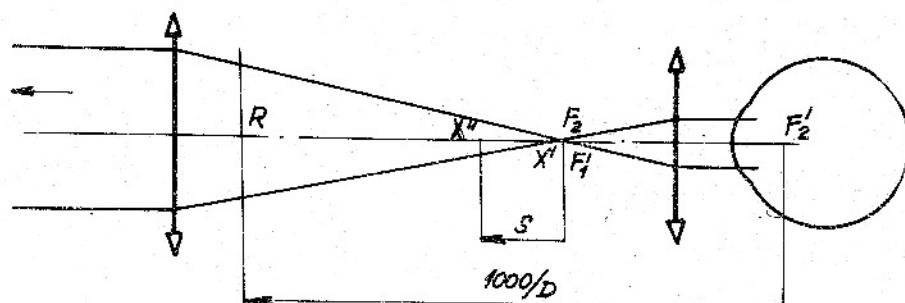
kde  $\frac{1000}{D}$  značí vzdálenost, do které má být zobrazen okulárem předmět pro oko o emetropii  $D$  dioptrií a  $f_2$  ohniskovou vzdálenost okuláru.

**Příklad:** Určeme posuv okuláru o ohniskové vzdálenosti  $f_2' = 20$  mm tak, aby tento posuv odpovídal oku s krátkozrakostí  $-2,5$  D.

Podle (8.8.1) pro tento posuv vychází

$$s = - \frac{20^2}{1000} \cdot (-2,5) = +1 \text{ mm}.$$

To znamená, že okulár je nutno pošinout tak, aby obrazová rovina objektivu ležela



Obr. 8.8.2 K určení posunu okuláru.

+ 1 mm vpravo od ohniska okuláru, tj. okulár je nutno pošinout o 1 mm k objektivu.

Obecně je možno říci, že ametropii  $\pm 1$  dioptrie odpovídá posuv okuláru

$$s = \pm \frac{f_0^2}{1000} . \quad (8.8.2)$$

Některé přístroje, jako např. triedry nebo divadelní kukátka, nebo dalekohledy některých zaměřovacích a laboratorních přístrojů se konstruují tak, že okulár je posuvný podél optické osy pomocí lichoběžníkového závitu o velkém stoupání v rozsahu  $\pm 5$  D.

Např. u triedru 6 x 30 je použito Kellnerova okuláru o ohniskové vzdálenosti 20 mm. Podle (8.8.2) odpovídá ametropii  $\pm 1$  D posuv

$$s = \pm \frac{20^2}{1000} = \pm 0,4 \text{ mm} .$$

Celému rozsahu  $\pm 5$  D odpovídá tedy posuv okuláru  $0,4 \times 10 = 4$  mm.

Obyčejně je žádano, aby okulár byl opatřen dioptrovou stupnicí dělenou po 0,5 D od  $-5$  do  $+5$  D a aby tato stupnice byla naryta na polovičním obvodu objímky okuláru.

To znamená, že je žádano, aby posuv 4 mm se dosáhl pootočením okuláru o  $180^\circ$ . Potom příslušný závit musí mít stoupání  $2 \times 4 = 8$  mm.

Poněvadž toto stoupání je příliš velké, volí se čtyřchodý závit s lichoběžníkovým profilem, podle obr. 8.8.3.

U některých přístrojů, používaných ve vojenské praxi, je naopak žádano, aby okulár byl seřízen na určitou ametropii, neboť nutno vyloučit možnost dejistáže dalekohledu a snížení obranné pohotovosti příslušné zbraně tím, že by obsluha měla možnost okulár přestavovat.

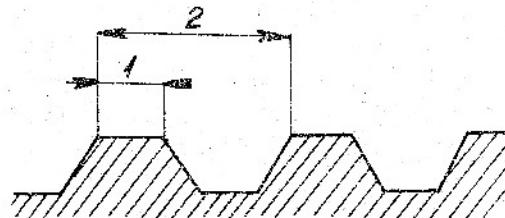
Je však nutno nastavit okulár na ametropii odpovídající průměrnému pozorovateli. Zkušenosti ukazují, že většina lidí je spíše mírně krátkozraká v rozsahu  $-0,5$  až  $-1$  D. Z toho důvodu se pak příslušné zaměřovací dalekohledy nastavují s okulárem na  $-0,5$  až  $-1$  D.

Tento dejistáž se však poruší afokálnost optické soustavy dalekohledu, což se projeví tím, že zvětšení nabude jiné hodnoty než je ta, která odpovídá afokální soustavě.

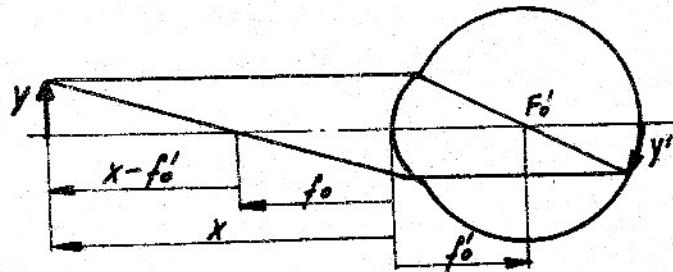
Všimněme si proto blíže tohoto vlivu. Jak již bylo uvedeno dříve, zvětšení dalekohledu je dáno poměrem velikosti obrazu, který se vytvoří na sítnici oka, pozorujeme-li předmět dalekohledem a velikostí obrazu, který se vytvoří na sítnici, pozorujeme-li tentýž předmět pouhým okem.

Značí-li  $f'_0$  ohniskovou vzdálenost neakomodujícího oka,  $x$  vzdálenost a  $y$  velikost pozorovaného předmětu, pak pro velikost příslušného obrazu  $y'$  na sítnici platí podle obr. 8.8.4

$$\frac{y'}{y} = \frac{f'_0}{x - f'_0} = \frac{f'_0}{x}$$



Obr. 8.8.3 Profil závitu nastavovacího okuláru triedru 6 x 30.

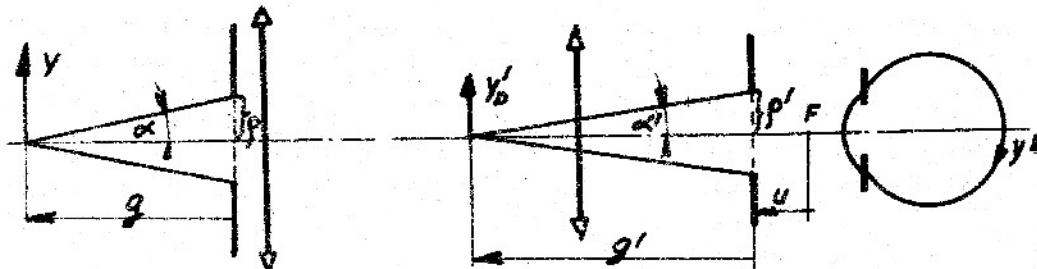


Obr. 8.8.4 K určení velikosti obrazu předmětu na sítnici pozorovatelského oka.

Síli

$$y' = y \cdot \frac{f'_0}{x} . \quad (8.8.3)$$

Předpokládáme, že nyní mezi předmětem a pozorovatelským okre je vložen dalekohled tak, že pozorovaný předmět leží ve vzdálenosti  $g$  od vstupní pupilly dalekohledu, takže příslušný obraz vytvořený dalekohledem leží ve vzdálenosti  $g'$  od jeho výstupní pupilly, jak je to naznačeno na obr. 8.8.5.



Obr. 8.8.5 K určení vlivu posunu okuláru na zvětšení dalekohledu.

Předpokládáme dále, že obecně nesplývá pupile pozorovatelského oka s výstupní pupilou dalekohledu, nýbrž že oko je umístěno tak, že jeho předmětové ohnisko  $F_o$  je ve vzdálenosti  $u$  od výstupní pupilly dalekohledu.

Pro velikost obrazu  $y''$  na sítnici pozorovatelského oka plyne obdobně jako v předešlém případě

$$y'' = \frac{f'_0}{g' + u} \cdot y'_0 . \quad (8.8.4)$$

kde  $y'_0$  značí velikost obrazu vytvořeného dalekohledem a  $f'_0$  opět ohniskovou vzdálenost neškemodujícího oka (správněji by bylo třeba brát místo  $f'_0$  ohniskovou vzdálenost akomodujícího oka na vzdálenost  $g' + u$ , avšak vzhledem k malému rozdílu obou ohniskových vzdáleností se dopouštíme malé chyby, běžíme-li v naších úvahách  $f'_0/$ .

Pro zvětšení uvažovaného dalekohledu pak vychází

$$\Gamma = \frac{y''}{y'} = \frac{\frac{f'_0}{g' + u} \cdot y'_0}{\frac{f'_0}{x} \cdot y} = \frac{y'_0}{y} \cdot \frac{x}{g' + u} . \quad (8.8.5)$$

Podle Legrangeovy věty platí

$$n \cdot y = \operatorname{tg} \alpha = n' y'_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha'$$

čili

$$ny \cdot \frac{p}{g} = n' \cdot y'_D \cdot \frac{p'}{g'}, \quad (8.8.6)$$

kde  $p$  a  $p'$  značí poloměr vstupní a výstupní pupily dalekohledu.

Z (8.8.6) plyne dále

$$\frac{y'_D}{y} = \frac{n}{n'} \cdot \frac{p}{p'} \cdot \frac{g'}{g}, \quad (8.8.7)$$

takže po dosazení do (8.8.5) plyne

$$\Gamma = \frac{n}{n'} \cdot \frac{p}{p'} \cdot \frac{g'}{g} \cdot \frac{x}{g' + u}. \quad (8.8.8)$$

Přitom plyne dále pro poměr  $\frac{p}{p'}$ , vzhledem k tomu, že obraz  $y'_D$  předmětu  $y$ , vytvořený dalekohledem (který není nyní afokální soustavou), leží prakticky v jeho obrazovém ohnisku

$$\frac{p'}{p} = \frac{g'}{g} = g'y \quad \text{čili}$$

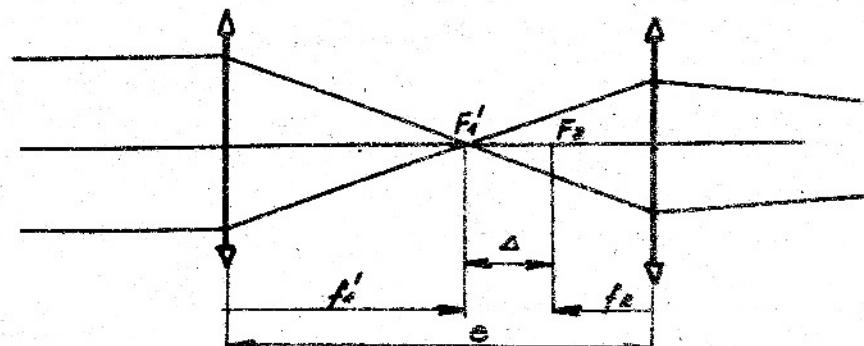
$$\frac{p}{p'} = \frac{1}{g'y}, \quad (8.8.9)$$

$$y = \frac{f_1 + f_2 - e}{f_1 f_2} = \frac{\Delta}{f_1 f_2} \quad (8.8.10)$$

značí lámavost dalekohledu, jehož okulár je počinut vzhledem k obrazové ohniskové rovině objektivu o hodnotu  $\Delta$ , jak je to vidět z obr. 8.8.6.

Dosadíme-li z (8.8.9) do (8.8.8) a uvážíme-li, že prakticky  $g = x$  a  $n = n'$ , dostaneme

$$\Gamma = \frac{1}{g'} \cdot \frac{1}{g' + u}. \quad (8.8.11)$$



Obr. 8.8.6 K určení vlivu posuvu okuláru na zvětšení dalekohledu.

Výraz  $\frac{1}{g' + u}$  značí změnu lámavosti oka v dioptriích při jeho skoncentraci na obraz  $y'_D$ . Nechť této změně odpovídá D dioptrii.

Potom můžeme vztek (8.8.11) psát dále ve tvaru

$$\Gamma = \frac{1}{g'} \cdot D = \frac{f_1 f_2}{\Delta} \cdot D,$$

kde všechny vzdálenosti jsou vyjádřeny v metrech, nebo

$$\Gamma = \frac{f_1 f_2 \cdot D}{1000 \cdot \Delta}, \quad (8.8.12)$$

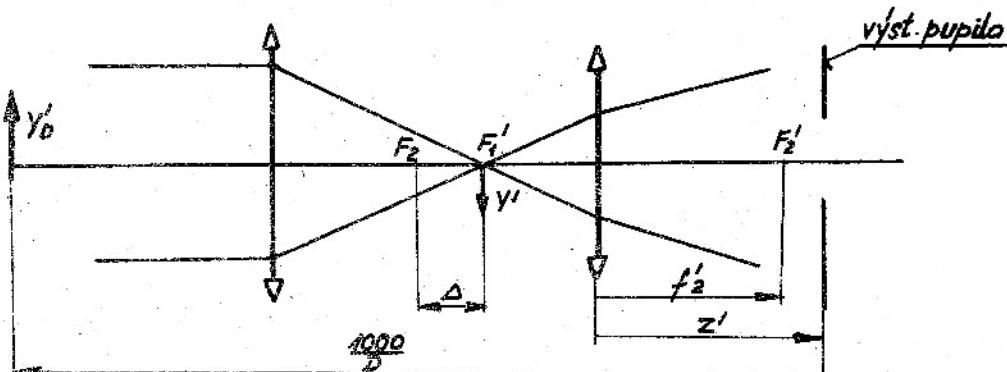
kde vzdálenosti  $f_1'$ ,  $f_2'$  a  $\Delta$  jsou vyjádřeny v milimetrech.

Při tom hodnotu posunu  $\Delta$  odpovídající D dioptriím, na které je nastaven okulár, určíme podle obr. 8.8.7, podle kterého platí

$$\left[ \frac{1000}{D} + (z' - f_2') \right] \cdot \Delta = - f_2'^2$$

tj.

$$\Delta = \frac{-f_2'^2}{\frac{1000}{D} + z' - f_2'} , \quad (8.8.13)$$



Obr. 8.8.7 K určení posuvu okuláru.

kde  $z'$  značí vzdálenost výstupní pupily dalekohledu od okuláru.

Je-li tedy okulár nastaven na  $D$  dioptrií, můžeme pomocí vztahů (8.8.13) a (8.8.12) určit skutečné zvětšení takto nastaveného dalekohledu.

Příklad: Uvažujme puškový dalekohled, jehož objektiv má ohniskovou vzdálenost  $f_1 = 43$  mm a okulár  $f_2' = 58$  mm a jehož převracející soustava má zvětšení  $m = -2,33$ . Jeho výstupní pupila leží ve vzdálenosti  $z' = 300$  mm od okuláru, který je nastaven na  $-0,5$  D.

Podle (8.8.13) vychází pro

$$\Delta = \frac{-58^2}{\frac{1000}{-0,5} + 300 - 58} = \frac{-3364}{-2000 + 300 - 58} = \frac{-3364}{-1758} = 1,94 \text{ mm} .$$

Pro zvětšení dalekohledu bez převracející soustavy

$$F'' = \frac{43 \cdot 58 \cdot (-0,5)}{1,94 \cdot 1000} = -0,65$$

a tedy celkové tvětšení dalekohledu je pak

$$F = F'' \cdot m = (-0,65) \cdot (-2,33) = +1,514 .$$

Kdyby byl dalekohled nastaven při justáži jako afokální soustava, bylo by jeho zvětšení

$$= \frac{43}{58} \cdot (-2,33) = +1,74 .$$

Zvětšení dalekohledu se tedy nastavením okuláru na  $-0,5$  D zmenší o  $0,23$ .

## 9. OBJEKTIV DALEKOHLEDU

### 9.1. Achromatický objektiv

Hvězdářský dalekohled byl objevenem Keplerem v r. 1611. Až do r. 1758, kdy byl Dollondem (1706 - 1761) objeven achromatický objektiv, se používalo u hvězdářských dalekohledů jako objektivu jednoduché čočky. Hlavním nedostatkem tohoto jednoduchého objektivu je jeho barevná vada.

Věšimme si proto blíže barevné vady polohy. Uvažujme dva paprsky o vlnových délkách  $\lambda_F$  a  $\lambda_C$  dopadající na jednoduchou čočku rovnoběžně s optickou osou. Nechť  $f'$  značí ohniskovou vzdálenost čočky pro střední vlnovou délku  $\lambda_D$ .

Podle obr. 9.1.1 je pak barevná vada polohy dána rozdílem sečných vzdáleností příslušných k uvažovaným dvěma vlnovým délkom

$$\Delta x'_A = x'_F - x'_C \quad (9.1.1)$$

Ze vztahu pro lámavost  $\varphi$  jednoduché čočky

$$\varphi = -\frac{1}{f'} r = (n_D - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right), \quad (9.1.2)$$

plyne differencováním

$$-\frac{df'}{f'^2} = dn \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

čili

$$-\frac{df'}{f'^2} = \frac{dn}{n_D - 1} \cdot \frac{1}{f'}.$$

Uvážime-li, že

$$df' = x'_F - x'_C = \Delta x'_A$$

a

$$dn = n_F - n_C,$$

můžeme předchozí vztah psát ve tvaru

$$df' = \Delta x'_A = -\frac{n_F - n_C}{n_D - 1} f' = -\frac{f'}{\nu}. \quad (9.1.3)$$

Nemá-li být barevná vada polohy patrná, musí být

$$\Delta x'_A \leq 2\lambda_F c^2 + 2\lambda_C c^2$$

nebo

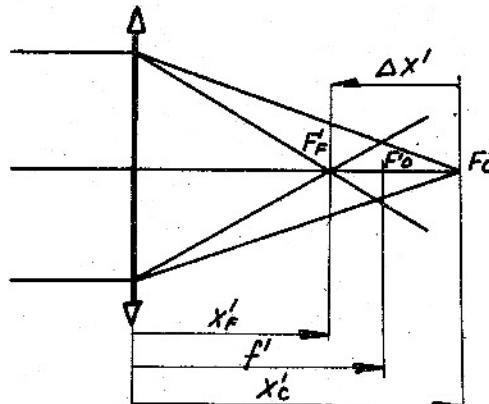
$$\Delta x' \leq 4\lambda c^2$$

kde  $\lambda = \frac{\lambda_F + \lambda_C}{2}$  je střední vlnová délka ležící mezi vlnovými délky  $\lambda_F$  a  $\lambda_C$  a  $c = \frac{f'}{D}$  značí clonové číslo objektivu.

Uvážime-li dále, že pro jednoduchou čočku je  $\Delta x' < 0$ , můžeme psát dále

$$\frac{f'}{\nu} \leq 4\lambda c^2 = 4\lambda \frac{f'^2}{D^2} \quad (9.1.4)$$

$$x) \Delta x'_A \leq 2 c^2 (\lambda_F + \lambda_C) = 4 c^2 \frac{\lambda_F + \lambda_C}{2} = 4 c^2 \lambda.$$



Obr. 9.1.1 K barevné vadě polohy jednoduché čočky.

nebo

$$f' \geq \frac{D^2}{4 \lambda \gamma} . \quad (9.1.5)$$

Volíme-li sklo s  $\gamma = 70$ , plynou pro  $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$  cm

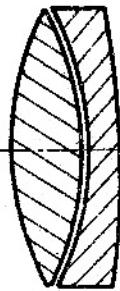
$$f' \geq \frac{D^2}{4 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \cdot 70} = \frac{D^2}{1400 \cdot 10^{-5}} = 70 \frac{D^2}{m}, \quad (9.1.6)$$

Když D a f' jsou vyjádřeny v centimetrech. Např. pro D = 10 cm vychází odtud, že

$$f' \geq 70 \cdot 10^2 \text{ cm} = 70 \text{ m}.$$

Z tohoto výsledku je patrné, že při poměrně malém průměru D = 10 cm vychází značně velká ohnisková vzdálenost objektivu. Tím je odvodená konstrukce původních dalekohledů. Např. Heveliusův dalekohled měl objektiv s ohniskovou vzdáleností 49 m a byl montován na stožáru 29 m vysokém.

Nyní se používá u dalekohledů většinou achromatických objektivů. Jejich vývoj souvisejí s vývojem optických skel. Když se počátkem 19. stol. podařilo Fraunhoferovi zdokonalit výrobu korunového a flintového skla, podařilo se mu též vypracovat návrh dvoučočkového achromatického objektivu, který nese jeho jméno. Je složen ze dvou vzájemně nestmelených čoček, korunové spojky a flintové rozptylky, jak je to vidět z obr. 9.1.2. Je korigován z hlediska barevné vady polohy, otvorové vady a komory. To znamená, že na tento objektiv jsou kladený tři požadavky. Předepiseme-li ještě ohniskovou vzdálenost, můžeme splnit i tento požadavek, neboť objektiv má 4 proměnné parametry - 4 poloměry křivosti.



Obr. 9.1.2 Fraunhoferův achromatický objektiv.

Tento objektiv vychovuje pro ohniskové vzdálenosti

$$f' = 1,2 D^2 \quad x) \quad (9.1.7)$$

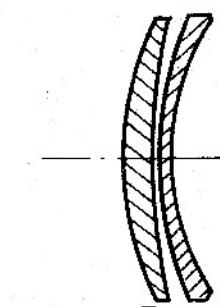
při zorném poli do  $12^\circ$ .

Ze vztahu (9.1.7) vychází např. pro D = 3 cm :  $f' = 1,2 \cdot 9 = 10,8 \text{ cm}$ .

Od Fraunhoferova objektivu se poněkud liší Gaussův objektiv, znázorněný na obr. 9.1.3. Má odstraněnu barevnou vodu polohy pro dvě vlnové délky, avšak nemá splněnu sínovou podmíinku. Používá se ho až do relativního otvoru 1:9 a pro maximální zorné pole  $18^\circ$ . Je možno říci, že tento objektiv nenašel většího praktického použití.

Zvláštním případem Fraunhoferova objektivu je tzv. Clairotův objektiv. U Fraunhoferova objektivu jsou jeho vnitřní poloměry sobě velmi blízké. Vhodnou volbou skel lze dosáhnout, že tyto poloměry nabudou stejných hodnot. Potom je možno čočky vzájemně stmelenit, čímž se odstraní ztráty světla odrazem na těchto dvou plochách a zvýší se kontrast obrazu.

S ohledem na různou tepelnou roztaživost korunových a flintových skel, doporučuje se tmelit tyto objektivy do průměru D = 50 mm.



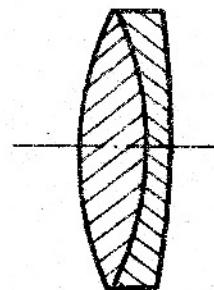
Obr. 9.1.3 Gaussův achromatický objektiv

Clairotovy objektivy se konstruují až do relativního otvoru 1 : 4 při maximálním zorném poli do  $12^\circ$ . Používá se jich především pro kon-

x) D je vyjádřeno v centimetrech.

strukci triedrù. Je možno říci, že jejich relativní otvor dosahuje obecné hodnoty  $1 : D$ , kde  $D$  je vyjádřen v centimetrech.

K potlačení sekundérní barevné vady se používá trifóčkových apochromatických objektivù, které se konstruují pro relativní otvor  $1 : 15$  příp.  $1 : 10$ . Stavba tohoto objektivu je patrná z obr. 9.1.5.



Obr. 9.1.4 Clai-rautův achromatický objektiv.

### 9.2. Návrh tmeleného achromatického objektivu

Podle (9.1.3) platí pro barevnou vodu polohy jednoduché čočky

$$df' = -\frac{f'}{\gamma}.$$

$$\text{Položime-li } f' = \frac{1}{\gamma},$$

dostaneme differencováním a dosazením do předešlé rovnice

$$d\varphi = \frac{\rho}{\gamma}. \quad (9.2.1)$$

Uvažujme soustavu složenou ze dvou čoček o lámavostech  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$ . Potom pro lámavost  $\varphi$  této soustavy platí

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2. \quad (9.2.2)$$

Differencováním (9.2.2) dostaneme podobně jako v případě jednoduché čočky vztah pro barevnou vodu polohy této dvoučlenné soustavy

$$d\varphi = d\varphi_1 + d\varphi_2 \quad (9.2.3)$$

a použitím (9.2.1)

$$d\varphi = \frac{\varphi_1}{\gamma_1} + \frac{\varphi_2}{\gamma_2}.$$

Položime-li požadavek, aby barevná voda polohy této dvoučlenné soustavy byla rovna nule, dostaneme pro lámavosti  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  příslušných členù spolu s rovnicií (9.2.2) dvě rovnice

$$\left. \begin{aligned} \varphi &= \varphi_1 + \varphi_2 \\ 0 &= \frac{\varphi_1}{\gamma_1} + \frac{\varphi_2}{\gamma_2} \end{aligned} \right\} \quad (9.2.4)$$

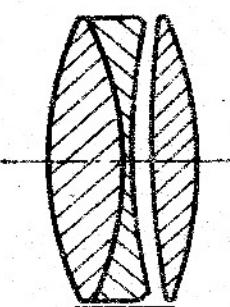
V praxi se obyčejně postupuje tak, že se lámavost  $\varphi$  volí rovna 1, takže pak lámavosti  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  se určí z rovnic

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 + \varphi_2 &= 1 \\ \frac{\varphi_1}{\gamma_1} + \frac{\varphi_2}{\gamma_2} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9.2.5)$$

Řešením těchto rovnic dostáváme

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{\gamma_1}{\gamma_1 - \gamma_2} \\ \varphi_2 &= -\frac{\gamma_2}{\gamma_1 - \gamma_2} \end{aligned} \right\} \quad (9.2.6)$$

Veličiny  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\gamma_1$  a  $\gamma_2$  jsou konstantní hodnoty nezávislé na poloměrech čoček  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  a  $r_4$  obou čoček. Z toho plyne, změníme-li tzv. prohybáním tvar



Obr. 9.1.5 Apochromatický objektiv.

obou čoček při zachování jejich lámevosti a materiálu, ze kterého mají být zhotoveny, že barevná vada uvažované dvoučlenné soustavy zůstane nezměněna.

Tuto skutečnost můžeme využít k tomu, abychom volili tvar jednotlivých čoček tak, aby příslušná dvoučlenná soustava jako celek měla současně s barevnou vadou polohy odstraněnu i otvorovou vadu. Přitom obyčejně řešíme tuto dvoučlennou soustavu tak, aby poloměry  $r_2$  a  $r_3$  byly stejné, abychom mohli oba členy soustavy spolu stmelenit a snížit tak ztráty světla odrazem na příslušných plochách.

Z teorie vad třetího rádu plyne pro koeficient A otvorové vady jednoduché čočky:

$$A = \left(\frac{n}{n-1}\right)^2 \cdot \varphi^3 + \frac{3n+1}{n-1} \cdot \sigma \varphi^2 + \frac{3n+2}{n} \sigma^2 \cdot \varphi - \left[ \frac{2n+1}{n-1} \varphi^2 + \frac{4(n+1)}{n} \cdot \varphi \cdot \sigma \right] \rho_1 + \frac{n+2}{n} \varphi \cdot \rho_1^2 , \quad (9.2.7)$$

kde  $\sigma = \frac{1}{x}$  značí převrácenou hodnotu předmětové sečné vzdálenosti (tzv. vergenci) a  $\rho_1 = \frac{1}{r_1}$  křivost první plochy příslušné čočky.

Určeme nyní koeficienty otvorové vady pro obě čočky dvoučlenné soustavy a označme je  $A_a$  resp.  $A_b$ .

Vzhledem k tomu, že se jedná o návrh objektivu dalekohledu, který je určen pro pozorování velmi vzdálených předmětů, bude pro první čočku soustavy  $\sigma_1 = 0$ , takže výraz pro koeficient  $A_a$  otvorové vady nabude z jednodušeného tvaru

$$\begin{aligned} A_a &= \left(\frac{n_1}{n_1-1}\right)^2 \cdot \varphi_1^3 - \frac{2n_1+1}{n_1-1} \varphi_1^2 \rho_1 + \frac{n_1+2}{n_1} \varphi_1 \rho_1^2 \\ A_b &= \left(\frac{n_2}{n_2-1}\right)^2 \cdot \varphi_2^3 + \frac{3n_2+1}{n_2-1} \sigma_2 \varphi_2^2 + \frac{3n_2+2}{n_2} \sigma_2^2 \varphi_2 - \left[ \frac{2n_2+1}{n_2-1} \varphi_2^2 + \frac{4(n_2+1)}{n_2} \varphi_2 \cdot \sigma_2 \right] \rho_3 + \frac{n_2+2}{n_2} \cdot \varphi_2 \cdot \rho_3^2 \end{aligned} \quad (9.2.8)$$

Položíme-li požadavek na stmelení obou čoček, bude

$$\rho_2 = \rho_3 ,$$

a uvážíme-li, že mezi  $\rho_1$  a  $\rho_2$  platí vztah

$$\frac{\varphi_1}{n_1-1} = \rho_1 - \rho_2 ,$$

takže

$$\rho_2 = \rho_1 - \frac{\varphi_1}{n_1-1} , \quad (9.2.9)$$

můžeme vztah pro koeficient  $A_b$  psát ve tvaru

$$\begin{aligned} A_b &= \left(\frac{n_2}{n_2-1}\right)^2 \varphi_2^3 + \frac{3n_2+1}{n_2-1} \cdot \sigma_2 \varphi_2^2 + \frac{3n_2+2}{n_2} \sigma_2^2 \varphi_2 - \\ &- \left[ \frac{2n_2+1}{n_2-1} \varphi_2^2 + \frac{4(n_2+1)}{n_2} \varphi_2 \cdot \sigma_2 \right] \cdot \left( \rho_1 - \frac{\varphi_1}{n_1-1} \right) + \\ &+ \frac{n_2+2}{n_2} \cdot \varphi_2 \cdot \left( \rho_1 - \frac{\varphi_1}{n_1-1} \right)^2 , \end{aligned}$$

čili po úpravě

$$\begin{aligned}
 A_b = & \left\{ \left( \frac{n_2}{n_2 - 1} \right)^2 \cdot \varphi_2^3 + \frac{3n_2 + 1}{n_2 - 1} \varphi_2 \varphi_2^2 + \frac{3n_2 + 2}{n_2} \varphi_2^2 \varphi_2 + \right. \\
 & + \left[ \frac{2n_2 + 1}{n_2 - 1} \varphi_2^2 + \frac{4(n_2 + 1)}{n_2} \varphi_2 \varphi_2 \right] \frac{\varphi_1}{n_1 - 1} + \frac{n_2 + 2}{n_2} \frac{\varphi_1^2 \cdot \varphi_2}{(n_1 - 1)^2} \Big\} - \\
 & - \left[ \frac{2n_2 + 1}{n_2 - 1} \varphi_2^2 + \frac{4(n_2 + 1)}{n_2} \varphi_2 \varphi_2 + \frac{n_2 + 2}{n_2} \cdot \frac{2\varphi_1 \varphi_2}{n_1 - 1} \right] \rho_1 + \\
 & + \frac{n_2 + 2}{n_2} \varphi_2 \cdot \rho_1^2 . \tag{9.2.10}
 \end{aligned}$$

Má-li být u navrhovaného dvoučlenného objektivu odstraněna otvorová vada, musí být

$$A_a + A_b = 0 ,$$

nebo musí být tento součet roven malé záporné hodnotě, např.  $-0,2$  až  $-0,3$ .

Stačí tedy sečít první rovnici (9.2.8) s rovnicí (9.2.10) a dostaneme kvadratickou rovnici v  $\rho_1$ . Vypočítáme  $\rho_1$  a pak již snadno určíme i  $\rho_2$  a  $\rho_4$  ze vztahů

$$\begin{cases} \rho_2 = \rho_1 - \frac{\varphi_1}{n_1 - 1} \\ \rho_4 = -\rho_2 - \frac{\varphi_2}{n_2 - 1} \end{cases} \tag{9.2.11}$$

Tím jsou určeny obě čočky objektivu a stačí nahradit pouze tenké čočky čočkami tlustými.

Pro usnadnění výpočtu koeficientů A otvorové vady slouží tabulka 9.2.1, která obsahuje hodnoty koeficientů vyskytujících se v příslušných výrazech pro nejběžnější optická skla používaná ke konstrukci těchto objektivů.

#### Příklad

Urceme konstrukční parametry zmíleného achromatického objektivu, jehož spojny člen má být zhotoven ze skla BK 7 a rozptylný člen ze skla SF 2.

Optické hodnoty těchto skel jsou:

$$\begin{aligned}
 \text{BK 7 : } n_1 &= 1,51633 & \nu_1 &= 64,0 \\
 \text{SF 2 : } n_2 &= 1,64769 & \nu_2 &= 33,9
 \end{aligned}$$

Zdle (9.2.6) plyne pro lámavosti  $\varphi_1$  resp.  $\varphi_2$  obou těchto čoček objektivu

$$\varphi_1 = \frac{\nu_1}{\nu_1 - \nu_2} = \frac{64,0}{64,0 - 33,9} = \frac{64,0}{30,1} = 2,126$$

$$\varphi_2 = -\frac{\nu_2}{\nu_1 - \nu_2} = -\frac{33,9}{30,1} = -1,126$$

Urceme nyní koeficienty  $A_a$  resp.  $A_b$  otvorové vady obou členů objektivu. Podle první rovnice (9.2.8) plyne

$$A_a = 8,62435 \cdot 2,126^3 - 7,81023 \cdot 2,126^2 \cdot \rho_1 + 2,31897 \cdot 2,126 \cdot \rho_1^2$$

Tabuľka koeficientu pro otvorovou vodu

Tab. 9.2.1

SKID	$n_d$	$n_p$	$n_c$	$d$	$\frac{n}{n-1}$	$\frac{1}{\ln \frac{n}{n-1}}$	$\frac{1}{\ln \frac{n}{2}}$	$\frac{2n-1}{n}$	$\frac{4n-1}{n}$	$\frac{n-2}{n}$	$\frac{n-1}{n}$	$\frac{n}{n-1}$	$\frac{2n-1}{n}$
BK 7	1,51633	1,52191	1,51385	64,0	8,62435	10,74690	4,31897	7,81023	6,63794	2,31897	1,65948	2,93674	2,65948
SF 2	1,64769	1,66122	1,64210	33,9	6,47167	9,17579	4,21392	6,63184	6,42764	2,21392	1,60691	2,54395	2,60691
SF 5	1,67270	1,68749	1,66662	32,2	6,18291	8,94619	4,19578	6,45964	6,39134	2,19578	1,59783	2,48654	2,59793
BeK2	1,53996	1,54625	1,53720	59,6	8,13384	10,40795	4,29873	7,55596	6,59747	2,29873	1,64936	2,85198	2,64936
BeK4	1,56883	1,57590	1,56575	56,0	7,60653	10,03197	4,27483	7,27398	6,54967	2,27483	1,63741	2,75799	2,63741
SK 11	1,56384	1,57029	1,56102	60,7	7,69259	10,09421	4,27890	7,32066	6,55780	2,27890	1,63945	2,77355	2,63945
BeKL	1,57250	1,57943	1,56547	57,5	7,54449	9,98690	4,27136	7,24017	6,54372	2,27136	1,63593	2,74672	2,63593
SK 8	1,61117	1,61880	1,60765	55,8	6,94957	9,54482	4,24133	6,90861	6,48266	2,24133	1,62066	2,63620	2,62066
SK 4	1,61272	1,62000	1,60954	58,6	6,92777	9,52826	4,24014	6,89620	6,48028	2,24014	1,62007	2,63206	2,62007
F 3	1,61293	1,62464	1,60805	37,0	6,92483	9,52603	4,23998	6,89452	6,47995	2,23997	1,61999	2,61150	2,61999
F 4	1,61659	1,62848	1,61164	36,6	6,87395	9,48729	4,23717	6,86547	6,47434	2,23717	1,61858	2,62182	2,61858
F 2	1,62004	1,63210	1,61504	36,3	6,82671	9,45119	4,23453	6,83639	6,46907	2,23453	1,61726	2,61128	2,61726
F 7	1,62536	1,63777	1,62019	35,6	6,75516	9,39631	4,23049	6,79723	6,46099	2,23049	1,61524	2,59907	2,61524

cili

$$A_a = 82,872 - 35,301 \rho_1 + 4,930 \rho_1^2 .$$

Podobně plyne z (9.2.10) pro koeficient  $A_b$  druhého člena objektivu

$$\begin{aligned} A_b &= \left\{ 6,47167 \cdot (-1,126)^3 + 9,17579 \cdot 2,126 \cdot (-1,126)^2 + \right. \\ &\quad + 4,21392 \cdot 2,126^2 \cdot (-1,126) + [6,63184 \cdot (-1,126)^2 + \\ &\quad + 6,42764 \cdot (-1,126) \cdot 2,126] \cdot \frac{2,126}{0,51633} + \\ &\quad \left. + 2,21392 \cdot \frac{2,126^2 \cdot (-1,126)}{0,51633^2} \right\} - [6,63184 \cdot (-1,126)^2 + \\ &\quad + 6,42764 \cdot 2,126 \cdot (-1,126) + 2,21392 \cdot \frac{2 \cdot 2,126 \cdot (-1,126)}{0,51633}] \cdot \rho_1 + \\ &\quad + 2,21392 (-1,126) \cdot \rho_1^2 = \\ &= \left\{ -9,2394 + 24,733 - 21,446 + [8,4064 - 15,387] \cdot 4,1175 - \right. \\ &\quad \left. - 42,263 \right\} - [8,4064 - 15,387 - 20,529] \cdot \rho_1 - 2,4929 \cdot \rho_1^2 = \\ &= -5,9524 - 28,734 - 42,263 - 27,5076 \rho_1 - 2,4929 \rho_1^2 \end{aligned}$$

cili

$$A_b = -76,9494 + 27,5076 \rho_1 - 2,4929 \rho_1^2 .$$

Z podmínky  $A_a + A_b = 0$  plyne dále:

$$\begin{aligned} A_a + A_b &= 82,872 - 35,301 \rho_1 + 4,930 \rho_1^2 - 76,9494 + 27,5076 \rho_1 - \\ &\quad - 2,4929 \rho_1^2 = 5,9226 - 7,7934 \cdot \rho_1 + 2,4371 \rho_1^2 = 0 \end{aligned}$$

cili

$$2,4371 \rho_1^2 - 7,7934 \rho_1 + 5,9226 = 0.$$

Odtud

$$\begin{aligned} (\rho_1)_{1,2} &= \frac{7,7934 \pm \sqrt{(-7,7934)^2 - 4 \cdot 2,4371 \cdot 5,9226}}{2 \cdot 2,4371} = \\ &= \frac{7,7934 \pm \sqrt{60,736 - 57,736}}{4,8742} = \frac{7,7934 \pm \sqrt{3}}{4,8742} = \\ &= \frac{7,7934 \pm 1,7321}{4,8742} = \\ &= \frac{9,5255}{4,8742} = 1,9543 \\ &= \frac{6,0613}{4,8742} = 1,2435 \end{aligned}$$

Určeme nyní křivosti  $\rho_2 = \rho_3$  a  $\rho_4$  ostatních kulových ploch obou členů navrhovaného objektivu pomocí vztahů (9.2.11). Dostaneme:

$$\begin{aligned} (\rho_2)_1 &= (\rho_1)_1 - \frac{\varphi_1}{n_1 - 1} = 1,9543 - \frac{2,126}{0,51633} = \\ &= 1,9543 - 4,118 = -2,1637 \end{aligned}$$

$$(\rho_2)_2 = (\rho_1)_2 - \frac{\varphi_1}{n_1 - 1} = 1,2435 - 4,118 = -2,8745$$

Podobně

$$(\rho_4)_1 = (\rho_2)_1 - \frac{\varphi_2}{n_2 - 1} = -2,1637 + \frac{1,126}{0,64769} =$$

$$= -2,1637 + 1,739 = -0,4247$$

$$(\rho_4)_2 = (\rho_2)_2 - \frac{f^2}{n_2 - 1} = -2,87745 + 1,739 = -1,1355 .$$

Pro poloměry křivosti jednotlivých ploch pak dostaneme:

$$r_1 = \frac{1}{(\rho_1)_1} = \frac{1}{1,9543} = 0,51169$$

$$r_2 = r_3 = \frac{1}{(\rho_2)_1} = \frac{1}{2,1637} = -0,46217$$

$$r_4 = \frac{1}{(\rho_4)_1} = \frac{1}{0,4247} = -2,3546 .$$

V druhém případě

$$r_1 = \frac{1}{(\rho_1)_2} = \frac{1}{1,2435} = 0,80417$$

$$r_2 = r_3 = \frac{1}{(\rho_2)_2} = \frac{1}{2,8745} = -0,34787$$

$$r_4 = \frac{1}{(\rho_4)_2} = \frac{1}{1,1355} = -0,88066 .$$

Provědme kontrolu početním sledováním průchodu paraxiálního paprsku nalezenou soustavou složenou z tenkých čoček. Výsledky výpočtu jsou uspořádány do tab. 9.2.1 v případě prvního řešení a do tab. 9.2.2 (viz str. 47) v případě druhého řešení.

Tab. 9.2.1

	1. plocha	2. plocha	3. plocha
$n'$	1,51633	1,64769	1,0
$n$	1,0	1,51633	1,64769
$r$	0,51169	-0,46217	-2,3546
$d$	-	-	-
$n' : x$	0,0	1,009	0,72478
$(n' - n) : r$	1,009	-0,28422	0,27507
$n' : x'$	1,009	0,72478	0,99985 = f'
$x'$	1,4684	2,2734	=====
$x' - d$	1,4684	2,2734	

Z obou těchto tabulek je vidět, že ohnisková vzdálenost určené soustavy je v obou případech rovna 1, čímž je správnost výpočtu potvrzena.

Uvažujme nyní první z obou řešení, neboť toto řešení vede k větším poloměrům křivosti, což je z výrobního hlediska výhodnější. Prepočítajme nyní nalezené hodnoty na ohniskovou vzdálenost  $f' = 100$  mm a zvolme vhodné tloušťky obou členů.

Žádáme-li, aby okrajová tloušťka spojních čoček byla alespoň 2 mm, potom při průměru čočky  $D = 24$  mm, vychází pro výšky  $h_1$  resp.  $h_2$  vrchlíků spojné čočky

$$h_1 = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{2 r_1} = \frac{12^2}{2 \cdot 51,17} = \frac{144}{102,34} = 1,4 \text{ mm}$$

Tab. 9.2.2

	1. plocha	2. plocha	3. plocha
$n'$	1,51633	1,64769	1,0
$n$	1,0	1,51633	1,64769
$r$	0,80417	- 0,34787	- 0,88066
$d$	-	-	
$n : x$	0,0	0,64206	0,26444
$(n' - n) : r$	0,64206	- 0,37762	0,73545
$n' : x'$	0,64206	0,26444	0,99989 = $f'$
$x'$	2,3615	6,231	=====
$x' - d$	2,3615	6,231	

$$h_2 = \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{2 r_2} = \frac{12^2}{2 \cdot 46,22} = \frac{144}{92,44} = 1,55 \text{ mm} .$$

Tedy tloušťku  $d_1$  spojné čočky budeme volit

$$d_1 = 1,4 + 2 + 1,6 = 5 \text{ mm} .$$

Tlušťku rozptylné čočky budeme volit  $d_2 = 2 \text{ mm}$ .

Nyní je nutné určit poloměry křivosti těchto tlustých čoček.

Podle předchozího výpočtu vychází pro  $r_1 = 51,17 \text{ mm}$ . Polomér  $r_2$  první čočky určíme pak ze vztahu

$$r_2 = \frac{\frac{d_1 (n_1 - 1)}{n_1} - r_1}{\frac{r_1}{r_1 \cdot (n_1 - 1)} - 1} = \frac{\frac{d_1 (n_1 - 1)}{n_1} - r_1}{\frac{r_1}{r_1 \cdot (n_1 - 1)} - 1} , \quad (9.2.12)$$

který plyne ze vztahu plastického pro ohniskovou vzdálenost jednoduché čočky

$$f' = \frac{n r_1 r_2}{(n-1) \cdot [n (r_2 - r_1) + (n-1) \cdot d]}$$

$$r_2 = \frac{\frac{5,0 \cdot 51633}{1,51633} - 51,17}{\frac{0,02126 \cdot 51,17}{0,51633} - 1} = \frac{1,70 - 51,17}{2,106 - 1} = - \frac{49,47}{1,107} = \\ = - 44,68 \text{ mm} .$$

Polomér  $r_4$  druhé plochy rozptylného členu určíme obdobně ze (9.2.12). Dostaneme

$$r_4 = \frac{\frac{2,0 \cdot 64769}{1,64769} + 44,68}{\frac{0,01126 \cdot 44,68}{0,64769} - 1} = \frac{0,79 + 44,68}{0,7768 - 1} = - \frac{45,47}{0,2232} = \\ = - 203,17 \text{ mm} .$$

Když jsme určili poloměry křivosti ploch tlustých čoček, určíme sledováním paraxiálního paprsku ohniskovou vzdálenost celého objektivu, která bude o něco menší než 100 mm, vzhledem k tomu, že vzdálenost  $P_1 P_2$  příslušných hlavních bodů obou členů objektivu nebude již nulová. Příslušné výpočty jsou sestaveny do tabulky 9.2.3 (viz str. 48), která zahrnuje průchod paraxiálního paprsku z nekonečně vzdáleného

Tab. 9.2.3

	Sledování paprsku z prostoru předmětového do obrazového			Sledování paprsku z prostoru obrazového do předmětového		
	1. plocha	2. plocha	3. plocha	1. plocha	2. plocha	3. plocha
$n'$	1,51633	1,64769	1,0	1,64679	1,51633	1,0
$n$	1,0	1,51633	1,64769	1,0	1,64679	1,51633
$r$	51,17	- 44,68	- 203,17	203,17	44,68	- 51,17
$d$	5	2	-	2	5	-
$\frac{n'}{x}$ ( $n' - n$ ) : $r$	0,0 0,01009	0,010438 -0,002940	0,007567 0,003188	0,0 0,003188	0,0032002 -0,002940	0,00025992 0,01009
$\frac{n'}{x}$ $x'$	0,01009 150,27	0,007498 219,75	0,010755 92,98	0,003188 516,88	0,000260 5838,9	0,010349 96,63
$x$	145,27	217,75	$r' = 97,06$	514,88	5833,9	$r' = 97,06$

bodu v prostoru předmětovém i prostoru obrazovém. Z tabulky je vidět, že ohnisková vzdálenost vypočítaná oběma cestami je shodná až na chyby vzniklé zaokrouhlováním čísel při výpočtu.

Nyní je ještě nutné provést trigonometrické ověření korekce otvorové vady a provést případnou její úpravu.

Sledujme nejdříve průchod paprsku vycházejícího z osového bodu v nekonečnu a dopadajícího na okraj vstupní pupily navrhovaného objektivu, tj. paprsku, jehož dopadová výška  $h_0 = 12 \text{ mm}$ .

Dílčí výsledky výpočtu jsou uspořádány do tab. 9.2.4 (viz str. 49).

Nyní sledujme obdobně paprsek vycházející z osového bodu v nekonečnu, který dopadá na vstupní pupilu ve výšce  $h_1 = \frac{D}{2} \cdot 0,7 = 8,4 \text{ mm}$ . Výsledky tohoto výpočtu jsou uvedeny v tabulce 9.2.5 (viz str. 49).

Znázorníme-li nalezené výsledky graficky tak, že k jednotlivým dopadovým výškám, nenášeným ve směru pořadnic, naneseeme rozdíly  $x_{h_0}' - x_0'$  a  $x_{h_1}' - x_0'$  ve směru úseček, dostaneme křivku znázorněnou na obr. 9.2.1, ze které je patrné, že navržený objektiv je z hlediska otvorové vady korigován.

Je-li nutné otvorovou vodu upravit, potom ve vztahu pro  $A_a + A_b$  se klade místo  $A_a + A_b = 0$  malá záporná hodnota, např. - 0,3. Pro určení křivosti  $P_1$  pak dostáváme rovnici:

$$2,4371 \beta_1^2 - 7,7934 \beta_1 + 5,9226 = -0,3$$

čili

$$2,4371 \beta_1^2 - 7,7934 \beta_1 + 6,2226 = 0$$

Jejím řešením určíme  $\beta_1$  a potom již pokračujeme stejným způsobem jako v předcházejícím případě.

Poznámka:  $x_0'$  značí sečnou vzdálenost paraxiálního paprsku a  $x_{h_0}'$  resp.  $x_{h_1}'$  sečné vzdálenosti paprsků o dopadových výškách  $h_0$  resp.  $h_1$ .

$$\text{Pro } h_0 = \frac{D}{2} = 12 \text{ mm}$$

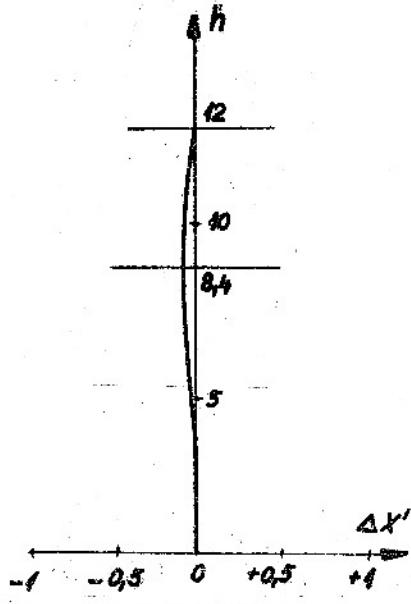
Tab. 9.2.4

	1. plocha	2. plocha	3. plocha
$n'$	1,51633	1,64769	1,0
$n$	1,0	1,51633	1,64769
$r$	51,17	- 44,68	- 203,17
$d$	5	2	-
$\log \sin \xi (= \log \frac{h}{r})$	9,37016-10	9,53469-10	9,04040-10
$\xi$	13°33'46"	-20° 1'50"	-6°18' 3"
$\log \sin \xi' (= \log \frac{n}{n'}, \sin \xi)$	9,18937	9,49860-10	9,25728-10
$\xi'$	8°53'49"	-18°22'25"	-10°25' 6"
$\sigma$	0,0	4°39'57"	3° 0'32"
$\xi$	13°33'46"	-20° 1'50"	-6°18' 3"
$\xi'$	-8°53'49"	18°22'25"	10°25' 6"
$\sigma'$	4°39'57"	3° 0'32"	7° 7'35"
$\log \sin \sigma'$	8,91032-10	8,72008	9,09363
$x' = r + \frac{r \cdot \sin \xi'}{\sin \sigma'}$	148,46	223,63	92,98 =====
$x = x' - d$	143,46	221,63	

$$\text{Pro } h_1 = 12,0,7 = 8,4 \text{ mm}$$

Tab. 9.2.5

	1. plocha	2. plocha	3. plocha
$n'$	1,51633	1,64769	1,0
$n$	1,0	1,51633	1,64769
$r$	51,17	- 44,68	- 203,17
$d$	5	2	-
$\log \sin \xi (= \log \frac{x - r}{r} \cdot \sin \sigma')$	9,21526-10	9,37781-10	8,88481-10
$\xi$	9°26'54"	-13°48'30"	-4°23'57"
$\log \sin \xi' (= \log \frac{n}{n'}, \sin \xi)$	9,03447-10	9,34172-10	9,10169-10
$\xi'$	6°12'54"	-12°41'17"	-7°15'38"
$\sigma$	0,0	3°14' 0"	2° 6'47"
$\xi$	9°26'54"	-13°48'30"	-4°23'57"
$-\xi'$	-6°12'54"	12°41'17"	7°15'38"
$\sigma'$	3°14' 0"	2° 6'47"	4°58'28"
$\log \sin \sigma'$	8,75130-10	8,56668-10	8,9308-10
$x' = r + \frac{r \cdot \sin \xi'}{\sin \sigma'}$	149,39	221,49	92,95 =====
$x = x' - d$	144,39	219,49	



Obr. 9.2.1 Průběh otvorové vady navrhovaného objektivu.

### 9.3. Konstrukce netmeleného achromatického objektivu

Upustíme-li od podmínky tmelení, podle které jeme v předchozím případě volili  $f_2 = f_3$ , můžeme při návrhu achromatického objektivu potlačit další vadu - komu.

Z teorie vzd. 3. řádu vyplývá, že koeficient komu je úměrný výrazu

$$C = \frac{n+1}{n} \varphi f_1 - \frac{2n+1}{n} \varphi \sigma_1 - \frac{n}{n-1} \cdot \varphi^2. \quad (9.3.1)$$

Napišme tento výraz pro oba členy navrhovaného objektivu a dostaneme

$$\left. \begin{aligned} C_a &= \frac{n_1+1}{n_1} \varphi_1 f_1 - \frac{n_1}{n_1-1} \varphi_1^2 \\ C_b &= \frac{n_2+1}{n_2} \varphi_2 f_3 - \frac{2n_2+1}{n_2} \varphi_2 \varphi_1 - \frac{n_2}{n_2-1} \varphi_2^2. \end{aligned} \right\} \quad (9.3.2)$$

Má-li být koma odstraněna, musí být

$$C_a + C_b = 0.$$

Vyjádříme-li první z obou vztahů (9.3.2) pomocí  $\varphi_2$  a sice tak, že za  $\varphi_1$  dosadíme ze vztahu (9.2.9), můžeme psát

$$C_a = \frac{n_1+1}{n_1} \varphi_1 \left( \frac{\varphi_2}{n_1-1} + \rho_2 \right) - \frac{n_1}{n_1-1} \varphi_1^2 \quad \text{čili}$$

$$C_a = \frac{n_1+1}{n_1} \varphi_1 \rho_2 + \left[ \frac{n_1+1}{n_1(n_1-1)} - \frac{n_1}{n_1-1} \right] \varphi_1^2. \quad (9.3.3)$$

Sečteme-li tento výraz s druhým vztahem (9.3.2), dostaneme z podmínky  $C_a + C_b = 0$  závislost mezi  $\varphi_3$  a  $\varphi_2$ . Vyjádříme-li odtud  $\varphi_3$  a dosadíme-li do vztahu (9.2.8) pro  $A_b$  a sečteme-li jej se vztahem (9.2.10) pro  $A_a$ , dostaneme z podmínky  $A_a + A_b = 0$  kvadratickou rovnici v  $\varphi_2$ .

Vyjaďme si celý postup návrhu objektivu na příkladu. Uvažujme objektiv z předchozího příkladu a určeme pro něj hodnoty výrazu (9.3.3) pro  $C_a$  a druhého výrazu (9.3.2) pro  $C_b$ . Dostaneme:

$$\begin{aligned} C_a &= 1,65948 \cdot 2,126 \cdot \varphi_2 + \left[ \frac{1,65948}{0,51633} - 2,93674 \right] \cdot 2,126^2 = \\ &= 3,5281 \varphi_2 + 0,277 \cdot 4,5198 = 3,5281 \varphi_2 + 1,2519 \\ C_b &= 1,60691 \cdot (-1,126) \cdot \varphi_3 - 2,60691 \cdot (-1,126) \cdot 2,126 - \\ &\quad - 2,54395 \cdot (-1,126)^2 = -1,8094 \cdot \varphi_3 + 6,2406 - 3,2255 = \\ &= -1,8094 \varphi_3 + 3,0151. \end{aligned}$$

Sečtením vztahů  $C_a$  a  $C_b$  plyne z podmínky  $C_a + C_b = 0$

$$3,5281 \varphi_2 - 1,8094 \varphi_3 + 4,2670 = 0$$

čili

$$\varphi_3 = \frac{3,5281}{1,8094} \varphi_2 + \frac{4,2670}{1,8094}$$

čili

$$\rho_3 = 1,950 \rho_2 + 2,358 .$$

Tento vztah mezi  $\rho_2$  a  $\rho_3$  zajišťuje odstranění komy.

Napišme rovnice (9.2.8) pro  $A_a$  a  $A_b$  a dostaneme

$$A_a = 82,872 - 35,301 \rho_1 + 4,930 \rho_1^2$$

$$\text{a dosadme za } \rho_1 = \rho_2 + \frac{\rho_1}{n_1 - 1}$$

čili

$$\rho_1 = \rho_2 + \frac{2,126}{0,51633} = \rho_2 + 4,117 .$$

Dostaneme

$$A_a = 82,872 - 35,301 (\rho_2 + 4,117) + 4,930 (\rho_2 + 4,117)^2 =$$

$$= 82,872 - 35,301 \rho_2 - 35,301 \cdot 4,117 + 4,930 \rho_2^2 + 2 \cdot 4,930 \cdot$$

$$4,117 \rho_2 + 4,930 \cdot 4,117^2 =$$

$$= 82,872 - 35,301 \rho_2 - 145,33 + 4,930 \rho_2^2 + 40,594 \rho_2 + 83,562 =$$

$$= 21,104 + 5,293 \rho_2 + 4,930 \rho_2^2 \text{ čili}$$

$$A_a = 21,104 + 5,293 \rho_2 + 4,930 \rho_2^2 .$$

Podobně plynne pro  $A_b$

$$A_b = 6,47167 \cdot (-1,126)^3 + 9,17579 \cdot 2,126 \cdot (-1,126)^2 +$$

$$+ 4,21392 \cdot 2,126^2 \cdot (-1,126) = [6,63184 \cdot (-1,126)^2 +$$

$$+ 6,42764 \cdot 2,126 \cdot (-1,126)] \rho_3 + 2,21392 \cdot (-1,126) \cdot \rho_3^2 =$$

$$= -9,2394 + 24,733 - 21,446 - [8,4083 - 15,387] \rho_3 -$$

$$- 2,493 \rho_3^2 \text{ čili}$$

$$A_b = -5,9524 + 6,9787 \rho_3 - 2,493 \rho_3^2 .$$

Dosadme za  $\rho_3$  hodnotu nalezenou z podmínky pro odstranění komy a dostaneme dále

$$A_b = -5,9524 + 6,9787 (1,950 \rho_2 + 2,358) - 2,493 (1,950 \rho_2 + 2,358)^2 =$$

$$= -5,9524 + 6,9787 \cdot 1,950 \cdot \rho_2 + 6,9787 \cdot 2,358 -$$

$$- 2,493 \cdot 1,950^2 \cdot \rho_2^2 - 2 \cdot 2,493 \cdot 1,950 \cdot 2,358 \rho_2 -$$

$$- 2,493 \cdot 2,358^2 =$$

$$= -5,9524 + 13,608 \rho_2 + 16,455 - 9,4794 \rho_2^2 - 22,926 \rho_2 - 13,861$$

čili

$$A_b = -3,3584 - 9,318 \rho_2 - 9,4794 \rho_2^2 .$$

Z podmínky pro odstranění otvorové vady

$$A_a + A_b = 0 \text{ plynne konečně}$$

$$\begin{aligned}
 A_a &= 21,104 + 5,293 \rho_2 + 4,930 \rho_2^2 \\
 A_b &= -3,3584 - 9,318 \rho_2 - 9,4794 \rho_2^2 \\
 \hline
 A_a + A_b &= 17,7456 - 4,025 \rho_2 - 4,5494 \rho_2^2 = 0 \\
 \text{takže } 4,5494 \rho_2^2 + 4,025 \rho_2 - 17,7456 &= 0
 \end{aligned}$$

Řešením této kvadratické rovnice dostaneme

$$\begin{aligned}
 (\rho_2)_{1,2} &= \frac{-4,025 \pm \sqrt{4,025^2 + 4 \cdot 4,5494 \cdot 17,7456}}{2 \cdot 4,5494} = \\
 &= \frac{-4,025 \pm 18,417}{9,0988} = \begin{cases} \frac{14,392}{9,0988} = 1,576 \\ \frac{-22,442}{9,0988} = -2,466 \end{cases}
 \end{aligned}$$

Praktický význam má pouze druhé řešení, neboť první vede k meniskovému tvaru celého objektivu.

Pro křivoostí jednotlivých ploch objektivu vychází pak:

$$\rho_1 = \rho_2 + 4,117 = -2,466 + 4,117 = +1,651$$

$$\begin{aligned}
 \rho_3 &= 1,950 \rho_2 + 2,358 = 1,950 \cdot (-2,466) + 2,358 = \\
 &= -4,809 + 2,358 = -2,451
 \end{aligned}$$

$$\rho_4 = \rho_3 - \frac{\rho_2}{n_2 - 1} = -2,451 - \frac{1,126}{0,64769} = -2,451 + 1,743 = -0,708.$$

Nyní je třeba určit tloušťky jednotlivých členů objektivu a trigonometrickým výpočtem upravit korekční stav.

#### 9.4. Zrcadlové objektivy

##### 9.4.1. Kulové zrcadlo

Tato zrcadla jsou tvořena kulovou plochou vybroušenou do vhodného kovového nebo skleněného nosiče, opatřenou kovovou vrstvou, která bývá buď ze stříbra nebo v poslední době z hliníku obr. 9.4.1.1.

Protože odraz světla není závislý na vlnové délce světla, není zobrazení zprostředkováváné zrcadly zatíženo barevnými vadami. Na druhé straně u kulových zrcadel se velmi nepříznivě projeví otvorová veda a mimoosové vadky, zvláště koma. Z toho důvodu lze využít kulových zrcadel pouze do relativního otvoru

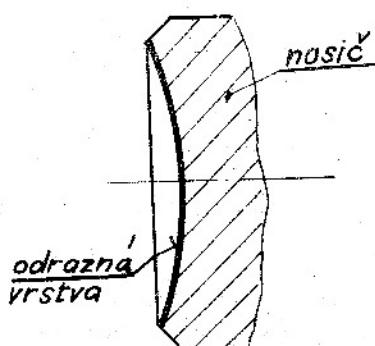
$$1 : 2,5 \sqrt{D}, \quad (9.4.1.1)$$

kde D značí průměr zrcadla vyjádřený v centimetrech.

Např. pro D = 25 cm vychází pro relativní otvor kulového zrcadla

$$1 : 2,5 \sqrt{25} = 1 : 12,5.$$

Povrchová kovová odrazená vrstva těchto zrcad



Obr. 9.4.1.1 Kulové zrcadlo s přední odrazenou plochou.

del podléhá snadno vlivům atmosféry, čímž velmi rychle klešá odrazivost zrcadel. Z toho důvodu se počala později konstruovat kulová zrcadla tak, že byla tvořena ~~kotoučem~~ nosičem, který byl opracován po obou stranách, při čemž obě vybroušené plochy byly tvořeny soustřednými kulovými plochami, jak je to naznačeno na obr. 9.4.1.2. Odrazná kovová vrstva byla nanesena na zadní plochu, kde je ji možno chránit vhodnými ochrannými vrstvami, např. z mědi nanášené elektrolyticky nebo vrstvou laku.

V těchto případech se zobrazování zúčastňuje dvakrát také přední lámavá plocha a proto se často tato zrcadla nazývají zrcadlovými čočkami.

Koncem minulého století navrhl Francouz A. Mangin zrcadlovou čočku, která nebyla omezena soustřednými kulovými plochami, nybrž kulovými plochami, jejichž středy jsou poněkud pošinuty ve směru optické osy zrcadla. Zrcadlo tvoří vlastně rozptylný meniskus, který bývá obyčejně upraven tak, že ohnisko zrcadla splývá se středem křivosti přední kulové plochy. Tímto uspořádáním se odstraní reflexní obrazový vznikající na přední ploše zrcadlové plochy v případech, kdy toto zrcadlo je použito při konstrukci světlostříbřitky nebo kolimátoru. V těchto případech se umisťuje v jeho ohnisku světelny zdroj nebo zámerná značka, takže paprsky pak dopadají na přední plochu kolmo a odrážejí se zpět do zdroje nebo zámerné značky.

Označíme-li poloměr přední plochy Manginova zrcadla  $r$ , poloměr zadní plochy  $R$ , osovou tloušťku  $d$  a index lomu skla, ze kterého je zrcadlo zhotoveno  $n$ , lze poloměr  $R$  vyjádřit vztahem:

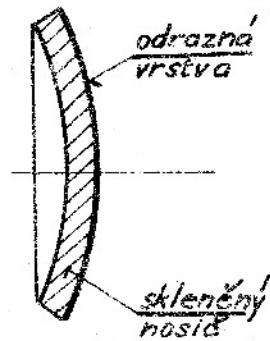
$$R = 2 \cdot \frac{n r^2 + (2n - 1) d \cdot r + (n - 1) d^2}{(2n - 1) r + 2(n - 1) d} \quad (9.4.1.2)$$

Manginova zrcadla je možno konstruovat až do relativního otvoru  $1 : 2,5$ , přičemž mimicosové vady v porovnání s vadami kulového zrcadla jsou redukovány přibližně na  $1/9$ .

Jeden z prvních zrcadlových dalekohledů sestrojil v r. 1672 I. Newton, jehož optická soustava je znázorněna na obr. 9.4.1.4 (viz str. 54). V blízkosti obrazového ohniska  $F'$  zrcadla (1) umístil Newton rovinné zrcátko (2) skloněné pod úhlem  $45^\circ$  vzhledem k jeho optické ose, které přenese obraz bočním otvorem v tubusu dalekohledu k okuláru (3). Aby se odstranila otvorová vada kulového zrcadla, bylo toto později nahrazeno paraboloidickým zrcadlem.

Newtonovo uspořádání dalekohledu se užívá pro astronomické účely dodnes. Tak např. známé hvězdárna na Mont-Wilsonu je vybavena Newtonovým dalekohledem s objektivem o průměru  $D = 1,52$  m a ohniskovou vzdáleností  $7,6$  m.

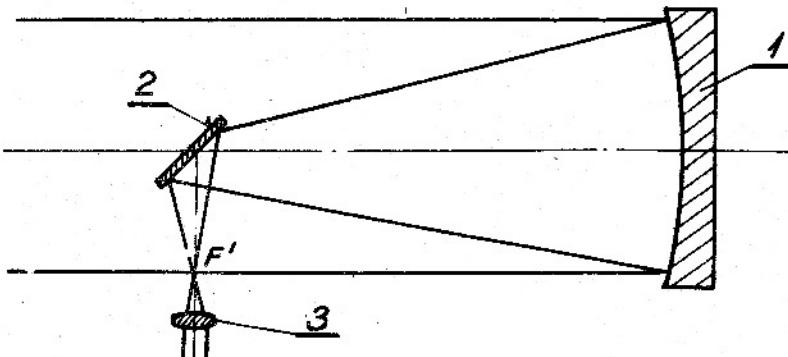
Nevýhodou Newtonova dalekohledu z hlediska jeho světelnosti je zastínění střední části průměru zrcadla roviným zrcátkem. Skoro 100 let později, v roce 1789 odstraňuje F.W. Herschel tento nedostatek Newtonova dalekohledu skloněním zrcadla cca o  $1,5^\circ$ , takže ohnisko  $F'$  zrcadla leží v blízkosti stěny tubusu dalekohledu, jak je to patrné z obr. 9.4.1.5. Tím bylo odstraněno zastínování střední části zrcadla, avšak obraz byl zatižen komou a astigmatismem, neboť pozorování se



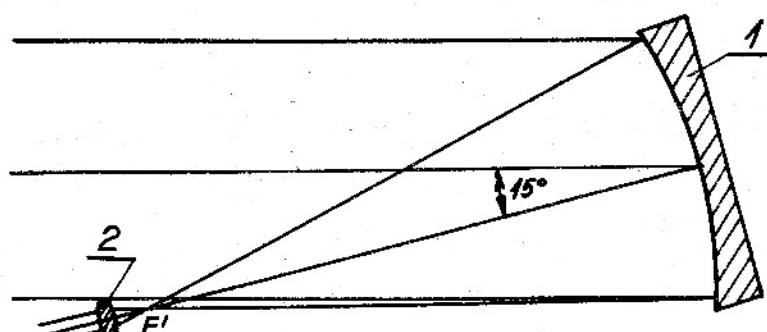
Obr. 9.4.1.2  
Kulové zrcadlo se zadní odraznou plochou.



Obr. 9.4.1.3  
Manginova zrcadlová čočka.



Obr. 9.4.1.4 Optická soustava Newtonova dalekohledu



Obr. 9.4.1.5 Soustava Herschelova dalekohledu

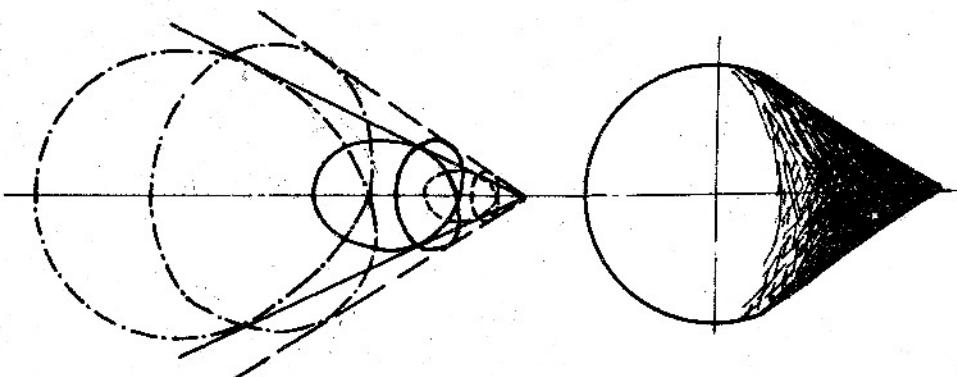
dělo v mimoosové oblasti. Herschel pravděpodobně již v tomto roce ovládal technologii broušení a leštění paraboloidických ploch a proto mohl přistoupit ke konstrukci mohutného dalekohledu se zrcadlem o průměru  $D = 1,22 \text{ m}$  a ohniskové vzdálosti  $12,2 \text{ m}$ .

#### 9.4.2. Paraboloidické zrcadlo

Otvorovou vadu kulových zrcadel lze odstranit tím, že kulovou odražnou plochu nahradíme plochou paraboloidickou. Mimosové vady, koma a astigmatismus, zůstanou však i u paraboloidického zrcadla nezměněny. Proto mimoosové předměty (hvězdy) se zobrazují jako asymetrické útvary znázorněné na obr. 9.4.2.1 (viz str. 55). Tři křivky, čerchované, plná a tečkovaná tvoří v obrazové rovině základy válců, jejichž povrchové přímky vznikly odrazem šikmých rovnoběžných paprskových svazků, které dopadly na parabolické zrcadlo na kružnice soustředné s vrcholem zrcadla, jejichž poloměr se postupně zmenšoval. Z tohoto obrázku je vidět, že velikost těchto asymetrických útvarů závisí na relativním otvoru zrcadla, a nímž rostou. Obrazce příslušné k jednotlivým zonám zrcadla (k jednotlivým relativním otvorům) se vzájemně překládají, takže výsledný obrazec má tvar shodný s obrázkem 9.4.2.2 (viz str. 55), v němž je světlo rozděleno velmi nerovnoměrně.

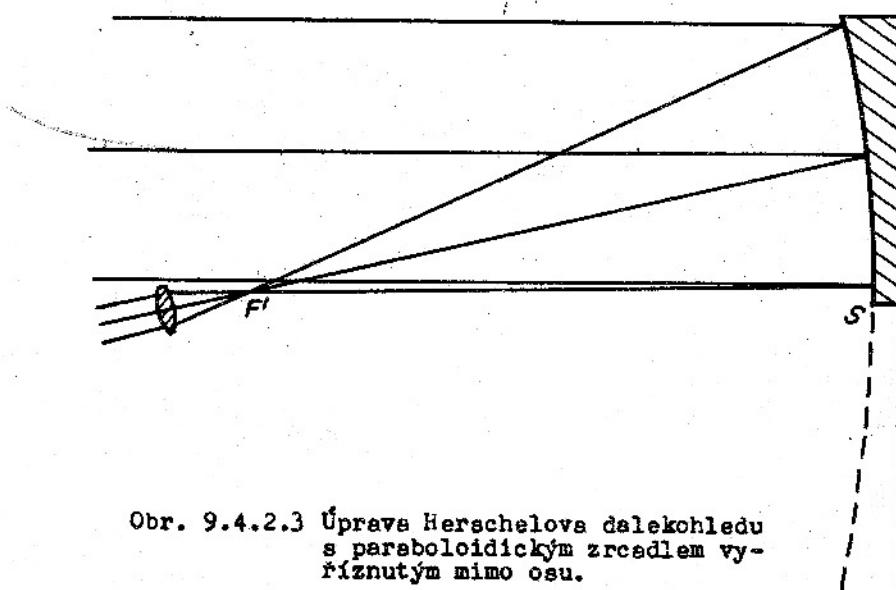
Při návrzích zrcadlových dalekohledů s paraboloidickými zrcadly je nutno si uvědomit, že velikost těchto asymetrických útvarů roste lineárně se zorným polem a s druhou mocninou relativního otvoru. Tato skutečnost omezuje relativní otvor i zorné pole příslušných objektivů.

Z těchto důvodů se v některých případech konstrukce dalekohledu Herschelova typu použilo paraboloidické zrcadlo vyříznuté mimo jeho osu (*off axis*), jak je to naznačeno na obr. 9.4.2.3 (viz str. 55).



Obr. 9.4.2.1 Tvar obrazu mimoosového bodu vytvořený paraboloidickým zrcadlem.

Obr. 9.4.2.2 Obraz mimoosového bodu ovlivněny komou.

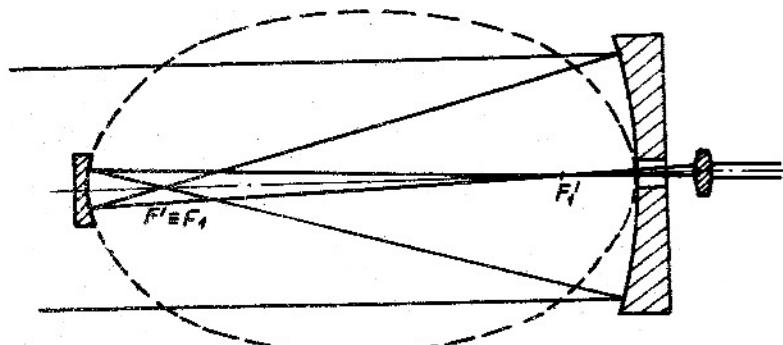


Obr. 9.4.2.3 Úprava Herschelova dalekohledu s paraboloidickým zrcadlem výříznutým mimo osu.

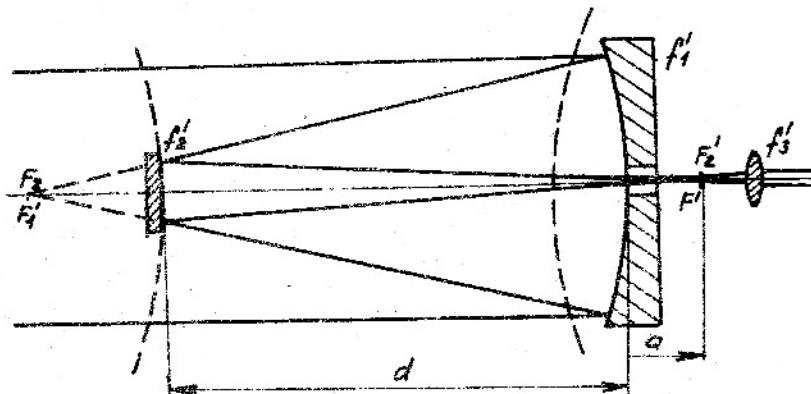
Tím se sice odstranil vliv mimoosových vad ve středu zorného pole, ale na druhé straně vzrostl neúměrně relativní otvor zrcadla, takže značněji bylo ovlivněno zobrazení mimoosových bodů komou a astigmatismem. Proto se Herschelovo uspořádání dalekohledu nevžilo.

Paraboloidické zrcadlo použil pro konstrukci dalekohledu v r. 1661 Gregory. Optická soustava tohoto dalekohledu je znázorněna na obr. 9.4.2.4 (viz str. 56). Jak je vidět, skládá se dalekohled ze dvou zrcadel, hlavního paraboloidického a vedlejšího elipsoidického. Je zřejmé, že otvorová vada je odstraněna pro všechny zony, zatím co mimoosové vady zůstávají nezměněny, stejně jako v případě Cassegrainova dalekohledu, který byl sestrojen v téže roce 1661. Tento dalekohled se skládá, jak je to patrné z obr. 9.4.2.5. (viz str. 56), také ze dvou zrcadel, hlavního paraboloidického, zatím co vedlejší zrcadlo je hyperboloidické. Oba dalekohledy mají při menších relativních otvorech zorné pole větší než tomu bývá u dalekohledů Newtonových.

Výhodou Cassegrainova dalekohledu je krátká stavební délka v porovnání s da-



Obr. 9.4.2.4 Gregoryho dalekohled.



Obr. 9.4.2.5 Optická soustava Cassegrainova dalekohledu.

dalekohledem Gregoryho. Oba dalekohledy se ještě liší tím, že Gregoryho dalekohled dává vzpřímený, zatím co Cassegrainův dalekohled převrácený obraz.

Výhody Cassegrainova dalekohledu zatlačily do pozadí dalekohled Gregoryho, který se dnes již neužívá.

Při návrhu Cassegrainova dalekohledu se obyčejně vychází z ohniskové vzdálenosti  $f'$  objektivu jako celku, přičemž bývá předepsána vzdálenost  $a$  obou zrcadel a vzdálenost  $a$  ohniska  $F'$  objektivu jako celku od hlavního zrcadla.

Za těchto předpokladů můžeme psát

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{f'_1 \cdot f'_2} \quad (9.4.2.1)$$

$$\frac{1}{f'_2} = \frac{1}{d+a} - \frac{1}{f'_1-d} \quad (9.4.2.2)$$

Dosedíme-li z (9.4.2.2) do (9.4.2.1), dostaneme

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{d+a} - \frac{1}{f'_1-d} - \frac{d}{f'_1} \left( \frac{1}{d+a} - \frac{1}{f'_1-d} \right)$$

čili

$$f'_1 (d+a) (f'_1 - d) = f' (d+a) \cdot (f'_1 - d) + f' f'_1 (f'_1 - d) - f' f'_1 (d+a) - df' (f'_1 - d) + df' (d+a)$$

čili konečně

$$f_j^2 \left(1 - \frac{d+a}{f'}\right) - 2 f_j \cdot \left[d - \frac{d(d+a)}{2 f'}\right] + d^2 = 0. \quad (9.4.2.3)$$

K největším dalekohledům Cassegrainova typu patří dalekohled hamburské hvězdárny mající průměr hlavního zrcadla  $D = 1 \text{ m}$  a ohniskovou vzdálenost  $3 \text{ m}$  a dále dalekohled berlínské hvězdárny v Babelsbergu, kde hlavní zrcadlo dosahuje průměru  $1,25 \text{ m}$  a ohnisková vzdálenost  $8,4 \text{ m}$ .

### 9.4.3. Zrcadlo-čočkové objektivy

Přesto, že vývoj zrcadlových objektivů probíhal po delší dobu než 250 let, zdálo se, že vzhledem k malému zornému poli, které se často pohybovalo řádově v desítkách minut, a vzhledem k omezenému relativnímu otvoru, budou zrcadlové objektivy zatlačeny objektivy čočkovými, jejichž rozšíření pro konstrukci velkých dalekohledů dluho bránily velké požadavky, které byly kladený na příslušné zkleněné polotovary odpovídajících rozměrů, které nemohly být dodány, neboť dříve nebyla známa technologie výroby tak velkých homogenních bloků skla.

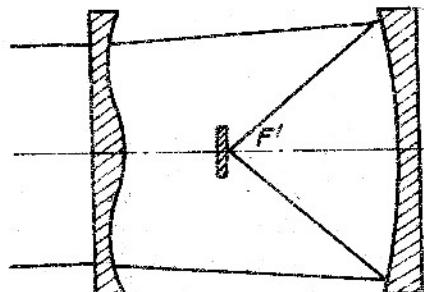
#### I. Schmidtův objektiv

Převrat ve vývoji zrcadlových objektivů a návrat k jejich dalšímu širokému využití způsobil v r. 1931 B. Schmidt, který zkonstruoval zrcadlo-čočkový objektiv jednoduché konstrukce u kterého dosáhl při relativním otvoru  $1:2$  zorného pole  $20^\circ$ .

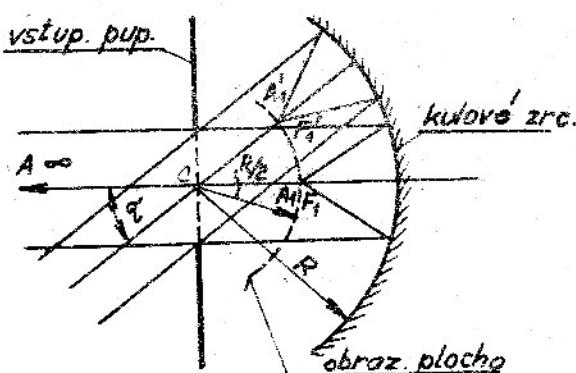
Objektiv je v principu tvořen kulovým zrcadlem, v jehož středu křivosti, tj. ve stupni pupile, je umístěna korekční deska, která kompenzuje jeho otvorovou vadu (obr. 9.4.3.1). Obraz vytvořený tímto objektivem je zklenut a leží na kulové ploše, která je soustředěná s kulovou plochou vlastního zrcadla, jak to vyplývá z dalšího obr. 9.4.3.2. Nechť na tomto obrázku značí C střed zrcadla a  $F'$  jeho ohnisko. Nechť A resp.  $A_1$  značí dva vzdálené body ležící ve směrech, které spolu svírají úhel  $\gamma$  a nechť  $F'$  a  $F'_1$  značí jejich obrazy. Z obrázku je snadno vidět, že tyto obrazy nejsou zatíženy otvorovou vadou vzhledem k plné souměrnosti rovnoběžných svazků. Totéž platí i pro astigmatismus. Přitom obraz rovinného předmětu leží na kulové ploše o poloměru křivosti  $\frac{R}{2}$ , značí-li R poloměr křivosti kulového zrcadla.

Otvorovou vadu zrcadla je možno korigovat čočkou umístěnou ve středu křivosti, jejíž jedna plocha je rovinná druhá asférická.

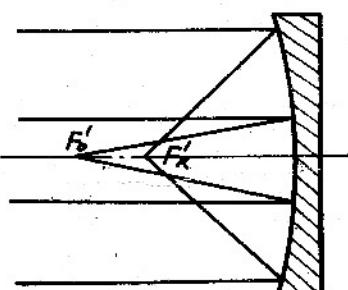
Z geometrické optiky dutého zrcadla je známo, že paprsky probíhající v blízkosti optické osy protinají optickou osu po odraze na zrcadle dále od zrcadla než paprsky dopadající na okraj zrcadla (obr. 9.4.3.3 na str. 58). Tuto vlastnost kulových zr-



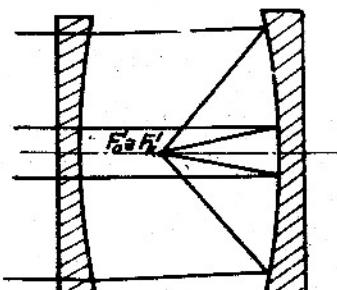
Obr. 9.4.3.1 Schmidův zrcadlo-čočkový objektiv.



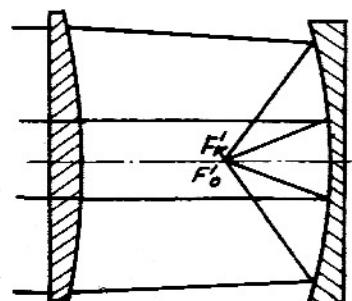
Obr. 9.4.3.2 K vysvětlení principu Schmidtova objektivu.



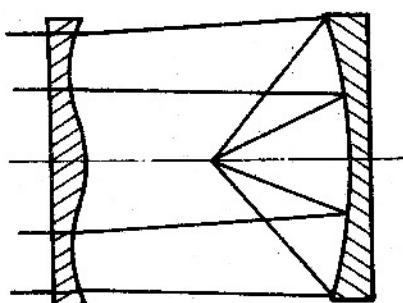
Obr. 9.4.3.3  
Chod paprsků na kulovém zrcadle.



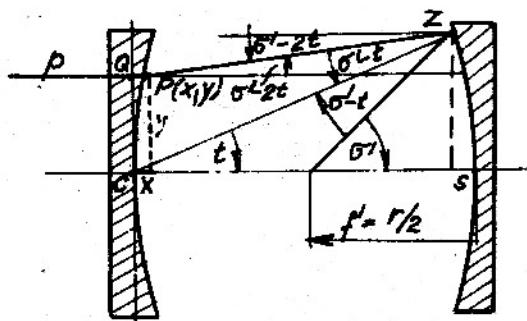
Obr. 9.4.3.4  
Ovlivnění paprakového chodu na kulovém zrcadle plankonkávní čočkou.



Obr. 9.4.3.5  
Ovlivnění paprakového chodu na kulovém zrcadle plankonvexní čočkou.



Obr. 9.4.3.6  
Ovlivnění paprakového chodu na kulovém zrcadle čočkou na tvořenou kombinací spojky a rozptylky.



Obr. 9.4.3.7  
K výpočtu meridiana asférické plochy korekční desky.

zařízení je možno využít pro korekci otvorové vady, neboť naznačený paprakový chod je možno ovlivnit celkem trojím způsobem:

a) čočkou, která poměrně značně prodlouží sečnou vzdálenost krajových paprsků a jen nepatrně sečnou vzdálenost středových paprsků. Čočka má tvar plankonkávní, jak je to naznačeno na obr. 9.4.3.4.

Obdobně je možno provést korekci otvorové vady kulového zrcadla spojnicí čočkou, která podstatně zkrátí sečnou vzdálenost středových paprsků a jen nepatrně sečnou vzdálenost krajových paprsků, jak je to naznačeno na obr. 9.4.3.5.

Konečně je možno korigovat otvorovou vodu kulového zrcadla čočkou, která zkráti sečnou vzdálenost středových paprsků a prodlouží sečnou vzdálenost krajových paprsků, jak je to provedeno na obr. 9.4.3.6.

Porovnáme-li uvedené tři případy možné korekce otvorové vady kulového zrcadla, je možno říci, že v prvním případě splývá ohnisko  $F'$  objektivu jako celku (kulové zrcadlo + korekční čočka) s paraxiálním ohniskem  $F'_o$  kulového zrcadla, v druhém případě s ohniskem  $F'_k$  příslušným k okrajovým zonám zrcadla a konečně ve třetím případě s ohniskem  $F'_s$  příslušným ke středním zonám kulového zrcadla.

Z naznačených tří možností korekce otvorové vady kulového zrcadla je nejvhodnější poslední alternativa, neboť barevná voda, která je vyvolávána korekčními členy je u této alternativy rovno  $\frac{1}{4}$  hodnoty barevné vady v obou předchozích případech.

Věsimme si nyní postupu, podle kterého se provádí návrh korekční desky. Pro jednoduchost uvažujme první z uvedených tří případů.

Nechť  $r$  značí poloměr křivosti kulového zrcadla,  $Z$  libovolný bod na kulovém zrcadle a  $P(x,y)$  bod na sférické ploše korekční desky, jejíž první plocha je roviná. Paprsek  $p$ , který dopadá na uvažovanou soustavu rovnoběžně s její optickou osou, se v bodě  $P(x,y)$  lámá, dopadá do bodu  $Z$ , kde se odráží do bodu  $Z'$ , paprsek  $PZ$  svírá s optickou osou úhel

$$2(\sigma' - t) = \sigma' = \sigma' - 2t,$$

kde  $\sigma'$  značí úhel, který svírá s optickou osou paprsek  $ZF'$  a  $t$  úhel, který tvoří s optickou osou poloměr zrcadla  $ZC$ .

Má-li být odstraněna otvorová vada soustavy, musí být optická dráha paprsku  $QPZF'$  nezávislá na poloze bodu  $Z$  rovná

$$CZ + SF' = \frac{3}{2} r .$$

Musí tedy platit podle obrázku

$$nx + PZ + ZF' = \frac{3}{2} r ,$$

značí-li  $n$  index lomu skla, ze kterého je zhotovena korekční deska.

Z obrázku plyne dále:

$$ZF' \sin \sigma' = r \cdot \sin t ,$$

takže můžeme psát

$$PZ = \frac{3}{2} r - nx - r \frac{\sin t}{\sin \sigma'} . \quad (9.4.3.1)$$

Pro souřadnice  $x, y$  bodu  $P$  hledaného meridiánu korekční desky pak plyne:

$$\begin{aligned} x &= r \cos t - PZ \cos (\sigma' - 2t) \\ y &= r \sin t - PZ \sin (\sigma' - 2t) \end{aligned} \quad (9.4.3.2)$$

V těchto rovnicích je nutné vyjádřit  $\sin (\sigma' - 2t)$  a  $\cos (\sigma' - 2t)$  úhlem  $t$ . Podle obrázku můžeme psát

$$\sin \sigma' = \frac{r \cdot \sin t}{\sqrt{(r \cos t - \frac{r}{2})^2 + r^2 \sin^2 t}} = \frac{2 \sin t}{\sqrt{5 - 4 \cos t}} ,$$

a tedy

$$\cos \sigma' = \sqrt{1 - \sin^2} = \sqrt{1 - \frac{4 \sin^2 t}{5 - 4 \cos t}} = \frac{2 \cos t - 1}{\sqrt{5 - 4 \cos t}}$$

takže

$$\begin{aligned} \sin (\sigma' - 2t) &= \frac{2 \sin t}{\sqrt{5 - 4 \cos t}} \cos 2t - \frac{2 \cos t - 1}{\sqrt{5 - 4 \cos t}} \cdot \sin 2t = \\ &= \frac{2 \sin t (\cos t - 1)}{\sqrt{5 - 4 \cos t}} \end{aligned} \quad (9.4.3.3)$$

a konečně

$$\cos (\sigma' - 2t) = \sqrt{1 - \frac{4 \sin^2 t (\cos t - 1)^2}{5 - 4 \cos t}} = \frac{1 + 2 \cos t - 2 \cos^2 t}{\sqrt{5 - 4 \cos t}} \quad (9.4.3.4)$$

Dosadíme-li z (9.4.3.3), (9.4.3.4) a (9.4.3.1) do (9.4.3.2), dostaneme pro souřadnice bodu  $P$  meridiánu

$$\left. \begin{aligned} x &= r \cos t - \left( \frac{3}{2} r - nx - \frac{r \sin t}{\sin \sigma'} \right) \frac{1+2 \cos t - 2 \cos^2 t}{\sqrt{5-4 \cos t}} \\ y &= r \sin t - \left( \frac{3}{2} r - nx - \frac{r \sin t}{\sin \sigma'} \right) \frac{2 \sin t (\cos t - 1)}{\sqrt{5-4 \cos t}} \end{aligned} \right\}$$

Dosadíme-li za  $\sin \sigma'$  dříve nalezený vztah dostaneme po úpravě

$$\begin{aligned} x &= \frac{r}{2} \cdot \frac{2 \cos t \sqrt{5-4 \cos t} + (1+2 \cos t - 2 \cos^2 t) (\sqrt{5-4 \cos t} - 3)}{\sqrt{5-4 \cos t} - n (1+2 \cos t - 2 \cos^2 t)} \\ y &= r \cdot \sin t \cos t + \frac{(3r - 2nx) \sin t (1 - \cos t)}{\sqrt{5-4 \cos t}} \end{aligned} \quad (9.4.3.5)$$

Při návrhu konstrukce tedy postupujeme tak, že k danému poloměru  $r$  kulového zrcadla a k danému indexu lomu  $n$  skla, ze kterého bude zhotovena korekční deska, určíme z první rovnice 9.4.3.5 pro každé zvolené  $t$  souřadnici  $x$  a pomocí této souřadnice k témuž  $t$  z druhé rovnice 9.4.3.5 souřadnici  $y$  bodu  $P$  hledaného meridiánu.

Ostatní případy Schmidtova objektivu jsou řešeny např. C. Carathéodorym<sup>1)</sup>, F.A. Lucyem<sup>2)</sup> a D.S. Volosovem<sup>3)</sup>.

## II. Maksutovův objektiv

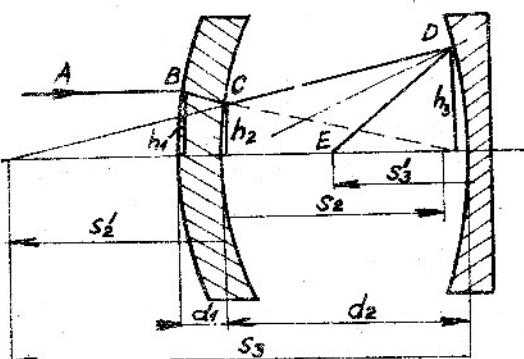
Deset let po B. Schmidtu, zkonstruoval v roce 1941 sovětský astronom D.D. Maksutov novou aplanatickou zrcadlo-čočkovou soustavu, která se liší od Schmidtova objektivu tím, že asferická korekční deska je nahrazena meniskovou čočkou, omezenou kulovými plochami, jak je to vyznačeno na obr. 9.4.3.8.

Všimněme si nejdříve vlastního menisku. Nechť  $r_1$  resp.  $r_2$  znací poloměry přední resp. zadní plochy meniskové čočky a nechť dále značí  $\Delta r = r_1 - r_2$  jejich rozdíl.

Označíme-li  $n$  indexu lomu skla čočky a  $d_1$  její osovou tloušťku, můžeme její ohniskovou vzdálenost  $f_m'$  psát ve tvaru

$$\frac{1}{f_m'} = \frac{n-1}{n \cdot r_1 \cdot r_2} [(n-1) \cdot d - n \cdot \Delta r] \quad (9.4.3.6)$$

Pro koeficient otvorové vady této čočky vychází přibližně, zanedbáme-li členy s  $\frac{d}{r_1}$  vyššího stupně než 1:



Obr. 9.4.3.8 Maksutovův objektiv.

$$A = \frac{n-1}{nr_1^2} \left[ \frac{(n-1)(n+1)^2 \cdot d}{n^2} - (n+2) \cdot \Delta r \right]. \quad (9.4.3.7)$$

Podobně dostaneme pro koeficient barevné vady polohy:

$$B = \frac{dn}{n} \left\{ \frac{1}{r_1} - \left[ \frac{nr_1 - (n-1) \cdot d}{n \cdot r_1} \right]^2 \cdot \left[ \frac{n}{r_2} - \frac{n(n-1)}{n \cdot r_1 - (n-1) \cdot d} \right] \right\} \quad (9.4.3.8)$$

1) C. Carathéodory, Elementare Theorie des Spiegelteleskops von B. Schmidt, Hamb. Math. Einzelschriften, 28, 1940.

2) F.A. Lucy, Exact and approximate computation of Schmidt cameras, JOSA 30, 251, 1940, 31, 358, 1941.

3) D.C. Volosov, Metody řešení složných fotografických systémů, část XVI., 363, Leningrad, 1948.

Volme nejdříve uvažovanou meniskovou čočku tak, aby byla afokální, tj. tak, aby  $\frac{1}{f_m} = 0$ . Potom z (9.4.3.6) plyne

$$\Delta r = \frac{n-1}{n} \cdot d, \quad (9.4.3.9)$$

tj. poloměry křivosti  $r_1$  a  $r_2$  čočky se od sebe liší asi o  $\frac{1}{3}$  její tloušťky.

Za tohoto zjednodušení plyne pro koeficient otvorové resp. barevné vady polohy

$$A = \frac{n-1}{nr_1^4} \cdot \left[ \frac{(n-1) \cdot (n+1)^2 \cdot d}{n^2} - \frac{(n+2) \cdot (n-1) \cdot d}{n} \right] = \frac{(n-1)^2}{n^3} \cdot \frac{d}{r_1^4} \quad (9.4.3.10)$$

resp.

$$E = \frac{\delta n}{n} \cdot \left\{ \frac{1}{r_1} - \left[ \frac{nr_1 - (n-1) \cdot d}{n \cdot r_1} \right]^2 \cdot \left[ \frac{n}{r_1 - \frac{n-1}{n} d} - \frac{n(n-1)}{nr_1 - (n-1)d} \right] \right\} =$$

$$= \frac{(n-1) \cdot d}{n \cdot r_1^2} \cdot \frac{\delta n}{n}. \quad (9.4.3.11)$$

Řešme nyní tuto meniskovou čočku tak, aby byla achromatická. Potom koeficient E musí být roven nule, takže z (9.4.3.8)

$$\frac{1}{r_1} = \left[ \frac{n \cdot r_1 - (n-1) \cdot d}{n \cdot r_1} \right]^2 \cdot \left[ \frac{n}{r_2} - \frac{n \cdot (n-1)}{n \cdot r_1 - (n-1) \cdot d} \right].$$

Odtud

$$r_2 = \frac{\left[ n \cdot r_1 - (n-1) \cdot d \right]^2}{n^2 \cdot r_1 - (n-1)^2 \cdot d} = \frac{r_1 \left[ 1 - \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{r_1} \right]^2}{1 - \frac{(n-1)^2}{n^2} \cdot \frac{d}{r_1}} =$$

$$= r_1 \cdot \left[ 1 - \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d}{r_1} \right]^2 \cdot \left[ 1 - \frac{(n-1)^2}{n^2} \cdot \frac{d}{r_1} \right]^{-1}.$$

Rozvineme-li druhý výraz v řadu a omezíme-li se při úpravě na členy s  $\frac{d}{r_1}$  v první mocnině, dostaneme po úpravě

$$r_2 = r_1 - \frac{n^2 - 1}{n^2} \cdot d \text{ čili}$$

$$r_1 - r_2 = \Delta r = \frac{n^2 - 1}{n^2} \cdot d. \quad (9.4.3.12)$$

Odtud plyne, že pro  $n = 1,5$  je

$$\Delta r = \frac{1,25}{2,25} \cdot d = 0,5 d,$$

takže je možno říci, že poloměry křivosti achromatického menisku se liší podle indexu lomu skla čočky přibližně o 0,5 až 0,6 tloušťky  $d$ .

Pro ohniskovou vzdálenost  $f'_m$  meniskové čočky plyne pak z (9.4.3.6)

$$\frac{1}{f'_m} = \frac{n-1}{n \cdot r_1 \cdot r_2} \cdot \left[ (n-1) \cdot d - n \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2} \cdot d \right] =$$

$$= - \frac{(n-1)^2 \cdot d}{n^2 \cdot r_1 \cdot r_2}. \quad (9.4.3.13)$$

Podobně plyne pro koeficient otvorové vady

$$A = \frac{n-1}{n r_1^4} \left[ \frac{(n-1)(n+1)^2 \cdot d}{n^2} - \frac{(n+2) \cdot (n^2-1) \cdot d}{n^2} \right] = \\ = \frac{-(n-1)^2(n+1)}{n^3} \cdot \frac{d}{r_1^4} \quad (9.4.3.14)$$

Porovnáním (9.4.3.14) a (9.4.3.10) plyne, že koeficient otvorové vady achromatické meniskové čočky je přibližně 2,5-krát absolutně větší než v případě sférické čočky, ovšem opačného znaménka. Meniskové čočky, které jsou svým tvarem blízké achromatické čočce, jsou velmi vhodné pro redukci otvorové vady složitých optických soustav. Velmi dobře se proto hodí i pro jednodušší soustavy zrcadlové.

Uvažujme proto zrcadlo-čočkovou soustavu typu Maksutovova objektivu podle obr. 9.4.3.8. V souladu s označeními uvedenými na tomto obrázku, vychází pro koeficient otvorové vady tohoto objektivu jako celku

$$A = A_m + \frac{h_3^4}{h_1^4} \cdot A_z ,$$

kde  $A_m$  resp.  $A_z$  značí koeficienty otvorové vady meniskové čočky resp. samotného kulového zrcadla. Přitom lze psát

$$A_z = - \frac{(s_3 - r_3)^2}{r_3^3 \cdot s_3^2} .$$

Odtud je vidět, že pro  $r_3 < 0$  je  $A_z > 0$ , zatím co  $A_m < 0$ .

Aby soustava jako celek neměla otvorovou vodu, musí být  $A = 0$ , tj.

$$\frac{(n-1)^2(n+1)}{2n^3} \cdot \frac{d_1}{r_1^4} = - \frac{h_3^4}{h_1^4} \cdot \frac{(s_3 - r_3)^2}{r_3^3 \cdot s_3^2} . \quad (9.4.3.15)$$

Tato rovnice spolu s dalšími podmínkami

$$\left. \begin{aligned} s_3 &= s'_2 - d_2 , & \frac{h_3}{h_1} &= \frac{h_3}{h_2} \cdot \frac{h_2}{h_1} \\ \frac{h_3}{h_2} &= \frac{s_3}{s'_2} = \frac{s'_2 - d_2}{s'_2} , & \frac{h_2}{h_1} &= 1 - \frac{n-1}{n} \cdot \frac{d_1}{r_1} \end{aligned} \right\} \quad (9.4.3.16)$$

umožní určit  $r_1$  resp.  $r_2$  pro dané  $r_3$  tak, aby soustava jako celek byla prostá otvorové vody.

Protože výpočet těchto rovnic není jednoduchý, doporučuje se nejdříve provést přibližné řešení za předpokladu, že

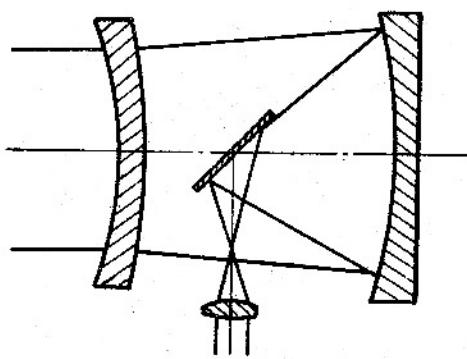
$$r_1 = r_2 , \quad s'_2 = f'_m \quad \text{a} \quad h_2 = h_1 .$$

Potom ze vztahu (9.4.3.13) plyne

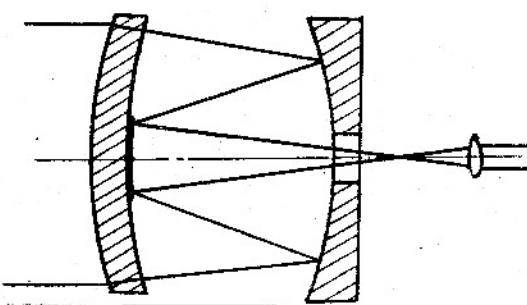
$$r_1^2 = - \frac{(n-1)^2 \cdot d_1 \cdot f'_m}{n^2} .$$

Maksutovův objektiv se ukázal jako velmi výhodný z několika důvodů:

- a) soustava Maksutovova má poměrně malou komu a astigmatismus,
- b) umožňuje poměrně velmi krátkou stavební délku,



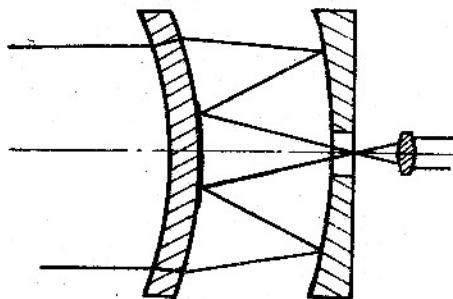
Obr. 9.4.3.9 Newtonův dalekohled s Maksutovovým objektivem



Obr. 9.4.3.10 Gregoryho dalekohled s Maksutovovým objektivem

- c) menisková čočka uzavírá tubus dalekohledu, čímž je odstraněna řada nevýhod otevřených zrcadlových dalekohledů,
- d) malé požadavky na druh skla volený pro výrobu meniskové čočky.

Proto během krátké doby byly skoro všechny typy zrcadlových dalekohledů překonstruovány na Maksutovův typ, jak je to vidět z obr. 9.4.3.9 až 9.4.3.11.



Obr. 9.4.3.11 Cassegrainův dalekohled s Maksutovovým objektivem.

Maksutovový objektiv se s výhodou používá u dalekohledů Gregoryho resp. Cassegrainovy konstrukce, kdy druhá plocha meniskové čočky může být s výhodou využita jako náhrada elipsoidického resp. hyperboloidického zrcadla, čímž odpadnou speciální držáky těchto zrcadel u klasických dalekohledů těchto dvou typů, které byly často příčinou ohýbových jevů, které se nepříznivě projevovaly v zobrazení.

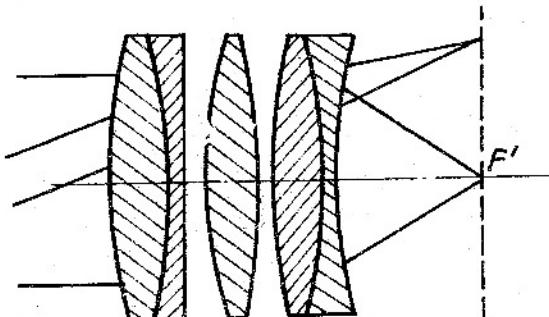
Pro úplnost uvádíme příklad Maksutovova objektivu o ohniskové vzdálenosti  $f' = 2633,0 \text{ mm}$  o relativním otvoru  $1:17,5$  Cassegrainova typu.

Poloměry křivosti	Tloušťky	Průměry
$r_1 = 195,0 \text{ mm}$		
$r_2 = 202,0 \text{ mm}$	$d_1 = 11,5 \text{ mm}$	$D_1 = 150 \text{ mm}$
$r_3 = 940,0 \text{ mm}$	$d_2 = 395,5 \text{ mm}$	$D_2 = 156 \text{ mm}$

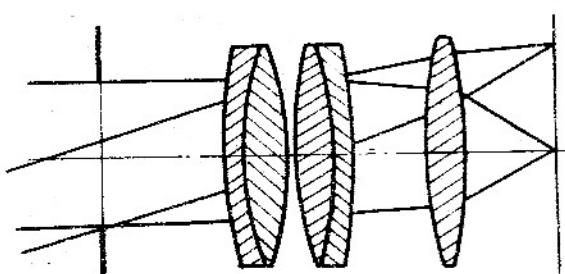
#### 9.4.4. Objektivy používané u zaměřovačů

U některých zaměřovacích přístrojů se vyžaduje velké zorné pole. Pro tyto účely se s výhodou používá jako objektivu některých okulárů obráceně orientovaných, nebo objektivů, jejichž stavba je velmi podobná okuláru.

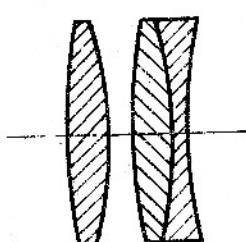
Na obr. 9.4.4.1 (viz str. 64) je znázorněn širokouhlý objektiv, který při zorném poli  $56^\circ$  má relativní otvor  $1:5$ . U těchto objektivů bývá obyčejně vstupní pupila dalekohledu umístěna před objektivem.



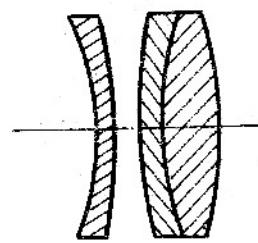
Obr. 9.4.4.1 Širokouhly objektiv.



Obr. 9.4.4.2 Objektiv užívaný u periskopů.



Obr. 9.4.4.3  
Objektiv  
zaměřovače.



Obr. 9.4.4.4  
Objektiv  
zaměřovače.

Na obr. 9.4.4.2 je schema objektivu užívaného u periskopů. Jeho zorné pole dosahuje  $30 - 40^\circ$  při relativním otvoru 1:5. Také v tomto případě se vstupní pupila předsouvá před objektiv.

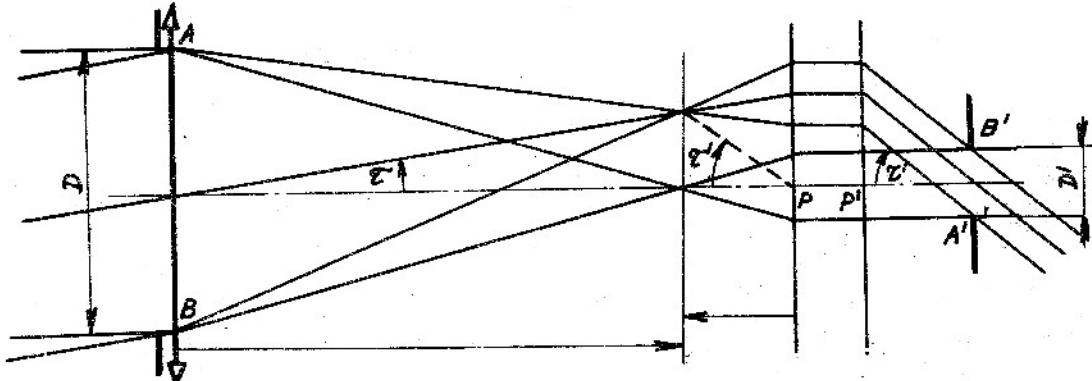
Na obr. 9.4.4.3 a 9.4.4.4 jsou znázorněny soustavy širokouhlých objektivů zaměřovačů o zorném poli  $15 - 30^\circ$  a relativním otvoru 1:5.

## 10. OKULÁRY

Jak již bylo dříve uvedeno, tvoří okulár u dalekohledů, do jejichž optické soustavy není začleněn zámeřný kříž nebo jiný rovinový zámeřný obrazec, součást celé optické soustavy a koriguje se současně s ní tak, že částečně např. kompenzuje optické vadby částí, které se nacházejí před ním. Proto není možné přenášet okulár od jedné dalekohledové soustavy k jiné.

V dalekohledových soustavách bývají však ve většině případů umístěny rovinové zámeřné obrazce. V těchto případech musí být okulár korigován jako samostatný celek a sice tak, aby jeho pole na předmětové straně bylo rovinové a bez zkreslení. Takové okuláry je pak možno kombinovat s různými optickými soustavami a tvoří samostatné konstrukční celky. Takové okuláry se sestavují do katalogů s charakterisují se ohniskovou vzdáleností, zorným polem, polohou vstupní a výstupní pupily, relativním otvorem apod.

Na obr. 10.1 (viz str. 65) značí AB vstupní pupilu objektivu Keplerova dalekohledu a A'B' její obraz vytvořený okulárem. Protože vstupní pupila u achromatického objektivu prakticky splývá s jeho výstupní pupilou, tvoří obraz A'B' současně výstupní pupil okuláru i celého dalekohledu.



Obr. 10.1 K vysvětlení vstupní a výstupní pupily okuláru.

Přitom podle obrázku platí

$$\frac{D}{D'} = \frac{f_1'}{f_2} = -\frac{f_1'}{f_2} = \Gamma \quad \text{čili} \\ D = \Gamma \cdot D' . \quad (10.1)$$

Uvažujeme-li okulár jako samostatný celek bez dalekohledové soustavy, pak jeho vstupní pupila leží v nekonečnu a jeho výstupní pupila v obrazové ohniskové rovině. Při začlenění okuláru do dalekohledové soustavy se poloha výstupní pupily okuláru resp. dalekohledu mnoho nezmění, neboť obyčejně ohnisková vzdálenost objektivu několikráté převyšuje ohniskovou vzdálenost okuláru.

Relativním otvorem okuláru rozumíme poměr průměru jeho výstupní pupily  $D'$  a jeho ohniskové vzdálenosti. Platí tedy

$$\frac{D'}{f_2} = \frac{D}{f_2} = \frac{D}{\Gamma \cdot f_2} = \frac{D}{f_1} , \quad (10.2)$$

uvažujeme-li zvětšení dalekohledu  $\Gamma$  absolutně.

Ze vztahu (10.2) vyplývá, že v případě jednoduchého Keplerova dalekohledu je relativní otvor okuláru shodný s relativním otvorem objektivu.

Jak bude ještě dále podrobně uvedeno, zvětšení dalekohledu s převracející soustavou je dán vztahem

$$\Gamma = -\frac{f_1}{f_2} \cdot m , \quad (10.3)$$

kde  $f_1$  a  $f_2$  značí ohniskovou vzdálenost objektivu a okuláru a  $m$  zvětšení převracející soustavy. Pro relativní otvor okuláru můžeme pak psát (běžeme-li  $\Gamma$  absolutně)

$$\frac{D'}{f_2} = \frac{D}{|\Gamma| \cdot f_2} = \frac{f_2 \cdot D}{m \cdot f_1 \cdot f_2} = \frac{D}{m f_1} . \quad (10.4)$$

Ze vztahu (10.4) je vidět, že u dalekohledů s převracející soustavou o zvětšení  $m$  je relativní otvor okuláru  $m$ -krát menší než relativní otvor objektivu dalekohledu. Tuto skutečnost je nutno brát v úvahu při volbě zvětšení převracející soustavy, neboť je možné volit toto zvětšení tak, aby to odpovídalo příznivějším požadavkům kladeným na okulér.

Není-li objektiv dalekohledu zatížen zkreslením, pak pro jeho zorné pole platí podle obr. 10.1

$$\tan \tau = \frac{b}{f_1} \quad (10.5)$$

Podobně plyně pro zorné pole  $\tilde{\Gamma}$  okuláru

$$\operatorname{tg} \tilde{\Gamma} = \frac{b}{f_2} = - \frac{b}{f'_2}. \quad (10.6)$$

Ze vztahů (10.5) a (10.6) plyně

$$\frac{\operatorname{tg} \tilde{\Gamma}}{\operatorname{tg} \Gamma} = - \frac{f'_1}{f'_2} = \Gamma \quad \text{tj.} \\ \operatorname{tg} \tilde{\Gamma} = \Gamma \cdot \operatorname{tg} \Gamma. \quad (10.7)$$

Zorné pole okuláru v prostoru obrazovém nechť je  $\tilde{\Gamma}'$ . Pokud není okulár zatížen zkreslením, je

$$\tilde{\Gamma}' = \tilde{\Gamma}$$

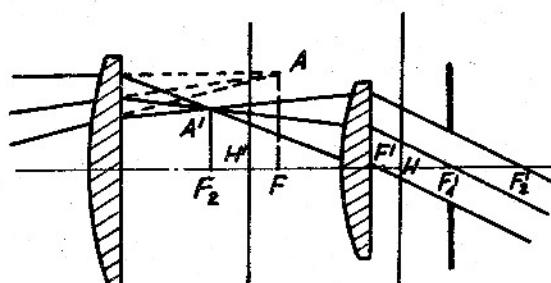
Ve většině praktických případů mají okuláry značné zkreslení, takže pak

$$\tilde{\Gamma}' \neq \tilde{\Gamma}$$

Rozdíl  $\tilde{\Gamma}' - \tilde{\Gamma}$  čini často 10% i více. Je proto nutné respektovat tuto skutečnost při měření zorného pole dalekohledu.

#### 10.1. Huygenušův okulár

Huygenušův okulár se používá u dalekohledů v kombinaci s achromatickými objektivy. Skládá se ze dvou jednoduchých plankonvexních čoček přivrácených vypuklými plochami k předmětu, jak je to vidět z obr. 10.1.1.



Obr. 10.1.1 Huygenušův okulár.

Zvláštností tohoto okuláru je poloha jeho předmětového ohniska  $F$ , které leží mezi oběma čočkami. Protože obraz vytvořený objektivem dalekohledu musí padnout do předmětové ohniskové roviny okuláru, je pro první čočku okuláru nesklutečným předmětem, která jej zobrazí do předmětového ohniska  $F_2$  druhé čočky okuláru, neboť za okulárem musí vystupovat příslušné zobrazovací paprsky jako soubor rovnoběžných paprsků, jak je to na obr. 10.1.1 naznačeno.

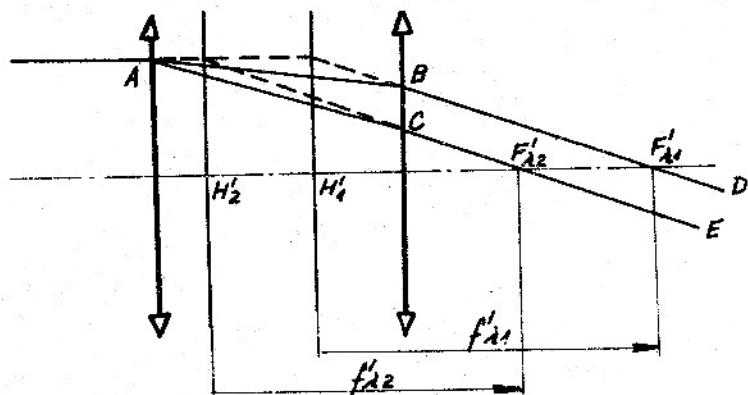
První čočka Huygenušova okuláru se nazývá často kolektivem a druhá oční čočkou.

Huygenušův okulár má z optického hlediska pouze tři konstrukční parametry, dva poloměry křivosti a vzdálenost obou čoček. Do určité míry je ještě možno volit druh skel.

Volíme-li zvětšení okuláru, tj. jeho ohniskovou vzdálenost, zbyvají k dispozici pro korekci okuláru pouze dva parametry a druh skel. tloušťky obou čoček jsou velmi malé a proto jich není možno využít ke korekci. Těchto parametrů se využívá ke korekci barevné vady velikosti a komfy nebo astigmatismu.

Předpokládejme, že na obr. 10.1.2 (viz str. 67) dopadá na první čočku paprsek bílého světla rovnoběžně s její optickou osou.

Vlivem barevné vady první čočky se v bodě A rozloží paprsek na barevný vějíř. Nechť paprsky AB resp. AC značí krajní paprsky vějíře příslušné ke krajním vlnovým délkám  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  viditelného spektra. Tyto paprsky protinou po průchodu druhou čočkou optickou osu v ohniscích  $F'_\lambda_1$  resp.  $F'_\lambda_2$ . Příslušné ohniskové vzdálenosti



Obr. 10.1.2 K vysvětlení barevné vady polohy Huygensova okuláru.

$f'_{\lambda_1}$  resp.  $f'_{\lambda_2}$  budou obecně různé a v důsledku toho se v obraze vytvořeném okulárem projeví barevná vada velikosti. Má-li se tato vada potlačit, je nutné, aby paprsky  $\overline{BD}$  resp.  $\overline{CE}$  byly rovnoběžné, tj. musí být

$$f'_{\lambda_1} = f'_{\lambda_2} . \quad (10.1.1)$$

Nechť  $f'_1$  resp.  $f'_2$  značí ohniškové vzdálenosti kolektivu resp. oční čočky. Potom pro lámavost Huygensova okuláru můžeme psát

$$\frac{1}{f'} = \varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - e \varphi_1 \cdot \varphi_2 , \quad (10.1.2)$$

kde  $\varphi_1 = \frac{1}{f'_1}$ , a  $\varphi_2 = \frac{1}{f'_2}$ , značí lámavosti obou jeho členů a  $e$  jejich vzdálenost. Protože se v obou případech jedná o plankonvexní čočky, můžeme psát dále

$$\varphi_1 = \frac{n-1}{r_1} \quad \text{resp.} \quad \varphi_2 = \frac{n-1}{r_2} , \quad (10.1.3)$$

kde  $r_1$  resp.  $r_2$  značí poloměry kulových ploch a  $n$  index lomu skla, ze kterého jsou zhotoveny obě čočky.

Dosadíme-li do (10.1.2), dostaneme dále

$$\varphi = \frac{n-1}{r_1} + \frac{n-1}{r_2} - e \frac{(n-1)^2}{r_1 r_2} . \quad (10.1.4)$$

Aby byla splněna podmínka (10.1.1) pro potlačení barevné vady velikosti, musí

$$\frac{d\varphi}{dn} = 0 . \quad \text{Diferencováním (10.1.4) plyne}$$

$$d\varphi = \frac{dn}{r_1} + \frac{dn}{r_2} - \frac{2(n-1) \cdot dn}{r_1 r_2} \cdot e$$

čili odtud

$$\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} - \frac{2(n-1)}{r_1 \cdot r_2} \cdot e = 0$$

čili

$$e = \frac{1}{2} \left[ \frac{r_1}{n-1} + \frac{r_2}{n-1} \right] = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\varphi_1} + \frac{1}{\varphi_2} \right)$$

čili konečně

$$e = \frac{1}{2} (f'_1 + f'_2) . \quad (10.1.5)$$

Tím jsme dosáhli k základní podmínce pro konstrukci Huygensových okuláru. Podle této podmínky je Huygensův okulár vykorigován z hlediská barevné vady velikosti, je-li vzdálenost  $e$  obou jeho článků rovna aritmetickému průměru jejich ohniskových vzdáleností.

Okuláry konstruované Huygensem měly ohniskovou vzdálenost  $f'_1$ , vzdálenost  $e$  a ohniskovou vzdálenost  $f'_2$  v poměru  $4 : 3 : 2$ , což se obyčejně vyjadřuje symbolem 4,3,2. Předmětová ohnisková rovina leží ve vzdálenosti 2 před oční čočkou.

Dnes se používají Huygensovy okuláry konstruované podle symbolu 3,2,1. Předmětová ohnisková rovina leží pak ve vzdálenosti 1 před oční čočkou.

Předchozí úvahy se týkaly okuláru Huygensova typu, u kterých jsou obě čočky zhotoveny ze stejněho skla.

Uvažujme nyní případ, kdy každá čočka je zhotovena z jiného skla. Nechť např. kolektiv je zhotoven ze skla o indexu lomu  $n_1$  a Abbeově čísle  $\nu_1$  a podobně druhá, oční čočka ze skla o konstantách  $n_2$ ,  $\nu_2$ .

Pro lámavost  $\varphi$  Huygensova okuláru bude nyní platit

$$\varphi = \frac{n_1 - 1}{r_1} + \frac{n_2 - 1}{r_2} - \frac{(n_1 - 1)(n_2 - 1)}{r_1 r_2} . e \quad (10.1.8)$$

Má-li být u tohoto okuláru odstraněna barevná vada velikosti, musí opět být  $d\varphi = 0$ . Diferencováním (10.1.8) plyne

$$d\varphi = \frac{dn_1}{r_1} + \frac{dn_2}{r_2} - \frac{(n_1 - 1) dn_2 + (n_2 - 1) dn_1}{r_1 r_2} . e$$

Avšak  $dn_1 = (n_p - n_C)_1$ ,

$dn_2 = (n_p - n_C)_2$ ,

a  $\nu_1 = \frac{n_1 - 1}{(n_p - n_C)_1}$ ,

$\nu_2 = \frac{n_2 - 1}{(n_p - n_C)_2}$ ,

takže můžeme psát

$$d\varphi = \frac{n_1 - 1}{\nu_1 \cdot r_1} + \frac{n_2 - 1}{\nu_2 \cdot r_2} - \frac{(n_1 - 1)(n_2 - 1)}{\nu_1} + \frac{(n_1 - 1)(n_2 - 1)}{\nu_2} . e$$

Zíráme

$$\frac{n_1 - 1}{\nu_1 \cdot r_1} + \frac{n_2 - 1}{\nu_2 \cdot r_2} = \frac{(n_1 - 1)(n_2 - 1)(\nu_1 + \nu_2)}{r_1 r_2 \nu_1 \nu_2} . e$$

$$e = \left[ \frac{r_2 \cdot \nu_2}{n_2 - 1} + \frac{r_1 \cdot \nu_1}{n_1 - 1} \right] \cdot \frac{1}{\nu_1 + \nu_2}$$

Zíráme

$$e = \frac{f'_1 \cdot \nu_1 + f'_2 \cdot \nu_2}{\nu_1 + \nu_2} . \quad (10.1.9)$$

Otvorová vada Huygensemových okuláru nemůže být odstraněna. Její hodnota závisí především na oční čočce. Roste s klíčající ohniskovou vzdáleností (se zvětšením) okuláru a je menší, je-li oční čočka zhotovena z korunového skla než ze skla flintového. Protože však okulárem probíhají úzké paprskové svažky, neprojevuje se otvorová vada příliš na jeho zobrazování.

Zorné pole Huygensemových okuláru se pohybuje u okuláru s ohniskovými vzdálenostmi od 100 do 150 mm až do  $80^\circ$  a u okuláru s ohniskovými vzdálenostmi od 7 do

80 mm do 50°. V průměru se počítá u Huygensovych okulárů se zorným polem do 40°.

Pro informaci uvádíme dva příklady Huygensovych okulárů, jeden z jednoho druhu skla a druhý ze dvou druhů skel.

Tab. 10.1.1  
 $f' = 25 \text{ mm}$

	Poloměr křivosti mm	Tjoušťka a vzduchová vzdálenost mm	Index lomu $n_d$	Abbeho čís.	Symbol
Okulár z jednoho skla	$r_1 = 17,63$ $r_2 = \infty$ $r_3 = 9,00$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 3,0$ $d_2 = 25,8$ $d_3 = 1,5$	1,5163 1,0 1,5163	64 ~ 64	4,3,2
Okulár ze dvou druhů skla	$r_1 = 24,92$ $r_2 = \infty$ $r_3 = 13,08$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 3,5$ $d_2 = 36,2$ $d_3 = 1,5$	1,5480 1,0 1,5163	45,9 ~ 64,0	4,3,2

Huygenovy okuláry se používají zejména u astronomických přístrojů.

## 10.2. Ramsdenův okulár

Ramsdenův okulár je rovněž tvořen dvěma planokonvexními čočkami, které jsou přivráceny svými vypuklými plochami k sobě, jak je to patrné z obr. 10.2.1. Jejich ohniskové vzdálenosti  $f'_1$  a  $f'_2$  jsou stejné.

Z podmínky pro odstranění barevné vady velikosti (10.1.5) plyne

$$e = -\frac{1}{2} (f'_1 + f'_2) = f'_1 \quad (10.2.1)$$

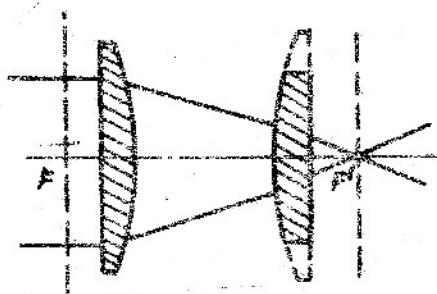
Pro ohniskovou vzdálenost okuláru  $f'$  pak plyne

$$f' = \frac{f'_1^2}{2f'_1 - f'_2} = f'_1. \quad (10.2.2)$$

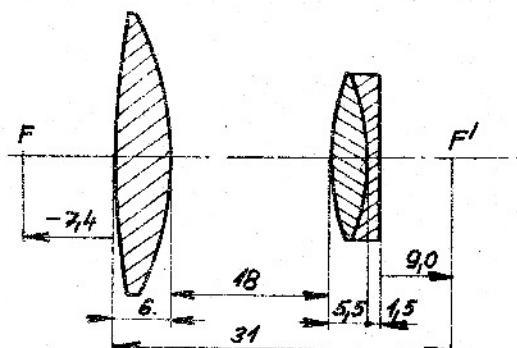
Ze vztahu (10.2.2) plyne, že vzdálenost členů Ramsdenova okuláru a jeho celková ohnisková vzdálenost je rovna ohniskové vzdálenosti těchto členů.

Ze těchto podmínek leží obrazová ohnisková rovina kolektivu v rovině oční čočky s obráceně. Také předmětová ohnisková rovina a obrazová ohnisková rovina celého okuláru leží v rovinách kolektivu resp. oční čočky.

Tato okolnost není příznivá z hlediska usazování prachu na plochách čoček, který pak velmi neruší zorné pole. Proto se v praxi poněkud poruší podmínka achromasie (10.2.1) a vzdálenost mezi oběma členy se poněkud změnuje. Obyčejně se volí  $e = -\frac{2}{3} f'_2$ . V tomto případě se pošinou ohniska  $F$  a  $F'$  před resp. za oba členy, jak je to vyznačeno na obr. 10.2.1. To však umožňuje snadno umístit před okulár zámerný kříž.



Obr. 10.2.1 Ramsdenův okulár



Obr. 10.3.1 Kellnerův okulár.

tového skla. Tím se docílí lepší korekce barevné vady. Také zkreslení je velmi dobře vykorigováno. Jeho zorné pole dosahuje až  $52^{\circ}$ . Je to velmi rozšířený okulár, který se používá u triédru nebo zaměřovacích dalekohledů. Pro informaci uvádíme v tab. 10.3.1 \*) jako příklad konstrukční data Kellnerova okuláru pro  $f' = 25,0$  mm, znázorněného na obr. 10.3.1.

### 10.3. Kellnerův okulár obr. 10.3.1

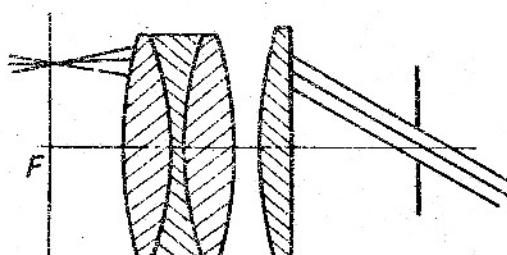
Kellnerův okulár je tvořen v principu zlepšeným Ramsdenovým okulárem. Jeho oční čočka je stmelena ze spojky z barveného korunového skla a z rozptylky z flintového skla.

Tab. 10.3.1  
 $f' = 25,0$  mm

Poloměry křivosti mm	Tloušťky a vzduchové mezery mm	Index lomu $n_D$	Abbeovo číslo	Sklo	Průměr čoček mm
$r_1 = 66,18$	$d_1 = 6,0$	1,5163	64,1	K-8	24
$r_2 = -31,09$	$d_2 = 18,0$	1,0	-		
$r_3 = 18,05$	$d_3 = 5,5$	1,5399	59,7	BK-6	14
$r_4 = -13,54$	$d_4 = 1,5$	1,6199	36,3	6-13	14
$r_5 = -95,53$					

$$x_F = -7,4 \text{ mm},$$

$$x_{F'} = 9,0 \text{ mm}$$



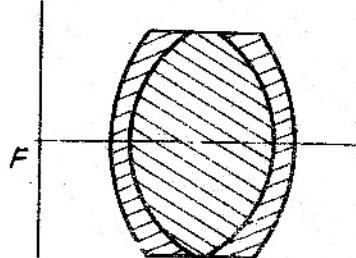
Obr. 10.4.1 Abbeův ortoskopický okulár.

### 10.4. Abbeův ortoskopický okulár

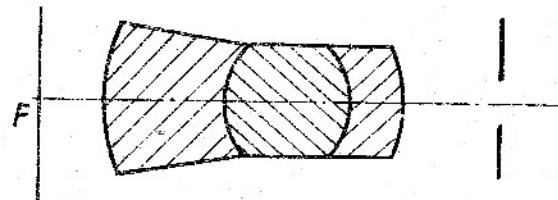
Jak je vidět z obr. 10.4.1 je tento okulár složen ze dvou členů, prvního třídielného, který je tvořen flintovou rozptylkou ohrazenou dvěma korunovými spojkami a druhého jednoduchého, tvořeného plenkonvexní čočkou.

Je dobrě korigován z hlediska otvorové vady, barevné vady polohy a zkreslení. Zorné pole dosahuje  $40^{\circ}$ , v některých případech bylo výše překročeno. Protože má málo ploch proti vzduchu dává velmi kontrastní obraz. Mimoto jeho předností je velká předmětová pracovní vzdálenost a velká vzdálenost výstupní pupily od poslední plochy, která dosahuje až 82% jeho ohniskové vzdálenosti. Je proto velmi vhodný pro velká zvětšení, kdy je nutno snížit ohniskovou vzdálenost na 5 - 3 mm.

\*) M.M. Rusinov, Gabaritnye raschety opticheskikh sistem, 1959, 249.



Obr. 10.5.1 Steinheilův okulár.



Obr. 10.5.2 Monocentrický okulár.

### 10.5. Monocentrický okulár

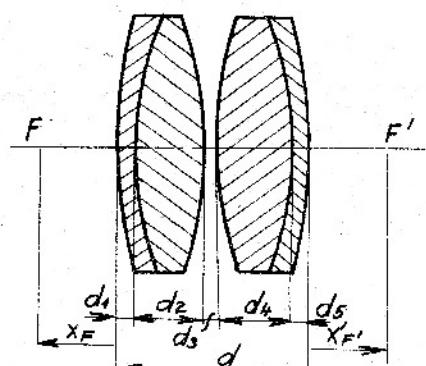
Jako okuláru se často používá Steinheilovy lupy, která je tvořena souměrnou korunovou spojkou obklopenou dvěma stejnými rozptylnými flintovými meniskami, jak je to naznačeno na obr. 10.5.1. Není zcela prosta otvorové vady a má zbytkové kreslení a menší zklenutí pole. Tato lupa se používá jako okulár do zorného pole asi  $25^\circ$ . Jeho výhodou jsou pouze dvě plochy proti vzduchu.

Ze Steinheilovy lupy byl později odvozen monocentrický okulár, který má podobnou stavbu, avšak všechny jeho kulové plochy jsou koncentrické (viz obr. 10.5.2). Jeho zorné pole dosahuje cca  $30^\circ$ .

Používá se ho všude v těch případech, kdy je žádoucí kontrastní obraz, jak je tomu např. při pozorování povrchu planet nebo v okulárových mikrometrech. Také u těchto okuláru je možno snížit ohniskovou vzdálenost až na 6 mm.

### 10.6. Souměrný okulár

Souměrný okulár se skládá ze dvou stejných dvoudílných tmelených členů, jak je to vidět z obr. 10.6.1. Vyznačuje se poměrně velkými vzdálenostmi ohnisek od jeho krajních ploch, které dosahují 80 % (i více) jeho ohniskové vzdálenosti. Je vhodný pro takové konstrukce puškových zaměřovačů, u kterých je žádáno, aby výstupní pupila ležela co nejdále za poslední plochou okuláru (viz příklad návrhu puškového zaměřovače str. 150). Zorné pole tohoto okuláru dosahuje asi  $40^\circ$ .



Obr. 10.6.1 Souměrný okulár.

Pro informaci uvádíme v tab. 10.6.1 konstrukční hodnoty souměrného okuláru<sup>x)</sup>.

### 10.7. Širokouhlý Erfleův okulár

Jak je patrno z obr. 10.7.1 resp. 10.7.2 (viz str. 72) sestává tento okulár ze tří členů, z nichž oba krajní jsou dvoudílné tmelené. Vyrábí se ve dvou variantách, souměrné a asymetrické. První varianta je vlastně tvořena souměrným okulárem, mezi jehož členy je vložena souměrná bikonvexní čočka. Zorné pole těchto okuláru dosahuje  $70^\circ$ .

Jako příklad jsou v tab. 10.7.1 uvedena konstrukční data asymetrického Erfleova okuláru pro ohniskovou vzdálenost  $f'=25$  mm.

Další vývoj okuláru je zaměřen na zvětšení jejich zorného pole a oddalení vý-

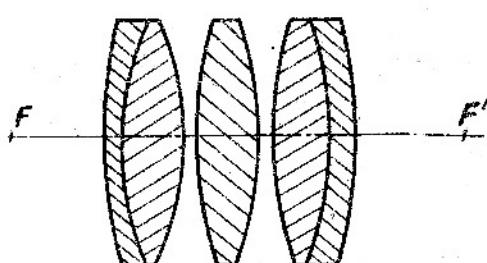
<sup>x)</sup> M.M. Rusinov, Gabaritnye raschety optičeskikh sistem, 1959, str. 253.

Tab. 10.6.1

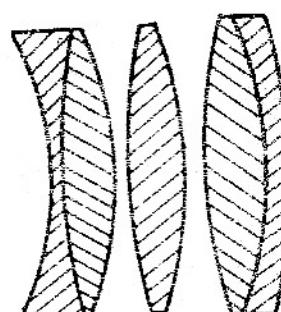
$$f' = 25 \text{ mm}, \quad T' = 38^\circ$$

Poloměry křivosti mm	Tloušťky a vzduchové vzdálen. mm	Index lomu $n_D$	Abbeovo číslo	Sklo	Průměr čoček mm
$r_1 = 68,66$	$d_1 = 1,5$	1,6164	36,6	š 2	22
$r_2 = 21,01$	$d_2 = 7,5$	1,5163	64,1	K-8	22
$r_3 = -30,58$	$d_3 = 0,1$	1,0	-		
$r_4 = 30,58$	$d_4 = 7,5$	1,5163	64,1	K-8	22
$r_5 = -21,01$	$d_5 = 1,5$	1,6164	36,6	š 2	22
$r_6 = -68,66$					

$$x_F^t = 18,9 \text{ mm}, \quad x_P = -18,9 \text{ mm}.$$



Obr. 10.7.1 Souměrný Erfleuv okulár.



Obr. 10.7.2 Asymetrický Erfleuv okulár.

stupní pupily od poslední plochy. Lze toho dosáhnout jednak stlačením jednotlivých členů okuláru k sobě, jednak zvětšením jejich průměru. Zvětšování průměru nelze všeck provádět bez omezení, neboť průměr čočky musí být menší než je dvojnásobný poloměr křivosti nejvíce zakřivené plochy okuláru. Tento poloměr u většiny případů dosahuje hodnoty 75 % ohniskové vzdálenosti okuláru.

Tab. 10.7.1  
 $f = 25 \text{ mm}$ 

Poloměry křivosti mm	Tloušťky a vzduchové vzdálen. mm	Index lomu $n_D$	Abbeovo číslo	Sklo	Průměr čoček mm
$r_1 = -56,01$	$d_1 = 1,7$	1,6199	36,3	š - 13	36,5
$r_2 = 31,89$	$d_2 = 15,0$	1,5163	64,1	K-8	36,5
$r_3 = -31,89$	$d_3 = 0,25$	1,0	-	-	
$r_4 = 70,78$	$d_4 = 7,6$	1,5163	64,1	K-8	36,5
$r_5 = -70,78$	$d_5 = 0,25$	1,0	-	-	
$r_6 = 29,41$	$d_6 = 13,8$	1,5163	64,1	K-8	32,5
$r_7 = -34,42$	$d_7 = 1,8$	1,6199	36,3	š - 13	32,5
$r_8 = -170,23$					

$$x_F^t = 17,0 \text{ mm}, \quad x_P = -8,9 \text{ mm}$$

## II. PŘEVRAČEJÍCÍ SOUSTAVY

Keplerův dalekohled vytváří převrácený obraz. Tato vlastnost Keplerova dalekohledu není na závadu při astronomických pozorováních nebo u některých měřicích přístrojů, jako geodetických a některých laboratorních (refraktometrů). V případě geodetických přístrojů se obrace tato vlastnost Keplerova dalekohledu vhodnou úpravou záměrné letce (číslování se obrátí), u refraktometrů, kde se jedná o nastavení dalekohledu na rozhraní mezi světlou a tmavou polovinou zorného pole, nehraje převrácení obrazu dlužu, neboť se projeví pouze výměnou obou polovin zorného pole.

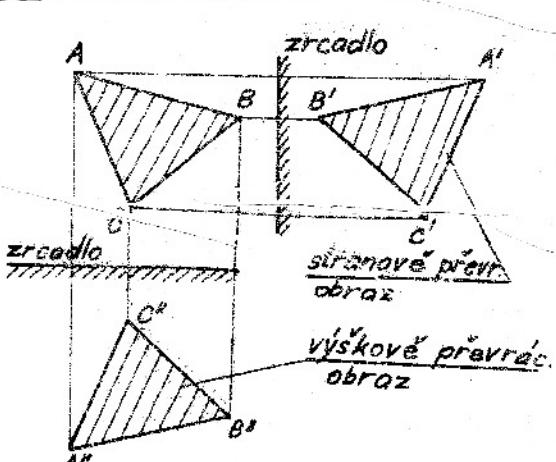
U většiny ostatních přístrojů, zvláště pozorovacích, je nutné, aby obraz byl v zorném poli vzpřímen. Z toho důvodu je nutné zavést do optické soustavy dalekohledu tzv. převracející soustavu.

Úkolem převracející soustavy je otočit obraz vytvořený objektivem dalekohledu v jeho rovině kolem optické osy o  $180^{\circ}$ . Tohoto otočení lze dosáhnout dvěma způsoby, pomocí rovinných zrcadel nebo lámavých soustav (čoček). Všimněme si podrobněji obou těchto způsobů.

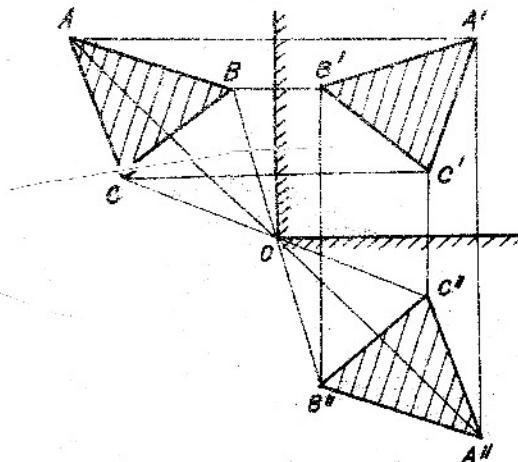
### II.1. Zrcadlové převracející soustavy

Rovinné zrcadlo zobrazuje předmět tak, že příslušný obraz je souměrný s předmětem podle roviny tohoto zrcadla. Podle orientace zrcadla je příslušný obraz otočen vzhledem k předmětu stranově nebo výškově, jak je to vidět z obr. II.1.1.

Máme-li tedy otočit obraz předmětu vytvořený objektivem dalekohledu kolem optické osy o  $180^{\circ}$ , je nutno použít dvou rovinných zrcadel, z nichž jedno převrátí obraz stranově a druhé výškově nebo naopak, jak je to patrné z obr. II.1.2.



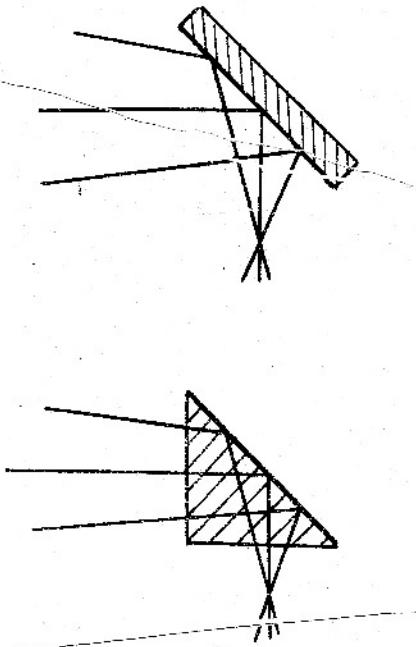
Obr. II.1.1 Stranové resp. výškové převrácení obrazu rovinným zrcadlem.



Obr. II.1.2 Otočení obrazu o  $180^{\circ}$  postupným otočením dle různých zrcadlením rovinným zrcadlem.

Toto dvojí postupné zobrazení je ekvivalentní otočení obrazu kolem průsečnice O obou zrcadel.

Pro konstrukci převracejících soustav se používá zrcadel jen ve výjimečných



Obr. 11.1.3  
Pravoúhlý hranol nahrazující funkci rovinného zrcadla.

důležitých podmínek:

- úhel lomu procházejících paprsků na výstupní ploše má být roven úhlu dopadu paprsků na vstupní plochu hranolu,
- jednotlivé paprsky svažku rovnoběžných paprsků procházejícího hranolem musí mít stejnou optickou dráhu,
- hranol má být rovnocenný planparallelní desce, jejíž tloušťka se rovná dráze osvého paprsku svažku v hranolu.

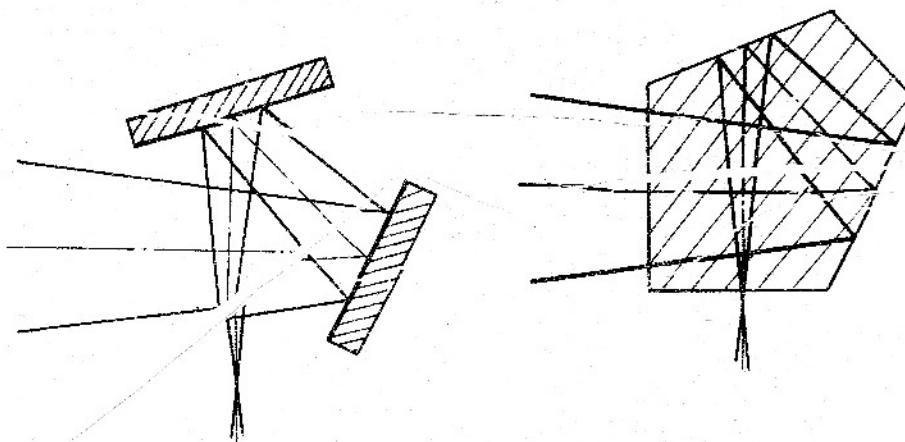
případech a ve většině případu jsou rovinná zrcadla nahrazena odraznými hranoly, které mají v porovnání se zrcadly řadu předností:

- mají větší odrazivost, protože se ve většině případu využívá u hranolu úplného odrazu,
- vylučují zdvojení obrazu, ke kterému dochází u rovinných zrcadel tvořených planparallelními deskami opatřenými kovovými odraznými plochami na zadní straně,
- tvoří stabilní soustavy zaručující neměnnost úhlu,
- umožňují snadnější spojení s mechanickými částmi přístroje.

Např. rovinné zrcadlo odchylující osu paprskového svažku o  $90^\circ$  je možno nahradit pravoúhlým hranolem s odraznou plochou totožnou s jeho přeponovou plochou, jak je to patrné z obr. 11.1.3.

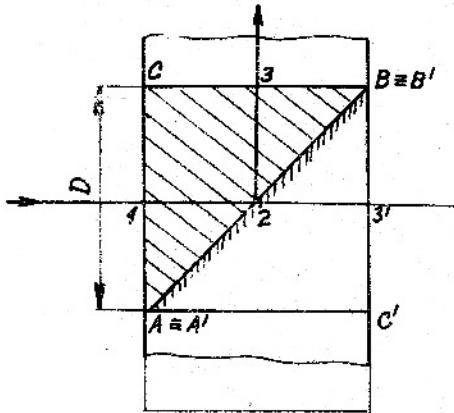
Podobně můžeme nahradit dvě rovinná zrcadla odchylující osu paprskového svažku o  $90^\circ$  pentagonálním hranolem, jak je to vidět na obr. 11.1.4.

Hranoly používané jako převracející soustavy musí být však konstruovány tak, aby splňovaly řadu

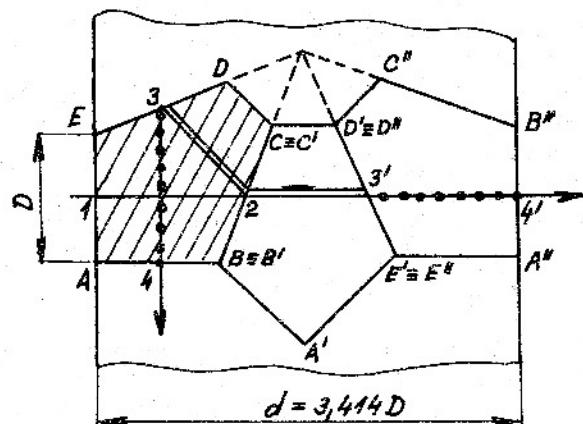


Obr. 11.1.4 Pentagonální hranol nahrazující funkci dvou rovinných zrcadel.

Že je možno každý odrazený hranol rozvinout v planparallelní desku, je vidět z několika následujících příkladů. Rozvinutí hranolu v planparallelní desku se provede tisk, že se hranol postupně zobrazí všemi jeho odraznými plochami.



Obr. 11.1.5  
Rozvinutí pravoúhlého hranolu v planparallelní desku.



Obr. 11.1.6  
Rozvinutí pentagon. hranolu v planparallelní desku.

V případě rozvinutí pravoúhlého hranolu se jedná o zobrazení hranolu v jeho jediné odražné přeponové ploše. Jak je vidět z obr. 11.1.5, je dráha osového paprsku 1-2-3 rovná tloušťce 1-2-3' planparallelní desky, neboť dráha 2-3 je rovna dráze 2-3'.

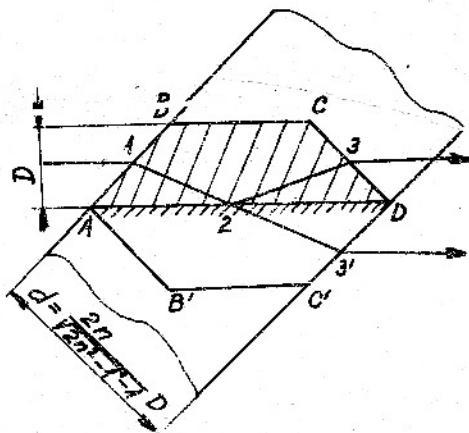
Při rozvíjení pentagonálního hranolu v planparallelní desku je nutné zobrazit hranol postupně dvakrát v jeho obou odražných plochách. Přitom je opět dráha osového paprsku 1-2-3-4 rovna tloušťce 1-2-3'-4' příslušné planparallelní desky, neboť dráhy 2-3 = 2-3' a 3-4 = 3'-4', jak je to vidět na obr. 11.1.6.

Konečně v posledním případě Wollastona hranolu se jedná o zobrazení hranolu pouze v jediné jeho odražné ploše.

Jak je vidět z obr. 11.1.7, je tento hranol ekvivalentní planparallelní desce, která je skloněna k dopadajícímu svazku pod úhlem  $45^\circ$ . V tomto případě je dráha osového paprsku 1-2-3 rovna dráze paprsku v desce 1-2-3', neboť dráha 2-3 je rovna dráze 2-3'.

V případě, že hranol není ekvivalentní planparallelní desce, tj. že deska, do které se hranol rozvine, má určitou klinovitost, projevuje se to na průchod paprskového svazku tím, že je odchylován od správného směru o určitou hodnotu, která zavádí do optických soustav určité chyby, které je nutno buď odstranit při justáži přístroje, nebo je tolerovat tak, aby se neprojevovaly škodlivě na funkci přístroje. Jak bude později ukázáno, je možno rozvinutím hranolu v planparallelní desku s určitou klinovitostí určit přípustné odchylky hranolu nebo kolmosti jeho funkčních ploch na společnou rovinu.

Jak již bylo uvedeno, je předností odražných hranolů, že lze u nich ve velké většině případů využít na odražných plochách úplného odrazu, čímž se podstatně zvýší odrezivost těchto ploch. Protože v některých případech dopadají jednotlivé paprsky svazku na odražnou plochu pod úhly, které jsou velmi blízké úhlu úplného odrazu, je nutno při konstrukci pečlivě sledovat úhel dopadu krajních paprsků svazku



Obr. 11.1.7 Rozvinutí Wollastono-va hranolu v desku.

na odreznou plochu. Úhel dopadu  $\xi$  musí splnovat podmíinku

$$\sin \xi \geq \sin \xi_0 = \frac{1}{n}, \quad (11.1.1)$$

kde  $n$  značí index lomu skla, ze kterého je zhotoven hranol s  $\xi_0$  úhel úplného odrazu. Pro usnědňní práce jsou v tab. 11.1.1 uvedeny hodnoty úhlu úplného odrazu  $\xi_0$  pro nejběžnější druhy skel používaných pro výrobu hranolů.

Tab. 11.1.1

Sklo	$n_d$	$\xi_0$
BK 7	1,51633	41,26°
BK 10	1,49782	41,89°
K 8	1,51276	41,38°
BaK 1	1,57250	39,49°
BaK 4	1,56883	39,50°

Jak je vidět z obr. 11.1.8, který znázorňuje průchod sbíhavého svažku pravoúhlým hranolem, jsou dopadové podmínky pro paprsek 1 v bodě A na odreznou ploše příznivější než podmínky pro paprsek 2 v bodě B. Může se tedy v některých případech snadno stát, že pro paprsek 2 nemusí být splněna podmínka úplného odrazu.

V důsledku toho pak část svažku částečně projde odraznou plochou. V praxi se to projeví tím, že příslušná část zorného pole nabude namodralého zbarvení. Nejdříve se totiž naruší podmínka úplného odrazu pro delší vlnové délky, pro které má sklo hranolu menší index lomu. To znamená, že z bílého světla, které prochází hranolem, nejdříve vymizí částečným průchodem odraznou plochou dlouhovlnné červené paprsky, takže zbytek se projeví komplementární zelenomodrou barvou.

Jak je patrné z tab. 11.1.1 jeví se z hlediska úplného odrazu jako nejvhodnější sklo BaK 1. V praxi se nejvíce používá sklo BK 7 a BaK 4.

Pro konstrukci převracejících soustav se používá velmi početná řada hranolů různých tvarů a vlastností. Přehled nejdůležitějších hranolů s označením jejich nejčastějšího použití je uveden

Obr. 11.1.8  
Průchod sbíhavého paprskového svažku pravoúhlým hranolem.

v příloze tohoto skripta. Některé praktické kombinace těchto hranolů jsou uvedeny v následujících příkladech.

Je možno říci, že existují dva odlišné způsoby konstrukce hranolových převracejících soustav. V prvním případě se opatrují odrazné hranoly střechami, čímž je možno jediným hranolem dosáhnout úplného otočení obrazu o  $180^\circ$ , takže takové hranoly zastávají funkci celé převracející soustavy. V druhém případě se kombinuje několik hranolů, jejichž vhodnou orientaci se opět dosáhne úplného otočení obrazu o  $180^\circ$  jako v předchozím případě.

Přitom v obou případech plní hranolová soustava ještě další úlohy, jako např. lomí optickou osu přístroje do jiného směru, umožnuje panoramování, zkracuje stavbaní délku přístroje apod.

Příkladem převracející soustavy prvního druhu je Schmidtův střechový hranol znázorněný na obr. 11.1.9. Jeho rozměry jsou uvedeny v příloze.

Příkladem druhého druhu převracejících soustav je tzv. Porrova soustava I. Skládá se ze dvou pravoúhlých hranolů (obr. 11.1.10) orientovaných proti sobě přeponovými plochami. Jeden otáčí obraz stranově a druhý výškově.

Dříve než přejdeme k dalším příkladům hranolových převracejících soustav, je třeba si připomenout zásadu, podle které se konstrukce těchto soustav provádí. Platí jednoduché pravidlo: Aby soustava hranolů výškově převracela obraz, je třeba kombinovat hranoly tak, aby celkový počet odrazených ploch kolmých na společnou svislou rovinu byl lichý. Má-li soustava současně otáčit obraz stranově, je nutno místo jedné z těchto odrazených ploch zečlenit do některého vhodného hranolu střechu.

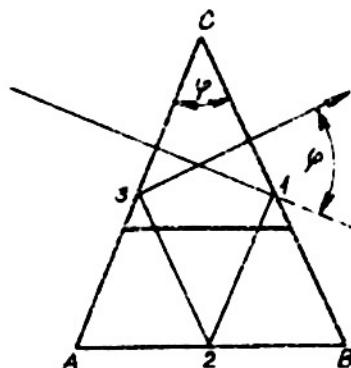
Aplikujme toto pravidlo na Schmidtův střechový hranol. Tento hranol má tři odrazené plochy  $\overline{AB}$ ,  $\overline{BC}$  a  $\overline{CA}$  kolmé na společnou svislou rovinu (rovinu nákresnou). Má tedy lichý počet odrazených ploch a proto výsledný obraz bude výškově převrácený. Plocha  $\overline{AB}$  je mimoto opatřena střechou, tské obraz je otocen i stranově. Hranol sám tedy pracuje jako převracející soustava. Přitom podstatně zkracuje stavební délku přístroje a odchyluje optickou osu od původního směru o úhel  $\varphi$ .

Porrovo převracející soustavu I. nutno si představit jako pravoúhlý hranol kombinovaný s roviným zrcadlem, jak je to naznačeno na obr. 11.1.11 (viz str. 78).

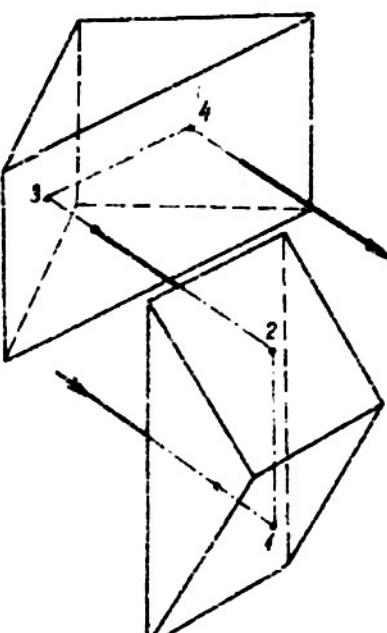
Potom má tato soustava 3 odrazené plochy kolmé na společnou svislou rovinu a proto výsledný obraz bude výškově převrácený. Nahradíme-li toto rovinné zrcadlo střechou, která je tvořena druhým pravoúhlým hranolem, bude soustava otáčet obraz i stranově a bude tedy tvořit úplnou převracející soustavu.

Všimněme si nyní delších nejužívanějších hranolových převracejících soustav. Na obr. 11.1.12 (viz str. 78) je znázorněna druhá Porrova soustava. Tato soustava se může snadno upravit tak, že umožňuje současně konstrukci periskopických dalekohledů, jak je to naznačeno na obr. 11.1.13 (viz str. 78).

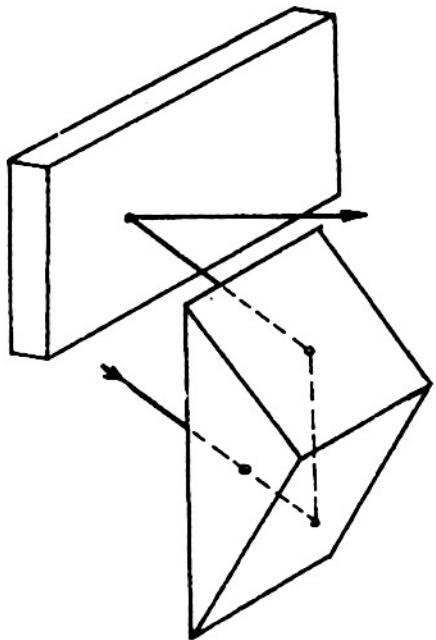
Pro dalekohledové soustavy, u nichž optická osa je tvořena nelomenou přímkou, je možno konstruovat převracející soustavu kombinací Schmidtova střechového hranolu s delším hranolem, jak je to vidět na obr. 11.1.14 (viz str. 78). Tato soustava má 5 odrazených ploch kolmých na společnou svislou rovinu a jednu střechu. Pro konstrukci periskopických dalekohledů je možno s výhodou použít soustavy hranolů tvořené kombinací pentagonálního hranolu s pravoúhlým střechovým hranolem, jak je to vyznačeno na obr. 11.1.15 (viz str. 78). Soustava má opět lichý počet (3) odrazených ploch kolmých na společnou svislou rovinu a jednu střechu.



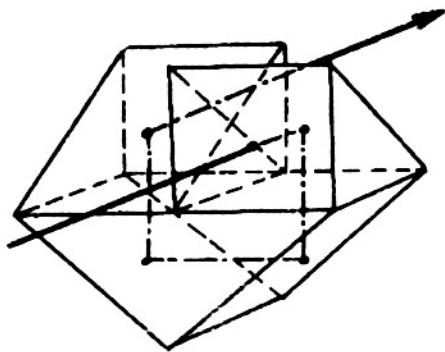
Obr. 11.1.9  
Schmidtův střechový hranol.



Obr. 11.1.10  
Porrova soustava I.



Obr. 11.1.11 K vysvětlení funkce I. Porrovy převracející soustavy.



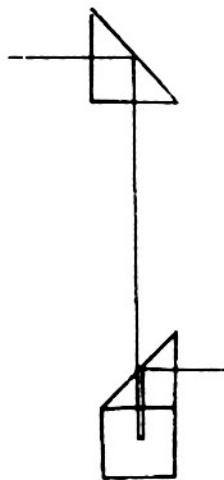
Obr. 11.1.12 Druhá Porrova hranolová převracející soustava.

U „panoramatických dalekohledů, u nichž je třeba vyrovnat „kácení“ obrazu vyvolané panoramováním, se začleňuje do optické soustavy Wollastonův vzpřímovací hranol a proto místo pentagonálního hranolu v předchozí soustavě se nyní vystačí s pravoúhlým hranolem. Jednu z ploch komých na svislou rovinu zastupuje nyní odrazená plocha Wollastonova hranolu (viz obr. 11.1.16 na str. 79). Tato soustava má lichý počet (3) odrazených ploch kolmých na společnou svislou rovinu a jednu střechu.

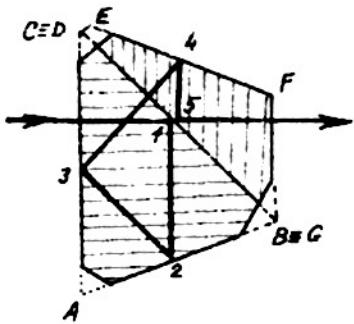
Konečně na obr. 11.1.17 je znázorněna další převracející soustava používaná u periskopických dalekohledů. Má opět 3 odrazené plochy kolmé na společnou svislou rovinu a jednu střechu. První dalekohled, v němž bylo použito hranolové převracející soustavy, zhotoval italský inženýr I. Porro v r. 1852. Protože výroba hranolů v polovině minulého století byla nedokonalá, tento dalekohled upadl v zapomnění až do r. 1893, kdy hranolové převracející soustavy byly znova oživeny E. Abbeem.

Všimněme si nyní ještě konstrukce a výpočtu hranolů. Cílem konstrukce a výpočtu hranolů je určení jejich úhlových a délkových rozměrů a stanovení správného tvaru s ohledem na odlehčení váhy, možnosti snazšího upevnění v mechanických částech přístroje a úpravy faset.

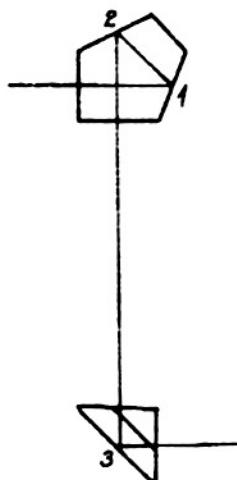
Rozměry hranolu je nutno volit tak, aby hranolem prošel celý průřez paprskového svazku vymezeného optickou soustavou dalekohledu nebo přístroje. V optické konstrukci se proto často



Obr. 11.1.13 Druhá Porrova převracející soustava upravená pro periskopické dalekohledy.



Obr. 11.1.14 Převracející soustava tvorená kombinací Schmidtova střechového hranolu a dalšího hranolu.



Obr. 11.1.15 Převracející soustava pro periskopické přístroje.

setkáváme s pojmem optického a mechanického průměru paprskového svazku (viz obr. 11.1.18). Optický nebo též volný průměr určuje čistý průměr paprskového svazku, který má být hranolem propuštěn. Mechanický průměr je větší než optický průměr a liší se od tohoto pouze v desetinách nebo v jednotkách milimetru. Rozdíl obou průměrů je závislý jednak na umístění hranolu v přístroji, na velikosti pohybu hranolu vyžedované justáží přístroje a konečně na velikosti jeho faset.

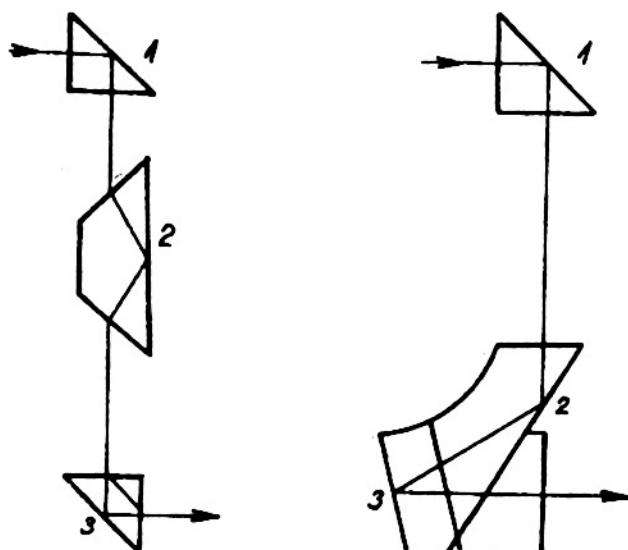
Pro vlastní konstrukci hranolu je důležitý mechanický průměr  $D_M$  paprskového svazku, který určíme pomocí optického průměru  $D_o$ . Průměr  $D_o$  stanovíme nejsnadněji graficky. Přitom postupujeme takto: Do optické soustavy příslušného dalekohledu nebo přístroje zakreslíme krajní paprsky, které omezují paprskový svazek procházející přístrojem. Předpokládejme např., že mezi objektiv a jeho obrazovou rovinu můžeme umístit pentagonální hranol (viz obr. 11.1.19).

Spojíme okrajové body oběžníky objektivu (koncové body jeho optického průměru) A a B s okrajovými body C a D clony zorného pole. Příslušné spojnice nám vymezí paprskový svazek, který musí hranolem projít.

Předpokládejme dále, že vstupní plocha hranolu má procházen bodem E na optické osě přístroje. Tímto bodem vedeme kolmici na optickou osu, která představuje v řezu vstupní plochu uvažovaného hranolu. Tato přímka nám protne paprskový svazek v bodech F a G, které vymezují optický průměr  $D_o$  paprskového svazku.

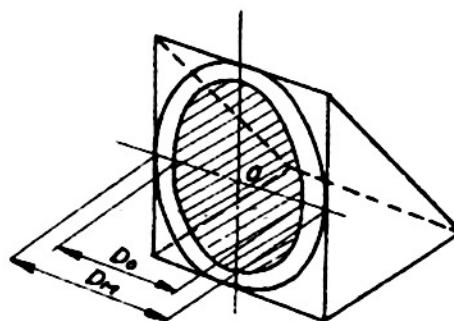
Zvětšíme-li tento průměr např. o 2 mm, dostaneme hledaný mechanický průměr  $D_M$ . Tedy

$$D_M = D_o + 2 \text{ mm}.$$

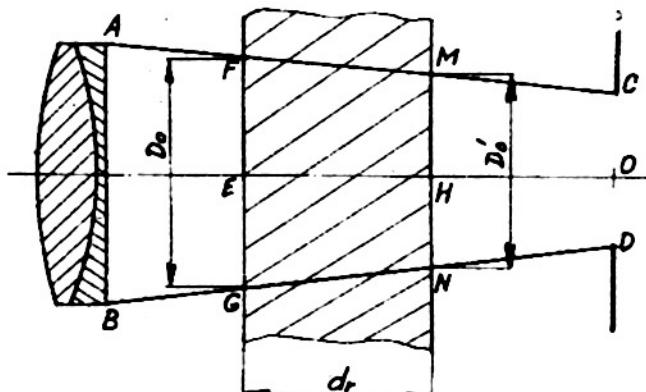


Obr. 11.1.16 Převracející hranolová soustava s kollastonovým vzpřímovacím hranolem.

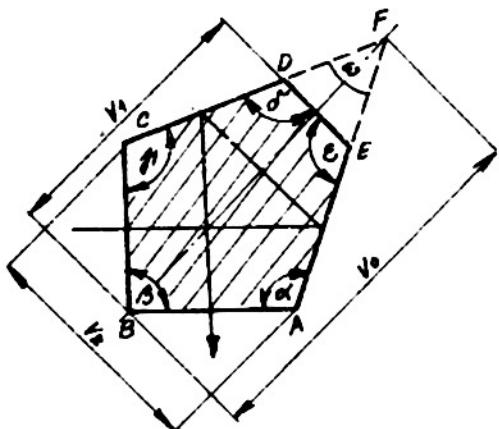
Obr. 11.1.17 Převracející hranolová soustava používaná u periskopických přístrojů.



Obr. 11.1.18 Mechanický a optický průměr svazku.



Obr. 11.1.19 K určení optického průměru svazku.



Obr. 11.1.20 K určení rozměrů pentagonálního hranolu.

2. Úhel při hraně F

Rozměry příslušného hranolu pak určíme snadno pomocí přílohy, kde jsou u každého jednotlivého hranolu uvedeny jeho rozměry vztahem na velikost vstupní nebo výstupní plochy, tj. na mechanický průměr  $D_M = 1$ . Takto upravené rozměry pak stačí násobit zjištěnou hodnotou mechanického průměru  $D_M$ .

Věmněme si našeho příkladu, který se týká konstrukce pentagonálního hranolu. Podle zmíněné přílohy jsou jeho rozměry dány vztahy s hodnotami (obr. 11.1.20):

#### a) Úhly

1. Úhly při hranách A,C,D a E

$$\alpha = \gamma = \delta = \epsilon = 112,5^\circ .$$

$$\omega = 45^\circ .$$

$$\beta = 90^\circ .$$

#### b) Délkové rozměry

Předpokládejme, že bylo graficky určeno  $D_0 = 28$  mm. Potom  $D_M = D_0 + 2 = 30$  mm.

Potom pro délky jednotlivých hran pentagonálního hranolu vychází:

1. Hrana  $\overline{AB} = \overline{BC} = D_M = 30$  mm
2. Hrana  $\overline{AE} = \overline{CD} = 1,082 \cdot D_M = 1,082 \cdot 30 = 32,46$  mm
3. Hrana  $\overline{AF} = \overline{CF} = 1,848 \cdot D_M = 1,848 \cdot 30 = 55,44$  mm
4. Hrana  $\overline{DE} = 0,586 \cdot D_M = 0,586 \cdot 30 = 17,58$  mm
5. Výška  $v_0 = 2,414 \cdot D_M = 2,414 \cdot 30 = 72,42$  mm
6. Výška  $v_1 = 1,707 \cdot D_M = 1,707 \cdot 30 = 51,21$  mm
7. Výška  $v_2 = 1,414 \cdot D_M = 1,414 \cdot 30 = 42,42$  mm.

Tím jsou veškeré konstrukční parametry pentagonálního hranolu určeny a je možno navrhnout konstrukci hranolu včetně příslušných faset.

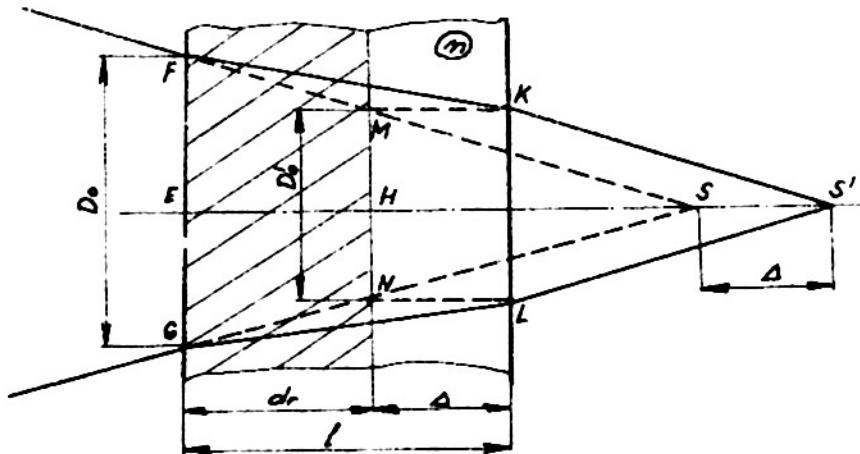
Má-li se takto určený hranol včlenit do příslušné optické soustavy, je nutno určit výpočtem nebo graficky průchod jednotlivých paprsků hranolem. Nejlépe se to provede graficky.

Při této grafické konstrukci vycházíme z následující úvahy: Jak již bylo uvedeno, je každý hranol ekvivalentní planparallelní desce, jejíž tloušťka je rovna dráze osového paprsku v hranolu. Uvažujme proto planparallelní desku o tloušťce  $d$  zhotovenou ze skla o indexu lomu  $n$ , kterou prochází sbíhavý paprskový svazek o vrcholu S (obr. 11.1.21 na str. 81).

Z geometrické optiky planparallelní desky je známo, že planparallelní deska posouvá (prodlužuje) obraz o hodnotu

$$\Delta = \overline{SS'} = \frac{n-1}{n} \cdot l \quad (11.1.2)$$

Je to způsobeno tím, že paprsky 1 resp. 2 na obr. 11.1.21 se lámou v bodech dopadu F resp. G na vstupní ploše desky ke kolmici dopadu do bodů K resp. L na výstupní ploše, kde se znova lámou do směru rovnoběžného s původním směrem dopadu. Body K a L vymezují na výstupní plátně průměr  $D'_0$  svazku vystupujícího z desky. Z obrázku je patrné, že tento průměr můžeme určit také jako průsek (body M a N) výstupní plochy, tzv. redukované desky o tloušťce  $d_p$  s původním sbíhavým svazkem o vrcholu S.



Obr. 11.1.21 K určení redukované tloušťky hranolu.

Určíme-li tloušťku  $d_r$  (zvanou redukovanou) této desky, můžeme snadno určit průměr  $D_o'$  vystupujícího svažku, aniž bychom museli konstruovat nebo početně sledovat průchod paprskového svažku plenparallelní deskou.

Z obrázku plyne jednoduše

$$d_r = \ell - \Delta = \ell - \frac{n-1}{n} \ell = \frac{\ell}{n} . \quad (11.1.3)$$

Pro usnadnění práce jsou proto v příloze uvedeny mezi délkovými rozměry u každého hranolu hodnoty dráhy  $\ell$  osového paprsku v hranolu. Dělíme-li tuto dráhu indexem lomu  $n$  skla, ze kterého bude zhotoven konstruovaný hranol, dostaneme hledanou hodnotu  $d_r$  redukované tloušťky.

V případě uvažovaného pentagonálního hranolu je dráha  $\ell$  osového paprsku v hranolu

$$\ell = 3,414 \cdot D_M = 3,414 \cdot 30 = 102,42 \text{ mm.}$$

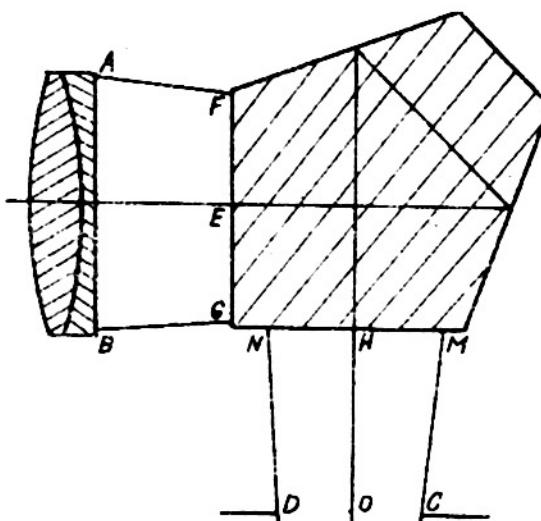
Volíme-li pro jeho výrobu sklo BK 7 o  $n = 1,5163$ , bude

$$d_r = \frac{\ell}{n} = \frac{102,42}{1,5163} = 67,7 \text{ mm.}$$

Vedeme-li bodem H na obr. 10.1.19 kolmici na optickou osu, protne nám pak teto kolmice paprsky AC resp. ED v bodech K a N, které vymezují průměr  $L_o'$  svažku vystupujícího z hranolu.

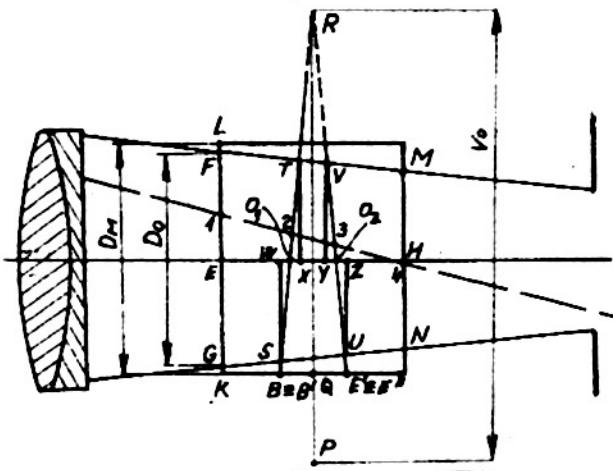
Potom stačí zakreslit do optické soustavy pentagonální hranol vypočítaných rozměrů tak, aby jeho vnitřní plocha splynula s přímkou FG. Na výstupní plochu se pak naváže paprskový chod EC, HG resp. ND, jak je to naznačeno na obr. 11.1.22.

Chceme-li současně zakreslit průchod jednotlivých paprsků svažku hranolem, je nutno určit body, ve kterých dopadají tyto paprsky na odrazové plochy hranolu. Přitom postupujeme takto: Roz-

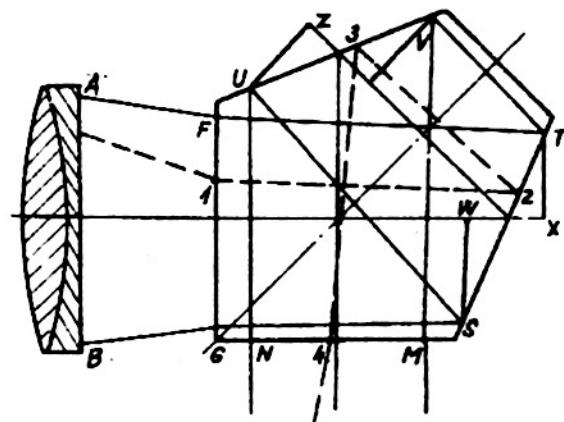


Obr. 11.1.22 K určení průchodu paprsků hranolem.

vineme hranol v planparallelní desku tak, jak je to naznačeno pro případ pentagonálního hranolu na obr. 11.1.6 a redukujeme rozměry  $\overline{AB}$ ,  $\overline{B'E'}$ ,  $\overline{E'A'}$  na  $\frac{\overline{AB}}{n}$ ,  $\frac{\overline{B'E'}}{n}$  a  $\frac{\overline{E'A'}}{n}$ . Nyní vyznačíme na vstupní ploše planparallelní desky koncové body L a K vstupní plochy pentagonálního hranolu a těmito body vedenem rovnoběžky s optickou osou, jak je to provedeno na obr. 11.1.23. Na jedné z obou rovnoběžek vyznačíme polohy bodů  $B \equiv B'$  a  $E' \equiv E''$  jako koncových bodů nalezených redukovaných úseček. V půlícím bodě Q úsečky  $\overline{B'E'}$  vztyčíme kolmici a naneseme na ni směrem dolu od bodu Q délku  $0,707 \cdot D_M = 0,707 \cdot 30 = 21,21$  mm, čímž dostaneme bod P. Od tohoto bodu vyneseme směrem nahoru úsečku  $v_0 = 2,414 \cdot D_M = 2,414 \cdot 30 = 72,42$  mm. S koncovým bodem R této úsečky spojíme body  $B \equiv B'$  a  $E' \equiv E''$  a dostaneme polohu odražných ploch v redukovaném tvaru. Body S, T, V a U, ve kterých protinají tyto plochy krajní paprsky svazku, značí body dopadu těchto paprsků na odražné plochy pentagonálního hranolu. Při konstrukci paprsků procházejících hranolem stačí přenášet kolmé vzdálenosti  $\overline{XT}$ ,  $\overline{WS}$ ,  $\overline{IV}$  a  $\overline{ZU}$  od optické osy, a jejich koncovými body vést rovnoběžky s optickou osou až tyto protornou odražné plochy pentagonálního hranolu v bodech T, S, V a U, jak je to provedeno na obr. 11.1.24.



Obr. 11.1.23 Ke konstrukci průchodu paprsku hranolem.



Obr. 11.1.24 Ke konstrukci průchodu paprsku hranolem.

Stejným způsobem můžeme graficky určit průchod libovolného paprsku, např. paprsku 1-2-3-4.

V případě, že je nutno určit rozměry hranolu umístěného v rozvíjivém paprskovém svezku, postupujeme poněkud odlišně a sice takto:

Předpokládejme, že vstupní plocha hranolu má být umístěna tak, aby protínala optickou osu v bodě E, jak je to naznačeno na obr. 11.1.25 (viz str. 63). V tomto případě rozhoduje o rozměrech hranolu průměr  $D_M$  paprskového svazku ne výstupní ploše hranolu. Tento průměr nelze určit graficky jako v předchozím případě. Postupujeme proto takto: Jak vyplývá z předchozího obrázku, můžeme psát

$$D_M^* = D_M + 2 d_r \cdot \operatorname{tg} \alpha ,$$

přičemž

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \alpha &= \frac{CD - AB}{2 \cdot \Delta} \\ d_r &= \frac{D_M^* \cdot K}{n} \end{aligned} \right\} \quad (11.1.4)$$

kde K značí číslo, kterým nutno násobit průměr  $D_M$ , abychom dostali dráhu  $\ell$  osového

paprsku v hranolu. Tato čísla jsou uvedena v příloze u každého hranolu. Např. pro pentagonální hranol je

$$\ell = 3,414 \cdot D_M$$

čili

$$K = 3,414,$$

nebo pro pravouhlý hranol je

$$\ell = D_M,$$

takže

$$K = 1$$

spod. pro další hranoly.

Dosadíme-li tyto hodnoty do vztahu pro  $D'_M$ , můžeme psát dále

$$D'_M = D_M + \frac{CD - AB}{\Delta} \cdot \frac{D_M \cdot K}{n} .$$

Odtud pak

$$D'_M = D_M \cdot \frac{1}{1 - \frac{(CD - AB) K}{\Delta \cdot n}} . \quad (11.1.5)$$

Tím jame určili  $D'_M$  a můžeme již snadno stanovit  $d_r$ , takže ostatní část určení rozměrů hranolu s průchodu paprsků hranolem provedeme stejným způsobem jako v předchozím případě.

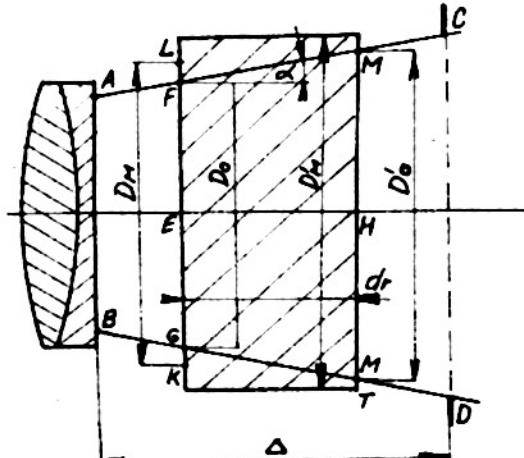
Příklad: Určeme rozměry pravouhlého hranolu, který má být umístěn v rozbitém paprakovém svazku tak, aby vstupní plocha procházela bodem A ležícím na optické osě ve vzdálenosti 30 mm od objektivu, jak je to vidět na obr. 11.1.26. Přitom nechť je  $AB = 30$ ,  $ED = 60$ ,  $\Delta = 100$  a index lomu skla, ze kterého má být hranol zhotoven  $n = 1,5$ . Celou situaci opět znázorníme graficky. Z nákresu zjistíme, že  $D_o = 40$  mm. Pro  $D_M$  pak vychází  $D_M = D_o + 2 = 42$  mm. Dosazením do vztahu (11.1.5) pro  $D'_M$  vychází

$$D'_M = 42 \cdot \frac{1}{1 - \frac{(60-30)}{100 \cdot 1,5}} = \frac{42}{1 - 0,2} = \\ = \frac{42}{0,8} = 52,5 \text{ mm.}$$

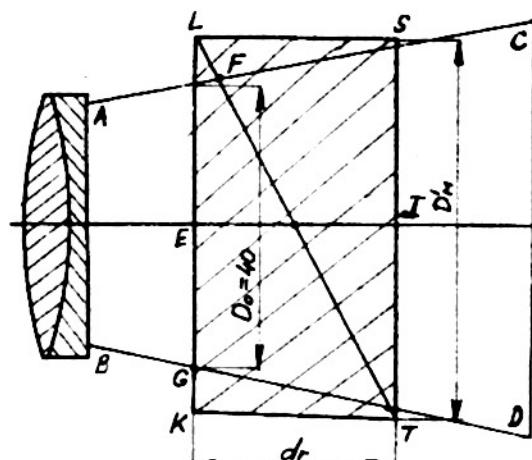
Protože u pravouhlého hranolu je dráha  $\ell$  ve skle rovna  $D'_M = 52,5$  mm, vychází pro  $d_r$  hodnota  $d_r = \frac{52,5}{1,5} = 35,0$  mm.

Naneseme-li tuto délku na optickou osu od bodu E dostaneme bod I, kterým bude procházet výstupní plocha, která bude nyní rozhodovat o velikosti hranolu. Od bodu I vyneseme na obě strany příslušnou kolmici délky  $\frac{D'_M}{2} = \frac{26,25}{2} = 26,25$  mm a dostaneme koncové body S a T, které omezují výstupní plochu hranolu.

Spojíme-li body L a T, dostaneme polohu odrezné plochy hranolu v jeho redukovane formě, která nám umožní grafické sledování paprsků hranolem, které provedeme obdobným způsobem jako v předchozím případě pentagonálního hranolu.



Obr. 11.1.25 K určení rozměrů hranolu v případě, že je umístěn v rozbitém paprakovém chodu.



Obr. 11.1.26 Určení rozměrů pravouhlého hranolu v rozbitém paprakovém svazku.

Podrobnější informace o konstrukci hranolu najde čtenář v publikacích<sup>x)</sup>.

Nyní zbyvá se ještě zmínit o určení přípustných odchylek funkčních úhlů hranolu a kolmosti funkčních ploch hranolu vzhledem k jeho rovině hlavního řezu.

Je známo, že hranoly, jejichž funkční úhly nesouhlasí přesně s předepsanými hodnotami, odchylují paprsky v rovině hlavního řezu od správného směru. Říkáme, že hranol způsobuje úhlovou odchylku. Tato odchylka se dá odstranit při seřizování přístroje natočením hranolu v rovině hlavního řezu.

Zdálo by se tedy, že při výrobě nezáleží na dodržení funkčních úhlů hranolů. Ukážeme, že není možno funkční úhly vyrobit s libovolnými odchylkami a že je nutno stanovit přípustné odchylky těchto funkčních úhlů. Přitom vycházíme z následující úvahy:

Odchylují-li se úhly hranolu od předepsaných hodnot, pak nelze hranol nahradit planparallelní deskou, nýbrž pouze klínem o určitém lámavém úhlu  $\varphi$ , jehož lámavá hrana je kolmá na rovinu hlavního řezu. Pokud tato klinovitost je malá, není na závadu funkce přístroje. Přestož i-li však určitou hodnotu, projeví se to rozkladním účinkem hranolu, tj. zabarvením obrazu. Je proto nutno přípustnou klinovitost ekvivalentní desky vhodným způsobem tolerovat. Přitom postupujeme takto:  
Klín o lámavém úhlu  $\varphi$  vyvolá odchylku

$$\delta = (n - 1) \cdot \varphi . \quad (11.1.6)$$

Diferencujeme-li tento vztah podle  $n$ , dostaneme

$$d\delta = dn \cdot \varphi . \quad (11.1.7)$$

Avšak

$$dn = n_p - n_c = \frac{n_p - 1}{\nu} ; \quad (11.1.8)$$

kde  $\nu$  značí Abbeovo číslo.

Dosadíme-li do předchozího vztahu, dostaneme

$$d\delta = \frac{n_p - 1}{\nu} \cdot \varphi . \quad (11.1.9)$$

Úhel  $d\delta$  značí tedy úhel paprskového vějíře, do kterého je rozloženo světlo uvažovaným klínem.

Tento barevný vějíř nebude okem postřehnutelný, pokud  $d\delta$  bude pod rozlišovací mezi lidského oka, tj. pokud bude

$$d\delta \leq 30 - 60^{\circ} . \quad (11.1.10)$$

Za tohoto předpokladu pak vyplývá z předchozího vztahu, že přípustná klinovitost

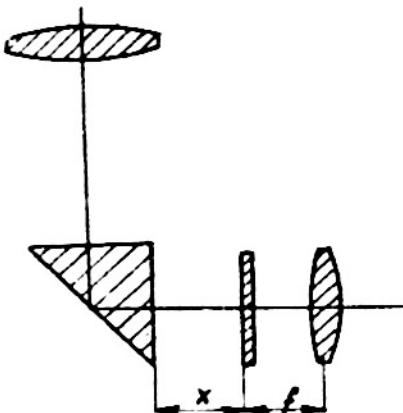
$$\varphi \leq \frac{30 \cdot \nu}{n_p - 1} . \quad (11.1.11)$$

Bude-li hranol umístěn před dalekohledem o zvětšení  $\Gamma$ , bude přípustná klinovitost ekvivalentní desky

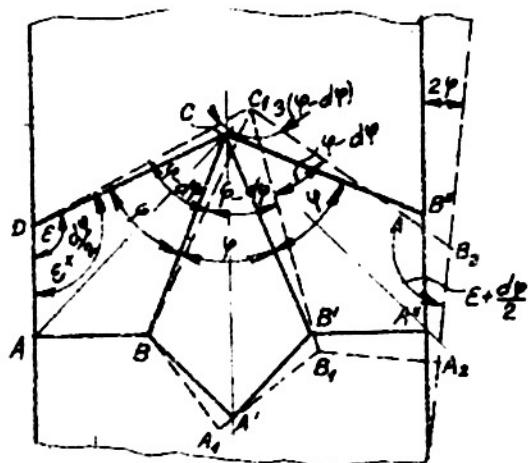
$$\varphi \leq \frac{30 \cdot \nu}{\Gamma \cdot (n_p - 1)} . \quad (11.1.12)$$

Bude-li hranol umístěn uvnitř dalekohledu a bude-li  $x$  značit vzdálenost jeho vý-

- x) 1. Ong Klabežná, časopis Jemná mechanika a optika 1961 - 1962.  
2. Optika pricelov bombometanijs i vozdušnoi strelby.  
3. M.M. Rusinov "Gabaritnyje reshety optičeskikh sistem", 1959.  
4. I.C. Gardner "Application of the algebraic aberration equations to the optical design", 1927.



Obr. 11.1.27 K určení vlivu hranolu na rozklad světla v případě, že leží uvnitř soustavy.



Obr. 11.1.28 K rozdělení přípustné klínovitosti na jednotlivé funkční úhly pentagonálního hranolu.

stupní plochy od obrazové roviny, jak je to naznačeno na obr. 11.1.27, bude přípustná klínovitost ekvivalentní desky dána vztahem

$$\varphi = \frac{30 \cdot \gamma}{x(n_D - 1)} \cdot f' , \quad (11.1.13)$$

kde  $f'$  značí ohniskovou vzdálenost okuláru.

Příklad: Určeme přípustnou klínovitost ekvivalentní desky příslušné k pentagonálnímu hranolu, který má být umístěn před objektivem dalekohledu o zvětšení  $\Gamma = 5x$ , je-li index lomu  $n$ , ze kterého je hranol zhotoven  $1,5163$  a  $\gamma = 64$ .

Podle vztahu (11.1.12) plyne

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{30 \cdot 64}{6 \cdot (1,5163 - 1)} = \\ &= \frac{1920}{3,0978} = 640^\circ = 10,7' \approx 11'. \end{aligned}$$

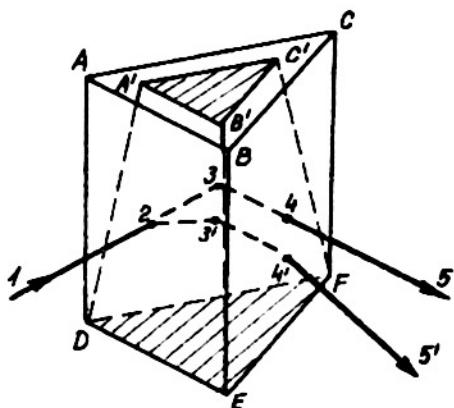
Nalezená hodnota  $\varphi = 11'$  se musí rozdělit na jednotlivé funkční úhly pentagonálního hranolu. Podle obr. 11.1.28 plyne, že odchylka  $d\varphi$  na úhlu  $\varphi = 45^\circ$ , který spolu svírají odrazené plochy pentagonálního hranolu, vyvolá sama klínovitost ekvivalentní desky v hodnotě  $2 d\varphi$ . Zůstane-li totiž úhel  $\omega$  při hrani A přesně  $90^\circ$  a změní-li se pouze úhel  $\varphi$  tak, že se např. zmenší o hodnotu  $d\varphi$ , zvětší se úhly při hraniach B a D o  $\frac{d\varphi}{2}$ . To znamená, že plocha DC se otočí kolem hrany D o úhel  $\frac{d\varphi}{2}$  proti směru, plocha C1B2 se současně otočí kolem hrany C1 o úhel  $3 d\varphi$  ve směru a konečně plocha A2B2 se otočí kolem hrany B2 o úhel  $\frac{d\varphi}{2}$  proti směru pohybu hodinových ručiček. Jinak řečeno, plocha A2B2 se otočí kolem hrany B2 celkem o úhel  $3\varphi - 2 \cdot \frac{d\varphi}{2} = 2 d\varphi$ .

Změní-li se současně úhel  $\omega = 90^\circ$  tak, že se např. zvětší o hodnotu  $d\omega$ , úhly E při hraniach B a D se zmenší o hodnotu  $\frac{d\omega}{2}$ , takže plocha A2B2 se ještě otočí kolem hrany B2 o úhel  $d\omega$  ve směru pohybu hodinových ručiček. To znamená, že plocha A2B2 se pootočí kolem hrany B2 celkem o úhel  $2 d\varphi + d\omega$ .

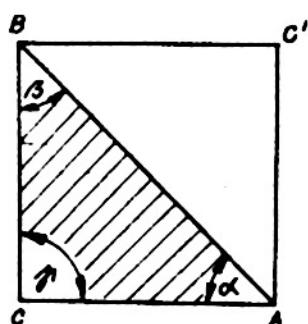
Tato hodnota nesmí překročit přípustnou hodnotu klínovitosti ekvivalentní desky, tj.

$$2 d\varphi + d\omega \leq 11' .$$

Na hodnotě  $d\varphi$  závisí celková odchylka paprskového svažku procházejícího pentagonálním hranolem, která je rovna dvojnásobné hodnotě úhlu, který spolu svírají



Obr. 11.1.29 K vysvětlení pyramidální chyby hranolem.



Obr. 11.1.30 K určení pyramidální chyby pravoúhlého hranolu.

odražné plochy hranolu. Tato odchylka bývá tolerována obvykle pouze v hodnotách několika málo úhlových vteřin. To znamená, že např.  $2d\varphi \leq 5$  až  $10^\circ$ . Z tohoto vyplývá, že je možno přípustnou klínovitost prakticky celou vyčerpat na úhel  $\omega = 90^\circ$ , takže je možno volit  $d\omega \leq 10^\circ$ .

V našem případě je nutno tolerovat úhel  $\varphi \pm 5^\circ$  a úhel  $\omega \pm 10^\circ$ .

Neznačme nyní ještě způsob, kterým určujeme přípustnou odchylku v pyramidálnosti hranolu. Hranol má pyramidální chybu, když jeho funkční plochy nejsou kolmé na společnou boční stěnu. Projeví se to tím, že paprsek neprobíhá hranolem v jeho hlavní rovině, tj. po dráze 1, 2, 3, 4 a 5, nýbrž z ní vybočí na dráhu 2, 3', 4' a 5' tak, že po výstupu z hranolu svírá s ní úhel  $\text{H}$ , jak je to naznačeno na obr. 11.1.29. Rozvineme-li hranol v desku, projeví se to tím, že hranol bude ekvivalentní klínu o určitém lámavém úhlu  $\varphi$ , přičemž jeho lámavá hrana je rovnoběžná s rovinou hlavního řezu. Velikost lámavého úhlu je závislá na geometrickém tvaru příslušného hranolu a musí se proto určit zvláště pro každý typ hranolu.

Neznačme proto postup při určení úhlu  $\varphi$  alespoň pro dva případy a sice pro pravoúhlý a pentagonální hranol.

Uvažujme proto pravoúhlý hranol (obr. 11.1.30) ABC a předpokládejme, že jeho stěny  $\overline{AC}$  resp.  $\overline{BC}$  jsou kolmé na základnu ABC, zatím co přeponová stěna  $\overline{AB}$  je odchýlena od správné polohy o úhel  $\omega$ .

Rozvineme-li tento hranol v desku, pak její výstupní stěna  $\overline{AC'}$  bude svírat s rovinou základny ABC úhel  $2\omega$ .  $\cos \alpha$ , značí-li  $\alpha$  úhel při hraně A. To znamená, že lámavý úhel této desky bude

$$\varphi = \frac{2\omega}{\sqrt{2}} = 1,4\omega.$$

Připusťme nyní, že také stěny  $\overline{AC}$  a  $\overline{BC}$  jsou skloneny k základné ABC o úhyly  $\omega$ . Potom úhel klínu se zvětší o hodnotu  $2\omega$ , takže můžeme psát

$$\varphi = 1,4\omega + 2\omega = 3,4\omega.$$

Pro odchylku  $\text{H}$  paprsku do roviny hlavního řezu pak plyne

$$\text{H} = (n - 1)\varphi = (n - 1)3,4\omega.$$

Pro  $n = 1,5$  pak vychází

$$\text{H} = 1,7\omega.$$

Je vidět, že odchylka  $\text{H}$  je o 70 % větší než přípustná tolerance na kolmost bočních stěn pravoúhlého hranolu.

V případě, že se pravoúhlý hranol v přístroji otáčí kolem osy kolmé na jeho rovinu hlavního řezu, pak paprskové svažky procházejí ekvivalentním klínem šikmo vzhledem k jeho rovině hlavního řezu. To znamená, že při natáčení hranolu o úhel  $\omega$  se bude lámavý úhel ekvivalentního klínu zvětšovat podle vztahu

$$\varphi = \frac{\varphi_0}{\cos \alpha},$$

kde  $\varphi_0$  značí úhel klínu v hlavním řezu, přičemž pro úhel  $\omega'$  platí podle zákona lomu

$$\sin \omega' = \frac{\sin \alpha}{n} .$$

Dosadíme-li odtud do předchozího vztahu, dostaneme

$$\varphi = \frac{n \cdot \varphi_0}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha}} . \quad (11.1.14)$$

Pro  $n = 1,5$  a  $\alpha = 30^\circ$  odtud vychází

$$\varphi = \frac{1,5 \cdot \varphi_0}{\sqrt{2,25 - 0,25}} = \frac{1,5}{1,4} \varphi_0 = 1,07 \varphi_0 .$$

Pro úhel  $\omega = 45^\circ$  plyne obdobně

$$\varphi = \frac{1,5 \cdot \varphi_0}{\sqrt{2,25 - 0,5}} = \frac{1,5}{1,32} \varphi_0 = 1,14 \varphi_0 .$$

Je vidět, že při natočení pravoúhlého hranolu o úhel  $\omega = 30^\circ$  resp.  $\alpha = 45^\circ$  se zvětší úhel ekvivalentního klínu o 7 resp. 14 %.

Tolerujeme-li u těchto hranolů pyramidální chybu  $(H)$  v rozsahu do 2 - 3 minut, mění se úhel  $(H)$  rovněž do 14 %, tj. o hodnotu 0,3 - 0,4 minuty. U dělostřeleckých dalekohledů se např. tolerují odchylky v měření horizontálních úhlů do 1,5 minuty. Z toho je vidět, že změna odchylky  $(H)$  v závislosti na úhlu  $\omega$  si vyžádá prakticky 1/3 této celkové přípustné chyby.

Všimněme si ještě pentagonálního hranolu. Předpokládejme obdobně jako v případě pravoúhlého hranolu, že jeho odrazné plochy jsou odchýleny o úhel  $\omega$ , zatím co vstupní s výstupní plochy jsou kolmé na základnu ABCDE.

Rozvineme-li tento hranol v desku (obr. 11.1.31), bude základna  $A'B'C'D'E'$  resp.  $A''B''C''D''E''$  svíret se základnou úhel  $2\omega$  resp.  $4\omega$ . To znamená, že výstupní plocha  $\overline{A''B''}$  se otočí o úhel

$$4\omega \cdot \cos 22,5^\circ = 4 \cdot 0,9 \cdot \omega = 3,6\omega .$$

Předpokládejme nyní, že jsou odchýleny o úhel  $\omega$  od správné polohy i vstupní a výstupní plochy hranolu. Potom lámový úhel ekvivalentního klínu bude

$$\varphi = 3,6\omega + 2\omega = 5,6\omega .$$

Pro pyramidální chybu pak plyne

$$(H) = (n-1)\varphi = 0,5 \cdot 5,6 \cdot \omega = 2,8\omega .$$

Tolerujeme-li celkovou odchylku  $(H)$  do 5%, vychází pro odchylku stěn hranolu od kolmosti

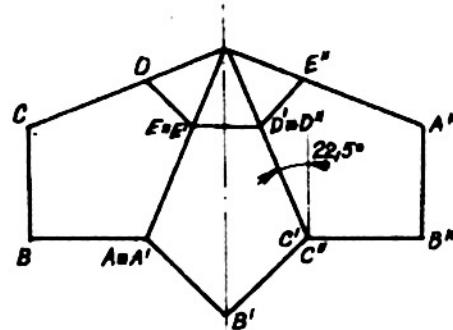
$$\omega = \frac{(H)}{2,8} = \frac{5}{2,8} = 2^\circ .$$

## 11.2. Čočkové převracející soustavy

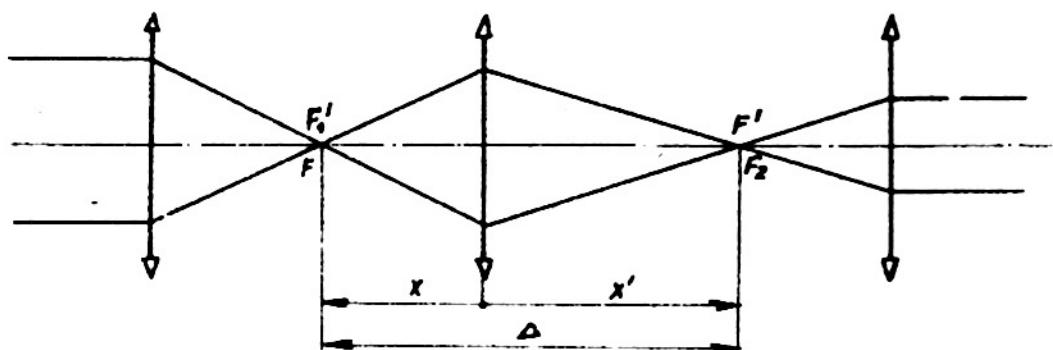
### I. Převracející soustava s jedním členem

K převrácení obrazu je možno použít mimo hranolů též optických čočkových soustav. V principu stačí pro tento účel jediný člen (čočka), který přenáší obraz vytvořený objektivem do předmětové ohniskové roviny okuláru, jak je to naznačeno na obr. 11.2.1 (viz str. 88). Přitom se prodlouží stavební délka dalekohledu o hodnotu

$$\Delta = x' - x \quad (11.2.1)$$



Obr. 11.1.31 K určení pyramidální chyby pentagonálního hranolu.



Obr. 11.2.1 Převracející soustava s jedním členem.

s současně zvětší obraz v měřítku

$$m = \frac{x'}{x} . \quad (11.2.2)$$

Pro celkové zvětšení dalekohledu pak vychází

$$\frac{f'_1}{f'_2} \cdot m . \quad (11.2.3)$$

Prodloužení  $\Delta$  stavební délky dalekohledu bude minimální, bude-li  $\frac{d\Delta}{dx} = 0$ . Dosaďme-li z (11.2.1) do zobrazovací rovnice vztahené na hlavní body převracející soustavy

$$\frac{1}{x'} - \frac{1}{x} = \frac{1}{f'_1} ,$$

můžeme psát

$$\Delta = \frac{x f'_1}{x + f'_1} - x .$$

Diferencováním tohoto vztahu dostáváme

$$\frac{d\Delta}{dx} = \frac{(x + f'_1) \cdot f'_1 - x f'_1}{(x + f'_1)^2} - 1 = - \frac{x^2 + 2x f'_1}{(x + f'_1)^2} .$$

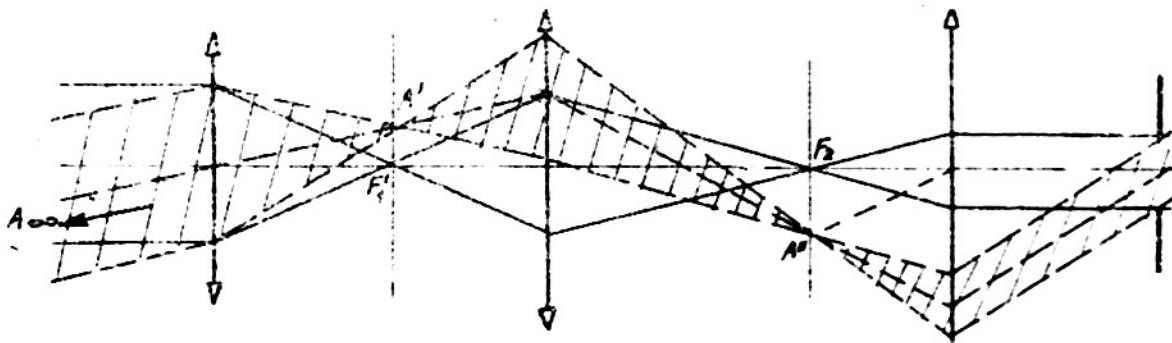
Z podmínky  $\frac{d\Delta}{dx} = 0$  pak plyne

$$\begin{aligned} x &= -2 f'_1 \\ x' &= 2 f'_1 \end{aligned} \quad (11.2.4)$$

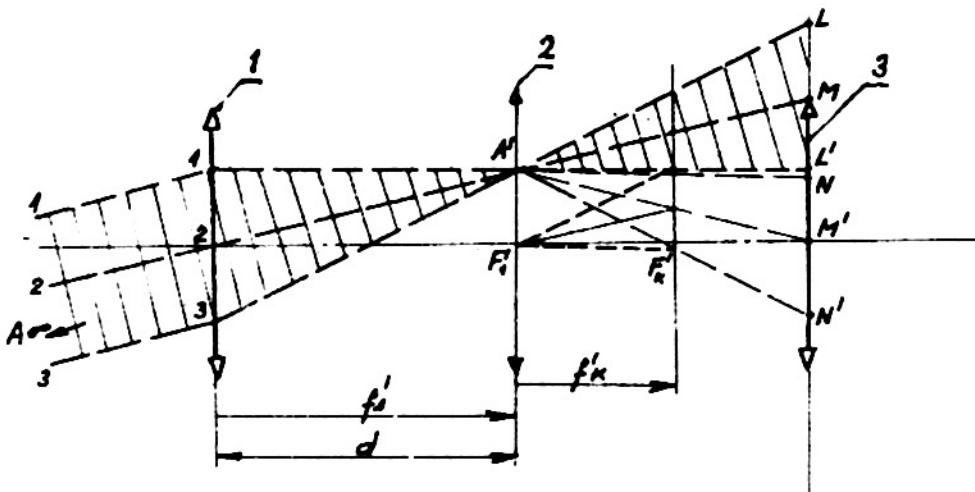
takže

$$m = -1 .$$

Je tedy vidět, že dalekohled nabude nejkratší stavební délky při zvětšení převracející soustavy  $m = -1$ . Jak je vidět z obr. 11.2.2, na kterém je vyznačen průchod



Obr. 11.2.2 Průchod paprskových svazků dalekohledem.



Obr. 11.2.3 K vysvětlení funkce kolektivu.

peprskových svazků vycházejících z osového (plně vytažené peprsky) a z okrajového bodu zorného pole (čárkováné peprsky), musí být průměr převracející soustavy a často i průměr okuláru volen značně veliký, aby dalekohledem prošel celý svazek vycházející z okrajových bodů zorného pole.

Aby se zmenšil průměr převracející soustavy, případně okuláru, umisťuje se v rovině obrazu vytvořeného objektivem nebo v předmětové ohnískové rovině okuláru nebo jejich blízkosti tzv. kolektiv. Vážmeme si proto blíže jeho funkce. Nechť na obr. 11.2.3 značí (1) objektiv, (2) kolektiv a (3) převracející soustavu. Umístíme-li v ohnískové rovině objektivu kolektiv o ohnískové vzdálenosti  $f_k'$ , pak vznikne nová optická soustava objektiv-kolektiv, pro jejíž ohnískovou vzdálenost  $f'^*$  platí

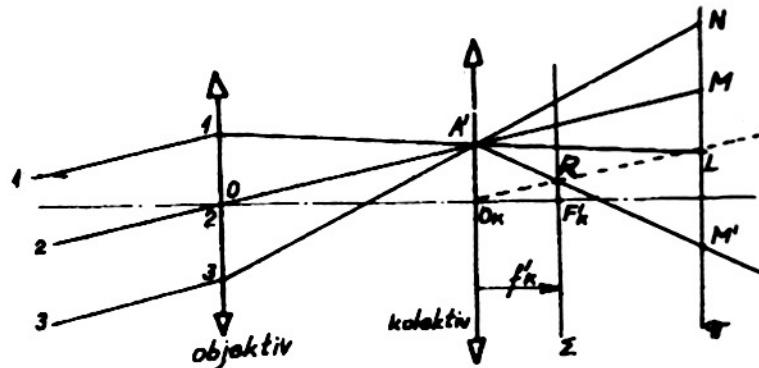
$$f'^* = \frac{f_1' \cdot f_k'}{f_1' + f_k' - d} = f_1' ,$$

neboť v tomto případě, je-li  $f_1' = d$ .

To znamená, že soustava objektiv-kolektiv má stejnou ohnískovou vzdálenost jako samostatný objektiv. Z toho důvodu nemá kolektiv vliv na polohu obrazu, nýbrž pouze odchyluje šikmé peprskové svazky do vhodného směru, jak je vidět z předchozího obrázku. Kdyby nebyl v dalekohledové soustavě začleněn kolektiv, protínaly by peprsky II, ZZ resp. JJ rovinu převracející soustavy v bodech L, M resp. N. Kolektiv odchylí peprskový svazek tak, že uvedené peprsky budou protinat rovinu převracející soustavy v bodech L', M', resp. N'.

Při návrhu nebo volbě kolektivu je nutno určit jeho ohnískovou vzdálenost tak, aby daný peprsek odchylil do nového přesně určeného směru. Tento problém se nejrychleji řeší s dostatečnou přesností graficky. Uvažujme proto na obr. 11.2.4 (viz str. 90) objektiv, kterým prochází šikmy svazek rovnoběžných peprsků sbíhajících se po průchodu objektivem v bodě A' ležícím v jeho ohnískové rovině. Nechť peprsky II, ZZ resp. JJ protinou rovinu JJJ v bodech L, M resp. N. Volme ohnískovou vzdálenost kolektivu  $f_k'$  tak, aby např. peprsek  $\overline{AM}$  se lomil po průchodu kolektivem do směru  $\overline{A'M'}$ .

Ohnískovou vzdálenost  $f_k'$  kolektivu pak určíme takto: Středem kolektivu O<sub>K</sub> vedeme přímku  $\overline{OK}$  rovnoběžně s peprskem  $\overline{AM}$ . Nechť bod R značí průsečík této rovnoběžky s novým směrem peprsku  $\overline{A'M'}$ . Potom rovina JJJ procházející bodem R kolmo na optickou osu je ohnískovou rovinou řešeného kolektivu.



Obr. 11.2.4 K určení ohniskové vzdálenosti kolektivu.

#### Poznámka 1.

Je-li kolektiv umístěn přímo v obrazové rovině objektivu nebo předmětové rovině okuláru, pak prach nebo nečistoty usazené na jeho plochách jsou zobrazovány do zorného pole dalekohledu, což působí rušivě a neesteticky. Proto se často umísťuje kolektiv pouze v blízkosti uvedených rovin. Potom je ovšem nutno počítat s tím, že soustava objektiv-kolektiv nemá ohniskovou vzdálenost  $f'$  rovnou ohniskové vzdálenosti  $f_k$  samotného objektivu a že proto takto umístěný kolektiv má vliv i na polohu obrazu v dalekohledové soustavě.

#### Poznámka 2.

Je-li nutné umístit současné s kolektivem v obrazové rovině objektivu zámernou osnovu, pak lze volit pro kolektiv plankonvexní čočku tak, aby na její rovinné ploše bylo možno umístit tuto zámernou osnovu.

#### Poznámka 3.

Přesto, že se jako kolektivu užívá jednoduchých čoček, pak tyto čočky, pokud jsou umístěny v obrazových rovinách, nezavádí otvorovou vadu, komu nebo astigmatismus, nýbrž mají v určité míře vliv na zklenutí pole a zkreslení.

Při návrhu dalekohledu není možné volit jeho příčné rozměry, tj. průměry jeho čoček, libovolně velké, neboť tyto rozměry bývají omezeny jinými požadavky kladenými na přístroj. Proto nelze ani s použitím kolektivu zajistit, aby dalekohledem procházely z okrajových bodů zorného pole paprskové svazky o stejném průměru, jako mají svazky vycházející ze středu zorného pole. To má za následek úbytek světla ke kraji zorného pole. Na základě praktických zkušeností je možno říci, že je možno snížit průměr okrajových svazků bez obav na 50 %. V případě dalekohledových soustav o dlouhé stavbě, jak je tomu např. u ponorkových periskopů apod., se snižuje tento průměr ještě více. Jak uvidíme dále, na šířce okrajového paprskového svazku závisí poloha vstupní pupilu převracející soustavy.

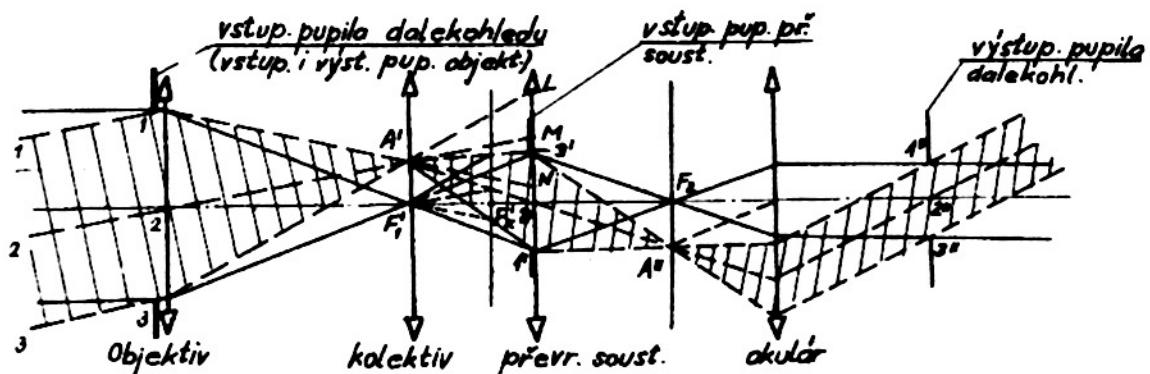
Uvažujme proto nejdříve případ, kdy dalekohledovou soustavou prochází i z okrajů zorného pole svazek paprsků o stejném průměru (šířce) jako ze středu zorného pole.

Z obr. 11.2.5 (viz str. 91) je zřejmé, že v tomto případě splývá vstupní pupil dalekohledu se vstupní pupilou jeho objektivu (která je totičná s jeho výstupní pupilou). Kolektiv pak zobrazuje výstupní pupil objektivu do objímky čočky tvořící převracející soustavu, která je jeho vstupní pupilou, neboť skutečné body 1', 2' a 3' jsou obrazy bodů 1, 2 a 3.

Okulár pak zobrazí výstupní pupilu převracející soustavy do výstupní pupily dalekohledu. Body  $1''$ ,  $2''$  a  $3''$  jsou obrazy bodů  $1'$ ,  $2'$  a  $3'$  vytvořenými okulárem.

Jak je vidět z obr. 11.2.5, vychází průměr okuláru větší než průměr objektivu. Jeho zmenšení je možno dosáhnout dvojím způsobem:

1. začleněním dalšího kolektivu do předmětové ohniskové roviny okuláru,
2. omezením šířky paprskového svazku přicházejícího z okraje zorného pole.



Obr. 11.2.5 Průchod paprsků dalekohledovou soustavou s využitím kolektivu v ohniskové rovině objektivu.

Všimněme si nejdříve prvního případu. Z obr. 11.2.6 (viz str. 92) je vidět porovnáním s obr. 11.2.5, že začleněním dalšího kolektivu do předmětové ohniskové roviny okuláru se zmenší průměr okuláru, ale současně se výstupní pupila dalekohledu přiblíží k okuláru, což bývá často nežádoucí.

V druhém případě, znázorněném na obr. 11.2.7 (viz str. 92), stačí zařadit do roviny JI clonu, která odcloní dolní polovinu paprskového svazku přicházejícího z okraje zorného pole. Přitom se počine vstupní pupila dalekohledu před jeho objektiv a výstupní pupila dalekohledu se přiblíží k okuláru. Polohu clony nutno volit tak, aby odclonila okrajové paprskové svazky, avšak aby nezasáhla do svazků přicházejících ze středu zorného pole.

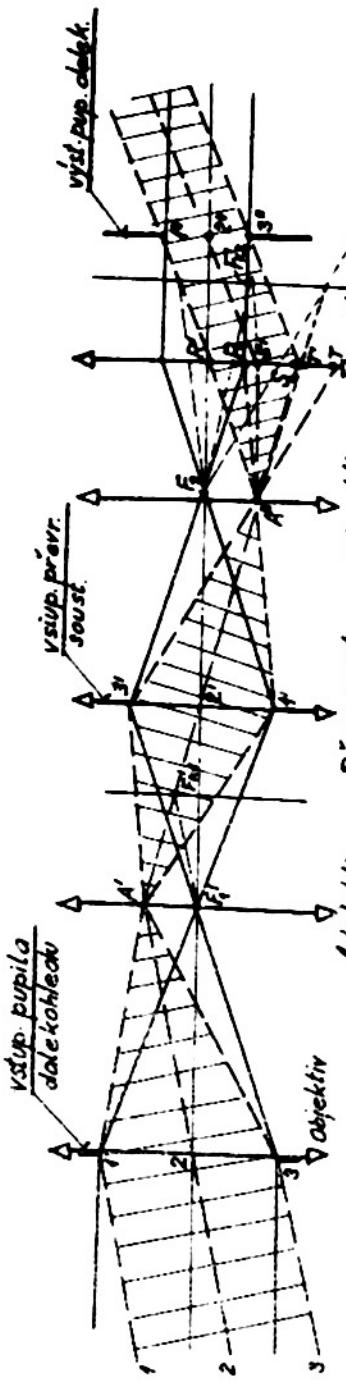
Na obr. 11.2.8 (viz str. 92) je znázorněn případ, kdy je paprskový svazek přicházející z okraje zorného pole odcloněn ještě více než na 50%. Je vidět, že vstupní pupila dalekohledu se posune ještě více před jeho objektiv a výstupní pupila dalekohledu blíže k okuláru.

## II. Převracející soustava složená ze dvou členů

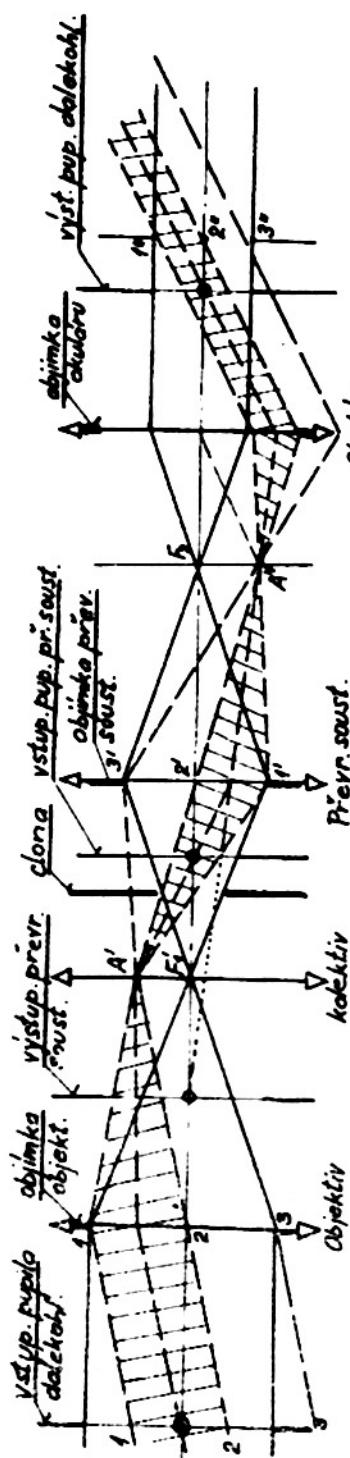
Užití jednoho členu jako převracející soustavy má značné nevýhody z hlediska korekčního a hlavně z hlediska justáže. Při dané stavební délce není možné seřídit dalekohled pro předepsané zvětšení. Z toho důvodu se u dalekohledových soustav používá obyčejně dvoučlenných převracejících soustav. Všimněme si proto tohoto případu.

Nechť  $f'$ ,  $f'_1$ ,  $f'_2$ ,  $e$  a  $f'_0$  značí postupně ohniskovou vzdálenost objektivu, prvního a druhého člena převracející soustavy, a jejich vzdálenost a  $f'_0$  ohniskovou vzdálenost okuláru.

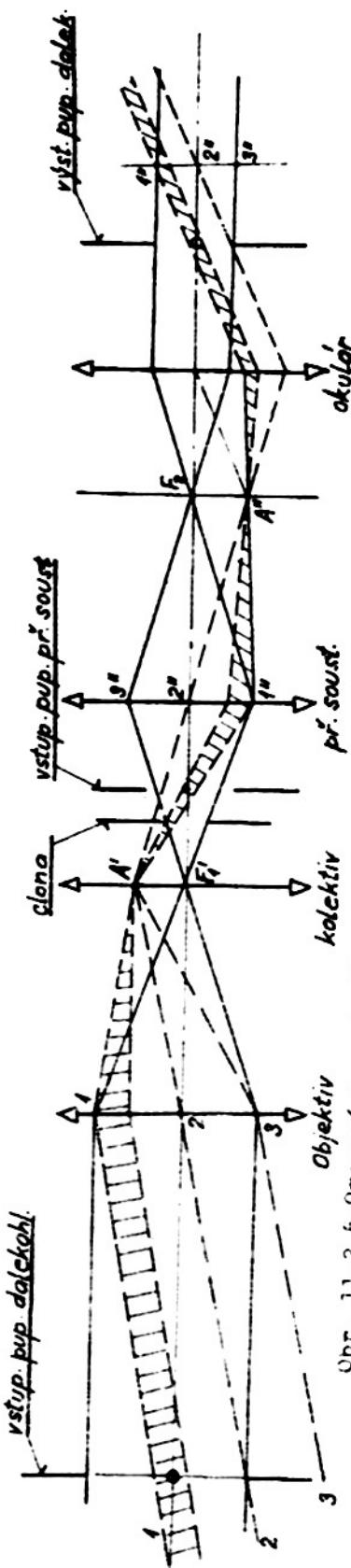
Úkolem této dvoučlenné převracející soustavy je opět přenést obraz  $X_1$  vytvořený objektivem v jeho ohniskové rovině do bodu  $X_2'$  ležícího v předmětové ohniskové



Obr. 11.2.6 Vliv 2. kollektivu na průměr okuláru s polohy výstupní pupilly dalekohledu.



Obr. 11.2.7 Změna průměru okuláru clonou.



Obr. 11.2.6 Omezení peprskového svazku z okrajů zorného pole více než na 50x třiky.

roviny okuláru. Nechť  $\Delta = X_1 X_2'$  značí vzdálenost těchto dvou rovin. První člen převacející soustavy zobrazí bod  $X_1$  do bodu  $X_1'$ , který je předmětem pro druhý člen převacející soustavy, která jej zobrazí do bodu  $X_2'$ . Pro tato zobrazení platí po stupně

$$\frac{1}{x_1'} - \frac{1}{x_1} = \frac{1}{f_1} \quad \text{čili}$$

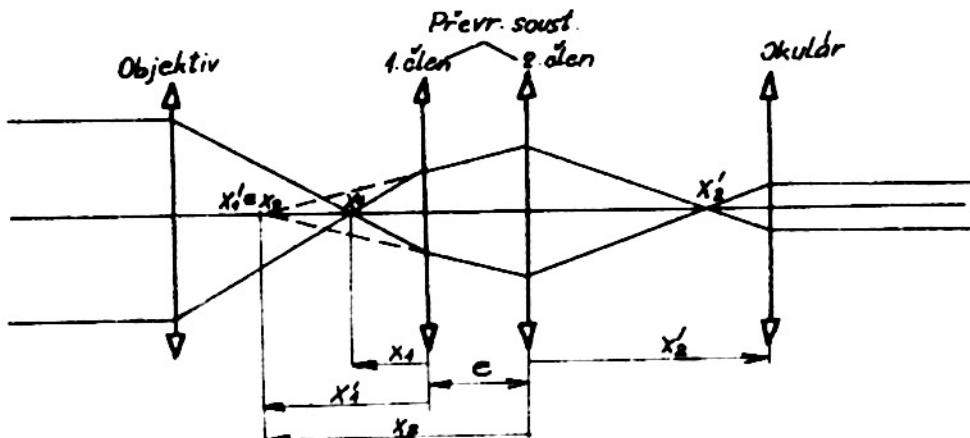
$$x_1' = \frac{x_1 f_1}{x_1 + f_1} \quad (11.2.6)$$

$$x_2 = x_1' - e \quad (11.2.7)$$

$$\frac{1}{x_2'} - \frac{1}{x_2} = \frac{1}{f_2} \quad ,$$

čili

$$x_2' = \frac{x_2 f_2}{x_2 + f_2} \quad .$$



Obr. 11.2.9 Dalekohled s dvoučlennou převacející soustavou.

Pomocí (11.2.6) a (11.2.7) pak plyně

$$x_2' = \frac{\left( \frac{x_1 f_1}{x_1 + f_1} - e \right) f_2}{\left( \frac{x_1 f_1}{x_1 + f_1} - e \right) f_2} = \frac{f_2 [x_1 f_1 - e (x_1 + f_1)]}{x_1 f_1 - (e - f_2) \cdot (x_1 + f_1)} \quad . \quad (11.2.8)$$

Podle obr. 11.2.9 platí

$$\Delta = -x_1 + e + x_2' = -x_1 + e + \frac{f_2 [x_1 f_1 - e (x_1 + f_1)]}{x_1 f_1 - (e - f_2) \cdot (x_1 + f_1)}$$

čili po úpravě

$$\Delta = -\frac{x_1^2 (f_1 + f_2 - e) - x_1 e (2 f_1 - e) + e^2 f_1}{x_1 (f_1 + f_2 - e) + f_1 f_2 - e f_1} \quad . \quad (11.2.9)$$

Z tohoto vztahu je vidět, že změní-li se při výrobě z technologických důvodů  $f_1$  resp.  $f_2$ , je možno dodržet zvětšení dalekohledu při dodržení stavební délky  $\Delta$  změnou vzdálenosti  $e$  obou členů převacející soustavy a změnou sečné vzdálenosti  $x_1$ .

Pro zvětšení uvažované dvoučlenné soustavy plyně

$$m = \frac{x_1' \cdot x_2'}{x_1 \cdot x_2} = \frac{\frac{x_1 f_1'}{x_1 + f_1'} \cdot \frac{f_2' [x_1 f_1' - e(x_1 + f_1')]}{x_1 f_1' - (e - f_2') (x_1 + f_1')}}{x_1 \cdot \left( \frac{x_1 f_1'}{x_1 + f_1'} - e \right)} = \\ = \frac{f_1' \cdot f_2'}{x_1 (f_1' + f_2' - e) + f_1' \cdot f_2' - e f_1'} . \quad (11.2.10)$$

Vzdálenost  $\Delta$  obrazové ohniskové roviny objektivu a předmětové ohniskové roviny okuláru bude opět minimální, bude-li splněna podmínka  $\frac{d\Delta}{dx_1} = 0$ .

Diferencováním vztahu (11.2.9) plyně

$$d\Delta = - \frac{[x_1 (f_1' + f_2' - e) + f_1' f_2' - e f_1'] [2x_1 (f_1' + f_2' - e) - e (2f_1' - e)] \cdot dx_1}{[x_1 (f_1' + f_2' - e) + f_1' f_2' - e f_1']^2} + \\ + \frac{[x_1^2 (f_1' + f_2' - e) - x_1 e (2f_1' - e) + e^2 f_1'^2] (f_1' + f_2' - e) \cdot dx_1}{[x_1 (f_1' + f_2' - e) + f_1' f_2' - e f_1']^2} .$$

Po úpravě dostaneme

$$\frac{d\Delta}{dx_1} = \frac{-x_1^2 (f_1' + f_2' - e)^2 + 2x_1 (f_1' + f_2' - e) (f_1' \cdot f_2' - e f_1') - [(f_1' + f_2' - e) e^2 f_1'^2 + e (2f_1' - e) (f_1' f_2' - e f_1')]}{[x_1 (f_1' + f_2' - e) + f_1' f_2' - e f_1']^2}$$

Z podmínky  $\frac{d\Delta}{dx_1} = 0$  pak dostáváme kvadratickou rovnici v  $x_1$

$$x_1^2 (f_1' + f_2' - e)^2 + 2x_1 (f_1' + f_2' - e) (f_1' \cdot f_2' - e f_1') - \\ - [(f_1' + f_2' - e) \cdot e^2 f_1'^2 + e (2f_1' - e) (f_1' f_2' - e f_1')] = 0,$$

jejímž řešením pak vychází pro  $x_1$

$$(x_1)_{1,2} = \begin{cases} \frac{e f_1'}{f_1' + f_2' - e} \\ \frac{-2 f_1' f_2' + e f_1'}{f_1' + f_2' - e} \end{cases} \quad (11.2.11)$$

Vzhledem k tomu, že v těchto řešeních jsou výrazy ve jmenovateli a v čitateli prvního zlomku kladné, zatím co čitatel druhého zlomku je záporný, má pro naše úvahy význam pouze druhé řešení. Dosazením tohoto řešení do (11.2.10) dostaneme

$$m = \frac{f_1' f_2'}{-2 f_1' f_2' + e f_1' + f_1' f_2' - e f_1'} = -1 . \quad (11.2.12)$$

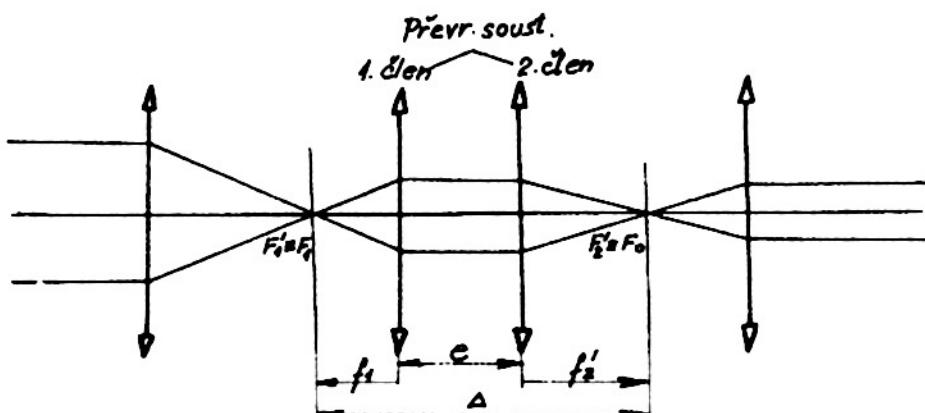
Je vidět, že jsme dospěli ke stejnemu výsledku jako v případě převracející soustavy s jedním členem, což je samozřejmé, neboť každou složenou soustavu můžeme nahradit soustavou jednoduchou. Položíme-li ve vztahu (11.2.10)  $m = -1$ , dostaneme druhé řešení (11.2.11). Skutečně

$$x_1 \cdot (f_1' + f_2' - e) + f_1' f_2' - e f_1' = - f_1' f_2' \text{ čili}$$

$$x_1 = \frac{-2 f_1' f_2' + e f_1'}{f_1' + f_2' - e} .$$

Z justážního hlediska jsou výhodné převracející soustavy, u nichž paprskové svazky mezi oběma jejími členy jsou rovnoběžné svazky. Potom předmětová ohnisková rovina prvního člena splyvá s obrazovou ohniskovou rovinou objektivu a obrazová ohnisková rovina druhého člena splyvá s předmětovou ohniskovou rovinou okuláru, jak je to patrné z obr. 11.2.10. Pro vzdálenost  $\Delta$  pak plyne

$$\Delta = f_1 + f_2 + \dots \quad (11.2.12)$$



Obr. 11.2.10 Dalekohled s dvoučlennou převracející soustavou s rovnoběžným paprskovým chodem.

### III. Vliv čočkových převracejících soustav na polohu výstupní pupily dalekohledu

Výhodou čočkových převracejících soustav je možnost ovlivnit jimi polohu výstupní pupily dalekohledu.

Má-li být dalekohledu dobře využito, je nutné dát výstupní pupilu vhodnou polohu, která by umožňovala ztotožnit výstupní pupilu dalekohledu s pupilou pozorovatelova oka.

Jak bylo dříve uvedeno, u dalekohledů s velkým zorným polem, které ze okulárem přesahuje 70°, je nutno umístit výstupní pupilu tak, aby ji bylo možno ztotožnit se středem otáčení oka.

U některých zaměřovacích dalekohledů spojených pevně se zbraní, je nutné chránit pozorovatelské oko před nebezpečím úrazu, který by mohl vyvolat dalekohled při zpětném pohybu zbraně po výstřelu. Proto v těchto případech je nutné umístit jeho výstupní pupilu do vzdálenosti 60 - 100 mm za poslední čočkou okuláru tak, aby se současně získalo místo pro volný odchod vyhazovaných nábojníc.

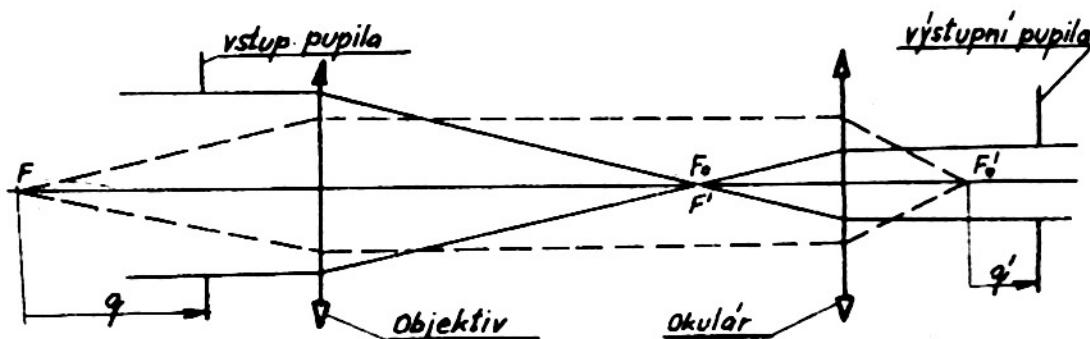
U Keplerova dalekohledu nebo u dalekohledů s hranolovou převracející soustavou umístěnou mezi jeho objektivem a okulárem leží vstupní pupil dalekohledu obvykle velmi blízko u objímky jeho objektivu nebo je s ní totožná. Pro polohu q' výstupní pupily pak vychází podle Gullstrandovy zobrazovací rovnice

$$q' = \frac{d}{f^2} \quad (11.2.13)$$

(Pro určení polohy q' výstupní pupily je možno použít Gullstrandovy rovnice, neboť body F a F' jsou sdružené, jak to vyplývá z obr. 11.2.11 (viz str. 96). Protože u sfokální soustavy je ohnisková vzdálenost  $f' = \infty$ , nabude Gullstrandova rovnice  $\frac{D'^2}{g'} - \frac{L^2}{g} = \frac{D D'}{f^2}$  jednoduchého tvaru  $\frac{L'^2}{g'} - \frac{D^2}{g} = 0$  čili  $\frac{g'}{g} = \frac{1}{f^2}$ .

kde  $\Gamma$  značí zvětšení dalekohledu. V případě, že vstupní pupila dalekohledu splyvá s objímkou jeho objektivu, pak  $q = f'$ , kde  $f'$  značí ohniskovou vzdálenost objektivu dalekohledu.

Ze vztahu (11.2.13) je patrné, že u Keplerova dalekohledu nebo u dalekohledů s hranolovými převracejícími soustavami je určena poloha jeho výstupní pupily při



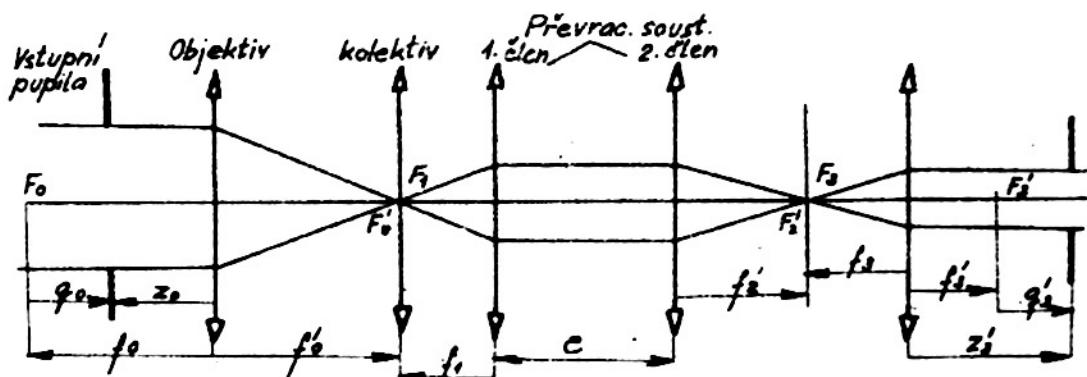
Obr. 11.2.11 K určení polohy výstupní pupily u Keplerova nebo hranolového dalekohledu.

dané poloze vstupní pupily pouze jeho zvětšením  $\Gamma$ . S rostoucím zvětšením  $\Gamma$  se blíží výstupní pupila k obrazové ohniskové rovině okuláru. U astronomických dalekohledů, které mají velké zvětšení, splyvá prakticky výstupní pupila s obrazovou ohniskovou rovinou okuláru.

Čočky převracející soustavy se zúčastní ne zobrazení vstupní pupily dalekohledu a mají proto značný vliv na polohu výstupní pupily dalekohledu. Lze tedy polohu výstupní pupily ovlivnit vhodnou volbou jednotlivých členů převracející soustavy.

U celé řady dalekohledů, zvláště u dalekohledů z oboru vojenské techniky, není vstupní pupila dalekohledu tvorena objímkou objektivu, nýbrž obyčejně určitou článkou nacházející se před objektivem. Tato článka může být tvorena např. objímkou hranolu umístěného před objektivem, nebo objímkou vstupního krycího skla, které uzavírá tubus dalekohledu apod.

Určeme proto polohu výstupní pupily dalekohledu, kdy dvoučlenná převracející soustava má mezi oběma členy rovnoběžný paprskový chod. Předpokládejme, že v obrazové ohniskové rovině objektivu je umístěn kolektiv. Nechť  $f'_0$ ,  $f'_1$ ,  $f'_2$ ,  $r'_1$  a  $f'_2$  značí postupně ohniskové vzdálenosti objektivu, kolektivu, prvního a druhého člena převracející soustavy a okuláru. Nechť dále podle obr. 11.2.12 značí  $q_0$  vzdálenost



Obr. 11.2.12 K určení polohy výstupní pupily u dalekohledu s čočkovou převracející soustavou.

vstupní pupily dalekohledu od předmětového ohniska objektivu a  $q'_0$  vzdálenost výstupní pupily dalekohledu od obrazového ohniska okuláru.

Nechť konečně značí  $z'_0$  vzdálenost vstupní pupily dalekohledu od objektivu a  $z'_0$  vzdálenost jeho výstupní pupily od jeho okuláru.

Potom podle obr. 11.2.12 platí postupně pro zobrazení vstupní pupily dalekohledu všechny čočkami uvažovaného dalekohledu:

$$a) \quad \frac{1}{z'_0} - \frac{1}{z'_0} = \frac{1}{f'_0} \quad \text{čili}$$

$$z'_0 = \frac{f'_0 \cdot z'_0}{z'_0 + f'_0}$$

$$b) \quad z_K = z'_0 - f'_0 = \frac{f'_0 \cdot z'_0}{z'_0 + f'_0} - f'_0 = - \frac{f'^2_0}{z'_0 + f'_0} \quad (11.2.14)$$

$$\frac{1}{z'_K} - \frac{1}{z'_K} = \frac{1}{f'_K} \quad \text{čili}$$

$$z'_K = \frac{f'_K \cdot z'_K}{z'_K + f'_K} \quad \text{a po dosazení z (11.2.14)}$$

$$z'_K = \frac{- \frac{f'^2_0 \cdot f'_K}{z'_0 + f'_0}}{- \frac{f'^2_0}{z'_0 + f'_0} + f'_K} = \frac{- f'^2_0 \cdot f'_K}{- f'^2_0 + z'_0 f'_K + f'_0 f'_K} \quad (11.2.15)$$

$$c) \quad z_1 = z'_K - f'_1 = \frac{f'^2_0 \cdot f'_K}{f'^2_0 - z'_0 f'_K - f'_0 f'_K} - f'_1 =$$

$$= \frac{f'_K [f'^2_0 + f'_1 (f'_0 + z'_0)] - f'^2_0 \cdot f'_1}{f'^2_0 - f'_K (f'_0 + z'_0)} \quad (11.2.16)$$

$$\frac{1}{z'_1} - \frac{1}{z'_1} = \frac{1}{f'_1} \quad \text{čili}$$

$$z'_1 = \frac{f'_1 z'_1}{z'_1 + f'_1} \quad \text{a po dosazení z (11.2.16)}$$

$$z'_1 = \frac{f'_1 \cdot \frac{f'_K [f'^2_0 + f'_1 (f'_0 + z'_0)] - f'^2_0 f'_1}{f'^2_0 - f'_K (f'_0 + z'_0)}}{\frac{f'_K \cdot [f'^2_0 + f'_1 (f'_0 + z'_0)] - f'^2_0 f'_1}{f'^2_0 - f'_K (f'_0 + z'_0)} + f'_1}$$

odkud dostaneme po úpravě

$$z'_1 = z'_0 \left( \frac{f'_1}{f'_0} \right)^2 - \frac{f'^2_1}{f'^2_K} + \frac{f'^2_1}{f'^2_0} + f'_1 \quad (11.2.17)$$

$$d) \quad z_2 = z'_1 - \bullet$$

$$\frac{1}{z'_2} - \frac{1}{z'_2} = \frac{1}{f'_2} \quad \text{čili}$$

$$z_2' = \frac{z_2 f_2'}{z_2 + f_2'} = \frac{(z_1' - e) \cdot f_2'}{z_1' - e + f_2'}$$

e)  $z_3' = z_2' - (f_2' + f_3') = \frac{(z_1' - e) \cdot f_2'}{z_1' - e + f_2'} - f_2' - f_3'$

$$\frac{1}{z_3'} - \frac{1}{z_3} = \frac{1}{f_3'} \text{ čili}$$

$$z_3' = \frac{z_3 \cdot f_3'}{z_3 + f_3'} = \frac{\left[ \frac{(z_1' - e) \cdot f_2'}{z_1' - e + f_2'} - f_2' - f_3' \right] \cdot f_3'}{\frac{(z_1' - e) \cdot f_2'}{z_1' - e + f_2'} - f_2' - f_3' + f_2'} ,$$

odkud plyne po úpravě

$$z_3' = z_1' \left( \frac{f_3'}{f_2'} \right)^2 - e \left( \frac{f_3'}{f_2'} \right)^2 + \frac{f_3'^2}{f_2'} + f_3' . \quad (11.2.18)$$

Dosadíme-li za  $z_1'$  z (11.2.17) plyne dále

$$z_3' = \left[ z_0 \left( \frac{f_1'}{f_0'} \right)^2 - \frac{f_1'^2}{f_K'} + \frac{f_1'^2}{f_0'} + f_1' \right] \left( \frac{f_3'}{f_2'} \right)^2 - e \left( \frac{f_3'}{f_2'} \right)^2 + \frac{f_3'^2}{f_2'} + f_3' ,$$

odkud po úpravě

$$z_3' = \frac{1}{f^2} \left( z_0 + f_0' - \frac{f_0'^2}{f_K'} \right) + \frac{f_3'^2 \cdot f_1'}{f_2' f_0'} + f_3' , \quad (11.2.19)$$

kde  $f_s' = \frac{f_1' \cdot f_2'}{f_1' + f_2' - e}$  značí ohniskovou vzdálenost převracející soustavy jako celku a

$$\frac{f_0'}{f_3'} \cdot \frac{f_2'}{f_1'} \text{ celkové zvětšení dalekohledu.}$$

Podle obr. 11.2.14 platí, že

$$z_0 + f_0' = q_0 \quad \text{a} \quad z_3' - f_3' = q_3' ,$$

teží (11.2.19) můžeme psát v konečném tvaru

$$q_3' = \frac{1}{f^2} \left( q_0 - \frac{f_0'^2}{f_K'} \right) + \frac{f_3'^2 f_1'}{f_2' f_s'} . \quad (11.2.20)$$

Z tohoto vztahu je vidět, že poloha  $q_3'$  výstupní pupily dalekohledu se dá ovlivnit takto:

a)  $q_3'$  je možno zvětšit volbou okuláru o větší ohniskové vzdálenosti, neboť druhý člen závisí na  $f_3'^2$ ,

b)  $q_3'$  je možno zvětšit volbou menšího zvětšení  $\frac{f_2'}{f_1'}$  převracející soustavy,

c)  $q_3'$  je možno zvětšit volbou menší ohniskové vzdálenosti  $f_s'$  převracející soustavy.

Uvedené tři možnosti zvětšení vzdálenosti  $q_3'$  výstupní pupily působí do jisté míry proti sobě. Zvětšíme-li ohniskovou vzdálenost  $f_3'$  okuláru, je nutné k zachování zvětšení dalekohledu buď zvětšit ohniskovou vzdálenost  $f_0'$  objektivu, nebo zvýšit zvětšení převracející soustavy, tj. snížit celkovou její ohniskovou vzdálenost  $f_s'$ .

Z druhého členu (11.2.20) vyplývá, že kolektiv má nepříznivý vliv na polohu výstupní pupily a to tím více, čím jeho ohnisková vzdálenost bude menší. Vyplývá to i z názoru, neboť čím bude ohnisková vzdálenost kolektivu  $f_k'$  menší, tím blíže ke středu okuláru budou procházet šikmé paprskové svažky z okraje zorného pole a tím blíže za okulárem budou protinat jeho optickou osu.

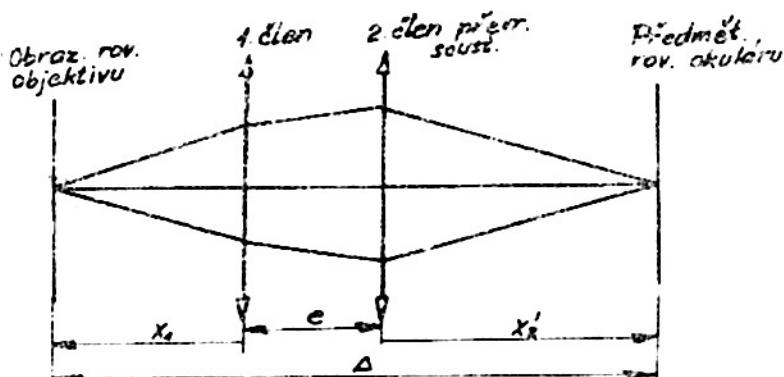
V případě, že  $f_k' = f_o'$  a  $q_o = f_o'$ , tj. splývá-li vstupní pupila dalekohledu s objímkou jeho objektivu, vymizí první člen (11.2.20), takže

$$q_3' = \frac{f_3'^2 \cdot f_1'}{f_2^2 \cdot f_s'} . \quad (11.2.21)$$

Není-li použito kolektivu, je možno ve vztahu (11.2.20) klást za  $f_k'$  hodnotu nekonečně velkou, takže poloha  $q_3'$  výstupní pupily je určena vztahem

$$q_3' = \frac{q_o}{\Delta} + \frac{f_3'^2 \cdot f_1'}{f_2^2 \cdot f_s'} . \quad (11.2.22)$$

Pomocí vztahů (11.2.20) až (11.2.22) je tedy možno v daném případě rychle určit polohu výstupní pupily dalekohledu.



Obr. 11.3.1 K určení funkce pankratické převracející soustavy.

### 11.3. Pankratické převracející soustavy

Největší předností dalekohledů je, že umožňují při konstantní vzdálenosti  $\Delta$  obrazových rovin plynulou změnu zvětšení. Dosahuje se toho posuvem obou členů převracející soustavy. Takové převracející soustavy se nazývají pankratické.

U hranolových dalekohledů je možno měnit zvětšení pouze skoky výměnou okuláru nebo předřazením Galileových sfokálních soustav.

Všimněme si nejdříve pankratických soustav. Jak bylo uvedeno, provádí se plynulá změna zvětšení posuvem obou členů soustavy. Pohyb každého člena převracející soustavy, tj. jejich poloha  $x_1$  resp.  $x_2'$  (viz obr. 11.3.1) jsou funkcí zvětšení  $m$  převracející soustavy. Určeme proto vztahy pro  $x_1$  resp.  $x_2'$  vyjadřující jejich závislost na zvětšení  $m$ .

Nechť vzdálenost  $\Delta$  obrazových rovin je dána konstrukcí dalekohledu a nechť  $f_1'$  resp.  $f_2'$  značí v souhlase s předchozími úvahami ohniskové vzdálenosti prvního resp. druhého člena převracející soustavy a  $\pm$  jejich vzdálenost.

Ze vztahu (11.2.10) pro zvětšení dvoučlenné převracející soustavy plyne

$$= [x_1 (f'_1 + f'_2 - e) + f'_1 \cdot f'_2 - ef'_1] = f'_1 \cdot f'_2 ,$$

odkud

$$x_1 = \frac{ef'_1 - f'_1 \cdot f'_2 - \frac{m-1}{m}}{f'_1 + f'_2 - e} . \quad (11.3.1)$$

Dosadime-li tuto hodnotu do vztahu (11.2.8) pro  $x'_2$ , dostaneme

$$\begin{aligned} x'_2 &= \frac{f'_2 [x_1 f'_1 - e (x_1 + f'_1)]}{x_1 f'_1 - e (x_1 + f'_1)} = \frac{f'_2 [x_1 (f'_1 - e) - ef'_1]}{x_1 (f'_1 + f'_2 - e) + f'_1 f'_2 - ef'_1} = \\ &= \frac{f'_2 \cdot \left[ \frac{ef'_1 - f'_1 f'_2 - \frac{m-1}{m}}{f'_1 + f'_2 - e} (f'_1 - e) - ef'_1 \right]}{\frac{ef'_1 - f'_1 f'_2 - \frac{m-1}{m}}{f'_1 + f'_2 - e} \cdot (f'_1 + f'_2 - e) + f'_1 f'_2 - ef'_1} , \end{aligned}$$

odkud pak plyne po úpravě

$$x'_2 = f'_2 \frac{(1-m) f'_1 - e}{f'_1 + f'_2 - e} . \quad (11.3.2)$$

Ze vztahu pro vzdálenost

$$\Delta = -x_1 + e + x'_2$$

plyne pak dle

$$- \frac{ef'_1 - f'_1 f'_2 - \frac{m-1}{m}}{f'_1 + f'_2 - e} + e + \frac{f'_2 [(1-m) \cdot f'_1 - e]}{f'_1 + f'_2 - e} ,$$

odkud dostaneme po úpravě kvadratickou rovnici pro vzdálenost  $e$

$$e^2 - \Delta e + \Delta (f'_1 + f'_2) + f'_1 \cdot f'_2 - \frac{(m-1)^2}{m} = 0 .$$

Rešením této rovnice dostaneme dále

$$e = \frac{\Delta}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 - \Delta (f'_1 + f'_2) - f'_1 \cdot f'_2 \cdot \frac{(m-1)^2}{m}} .$$

Pro nás případ má význam pouze řešení se znaménkem minus, tedy

$$e = \frac{\Delta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 - \Delta (f'_1 + f'_2) - f'_1 \cdot f'_2 \cdot \frac{(m-1)^2}{m}} \quad (11.3.3)$$

Při řešení pankratické převracející soustavy pak postupujeme takto: Je-li konstrukce dalekohledu dána  $\Delta$ ,  $f'_1$  a  $f'_2$ , pak ze vztahu (11.3.3) určíme pro každou hodnotu zvětšení  $m$  v daném intervalu vzdálenost  $e$  obou členů převracející soustavy a pomocí ní pak ze vztahů (11.3.1) a (11.3.2) polohy  $x_1$  resp.  $x'_2$  obou členů vztázené na přilehlé obrazové roviny. Tím je prakticky řešení pankratické soustavy ukončeno.

Všimněte si pravděpodobně nyní praktické aplikace naznačeného řešení.

I. Nechť  $f'_1$  a  $f'_2$  značí krajní hodnoty zvětšení konstruovaného dalekohledu, mezi kterými se má jeho zvětšení plynule měnit. Provedme konstrukci dalekohledu tak, aby při zvětšení  $f'_2$  byla vzdálenost obou členů převracející soustavy  $e_2 = 0$ , tj. aby se při tomto zvětšení oba členy dotýkaly. Pohyb obou členů převracející soustavy bude probíhat podle obr. 11.3.2 (viz str. 101), kde je vyznačena poloha těchto členů pro tři různá zvětšení, z nichž dvě odpovídají krajním hodnotám.

Nechť  $f'$  značí zvětšení vlastního Keplerova dalekohledu (tj. dalekohledu bez

převracející soustavy) a nechť  $m_1$  resp.  $m_2$  značí krajní hodnoty zvětšení vlastní pankratické převracející soustavy. Je nutné určit  $f'_1$ ,  $f'_2$  a polohy  $x'_1$  resp.  $x'_2$  obou členů převracející soustavy pro jednotlivá zvětšení  $m$  v intervalu  $m_1 \dots m_2$ .

Pro krajní hodnoty zvětšení  $m_1$  resp.  $m_2$  pankratické soustavy plyne

$$m_1 = \frac{f'_1}{f}$$

$$m_2 = \frac{f'_2}{f} .$$

Z požadavku, aby  $e_2 = 0$  plyne z (11.3.3)

$$\frac{\Delta}{2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 - \Delta(f'_1 + f'_2) - f'_1 \cdot f'_2 \frac{(m_2-1)^2}{m_2}}$$

takže

$$\Delta(f'_1 + f'_2) + f'_1 f'_2 \frac{(m_2-1)^2}{m_2} = 0. \quad (11.3.4)$$

Pro zvětšení  $m_1$  pak plyne dále

$$e_1 = \frac{\Delta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 - \Delta(f'_1 + f'_2) - f'_1 f'_2 \frac{(m_1-1)^2}{m_1}} . \quad (11.3.5)$$

Ve vztazích (11.3.4) a (11.3.5) máme tři neznámé,  $f'_1$ ,  $f'_2$  a  $e_1$ . Musíme proto jednu z nich volit. Volme ohniskovou vzdálenost  $f'_1$  a určeme  $f'_2 = e_1$ . Z (11.3.4) pak dostaneme

$$f'_2 = - \frac{\Delta \cdot f'_1}{\Delta + f'_1 \frac{(m_2-1)^2}{m_2}} . \quad (11.3.6)$$

Dosazením (11.3.6) do (11.3.5) dostáváme pak dále

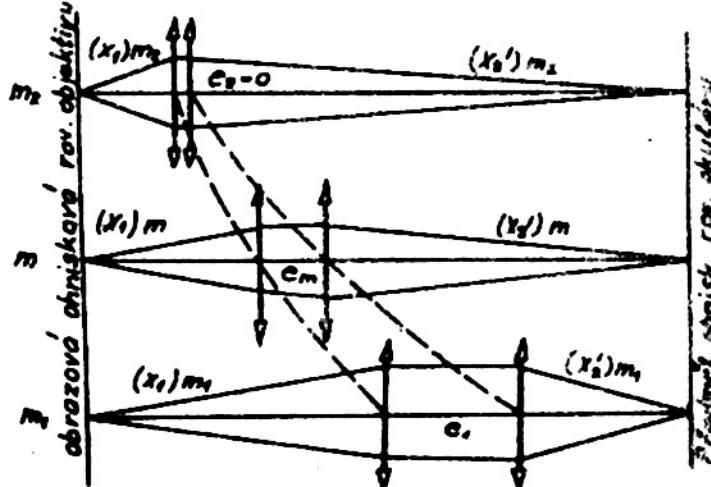
$$e_1 = \frac{\Delta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 - \Delta \left[ f'_1 - \frac{\Delta \cdot f'_1}{\Delta + f'_1 \frac{(m_2-1)^2}{m_2}} \right] + f'_1 \frac{\Delta f'_1}{\Delta + f'_1 \frac{(m_2-1)^2}{m_2}} \cdot \frac{(m_1-1)^2}{m_1}} .$$

odkud plyne po úpravě

$$e_1 = \frac{\Delta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 - \frac{\Delta \cdot f'_1^2 \cdot \frac{(m_2-1)^2}{m_2} - \Delta f'_1^2 \frac{(m_1-1)^2}{m_1}}{\Delta + f'_1 \cdot \frac{(m_2-1)^2}{m_2}}} .$$

Vyjádříme-li jmenovatele druhého člena pod odmocinou pomocí (11.3.6), dostaneme konečně

$$e_1 = \frac{\Delta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 - f'_1 f'_2 \left[ \frac{(m_1-1)^2}{m_1} - \frac{(m_2-1)^2}{m_2} \right]} . \quad (11.3.7)$$



Obr. 11.3.2 Průběh pohybu členů pankratické soustavy.

Tím náme určenu paralelníkovou soustavou ohniskovými vzdálenostmi  $f'_1$  a  $f'_2$  jejich obou členů s současně vzdálenost  $e_1$  odpovídající krajnímu zvětšení  $m_1$ . Ostatní hodnoty  $x_1$  resp.  $x'_2$  a vzdálenosti  $e$  pro jednotlivé hodnoty zvětšení  $m$  v intervalu  $m_1$ ,  $m_2$  určíme pomocí vztahů (11.3.1) až (11.3.3).

### Příklad

Je navrhnout dalekohled s plynule měnitelným zvětšením od  $\Gamma_1 = 4$  do  $\Gamma_2 = 12$ . Nechť zvětšení Keplerova dalekohledu je  $-4$ .

Podle předchozího platí

$$m_1 = \frac{f'_1}{\Gamma} = \frac{4}{-4} = -1$$

$$m_2 = \frac{f'_2}{\Gamma} = \frac{12}{-4} = -3.$$

Volme  $f'_1 = 0,3\Delta$ , kde  $\Delta$  značí vzdálenost obrazových rovin. Potom z (11.3.6) plyne pro ohniskovou vzdálenost  $f'_2$ :

$$f'_2 = - \frac{\Delta \cdot f'_1}{\Delta + f'_1 - \frac{(m_2-1)^2}{m_2}} = - \frac{0,3 \cdot \Delta^2}{\Delta + 0,3\Delta - \frac{(-3-1)^2}{-3}} = \frac{\Delta}{2}.$$

Podobně z (11.3.7) plyne pro  $e_1$ :

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{\Delta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 - f'_1 f'_2 \left[ \frac{(m_1-1)^2}{m_1} - \frac{(m_2-1)^2}{m_2} \right]} = \\ &= \frac{\Delta}{2} - \sqrt{\frac{\Delta^2}{4} - 0,3 \cdot 0,5 \cdot \Delta^2 \cdot \left[ \frac{(-1-1)^2}{-1} - \frac{(-3-1)^2}{-3} \right]} = \\ &= 0,276 \Delta. \end{aligned}$$

Pro  $(x_1)_{m_1}$  a  $(x_1)_{m_2}$  plyne z (11.3.1)

$$(x_1)_{m_1} = \frac{e_1 f'_1 - f'_1 f'_2 \cdot \frac{m_1 - 1}{m_2}}{f'_1 + f'_2 - e_1} = \frac{0,276 \cdot 0,3 \Delta^2 - 0,3 \cdot 0,5 \Delta^2 \cdot \frac{-1-1}{-1}}{0,3 \Delta + 0,5 \Delta - 0,276 \Delta} = -0,415 \Delta,$$

$$(x_1)_{m_2} = \frac{e_2 f'_1 - f'_1 f'_2 \cdot \frac{m_2 - 1}{m_1}}{f'_1 + f'_2 - e_2} = \frac{-3 \cdot 0,5 \Delta^2 \cdot \frac{-3-1}{-3}}{(0,3 + 0,5)\Delta} = -0,25 \Delta.$$

Pro  $x'_2$  plyne z (11.3.2)

$$(x'_2)_{m_1} = f'_2 \frac{(1-m_1) f'_1 - e_1}{f'_1 + f'_2 - e_1} = 0,5 \Delta \frac{(1+1) \cdot 0,3 \Delta - 0,276 \Delta}{0,3 \Delta + 0,5 \Delta - 0,276 \Delta} = 0,309 \Delta.$$

$$(x'_2)_{m_2} = f'_2 \frac{(1-m_2) f'_1 - e_2}{f'_1 + f'_2 - e_2} = 0,5 \Delta \frac{(1+3) 0,3 \Delta}{0,8 \Delta} = 0,75 \Delta.$$

Kontrolu správnosti výpočtu je možno provést pomocí vztahu

$$\Delta = -x_1 + e + x'_2.$$

Pro  $m_1$  vychází

$$\Delta = 0,415 \Delta + 0,276 \Delta + 0,309 \Delta = 1,000 \Delta$$

a pro  $m_2$

$$\Delta = 0,25 \Delta + 0 + 0,75 \Delta = 1,000 \Delta .$$

II. Volme pankratickou soustavu tsk, aby  $f'_1 = f'_2 = f'$ . Potom ze předpokladu případu řešeného ed I. plyně z (11.3.4)

$$2 \Delta f' + f'^2 \frac{(m_2 - 1)^2}{m_2} = 0 \text{ čili}$$

$$f' = - \frac{2 \Delta m_2}{(m_2 - 1)^2} . \quad (11.3.8)$$

### Příklad

Řešíme předchozí číselný případ a dostaneme:

$$f' = - \frac{2 \Delta (-3)}{(-3 - 1)^2} = \frac{6 \Delta}{16} = 0,375 \Delta .$$

Z (11.3.7) plyně dále

$$\begin{aligned} e_1 &= \frac{\Delta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 - f'^2} \left[ \frac{(m_1 - 1)^2}{m_1} - \frac{(m_2 - 1)^2}{m_2} \right] = \\ &= \frac{\Delta}{2} - \sqrt{\frac{\Delta^2}{4} - 0,375^2 \Delta^2} \cdot \left[ \frac{(-1-1)^2}{-1} + \frac{(-3-1)^2}{3} \right] = 0,25 \Delta . \end{aligned}$$

Z (11.3.1) plyně pro  $x_1$ :

$$(x_1)_{\frac{m_1}{m_1}} = \frac{e_1 f' - f' \cdot \frac{1-m_1}{m_1}}{2 f' - e_1} = \frac{0,25 \cdot 0,375 \Delta^2 - 0,375^2 \cdot \frac{-1-1}{-1} \Delta^2}{2 \cdot 0,375 \Delta - 0,25 \Delta} = -0,374 \Delta ,$$

a pro  $(x_1)_{\frac{m_2}{m_2}}$ :

$$(x_1)_{\frac{m_2}{m_2}} = \frac{-f_1^2 \frac{m_2 - 1}{m_2}}{2 f'} = \frac{-0,375 \cdot \frac{-3-1}{-3} \cdot \Delta}{2} = -0,25 \Delta .$$

Podobně z (11.3.2)

$$(x_2')_{\frac{m_1}{m_1}} = f' \cdot \frac{(1-m_1) \cdot f' - e_1}{2 f' - e_1} = 0,375 \Delta \cdot \frac{(1+1) 0,375 \Delta - 0,25 \Delta}{2 \cdot 0,375 \Delta - 0,25 \Delta} = 0,375 \Delta$$

a

$$(x_2')_{\frac{m_2}{m_2}} = f' \cdot \frac{1 - \frac{m_2}{m_2}}{2} = 0,375 \cdot \frac{1+3}{2} \Delta = 0,75 \Delta .$$

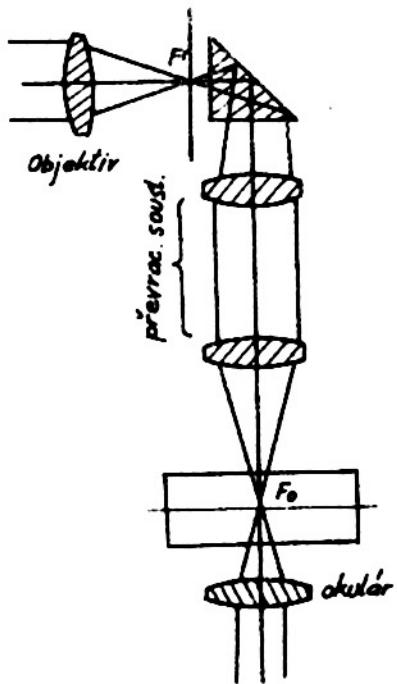
Kontrola: Pro zvětšení  $m_1$

$$\Delta = 0,374 \Delta + 0,25 \Delta + 0,375 \Delta = 0,999 \Delta .$$

Pro zvětšení  $m_2$

$$\Delta = 0,25 \Delta + 0 + 0,75 \Delta = 1,000 \Delta .$$

III. V některých případech návrhu pankratických soustav se vychází z daných hodnot krajních zvětšení  $m_1$  a  $m_2$  a z odpovídajících poloh členů  $x_1$  a  $x_2'$  pro jedno z obou zvětšení.



Obr. 11.3.3 Úprava pankratického dalekohledu.

Tento případ přichází v praxi v úvahu tehdy, když není možno využít celý interval  $\Delta$  k pohybu členů převracející soustavy. Např. za obrazovou ohniskovou rovinou objektivu je nutno umístit hranol, jak je to naznačeno na obr. 11.3.3, nebo v předmětové ohniskové rovině okuláru je nutno umístit mechanismus pro posuv zámerné osnovy, který si vyžaduje určitého prostoru.

Návrh pankratické převracející soustavy je tedy možno formulovat takto:

Je dán interval  $\Delta$ , krajní hodnoty  $x_1$  a  $x_2$  zvětšení a polohy  $x_1$  a  $x_2$  členů praktické soustavy např. pro zvětšení  $m_1$  a je třeba určit ohniskové vzdálenosti  $f_1$  a  $f_2$  obou jejích členů.

Při řešení tohoto úkolu postupujeme pak takto:

Vyjdeme ze vztahu pro zvětšení dvoučlenné soustavy

$$m = \frac{x_1 x_2}{x_1 + x_2} ,$$

kde  $x_1$ ,  $x_1'$  resp.  $x_2$ ,  $x_2'$  značí vzdálenosti příslušné k jednotlivým členům soustavy při zobrazování obrazové ohniskové roviny objektivu do předmětové oh-

niskové roviny okuláru.

Dosadíme-li sem za  $x_1'$  z přechodového vztahu

$$x_2 = x_1' - e ,$$

dostaneme

$$x_2 = \frac{x_2' \cdot e}{x_1 m - x_2'} . \quad (11.3.14)$$

Po zobrazení prvním členem platí

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{x_1} - \frac{1}{x_1'} = \frac{1}{x_2 + e} - \frac{1}{x_1} .$$

Pomocí (11.3.14) pak plyne odtud pro ohniskovou vzdálenost  $f_1'$  prvního člena po úpravě

$$f_1' = \frac{e x_1}{x_1 - e - \frac{x_2'}{m}} . \quad (11.3.15)$$

Podobně plyne ze zobrazovací rovnice platné pro druhý člen

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_2'} = \frac{1}{x_1' - e} - \frac{x_1 m - x_2'}{x_2' - e}$$

a po úpravě

$$f_2' = \frac{x_2' \cdot e}{e - x_1 m + x_2'} . \quad (11.3.16)$$

### Příklad

Je nutno navrhnut obdobně jako v předchozím příkladu pankratický dalekohled, který by umožnil plynulou změnu zvětšení od  $\Gamma_1 = 4$  do  $\Gamma_2 = 12$ , přičemž vlastní Keplerův dalekohled by měl zvětšení  $\Gamma = -4$ . Přitom je žádáno, aby první člen (druhý člen) soustavy se nepriblížil k obrazové ohniskové rovině objektivu (k předmě-

tové ohniskové rovině okuláru) v průběhu změny zvětšení blíže než  $x_1 = -0,20 \Delta$  ( $x_2' = 0,25 \Delta$ ).

Pro krajní hodnoty zvětšení vlastní parakratické soustavy tedy vychází

$$m_1 = \frac{f_1}{f} = \frac{4}{-4} = -1$$

$$m_2 = \frac{f_2}{f} = \frac{12}{-4} = -3 .$$

Volme polohu členů převracející soustavy pro zvětšení  $m_1 = -1$

$$(x_1)_{m_1} = -0,4 \Delta$$

$$(x_2')_{m_1} = 0,3 \Delta .$$

Potom

$$(e)_{m_1} = \Delta - x_2' + x_1 = \Delta - 0,3 \Delta - 0,4 \Delta = 0,3 \Delta .$$

Pro ohniskové vzdálenosti  $f_1'$  a  $f_2'$  obou členů parakratické soustavy vychází podle (11.3.15) a (11.3.16)

$$f_1' = \frac{(e)_{m_1} \cdot (x_1)_{m_1}}{(x_1)_{m_1} - (e)_{m_1} \cdot \frac{(x_2')_{m_1}}{m_1}} = \frac{-0,3 \cdot 0,4 \cdot \Delta^2}{-0,4 \Delta - 0,3 \cdot 1 - \frac{0,3}{-1} \Delta} = 0,3 \Delta .$$

$$f_2' = \frac{(e)_{m_1} \cdot (x_2')_{m_1}}{(e)_{m_1} - (x_1)_{m_1} \cdot \frac{m_1}{x_1} + (x_2')_{m_1}} = \frac{0,3 \cdot 0,3 \cdot \Delta^2}{0,3 \Delta - 0,4 \Delta + 0,3 \Delta} = 0,45 \Delta .$$

Určeme nyní  $(x_1)_{m_2}$  a  $(x_2')_{m_2}$  pro druhé krajní zvětšení  $m_2 = -3$ . Nejdříve určíme

ze vztahu (11.3.3) vzdálenost  $(e)_{m_2}$ :

$$(e)_{m_2} = \frac{\Delta}{2} - \sqrt{\left(\frac{\Delta}{2}\right)^2 - \Delta(f_1' + f_2') - f_1' f_2' \cdot \frac{(m_2-1)^2}{m_2}} = \\ = \frac{\Delta}{2} - \sqrt{0,25 \Delta^2 - \Delta^2 (0,3 + 0,45) - 0,3 \cdot 0,45 \cdot \frac{(-3-1)^2}{-3} \Delta^2} = \\ = 0,032 \Delta .$$

Nyní nášeme určit  $(x_1)_{m_2}$  a  $(x_2')_{m_2}$  ze vztahů (11.3.1) a (11.3.2):

$$(x_1)_{m_2} = \frac{(e)_{m_2} \cdot f_1' - f_1' f_2' \frac{m_2-1}{m_2}}{f_1' + f_2' - (e)_{m_2}} = \frac{0,032 \cdot 0,3 \Delta^2 - 0,3 \cdot 0,45 \frac{-3-1}{-3} \Delta^2}{0,3 \Delta + 0,45 \Delta - 0,032 \Delta} = -0,237 \Delta .$$

$$(x_2')_{m_2} = x_2' - \frac{(1-m_2) f_1' - (e)_{m_2}}{f_1' + f_2' - (e)_{m_2}} = 0,45 \Delta \cdot \frac{(1+3) 0,3 \Delta - 0,032 \Delta}{0,718 \Delta} = 0,732 \Delta .$$

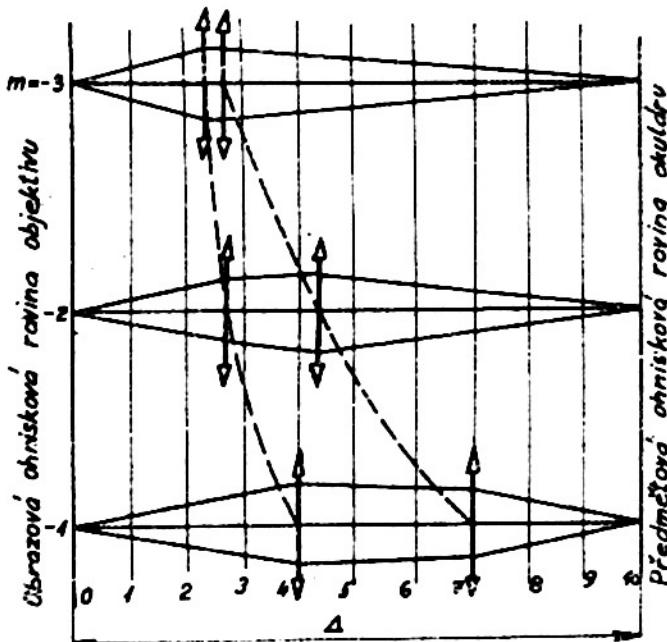
Kontrola správnosti výpočtu se provede pomocí vztahu pro

$$= -(x_1)_{m_2} + (e)_{m_2} + (x_2')_{m_2} = 0,237 \Delta + 0,032 \Delta + 0,732 \Delta = 1,001 \Delta .$$

Z nalezených výsledků je vidět, že vzdálenosti  $(x_1)_{m_2} \quad \text{a} \quad (x'_2)_{m_2}$  vyhovují požadavkům.

Nyní je ještě třeba provést kontrolu, zde je požadavek na omezený pohyb členů pankratické soustavy spiněn i pro jiná zvětšení v intervalu  $< -1, -3 >$ . Vzleme proto zvětšení  $m = -2$  a určeme vzdálenost  $(e)_m = -2$

$$e = \frac{\Delta}{2} - \sqrt{0,25 \Delta^2 - \Delta^2 (0,3 + 0,45) - 0,3 \cdot 0,45 \frac{(-2-1)^2}{-2}} \cdot \Delta^2 = 0,173 \Delta .$$



Obr. 11.3.4 Průběh pohybu členů pankratické soustavy určené příkladem k problému III.

$$x_1 = \frac{0,173 \cdot 0,3 \Delta^2 - 0,3 \cdot 0,45 \cdot \frac{-2-1}{-2} \Delta^2}{0,3\Delta + 0,45\Delta - 0,173\Delta} = -0,262 \Delta ,$$

$$x_2 = 0,45\Delta \cdot \frac{(1+2)0,3\Delta - 0,173\Delta}{0,577\Delta} = 0,565 \Delta .$$

Kontrola správnosti výpočtu

$$\Delta = 0,262\Delta + 0,173\Delta + 0,565\Delta = 1,000\Delta .$$

Je vidět, že i pro zvětšení  $m$  ležící v intervalu  $< -1, -3 >$  jsou splněny požadavky na krajní polohy obou členů pankratické soustavy. Průběh jejich pohybu je vidět na obr. 11.3.4.

IV. Někdy se řeší pankratická převracející soustava tak, aby vzdálenost  $e$  obou jejích členů byla stejná pro obě krajní zvětšení.

Při řešení tohoto problému využijeme ze vztahu (11.3.3), který napišeme pro obě krajní zvětšení ve tvaru

$$\left. \begin{aligned} (e)_{m_1}^2 - \Delta \cdot (e)_{m_1} + \Delta(f'_1 + f'_2) + f'_1 \cdot f'_2 \cdot \frac{(m_1 - 1)^2}{m_1} &= 0 \\ (e)_{m_2}^2 - \Delta \cdot (e)_{m_2} + \Delta(f'_1 + f'_2) + f'_1 \cdot f'_2 \cdot \frac{(m_2 - 1)^2}{m_2} &= 0 . \end{aligned} \right\} \quad (11.3.17)$$

Zádáme-li, aby  $(e)_{m_1} = (e)_{m_2}$ , pak je vidět, že v obou rovnicích (11.3.17) jsou první tři členy stejné, takže musí platit

$$\frac{(m_1 - 1)^2}{m_1} = \frac{(m_2 - 1)^2}{m_2} . \quad (11.3.18)$$

Označme obecně funkci

$$\frac{(m - 1)^2}{m} = \delta(m)$$

a dosadme postupně do této funkce za  $m$  hodnoty  $m_1$  a  $\frac{1}{m_2}$ . Dostaneme

$$\begin{aligned}\delta(m_1) &= \frac{(m_1 - 1)^2}{m_1} \\ \delta\left(\frac{1}{m_2}\right) &= \frac{\left(\frac{1}{m_2} - 1\right)^2}{\frac{1}{m_2}} = \frac{(m_2 - 1)^2}{m_2} .\end{aligned}$$

Z (11.3.18) tedy plynne

$$\delta(m_1) = \delta\left(\frac{1}{m_2}\right)$$

a musí tedy být

$$m_1 = \frac{1}{m_2}$$

čili

$$m_1 \cdot m_2 = 1. \quad (11.3.19)$$

Předpokládejme, že poměr  $m_1/m_2$  krajních zvětšení soustavy je znám a že pro  $m_1 > m_2$  platí

$$\frac{m_1}{m_2} = \Delta . \quad (11.3.20)$$

Z posledních dvou vztahů (11.3.19) a (11.3.20) pak plynne

$$m_1 = -\sqrt{\Delta} \quad a \quad m_2 = -\frac{1}{\sqrt{\Delta}} . \quad (11.3.21)$$

Tím je problém prakticky vyřešen, neboť známe-li krajní hodnoty zvětšení  $m_1$  a  $m_2$ , můžeme určit snadno podle příkladu III. ohniskové vzdálenosti  $f'_1$  a  $f'_2$  obou členů soustavy.

### Příklad

Předpokládejme, že je nutno navrhnut pankratickou soustavu tak, aby poměr

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{1}{3}$$

a aby vzdálenosti

$$(e)_{m_1} = (e)_{m_2} .$$

Podle (11.3.20) je

$$\Delta = \frac{m_1}{m_2} = \frac{1}{3} ,$$

takže podle (11.3.21) vychází

$$m_1 = -\sqrt{\Delta} = -\frac{1}{\sqrt{3}} = -0,577$$

$$m_2 = -\frac{1}{\sqrt{\Delta}} = -\sqrt{3} = -1,732 .$$

Volme pro  $m_1 = -0,577$  polohu

$$(x_1)_{m_1} = -0,5\Delta$$

$$(x_2)_{m_1} = 0,25\Delta,$$

teží

$$(\epsilon)_{m_1} = 0,25\Delta.$$

Pro ohniskové vzdálenosti obou členů pak vychází

$$f_1' = \frac{(\epsilon)_{m_1} \cdot (x_1)_{m_1}}{(x_2)_{m_1}} = \frac{-0,25\Delta \cdot 0,5\Delta}{-0,5\Delta - 0,25\Delta - \frac{0,25\Delta}{0,577}} = 0,394\Delta,$$

$$(x_1)_{m_1} - (\epsilon)_{m_1} - \frac{\Delta}{m_1}$$

$$f_2' = \frac{0,25\Delta \cdot 0,25\Delta}{0,25\Delta - 0,577\Delta + 0,25\Delta} = 0,297\Delta.$$

Kontrolu výpočtu provedeme určením vzdálenosti obou členů  $(\epsilon)_{m_2}$ :

$$(\epsilon)_{m_2} = 0,5\Delta - \sqrt{0,25\Delta^2 - 0,691\Delta^2 - 0,394 \cdot 0,297 \frac{(-1,732-1)^2}{-1,732} \Delta^2} =$$

$$= 0,25\Delta = (\epsilon)_{m_1} \quad \text{j.b.d.}$$

V. Velmi výhodné z hlediska korekčního jsou tzv. souměrné pankratické soustavy. Jsou to soustavy, u nichž obdobně jako v předchozím případě se volí vzdálenost  $(\epsilon)_{m_1}$  a  $(\epsilon)_{m_2}$  pro obě krajní zvětšení stejná, tj.  $(\epsilon)_{m_1} = (\epsilon)_{m_2}$  a mimoto se volí soustava tak, aby ohniskové vzdálenosti obou členů byly stejné, tj.  $f_1' = f_2' = f'$ .

Při návrhu souměrných soustav postupujeme teží: Ze vztahu (11.3.3) určíme pro zvolenou ohniskovou vzdálenost a pro jedno krajní zvětšení, např.  $m_1$ , vzdálenost obou členů  $(\epsilon)_{m_1} = (\epsilon)_{m_2}$ . Potom ze vztahu (11.3.3) a (11.3.1) resp. (11.3.2) určíme postupně pro jednotlivé hodnoty zvětšení v intervalu  $m_1, m_2$  vzdálenost  $\epsilon$ ,  $x_1$  resp.  $x_2$ . Protože soustava je souměrná, musí  $(x_1)_{m_1} = (x_2)_{m_2}$  resp.  $(x_2)_{m_1} = \epsilon = (x_1)_{m_2}$ .

### Příklad

Řešme předchozí případ jako souměrnou soustavu. Volme ohniskovou vzdálenost členů pankratické soustavy

$$f_1' = f_2' = 0,35\Delta$$

a určeme nejmíň  $(\epsilon)_{m_1}$ . Dostaneme

$$(\epsilon)_{m_1} = (\epsilon)_{m_2} = \frac{\Delta}{2} - \sqrt{\frac{\Delta^2}{2} - 2\Delta f' - f'^2 \frac{(m_1-1)^2}{m_1}} =$$

$$= 0,5\Delta - \sqrt{0,25\Delta^2 - 0,70\Delta^2 - 0,35^2 \frac{(-0,577-1)^2}{0,577} \Delta^2} =$$

$$= 0,22\Delta.$$

Nyní určíme  $x_1$  resp.  $x_2$  pro obě krajní zvětšení  $m_1$  resp.  $m_2$ :

$$(x_1)_{\frac{m}{m}} = \frac{ef' - r'^2 \frac{m-1}{m}}{2f' - e} = \frac{0,22 \cdot 0,35 \Delta^2 - 0,35^2 \frac{-0,577-1}{-0,577}}{0,70 \Delta - 0,22} \Delta^2 = -0,54 \Delta$$

$$(x_2)_{\frac{m}{m}} = f' \frac{(1-m_1)f'-e}{2f' - e} = 0,35 \Delta \frac{(1+0,577) \frac{0,35 \Delta}{-0,22 \Delta}}{0,70 \Delta - 0,22 \Delta} = 0,24 \Delta$$

$$(x_1)_{\frac{m}{m}} = \frac{0,22 \cdot 0,35 \Delta^2 - 0,35^2 \frac{-1,732-1}{-1,732}}{0,70 \Delta - 0,22 \Delta} \cdot \Delta^2 = -0,24 \Delta$$

$$(x_2)_{\frac{m}{m}} = 0,35 \Delta \frac{(1+1,732) \frac{0,35 \Delta}{-0,22 \Delta}}{0,70 \Delta - 0,22 \Delta} = 0,54 \Delta .$$

Určeme nyní ještě  $(e)_{\frac{m}{m}} = -1$ ,  $(x_1)_{\frac{m}{m}} = -1$  a  $(x_2)_{\frac{m}{m}} = -1$  pro zvětšení  $m = -1$ . Dostane-  
me

$$(e)_{\frac{m}{m}} = -1 = 0,5 \Delta - \sqrt{0,25 \Delta^2 - 0,70 \Delta^2 - 0,35^2 \frac{(-1-1)^2}{-1}} \Delta^2 = 0,3 \Delta$$

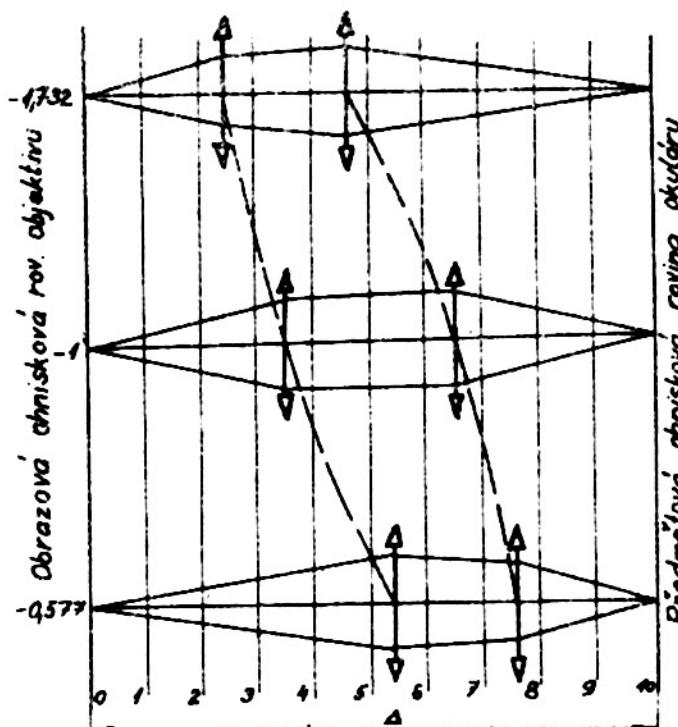
$$(x_1)_{\frac{m}{m}=-1} = \frac{0,22 \cdot 0,35 \Delta^2 - 0,35^2 \frac{-1-1}{-1}}{0,70 \Delta - 0,22 \Delta} \Delta^2 = -0,35 \Delta$$

$$(x_2)_{\frac{m}{m}=-1} = 0,35 \Delta \frac{2 \cdot 0,35 \Delta - 0,22 \Delta}{0,70 \Delta - 0,22 \Delta} = 0,35 \Delta .$$

Kontrola:  $\Delta = 0,35 \Delta + 0,3 \Delta + 0,35 \Delta = 1,00 \Delta$ .

Průběh pohybu obou členů této souměrné soustavy je patrný z obr. 11.3.5.

Jak bylo úvodem řečeno, jsou souměrné pankratické soustavy výhodné z hlediska korekčního. Každou pankratickou soustavu lze totiž korigovat pouze pro jedno její zvětšení. Při naustavení soustavy na jiné zvětšení se korekční stav na obě strany zhoršuje.



Obr. 11.3.5 Průběh pohybu členů souměrné pankratické soustavy.

Souměrná soustava se koriguje pro zvětšení  $m = -1$ . Vady soustavy od tohoto zvětšení pak na obě strany rostou. U souměrné soustavy však dochází k příznivé kompenzaci těchto vad, neboť otvorová vada soustavy bude největší pro největší zvětšení, avšak tomuto zvětšení na obrazové straně odpovídá nejmenší apertura a obráceně v případě nejmenšího zvětšení.

Souměrná pankratická soustava je výhodná i z hlediska výroby optických částí i z hlediska výroby šroubovice o proměnném stoupání, která realisuje automatický posuv členů soustavy.

Všechny předchozí příklady byly provedeny za předpokladu tenkých čoček. Protože při řešení praktického případu musíme počítat s tlustými čočkami, postupujeme tak, že od daného intervalu  $\Delta$  nejdříve odečteme součet tloušťek (vzdáleností hlavních bodů) čoček, které použijeme jako členů převracející soustavy a s takto upravenou hodnotou  $\Delta'$  pak pracujeme již s použitím tenkých čoček.

Určením ohniskových vzdáleností a poloh  $x_1$  resp.  $x_2$  členů pankratické soustavy není problém návrhu dalekohledu ukončen. Je nutno ještě v souvislosti s ostatními částmi dalekohledu, tj. objektivu a okuláru, určit průměry těchto soustav tak, aby dalekohledem prošel i z okrajů zorného pole v celém rozsahu jeho měnitelného zvětšení dostatečně široký paprskový svazek.

Provědme proto kontrolu průchodu paprskových svazků pankratickým dalekohledem. Nejlépe se to provede graficky. Dříve však musíme provést návrh celého dalekohledu. Uvažujme proto následující příklad:

Má se nevrhnout pankratický dalekohled s plynule proměnným zvětšením v rozsahu od 2 - 6 - krát, se souměrnou převracející soustavou. Nechť zvětšení 6x odpovídá výstupní pupila o průměru  $D' = 4$  mm ležící ve vzdálenosti cca 30 mm za okulárem. Konečně nechť skutečné zorné pole dalekohledu je  $6,5^\circ$ .

Pro průměr  $D$  objektivu vychází

$$D = D' \cdot f' = 4 \cdot 6 = 24 \text{ mm}.$$

Potom pro průměr výstupní pupily odpovídající krajnímu zvětšení  $f' = 2$  vychází

$$D' = \frac{D}{f'} = \frac{24}{2} = 12 \text{ mm}.$$

Je vidět, že tento průměr daleko převyšuje maximální hodnotu průměru výstupní pupily.

Pro ohniskovou vzdálenost  $f'$  objektivu volme s ohledem na příznivý relativní otvor hodnotu 105 mm.

Protože převracející soustava má být souměrná, vychází pro její zvětšení podle (11.3.19) a (11.3.20)

$$\left. \begin{aligned} m_1 \cdot m_2 &= 1 \\ \frac{m_1}{m_2} &= \frac{2}{6} = \frac{1}{3} \end{aligned} \right\},$$

odkud

$$m_1 = - \frac{1}{\sqrt{3}} = - 0,577$$

$$m_2 = - \sqrt{3} = - 1,732.$$

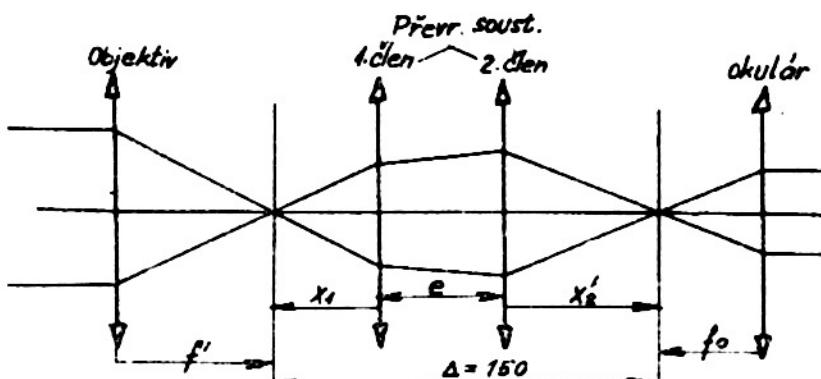
Pro krajní zvětšení  $f'_1$  dalekohledu musí tedy platit

$$f'_1 = - \frac{f'}{f'_0} \cdot m_1,$$

kde  $f'$  a  $f'_o$  značí ohniskovou vzdálenost objektivu resp. okuláru dalekohledu. Odtud plynne pro ohniskovou vzdálenost okuláru

$$f'_o = - \frac{f'}{f_1} \cdot m_1 = \frac{105}{2} : 0,577 = 30 \text{ mm}.$$

Volme podle obr. 11.3.6 pro vzdálenost  $\Delta$  obrazové ohniskové roviny objektivu a předmětové ohniskové roviny okuláru hodnotu 150 mm. Potom ve shodě s příkladem souměrné paraxatické soustavy řešeném v odstavci V. vychází pro polohy  $x_1$  resp.  $x_2'$  obou členů prevracející soustavy pro obě krajní hodnoty zvětšení  $m_1 = -0,577$  resp.  $m_2 = -1,732$ , volime-li  $f'$  přev. = 0,35  $\Delta = 0,35 \cdot 150 = 52,5 \text{ mm}$ :



Obr. 11.3.6 Optická soustava paraxatického dalekohledu.

$$(x_1)_{m_1} = -0,54 \Delta = -0,54 \cdot 150 = -81 \text{ mm}$$

$$(x_2')_{m_1} = 0,24 \Delta = 0,24 \cdot 150 = 36 \text{ mm}$$

$$(e)_{m_1} = 0,223 \Delta = 0,223 \cdot 150 = 33 \text{ mm}$$

$$(x_1)_{m_2} = -36 \text{ mm}$$

$$(x_2')_{m_2} = 81 \text{ mm}$$

Pro zdánlivé zorné pole dalekohledu vychází

$$(\tau')_{m_1} = 6,5 \times 2 = 13^\circ$$

$$(\tau')_{m_2} = 6,5 \times 6 = 39^\circ.$$

Je proto nutno volit okulár o zorném poli cca  $40^\circ$ , např. okulár souměrný. Nechť vzdálenost  $F_o F'_o$  hlavních bodů okuláru je 7 mm.

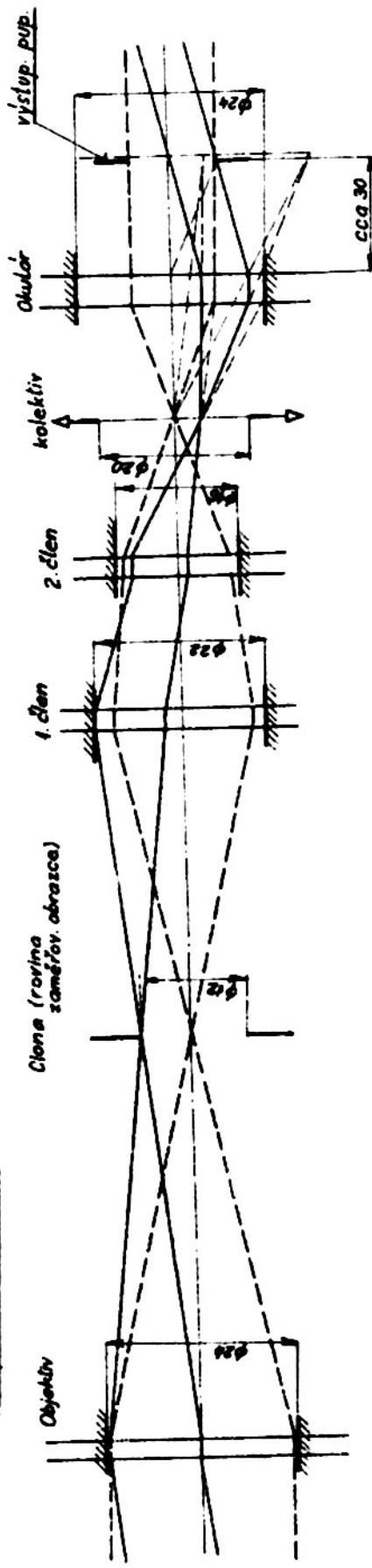
Pro objektiv a oba členy paraxatické soustavy budeme volit achromatické čočky. Nechť vzdálenost jejich hlavních bodů je cca 5 mm.

Nyní tedy můžeme přistoupit ke grafickému sledování průchodu paprskových svazků dalekohledem.

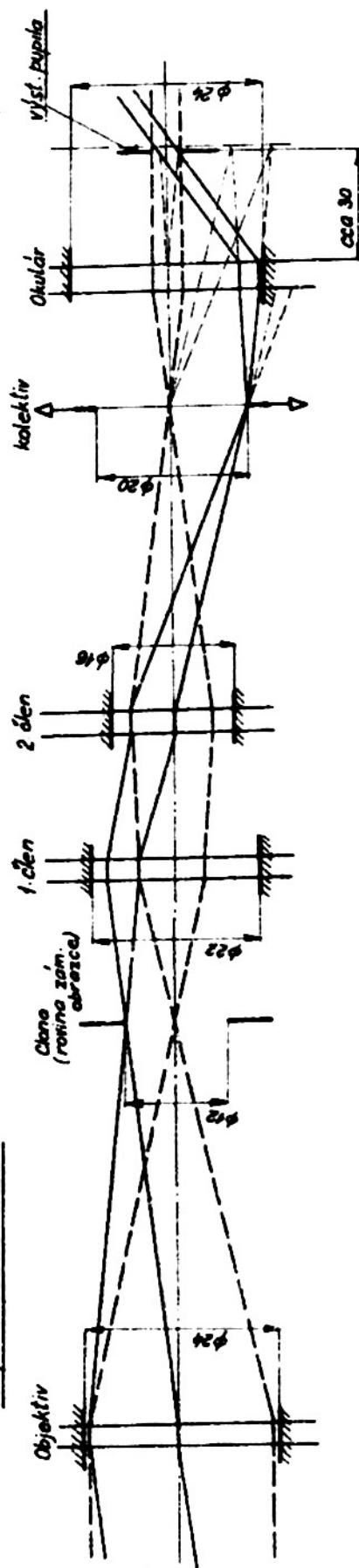
Na obr. 11.3.7 (viz str. 112) jsou vykresleny jednotlivé členy dalekohledu. Příčné rozměry těchto členů z důvodu vyšší přesnosti jsou vyneseny v dvojnásobném měřítku. Na obrázku jsou vyznačeny červeně (plně) paprsky vycházející ze středu

Panoramický dalekohled 2-6x s kollektivem před okulárem ( $f'_k = 68$  mm)

1) Případ zvětšení 2x



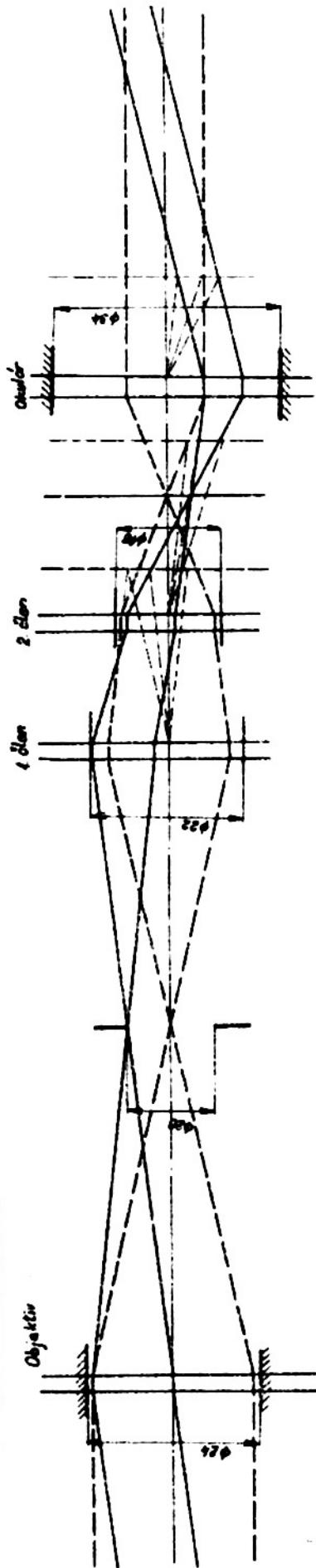
2) Případ zvětšení 6x



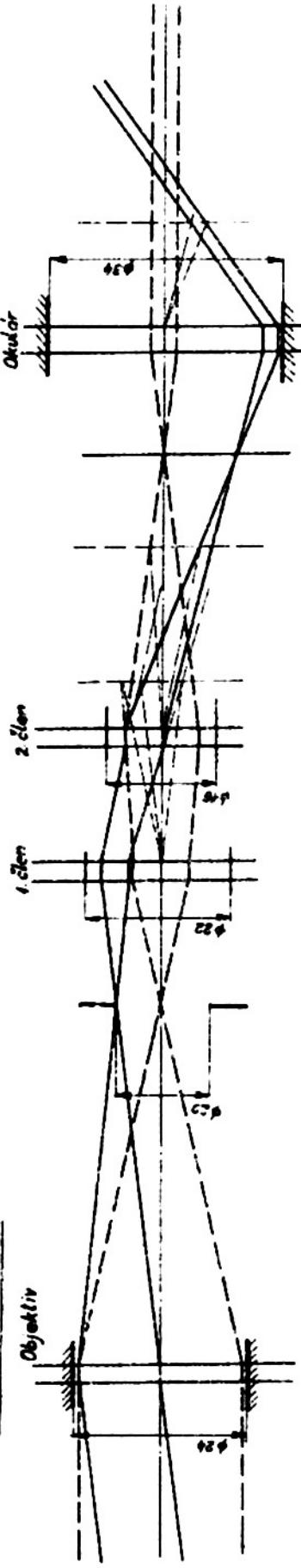
Obr. 11.3.7

Pendulárky dvochach 2-6x bez kolotiv.

1) Prípad zvetšenia 2x



2) Prípad zvetšenia 6x



Obr. 11.3.8

pole s modře (čárkované) paprsky vycházející z okraje zorného pole. Přitom horní obrázek vyznačuje situaci pro krajní zvětšení  $\Gamma_1 = 2$  a dolní obrázek pro krajní zvětšení  $\Gamma_2 = 6$ .

Z těchto obrázků je vidět, že v případě zvětšení  $\Gamma_2 = 6$  se vyžadují okrajové paprsky velký průměr okuláru (= 34 mm). Je proto nutné začlenit do předmětové ohniskové roviny okuláru kolektiv o ohniskové vzdálenosti cca  $f_k = 68$  mm, jak je to provedeno na obr. 11.3.8 (viz str. 113). Potom je možno zmenšit průměr okuláru na 24 mm, což odpovídá konstrukci souměrného okuláru.

Záměrná plotenka se umístí u pankratického dalekohledu vždy v obrazové ohniskové rovině objektivu.

Z horního obrázku 11.3.7 je vidět, že průměr prvního členu převracející soustavy je poměrně veliký (= 22 mm). V případě potřeby je však možné bez obav tento průměr zmenšit, neboť průměr výstupní pupily je 12 mm a je tedy možno jej snížit.

Celková délka dalekohledu  $L = f' + \Delta + f'_0 = 105 + 150 + 30 = 285$  mm.

#### 11.3.4. Kinematika pankratických soustav

Řešme např. pankratický dalekohled, jehož zvětšení by se plynule měnilo v rozsahu 4 - 12. Nechť zvětšení vlastního Keplerova dalekohledu  $\Gamma = -4$ . Volme vzdálenost  $\Delta = 200$  mm.

Pro zvětšení převracející pankratické soustavy plyně

$$m_1 = \frac{\Gamma_1}{\Gamma} = \frac{4}{-4} = -1$$

$$m_2 = \frac{\Gamma_2}{\Gamma} = \frac{12}{-4} = -3 .$$

Volme

$$(x_1)_m = -75 \text{ mm} ,$$

$$(x_2)_m = 50 \text{ mm} ,$$

potom

$$(e)_m = 75 \text{ mm} .$$

Pro ohniskové vzdálenosti  $f'_1$  a  $f'_2$  členů převracející soustavy plyně

$$f'_1 = \frac{e x_1}{x_1 - e - \frac{x_2}{m_1}} = \frac{75 \cdot (-75)}{-75 - 75 - \frac{50}{-1}} = 56,25 \text{ mm}$$

$$f'_2 = \frac{x_2 e}{e - x_1 m_1 + x_2} = \frac{50 \cdot 75}{75 - 75 + 50} = 75 \text{ mm} .$$

Známe-li  $f'_1$  a  $f'_2$ , můžeme postupně určit vzdálenost  $(e)_m$  a  $(x_1)_m$  resp.  $(x_2)_m$  pro zvětšení

$$m = -1, -1,2, -1,4, \dots, -2,8, -3,0 .$$

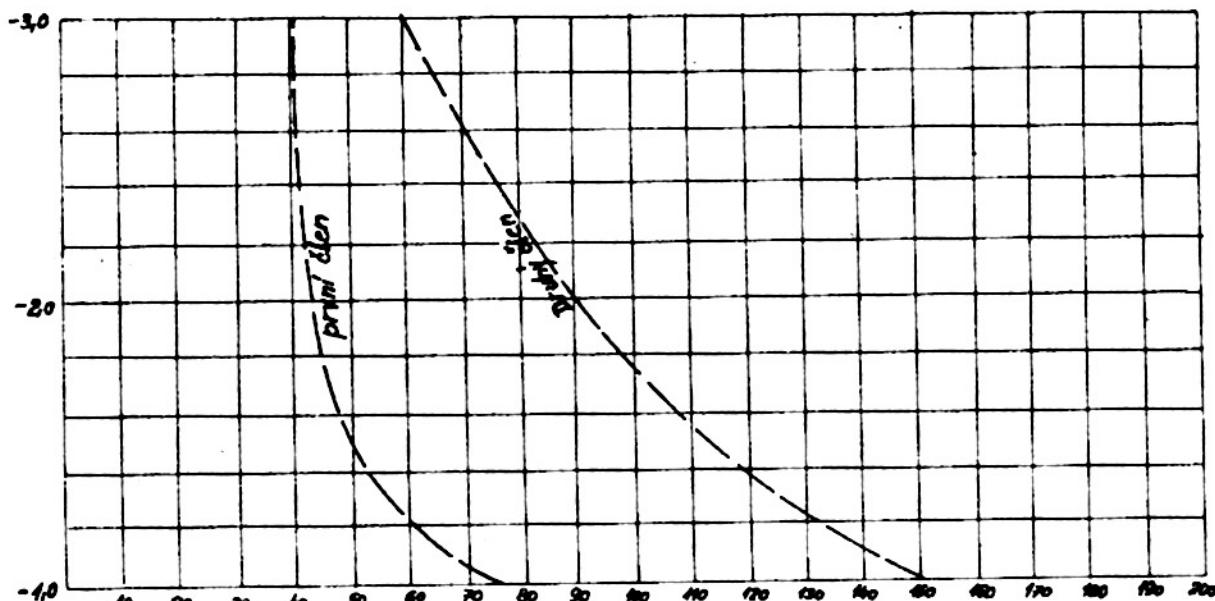
Příslušné hodnoty jsou sestaveny do tabulky 11.4.1 (viz str. 115).

Sestrojme z těchto hodnot graf závislosti  $(x_1)_m$  resp.  $(x_2)_m$  na zvětšení  $m$ , jak je to provedeno na obr. 11.4.1 (viz str. 115).

Z tohoto grafu je vidět, že závislost poloh  $x_1$  resp.  $x_2$  obou členů pankratické soustavy na zvětšení  $m$  je nelineární a že je tato závislost pro oba členy odlišná.

Tab. 11.4.1

$x$	$(e)_m$	$(x_1)_m$	$(x_2')_m$
- 1,0	75	- 75	50
- 1,2	72,33	- 62,21	65,45
- 1,4	66,73	- 53,92	79,36
- 1,6	60,32	- 48,82	90,86
- 1,8	53,90	- 45,65	100,46
- 2,0	47,70	- 43,63	108,67
- 2,2	41,81	- 42,31	115,88
- 2,4	36,20	- 41,46	122,34
- 2,6	30,87	- 40,89	128,24
- 2,8	25,79	- 40,53	133,67
- 3,0	20,94	- 40,31	138,74



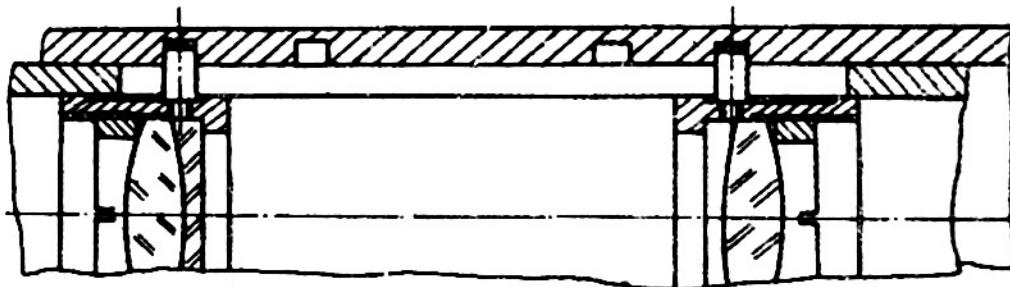
Obr. 11.4.1 Průběh pohybu obou členů pankratické soustavy v rozsahu plynulé změny zvětšení.

Pankratický dalekohled musí být konstruován tak, aby pohyb obou členů soustavy byl v průběhu změny jeho zvětšení plně automatizován. Konstrukčně lze to provést např. následujícím způsobem:

Objímky obou členů pankratické soustavy se uloží suvně ve společném tubusu, který je opatřen podél povrchové přímky protáhlou drážkou, jejíž délka odpovídá délce posuvu obou členů. Každá z obou objímek členů soustavy je opatřena válcovým radiálním kolíčkem o průměru rovném šířce drážky. Tyto kolíčky prochází drážkou a jejich vnější konec přesahuje poněkud vnější plochu společného tubusu. Na tomto tubusu je otočně uložen další tubus, který je opatřen drážkami tvaru šroubovic s proměnným stoupáním odpovídajícím křivkám na obr. 11.4.1. Přečnívající části zmíněných kolíčků zasahují do těchto šroubových drážek. Otačíme-li vnějším tubusem tak, aby se sám axiálně nepohyboval, posouvají se obě objímky tak, že čočky převra-

cející soustavy zaujímají polohy, které jsou v souladu s tabulkou 11.4.1. Princip této konstrukční úpravy je vidět na obr. 11.4.2.

Výroba šroubových drážek o proměnném stoupání je technicky velmi náročná a nákladná. Proto se při konstrukci pankratických dalekohledů postupuje tak, že se jedna z obou šroubovic redukuje na šroubovici s konstantním stoupáním, zatím co proměnné stoupání druhé šroubovice se přispásobí tak, aby oba členy zaujímaly správné polohy odpovídající nastavenému zvětšení.



Obr. 11.4.2 Konstrukční úprava posuvu objímk členů pankratické soustavy.

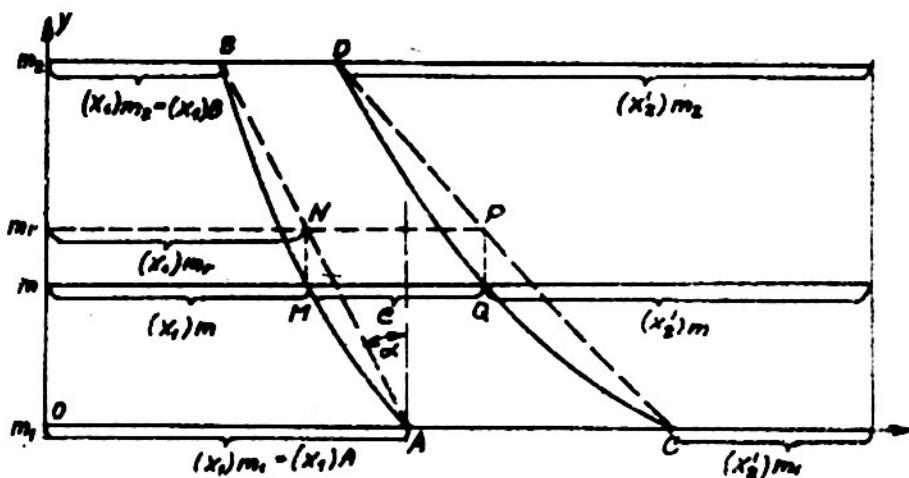
Protože uvažované šroubové drážky rovinuté do roviny mají dát křivky snášející sávialost poloh  $x_1$  resp.  $x_2$  na zvětšení  $m$ , jak je to provedeno na obr. 11.4.1, postupujeme při úpravě jedné šroubovice na šroubovici s konstantním stoupáním takto:

Měchť na obr. 11.4.3 značí A,B resp. C,D koncové body uvažovaných křivek, t.j. poloh obou členů pankratické soustavy pro krajní hodnoty zvětšení  $m$ .

Předpokládejme, že budeme redukovat první křivku AB. Z názoru je jasné, že tu to křivku musíme nahradit přímou AC.

Zvolme prevodníkou soustavu  $x, y$  tak, aby osa  $x$ -ová slyšela se spojnicí AC a  $y$ -ová ležela v obrazové ohniškové rovině objektivu. Potom rovnici přímky AB můžeme psát ve tvaru

$$x = (x_1)_{\Delta} - y \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (11.4.1)$$



Obr. 11.4.3 K redukcii obecné šroubovicki na šroubovici s konstantním stoupáním.

příčení

$$y = \ell (z - z_1), \quad (11.4.2)$$

kde  $\ell$  značí jednotku délky zvolenou v grafu 11.4.3 pro světlovi  $\overline{g}$ .

Aby posuv prvního člena byl hladký, musí být  $\alpha$  uplatňovat podmínku

$$\alpha \leq 30^\circ.$$

Musí tedy platit

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{(x_1)_A - (x_1)_B}{\Delta (z_2 - z_1)} \leq 0.6. \quad (11.4.3)$$

Dosadíme-li do rovnice (11.4.1) přímky  $\overline{AB}$  za  $y$  a  $\operatorname{tg} \alpha$  ze vztahu (11.4.2) a (11.4.3), dostaneme

$$x = (x_1)_A - \frac{[(x_1)_A - (x_1)_B] (z - z_1)_A}{z_2 - z_1},$$

nebo po úpravě

$$x = \frac{z [(x_1)_B - (x_1)_A] + (x_1)_A \cdot z_2 - (x_1)_B \cdot z_1}{z_2 - z_1}. \quad (11.4.4)$$

Dosadíme-li do tohoto vztahu za  $z$  hodnotu  $x_1$  určenou ze vztahu (11.3.1), který musíme pevně ve tvaru

$$x = -(x_1)_B = \frac{x_1 f_1^2 \frac{\Delta}{f_1} - e f_1^2}{f_1^2 + f_2^2 - e}, \quad (11.4.5)$$

neboli nyní v nejdejších úvahách během vzdálenosti  $x_1$  i světlovi  $\overline{g}$  absolutně, můžeme od tu určit hodnotu  $z_1$  příslušného bodu  $N$  na uvažované přímce.

$$z_1 = \frac{x (z_2 - z_1) - (x_1)_A \cdot z_2 + (x_1)_B \cdot z_1}{(x_1)_B - (x_1)_A}. \quad (11.4.6)$$

Pro  $y$ -ovou souřadnici bodu  $N$  vychází pak

$$y_1 = \ell (z_1 - z_1). \quad (11.4.7)$$

Pro souřadnice bodu  $P$  druhé, upravené křivky pak vychází

$$\left. \begin{aligned} z_2 &= \Delta - x_2^2 \\ y_2 &= \ell (z_2 - z_1) \end{aligned} \right\} \quad (11.4.8)$$

kde

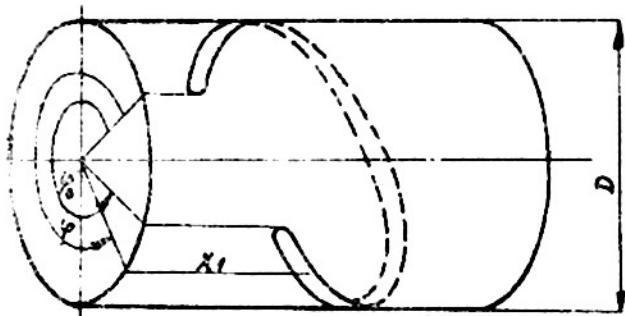
$$x_2^2 = f_2^2 \cdot \frac{(1 + e) f_1^2 - e}{f_1^2 + f_2^2 - e}. \quad (11.4.9)$$

Tím jsou určeny souřadnice  $x_1 = -(x_1)_B$ ,  $y_1$  resp.  $x_2$ ,  $y_2$  bodů přímky  $\overline{AB}$  a upravené křivky  $\overline{CD}$  odpovídající světlení  $\overline{g}$ .

Shrneme-li celý postup, je možno říci, že při redukcii jedné křivky na přímku postupujeme takto:

$$\text{Ke každé hodnotě } x_1 = \frac{f_1 f_2 \frac{\Delta}{f_1} - e f_1}{f_1^2 + f_2^2 - e}$$

určené pro jednotlivé hodnoty světlení  $\overline{g}$ , najdeme ze vztahu (11.4.6) odpovídající hodnotu redukovaného světlení  $z_1$ . Pomocí této hodnoty určíme ze vztahu (11.4.7) souřadnici  $y_1 = y_2$ . Konečně ze vztahu (11.4.8) určíme souřadnici  $x_2$  použití hodnoty  $x_2^2$  určené ze vztahu (11.4.9).



Obr. 11.4.4 K určení souřadnic bodů šroubových drážek tubusu pankratického dalekohledu.

Nyní je nutno přejít od rozvinutých šroubovic do roviny na válcový tubus. Označíme-li  $D$  průměr tohoto válce, pak podle obrázku 11.4.4 platí pro úhlovou délku šroubovic

$$\frac{l(m_2 - m_1)}{\pi \cdot D} = \frac{\varphi}{360}$$

čili

$$\varphi = \frac{360 \cdot l(m_2 - m_1)}{\pi D} .$$

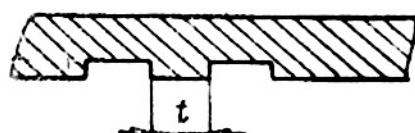
Dosadíme-li sem za  $l$  hodnotu určenou dříve vztahem (11.4.3), dostaneme

$$\varphi = \frac{360 \left[ (x_1)_A - (x_1)_B \right]}{\pi \cdot D \cdot \operatorname{tg} \alpha} , \quad (11.4.10)$$

nebo za předpokladu  $\operatorname{tg} \alpha = 0,6$

$$\varphi = 600 \frac{(x_1)_A - (x_1)_B}{\pi \cdot D} . \quad (11.4.11)$$

Úhel  $\varphi$  značí úhel, o který je nutno otočit tubus se šroubovými drážkami, abychom přešli od jednoho krajního zvětšení ke druhému krajnímu zvětšení.



Obr. 11.4.5 Kontrola tloušťky stěny mezi sousedními závity.

Vyjde-li úhel  $\varphi > 360^\circ$ , je nutné přeskoušet, zda mezi sousedními závity šroubovice abývá dostatečně silná stěna  $t$ , jak je to naznačeno na obr. 11.4.5. V nepříznivém případě je nutno zvětšit průměr  $D$ .

Pro válcové souřadnice bodu odpovídajícímu libovolnému zvětšení  $m$  pak vychází

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \frac{360 \ell(m_r - m_l)}{\pi D} .$$

Souřadnice  $x_1$  resp.  $x_2$  zůstávají stejné jako v rozvinutém stavu a jsou určeny vztahy (11.4.5), (11.4.8) resp. (11.4.9).

#### Příklad

Určeme postupně souřadnice  $x_1$  a  $x_2$ ,  $y_1 = y_2$  bodů obou šroubovic v rozvinutém stavu pro zvětšení  $m = -1,4; -2,0; 2,6$  našeho příkladu uvedeného v úvodu této kapitoly.

Podle tab. 11.4.1 vychází pro zvětšení  $m = 1,4$  (nyní běžeme zvětšení a vzdálenost  $r_1$  absolutně):

$$m_r = \frac{53,92 \cdot (3-1) - 75,3 + 40,31 \cdot 1}{40,31 - 75} = 2,215$$

$$y_1 = 50 (2,215 - 1) = 60,75 \text{ mm} ,$$

neboť v našem případě (viz obr. 11.4.1) jsme volili  $\ell = 50 \text{ mm}$ . Tedy

$$x_1 = 53,92 \text{ mm}$$

$$x_2 = 200 - 79,36 = 120,64 \text{ mm}$$

$$y_1 = y_2 = 60,75 \text{ mm} .$$

Podobně pro zvětšení  $m = 2,0$  vychází

$$n_y = \frac{43,63 \cdot 2 - 75,3 + 40,31 \cdot 1}{40,31 - 75} = 2,808$$

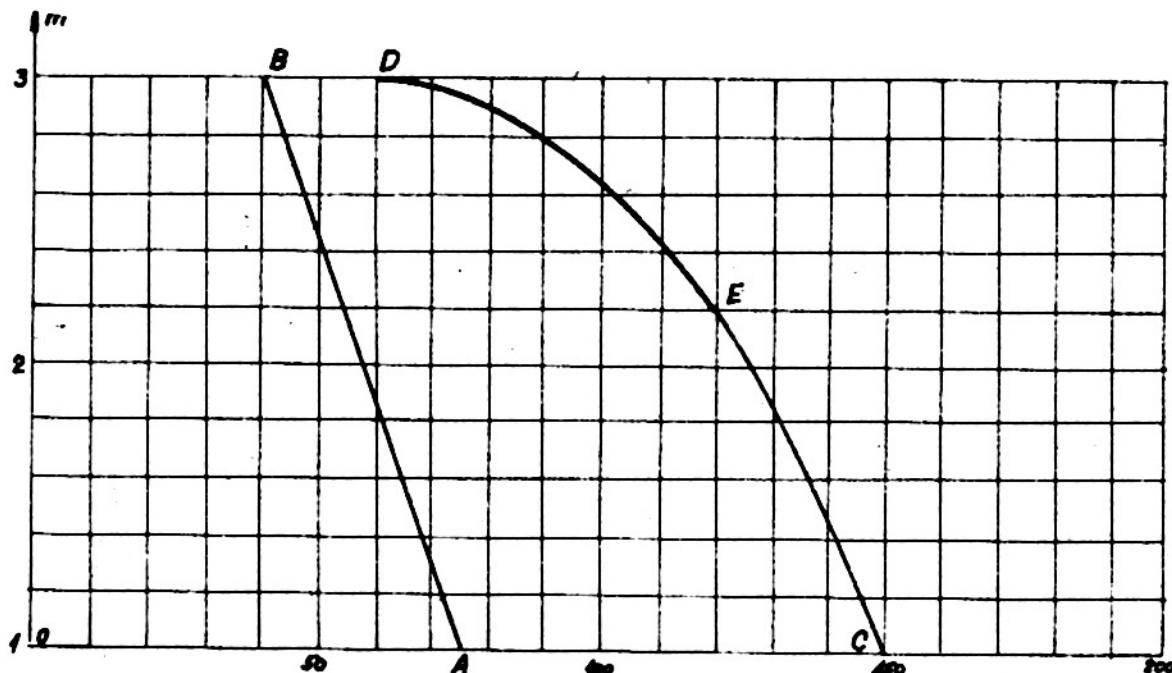
$$y_1 = 50 (2,808 - 1) = 90,40 \text{ mm}.$$

Tedy nyní je

$$x_1 = 43,63 \text{ mm}$$

$$x_2 = 200 - 108,67 = 91,33 \text{ mm}$$

$$y_1 = y_2 = 90,40 \text{ mm}.$$



Obr. 11.4.6 Redukce šroubovic pankratického dalekohledu.

Konečně pro zvětšení  $m = 2,6$  plyne

$$n_y = \frac{40,89 \cdot 2 - 75,3 + 40,31 \cdot 1}{40,31 - 75} = 2,965$$

$$y_1 = 50 (2,965 - 1) = 98,25 \text{ mm},$$

takže

$$x_1 = 40,89$$

$$x_2 = 200 - 128,24 = 71,76 \text{ mm}$$

$$y_1 = y_2 = 98,25 \text{ mm}.$$

Kontrolu provedeme graficky tím, že vyneseme nalezené výsledky do grafu na obr. 11.4.6.

Z tohoto obrázku je vidět, že druhá křivka se po redukcí transformuje velmi nepříznivě, neboť v části ED je její sklon příliš malý, takže by při posuvu druhého člena docházelo ke vspírání.

Tuto závadu nutno odstranit tak, že provedeme místo redukce první křivky redukci druhé křivky na přímku a současně zvolíme pro zvětšení větší jednotku délky a sice místo  $l = 50$  hodnotu  $l = 100 \text{ mm}$ .

Určeme opět souřadnice tří bodů uvažovaných šroubovic pro tři zvětšení  $m = 1,4$ ,  $2,0$  a  $1,6$ .

Nejdříve však musíme upravit vztah (11.4.6) pro druhou křivku na tvar

$$x_p = \frac{(200 - x) (m_2 - m_1) - [200 - (x_1)_C] \cdot m_2 + [200 - (x_1)_D] \cdot m_1}{[200 - (x_1)_D] - [200 - (x_1)_C]} .$$

Potom dostáváme postupně pro každou z tří hodnoty světla

a)  $m = 1,4$

$$x_p = \frac{(200 - 79,36) \cdot 2 - (200 - 50) + (200 - 138,74) \cdot 1}{(200 - 138,74) - (200 - 50)} = 1,665$$

$$y_1 = 100 (1,665 - 1) = 66,5 \text{ mm, takže}$$

$$x_1 = 53,92 \text{ mm}$$

$$x_2 = 120,64 \text{ mm}$$

$$y_2 = y_1 = 66,5 \text{ mm}$$

b)  $m = 2$

$$x_p = \frac{(200 - 108,67) \cdot 2 - 150 + 61,26}{88,74} = 2,32$$

$$y_1 = 100 (2,32 - 1) = 132 \text{ mm, takže}$$

$$x_1 = 43,63 \text{ mm}$$

$$x_2 = 91,33 \text{ mm}$$

$$y_1 = y_2 = 132 \text{ mm.}$$

c)  $m = 2,6$

$$x_p = \frac{(200 - 128,24) \cdot 2 - 450 + 61,26}{88,74} = 2,76$$

$$y_1 = 100 (2,76 - 1) = 176 \text{ mm, takže}$$

$$x_1 = 40,89 \text{ mm}$$

$$x_2 = 71,76 \text{ mm}$$

$$y_1 = y_2 = 176 \text{ mm.}$$

Z grafu 11.4.7 je vidět, že nyní je sklon obou čar v celém průběhu příznivý, takže je možno vyloučit obavy, že by při posunu obou členů pankratické soustavy došlo ke inspiraci.

O problémech pankratických převracejících soustav je podrobně pojednáno v různých článkotech.<sup>x)</sup>

## 12. BINOKULÁRNÍ DALEKOHLEDY

Binokulární dalekohledy jsou přístroje, které umožňují současné pozorování obou očí. Dříve než přistoupíme k řešení těchto dalekohledů, musíme se poněkud posetavit u problému vležného binokulárního vidění.

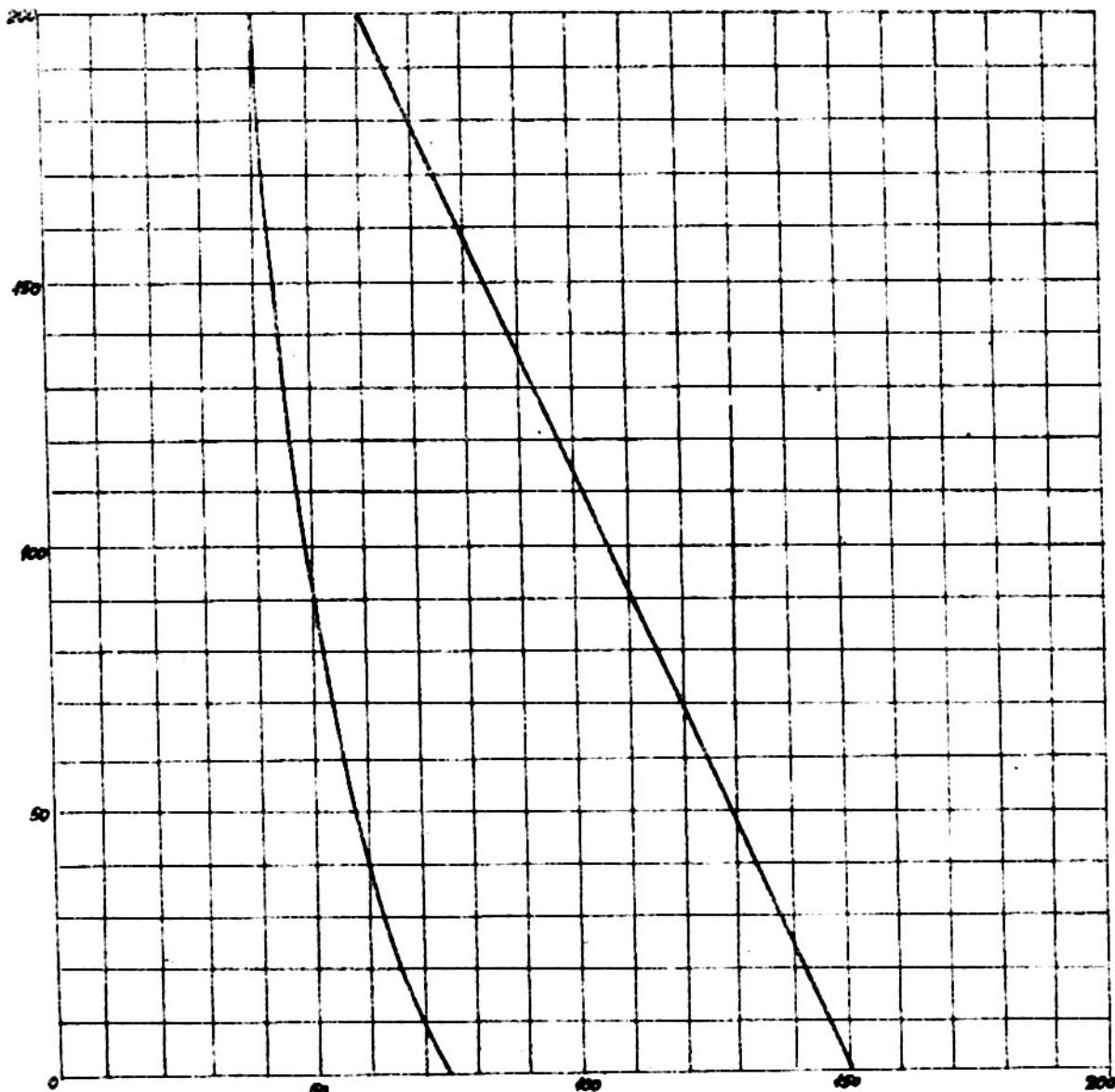
### 12.1. Fyziologie binokulárního vidění

Zrakový nerv vystupuje z zadního oku v místě slepé skvrny a prochází otvorem na dně očnice délky k mechn. V tzv. místě "křížení" (viz obr. 12.1.1 na str. 122), kde se buď nervy kříží nebo kde se rozdělují, přecházejí z vnitřních polovin sítnic

x) Günther Körffl: Grundlagen für eine Theorie pankratischen Systems, Z. f. I. 10, 1941, 321 - 337.

E. Erflies: Beiträge zur Geschichte und geometrischen Optik des Umhersystems mit veränderlicher Vergrößerung, Z.f.I. 1921, 107 - 116.

M.L. Dunoyer: Avants - projets de véhicules de lunette à grossissement variable, Revue d' Optique, 1924, 353.



Cbr. 11.4.7 Průběh Šroubovic po druhé redukci.

přivrácených k nosu na opačnou část mozků a obráceně z vnějších polovin sítnic na stejnolehlou část mozků. Proto podráždění levých polovin sítnic obou očí se přenáší na levou část a podráždění pravých polovin sítnic na pravou část mozků.

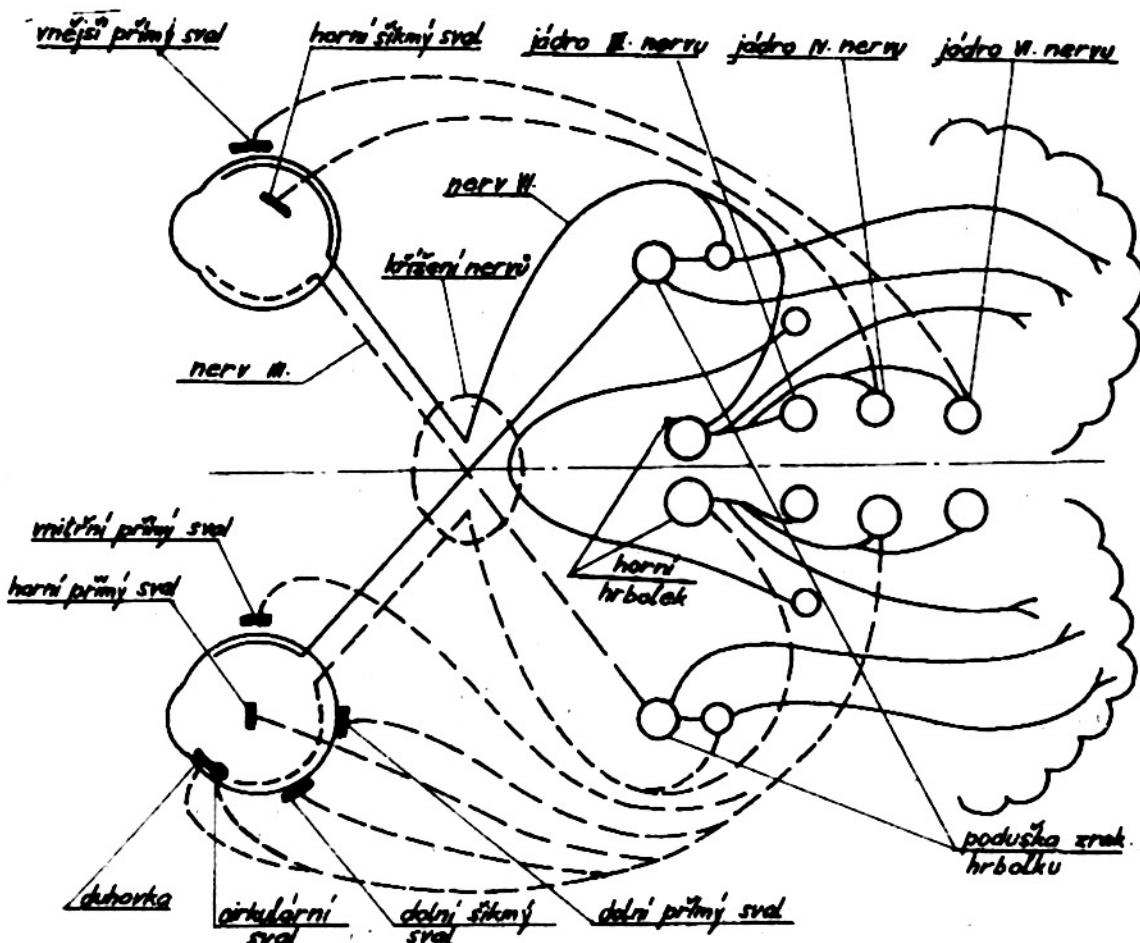
Při normálním pozorování nějakého předmětu se natočí obě oči směrem na pozorovaný předmět tak, že se vyvolá jediný vjem, tj. nedvojený obraz tohoto předmětu. Zaměření očí na předmět je uskutečňováno automaticky pohybovými svaly obou očí, které jsou ovládány mozkovými nervovými jádry III., IV. a VI. Všechny pohybové svaly pracují současně, takže nedvojený vjem pozorovaného předmětu vzniká bez patrného úsilí.

Ovládání pohybovým očním orgánem je velmi složitý, neboť mimo potřebné nastáčení obou očí na pozorovaný předmět musí řídit též akomodaci tak, aby odpovídala vzdálenosti uvažovaného předmětu. Současně s tím ovládá pohybový orgán příslušným svalem i velikost oční pupily, kterou přispívá k optimální rozlišovací schopnosti.

Normální podmínky svalové rovnováhy, při kterých jsou optické osy obou očí

vzájemně rovnoběžné a oční svaly se nacházejí v klidu, se nazývají jedním slovem orthophorie. Podmínky svalové rovnováhy, při kterých nejsou optické osy rovnoběžné, i když jsou oční svaly v klidu, se nazývají heterophorie. Optické osy se mohou v tomto druhém případě sbíhat v prostoru před očima a potom říkáme že konverguji, nebo se mohou sbíhat v prostoru za očima, čili diverguji.

Může však nastati obecnější případ, kdy každá osa je vychylena, takže pak je nutno mluvit o konvergenci jedné osy vzhledem k druhé apod.



Obr. 12.1.1 Schema srakových cest a spojení třetího, čtvrtého a šestého očního nervu.

V takových případech je možné dosáhnout jediného vjemu silnější inervací slabších svalů nebo nepodaří-li se to, dochází ke zdvojení obrazu.

V případě strabismu - silhání je svalová nerovnováha tak silná, že není možno dosáhnout jediného obrazového vjemu a dochází ke zdvojení obrazu.

### 12.2. Vynucené zdvojení obrazu

V optické praxi se často setkáváme s případy, kdy se oběma očím předkládají oddělené obrazy. Ukažuje se, že při soustředění pozornosti na jeden z obou prakticky stejných obrazů, je druhý obraz sotva patrný. Je možno se o tom přesvědčit různými testy. Stačí např. tlakem na jedno z obou očí vyvolat zdvojení obrazu.

nějakého vhodného předmětu. Pokud je tlakové úsilí malé, jsou oba obrazy stejně intenzivní. Zvýší-li se poněkud toto úsilí, stává se jeden z obou obrazů sotva patrný.

Jinak je možno se přesvědčit o tomto jevu pomocí stereoskopu. Upustime-li v zorném poli jedné poloviny stereoskopu např. černý kroužek na bílém pozadí a v zorném poli druhé poloviny stereoskopu černý kříž, bude se jevit vždy jeden z obou obrazů jasnější než druhý, podle toho, na který z nich soustředíme svou pozornost.

Jestli oběma očím předložíme prakticky stejné obrazy provedené v různých barvách, dojde k jakémusi "boji" mezi oběma barvami, což se projeví tím, že vnímáme obraz v jediné barvě. V některých případech, kdy jsou barvy obou obrazů vhodně voleny, dochází k additivnímu sčítání barev, takže potom vidíme jediný černobílý obraz. Tohoto spojení obrazů různých barev v jediný vjem nejsou schopni všichni pozorovatelé.

Tato vynucená spojení dvou různých obrazů jsou umožnována známými jevy v nervové soustavě, při kterých se v některých místech, zejména v místě křížení nervů, potlačuje jeden z obou nervových impulsů, takže pak silný impuls zaplní celou zrakovou dráhu a vyloučí plně impuls slabší.

Ukazuje se, že nervový impuls je hlavním jevem pouze pro jedno z obou očí. Můžeme se o tom přesvědčit jednoduchým pokusem. Vytvořme z palce a ukazováčku jedné ruky kroužek a pohybujme prudce touto rukou před očima tak, abychom otvorem vytvořeného kroužku viděli nějaký vhodný předmět. Zastavíme-li náhle pohyb ruky, abychom však přitom viděli i dále pozorovaný předmět, pak se ukazuje, že se obyčejně ruka zastaví tak, že střed kroužku leží na spojnici pozorovaného předmětu s jedním a tímž okem, tj. s okem, u kterého vzniká silnější impuls.

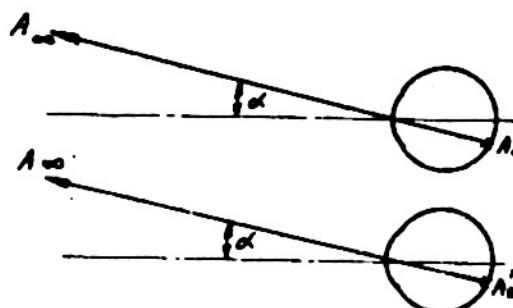
### 12.3. Prostorové vidění

Věinněme si nyní blíže vidění oběma očima, tj. binokulárního vidění. Předpokládejme, že pozorujeme očima předmět nekonečné vzdálenosti, např. bod A. Potom oční osy budou vzájemně rovnoběžné a obrazy pozorovaného předmětu se vytvoří na fovea centralis sítnic obou očí, jak je to naznačeno na obr. 12.3.1. K tomu je třeba, aby se oční osy natočily do směru, ve kterém se nachází bod A. Za tohoto předpokladu vidíme jediný předmět.

Předpokládejme nyní, že bod A bude ležet v konečné vzdálenosti. Abi obě oči viděly tento bod, musí se natočit v očních důlících tak, aby jejich oční osy se protinaly v pozorovaném bodě A, jak je to naznačeno na obr. 12.3.2 (viz str. 124).

Z této situace se opět vytváří obrazy bodu A na fovea centralis obou očí, takže pozorovatel vnímá zase jediný předmět. Úhel  $\varphi$ , který je tvoren očními osami se nazývá konvergenčním úhlem.

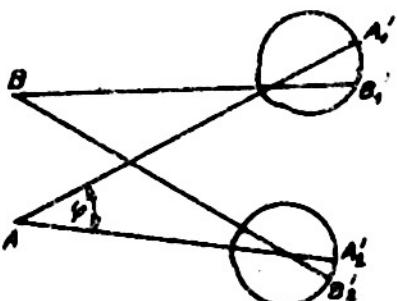
Přirozeně se nabízí následující otázka: Pozorujeme-li bod A, který přitom vnímáme jako jediný předmět, jak se nám budou jevit jiné body, např. bod B, jejichž obrazy se vytváří na okrajové části sítnice?



Obr. 12.3.1 K vysvětlení prostorového vidění.

Zkušenost ukazuje, že vnímání těchto bodů jako jednoduchých nebo zdvojených předmětů závisí na vzájemné poloze příslušných obrazů těchto bodů na obou sítnících. Jednotlivé body sítnice je možno totiž rozdělit na identické a disparitní.

Představme si, že obě oči jsou vzájemně pošinuty tak, že jejich sítnice tvoří jedinceho plochu a že fovea centralis obou sítnic slyvají v jeden bod. Potom body sítnic, které přitom padnou na sebe se nazývají identické a body, které neslyvají disparitní. Tedy identické body sítnic leží ve stejném směru a jsou stejně vzdáleny od fovea centralis.



Obr. 12.3.2 Binokulární pozorování předmětu v konečné vzdálenosti

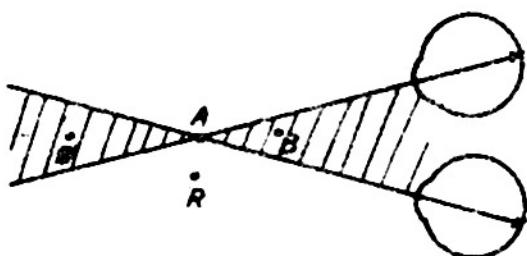
V okolí bodu A budou tedy existovat takové body B, jejichž obrazy padnou na identické body a takové body B', jejichž obrazy padnou na disparitní body sítnice. První skupina bodů bude vnímána jako skupina nerodvojených bodů, zatím co druhá skupina bodů bude vnímána jako skupina rozdvojených bodů.

O správnosti tohoto jevu se můžeme snadno přesvědčit pomocí dvou tužek, které budeme různě umísťovat před očima, při čemž vždy soustředíme pozornost na jednu z nich. Potom podle polohy se bude druhá jevit jako jednoduchá nebo zdvojená. Přitom se ukazuje, že v případě, kdy druhá tužka bude umístěna v prostoru vymezeném úhlem, který

je tvořen očními osami a bodem A (první tužkou) jako vrcholem, např. v bodě B resp. B', bude se jevit jako rozdvojené (viz obr. 12.3.3). Naopak, umístíme-li tužku v prostoru mimo uvažovaný úhel (např. v bodě R), bude se nám jevit stejně jako první tužka (bod A) nerodvojená a vzhledem k první tužce se bude jevit prostorově, tj. v jiné vzdálenosti. Tento jev prostorového vidění budeme pozorovat pokud druhá tužka (bod 2) nevystoupí z určité oblasti, která se rozprostírá vzhledem k bodu A směrem k menším i větším vzdálenostem.

Body, jejichž obrazy padnou na identické body sítnice, leží na zvláštní ploše, jejíž horizontální meridián je znázorněn na obr. 12.3.4 (viz str. 125). Body R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>, ... této plochy mají své obrazy na identických bodech R'<sub>1</sub>, R'<sub>2</sub>, R'<sub>3</sub> ..., zatím co bod B ležící mimo tuto plochu má svoje obrazy B' resp. B" na disparitních bodech sítnic. Každému bodu A, na které se soustředí pozornost obou očí, přísluší jedna určitá plocha.

I když obrazy některých bodů prostoru padnou na disparitní body sítnice, nejeví se vždy tyto body jako rozdvojené. Není-li totiž disparitnost velká, a leží-li při tom obrazy příslušných bodů na těchž polovinách (levých nebo pravých) sítnice, nejeví se tyto body jako rozdvojené a místo toho se nám jeví vzhledem k bodu A prostorově v jiných vzdálenostech.



Obr. 12.3.3 Prostory předmětu viděných rozdvojeně resp. nerodvojeně.

#### 12.4. Vnímání hloubky prostoru

Hloubku prostoru můžeme vnímat jak při monokulárním, tak i při binokulárním vidění. Při monokulárním vidění nám pomáhá při vytváření prostorového vjemu řada různých činitelů, k nimž zejména

patri: srovnání rozměrů viděných předmětů s rozměry těchto předmětů, jejichž velikost je pozorovatelem obyčejně známa ze zkušenosti, nebo změny barev a rozložení světla v stínu, překládání obrysů jednoho předmětu s obrysy druhých předmětů, nebo konečně velikost stereoskopického úsilí při pozorování různých předmětů společně. Jedním z nejdůležitějších faktorů, usnadňujících vnímání prostorových hloubek, je relativní paralaktický posuv jednoho předmětu vzhledem ke druhému, který je vyvolán pohybem oka. Je totiž známo, že při pohybu hlavy nebo celého pozorovatelského těla, jehož oko je akkomodováno na jakýkoliv předmět, se pohybují bližší předměty na opačnou stranu a vzdálenější předměty na tutéž stranu jako pozorovatelské oko.

Velkým přínosem pro vnímání prostoru je srovnávání obrazu podržovaného v paměti, který se vytvořil centrální projekcí na sítnici oka při jedné jeho poloze, a obrazem, který se znova vytváří na sítnici při nově zaujeté poloze středu centrální projekce, tj. při nové poloze oka.

Všechny faktory podmiňující vnímání prostorových hloubek při monokulárním vidění se uplatňují i v plném měřítku i při binokulárním vidění. Při binokulárním vidění však ještě přistupují další dva činitele ulehčující značnou míru prostorové vidění.

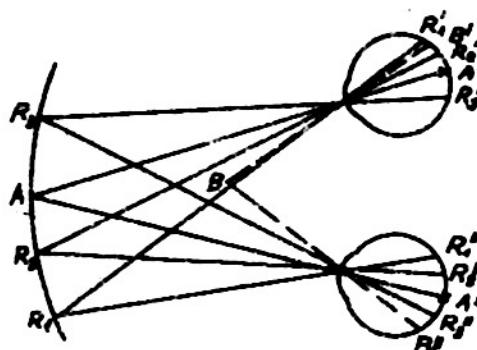
Prvním činitelem je konvergenční úhel, který se mění se vzdáleností předmětu a druhým činitelem je odlišnost obrazů téhož předmětu vytvořených na sítnici obou očí vzhledem k tomu, že odpovídající středy centrální projekce jsou vzájemně pošinuty o hodnotu rovnou očnímu rozestupu. V důsledku druhého činitele nepadnou obrazy těchž bodů předmětu na identické body, ale padnou na disparitní body sítnice.

Při malých rozdílech v obou obrazech vytvořených na sítnicích obou očí, tj. při malých disparitnostech, spojují se oba obrazy v našem vědomí v jeden obraz prostoru, který se před námi nachází, který svými hloubkovými a reliefními vlastnostmi daleko převyšuje prostorový vjem vytvářený při monokulárním vidění.

Schopnost prostorového vidění není u všech lidí stejná. Závisí jednak na fyziologických vlastnostech a podmírkách člověka a jednak do určité míry na výcviku.

Schopnost prostorového vidění, tj. schopnost vnímání hloubky prostoru, se měří schopností určení rozdílu paralaktických úhlů příslušejících k různě vzdáleným předmětům. Přitom paralaktickým úhlem rozumíme úhel, který je tvořen spojnicemi středu obou očí a příslušným předmětem. Nezmí se zaměňovat s konvergenčním úhlem, tvořeným očními osami, v jejichž průsečíku leží bod, na který jsou zaměřeny pozorovatelské oči, jak je to patrné z obr. 12.4.1.

Rozdíl paralaktických úhlů  $\alpha$  a  $\beta$ , který odpovídá minimálnímu rozdílu vzdáleností mezi dvěma předměty, které se nám jeví ještě hloubkově rozlišeny, se nazývá prahem hloubkového (prostorového) vidění a označuje se  $\delta$ . Velikost



kost tohoto prahu závisí na jasu pozadí, na kontrastu předmětu vzhledem k pozadí, avšak i na kontrastu jednoho předmětu vzhledem ke druhému, na tloušťce předmětu spod. V průměru se pohybuje tato hodnota v rozmezí od  $2 - 5''$ , pokud ovšem není omezena doba pro pozorování. Je-li doba pro pozorování omezena, jak tomu bývá ve většině praktických aplikací, roste rychle průh prostorového vidění. Při konstrukci binokulárních přístrojů, zejména stereoskopických dálkoměrů, se počítá s hodnotou  $10''$ , která se často nazývá teoretickou chybou.

### 12.5. Prostorové vidění a konvergenční úhel

Uvažujme dva obrazy, které byly vytvořeny jako centrální projekce nějakého předmětu ze dvou různých středů projekce. Mohou to být např. fotografické snímky předmětu zhotovené přístrojem ze dvou různých poloh ve vodorovné rovině. Umístěme tyto dva obrazy v zorných polích stereoskopu tak, abychom mohli posouvat každý obraz nezávisle na druhém a posouvejme je tak dlohu, až uvidíme příslušný obraz prostorově.

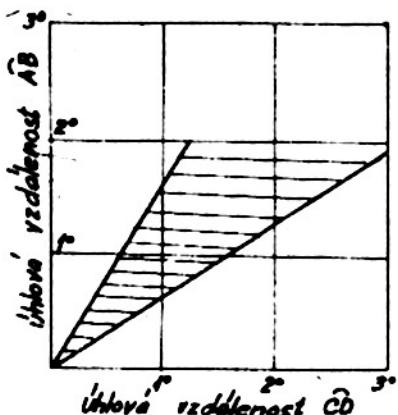
Budeme-li nyní oba obrazy v zorných polích stereoskopu vzájemně přibližovat nebo oddalovat ve směru jejich spojnice, bude se k nám příslušný prostorový obraz přibližovat resp. se bude od nás oddalovat. Zastaví-li se náhle jejich vzájemný pohyb, zmizí i dojem prostorového pohybu obrazu a současně se ukáže, že se nám pozorovaný předmět jeví ve stejné vzdálenosti jako dříve, než se započalo s jejich pohybem.

Z toho vyplývá vjem relativních vzdáleností jednotlivých bodů pozorovaného předmětu nezávisící na absolutní hodnotě konvergenčního úhlu. V okamžiku, kdy se dosáhne prostorového vjemu, mohou i oční osy divergovat. Je-li vzájemná změna poloh obou obrazů příliš veliká, takže činnost pohybových svalů očních je tím již nejmírněji narušována, dochází ke zdvojení obrazu. Je tedy možno říci, že jediným indikátorem vzdáleností jednotlivých bodů jsou rozdíly jejich příslušných binokulárních paralax.

Experimentálně se tímto problémem zabýval French<sup>x)</sup>, který zjistil, že k prostorovému vnímání dvou bodů, jejichž úhlová vzdálenost měřená vzhledem k jednomu oku je  $1^\circ$ , je nutná mezní binokulární parallaxa velikosti  $0,5^\circ$ . Tento výsledek je

nutno chápat takto: Nechť dva body A a B, ležící na vodorovné přímce, mají např. pro levé oko úhlovou vzdálenost  $1^\circ$ . Nechť dále jiné dva body C a D, ležící na téže vodorovné přímce, se pozorují pravým okem. Spojíme-li obrazy bodů A a C v jediný prostorový obraz, pak také body B a D spojíme v jediný prostorový obraz pouze tehdy, bude-li úhlová vzdálenost bodů C a D pro pravé oko v rozmezí  $0,5 - 1,5^\circ$ . Při menších nebo větších vzdálenostech bodů C a D zmizí prostorový vjem.

Mezní úhlová vzdálenost bodů C a D závisí na vzdálenosti bodů A a B, jak je to patrno z obr. 12.5.1.



Obr. 12.5.1 Závislost mezní úhlové vzdálenosti bodů CD na úhlové vzdálenosti bodů AB.

### 12.6. Oční rozestup

Konstruktor binokulárních přístrojů musí počítat s tím, že oční rozestup se u různých pozoro-

x) French, Trans. Opt. Soc. 23, 44 a 220 1921/1922

vateli mění v rozsahu od 54 - 72 mm a že střední hodnota očního rozestupu činí 63 mm. Střední hodnota očního rozestupu žen je o něco menší, cca 61 mm.

Hranolové dalekohledy - triedry - se konstruují tak, že obyčejně dovolují změnu očního rozestupu v rozsahu 57 - 70 mm.

U holandských dalekohledů není třeba provést konstrukci dalekohledu tak, aby dovolovala změnu očního rozestupu, neboť výstupní pupily obou polovin mají velký průměr a jednak změna očního rozestupu směrem k menším hodnotám není možná, neboť průměry objektivu tuto změnu nepřipustí.

### 12.7. Pseudostereoskopie

U některých stereoskopických přístrojů je možno snadno dosáhnout toho, aby obraz odpovídající pravému resp. levému oku byl pozorován obráceně levým resp. pravým okem. Potom vjem hloubek se změní tak, že např. místo kopce vnímáme prohlubně a místo prohlubní kopce. U některých přístrojů se tohoto jevu využívá ke zpřesnění stereoskopických měření.

### 12.8. Některé základní pojmy stereoskopického vidění

#### 12.8.1 Stereoskopická paralaxe

Jak již bylo dříve uvedeno, stereoskopickou paralaxou rozumíme úhel, který je tvořen osami očí pozorující určitý předmět. Je-li  $d$  vzdálenost tohoto předmětu a  $b$  oční rozestup (oční báze), pak pro stereoskopickou paralaxu  $\delta$  platí

$$\delta = \frac{b}{d} . \quad (12.8.1.1)$$

#### 12.8.2. Mez (prah) stereoskopického vidění

Dříve bylo řečeno, že dva předměty A,B jsou vnímány zrakem v rozdílných vzdálenostech, je-li rozdíl příslušných paralax ( $\delta_A - \delta_B$ ) větší než určitá hodnota  $\delta_0$ , která se nazývá prahem nebo mezí stereoskopického vidění.

$$\text{Platí tedy } (\delta_A - \delta_B) \geq \delta_0 = 10^\circ . \quad (12.8.2.1)$$

#### 12.8.3. Poloměr stereoskopického vidění

Vzdálenost

$$d_0 = \frac{b}{\delta_0} \quad (12.8.3.1)$$

nějakého předmětu, jehož stereoskopická paralaxe je rovna  $\delta_0$ , se nazývá poloměrem stereoskopického vidění.

Např. pro pozorovatele s prahem stereoskopického vidění  $\delta_0 = 20^\circ$  vychází při očním rozestupu  $b = 65$  mm

$$d_0 = \frac{65}{20} \rho^\circ = \frac{65 \cdot 2 \cdot 10^5}{20} = 650 \text{ m} .$$

Je tedy možno říci, že uvažovaný pozorovatel nebude hloubkově rozlišovat předměty, jejichž vzdálenost je větší než 650 m.

#### 12.8.4. Hloubka stereoskopického vidění

Předpokládejme, že nějaký pozorovatel pozoruje podle obr. 12.8.4.1 (viz str. 128) bod A, který se nachází ve vzdálenosti  $d$ . Podle předešlého, bude pozorovatel rozlišovat hloubky na obě strany od bodu A až do vzdálenosti  $d_1$  a  $d_2$ , pro něž platí

$$\frac{b}{d_1} - \frac{b}{d} = \frac{b}{d_0} \quad \text{resp. } \frac{b}{d} - \frac{b}{d_2} = \frac{b}{d_0}$$

čili

$$\frac{1}{d_0} = \frac{d-d_1}{dd_1} = \frac{h_1}{dh_1} \quad \text{resp.} \quad \frac{1}{d_0} = \frac{d_2-d}{dd_2} = \frac{h_2}{dh_2} ,$$

kde  $h_1 = AB$  a  $h_2 = AC$ .

Klademe-li v těchto vztasích

$$dd_1 = dd_2 = d^2 ,$$

můžeme psát dále

$$h = h_1 = h_2 = \frac{d^2}{d_0} . \quad (12.8.4.1)$$

Veličinu  $h$  nazýváme hloubkou stereoskopického vidění. Ze vztahu (12.8.4.1) vyplývá, že hloubka  $h$  stereoskopického vidění bude tím menší, tj. pozorovatel bude vnímat

tím menší hloubkové rozměry, čím bude  $d_0$  větší. Podle (12.8.3.1) bude tedy hloubka  $h$  tím menší, čím bude větší oční báse  $b$  a čím bude mít pozorovatel menší mez  $d_0$  stereoskopického vidění.

Z toho vyplývá, že velikost vnímané hloubky můžeme ovlivňovat dvěma způsoby:

a) zvětšením očního rozestupe pomocí sstrandlových soustav, jak je to námázeno na obr. 12.8.4.2. Potom pro poloměr stereoskopického vidění vychází

$$d_0 = \frac{b}{\Gamma} . \quad (12.8.4.2)$$

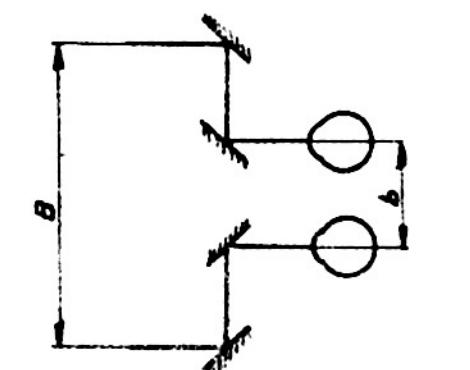
b) Změněním meze stereoskopického vidění zavedením do pozorování zvětšení  $\Gamma$  pomocí vhodného dalekohledu. Tím se meze stereoskopického vidění změní na hodnotu  $\frac{f_0}{\Gamma}$ , takže poloměr stereoskopického vidění nebude hodnoty

$$d_0 = \frac{b}{\frac{f_0}{\Gamma}} = \frac{bf_0}{\Gamma} . \quad (12.8.4.3)$$

Využijeme-li současně obou možností, tj. zvětšíme-li sstrandlovou soustavou báse na  $B$  a zavedeme-li do soustavy pomocí dalekohledu zvětšení  $\Gamma$ , bude poloměr stereoskopického vidění dán vztahem

$$d_0 = \frac{B}{\Gamma} . \quad (12.8.4.4)$$

Obr. 12.8.4.1 K určení hloubky stereoskopického vidění.



kde indexem  $\Gamma$  u  $d_0$  je vyznačeno, že je to poloměr stereoskopického vidění binokulárního dalekohledu.

Je tedy možné říci, že konstrukcí binokulárních dalekohledů se zvětšenou bási dosahujeme rozšíření menších hloubkových rozdílů.

Je-li tedy  $h$  hloubka stereoskopického vidění při pozorování neostrojenýma očima

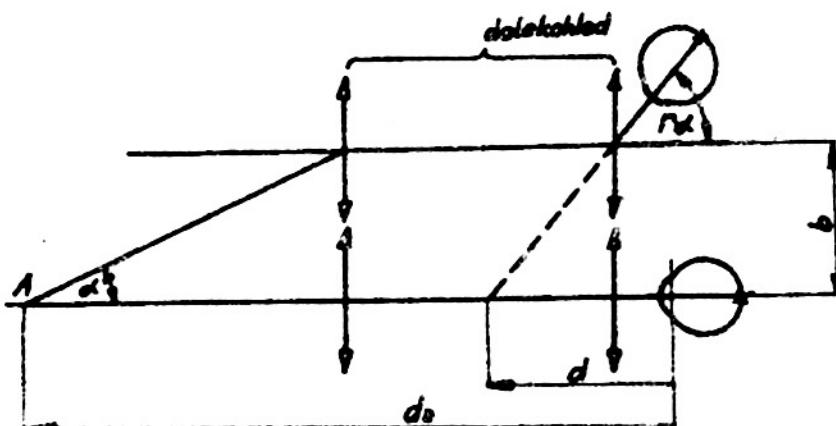
$$h = \frac{d^2}{d_0} = \frac{d^2 f_0}{B} . \quad (12.8.4.5)$$

bude při pozorování dalekohledem o bázi  $B$  a zvětšení  $\Gamma$  rovná

$$b_D = \frac{d_p^2}{d_{DP}} = \frac{d_p^2 \cdot d_g}{B \cdot T} , \quad (12.8.4.6)$$

kde  $d_D$  značí vzdálenost předmětu, který vidíme dalekohledem při stejném konvergenčním úhlu pozorovatelových očí.

Z teorie dalekohledů je známo, že dalekohledy posuvovaný prostor zplošťují, neboť v principu příčně předměty  $\Gamma$ -krátké zmenšují, avšak ve směru posuvání  $\Gamma^2$ -krátké zkracují. V důsledku toho se nám bude jevit např. krychle o straně 1 m při posuvání dalekohledem o zvětšení  $\Gamma = 10$  jako plochá deska o ploše  $1 \text{ dm}^2$  a tloušťce 1 cm.



Obr. 12.8.4.3 Ke konstrukci dalekohledu se správným vnímáním hloubek.

Tato skutečnost však ve značné míře stěžuje a zneperfetuje odhad vzdáleností pozorovaných předmětů. Potřeba přesné znalosti vzdálenosti určitých předmětů se vyskytuje především ve vojenské praxi. Z toho důvodu se vyskytl poladavok konstrukce takových binokulárních dalekohledů, aby vnímání hloubek prostoru při pozorování těmito dalekohledy bylo stejně jako při pozorování prostýma očima.

### **Musí tedy plstít**

$$h = h_n$$

~~ëili podle (12.8.4.5) a (12.8.4.6)~~

$$\frac{d^2 \delta_0}{B} = -\frac{d^2}{B} \cdot \frac{\delta_0}{F} \quad .$$

Podle obr. 12.8.4.3 platí pro vzdálenost  $d_p$ , zanedbáme-li délku dalekohledu vzhledem k resp.  $d_m$ :

$$\alpha = \frac{b}{g_p} \quad \text{e} \quad \alpha \cdot f = \frac{b}{g},$$

94/94

$$d = \frac{d_p}{\rho} \quad \text{cili}$$

$$\Phi_p = \Gamma_* \Phi_*, \quad (12.8.4.7)$$

Dosadíme-li tuto hodnotu do předchozího vztahu, dostaneme dále

$$\frac{d^2 \delta_0}{b} = \frac{r^2 d^2 \delta_0}{\Gamma_0 - \frac{1}{4}} \quad \text{will}$$

$$B = b \in \Gamma, \quad ((2,6), 4, 6)$$

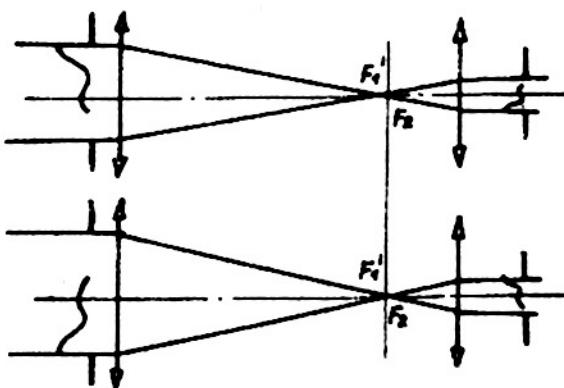
Z tohoto vztahu je vidět, že má-li binokulární dalekohled umožnit vnímání hloubek v prostoru za stejných podmínek jako při pozorování neozbrojenýma očima, že musí jeho báse  $B$  být rovna  $\Gamma$ -násobku oční báze.

Na tomto principu jsou konstruovány tzv. nůžkové dalekohledy používané ve vojenské praxi, jejichž konstrukce bude popsána později.

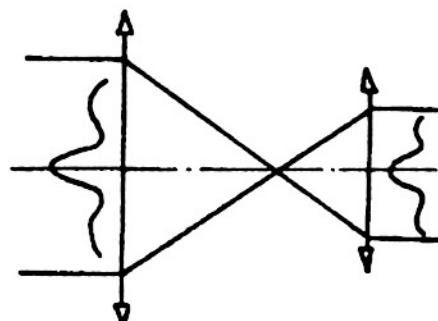
Poznámka: Je-li splněna podmínka (12.8.4.8) pak při pozorování prostoru příslušným dalekohledem se nám jeví pozorovaný prostor bez zkreslené perspektivy, tj. tak, jako kdyby se k nám přiblížil  $\Gamma$ -krát a byl přitom pozorován neozbrojenýma očima.

### 12.9. Binokulární dalekohledy

Při konstrukci binokulárních dalekohledů nutno vždy pečlivě dbát na správnou orientaci obrazů v obou polovinách dalekohledu, aby nedošlo k pseudostereoskopii. Kontrola se provede nejlépe tak, že si představíme střed oka promítnutý do předmětového prostoru před dalekohledem. Na obr. 12.9.1 je naznačen případ obyčejného bi-



Obr. 12.9.1 Projekce středu oku do předmětového prostoru před obyčejným binokulárním dalekohledem.



Obr. 12.9.2 Případ binokulárního pozorování, kdy obě oči pozorují stejným okulárem.

nokulárního dalekohledu bez převracející soustavy. Ve výstupních pupilách obou polovin jsou podle M. Rohra vyznačeny oči jednak obloukem rohovky, jednak částí nosu. Ve vstupních pupilách jsou neznačeny jejich obrazy. Z tohoto jednoduchého náčrtku je patrné, že obrazy očí jsou nosní stranou obráceny vně, takže je situace taková, jako kdyby předmět byl pozorován pravým okreem z místa levého oka a obráceně. Musí tedy dojít k pseudostereoskopii.

Na obr. 12.9.2 je znázorněn dalekohled, který je upraven tak, že obě oči mohou pozorovat stejným okulárem. Jak je z obrázku vidět, je nyní situace stejná, jako kdyby byl předmět pozorován bez dalekohledu. Nedochází tedy k pseudostereoskopii.

Z toho vyplývá, že v prvním případě je nutno začlenit do dalekohledu převracející soustavu.

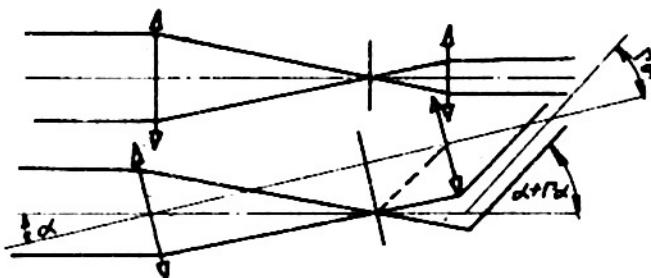
### 12.10. Dovolené zkřížení optických os binokulárních dalekohledů

Jak bylo úvodem ukázáno, řídící pohybový oční orgán upravuje mimo jiné automaticky akomodaci očí v závislosti na konvergenčním úhlu. Měli by ve správně konstruovaném dalekohledu odpovídat akomodace očí nekonečně vzdálenému cíli, musí být

Tab. 12.10.1

Druh zkřížení	Přípustná odchylka v úhl. min.
Konvergence $\varphi_K$	20 - 30'
Divergence $\varphi_D$	8'
Výškové zkřížení $\varphi_V$	8'

optické osy v důsledku shora uvedené závislosti vzájemně rovnoběžné. Tato rovnoběžnost musí být dodržena s určitou přípustnou odchylkou v divergenci, konvergenci nebo ve výškovém zkřížení, které neasí vyvolat větší zkřížení očních os, než připouští tab. 12.10.1. Z těchto odchylek vyplývají pak velmi přesné požadavky na mechanickou konstrukci binokulárních dalekohledů. Uvažujme podle obr. 12.10.1 dva samo-



Obr. 12.10.1 K určení vlivu zkřížení mechanických os dalekohledů.

statné dalekohledy o zvětšení  $\Gamma$ , jejichž optické osy svírají spolu úhel  $\alpha$ . Jak je z obrázku patrné, budou paprskové svažky přicházející z téhož bodu v nekonečnu svírat po průchodu oběma dalekohledy úhel

$$\varphi = \alpha \pm \Gamma \cdot \alpha = \alpha (\Gamma \pm 1) \quad (12.10.1)$$

podle toho, budou-li jejich osy divergovat nebo konvergovat.

Vráťme-li se k přípustným odchylkám uvedeným v tab. 12.10.1, pak pro dovolené zkřížení optických os obou polovin binokulárního dalekohledu vychází podle (12.10.1)

a) v konvergenci

$$\alpha_K = \frac{\varphi_K}{\Gamma \pm 1} = \frac{20 - 30'}{\Gamma \pm 1}$$

b) v divergenci

$$\alpha_D = \frac{\varphi_D}{\Gamma \pm 1} = \frac{8'}{\Gamma \pm 1}$$

c) ve výšce

$$\alpha_V = \frac{\varphi_V}{\Gamma \pm 1} = \frac{8'}{\Gamma \pm 1} .$$

} (12.10.2)

Např. pro triedr o zvětšení  $\Gamma = 6$  odtud vychází

$$\alpha_K = \frac{25}{5-7} = 5 - 4' \quad \alpha_D = \frac{8}{5-7} = 1,6 - 1' \quad \alpha_V = 1,6 - 1' .$$

Je vidět, že požadavek na rovnoběžnost optických os triedru je velmi vysoký a že

je jej možno dodržet jen díky vhodné upraveného uložení objektivů, jak bude podrobne uvedeno později.

#### 12.11. Stejnost zvětšení obou částí binokulárních dalekohledů

Velmi důležitou podmínkou binokulárních dalekohledů je požadavek stejnosti zvětšení obou jejich částí. Nestejnost zvětšení neruší prostorové vidění. Z toho je nutné párovat výběrem objektivy i okuláry. K tomu účelu se používá v justažních dílnách speciálních porovnávacích přístrojů založených obyčejně opět na stereoskopickém principu.

### 13. MONOKULÁRNÍ DALEKOHLEDY

Monokulární dalekohledy se používají obyčejně jako zaměřovací dalekohledy ve vojeneské praxi, v myslivosti, u geodetických a laboratorních přístrojů nebo jako periskopické dalekohledy pro pozorování procesů probíhajících v tzv. "horkých" komorách při Jaderných výzkumech. Zvláštní skupinu monokulárních dalekohledů tvoří dalekohledy astronomické.

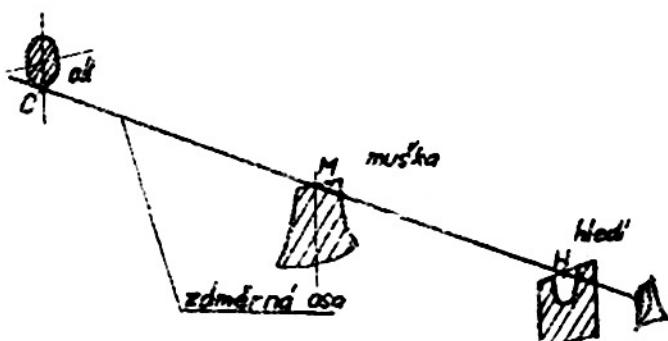
#### 13.1. Zaměřovací dalekohledy

Zaměřovací dalekohledy slouží k zamíření pušky, kulometu, děla, minometu nebo letadla při svrhávání bomb, k zaměření teodolitu, nivelačních nebo topografických přístrojů, k zaměření na rozhraní mezi tmavým a světlým polem u refraktometru apod.

Problém zaměřovacích dalekohledů je tedy úzce spjat s problémem zaměřování. Proto dříve než přistoupíme k vlastním zaměřovacím dalekohledům, věsieme si problému zaměřování.

#### 13.1.1. Zaměřování, zámerná a geodetická osa, přesnost zamíření

Zamíření pušky nebo zbraně je možno provést rámčem přesně pomocí mušky a hledí nebo daleko přesněji pomocí zámerného dalekohledu.



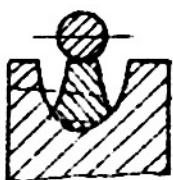
Obr. 13.1.1.1 Princip zamíření pomocí mušky a hledí.

Věsieme si nejdříve zamíření pomocí mušky a hledí znázorněných na obr. 13.1.1.1. Zámerná osa (přízma) je dána spojnici středu M horní hrany mušky a středu H spojnice horních hran hledí. Při zamíření je pak nutné uvést na tuto zámernou osu cíl C a pozorovatelovo oko O, jak je to naznačeno na obr. 13.1.1.2 (na str. 133). Jak je vidět, je nutné uvést na jednu přízmu celkem 4 body, cíl, mušku, hledí a oko. Je to celkem obtížná operace a sice z následujících důvodů:

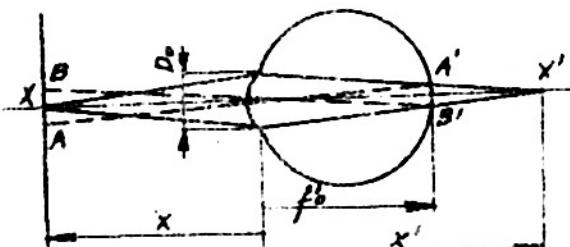
Oko při tomto způsobu zaměřování musí pozorovat současně tři body ležící v různých odlišných vzdálenostech. Hledí bývá umístěno asi 250 - 350 mm před okem a muška je vzdálena od hledí o 500 - 650 mm a konečně cíl se nachází prakticky v nekonečně velké vzdálenosti. Vyjádřime-li vzdálenost hledí a mušky od pozorovatelova oka

v dioptriích, vidíme, že se pohybují od 4 D do 1 D. To znamená, že oko akomodované na cíl by mělo současně dosáhnout akomodační hlcubku 4 D. Protože to není možné, projeví se to tím, že obraz mušky a hledí se bude jevit neostřý.

Určeme velikost neostrosti obrysů hledí a mušky a z ní vyplývající nepřesnost v zamílení. Předpokládejme proto, že oko je akomodováno na nekonečno a že současně pozoruje blízký bod X, jehož vzdálenost od oka je g, jak je to vyznačeno na obr. 13.1.1.3. Nechť  $x'$  značí vzdálenost jeho obrazu  $X'$ , který leží za sítnicí. Jak je



Obr. 13.1.1.2  
Situace při  
zamílení po-  
moci mušky  
a hledí



Obr. 13.1.1.3 K určení neostro-  
sti obrazu na sítnici oka.

z obrázku patrno, protne paprskový svazek přicházející do bodu  $X'$  sítnici v ploše o průměru  $2y' = AB'$ , pro něž plyne z podobnosti trojúhelníků

$$\frac{2y'}{D_0} = \frac{x' - f'_0}{x}, \quad (13.1.1.1)$$

kde  $D_0$  značí průměr oční pupily a  $f'_0$  ohniskovou vzdálenost oka.

Ze zobrazovací rovnice vztázené na hlavní body oka plyne

$$x' = \frac{x f'_0}{x + f'_0}. \quad (13.1.1.2)$$

Dosadíme-li do (13.1.1.1) dostaneme

$$\frac{2y'}{D_0} = \frac{\frac{x f'_0}{x + f'_0} - f'_0}{x} = - \frac{f'_0}{x}$$

čili

$$y' = - D_0 \cdot \frac{f'_0}{2x}. \quad (13.1.1.3)$$

Oko akomodované na nekonečno a současně pozorující bod X, bude vidět bod X tak, jako kdyby uvažovaná obrazová ploška o průměru  $2y'$  byla prošitnuta okem do její roviny. V této rovině bude se jevit její průměr jako ploška o průměru  $2y = AB$ , pro který platí podle obr. 13.1.1.3:

$$\frac{y}{y'} = - \frac{x}{f'_0}$$

nebo s pomocí (13.1.1.3)

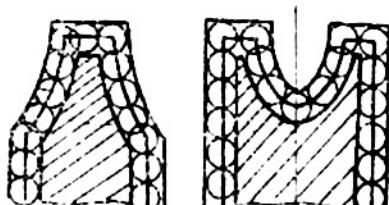
$$y = \frac{D_0}{2} \cdot \frac{x}{x + f'_0}. \quad (13.1.1.4)$$

Dospěli jsme k velmi zajímavému výsledku: Je-li oko akomodováno na nekonečno a po-

zoruje-li současně nějaký bod ležící v konečné vzdálenosti, pak se tento bod jeví oku tak, jako kdyby bylo skomodováno na jeho rovinu a jako kdyby v ní byla umístěna místo tohoto bodu šedá kruhová ploška velikosti oční pupily s to nezávisle na vzdálenosti tohoto bodu od oka.

Aplikujeme-li tento výsledek na naše hledí a mušku, budou se jednotlivé body jejich obrysů jevit jako plošky velikosti oční pupily, jak je to naznačeno na obr.

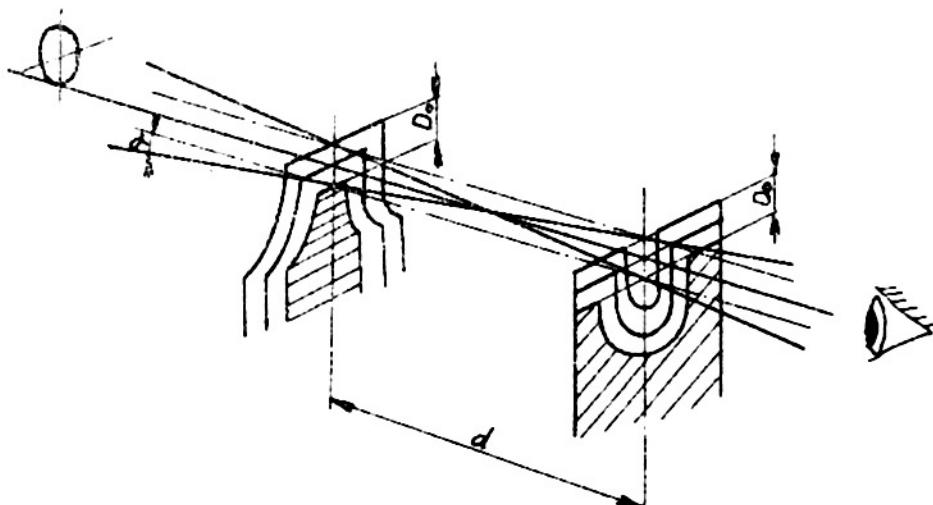
13.1.1.4. To znamená, že muška i hledí budou lepo-  
vány dvojitými obrysy ležícími ve vzdálenosti  $\frac{D_0}{2}$   
na každou stranu od vlastního skutečného obrysů.  
Budou se jevit tak, jako kdyby byly lemovány še-  
dým páskem o šířce rovné průměru oční pupily.



Obr. 13.1.1.4 Vzhled mušky a hledí při jejich pozorování okem skomodovaným na nekonečno.

z měrné osy ve svislém směru může v krajním případě dosáhnout při nejnepříznivějších světelných podmínkách, když už pupile dosahuje průměru 8 - 9 mm, hodnoty 4,5 mm, což nemá vliv na přesnost střelby.

Situace se však velmi změní, když při zaměřování uvedeme na spojnicí cíl-oko



Obr. 13.1.1.5 K určení chyby v zaměření při zaměřování muškou a hledím.

vnější obrys mušky a vnitřní obrys hledí nebo obráceně. Potom zámerná osa se odchýlí od správného směru o úhel

$$\alpha = \frac{D_0}{d} \cdot \beta'. \quad (13.1.1.5)$$

Přitom d značí vzdálenost mušky a hledí. Budeme-li uvažovat normální pušku, kde  $d = 650$  mm při nejnepříznivějších podmínkách, vychází pro tuto úhlovou odchylku hodnota

$$\alpha = \frac{8}{650} \cdot 3,4 \cdot 10^3 = 42^\circ.$$

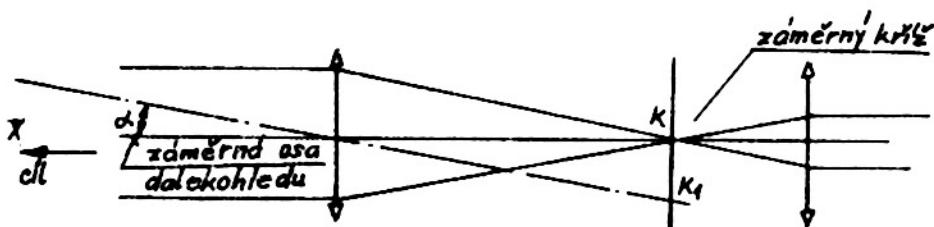
Při vzdálenosti cíle 100 mm vyvolá tato úhlová odchylka α posuv zásahu ve svislém směru o hodnotu

$$h = \frac{8}{650} \cdot 100 = 1,2 \text{ m},$$

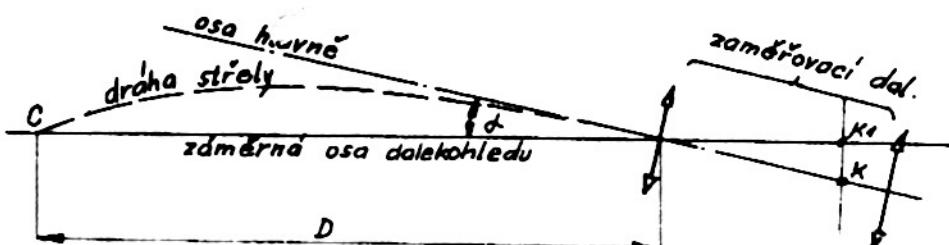
což je velmi značná hodnota, která prakticky znemožní zásah. Přitom nutno zvážit, že nepřesnost se ještě podstatně zhorší vlivem nevhodného kontrastu mušky a hledí vzhledem k cíli.

Tento nepříznivý vliv mušky a hledí na přesnost zaměření se dá vyloučit jedině použitím záměrného dalekohledu, tzv. puškového zaměřovače.

V principu je tvoren puškový zaměřovač dalekohledem, který je opatřen záměrným křížem nebo jinou vhodnou značkou, umístěnou v ohniskové rovině jeho objektivu.



Obr. 13.1.1.6 Vysvětlení záměrné osy dalekohledu.



Obr. 13.1.1.7 K vysvětlení přímého míření.

Při zamíření stačí uvést do koincidence střed kříže s cílem. Protože kříž leží ve stejné rovině, ve které se vytváří obraz cíle, je vidět stejně "ostře" jako cíl a nemůže tedy nastat situace jako v případě mušky a hledí.

Nabízí se otázka, která přímka tvoří u záměrného dalekohledu záměrnou osu. Podle obr. 13.1.1.6 je zřejmé, že záměrná osa u zaměřovacího dalekohledu je tvořena spojnicí středu objektivu a středu záměrného kříže. Přesněji řečeno je to spojnice obrazového hlavního (úzlového) bodu objektivu a středu záměrného kříže.

Z předchozího obrázku je dále jasné, že posouváním záměrného kříže ve svislém směru, např. z polohy K do polohy K<sub>1</sub>, můžeme jednoduchým způsobem snadno měnit sklon záměrné osy. Této vlastnosti záměrných dalekohledů se s výhodou využívá při primém zaměřování zbraně na různě vzdálené cíle. Z fyziky střelby je známo, že střela se pohybuje po výstřelu k cíli po balistické dráze, jak je to naznečeno na obr. 13.1.1.7. Má-li střela dolétnout do cíle, musí se osa hlavně zvednout o úhel α, zvaný elevace, který se určí výpočtem z balistických vlastností příslušné zbraně a střeliva.

Protože zaměřovací dalekohled je pevně spojen se zbraní, stačí pošinout záměrný kříž z polohy K do polohy K<sub>1</sub>, která se určí tak, aby vychýlení záměrné osy

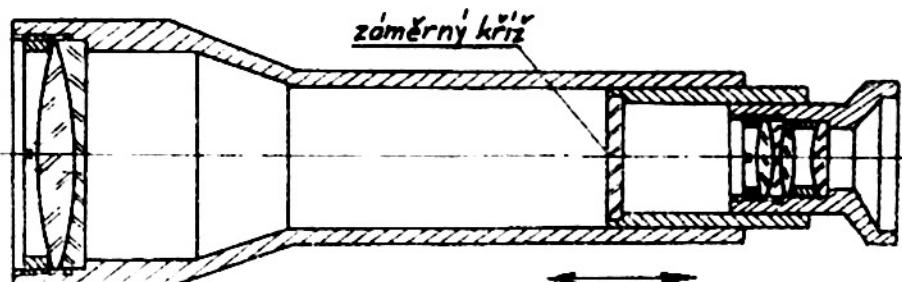
bylo rovno elevačnímu úhlu odpovídajícímu dané vzdálenosti D cíle. Když se stotožní obraz cíle s taktic vysunutým záměrným křížem, nabývá osa hledáku odpovídající požadované elevaci, tj. směr tečny k příslušné balistické dráze střely.

V předchozích jvahách jsme náleky předpokládali, že poloha záměrného kříže se vzhledem k objektivu ve směru jeho optické osy nemění. Tak je tomu všdy v případě vojenských zaměřovačů, kdy cíl se nachází ve vzdálenosti nejméně 100 m, takže je prakticky možno jej považovat za nekonečně vzdálený.

Jiná situace nastává u dalekohledů geodetických přístrojů, kdy cíl leží často těsně před dalekohledem ve vzdálenosti až 1 m. V těchto případech je proto nutno konstruovat zaměřovací dalekohled tak, aby bylo možno záměrný kříž umístit v rovině obrazu cíle, která se pro blízké cíle poměrně značně vzdaluje od objektivu. Např. u dalekohledu s objektivem o ohniskové vzdálenosti  $f' = 200$  mm čini tento posuv pro cíl vzdálený 1 m

$$\frac{f'}{10^3} = \frac{4 \cdot 10^4}{10^3} = 40 \text{ mm} .$$

Proto okulár bývá uložen se záměrným křížem ve společném tubusu, který se posouvá v druhém tubusu nesoucím objektiv, jak je to schematicky naznačeno na obr. 13.1.1.8.

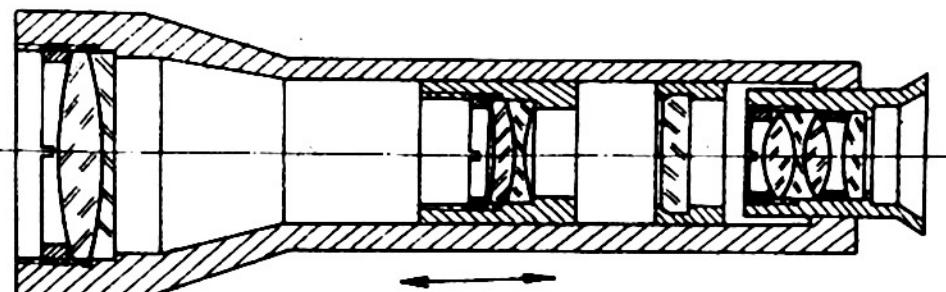


Obr. 13.1.1.8 Schema dalekohledu geodetických přístrojů.

Přitom okulár sám je výsuvný vzhledem k záměrnému kříži, aby jej bylo možno přizpůsobit pozorovatelově oku.

U dalekohledů s vnitřní fokusací se sice záměrný kříž neposouvá, avšak nastavení dalekohledu na různě vzdálené cíle se provádí posuvem rozptylného členu, který je umístěn mezi objektivem a záměrným křížem, jak je to vidět na obr. 13.1.1.9.

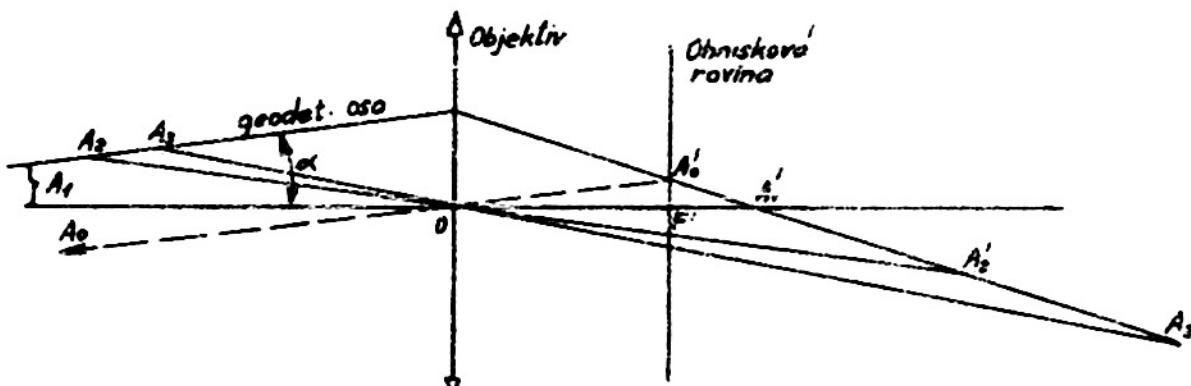
Nyní se naškýtá znova otázka, která přímka tvorí záměrnou osu u těchto záměrných dalekohledů?



Obr. 13.1.1.9 Schema dalekohledu s vnitřní fokusací.

Bude-li se pohybovat záměrný kříž nebo fokusovací čočka po přímce totožné s optickou osou objektivu, bude záměrnou osou dalekohledu opět spojnica obrazového hlavního bodu objektivu a středu záměrného kříže.

Předpokládejme, že se záměrný kříž pohybuje po přímce, která je však skloněna vzhledem k optické ose objektivu, jak je to naznačeno na obr. 13.1.1.10. Nechť střed záměrného kříže zaujme postupně na této přímce polohy  $A'_0, A'_1, A'_2, A'_3, \dots$ .



Obr. 13.1.1.10 K vysvětlení pojmu geodetické osy.

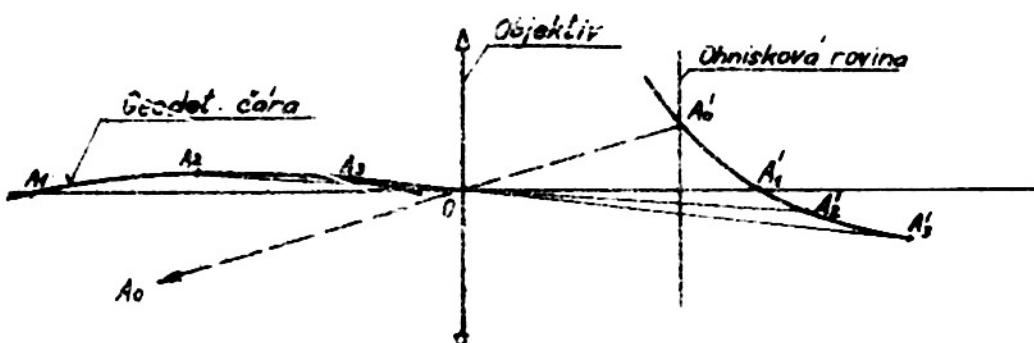
Považujeme-li příslušnou přímku  $\overline{A'_0 A'_3}$  za paprsek, bude se létat objektivem do směru  $\overline{A'_1 A'_3}$  rovnoběžného s paprskem  $\overline{A'_0 O}$ , neboť bod  $A'_0$  leží v ohniskové rovině objektivu. Potom budou bodům  $A'_1, A'_2, A'_3, \dots$  odpovídat na této přímce body  $A_1, A_2, A_3, \dots$

Z toho je patrné, že funkci záměrné osy přebírá nyní přímka  $\overline{A'_1 A'_3}$ . Tato přímka se nazývá geodetickou osou.

Z názoru je zřejmé, že pokud se bude záměrný kříž pohybovat po přímce, i když bude skloněná vzhledem k optické ose, že se při zaměřování a hlavně při měření úhlů nedopouštíme chyby, neboť sklon osy geodetické osy zůstává konstantní, takže při měření úhlů ze dvou zaměření se tento úhel  $\alpha$  vyloučí.

V případě, že se záměrný kříž pohybuje po křivce, pak funkci záměrné osy přebírá geodetická křivka, jak je to patrné z obr. 13.1.1.11. Takový dalekohled není použitelný k měření úhlů mezi body ležícími v různých vzdálenostech.

V případě dalekohledů s vnitřní fokusací je situace obdobná, ovšem odvození tvaru geodetické osy je poněkud složitější.



Obr. 13.1.1.11 Schema vzniku geodetické čáry.

Z uvedeného je zřejmé, že k zajištění přesného zaměřování je nutné provést uložení posuvné zámkerné značky nebo fokusovací čočky velmi dokonale, což klade značné požadavky jak na princip uložení tak i na jeho mechanické provedení.

Mimo uložení zámkerného kříže má značný vliv na přesnost zamíření zvětšení příslušného dalekohledu. Na základě velké řady měření bylo zjištěno, že chyba  $f'$  v zamíření při jednom zamíření je dána vztahem

$$f' = \frac{K}{\gamma} \text{ vteřin,} \quad (13.1.1.6)$$

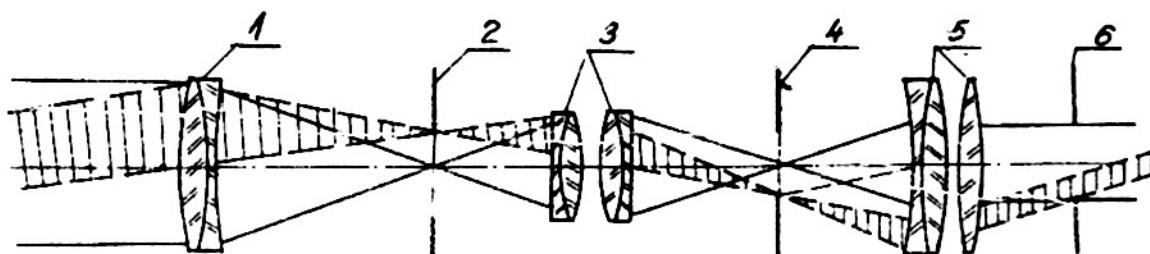
kde konstanta  $K$  se pohybuje v rozmezí 6 - 10 vteřin podle podmínek pozorování.

Vteřinové teodolity se vybavují dalekohledy se zvětšením kolem 36. Pro přesnost zamíření těmito dalekohledy vychází v nejpříznivějším případě

$$f' = \frac{6}{\sqrt{36}} = 1'' .$$

### 1.1.2. Puškové zaměřovače

V principu je puškový zaměřovač tvořen dalekohledem s čočkovou převracející soustavou. V obrazové ohniskové rovině (2) objektivu (1) se vytváří převrácený obraz pozorovaného předmětu, který je převracející soustavou přenesen vzpřímeně do předmětové ohniskové roviny (4) okuláru (5). Střelcové oko se umisťuje ve výstupní pupile (6) (viz obr. 13.1.2.1).



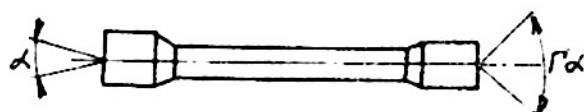
Obr. 13.1.2.1 Optická soustava puškového zaměřovače.

V puškovém zaměřovači existují dvě obrazové roviny (2) a (4), ve kterých je možno umístit zámkerný kříž.

Aby puškového zaměřovače bylo možno použít i za velmi nepříznivých světelných podmínek, konstruuje se s velkou výstupní pupilou, která dosahuje 7 až 8 mm.

Vzdálenost výstupní pupily od poslední plochy okuláru se volí velká, až 80 mm, aby jednako oko střelce bylo chráněno před zpětným nárazem po výstřelu a jednak, aby se získalo mezi okem a dalekohledem místo pro vysazování použitých nábojníc.

Zvětšení puškových dalekohledů se volí 2 - 6 nebo 8. Nejvhodnější zvětšení je 2 - 4. Při volbě zvětšení dalekohledu je nutno si uvědomit, že dalekohled zvětšuje úhly  $\Gamma$ -krát. Vychýlí-li při míření střelec zaměřovač vzhledem k cíli o úhel  $\alpha$ , vychýlí se příslušný paprsek svazek za okulárem o úhel  $\Gamma \cdot \alpha$ , jak je to vyznačeno na obr. 13.1.2.2. To znamená, že při vychýlení zaměřovače se bude v zorném poli pohybovat obraz



Obr. 13.1.2.2 Zvětšování úhlů dalekohledem.

cíle s lineární rychlostí  $\Gamma$ -krát větší. Čím větší zvětšení bude dalekohled mít, tím nepřiznivější se bude v jeho zorném poli projevovat pohyb zaměřovače vzhledem k cíli. Z toho důvodu nemá u puškových zaměřovačů, kdy se provádí střelba z volných rukou, přesáhnout zvětšení hodnotu 4.

Podrobněji bude čtenář seznámen s konstrukcí puškového zaměřovače později na příslušném praktickém příkladu.

### 13.1.3. Periskopické dalekohledy

Periskopické dalekohledy, nebo prostě periskopy jsou tvořeny monokulárními dalekohledy sloužícími k pozorování z krytých míst, bojových vozů, okopů nebo ponorek. Důležitým parametrem periskopických dalekohledů je jejich periskopická výška  $H$ , tj. svislá vzdálenost optické osy objektivu a okuláru. Zorné pole periskopů může být co největší.

Velmi důležitou skupinu periskopu tvoří ponorkové periskopy. Jsou na ně kladený velké požadavky:

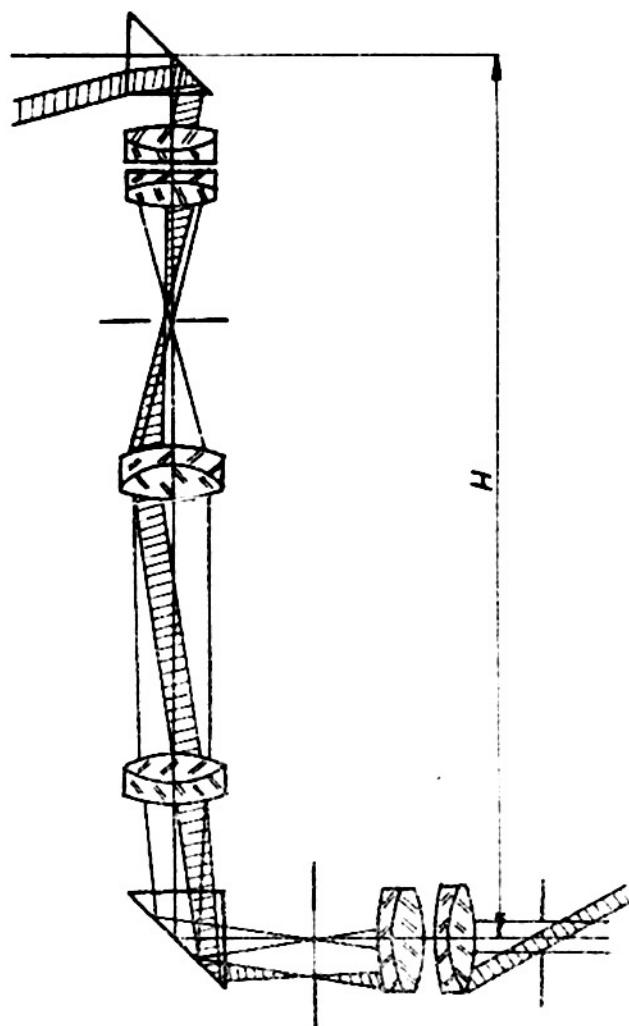
- Velká periskopická výška (až 15 m).
- Velké zorné pole (až  $40^\circ$ ).
- Možnost dvojitého zvětšení.
- Předměty pozorované periskopem se mají pozorovateli jevit stejně jako při pozorování prostýma neozbrojenýma očima.

Aby byl splněn poslední požadavek, mělo by být zvětšení periskopu  $\Gamma = 1$ . Zkušenosti s dalekohledy o malých zvětšeních však ukazují, že při zvětšení  $\Gamma = 1$  se pozorovateli jeví předměty poněkud menší. Z toho důvodu se volí zvětšení ponorkových periskopů asi 1,5.

Aby bylo možno plynule měnit periskopickou výšku periskopu, volí se převracející soustava tak, aby mezi oběma jejimi členy probíhaly pouze rovnoběžné paprskové svažky.

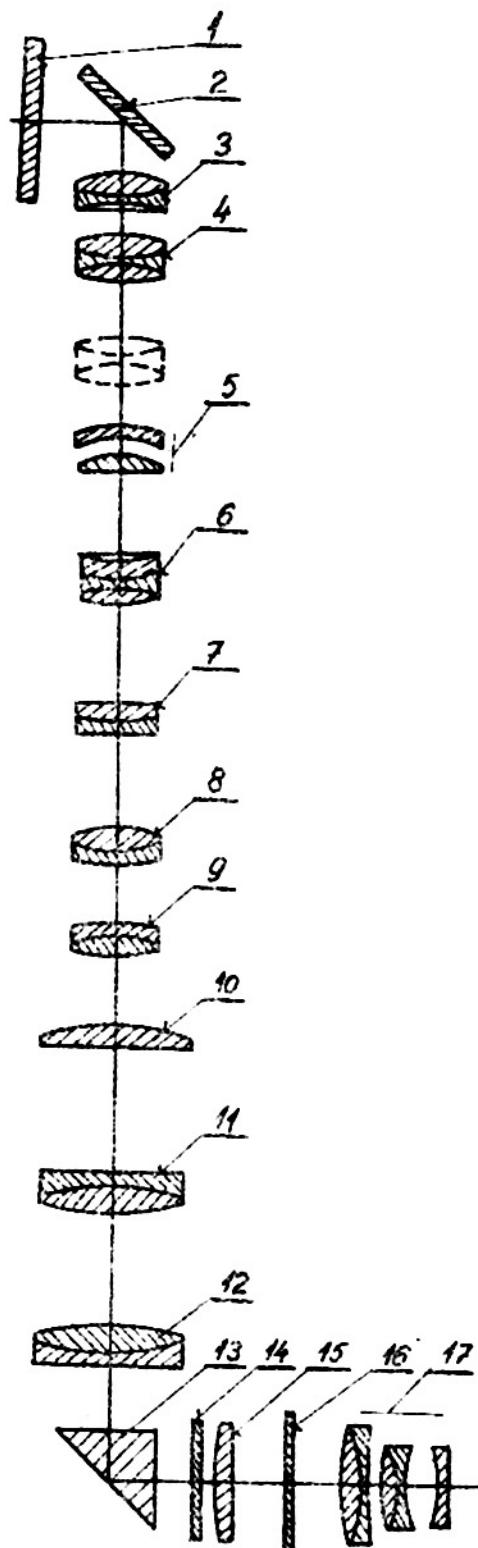
Vzhledem k velkému zornému poli ponorkových periskopů musí být v obrazových rovinách umístěny vhodné kolektivity.

Protože průměr ponorkového periskopu je omezen, není možné dosáhnout libovolné periskopické výšky prostým oddálením obou členů převracející soustavy, neboť při jejich velké vzdálenosti klesne příčná šířka svažků přicházejících z okrajů zorného pole, čímž velmi rychle ubývá světla od středu zorného pole k jeho okraji.



Obr. 13.1.3.1 Optická soustava jednoduchého okopového periskopu.

Proto prodloužení periskopické výšky je možno dosáhnout zadleněním většího počtu převracejících soustav. Vzhledem k tomu, že s rostoucím počtem převracejících soustav roste počet ploch sousedících se vzduchem, rostou ztráty světla odrazem a kle, t. j. kontrast obrazu. Z toho důvodu se u ponorkových periskopů používá maximálně tří převracejících soustav.



Obr. 13.1.3.2 Optická sousta-va ponorkového periskopu.

Na obr. 13.1.3.2 je znázorněna optická soustava ponorkového periskopu. Jak je vidět, se sestává z dvoučlenného objektivu (3) a (4), jehož druhý člen je možno posunout do polohy (4'), čímž se změní zvětšení periskopu. Obraz vytvořený tímto objektivem je přenášen první převracející soustavou (5) a (6) do roviny kolektivu (7), odkud dle druhou převracející soustavou (8) do roviny dalšího kolektivu (10) a odtud třetí převracející soustavou do předmětové ohniskové roviny okuláru, tvořeného jednoduchým kolektivem (15) a poměrně složitou oční čočkou (17).

Mezí čočky okuláru jsou obyčejně vloženy filtry (14) a (16). Používají se filtry dvou nebo tří barev - neutrální se žlutým nebo červeným nebo neutrální s oranžovým a modrým.

Neutrální, žlutý filtr slouží k potlačení silného slunečního světla a slunečních reflexů vzniklých na vodní hladině, červený a žlutý filtr se používá k zvýšení kontrastu předmětu vzhledem k pozadí. Modré světlo vyházející z pozadí je téměř filtrováno. Použití těchto filtrů má především význam ze mračevého počasí.

Jak je vidět z obr. 13.1.3.2, vyznačuje se ponorkový periskop velkým počtem optických prvků a tedy velkým počtem volných ploch. Proto ztráty světla odrazem dosahují značných hodnot od 70 do 85 %. Tyto ztráty je možno snížit použitím protiodrazových vrstev.

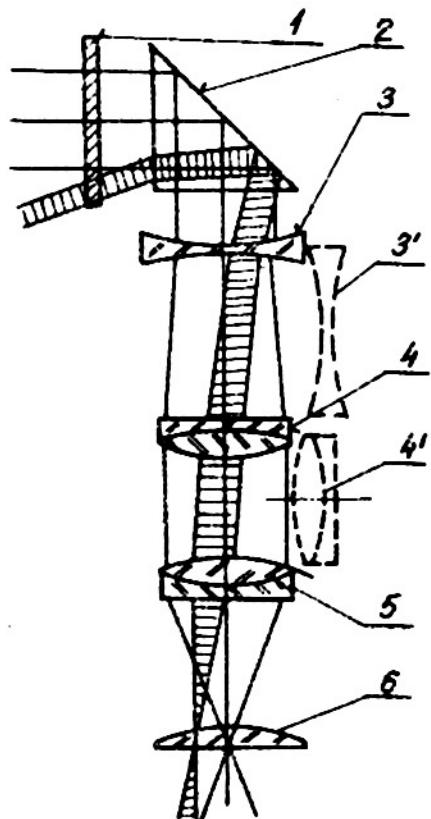
Změny zvětšení se dosahují několika různými způsoby.

1. Posouváním druhého dvoučlenného objektivu, jak je to provedeno v případě znázorněném na obr. 13.1.3.2.

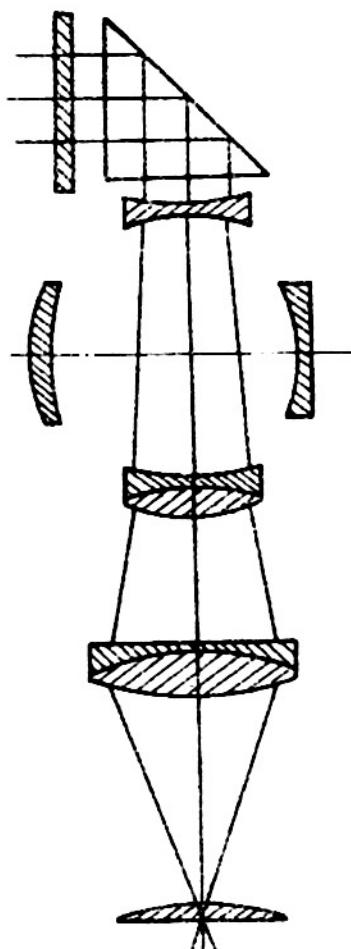
Poznámka:

Na obr. 13.1.3.2 jsou osové rozměry vzhledem k příčným rozměrům značně pro nedostatek místa zkresleny.

2. Předřezením holandského dalekohledu před objektiv periskopu, jak je to naznačeno na obr. 13.1.3.3 (viz str. 141), kde (3)



Obr. 13.1.3.3 Uprava zvětšení periskopu pomocí holandského dalekohledu.



Obr. 13.1.3.4 Uprava změny zvětšení periskopu.

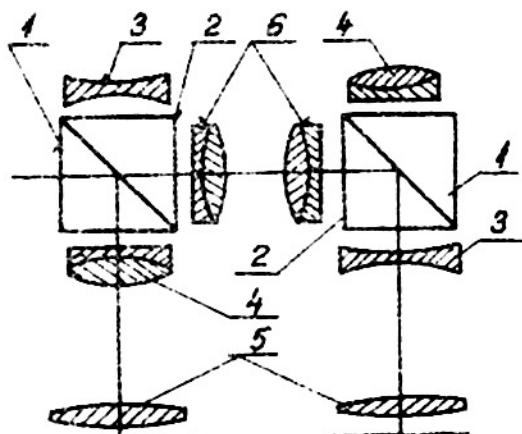
značí okulár a (4) objektiv holandského dalekohledu, (5) objektiv periskopu a (6) příslušný kolektiv. Okulár i objektiv holandského dalekohledu se mohou vychýlit do polohy (3') resp. (4'), čímž se zvýší zvětšení periskopu.

3. U některých periskopů se začlenují před objektiv (3) postupně dva holandské dalekohledy (1) resp. (2), jak je to naznačeno na obr. 13.1.3.4. Tímto způsobem je možno snadno dosáhnout i více zvětšení, podle toho, zda se k objektivu periskopu přivrátí objektiv nebo okulár předfazeného dalekohledu.

4. Konečně ještě jedna konstrukce změny zvětšení je znázorněna na obr. 13.1.3.5.

Zařízení sestává z krychlového hranolu, který je tvořen dvěma pravoúhlými hranoly stmalenými k sobě odragnou plochou. Hranol je otočný kolem vodorovné osy ležící v odražné ploše hranolu. Spolu s hranolem se otáčí objektiv (4) a teleobjektiv (3) a (6).

Podle natočení této soustavy je v činnosti buď jen objektiv (4), jak je to na-



Obr. 13.1.3.5 Změna zvětšení periskopu pomocí teleobjektivu.

Tab. 13.1.3.1<sup>x)</sup>

Typ	Průměr horní části mm	Průměr hlavního tubusu mm	Perisk. výška h m	Zvětšení	Zorné pole	Průměr výst. pupily mm
Velitelské	31	150-180	6-10	1,5-6x	40-10°	4
	51	190	11	1,5x	40°	4
Navigační	55	150	7	1,5-6x	40-10°	4
	84	190	11	1,5-6x	40-10°	4

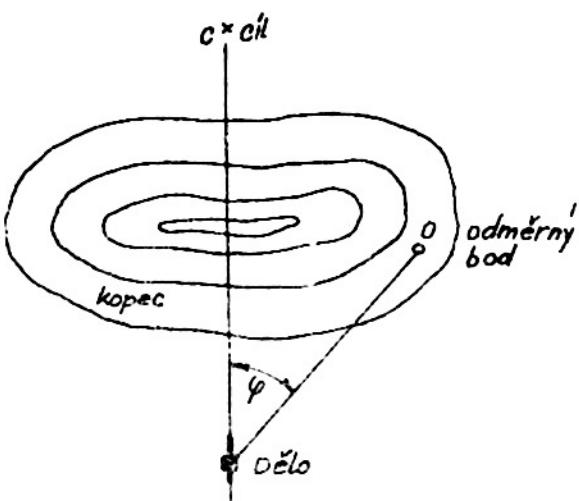
znečeno na obr. a) nebo teleobjektiv, jak je to na obr. b).

Pro informaci uvádíme v tab. 13.1.3.1 některá data ponorkových periskopů, které je možno rozdělit na velitelské a navigační.

#### 13.1.4. Panoramatické a zenitopanoramatické dalekohledy

Tyto dalekohledy slouží pro zaměřování děl při nepřímé střelbě, kdy cíl není vidět od zbraně. Zaměření zbraně se pak provádí pomocí tzv. odměrných bodů, které jsou od zbraně viditelné a které jsou voleny mimo jiné tak, aby bylo možno vhodným

způsobem určit úhel  $\varphi$  sevřený směrem dělo-cíl a směrem dělo-odměrný bod (viz obr. 13.1.4.1). Protože směr dělo-cíl je dán osou hlavně děla, stačí vychýlit záměrnou osu dalekohledu ve vodorovném směru a ve vhodném smyslu o úhel  $\varphi$  a natočit dělo se zaměřovačem tak, že obraz odměrného bodu splyne se záměrným křížem, aby osa hlavně mířila na cíl. Je zřejmé, že je nutno dát hlavní potřebnou elevaci; proto vlastní dělový zaměřovač je uložen ve zvláštním mechanickém mřížidle, které slouží k nastavení potřebné elevace. Tato záležitost se však již vymyká z poslání této skript a proto odkažujeme čtenáře najinou vhodnou odbornou literaturu.



Obr. 13.1.4.1 Princip zaměřování děla při nepřímé střelbě.

že odměrný bod C bude třeba hledat v nejrůznějších směrech, musí být dalekohledy upraveny tak, aby bylo možno jejich záměrnou osu plynule vychýlovat ve vodorovné rovině v rozsahu  $\varphi = 360^\circ$ . Jinak řečeno, musí tyto dalekohledy umožňovat pozorování celého obzoru kolem zaměřovače při pevném směru okuláru. Proto těmto zaměřovačům říkáme panoramatické.

Odměrný bod O neleží obecně ve vodorovné rovině proložené stanovištěm děla. Může ležet nad nebo i pod touto rovinou. Z toho důvodu musí být konstrukce daleko-

<sup>x)</sup> C.I.Vavilov a M.V.Savostjanovoj, Optika v Vojennom děle II, Moskva, 1948.

hledu upravena tak, aby umožňovala vychylování zámezrné osy též ve svíslé rovině v rozsahu - 300 až 900 dílců.<sup>x)</sup>

Některé zaměřovače dovolují vychýlení zámezrné osy směrem k převyšeným cílům o úhel větší než  $90^\circ$ , tj. umožňují pozorování cíle, který se nachází v zenitu. Proto se těmto zaměřovačům říká zenitopanoramatické.

Panoramatické dalekohledy jsou v principu tvořeny monokulárními periskopy o malé periskopické výšce, jejichž horní hranol je otáčivý jednak kolem svíslé osy o  $360^\circ$  a jednak kolem vodorovné osy procházející odraznou rovinou v rozsahu od - 18 do  $54^\circ$ , jak je to vidět na obr. 13.1.4.2, kde je znázorněna optická soustava panoramatického dalekohledu.

Natáčí-li se horní hranol (1) kolem svíslé osy, pak obraz obzoru se v zorném poli dalekohledu "kácí". Jeho vzpřímení se dosáhne, když se do optické soustavy zařízení Wollastonův hranol (2), který se otáčí poloviční rychlostí kolem svíslé osy než vlastní horní, tzv. panoramatický hranol. Proto pohyb Wollastonova hranolu je svázán s pohybem panoramatického hranolu (1) kuželovým ozubeným převodem v poměru 2 : 1.

Jak bylo dříve uvedeno v kapitole o hrancích, je možno Wollastonův hranol nahradit, jako každý hranol, planparallelní deskou, která je v našem případě skloněna k ose dalekohledu pod úhlem  $45^\circ$ . Z toho důvodu musí být Wollastonův vzpřimovací hranol umístěn v rovnoběžném paprskovém chodu, tj. v našem případě před objektivem (7) vlastního dalekohledu.

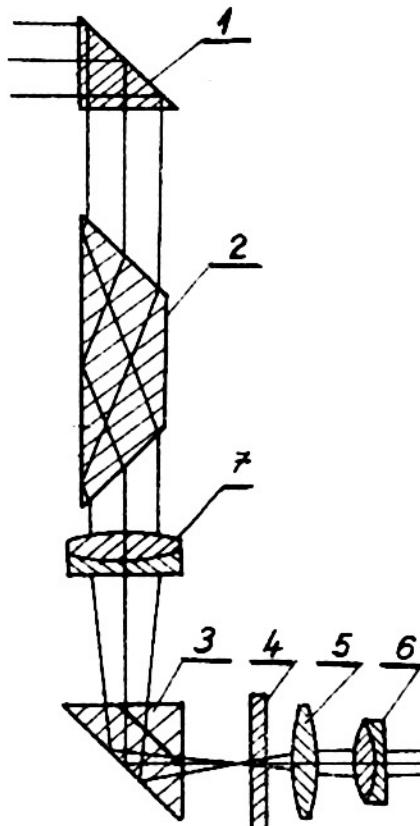
Protože při této konstrukci dalekohledu bylo použito tří odrazných hranolů, tj. lichý počet, bude obraz v zorném poli výškově správně orientován, zatím co stranově bude objektivem převrácen. Je proto nutno opatřit jeden z obou hranolů (1) a (3) střechou. Bývá to z rozměrových důvodů hranol (3), který je menší.

Zámezrný kříž je nanesen na plotence (4).

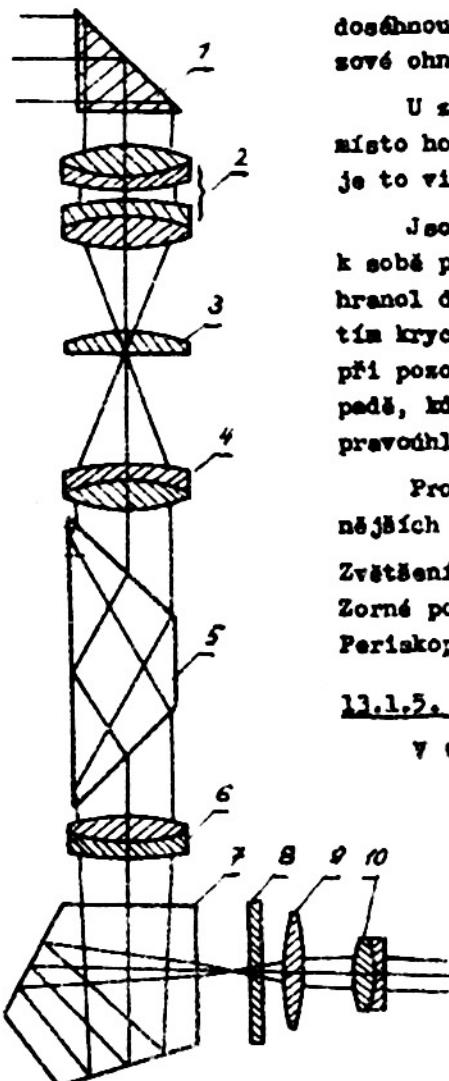
Jiná úprava konstrukce panoramatického dalekohledu je naznačena na obr. 13.1.4.3 (viz str. 144). Dalekohled tohoto zaměřovače je opatřen čočkou převracející soustavou s rovnoběžným paprskovým chodem mezi oběma jejimi členy. Potom musí mít soustava sudý počet odrazných hranolových ploch kolmých na nákresnou rovinu, takže střechový prevodní hranol (4) v předchozím případě musí být nahrazen normálním pentagonálním hranolem (7). Wollastonův vzpřimovací hranol (5) je nyní umístěn v rovnoběžných paprskových svazcích mezi oběma členy (4) a (6) převracející soustavy.

Této konstrukční úpravy se používá tehdy, když se má při větším zorném poli

-----  
x) Dělostřelecký dílec je úhel, pod kterým se jeví tyč dlouhá 1 m ze vzdálenosti 1 km. 1 dílec = 3 minutám, nebo  $90^\circ = 1500$  dílců.



Obr. 13.1.4.2 Optická soustava panoramatického dalekohledu.



Obr. 13.1.4.3 Optická soustava panoramatického dalekohledu s čočkovou převrácenou soustavou.

dosáhnout větší periskopické výšky. Proto se často v obrazové ohniskové rovině objektivu umisťuje kolektiv (3).

U zenitopanoramatických dalekohledů se často používá místo horního pravoúhlého hranolu, krychlového hranolu, jak je to vidět na obr. 13.1.4.4 (viz str. 145).

Jesou to v podstatě dva pravoúhlé hranoly, stmelené k sobě přeponovými plochami. V principu zastupuje krychlový hranol dva krátké Wollastonovy vspřímovací hranoly. Použitím krychlového hranolu se dosáhne, že dalekohledem projde při pozorování zenitu dvojmásobně široký svazek netr v případě, kdy by místo tohoto hranolu bylo použito jednoduchého pravoúhlého hranolu.

Pro informaci uvádíme některá konstrukční data nejběžnějších panoramatických dalekohledů:

Zvětšení 4x	Průměr výstupní pupily 4 mm
Zorné pole 10°	Vzdálenost výstupní pupily 19 mm
Periskopická výška H = 200 mm.	

#### 13.1.5. Tankové zaměřovače

V tankech se používají jednak zaměřovače kulometné a jednak dělové.

Kulometné zaměřovače bývají obyčejně lomené do tvaru písmene Z, jak je to vidět na obr. 13.1.5.1 (viz str. 145), kde je znázorněn vnější vzhled tohoto přístroje. Zvětšení těchto dalekohledů bývá  $\Gamma = 1$ , zorné pole 70° a průměr výstupní pupily kolem 4 mm. Je zřejmé, že tyto zaměřovače musí používat poměrně složitých širokouhlých okulárů. Vzhledem k velkému zornému poli lze zvládnout celý rozsah potřebných elevačních úhlů kulometu svislým posuvem sémerné značky v zorném poli.

Jinak je tomu u dělových tankových zaměřovačů, které vyžadují větší zvětšení  $\Gamma = 2,5$ , takže zorné pole je značně menší. V důsledku toho jsou kladený na korektní stav zaměřovače daleko vyšší požadavky, neboť zorné pole musí být využito až do jeho krajk. V případě, že by zorné pole bylo menší než rozsah potřebných elevačních děl, musí být před objektivem zaměřovače umístěno rovinné zrcadlo, které se otáčí kolem vodorovné osy a které vychylí sémernou osu o potřebný elevační úhel ještě před vstupem do zaměřovače.

Další okolnost, která znesnadňuje konstrukci tankových zaměřovačů je poměrně značná délka tankového děla. V důsledku toho je závér děla umístěn poměrně daleko za vodorovnou osou děla, což vede k velké stavební délce zaměřovače.

Kdyby byl takový zaměřovač pevně spojen s hlavní děla, opisoval by jeho okulář velký oblouk, takže atělec by nemohl při mífaní sedět, což by bylo velmi nevhodné z prostorových možností tanku. Proto se musí provést konstrukce dalekohledu tak, že se celá soustava rozdělí na dvě části. Kratší, přední část, která obsahuje objektiv (2), sémernou ploténku (3) a jeden pravoúhlý hranol (5) a která je

pevně spojena s hlavní děle a zadní, delší část obavšující převracející soustavu (8) a (9), okulár (10) a soustavu dvou hranolů (6) a (7), která je pevně spojena s vozidlem, takže okulár je vzhledem k vozidlu pevný (viz obr. 13.1.5.2).

Přední část dalekohledu se otáčí kolem vodorovné osy  $\overline{O'U}$ ; "kácení" obrazu, které je tím vyvoláno, se vyrovnává hranolem (6), který se otáčí poloviční rychlostí kolem osy  $O'U'$ . Je tedy možno říci, že přední část se otáčí jednak kolem osy  $\overline{O'U}$  a jednak se pohybuje po oblouku o středu  $O'U'$ , jak je to naznačeno na obr. 13.1.5.3 (viz str. 146).

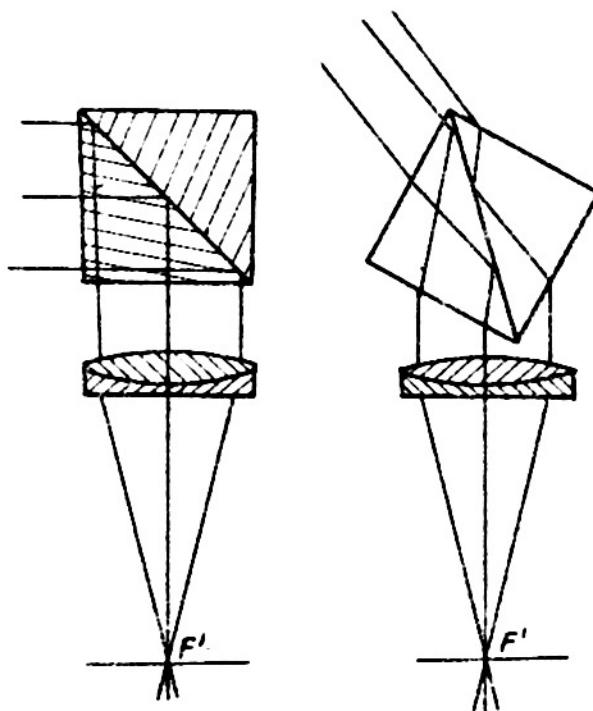
Zorné pole tankových dělových dalekohledů se pohybuje kolem  $25^\circ$ , průměr výstupní pupilly krom 6 mm a její vzdálenost od poslední plochy okuláru asi 25 mm.

Existuje celá řada jiných monokulárních zaměřovacích dalekohledů pro jiné zbraně. Čelem těchto skript však není podat vyčerpávajícím způsobem přehled všech dosud vyvinutých zaměřovačů. Omezili jsme se pouze na několik typických představitelů.

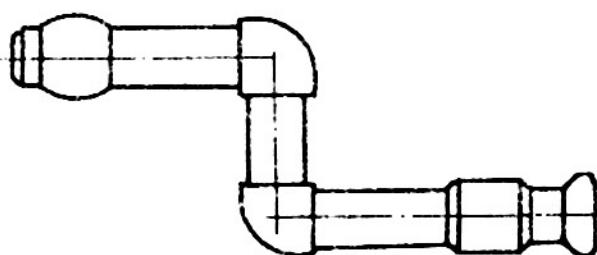
Závěrem kapitoly o monokulárních dalekohledech si řekneme ještě krátce o tzv. zaměřovačích kolimátorových.

### 13.2. Kolimátorové zaměřovače

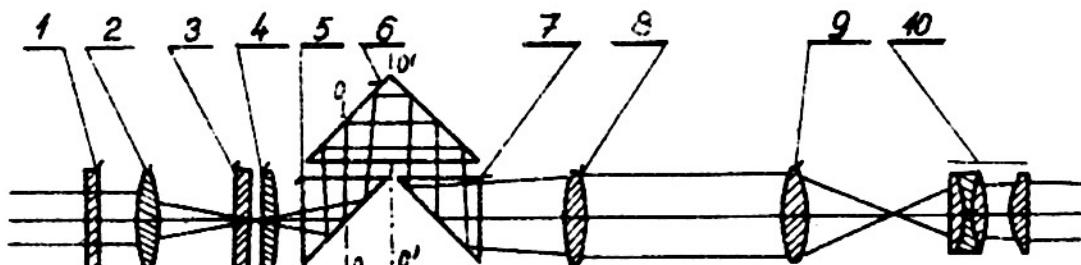
K zamílení je možno použít mimo dalekohledu též kolimátoru. Kolimátor je v podstatě tvoren objektivem, v jehož ohniskové rovině je umístěna zámeřná značka. Kolimátor je přivrácen k pozorovateli objektivem, jak je to vidět na obr. 13.2.1 (viz str. 146).



Obr. 13.1.4.4 Krychlový hranol u zenitopanoramatických dalekohledů.



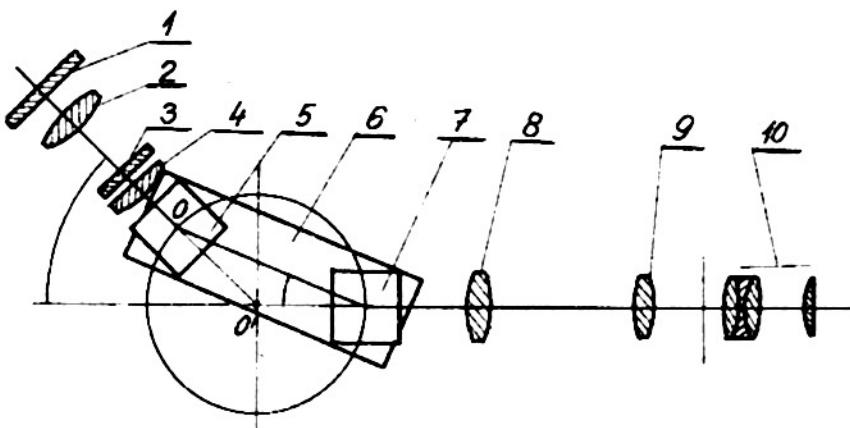
Obr. 13.1.5.1 Vnější vzhled kulometného zaměřovače.



Obr. 13.1.5.2 Optická soustava tankového dělového zaměřovače.

Z objektivu vystupuje sestupek paprsků rovnoběžných s optickou osou objektivu, takže pozorovatelu oko umístěné před objektivem vidi značku bez akomodace v nekonečnu.

Záměrná značka se může opět pohybovat ve svislém směru, takže i v tomto případě je možno snadno záměrnou osu vychylovat.



Obr. 13.1.5.3 Boční pohled na optickou soustavu tankového zaměřovače při vychýlení přední části.

Při aplikaci kolimátoru u zaměřovacích přístrojů musí být kolimátor upraven tak, aby nepřekážel při pozorování cíle. Z toho důvodu se kolimátory různě upravují.

Na obr. 13.2.2 je znázorněno jednoduché provedení kolimátoru. V podstatě je tvořen skleněnou tyčinkou obdélníkového průřezu, která je na jednom konci zakončena rovinou plochou a na druhém kulovou plochou. Poloměr  $r$  této plochy platí

$$r = f' \cdot \frac{n-1}{n}, \quad (13.2.1)$$

kde  $n$  značí index lomu skla, ze kterého je kolimátor zhotoven.

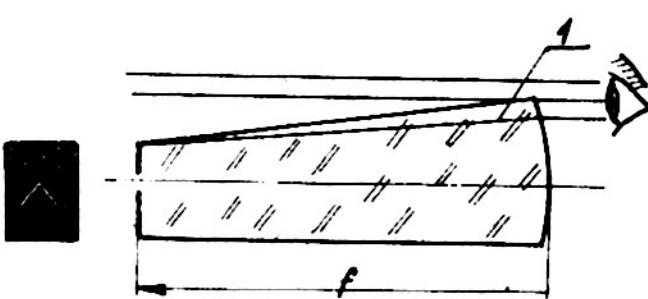
Volíme-li např.  $n = 1,5$ , vyházíme

$$r = f' \cdot \frac{0,5}{1,5} = \frac{f'}{3}.$$

Rovinná plocha je pokryta neprůhlednou vrstvou kovu, např. stříbra, do kterého je vyryta vhodná záměrná značka prosvětlovaná světlem oblohy nebo žárovky.

Horní plocha tyčinky je šikmo seříznuta, takže oko může při vhodné poloze snadno pozorovat přes hrancu (1) cíl i záměrnou značku, která se na cíl promítá. Nekláněním tyčinky se uvede značka do koincidence s cílem.

Na obr. 13.2.3 (viz str.147) je znázorněna optická sestava tzv.



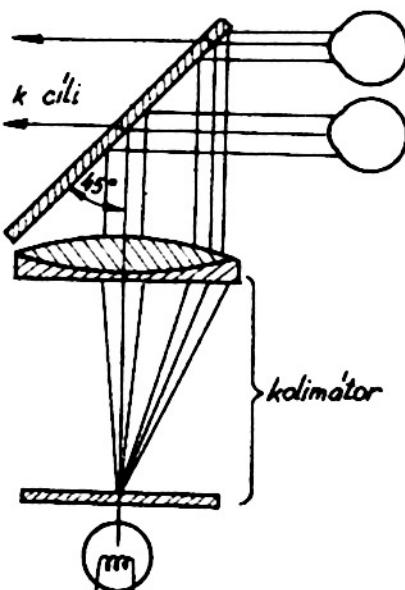
Obr. 13.2.1 Princip kolimátorového zaměřovače.

reflexního kolimátoru, který se často nazývá jednoduše též reflexvisírem. Vlastní objektivový kolimátor je umístěn tak, aby jeho optická osa byla svislá.

Nad kolimátorem je umístěna skleněná polopropustná planparallelní deska, která je skloněna vzhledem k osi kolimátoru pod úhlem  $45^{\circ}$ , takže zámerná osa je odchylena do vodorovného směru.

Oko umístěné za planparallelní deskou vidí jednak přímo cíl a jednak po odráze na planparallelní desce zámernou značku.

Tyto zaměřovače se používají všude tam, kde je nutné, aby poloha pozorovateľova oka nebyla přesně vázána na přístroj, jak tomu bývá vždy u běžných dalekohledových zaměřovačů. Proto průměr kolimátorového objektivu se volí poměrně veliký, kolem 50 mm.



Obr. 13.2.3 Optická soustava reflexvisíru.

#### 14. BINOKULÁRNÍ DALEKOHLEDY

Binokulární dalekohledy se vyznačují především tím, že využívají obou očí, čímž se aniuje únavu sraku a na druhé straně zajistuje určitou plastičnost.

U binokulárních dalekohledů mluvime často o poměrné a plné plastičnosti. Poměrná plastičnost  $P_r$  je dána poměrem vzdáleností středu objektivu  $B$  a očního rozestupu (báze)  $b$ . Tedy

$$P_r = \frac{B}{b} . \quad (14.1)$$

Plná plastičnost  $P$  je dána součinem poměrné plastičnosti  $P_r$  a světění dalekohledu. Tedy

$$P = P_r \cdot \Gamma = \frac{B}{b} \Gamma . \quad (14.2)$$

Ze vztahu (12.8.4.8) vyplývá, že k zajištění neskreslené perspektivy pozorovaného prostoru je nutné, aby poměrná plastičnost dalekohledu byla rovna jeho světění  $\Gamma$ . Potom plná plastičnost takového binokulárního dalekohledu je rovna  $\Gamma^2$ .

Vězme si nyní dvou typických představitelů binokulárních přístrojů.

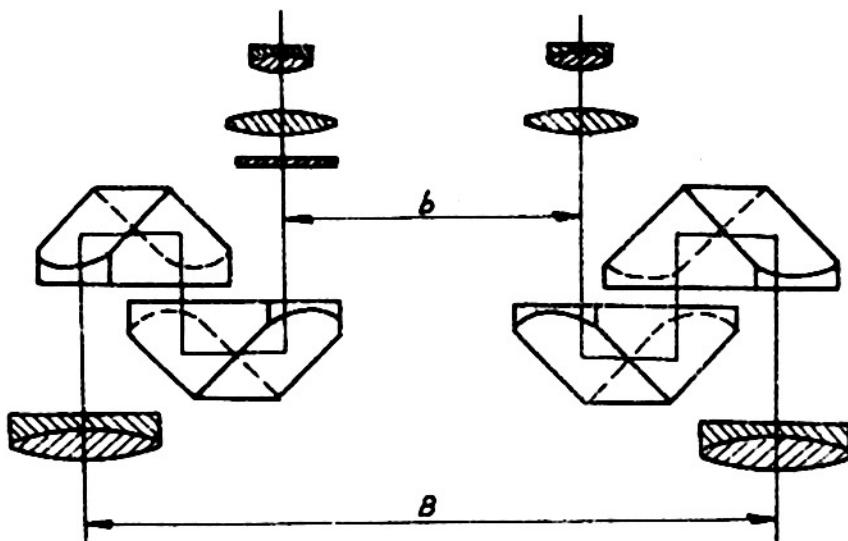
##### 14.1. Triedr

Triedr je nejrozšířenější binokulární dalekohled, který se používá jak v civilní, tak i ve vojenské praxi. Z toho důvodu je žádáno, aby jeho rozměry a váha byly co nejmenší, cca do 1 kg. Tento požadavek vyloučil použití čočkové převracející soustavy. Protože triedry pro vojenské účely musí být vybaveny vhodnou zámernou osnovou, musí být k jejich konstrukci použito Keplerova dalekohledu.

Jako převracející soustavy se používá proto hranolové soustavy Porro I, jak je to vidět na obr. 14.1.1, kde je znázorněna optická soustava triedru.

V současné době se vyrábí triedry parametrů uvedených v tab. 14.1.1.

Uvažujme případ nejpoužívanějšího triedru 6 x 30. Pro poloměr stereoskopického



Obr. 14.1.1 Optická soustava triedru.

Tab. 14.1.1

Zvětšení	Průměr objektivu mm	Průměr výst. pupily mm	Zorné pole
4	20	5	12°
6	30	5	8,5°
8	30	3,75	8,5°
7	50	7,1	7,3°
12	60	5	6°

vidění  $d_0$  vychází podle 12.8.4.4 při  $\delta_0 = 10^\circ$  a  $B = 2b$

$$d_{0D} = \frac{B \cdot \Gamma}{\delta_0} = \frac{2 \cdot 65 \cdot 6}{10} \cdot 10^5 = 15,6 \text{ km} .$$

Pro poměrnou plastičnost uvalovaného triedru vychází podle (14.1)

$$P_r = \frac{B}{b} = 2$$

• pro plnou plastičnost

$$P = P_r \cdot \Gamma = 2 \cdot 6 = 12 .$$

Konečně pro hloubku stereoskopického vidění plyne podle (12.8.4.6)

$$b_p = \frac{d_D^2 \cdot \delta_0}{B \cdot \Gamma} = \frac{d_D^2 \cdot d_0}{b \cdot \Gamma} \cdot \frac{1}{P} = \frac{d_D^2}{b} \cdot \frac{1}{P} = \frac{d_D^2}{b} \cdot \frac{1}{P_r} , \quad (14.1.1)$$

kde  $b$  značí hloubku stereoskopického vidění při pozorování neozbrojenýma očima.  
Je vidět, že hloubka stereoskopického vidění při pozorování triedrem bude  $P$ -krát menší.

Např. pro  $d_D = 1000 \text{ m}$  a  $\delta_0 = 10^\circ$ ;  
odtud plyne

$$b_p = \frac{d_D^2 \cdot \delta_0}{B \cdot \Gamma} = \frac{1000^2 \cdot 10}{0,130 \cdot 6 \cdot 2 \cdot 10^5} = 64 \text{ m}$$

zatím co

$$h = 12 \cdot b_p = 12 \cdot 64 = 770 \text{ m} .$$

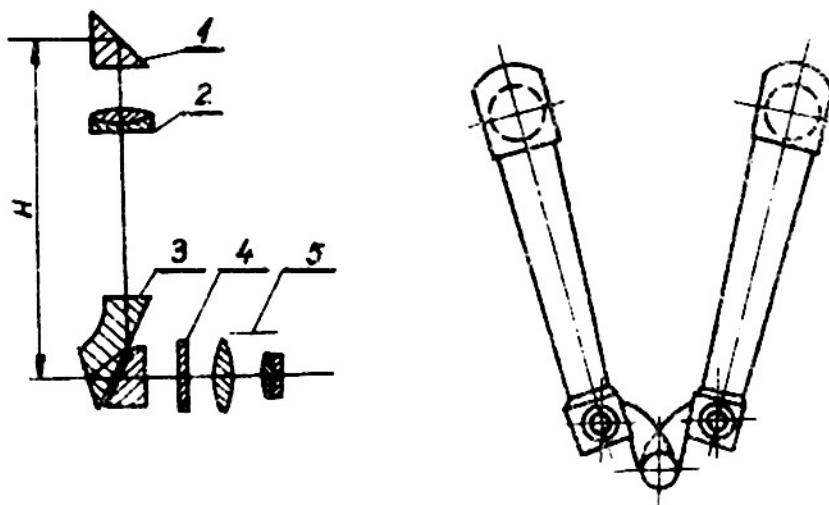
#### 14.2. Náškový stereoskopický dalekohled

V podstatě je to binokulární dalekohled s plynule proměnnou plastičností, která se mění v rozsahu od 20 do 100. Přitom je konstrukce upravena tak, aby při maximální plastičnosti byly splněny podmínky pro nákreslenou perspektivu, tj. platí

$$B = b \cdot \Gamma .$$

Zvětšení dalekohledu se volí  $\Gamma = 10$ , takže při  $b = 63 \text{ mm}$  je  $B = 650 \text{ mm}$ . Dalekohled je složen ze dvou stejných polovin tvaru periskopu o periskopické výšce

$$H = \frac{B}{2} = \frac{650}{2} = 325 \text{ mm} . \text{ Optická soustava je patrná z obr. 14.2.1. Jak je vidět,}$$



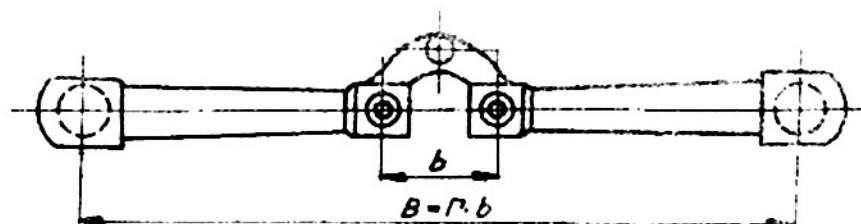
Obr. 14.2.1 Optická soustava náškového dalekohledu.

je převracející soustava tvořena pravodlným hrancem (1) a Bachmannovým hrancem (3). Dalekohled je opatřen zámernou ploténkou (4).

Jeho mechanická konstrukce je upravena tak, že obě poloviny dalekohledu jsou spolu spojeny kloubem, který umožňuje plynulé "otvírání" až do úplného rozvedení, jak je to naznačeno na obr. 14.2.2. Pro informaci uvádíme závěrem některé optické data:  $\Gamma = 10 \times$ , zorné pole  $4^\circ$ , průměr výstupní pupily  $4 \text{ mm}$ .

Pro polohu stereoskopického vidění při plném rozvedení dalekohledu je plati nákreslená perspektivní výhled:

$$d_{ob} = \frac{B \cdot \Gamma}{2} = \frac{0,650 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 10^3}{2} = 130 \text{ m} .$$



Obr. 14.2.2 Vnější pohled na náškový dalekohled.

Podobně vychází pro hloubku stereoskopického vidění pro  $d_D = 1000$  m

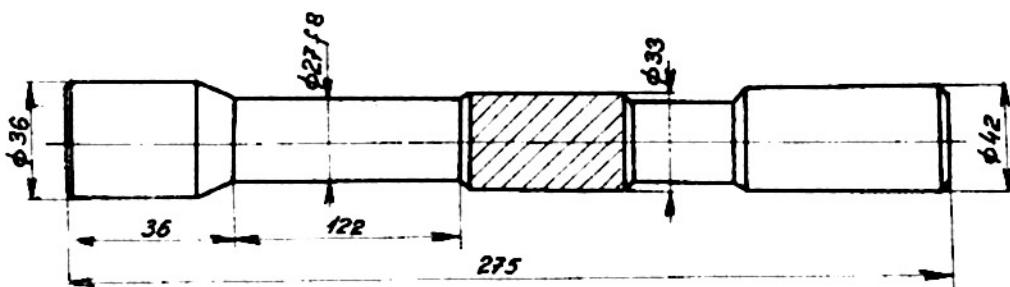
$$h_D = \frac{1000^2 \cdot 10}{0,65 \cdot 10 \cdot 2 \cdot 10^5} = 7,7 \text{ m}.$$

## 15. PRAKTIČKÉ NAVRHOVÁNÍ MONOKULÁRNÍCH A BINOKULÁRNÍCH DALEKOHLÉDŮ

### 15.1. Návrh konstrukce puškového dalekohledu

Má se navrhnout puškový zaměřovací dalekohled, který by splňoval následující požadavky:

1. Zvětšení  $\Gamma = 4 \times$
2. Zorné pole  $6^\circ$
3. Průměr výstupní pupily  $D' = 7,5 \text{ mm}$
4. Vzdálenost výstupní pupily od poslední plochy okuláru  $80 \text{ mm}$
5. Celková délka přístroje  $275 \text{ mm}$
6. Paralaxu vyloučit na takovou vzdálenost, aby od  $60$  do  $200$  m byla nepozorovatelná.
7. Optickou soustavu navrhnut tak, aby vnější obrys přístroje nepřekročily rozměry dané obr. 15.1.1.
8. Zaměřovač musí dovolit zamíření na cíl ve vzdálenosti  $1000$  m, je-li příslušná elevace zbraně  $25$  dílců. Zamíření nutno provést vychýlením zášerné osy dalekohledu.



Obr. 15.1.1 Vnější rozměry puškového zaměřovacího dalekohledu.

#### Postup návrhu

1. Nejdříve určíme průměr objektivu  $D$  z daného průměru výstupní pupily

$$D = \Gamma \cdot D' = 4 \times 7,5 = 30 \text{ mm}.$$

2. Nyní určíme ohniskovou vzdálenost objektivu  $f'$  z podmínky pro barevnou vadu polohy. Aby se barevná vada polohy neprojevovala, musí podle (9.17) ohnisková vzdálenost  $f'$  objektivu splňovat podmíinku

$$f' > 1,2 D^2 \quad \text{čili}$$

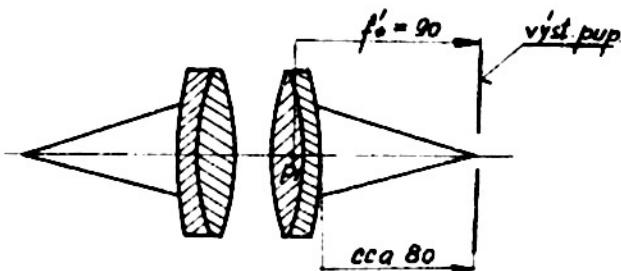
$$f' > 1,2 \cdot 3^2 = 10,8 \text{ cm}.$$

Vzhledem k tomu, že celková stavební délka dalekohledu je omezena, budeme raději volit  $f' = 90 \text{ mm}$ , aniž se dopustíme větší chyby.

3. S ohledem na malé výrobní náklady budeme pro okulár volit souměrnou stavbu podle obr. 15.1.2 tak, aby výstupní pupila okuláru ležela v obrazovém ohnisku druhého článku. Protože je podle bodu 4. žádáno, aby výstupní pupila dalekohledu

ležela ve vzdálenosti cca 80 mm za poslední plochou okuláru, je nutné volit ohniskovou vzdálenost každého z obou členů okuláru  $f'_1 = 90$  mm.

Budeme-li předpokládat, že vzdálenost mezi přilehlými hlavními body obou členů okuláru bude asi 5 mm, vychází pro ohniskovou vzdálenost okuláru  $f'_0$



Obr. 15.1.2 Optická soustava okuláru puškového dalekohledu.

$$f'_0 = \frac{f'_1^2}{2f'_1 - e} = \frac{90^2}{180 - 5} = \frac{8100}{175} = 46,5 \text{ mm}.$$

Pro polohu ohnisek  $P$  a  $P'$  okuláru platí

$$p_1(P) = - \frac{(f'_2 - e) \cdot f'_1}{f'_1 + f'_2 - e} = - \frac{85 \cdot 90}{175} = - 43,6 \text{ mm}$$

$$p'_2(P') = \frac{(f'_1 - e) \cdot f'_2}{f'_1 + f'_2 - e} = \frac{85 \cdot 90}{175} = + 43,6 \text{ mm},$$

což je zřejmě vzhledem k souměrnosti okuláru.

4. Když jsme určili ohniskové vzdálenosti  $f'$  a  $f'_0$  objektivu a okuláru, můžeme přistoupit k určení parametrů převracející soustavy.

Budeme-li předpokládat převracející soustavu s rovnoběžným paprskovým chodem mezi jejimi členy, pak pro zvětšení dalekohledu jako celku platí

$$\Gamma = \frac{f'_1}{f'_0} \cdot \frac{f'_2}{f'_1},$$

kde  $f'_1$  a  $f'_2$  jsou ohniskové vzdálenosti prvního a druhého člena převracející soustavy. Protože podle bodu 1. má být  $\Gamma = 4$ , vychází

$$4 = \frac{90}{46,5} \cdot \frac{f'_2}{f'_1} \quad \text{čili}$$

$$\frac{f'_2}{f'_1} = 2,07.$$

Pro zjednodušení návrhu budeme volit poměr  $f'_2 / f'_1 = 2$  a upravíme ohniskovou vzdálenost  $f'$  objektivu z 90 mm na 93 mm, aby předchozí rovnost byla splněna.

Načrtnešme-li si na základě dosud nalezených hodnot optickou soustavu dalekohledu, vidíme (obr. 15.1.3 viz str. 152), že interval  $\Delta$  pro převracející soustavu je roven cca 123 mm. Při těchto úvahách jsme omezili celkovou stavbní délku dalekohledu z daných 275 mm na 260 mm. Tím jsme si vytvořili rezervu pro zavedení tloušťek a ochranu vnější plochy objektivu a okuláru před mechanickým poškozením (jejich vrcholy budou ležet uvnitř tubusu dalekohledu).

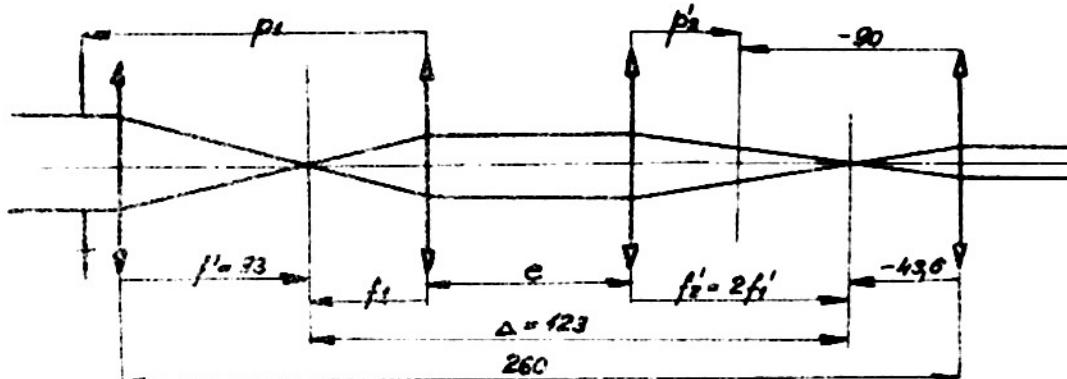
Můžeme tedy psát

$$3f'_1 + e = \Delta \quad (= 123). \quad (15.1.1)$$

Tento vztah tvorí jednu podmínku pro určení ohniskové vzdálenosti  $f'_1$  prvního člena převracející soustavy.

Havelka B., Geometrická optika, I., 82, Praha 1955.

Druhou podmínce určíme z požadavku, aby převrácený obraz vstupoval do pupila dalekohledu (objektivu) cca 90 mm před okulárem (viz obr. 15.1.2).



Obr. 15.1.3 Předběžný návrh optické soustavy puškového zaměřovacího dalekohledu.

Musej tedy platit

$$\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_1'} = \frac{1}{f_1}, \quad \left. \begin{array}{l} p_1 = -(93 + f_1') \\ p_2 = p_1' = 0 \end{array} \right\}$$

Me

$$\frac{1}{p_2} - \frac{1}{p_2'} = \frac{1}{f_2} = \frac{1}{2f_1} \quad (15.1.2)$$

Me

$$p_2' = 2f_1' + 43,6 = 90$$

Ručením těchto rovnic dostaneme postupně

$$p_1' = \frac{p_1 \cdot f_1}{p_1 + f_1} = \frac{-(93 + f_1') \cdot f_1}{93}$$

$$p_2 = \frac{(93 + f_1') \cdot f_1 - 93 \circ}{93}$$

$$p_2' = \frac{2 p_2 f_1}{p_2 + 2 f_1} = \frac{2 (93 + f_1') f_1^2 - 186 f_1 \circ}{(93 + f_1') \cdot f_1 - 93 \circ + 186 f_1}$$

a pomocí poslední rovnice

$$2 f_1' + 43,6 - 90 = \frac{2 (93 + f_1') f_1^2 - 186 f_1 \circ}{(93 + f_1') \cdot f_1 - 93 \circ + 186 f_1} \circ$$

Po úpravě odhad dostaneme

$$325,5 f_1^2 - 12.373,5 f_1 + 4.124,5 \circ = 0, \text{ nebo}$$

$$f_1^2 - 38,016 f_1 + 12,672 \circ = 0.$$

Dosadíme-li nyní z první podmínky (15.1.1) za  $\circ$  hodnotu

$$\circ = \Delta - 3 f_1$$

dostaneme dle

$$f_1^2 - 36,016 f_1 + 12,672 (\Delta - 3 f_1) = 0 \text{ čili}$$

$$f_1^2 - 76,032 f_1 + 12,672 \cdot \Delta = 0.$$

Odkud

$$(f_1)_{1,2} = 38,016 \pm \sqrt{38,016^2 - 12,672 \cdot \Delta}.$$

Volime-li  $\Delta = 123$  mm, bude diskriminantzáporný. Musíme proto interval  $\Delta$  zmenšit.

Volme  $\Delta = 113$  mm. Potom z předchozí rovnice dostaneme

$$(f_1)_{1,2} = 38,016 \pm \sqrt{1445,2 - 1431,9} = 38,016 \pm 3,64 = \begin{array}{l} 41,656 \text{ mm} \\ 35,376 \text{ mm} \end{array}$$

Pro nás případ má význam řešení druhé, neboť splňuje podmíinku (15.1.1)

$$e = 113 - 106,128 = 7 \text{ mm}.$$

Provědme nyní kontrolu stavební délky L celého přístroje

$$L = f' + f_1 + e + 2x_1 + p_2(F) = 93 + 35,4 + 7 + 70,8 + 43,6 = 249,8 \text{ mm}.$$

Tedy z celkové délky 275 mm nám zbyvá cca 25 mm.

5. Když jsme určili ohniskové vzdálenosti všech členů soustavy a jejich vzdušné vzdálenosti, zbyvá určit jejich průměry.

#### a) Určení průměru objektivu

Pro optický průměr objektivu jsme našli z požadavku na průměr výstupní pupily a zvětšení hodnotu  $D_o = 30$  mm. Aby bylo možno mechanicky upevnit objektiv v příslušné objímce, je nutné průměr zvětšit na  $D_M = 32$  mm.

#### b) Určení průměru okuláru

Průměr okuláru určíme z podmínky, že výstupní pupila s průměrem  $D' = 7,5$  mm leží ve vzdálenosti 80 mm za poslední plochou okuláru a že zorné pole má být  $\Gamma = 6^\circ$ .

Zdánlivé zorné pole bude  $\Gamma' = \Gamma \cdot \Gamma = 6 \cdot 4 = 24^\circ$ . Potom podle obr. 15.1.4 platí pro průměr  $D_o$  okuláru

$$D_o = 2 (2 + 80 \cdot \operatorname{tg} \frac{\Gamma'}{2}) = 2 (2 + 80 \cdot 0,212) = 38 \text{ mm}.$$

Z důvodu upevnění je nutno zvětšit průměr na  $D_M = 40$  mm.

#### c) Určení průměru člena převracající soustavy

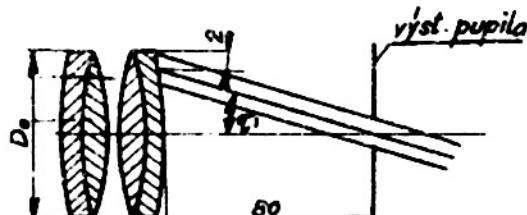
Průměr prvního člena převracající soustavy určíme pomocí obr. 15.1.5, kde je znázorněn paprskový chod z okraje zorného pole od objektivu k prvnímu členu převracající soustavy.

Snímíme-li se s tím, aby do krajů zorného pole pokleslo množství světla na 50 %, pak pro průměr  $D_o$  prvního člena vyházi podle obrázku

$$D_o = 2(93+35,4) \cdot \operatorname{tg} 3^\circ = 257,0,052 = 13,4 \text{ mm}.$$

Budeme volit 14 mm.

Z důvodu upevnění zvětšíme průměr prvního člena na 16 mm. Tentýž průměr můžeme volit i pro druhý člen, neboť leží těsně vedle prvního člena.

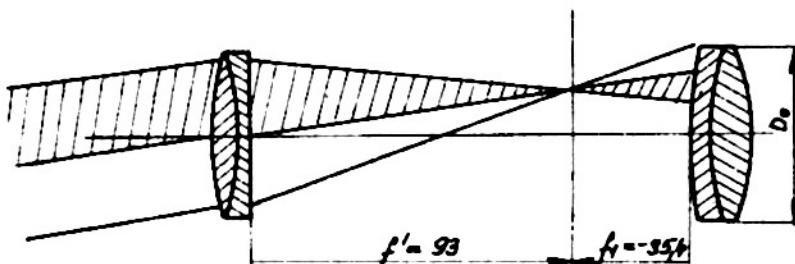


Obr. 15.1.4 K určení průměru okuláru.

Porovnáme-li nalezené průměry s nártkem 15.1.1, vidíme, že žádny z určených průměrů nepřekročil rozměry vymezené tímto nártkem a zbývá ještě prostor pro příslušné kovové tubusy.

#### 6. Volba stavby jednotlivých členů zaměřovacího dalekohledu.

Pro všechny členy dalekohledu je možno volit achromatické čočky. Nutno ovšem podotknout, že dalekohled nebude tvořit jako celek vykorigovanou soustavu, nýbrž že je nutné trigonometrickým propočtem soustavu vykorigovat. Změny tvaru nebo stavby jednotlivých členů vyplývající z požadavku na korekci vad nemají však již podstatného vlivu na celkovou stavbu dalekohledu.



Obr. 15.1.5 K určení průměru členů převracející soustavy.

#### 7. Grafická kontrola návrhu dalekohledu

Závěrem je nutno celý návrh graficky překontrolovat. Pro zvýšení přesnosti jsou na obr. 15.1.6 příčné rozměry 4 x zvětšeny. Současně jsou pro jednotlivé členy soustavy zavedeny tloušťky a sice pro objektiv a oba členy okuláru 4 mm a pro oba členy převracející soustavy 3 mm.

Je vidět, že z celkové stavební délky bylo odčerpáno 272,8 mm, takže asi 2 mm zbyvají k zajištění vnějších ploch<sup>x)</sup>. Průměr okuláru je nutno zvětšit asi o 0,5 mm.

Obr. 15.1.7 obsahuje optickou sestavu puškového zaměřovače v měřítku 1 : 1, s achromatickými členy.

#### 8. Určení posuvu záměrné značky

Podle bodu 8. požadavků uvedených na navrhovaný zaměřovač je nutno realizovat zamíření na vzdálenost 1000 m při elevačním úhlu 25 dílců vysunutím záměrné značky ve světlém směru.

Zorné pole dalekohledu je  $T = 6^\circ$ . Záměrný úhel 25 dílců =  $3.25' = 75' = 1^\circ 15'$  je hodně menší než 1/2 zorného pole a lze tedy snadno vychýlit záměrnou osu o příslušný úhel, aniž bychom musili pracovat v okraji zorného pole, kde již nemusí být nejlepší korekční stav zobrazení.

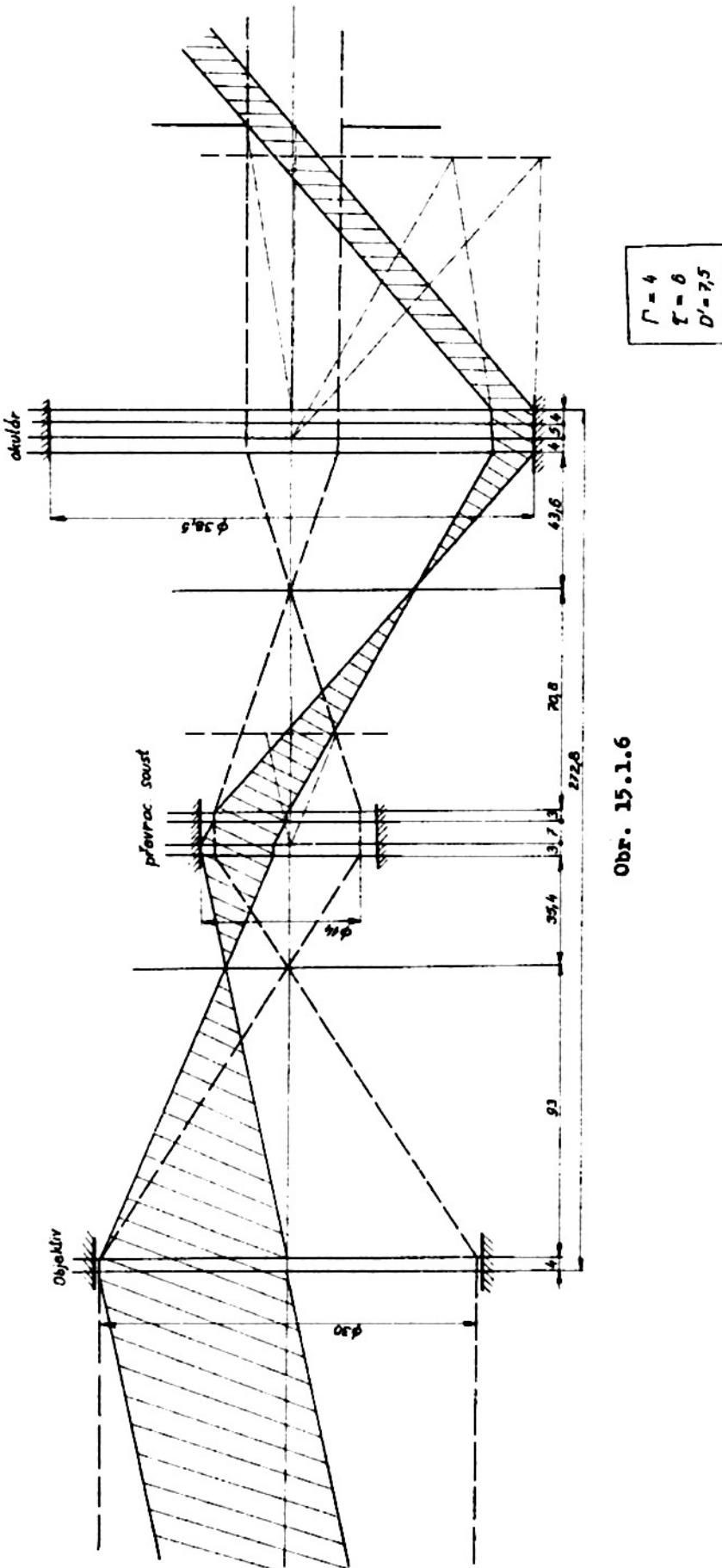
Bude-li záměrná značka umístěna v obrazové ohniškové rovině objektivu, bude její svislý posuv  $h$  odpovídající záměrnému úhlu 25 dílců roven

$$h = f' \cdot \operatorname{tg} 25 \text{ dílců} = 93 \cdot 0,025 = 2,325 \text{ mm}.$$

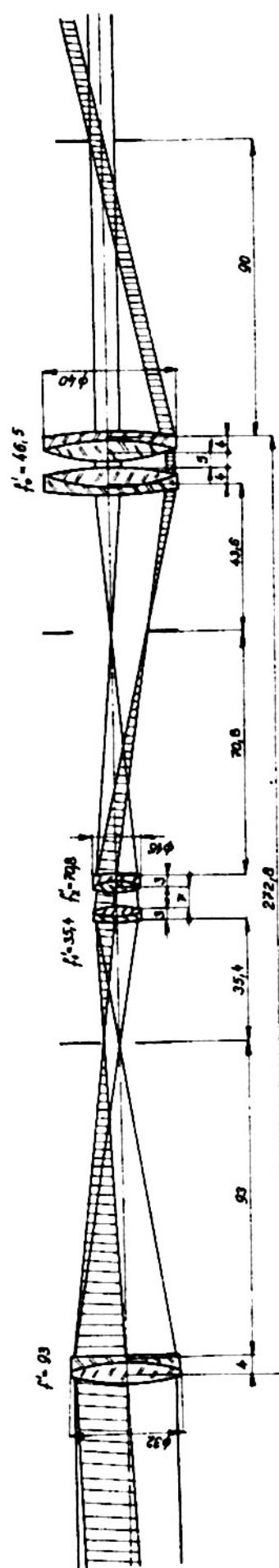
Bude-li záměrná značka umístěna v předmětové ohniškové rovině okuláru, bude její posuv

$$h = f' \cdot \operatorname{tg} 25 \text{ dc} \cdot m, \text{ kde}$$

x) Kdyby se ukázalo, že tato hodnota nestačí, bylo by třeba ještě o něco zmenšit interval, např. na 112 mm.



Obr. 15.1.6



Obr. 15.1.7

$\Gamma$  značí zvětšení převracející soustavy.

V našem případě je

$$n = \frac{f_2'}{f_1'} = 2,$$

takže posuv  $h = 2 \cdot 2,325 = 4,65$  mm.

### 9. Určení vzdálenosti, na kterou má být při justaci vyloučena paralaxe

Podle vztahu (8.7.10) vychází pro pomocnou vzdálenost  $x_0$

$$x_0 = - \frac{D' \Gamma}{6} \cdot 10^4 = - \frac{D' \Gamma^2}{6} \cdot 10^4 = - \frac{30 \cdot 4}{6} \cdot 10^4 = - 200 \text{ m}.$$

Vylučme parallaxu na vzdálenost  $x = - 100$  m. Potom vychází pro vzdálenosti  $x_1$  a  $x_2$ :

$$x_1 = \frac{x_0 \cdot x}{x_0 + x} = \frac{200 \cdot 100}{-200 + 100} = - 200 \text{ m}$$

$$x_2 = \frac{x_0 \cdot x}{x_0 + x} = \frac{200 \cdot 100}{-200 - 100} = - \frac{200}{3} = - 66 \text{ m}.$$

Je vidět, že při nastavení dalekohledu na vzdálenost  $- 100$  m bez paralaxy, nebude parallaxa patrná při míření na cíle v rozsahu vzdáleností od  $- 66$  do  $- 200$  m.

### 15.2. Návrh konstrukce dělového zaměřovače

Je navrhnut dělový zaměřovač o těchto parametrech:

1. Zvětšení  $\Gamma = 2,5$
2. Zorné pole  $20^\circ$
3. Průměr výstupní pupily  $D' = 6,5$  mm
4. Zamíření se má provádět vysouváním zámezrné značky tak, aby bylo možno do足eckně přesně nastavit délky podle tab. 15.2.1, která obsahuje příslušné balistické hodnoty délka.

Tab. 15.2.1

Vzdálenost v km	Elevace v dílcích dc	Vzdálenost v km	Elevace v dílcích dc
1	0,6	9	8,8
2	1,5	10	10,0
3	2,4	11	11,1
4	3,3	12	12,7
5	4,0	13	14,1
6	5,3	14	15,6
7	6,5	15	17,4
8	7,7	-	-

5. Konstrukce pro posuv zámezrného obrazce provést tak, aby celý rozsah stupnice délky střelby od 0 do 15 km byl rovinut na délce alespoň 100 mm.

6. Konstrukci přístroje upravit tak, aby osa okuláru svírala s optickou osou přístroje úhel  $45^\circ$ .

7. Volit konstrukci tak, aby přístroj měl minimální stavební délku.

8. Spojení zaměrovače se zbraní je nutno provést pomocí válcové části o délce 70 mm a průměru 34 mm, jak je to vyznačeno na rozměrovém náčrtku na obr. 15.2.1.

Postup návrhu:

1. Určení pěnovací jíce soustavy

Bod 6. požadavků kladených na přístroj vede nutně k použití hranolové pěnovací jíce soustavy. Pro nás případ nejlépe vyhoví Schmidtův střebový hranol, znázorněný na obr. 15.2.2, který současně zajistí splnění bodu 7.

Podle přílohy tohoto skripta vychází pro dráhu l paprsku v hranolu

$$l = 3,0402 \cdot D_M .$$

Zhotovíme-li hranol ze skla BaK 4, jehož index lomu  $n = 1,56883$ , bude prodloužení vyvolané Schmidtovy hranolovinou

$$\Delta = \frac{n-1}{n} l = \frac{1,56883-1}{1,56883} l = 1,1 \cdot D_M .$$

2. Určení ohniskové vzdálenosti objektivu

Má-li být stavba přístroje co nejméně, musí být objektiv umístěn těsně před vstupní plochou a jeho ohnisková rovina těsně za výstupní plochou uvažovaného Schmidtova hranolu.

To znamená, že sečná ohnisková vzdálenost  $s'$  objektivu musí být rovna délce

$$s' = l - \Delta = 3,04 \cdot D_M - 1,1 \cdot D_M = 1,94 D_M .$$

Abychom mohli tuto sečnou vzdálenost  $l - \Delta$  určit, je nutné nejdříve stanovit průměr  $D_o$  objektivu.

Pro tento průměr vychází z bodů 1. a 3. požadavků

$$D_o = D' \cdot f = 6,5 \cdot 2,5 = 16,25 \text{ mm} .$$

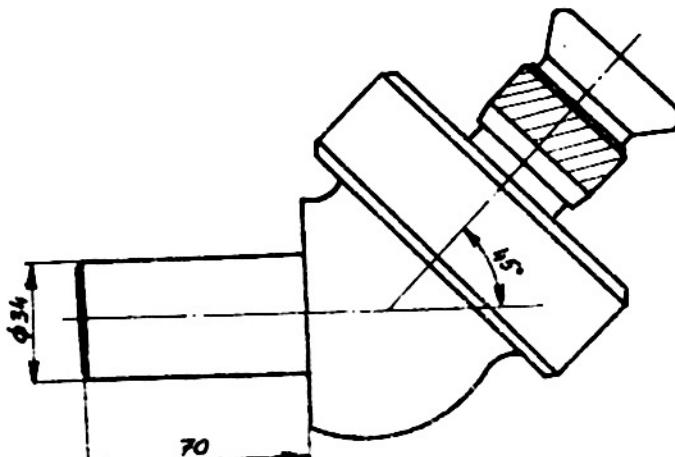
Potom  $D_M$  hranolu je možno volit

$$D_M = 18 \text{ mm} .$$

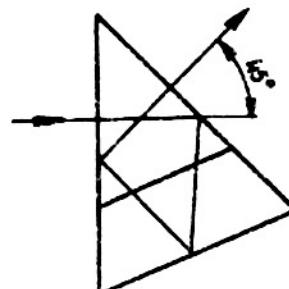
Pro sečnou vzdálenost  $s'$  objektivu vychází

$$s' = 1,94 \cdot D_M = 1,94 \cdot 18 = 35 \text{ mm} .$$

Protože objektiv spotřebuje pro svoje upevnění určitý prostor a protože v jeho ohniskové rovině musí být umístěna pohyblivá zámečná ploténka, nemůže ani objektiv a jeho obrazová ohnisková rovina ležet těsně před resp. za vstupní resp. výstupní plochou Schmidtova hranolu. Vyhradíme si pro objektivu prostor 16 mm (měřeno ve směru optické osy) a pro zámečnou ploténku prostor 19 mm, bude nutné,



Obr. 15.2.1 Vnější obrysy přístroje.



Obr. 15.2.2 Schmidtov střebový hranol.

aby sečné vzdálenost  $s'$  objektivu měla hodnotu

$$s' = 35 + 16 + 19 = 70 \text{ mm}.$$

Kdybychom bez ohledu na zorné pole volili pro objektiv achromatickou čočku, musila by být jeho ohnisková vzdálenost větší, cca 73 - 74 mm.

Při požadovaném zvětšení  $f' = 2,5$ , musil by být volen okulár o ohniskové vzdálenosti

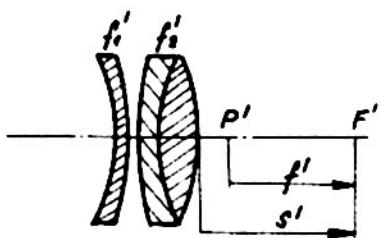
$$f'_0 = \frac{74}{2,5} = 30 \text{ mm},$$

což je příliš velká hodnota, která by podstatně zvedla rozměry celého přístroje.

Z toho důvodu je nutné volit takovou stavbu objektivu, která by při požadovaném zorném poli umožnila skrátit ohniskovou vzdálenost při zachování nalezené sečné vzdálenosti  $s'$ .

Stačí předřadit před achromatickou čočku meniskovou rozptylku, jak je to náznáčeno na obr. 15.2.3, která vytlačí hlavní bod  $P'$  směrem k obrazové rovině.

Označme  $r'_1$  a  $r'_2$  ohniskové vzdálenosti obou členů uvažovaného objektivu a určeme jejich hodnoty, když  $f' = 62$  a  $s' = 70$  mm. Určíme je ze vztahů



Obr. 15.2.3 Stavba objektivu s velkou sečnou ohniskovou vzdáleností.

$$\left. \begin{aligned} \frac{r'_1 r'_2}{r'_1 + r'_2 - e} &= f' = 62 \\ \frac{(r'_1 - e) \cdot r'_2}{r'_1 + r'_2 - e} &= s' = 70 \end{aligned} \right\} \quad (15.2.1)$$

Řešením těchto rovnic dostaneme

$$\frac{r'_1 \cdot r'_2}{62} = \frac{(r'_1 - e) \cdot r'_2}{70}$$

čili

$$r'_1 = \frac{-62 \cdot 70}{70 - 62}.$$

Volme  $e = 6$  mm a dostaneme

$$r'_1 = -46,5 \text{ mm}.$$

Z první rovnice (15.2.1) plyne pak pro

$$r'_2 = \frac{f' (e - r'_1)}{f' - r'_1} = \frac{62 (6 + 46,5)}{62 + 46,5} = 30 \text{ mm}.$$

Uvažujme obě čočky jako tenké a určeme poloměry krivosti jejich ploch tak, že pro rozptylný meniskus volime sklo o indexu lomu  $n = 1,51633$  a  $\nu = 64,0$  a pro druhý tmelený člen skla o konstantách  $n = 1,64769$ ,  $\nu = 33,9$  a  $n = 1,51633$ ,  $\nu = 64,0$ .

Volime-li poloměr krivosti  $r_1$  první plochy menisku  $r_1 = -20$  mm, dostáváme pro poloměr  $r_2$  druhé plochy ze vztahu pro lámavost tenké čočky

$$\left( \frac{1}{-20} - \frac{1}{r_2} \right) (1,516 - 1) = -\frac{1}{46,5},$$

odkud

$$r_2 = -119 \text{ mm}.$$

Poloměry krivosti  $r_3$ ,  $r_4$  a  $r_5$  ploch druhého člena objektivu určíme přepočtem parametrů achromatického objektivu navrženého v příkladu v odstavci 9.2. Z tab. 9.2.1 pak plyne:

$$r_1 = 2,355 \cdot 30 = 70,65 \text{ mm}$$

$$r_2 = 0,462 \cdot 30 = 13,86 \text{ mm}$$

$$r_3 = 0,512 \cdot 30 = 15,36 \text{ mm}.$$

Zvolíme-li ještě tloušťku menisku  $d_1 = 3 \text{ mm}$ , vzdálenost  $d_2 = 1 \text{ mm}$ , tloušťku menisku druhého členu  $d_3 = 1,5 \text{ mm}$  a tloušťku spojky  $d_4 = 5 \text{ mm}$ , budou parametry objektivu jako celku dány tab. 15.2.2.

Tab. 15.2.2

Poloměry křivosti mm	Tlušťky mm	Index lomu $n_D$	
$r_1 = -20,0$	3	1,51633	64,0
$r_2 = -119,0$	1	1,0	-
$r_3 = +70,65$	1,5	1,64000	33,9
$r_4 = +13,86$	5	1,51633	64,0
$r_5 = -15,36$			

Určeme nyní ohniskovou vzdálenost takto upraveného objektivu propočtem paraxiálního paprsku pomocí logaritmického pravítka. Výsledky propočtu jsou sestaveny do tab. 15.2.3.

Tab. 15.2.3

	1. plocha	2. plocha	3. plocha	4. plocha	5. plocha
$n'$	1,516	1,0	1,640	1,516	1,0
$n$	1,0	1,516	1,0	1,640	1,516
$r$	-20,0	-119,0	70,65	13,86	-15,36
$d$	3	1	1,5	5	-
$\frac{n'}{x}$	0,0	-0,0245	-0,0198	-0,01065	-0,0184
$\frac{n' - n}{r}$	-0,0256	0,00433	0,00906	0,00895	0,0336
$\frac{n'}{x'}$	-0,0258	-0,020017	-0,01074	-0,01960	0,0152
$x'$	-58,70	-49,5	-152,5	-77,33	66,0
$x$	-61,70	-50,5	-154,0	-82,33	$f' = 57,1$
		$f_1' = -47,0$			

Kontrolu výpočtu provedeme zpětným výpočtem, kterým si současně určíme správnou hodnotu ohniskové vzdálenosti  $f_2'$  druhého členu po zavedení tloušťek. Dříve však je třeba provést úpravu ohniskové vzdálenosti. Z tab. je vidět, že ohnisková vzdálenost  $f'$  nám po zavedení tloušťek vyšla menší 57,1 mm než bylo požadováno 62,0. Úpravu provedeme malou změnou posledního poloměru křivosti  $r_5$  z -15,36 na

Tab. 15.2.4

	5. plocha
$n'$	1,0
$n$	1,516
$r$	-16,0
$a$	-
$\frac{n}{x}$	-0,0184
$\frac{n'-n}{r}$	0,0323
$\frac{n'}{x'}$	0,0139
$x'$	72,0
$x$	$f' = 62,4$

- 16 mm. Stačí pak provést pouze výpočet průchodu poslední plochou, jak je to naznačeno v tab. 15.2.4. Propočet paraxiálního paprsku při zpětném průchodu je proveden v tab. 15.2.5, kde je již počítáno s upraveným poloměrem krivosti  $r_5$  na hodnotu - 16,0 mm.

Z této tab. je vidět, že ohnisková vzdálenost druhého člena je po zavedení tloušťek rovna  $f_2 = 31,0$  mm. Tím je prakticky připraven objektiv dalekohledu. Nutno však poznamenat, že tento objektiv bude nutno trigonometrickým výpočtem korigovat současně spolu s hranolem, který leží před jeho obrazovou ohniskovou rovinou.

### 3. Určení rozměrů Schmidtova hranolu

Rozměry hranolu určíme graficky. Z předchozích úvah víme, že obrazová ohnisková rovina objektivu leží ve vzdálenosti 72 mm za poslední plo-

Tab. 15.2.5

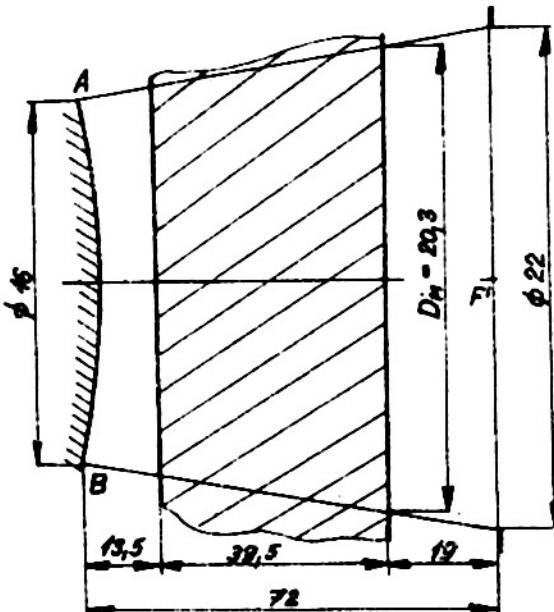
	1. plocha	2. plocha	3. plocha	4. plocha	5. plocha
$n'$	1,516	1,640	1,0	1,516	1,0
$n$	1,0	1,516	1,640	1,0	1,516
$r$	16,0	-13,86	-70,65	119,0	20,0
$a$	5	1,5	1	3	-
$\frac{n}{x}$	0,0	0,0361	0,02780	0,0383	0,0466
$\frac{n'-n}{r}$	0,0323	-0,00895	0,00906	0,00434	-0,0258
$\frac{n'}{x'}$	0,0323	0,02715	0,03686	0,04264	0,0208
$x'$	47,0	60,5	27,1	35,5	48,1
$x$	42,0	59,0	26,1	32,5	$f' = 62,4$
			$r_2 = 31,0$		

chou objektivu. Známe-li zornací polohu dalekohledu, můžeme určit velikost clony zorného pole 2 m, pro kterou platí:

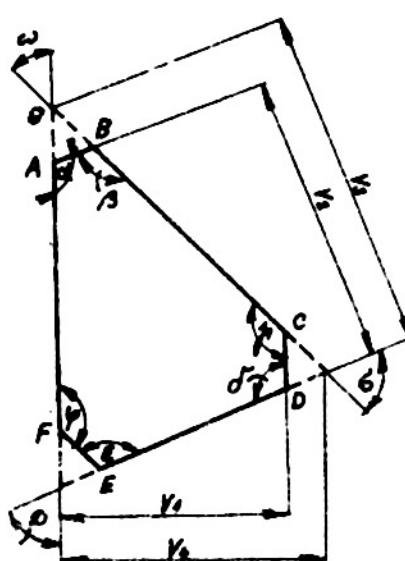
$$\begin{aligned} 2 \cdot h &= 2 \cdot f' \cdot \lg \frac{r}{2} = 2 \cdot 62,4 \cdot \lg 10^0 = \\ &= 124,8 \cdot 0,1763 = 22 \text{ mm}. \end{aligned}$$

Nyní si vyznačíme graficky poslední plochu objektivu o průměru 16 mm a v příslušné vzdálenosti 72 mm zornu zorného pole. Spojnice AC a BD okrajových bodů vymezují pek kruhový prostor, kterým mohou procházet paprsky od objektivu k okuliáru dalekohledu (viz obr. 15.2.4). Z důvodů přesnosti volíme v příslušném místu mřížku 4-tmáč-

větší než ve směru optické osy. Jak je vidět, paprskový svazek se směrem od objektivu k okuláru rozbíhá. Proto o velikosti hranolu bude rozhodovat zadní - výstupní - plocha hranolu, která leží podle dřívějších úvah ve vzdálenosti 19 mm před obrazovou ohniskovou rovinou objektivu. Z obrázku vyplývá, že průměr  $D_M = \bar{E}G = 20,3$  mm.



Obr. 15.2.4 Grafické určení rozměrů Schmidtova hranolu.



Obr. 15.2.5 K určení rozměrů Schmidtova hranolu.

Dráha paprsku v hranolu bude tedy

$$l = 3,0402 \cdot 20,3 = 61,7 \text{ mm}$$

a redukovaná délka hranolu

$$l_r = \frac{61,7}{1,569} = 39,5 \text{ mm}.$$

To znamená, že pro objektiv zůstává volný prostor

$$72 - 39,5 - 19 = 13,5 \text{ mm}.$$

Pro rozměry Schmidtova hranolu bude platit podle přílohy k tomuto skriptu a podle obr. 15.2.5.

#### 1. Pro úhly

a) Pro úhly při hranách A,B,D a E

$$\alpha = \beta = \delta = \epsilon = 112,5^\circ$$

b) Pro úhly při hranach C a F

$$\gamma = \varphi = 135^\circ$$

c) Pro úhel při hraně G

$$\omega = 45^\circ,$$

d) pro úhly při hranách H a K

$$\sigma = \rho = 67,5^\circ.$$

## 2. Pro délkové rozměry

- a) Hrana  $\overline{AF} = \overline{HC} = 1,4679 \cdot D_M = 1,4679 \cdot 20,3 = 29,8 \text{ mm}$
- b) Hrana  $\overline{AB} = 0,0992 \cdot D_M = 0,0992 \cdot 20,3 = 2,1 \text{ mm}$
- c) Hrana  $\overline{CD} = \overline{EF} = 0,1833 \cdot D_M = 0,1833 \cdot 20,3 = 3,7 \text{ mm}$
- d) Hrana  $\overline{DE} = 1,0824 \cdot D_M = 1,0824 \cdot 20,3 = 22,0 \text{ mm}$
- e) Hrana  $\overline{EG} = \overline{HG} = 1,7809 \cdot D_M = 1,7809 \cdot 20,3 = 36,2 \text{ mm}$
- f) Hrana  $\overline{HK} = 1,363 \cdot D_M = 1,363 \cdot 20,3 = 27,6 \text{ mm}$
- g) Výška  $v_1 = 1,1296 \cdot D_M = 1,1296 \cdot 20,3 = 22,9 \text{ mm}$
- h) Výška  $v_2 = 1,5256 \cdot D_M = 1,5256 \cdot 20,3 = 31,0 \text{ mm}$
- i) Výška  $v_3 = 1,6453 \cdot D_M = 1,6453 \cdot 20,3 = 33,4 \text{ mm}$
- j) Výška  $v_4 = 1,2593 \cdot D_M = 1,2593 \cdot 20,3 = 25,6 \text{ mm}$ .

Tím jsou rozměry Schmidtova hranolu plně určeny.

## 4. Určení okuláru

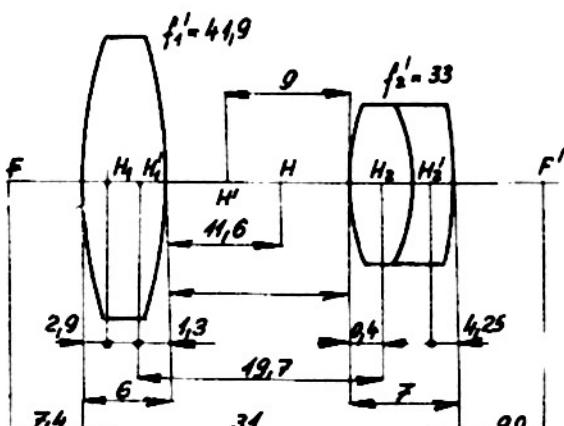
Z požadavku 1. a 2. plyne pro zdánlivé pole  $\zeta'$  dalekohledu

$$\zeta' = \zeta \cdot \Gamma = 20 \times 2,5 = 50^\circ.$$

Z toho vyplývá, že pro navrhovaný dalekohled je nutno použít Kellnerova okuláru. Pro jeho ohnískovou vzdálenost  $f'_0$  vychází

$$f'_0 = \frac{r'}{\Gamma} = \frac{62,4}{2,5} = 25 \text{ mm}.$$

Můžeme tedy použít Kellnerova okuláru s parametry uvedenými v odstavci 10.3.



Obr. 15.2.6 Umístění hlavních bodů a ohnísek u okuláru.

Protože pro grafickou konstrukci optické sestavy dalekohledu potřebujeme znát ohnískové vzdálenosti a polohy hlavních bodů obou členů, určíme je propočtem paraxiálního paprsku na logaritmickém pravítku. Výsledky propočtu pro kolektiv jsou uvedeny v tab. 15.2.6 a pro oční čočku v tabulce 15.2.7. Umístění ohnísek a hlavních bodů je znázorněno na základě těchto výsledků na obr. 15.2.6.

Kontrolu správnosti je možno provést určením ohnískové vzdálenosti okuláru jako celku

$$f' = \frac{f'_1 f'_2}{f'_1 + f'_2 - e} = \frac{41,9 \cdot 33}{41,9 + 33 - 19,7} = \frac{41,9 \cdot 33}{55,2} = 25 \text{ mm}.$$

## 5. Určení průměru objektivu a okuláru

Průměr objektivu byl již předběžně určen ze zvětšení a z průměru výstupní pupily dalekohledu. Protože z dřívě uvedených důvodů bylo třeba volit objektiv dvoučlený o větší stavební délce než bývá obvykle u achromatických objektivů, mu-

Tab. 15.2.6

	1. plocha	2. plocha	1. plocha	2. plocha
$n'$	1,516	1,0	1,516	1,0
$n$	1,0	1,516	1,0	1,516
$r$	66,18	-31,09	31,09	-66,18
$d$	6	-	6	-
$\frac{n}{x}$	0,0	0,00805	0,0	0,0178
$\frac{n' - n}{r}$	0,0078	0,0166	0,0166	0,0078
$\frac{n'}{x'}$	0,0078	0,02465	0,0166	0,0256
$x'$	194,0	40,6	91,2	39,0
$x$	188,0		85,2	
		$f' = 41,9$		$f' = 41,9$

Tab. 15.2.7

	1. plocha	2. plocha	3. plocha	1. plocha	2. plocha	3. plocha
$n'$	1,54	1,62	-1,0	1,620	1,54	1,0
$n$	1,0	1,54	1,62	1,0	1,62	1,54
$r$	18,05	-13,54	-95,53	95,53	13,54	-18,05
$d$	5,5	1,5	-	1,5	5,5	
$\frac{n}{x}$	0,0	0,0335	0,0283	0,0	0,00655	0,000633
$\frac{n' - n}{r}$	0,0299	-0,00591	0,0065	0,0065	-0,00592	0,0299
$\frac{n'}{x'}$	0,0299	0,02759	0,0348	0,0065	0,00063	0,03053
$x'$	51,5	58,7	28,75	249,0	2.440	32,6
$x$	46,0	57,2		247,5	2.434,5	
			$f' = 33,0$			$f' = 33,0$

má být průměry jeho členů přezkoušeny graficky, stejně jako u okuláru. Podle požadavků kladených na přístroj má být před objektivem umístěn upevňovací tubus. Je třeba přezkoušet, zda vstupní otvor tohoto tubusu případně neomezuje paprskové svazky přicházející z okraje zorného pole.

Aby mohla být tato grafická konstrukce uskutečněna, je nutno ještě určit polohu hlavních bodů jednotlivých členů objektivu a polohu hlavních bodů s ohnisek objektivu jako celku obdobně jak to bylo provedeno v případě okuláru. Stačí provést na logaritmickém pravítku zpětný propočet paraxiálního paprsku prvním a druhým členem objektivu. Výsledky tohoto propočtu jsou sestaveny do tab. 15.2.8. a tab. 15.2.9.

Tab. 15.2.8

	1. plocha	2. plocha
$n'$	1,516	1,0
$n$	1,0	1,516
$r$	119,0	20,0
$d$	1,0	-
$\frac{n}{r}$	0,0	0,00437
$\frac{R' - R}{r}$	0,0433	-0,0258
$\frac{R'}{r}$	0,0433	-0,02143
$x'$	350,0	-46,7
$x$	347,0	$f' = -47,0$

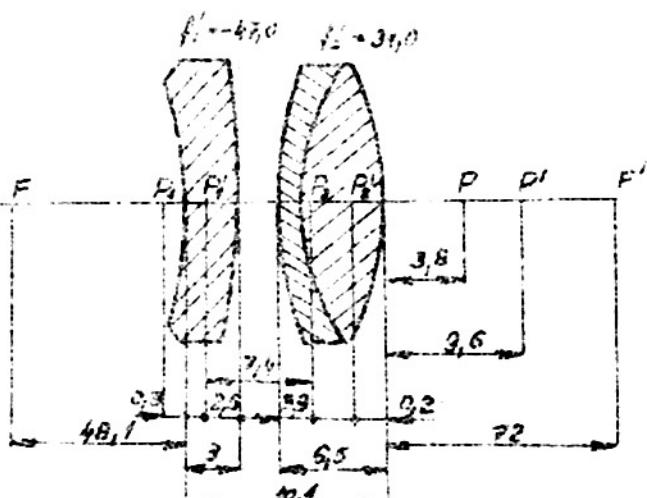
Tab. 15.2.9

1. plocha	2. plocha	3. plocha
1,64	1,516	1,0
1,00	1,64	1,516
70,65	13,86	-16,0
1,5	5	
0,00	0,00915	0,00020
0,00906	-0,00895	0,0323
0,00906	0,00020	0,03250
181,0	7,580	30,8
179,5	7,585	$f' = 31,0$

Poznámkou hlavních bodů a ohnišek provedené na základě těchto výpočtů je znázorněno na obr. 15.2.7.

Kontrolu správnosti je možno provést určením ohniškové vzdálenosti okuláru jako celku

$$f' = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - s} = \frac{-47 \cdot 31}{-47 + 31 - 7,4} = \frac{-47 \cdot 31}{-23,4} = 62 \text{ mm} .$$



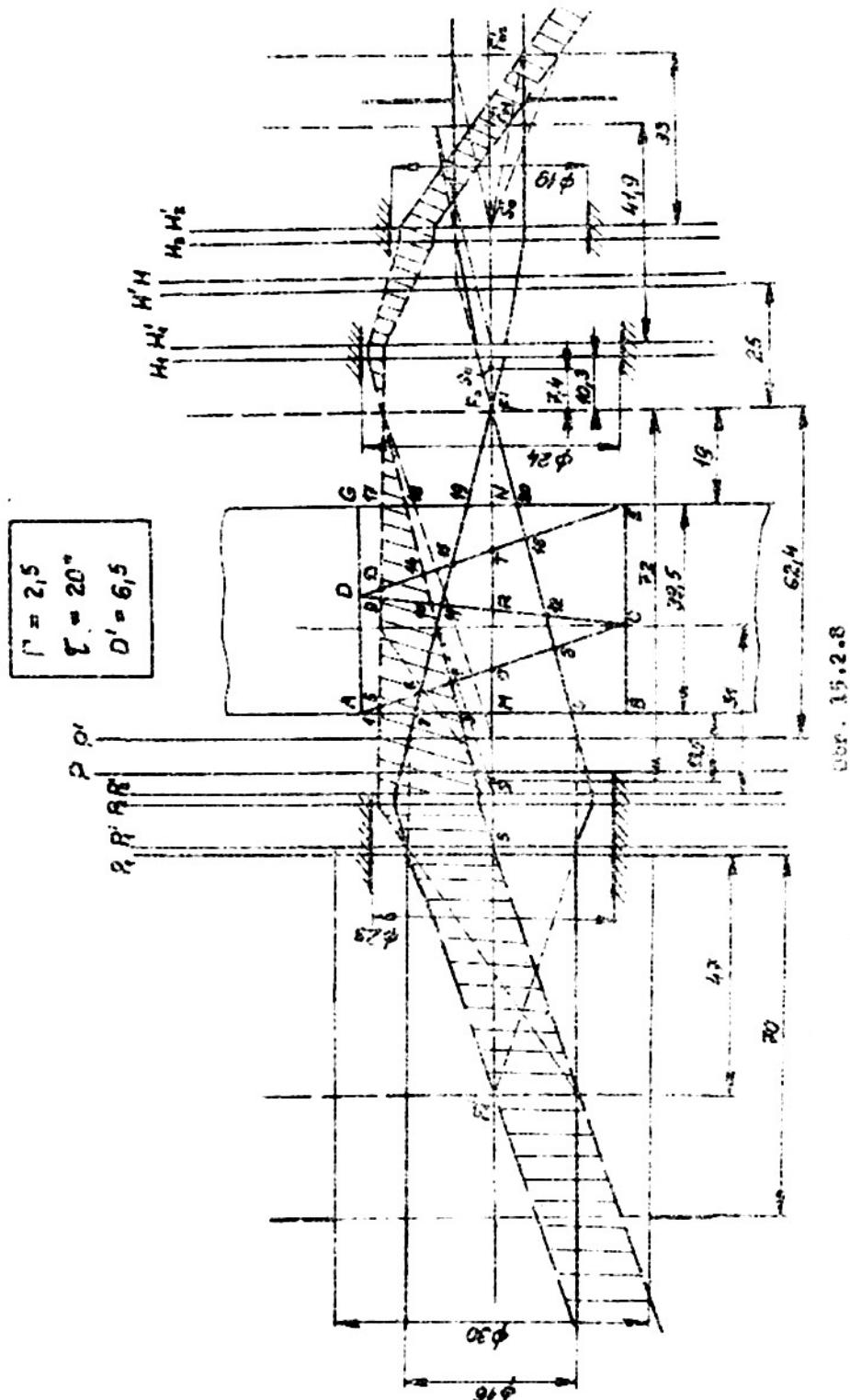
Obr. 15.2.7 Polohy hlavních bodů a ohnišek u objektivu.

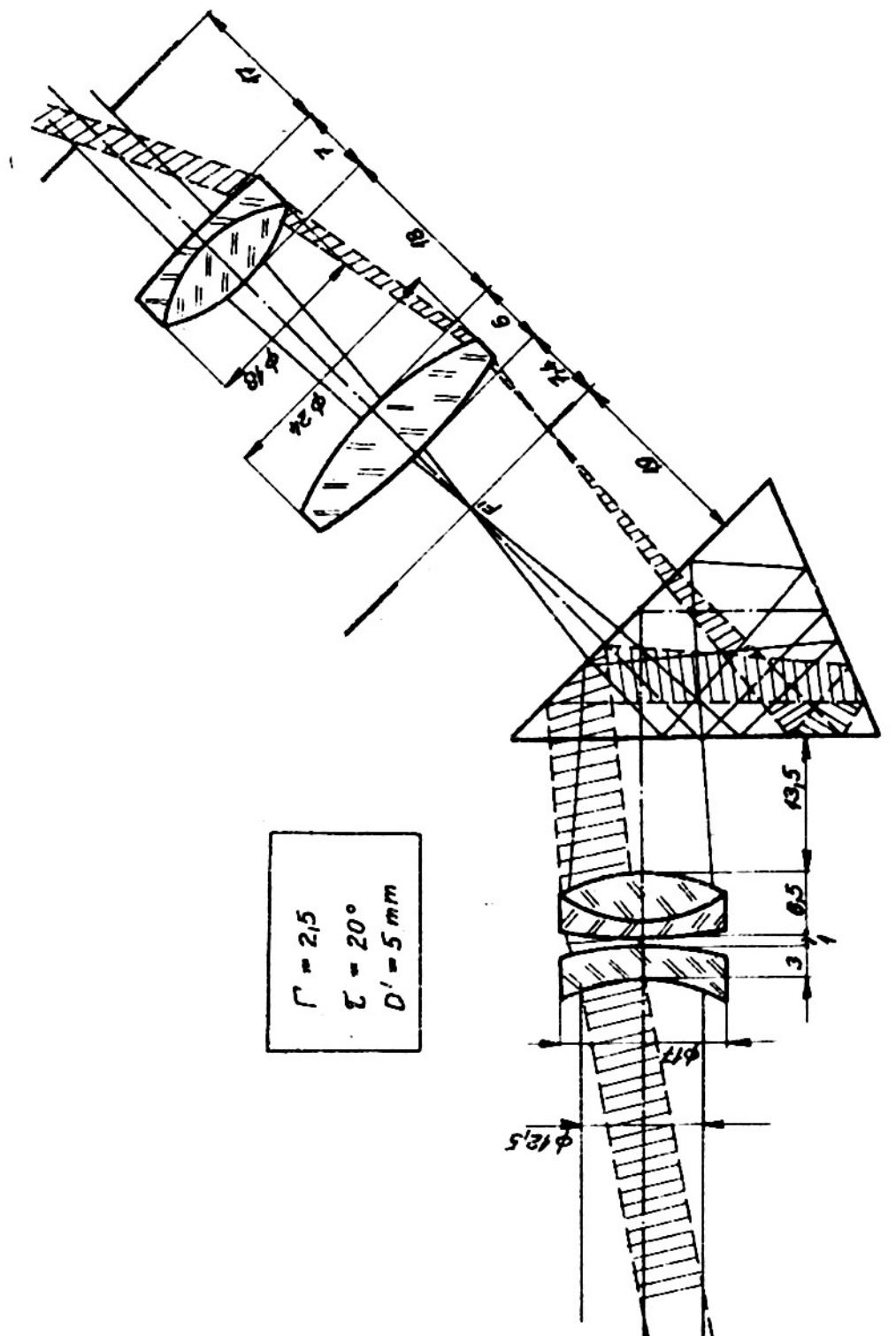
Když byly provedeny všechny pomocné výpočty, je možno přitřebit ke grafické konstrukci průchodu paprskových svazků optickou soustavou dalekohledu. Tato konstrukce je znázorněna na obr. 15.2.8. Objektiv i okulář je na tomto obrázku vyznačen jednak hlavními rovinami jejich jednotlivých členů  $P_1, P_2, P_3, P_4$  resp.  $H_1, H_2, H_3, H_4$  a jednak hlavními rovinami  $P$  a  $P'$  resp.  $H$  a  $H'$  objektivu a okuláru jako celku.

Konstruktivně byl sledován jednak průchod rovnoběžného paprskového svazku přicházejícího z nekonečně vzdáleného bodu ve středu zorného pole a rovnoběžného paprskového svazku přicházející

ciho z nekonečně vzdáleného bodu okraje zorného pole. Konstrukce průchodu těchto paprsků se provede obvyklým způsobem tak, že se určí lom na každém jednotlivém článku objektivu a okuláru. Správnost konstrukce se ověří tím, že se provede konstrukce lomu na objektivu s okuláru jako celku.

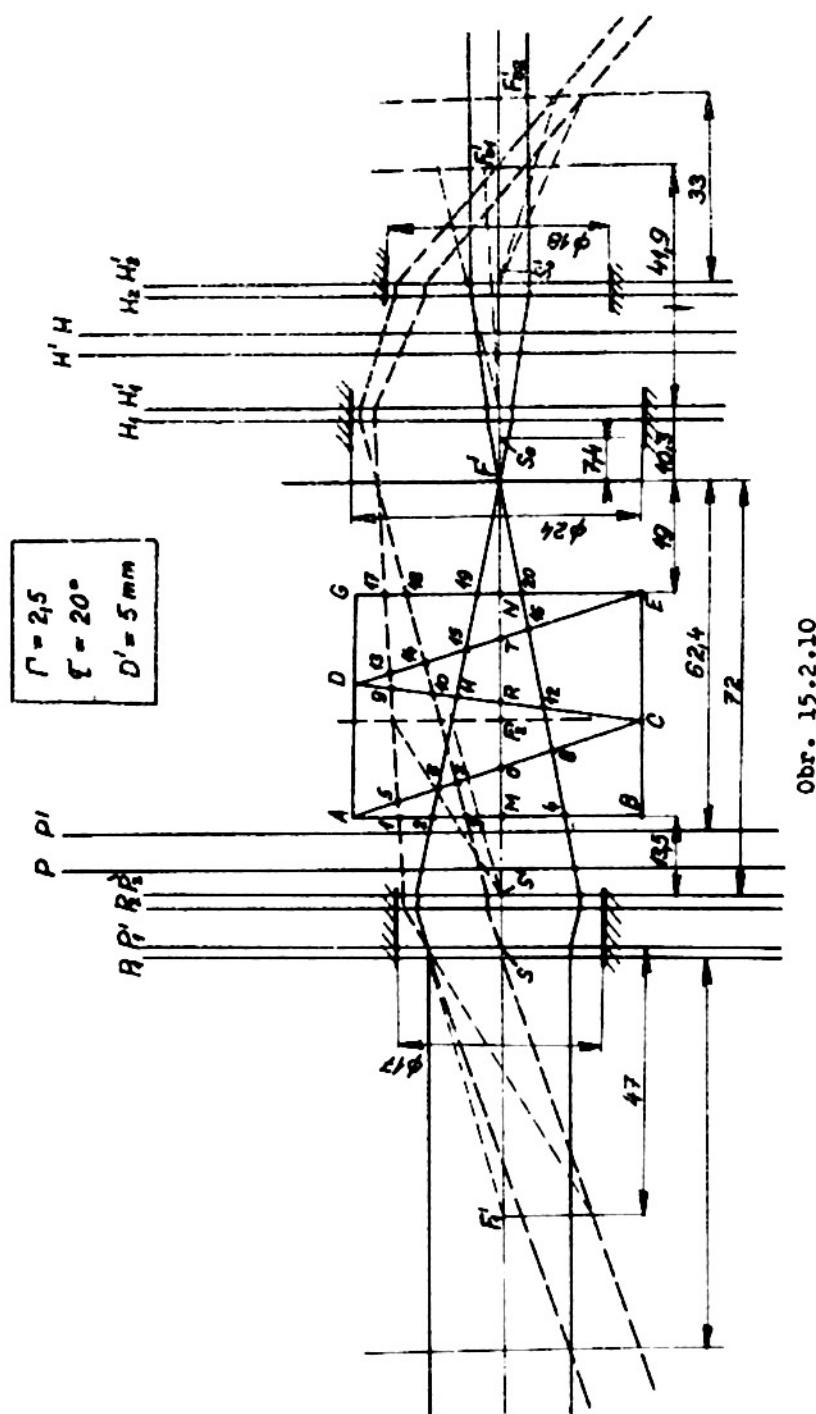
Z obr. 15.2.8 je patrné, že průměr druhého člena objektivu se musí zvětbit na 23 mm. Z důvodů jednoduchosti výroby se bude volit průměr obou členů objektivu stejný.





Dnbr. 15.2.9

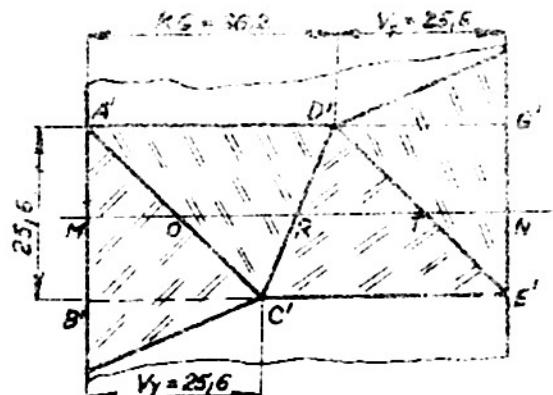
notlivých spojních čoček. Tato soustava je vykreslena na obr. 15.2.9. Z obrázku objektivu i okuláru je zřejmé, že spojné čočky tmelených členů mají v obou případech příliš malé poloměry křivosti ploch, které nedovolí při daných tloušťkách větší průměr než 16 mm v případě objektivu a 18 mm v případě oční čočky okuláru. Protože v obou případech je rozdíl mezi průměry spojek na obr. 15.2.9 a průměry tmelených členů na obr. 15.2.8 poměrně veliký, není možno zjištěný nedostatek odstranit volbou větší tloušťky u těchto spojních čoček.



Obr. 15.2.10

Závadu je možno odstranit buď tak, že se celá soustava dalekohledu přeypočítá (zvětší) v poměru uvedených průměrů. To znamená, že se v našem případě násobí všechny rozměry-poloměry křivosti, tloušťky, vzduchové mezery a průměry-soustavy poměrem  $\frac{23}{16}$  (tj. poměrem průměru druhého člena objektivu určeného na obr. 15.2.8 a průměru spojné čočky tohoto člena určeného na obr. 15.2.9). Tato úprava vede ovšem k větším rozměrům přístroje.

Jinak je možno odstranit tuto závodu zmenšením výstupní pupily při zachování ostatních rozměrů. Na obr. 15.2.10 je řešena takto upravená soustava s výstupní pupilou  $D' = 5$  mm. Je vidět, že průměry spojek právě dosahují požadovaného průměru. V konečné úpravě by bylo třeba ještě o něco zvětšit jejich tloušťky.



Obr. 15.2.11 Rozvinutí Schmidtova hranolu v planparallelní desku.

Na obr. 15.2.9 je znázorněna upravená optická soustava tak, aby byla v souběhu s obr. 15.2.10. Přitom průběh paprsků Schmidtova hranolem byl proveden tak, že do optické soustavy na obr. 15.2.12 je zakresleno do příslušného místa plánparallelní desky, jejíž tloušťka je ekvivalentní uvedenému Schmidtovu hranolu. Na této desce vyměřme šířku ABEG podle obr. 15.2.11, kde je zakresleno rozvinutí hranolu v plánparallelní desku. Do desky ABEG zakreslime odrazené plochy AC, CD a DE. Přitom body C a D určíme tak, že délky AE' a EC' na obr. 15.2.13 redukujeme, takže

$$\frac{AD'}{AD} = \frac{AE'}{1,569} = \frac{36,2}{1,569} = 23,1 \text{ mm}$$

$$EC' = \frac{EC'}{1,569} = \frac{25,6}{1,569} = 16,35 \text{ mm} .$$

Průsečíky 1,2, ..... 20 jednotlivých paprsků se vstupní, výstupní a odrazené plochami přeneseme pak snadno dřívěj neznačeným způsobem do optické soustavy na obr. 15.2.9.

#### 7. Postup při návrhu ohniškových zámerných plotének

##### a) Návrh pohyblivé ploténky

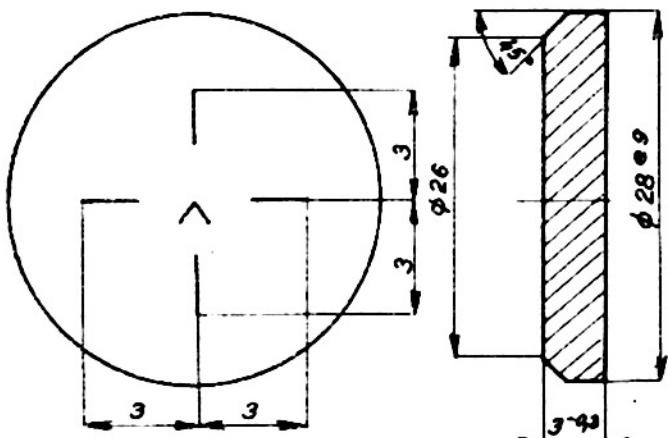
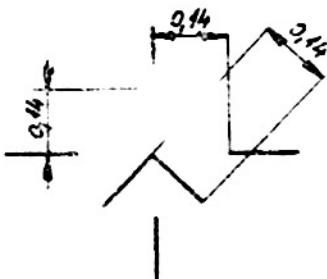
Podle bodu 4. požadavků se má zamíření provádět vysouváním zámerné značky ve svialem směru.

Úprava obrazce této ploténky se nejlépe provede podle obr. 15.2.12.

Pro sviały posuv zámerné značky vychází podle obr. 15.2.13

$$b_1 = f' \cdot \operatorname{tg} \alpha_1 , \quad (15.2.2)$$

##### Detail zámeř obrazce



Obr. 15.2.12 Návrh úpravy pohyblivé zámerné ploténky.

kde  $f$ : znadí ohniskovou vzdálenost objektivu  
 $\alpha_1$ : selenční úhel odpovídající vzdálenosti  
 $D_{11}$ .

Podle tab. 15.2.1 odpovídá maximální délce střely  $D_{11} = 1500$  m elevace  $\alpha_1 = 17,4^\circ$  dálce, takže pro maximální posuv zámečné známkы vychází

$$h_{15} = 62,4 \cdot \operatorname{tg} 17,4^\circ \operatorname{dc} = 62,4 \cdot 0,0174 = 1,08 \text{ mm.}$$

Stejným způsobem se určí posuvy  $h_1$  pro ostatní délky střely  $D_1$ . Zorné pole dalekohledu je  $20^\circ$ , takže pro průměr sloupu zámečného pole dosáváme

$$2 h = 2 \cdot 64,2 \cdot \operatorname{tg} 10^\circ = 22 \text{ mm.}$$

Průměr pohyblivé zámečné ploténky musí být vždy větší o dvojnásobku hodnoty základního posuvu  $h_{15}$ , t.j. o více než 2,16 mm. Proto její průměr budeme volit s ohledem na její vlnění hodnotu  $22 + 4 = 26 \text{ mm}$ .

Zámečné ploténka je pozorována okularem jako lupa a tedy se zvětšuje

$$m = \frac{250}{10} = \frac{250}{2,5} = 10.$$

Žádáme-li, aby síla rytí zámečného obrazce byla přizpůsobena počátečnímu oku s rozlišovací mezi  $\gamma_0 = 2'$ , pak pro sílu  $t$  příslušných čar vychází

$$t = \frac{2 \cdot 0,07}{m} = \frac{0,14}{10} = 0,014 \text{ mm. (x)}$$

Tato síla, promítaná do prostoru před dalekohledem, bude kryt prostor v ohlové síře

$$\frac{2'}{2,5} = \frac{2'}{2,5} = \frac{120'}{2,5} = 48'.$$

Je to nice asi o 50 % větší hodnota než se obvykle v měřicích přístrojích připouští ( $30'$ ), stejně s ohledem na nepříjemné podmínky, ze kterých musí často dělový zaměřovač pracovat, je tato čísla čas nutná.

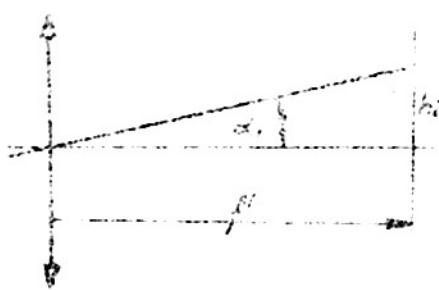
### b) Pevná ploténka

Úprava pevné ploténky je znázorněna na obr. 15.2.14. Tato ploténka je společně s pohyblivou ploténkou umístěna v obrazové rovině objektivu. Přitom jsou obě ploténky přivráceny k sobě plochami, na kterých je provedeno rytí. Tyto plochy jsou k sobě přibliženy na minimální vzdálenost cca 0,1 mm, aby pokud možno byly pozorovatelné bez paraleaxy. Jejich vzájemná poloha v průhledu i v řezu je znázorněna na obr. 15.2.15.

Síla rysk na této plotence bude volena stejná jako u pohyblivé ploténky.

V pořadavcích kladených na konstrukci přístroje je žádáno, aby celkový posuv (1,08 mm) zámečné známkы byl rozveden na stupnicí o délce slespon 100 mm.

x) Poznámka:  $250 \cdot \operatorname{arc} 1' = 0,07 \text{ mm.}$



Obr. 15.2.13 K určení vnitřního posuvu zámečné známkы.

$$2 h = 2 \cdot 64,2 \cdot \operatorname{tg} 10^\circ = 22 \text{ mm.}$$

Průměr pohyblivé zámečné ploténky musí být vždy větší o dvojnásobku hodnoty základního posuvu  $h_{15}$ , t.j. o více než 2,16 mm. Proto její průměr budeme volit s ohledem na její vlnění hodnotu  $22 + 4 = 26 \text{ mm}$ .

Zámečné ploténka je pozorována okularem jako lupa a tedy se zvětšuje

$$m = \frac{250}{10} = \frac{250}{2,5} = 10.$$

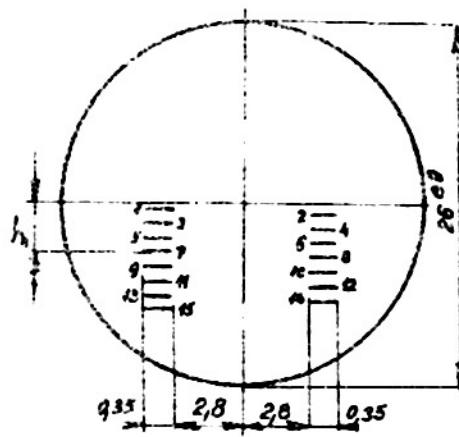
Žádáme-li, aby síla rytí zámečného obrazce byla přizpůsobena počátečnímu oku s rozlišovací mezi  $\gamma_0 = 2'$ , pak pro sílu  $t$  příslušných čar vychází

$$t = \frac{2 \cdot 0,07}{m} = \frac{0,14}{10} = 0,014 \text{ mm. (x)}$$

Tato síla, promítaná do prostoru před dalekohledem, bude kryt prostor v ohlové síře

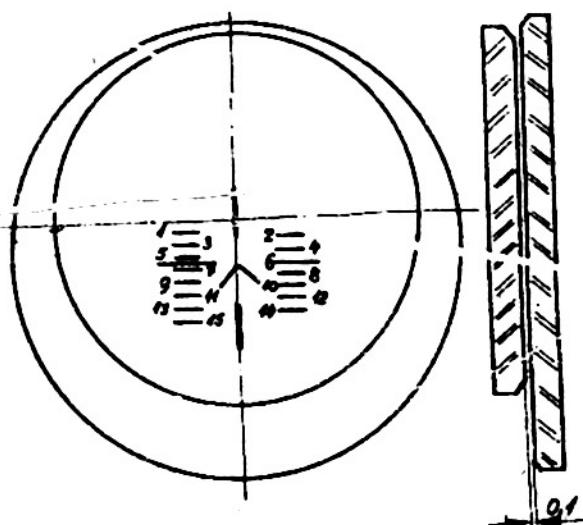
$$\frac{2'}{2,5} = \frac{2'}{2,5} = \frac{120'}{2,5} = 48'.$$

Je to nice asi o 50 % větší hodnota než se obvykle v měřicích přístrojích připouští ( $30'$ ), stejně s ohledem na nepříjemné podmínky, ze kterých musí často dělový zaměřovač pracovat, je tato čísla čas nutná.

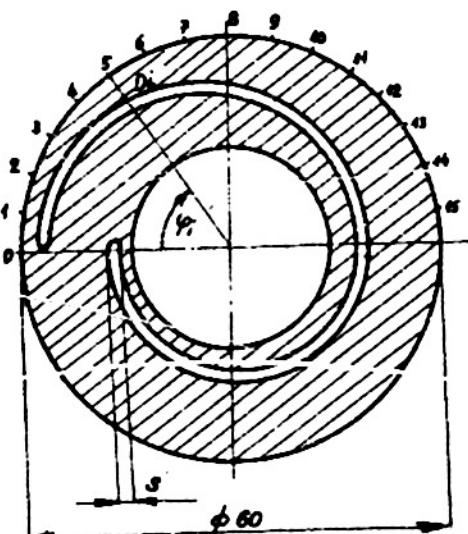


Obr. 15.2.14 Úprava pevné zámečné ploténky.

Tento požadavek se nejlépe splní tak, že se konstrukce základní pro posuvání pohyblivé ploténky provede tak, že se k posuvu ploténky využije drážky ve tvaru Archimedovy spirály, která se bude otáčet kolem optické osy okuláru. Tato drážka se vyřezuje do kovového mezikruží, které je spojeno se stupnicí, jak je to naznačeno na obr. 15.2.16.



Obr. 15.2.15 Rozmístění obou plotének v obražové rovině objektivu.



Obr. 15.2.16 Úprava posuvu zámerné značky spirálovou drážkou.

Volíme-li např. průměr této stupnice 60 mm, vychází pro obvod příslušné kružnice  $60 \cdot \pi = 188,4$  mm. Protože stupnice dalek má být rozvinuta na délce cca 100mm, stačí, aby se kotouč se spirálovou drážkou otáčel celkem asi o  $180^\circ$ . To znamená, že pro požadovaný posuv  $h_{15} = 1,08$  mm je žádoucí, aby stoupání spirálové drážky bylo voleno 2 mm.

Potom pro jednotlivé úhly  $\varphi_i$  nové rozvinuté stupnice platí podle předchozího obrázku

$$\varphi_i : h_i = 360 : s$$

čili

$$\varphi_i = \frac{360 \cdot h_i}{s}.$$

Např. v našem případě pro poslední dílek kruhové stupnice  $\varphi_{15}$  plyne

$$\varphi_{15} = \frac{h_{15} \cdot 360}{s} = \frac{1,08 \cdot 360}{2} = 182,6^\circ.$$

Tím je návrh optické části zaměřovače prakticky ukončen a je možno přikročit jednak k jeho korigování trigonometrickým propočtem vhodných paprsků a jednak ke konstrukci mechanické části přístroje, na kterou již nemají podstatného vlivu změny některých optických částí vynucené korekční soustavy.

### 15.3. Návrh konstrukce jednoduchého periskopu pro pozorování z ruky

Má se navrhnout periskop s následujícími parametry:

1. Zvětšení  $\Gamma = 1,5$
2. Průměr výstupní pupily  $D' = 6,5$  mm
3. Zorné pole  $\Gamma = 20^\circ$

4. Periskopická výška  $H = 450$  mm
5. Vzdálenost výstupní pupily alespoň 30 mm
6. Celou soustavu vtěsnat do tělesa, jehož rozměry jsou dány náčrtkem 15.3.1

### 1. Určení objektivu

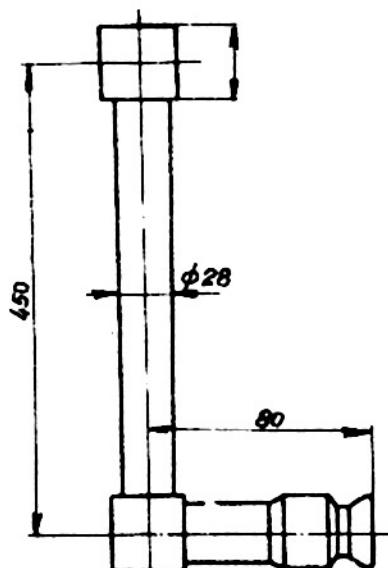
Pro průměr objektivu požadovaného periskopu vychází podle bodu 1. a 2.

$$D = D' \cdot f' = 6,5 \cdot 1,5 = 9,75 \text{ mm.}$$

Volme ohniskovou vzdálenost objektivu tak, aby jeho relativní otvor nekladl velké požadavky na jeho stavbu, např.  $f' = 50$  mm. Stačilo by volit pro objektiv achromatickou soustavu. S ohledem na velké zorné pole budeme volit objektiv dvoučlenný, složený ze dvou achromatických členů s rovnoběžným paralekovým chodem mezi oběma členy. Ohnisková vzdálenost každého z obou členů bude tedy

$$f'_1 = f'_2 = 100 \text{ mm.}$$

Předpokládáme, že jsem cestou popsanou v odstavci 9.2 určili achromatický objektiv o parametrech daných tab. 15.3.1. Rozmístění hlavních rovin vyplývá z tab. 15.3.2 a je znázorněno na obr. 15.3.2.



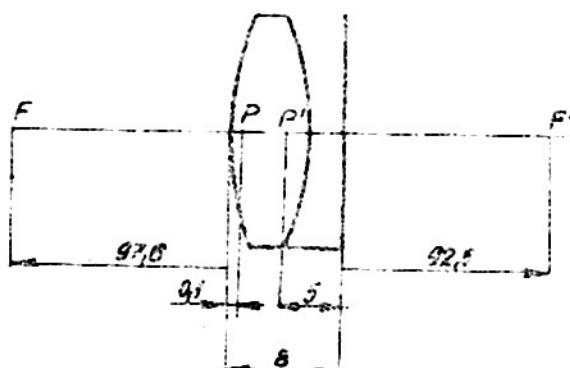
Obr. 15.3.1 Vnější obrys periskopu.

Tab. 15.3.1

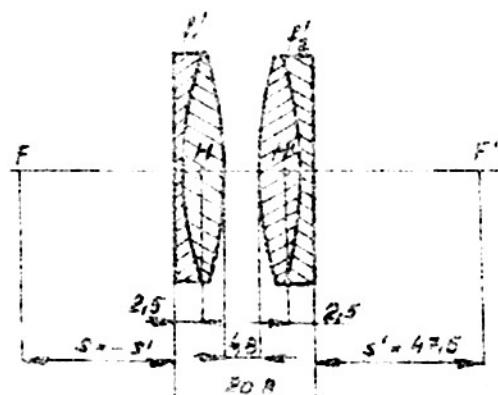
$r$	$d$	$n_D$	$\nu$
$r_1 = 49,8$	6	1,519	60,3
$r_2 = -467$	2	1,604	37,8
$r_3 = \infty$			

Tab. 15.3.2

	1. plocha	2. plocha	3. plocha	1. plocha	2. plocha	3. plocha
$n'$	1,519	1,604	1,0	1,604	1,519	1,0
$n$	1,0	1,519	1,604	1,0	1,604	1,519
$r$	49,8	-467			467	-49,8
$d$	6	2		2	6	-
$\frac{n'}{x}$	0,0	0,01085	0,01081	-	0,0	-0,000182
$\frac{n'-n}{r}$	0,01041	-0,000182	-	-	-0,000182	0,01041
$\frac{n'}{x'}$	0,01041	0,010668	0,01081	-	-0,000182	0,010228
$x'$	146	150,5	92,5	-	-8,350	97,6
$x$	140	148,5	$f' = 97,5$	-	-8,350	$f' = 97,5$



Obr. 15.3.2 Rozmístění hlavních bodů s ohnisek u každého z obou členů objektivu.



Obr. 15.3.3 Objektiv peristopu.

Volíme-li vzdálenost obou členů  $e = 5$  mm, pak pro objektiv jako celek vychází ohnisková vzdálenost (viz obr. 15.3.3)

$$f' = \frac{f_1' \cdot f_2'}{f_1' + f_2' - e} = \frac{97,5^2}{97,5 - 5} = \frac{9506}{90} = 105,6 \text{ mm.}$$

Pro polohu hlavních bodů objektivu jako celku plyně dálce

$$s' = \frac{(f_1' - e) \cdot f_2'}{f_1' + f_2' - e} = \frac{92,5 \cdot 97,5}{105,6} = 87,5 \text{ mm.}$$

## 2. Určení okuláru

Pro ohniskovou vzdálenost okuláru plyně

$$f'_o = \frac{f'}{n} = \frac{50}{1,5} = 33,3 \text{ mm.}$$

Jeho průměr  $D_o$  určíme z podmínky, že vzdálenost výstupní pupily má být co největší. Platí

$$D_o = 2 + 33,3 + \tan \frac{15^\circ}{2} = 66,6 + \tan 15^\circ = 66,6 + 0,27 = 66,87 \text{ mm.}$$

S ohledem na zajímání snedného uložení budeme v příslušných objímkách volit  $D_o = 20$  mm.

Protože okulár je zatižen zorným polem  $30^\circ$ , musíme volit souměrnou stavbu podle příkladu v části 10.6, který přepočítáme na ohniskovou vzdálenost  $f'_o = 33,3$  mm. Příslušné konstrukční hodnoty jsou v tab. 15.3.3.

Tab. 15.3.3

$r$ mm	$d$ mm	$n_D$	$\gamma$
$r_1 = + 90,7$	1,98	1,616	36,6
$r_2 = + 27,7$	9,9	1,516	64,1
$r_3 = - 39,7$	0,13	1,0	-
$r_4 = + 39,7$	9,9	1,516	64,1
$r_5 = - 27,7$	1,98	1,616	36,6
$r_6 = - 90,7$			

$$f' = 33,3 \text{ mm}, S_F = 25,0 \text{ mm}, S_{F'} = - 25,0 \text{ mm}.$$

Poloha hlavních bodů s ohnisek obou členů je zřejmá z tab. 15.3.4 a obrázku 15.3.4.

Tab. 15.3.4

	1. plocha	2. plocha	3. plocha	1. plocha	2. plocha	3. plocha
$n'$	1,616	1,516	1,0	1,516	1,616	1,0
$n$	1,0	1,616	1,516	1,0	1,516	1,616
$r$	90,7	27,7	-39,7	39,7	-27,7	-90,7
$d$	1,98	9,9	-	9,9	1,98	-
$\frac{n}{x}$	0,0	0,00684	0,00329	0,0	0,0142	0,0107
$\frac{n'-n}{r}$	0,0068	-0,00362	0,0130	0,0130	-0,00361	0,0068
$\frac{n'}{x'}$	0,0068	0,00322	0,01629	0,0130	-0,01059	0,0175
$x'$	237	470	62,02	116,5	152,5	57,1
$x$	235,02	460,1	$f' = 63,4$	106,6	150,52	$f' = 63,4$

Pro ohniskovou vzdálenost celého okuláru vychází

$$f' = \frac{63,4^2}{63,4 + 63,4 - 2,89} = 32,4 \text{ mm} .$$

Nalezená hodnota se poněkud liší od dříve určené hodnoty 33,3 mm. Tento malý rozdíl je způsoben nepřesností výpočtu, který byl prováděn pouze na logaritmickém pravítku.

### 3. Určení převracající soustavy

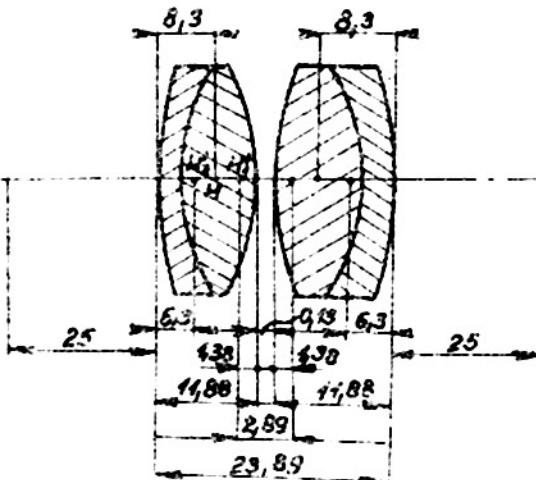
Návrh periskopu jsme dosud prováděli tak, že celé zvětšení dalekohledu jsme zajistili Keplerovým dalekohledem, tj. objektivem a okulárem. To znamená, že zvětšení převracající soustavy musí být rovno 1. Z toho vyplývá, že neži oběma členy převracající soustavy musí být rovnoběžný paprskový chod. Z výrobních důvodů je zádoucí, aby ohniskové vzdálenosti obou členů byly stejné, tj.  $f_1' = f_2'$ .

Ohniskovou vzdálenost členů převracající soustavy určíme z podmínky, podle které má ležet výstupní pupile dalekohledu ve vzdálenosti cca 30 mm ze poslední plochou okuláru. Protože obrazová osa vzdálenost s' okuláru je  $s' = 25 \text{ mm}$ , zobrazí okulár výstupní pupilu dalekohledu do vzdálenosti

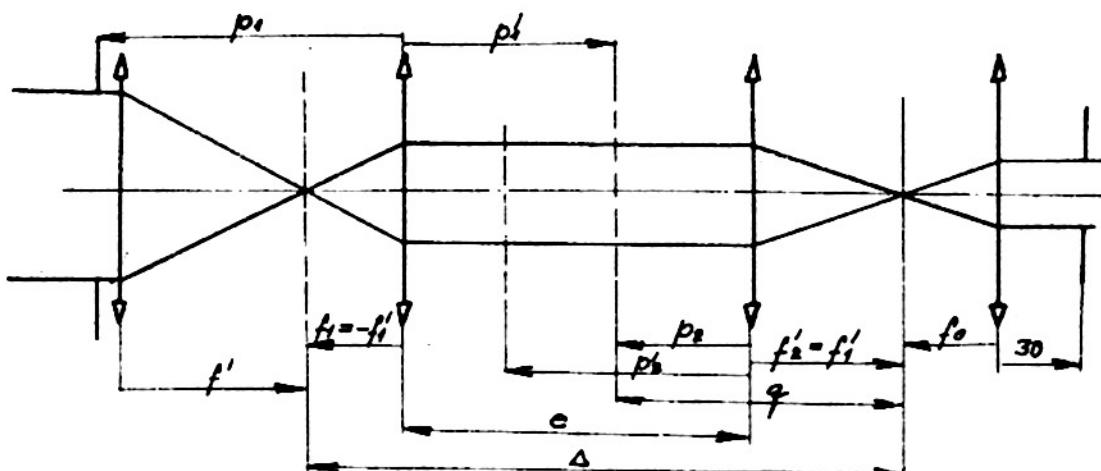
$$q = -\frac{f_0'^2}{5} = -\frac{33,3^2}{5} = -222 \text{ mm}$$

před ohniskem F okuláru.

Potom podle obr. 15.3.5 můžeme psát



Obr. 15.3.4 Rozmístění hlavních bodů s ohnisek u okuláru.



Obr. 15.3.5 K určení ohniskové vzdálenosti členů převracející soustavy.

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{p_1'} - \frac{1}{p_1} &= \frac{1}{f_1'} \\ p_1 &= -(f' + f_1') \\ p_2 &= p_1' - e \\ \frac{1}{p_2'} - \frac{1}{p_2} &= \frac{1}{f_2'} \\ p_2' &= q + f_2' \end{aligned} \right\} \quad (15.3.1)$$

Postupným řešením (15.3.1) dostaváme

$$\begin{aligned} p_1' &= \frac{p_1 \cdot f_1'}{p_1 + f_1'} = \frac{-(f' + f_1') \cdot f_1'}{-(f' + f_1') + p_1'} = \frac{(f' + f_1') \cdot f_1'}{f'} \\ p_2 &= p_1' - e = \frac{(f' + f_1') \cdot f_1' - ef'}{f'} \\ p_2' &= \frac{p_2 \cdot f_2'}{p_2 + f_2'} = \frac{(f' + f_1') \cdot f_1'^2 - ef' \cdot f_1'}{(f' + f_1') \cdot f_1' - ef' + f' \cdot f_1'} . \end{aligned}$$

Dosadíme-li za  $e$  hodnotu

$$e = \Delta - 2 f_1' ,$$

dostaneme po úpravě

$$f_1'^2 (q + f') + 4 q f' \cdot f_1' - q f' \Delta = 0 .$$

Dosadíme sem za  $q = -222$  mm,  $\Delta = 350$  mm a  $f' = 50$  mm a můžeme psát

$$f_1'^2 + 258 f_1' - 23.200 = 0$$

a odtud

$$(f_1')_{1,2} = -129 \pm \sqrt{16.641 + 23.200} = \begin{cases} -129 + 199,5 = 70,5 \text{ mm} \\ -129 - 199,5 = -328,5 \text{ mm} \end{cases}$$

Pro náš případ má význam pouze první, kladné řešení 70,5 mm.

Pro členy převracející soustavy budeme volit achromatické čočky použité pro objektiv a přepočtené na příslušnou ohniskovou vzdálenost 70,5 mm v poměru  $\frac{70,5}{97,5}$ . Odpovídající konstrukční parametry jsou v tab. 15.3.5 a rozmištění hlavních bodů a ohnisek na obr. 15.3.6.

4. Grafické určení průměru převracející soustavy

Nyní stačí provést grafickou konstrukci průchodu vhodných paprsků optickou soustavou a na základě toho vykreslit definativní soustavu. Grafická konstrukce je provedena na obr. 15.3.7 a konečná optická soustava na obr. 15.3.8.

Z obr. 15.3.7 je patrné, že periskopem by prošel z okraje zorného pole paprskový svazek o 50 % šířce, jen když průměr prvního člena převracející soustavy bude asi 34 mm a druhého člena asi 25 mm. Tyto průměry by se však nevtěsnaly do tubusu, jehož rozměry jsou dány obr. 15.3.1.

Je proto nutné provést dva zásahy. Předsunout vstupní pupilu dalekohledu málo před objektiv a zúžit příslušný paprskový svazek tak, jak je to na obrázku vyznačeno šrafováním. Výstupní pupila se asi o 5 mm přiblíží k okuláru.

Do optické soustavy jsou tak vyznačeny oba pravoúhlé hranoly, jejichž velikost z výrobních důvodů je volena stejná (8 x 18 mm). Musí být umístěny tak, aby byla dodržena předepsaná periskopická výška.

Tím je optická část návrhu periskopu ukončena.

15.4. Návrh triedru

Má se navrhnut triedr 6 x 30, aby splnil tyto požadavky:

1. Zvětšení  $\Gamma = 6$
2. Průměr výstupní pupily  $D' = 5 \text{ mm}$
3. Vzdálenost výstupní pupily 8 - 10 mm od poslední plochy okuláru
4. Zorné pole  $8^{\circ}30'$
5. Zorné pole opatřit stupnicí dělenou po 5 dílcích ve vodorovném i svislém směru
6. Okulár navrhnut stavitelný v rozsahu  $\pm 5$  dioptrií tak, aby nastavení bylo možno provést po 1 dioptrii v rozsahu natočení okulárové objímky do 150 - 170 stupňů
7. Oční rozestup měnitelný v rozsahu od 54 do 75 mm tak, že je odečitelný na stupničce, která je souosá se stěžejkou triedru
8. Rovnoběžnost optických os dodržet v mezích platných pro binokulární přístroje (tab. 12.10.1).

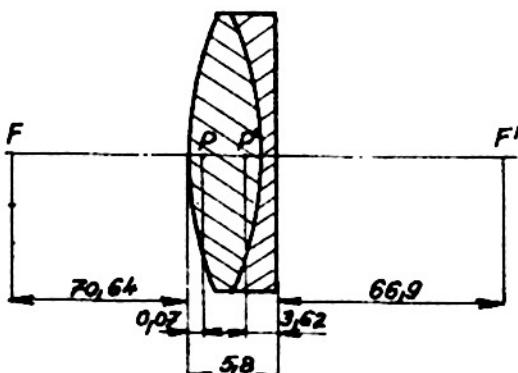
1. Návrh objektivu

Stejně jako v předchozích příkladech určíme průměr objektivu ze zvětšení a průměru výstupní pupily

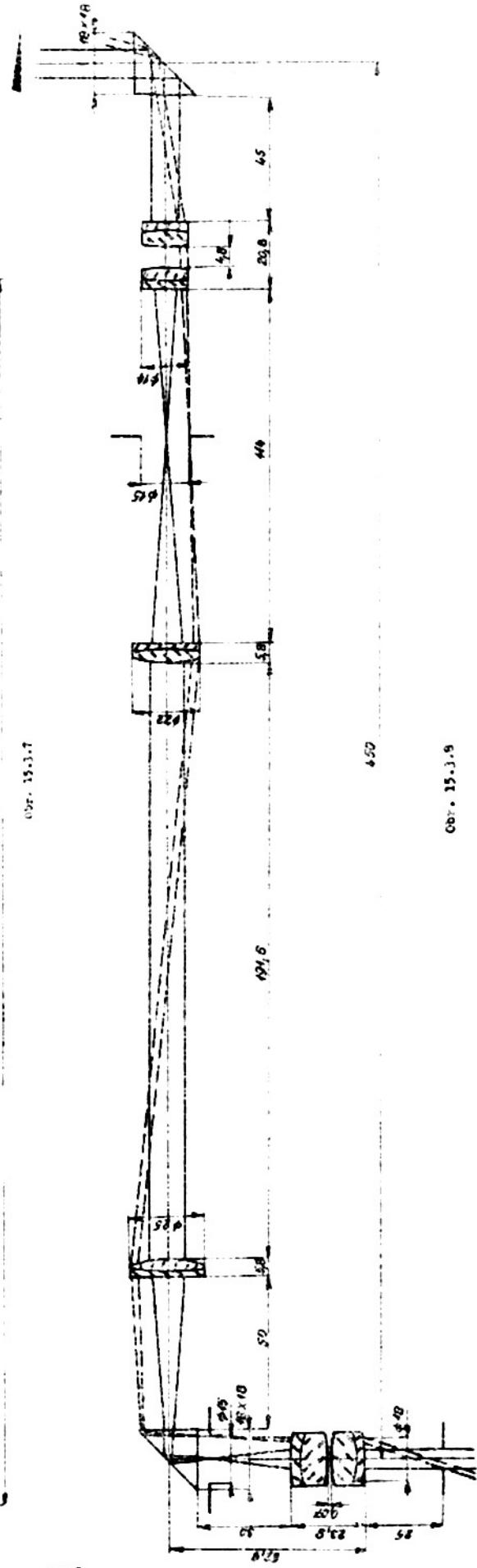
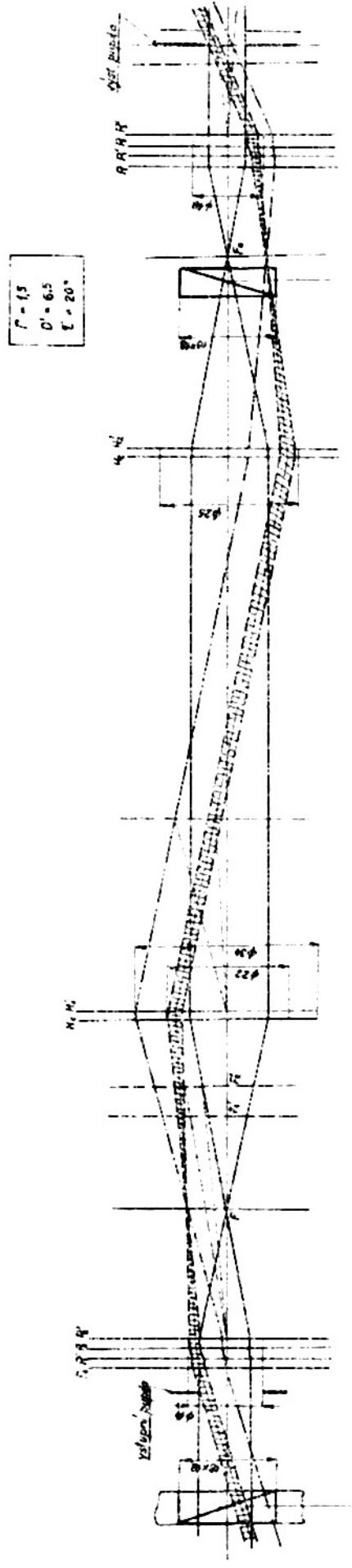
$$D = D' \cdot \Gamma = 5 \cdot 6 = 30 \text{ mm}.$$

Tab. 15.3.5

r mm	d	n D	$\gamma$
$r_1 = +36,0$	4,35	1,519	60,3
$r_2 = -337$	1,45	1,604	37,8
$r_3 = \infty$			



Obr. 15.3.6 Rozmístění hlavních bodů a ohnisek u členů převracející soustavy.



S ohledem na potlačení barevné vady budeme volit jeho ohniskovou vzdálenost  $f'$  tak, aby splňovala podmíinku

$$f' \geq 1,2 \cdot D^2, \text{ tj.}$$

$$f' \geq 1,2 \cdot 3^2 = 10,8 \text{ cm.}$$

Volíme  $f' = 120 \text{ mm}$ . S ohledem na poměrně malé pole můžeme použít achromatického objektivu.

Nechť parametry tohoto objektivu odpovídají tabulce 15.4.1. Rozmístění hlevních bodů a ohnisek je patrné z tab. 15.4.2 a obr. 15.4.1.

## 2. Volba okuláru

Odborně jako v předchozích případech platí pro ohniskovou vzdálenost okuláru

$$f'_o = -\frac{r'}{n} = -\frac{118}{6} \approx 20 \text{ mm.}$$

Okulár je zetižen zdánlivým zorným polem velikosti

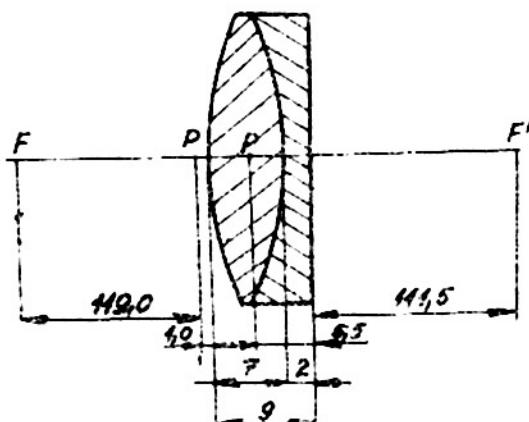
$$\tau' = T \cdot f = 8,5 \cdot 6 = 51^\circ.$$

Je proto nutno použít Kellnerova typu. Přepočtem okuláru uvedeného v odst. 10.3 poměrem 20/29 dostavíme konstrukční parametry uvedené v tab. 15.4.3.

Rozmístění hlevních bodů okuláru jako celku je vidět na obr. 15.4.2.

Tab. 15.4.1

$r$ mm	$d$ mm	$n_D$	$\nu_D$
$r_1 = 50,5$	7	1,516	64,0
$r_2 = -56,6$	2	1,620	36,3
$r_3 = \infty$			



Obr. 15.4.1. Rozmístění hlevních bodů a ohnisek u objektivu.

Tab. 15.4.2

	1. plocha	2. plocha	3. plocha	1. plocha	2. plocha	3. plocha
$n'$	1,516	1,620	1,0	1,620	1,516	1,0
$n$	1,0	1,516	1,620	1,0	1,620	1,516
$r$	50,5	-56,6	-	-	56,6	-50,5
$d$	7	2	-	2	7	-
$\frac{n}{x}$	0,0	0,01075	0,00896	0,0	0,0	-0,00184
$\frac{n'-n}{r}$	0,01025	-0,00186	0,0	0,0	-0,00186	0,01025
$\frac{n'}{x'}$	0,01025	0,00889	0,00896	0,0	-0,00186	0,00841
$x'$	148,0	182,5	111,5	-	-815,0	119,0
$\kappa$	141,0	180,5	-	$f' = 116$	-822,0	$f' = 118$

Tab. 15.4.3

$r$ mm	$d$ mm	$n_D$	D
$r_1 = + 53,0$	4,8	1,516	64,1
$r_2 = - 24,9$	14,4	1,0	-
$r_3 = + 14,4$	4,4	1,54	59,7
$r_4 = - 10,8$	1,2	1,62	36,3
$r_5 = - 76,5$			

### 3. Určení průměru obou členů okuláru a polohy výstupní pupily

Tento úkol budeme řešit graficky na obr. 15.4.3. Z tohoto obrázku je vidět, že je nutno omezit šířku paprskových svazků přicházejících z okraje zorného pole na 50 %, aby průměry členů okuláru nevzrostly nad hodnotu danou poloměry křivosti jejich ploch a tloušťkou.

Na obr. 15.4.4 je znázorněna konečná optická soustava triedru. Nutno poznat, že druhý hranol byl v této soustavě pootočen kolem optické osy o  $90^\circ$ .

Tím je návrh optické soustavy vyřešen a je možno přikročit k jeho korigování. Nutno poznat, že na korekční stav mají vliv oba hranoly, které zaujímají značnou část prostoru za objektivem a proto se musí dalekohled korigovat včetně těchto hranolů.

### 4. Návrh zájemného obrazce

Pro dělení dílcové stupnice platí podle obr. 15.4.5

$$h_i = f' \cdot \tan \alpha_i ,$$

kde  $h_i$  značí vzdálenost i-tého dílku stupnice odpovídajícímu

i dc	$h_i$ mm
5	$h_5 = 118,0,005 = 0,59$
10	$h_{10} = 118,0,010 = 1,18$
15	$h_{15} = 118,0,015 = 1,77$

úhlu  $\alpha_i$ .

Výpočet stupnic je naznačen v tab. 15.4.4.

Síla rytí  $t$  musí splňovat následující 3 podmínky:

a)  $t > f' \cdot \gamma \cdot \frac{1}{D}$ ,

kde  $f'$  značí ohniskovou vzdálenost objektivu,  $\gamma$  rozlišovací maz objektivu  $\gamma = \frac{120}{D}$  (D je průměr objektivu vyjádřený v milimetrech a  $D = 2 \cdot 10^5$ ).

Tedy

$$t > 118 \cdot \frac{120}{30} \cdot \frac{1}{2 \cdot 10^5} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ mm} .$$

b)  $t \cdot \frac{250}{f'_0} > 0,07 \text{ mm} ,$

kde  $f'_0$  značí ohniskovou vzdálenost okuláru,  $\frac{250}{f'_0}$  jeho zvětšení a 0,07 mm lineární hodnota rozlišovací maz oka.

Tedy

$$t > \frac{0,07 \cdot f'_0}{250} = \frac{0,07 \cdot 20}{250} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ mm} .$$

c)  $t \leq f' \cdot \frac{30^\circ}{\tan \alpha}$  nebo slovy, tloušťka tří rytí má být volena tak, aby promítanuto do prostoru před dalekohled nekryla větší úhlovou šífkou než  $30^\circ$ .

Tedy

$$t \leq 118 \cdot \frac{30}{2 \cdot 10^3} = \\ = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ mm.}$$

Z těchto tří podmínek vyplývá, že síla rytí tří má ležet mezi hodnotami

$$0,006 \text{ až } 0,018 \text{ mm.}$$

Budeme proto volit  $t = 0,01 \text{ mm.}$

Absolutní velikost písmen a uspořádání celého zámeřného obrazce určíme takto: Nakreslime si zámeřný obrazec v takové velikosti v jaké se nám bude jevit při pozorování ve zdánlivém zorném poli a pozorujeme jej ze vzdálenosti 250 mm (konvenční vzdálenost zřetelného vidění). Porovnáním velikosti číslic, jejich tloušťek s čarami dělení a z celkového zaplnění zorného pole rozhodneme o nevhodnější upravě stupnice.

Nutno poznat, že síla rytí u číslic nebo písmen se volí větší než je síla rytí dělení stupnic.

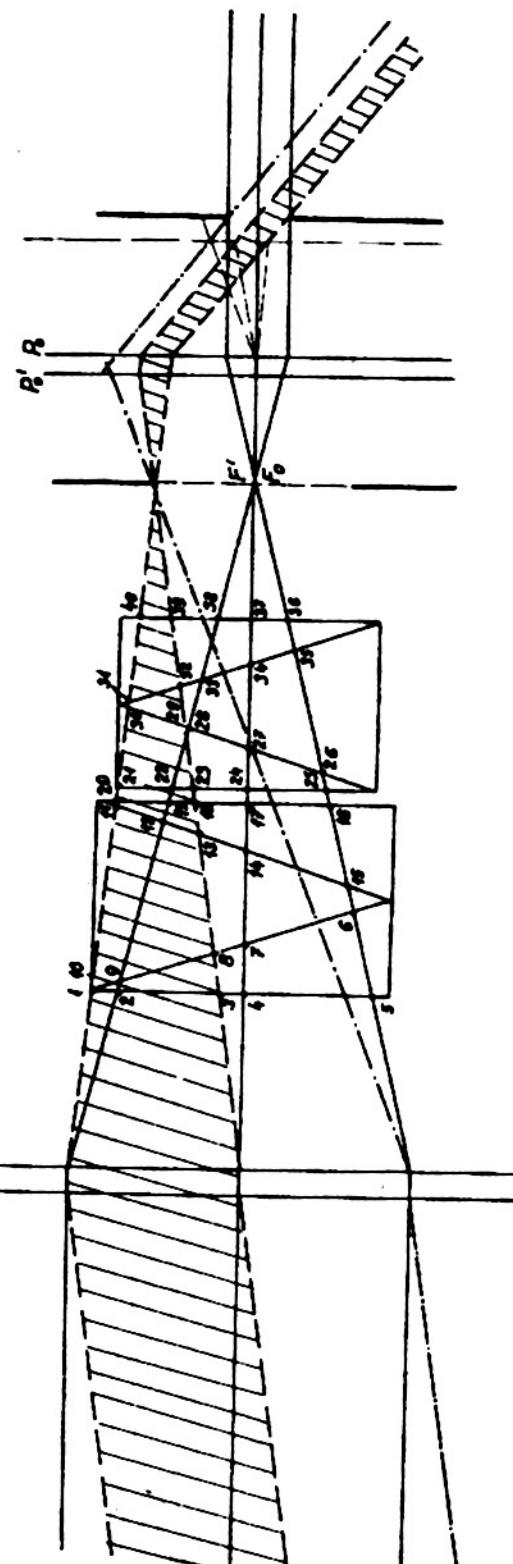
Nalezené velikosti písmen, číslic nebo síla rytí na tomto nákresu se pak dělí zvětšením okuláru a dostanou se hodnoty, které mají být vryty na příslušné zámeřné plotenky.

V našem případě vychází pro průměr zdánlivého zorného pole

$$2 f' \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{250}{f_0} =$$

$$= 500 \cdot 1' \cdot \tan 4^\circ 15' = 500 \cdot 6 \cdot 0,074 = 222 \text{ mm.}$$

Vzhled zorného pole v této velikosti je znázorněn na obr. 15.4.6 a výkres příslušné plotenky pro její výrobu na obr. 15.4.7 (jiné provedení než je naznačeno na obr. 15.4.6).



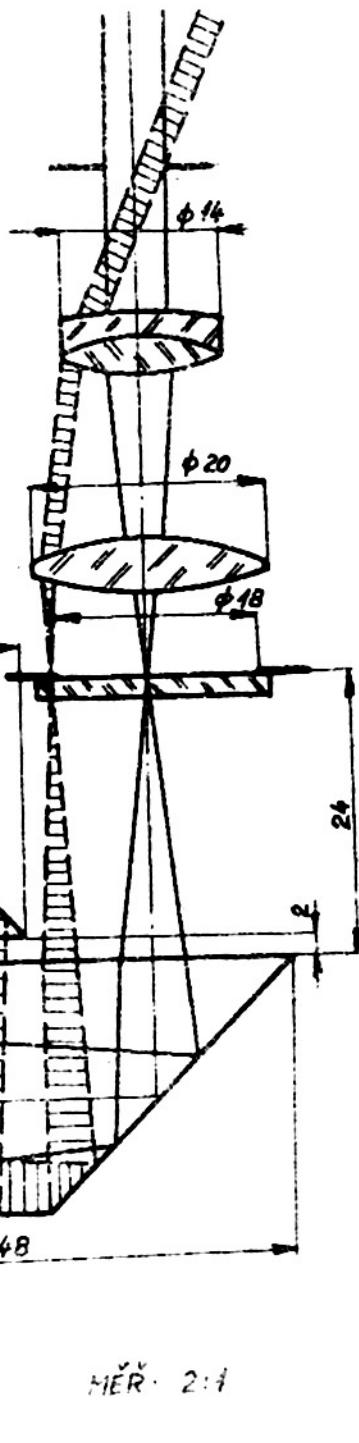
V zámeřném směru jsou rozdíly zvětšeny 2x

Obr. 15.4.3

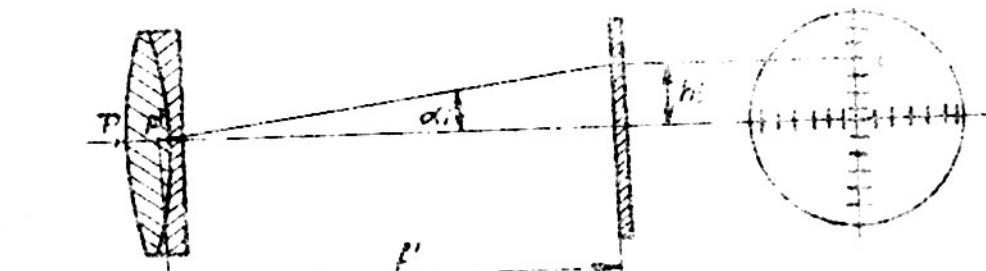
### 5. Navržení dioptrové stupnice okuláru

aby pozorovatel přehledl celé zorné pole, je nutné, aby pupily jeho oka splynuly s výstupní pupilou dalekohledu. Má-li pozorovatel ametropické oko, používá brýle, které mu brání u velké většiny přístrojů přiblížit oko k okuláru tak blízko, aby mohla být tato podmínka splněna. Je proto nutné upravit dalekohled tak, aby pozorovatel mohl pracovat s dalekohledem bez brýlí. Potom je ovšem nutno posouváním okuláru ve směru optické osy přizpůsobit dalekohledu ametropii pozorovatele.

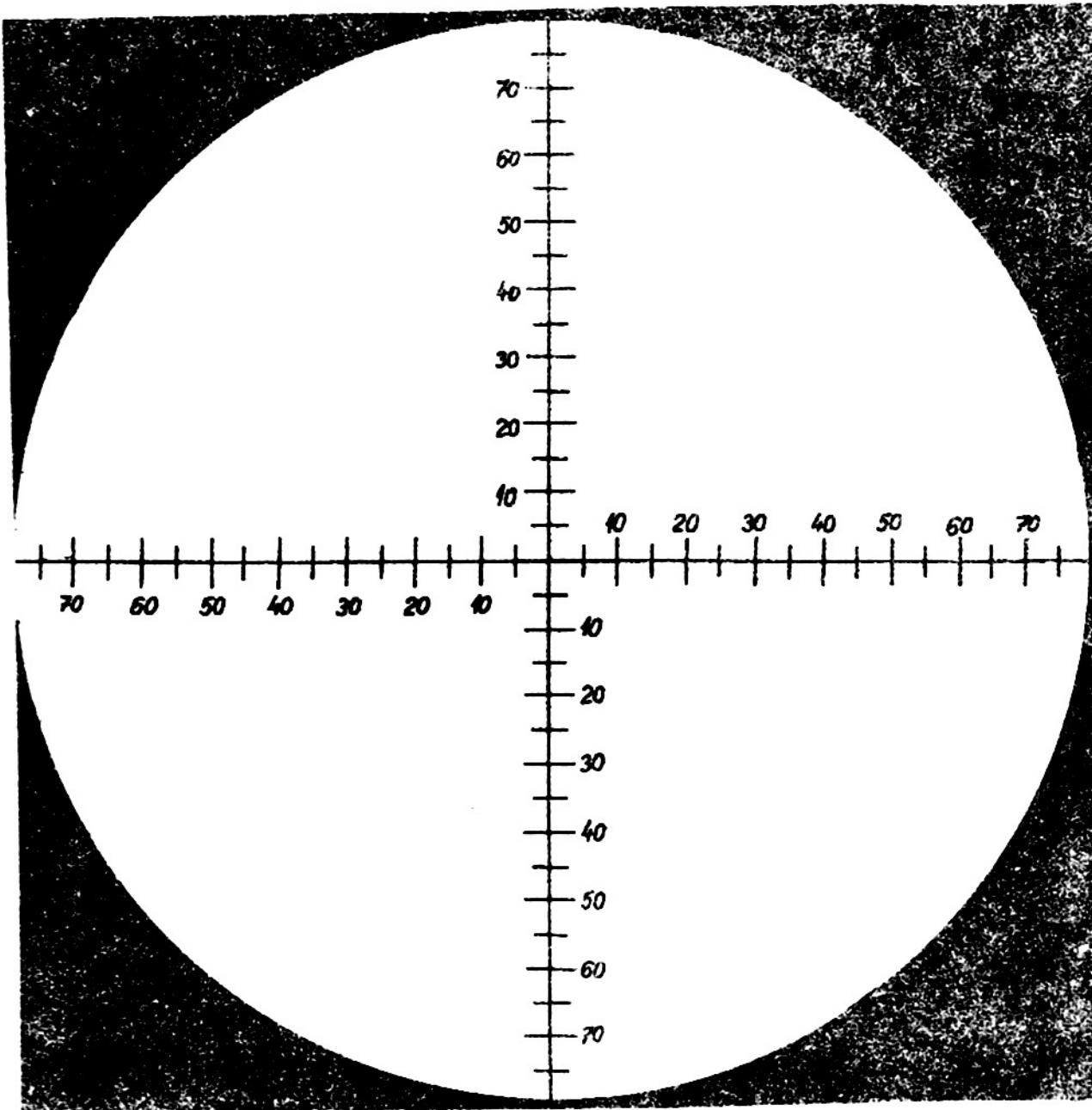
Pro příslušný posuv okuláru odpovídající  $\pm 1$  dioptrii platí podle (8.8.1)



Obr. 15.4.4



Obr. 15.4.5 k určení zdárných stupnic trubice.



Obr. 15.4.6

$$s = \pm \frac{f_0^2}{1000} = \pm \frac{20^2}{1000} = \pm 0,4 \text{ cm}.$$

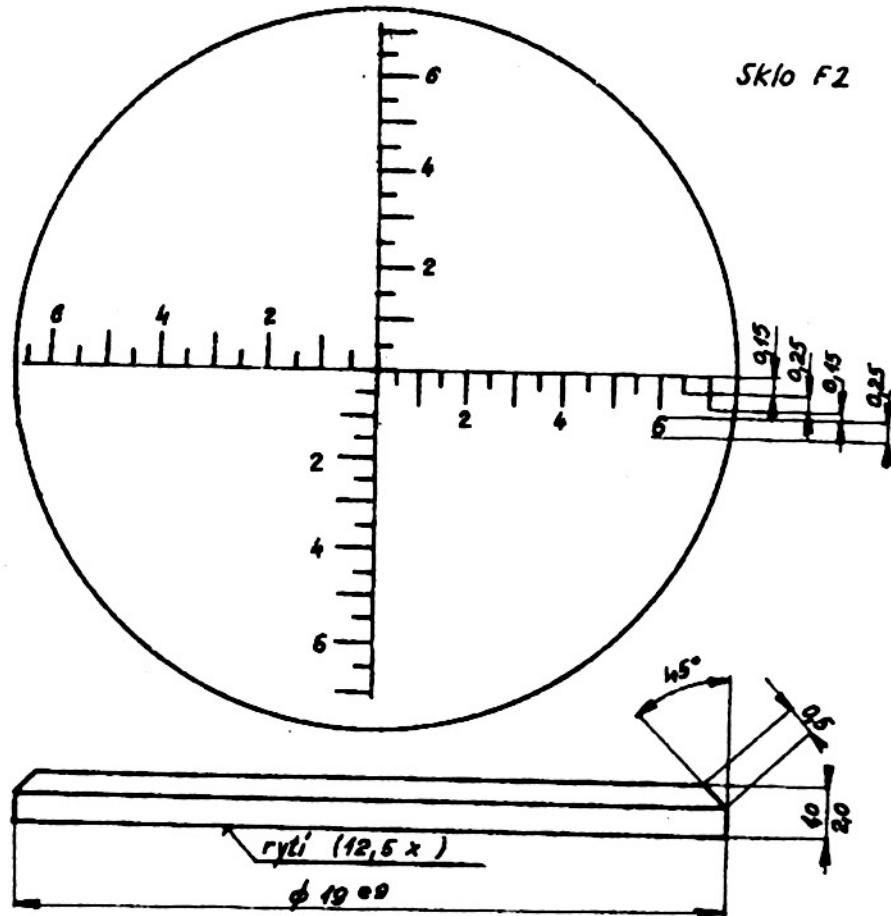
Tedy požadovaný rozsah  $\pm 5$  dioptrií odpovídá průměr  $10 \times 0,4 = 4$  cm.

Musíme určit stoupání závitu, kterým se provádí posuv okuláru, tak, aby celá stupnice od  $-5$  do  $+5$  dioptrií byla rozvinuta v úhlu  $150 - 170^\circ$ .

Je zřejmé, že stoupání závitu je nutno volit asi 9 mm. Je to stoupání příliš veliké, takže je třeba volit závit vícepramený (vícechody). Pro počet chodů  $n$  vybíráme

$$n = \frac{s}{t} = \frac{9}{1,5} = 6,$$

kde  $t$  značí rozteč závitů, jak je to znázorněno na obr. 15.4.7.



Obr. 15.4.7 Výkres ploténky triedru pro výrobu.

Potom dioptriiová stupnice bude rozvinuta v úhlu

$$\frac{360}{\alpha} = \frac{9}{4} \quad \text{čili}$$

$$\alpha = \frac{4 \cdot 360}{9} = 160^\circ,$$

Jak bylo požadováno.

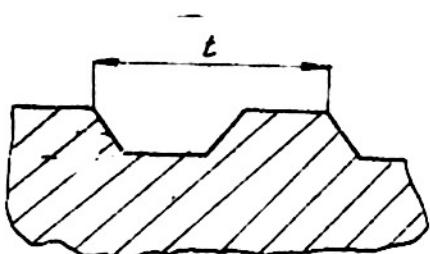
#### 6. Určení stupnice očního rozestupu

Podle požadavků, kladených na navrhovaný triedr, má být konstrukce upravena tak, aby umožňovala měnit oční rozestup v rozsahu 54 - 75 mm.

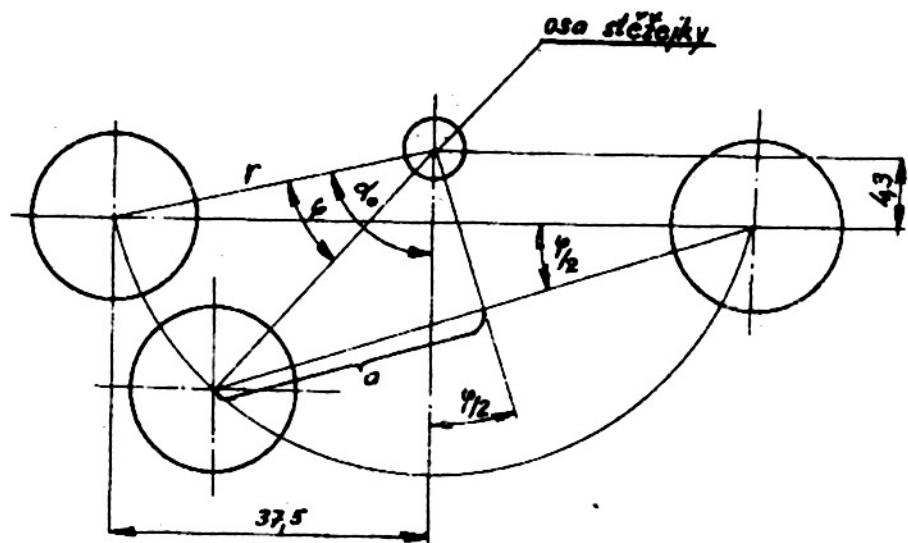
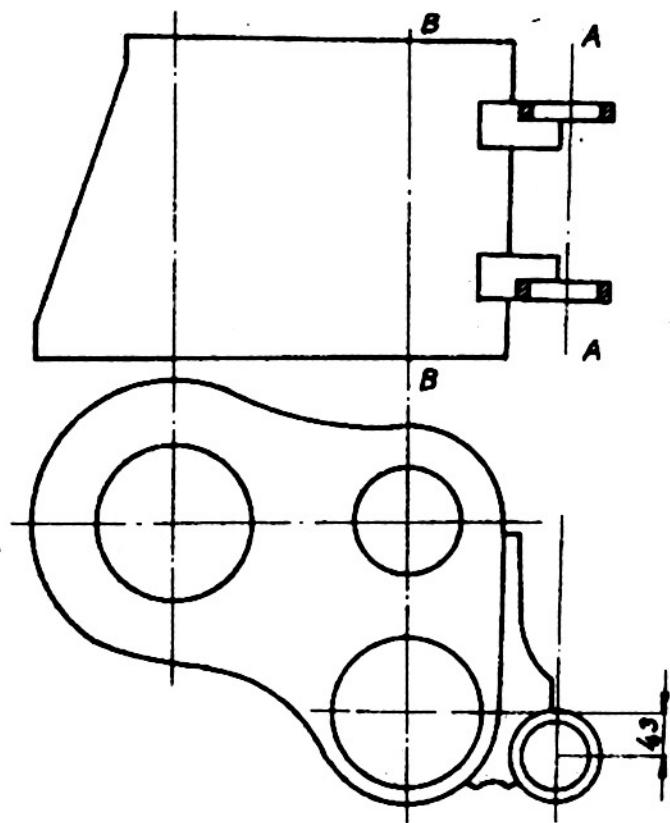
Konstrukce dalekohledu se upraví tak, aby maximální rozteč byla nejméně 75 mm. Ostatní, menší vzdálenosti se nastaví otočením obou polovin triedru kolem společné osy, tvořené tzv. stěžejkou.

Je proto nutno volit vzdálenost osy AA od osy okuláru BB 37,5 mm. Určeme nyní stupnici očního rozestupu, která má být souosá s osou stěžejky.

Podle obrázku 15.4.9 vychází



Obr. 15.4.8 Profil víceschodého lichoběžníkového závitu.



Obr. 15.4.9

$$\begin{aligned}
 r &= \sqrt{4,3^2 + 37,5^2} \\
 \alpha &= \alpha_0 - \frac{\varphi}{2} \\
 \operatorname{tg} \alpha_0 &= \frac{37,5}{4,3} \\
 a &= r \cdot \sin \alpha = r \cdot \sin \left( \alpha_0 - \frac{\varphi}{2} \right) \\
 \alpha_0 - \frac{\varphi}{2} &= \arcsin \frac{a}{r} \\
 \varphi &= 2 \left( \alpha_0 - \arcsin \frac{a}{r} \right)
 \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad (15.4.1)$$

čili

Protože  $\varphi$  značí polovinu očního rozestupu, volme postupně za  $\varphi$  hodnoty od 27 po 0,5 až do 36 mm a k těmto hodnotám určíme odpovídající hodnoty  $\alpha_0$ .  
Např. očním rozestupem 66 a 67 odpovídají hodnoty  $\alpha_0 = 33 \pm 33,5$  mm.

Ze vztahu (15.4.1) vychází postupně

$$r = 37,8 \text{ mm}$$

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{37,5}{4,3} = 8,725$$

$$\alpha_0 = 83^{\circ}30'$$

$$\begin{aligned}\varphi_{66} &= 2(83^{\circ}30' - \operatorname{arc} \sin \frac{33}{37,8}) = \\&= 2(83^{\circ}30' - \operatorname{arc} \sin 0,874) = \\&= 2(83,5^{\circ} - 61,5^{\circ}) = 2 \cdot 22,5^{\circ} = 45^{\circ}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varphi_{67} &= 2(83^{\circ}30' - \operatorname{arc} \sin \frac{33,5}{37,8}) = \\&= 2(83^{\circ}30' - \operatorname{arc} \sin 0,887) = \\&= 2(83^{\circ}30' - 62,5^{\circ}) = 2 \cdot 21 = 42^{\circ}\end{aligned}$$

$$\varphi_{66} - \varphi_{67} = 45 - 42 = 3^{\circ}.$$

Pro vzdálenost sousedních dílků  $d$  stupnice na průměru 20 mm platí

$$d = 10 \cdot \frac{3 \cdot 60}{3438} = \frac{1800}{3438} = 0,52 \text{ mm}.$$

Podobně určíme i vzdálenost ostatních dílků stupnice, která není rovnoměrná.

#### 7. Určení velikosti excentricity justažených excentrů objektivu

Podle vztahu 12.10.1 a hodnot přípustných odchylek v konvergenci, divergenci resp. ve výšce uvedených v tab. 12.10.1 vychází pro přípustné odchylky v nerovnoběžnosti optických os obou polovin triédu

$$\alpha_K = \frac{\varphi_K}{f \pm 1} = \frac{30'}{6-1} = 6'$$

$$\alpha_D = \frac{\varphi_D}{f \pm 1} = \frac{8'}{6-1} = 1,6'$$

$$\alpha_V = \frac{\varphi_V}{f \pm 1} = \frac{8}{6-1} = 1,6'$$

Je vidět, že rovnoběžnost optických os obou polovin dalekohledu musí být dodržena s přesností do 2 minut.

Zkrácení optických os obou polovin triédu může být vyvoláno dvěma druhými příčinami:

- a) nepřesnosti mechanických prvků,
- b) nepřesnosti optických prvků.

#### a) Příčiny v nepřesnosti mechanických součástí

1. Vzájemná poloha otvoru pro uložení objektivu a okuláru:

Vzdálenost středů těchto dvou otvorů se toleruje s přípustnou odchylkou  $\pm 0,05$  mm. Tato tolerancia odpovídá sklon optických os obou polovin  $\omega_1$ , pro který platí

$$\omega_1 = \frac{0,05}{\rho} \cdot \rho' = \frac{0,05 \cdot 3438}{118} = 1,45^\circ.$$

2. Vzájemná poloha lůžka pro uložení hranolu a osy otvoru pro objektiv:

Podle obr. 15.4.10 plyne, že tato poloha je tolerována s odchylkou  $\pm 0,1$  mm.

Z obr. 15.4.11 vyplývá, že vzájemný posuv  $\Delta$  obou detailů, vyvolá posuv optické osy o hodnotu  $2 \Delta$ , tj. 0,2 mm.

Tomuto posuvu odpovídá sklon optické osy o úhel  $\omega_2$  velikosti

$$\omega_2 = \frac{0,2}{113} \cdot \rho' = 5,8^\circ.$$

3. Různost délky přepony hranolu a jeho lůžka (viz obr. 15.4.12):

Podle obr. 15.4.12 vyplývá, že v nejpříznivějším případě se může hranol posunout ze správné polohy o hodnotu 0,3 mm, které odpovídá sklon optické osy o úhel  $\omega_3 = 8,7^\circ$ .

#### b) Příčiny v nepřesnosti optických součástí

##### 1. Úhlová chyba hranolu:

Jesou-li úhly  $\alpha = \beta = 45^\circ$  tolerovány s odchylkou  $\pm 5'$ , pak pro odchylku optické osy  $\omega_4$  od správného směru vychází podle obr. 15.4.13

$$\omega_4 = 2 n (\gamma' + \gamma'') = 2 \cdot 1,5 \cdot 10^\circ = 30^\circ,$$

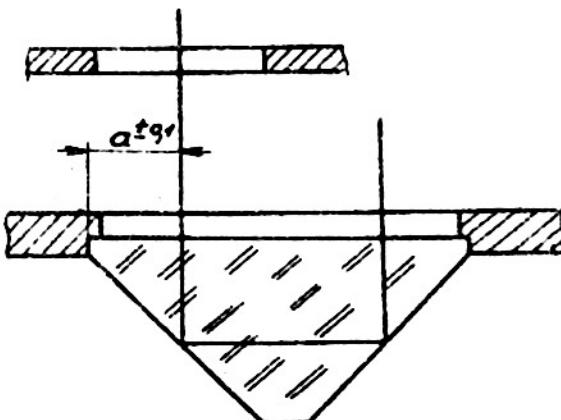
kde  $n$  značí index lomu skla hranolu a  $\gamma'$  resp.  $\gamma''$  přípustné odchylky úhlů  $\alpha = \beta$ .

##### 2. Pyramidální chyba hranolu:

Pyramidální chyba hranolů používaných u triedrů se toleruje odchylkou  $\omega_5 = 8'$ . Protože oba hranoly jsou v triedru vzájemně pootočeny o  $90^\circ$ , sčítá se pyramidální chyba jednoho hranolu s úhlovou chybou druhého hranolu. Vliv obou hranolů je tedy roven součtu těchto dvou hodnot, tedy  $\omega_4 + \omega_5 = 38^\circ$  a projeví se podle obrázku 15.4.14 přibližně poloviční hodnotou, neboť hranoly jsou umístěny v prostoru mezi objektivem a jeho ohniskovou rovinou.

##### 3. Nesouměrnost hranolu:

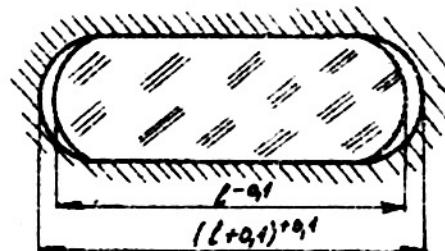
Při výrobě není možno dodržet souměrnost hranolu vzhledem k rovině procházející hranou při  $90^\circ$  úhlu přesněji než  $\pm 0,05$  mm (viz obr. 15.4.15). Nesouměrnost se projevuje jako posunutí hranolu, tedy dvojnásobnou hodnotou  $\pm 0,1$  mm, a vyvolává sklon optické osy  $\omega_6 = 2,9^\circ$ .



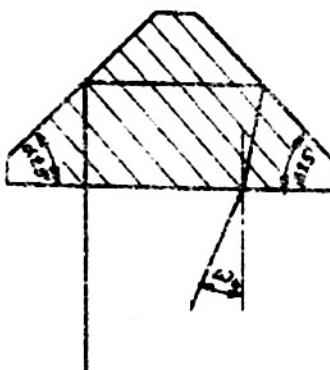
Obr. 15.4.10 Vzájemná poloha lůžka hranolu a optické osy objektivu.



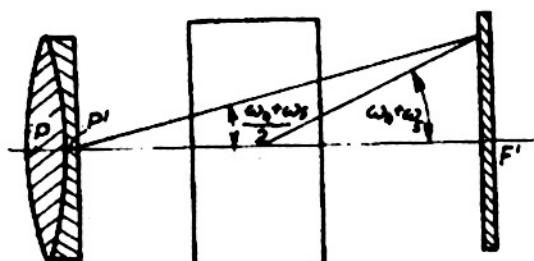
Obr. 15.4.11 Posuv optické osy vyvolaný posuvem hranolu.



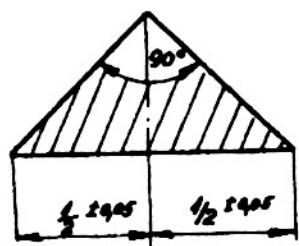
Obr. 15.4.12 K určení vlivu různosti délky přepony hranolu a jeho lůžka.



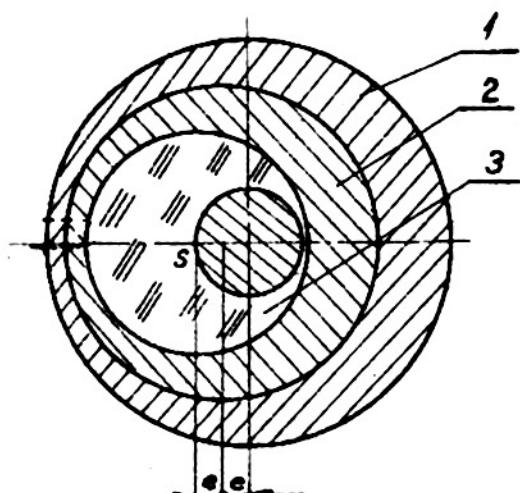
Obr. 15.4.13 Vliv úhlové chyby hranolu.



Obr. 15.4.14 K určení vlivu úhlové a pyramidální chyby hranolu.



Obr. 15.4.15 Vliv ne-souměrnosti hranolu.



Obr. 15.4.16 Uložení objektivu triedru v excentrických objímkách.

Tím byly probrány nejdůležitější příčiny způsobující sklon optických os obou polovin triedru. V nejpříznivějším případě se budou takto vyvolané úhlové odchylky sčítat, takže celková odchylka  $\omega$  je

$$\begin{aligned}\omega &= \omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_6 = \\ &= 1,45 + 5,8 + 8,7 + \frac{30}{2} + \frac{8}{2} + 2,9 = \\ &= 37,85^\circ \approx 38^\circ.\end{aligned}$$

Tuto chybu v rovnoběžnosti os obou polovin triedru je nutno při justáci přístroje odstranit. Z toho důvodu se ukládá objektiv do dvou excentrických objímek podle obr. 15.4.16. Je-li excentricita obou objímek (1) a (2) stejná a rovná  $e$ , pak vzájemným jejich natáčením je možno umístit objektiv (3) tak, že jeho střed S může zaujmout kterokoliv místo uvnitř kruhu o poloměru  $r = 2e$ .

Velikost excentricity  $e$  musí být tedy volena tak, aby splňovala podmíinku

$$\frac{2e}{\rho'} \cdot \rho' = \omega \quad \text{čili} \\ e = \frac{\rho' \omega}{2 \cdot \rho'}$$

V našem případě tedy

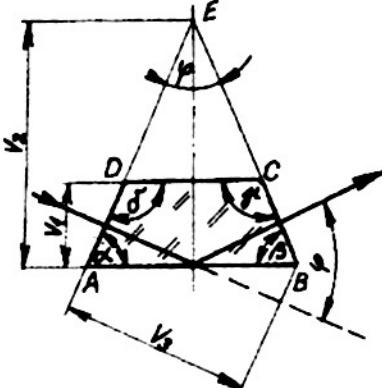
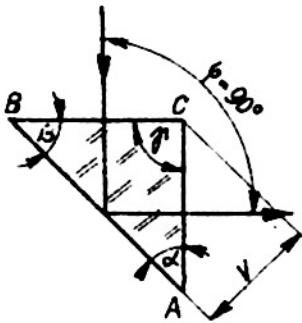
$$e = \frac{118 \cdot 38}{2 \cdot 3438} = 0,65 \text{ mm}.$$

Protože jsme v předchozích úvahách nejnepříznivější případ, který v praxi nenastává, neboť jednotlivé vlivy se vzájemně do jisté míry kompenzují, stačí volit excentricitu  $e = 0,5 \text{ mm}$ .

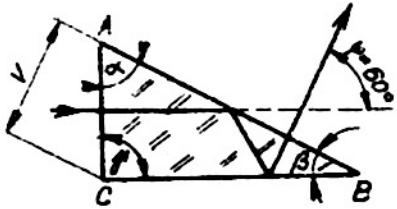
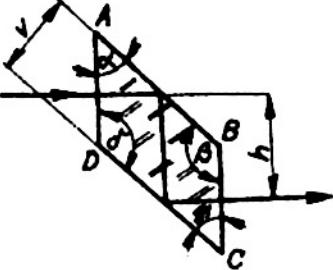
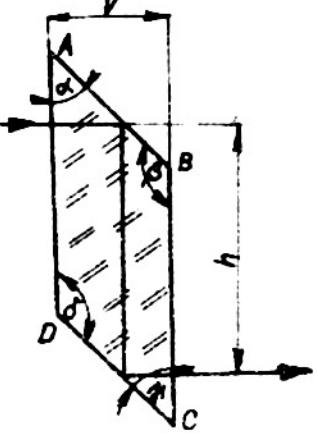
Tím můžeme považovat optickou část návrhu triedru za skončenou.

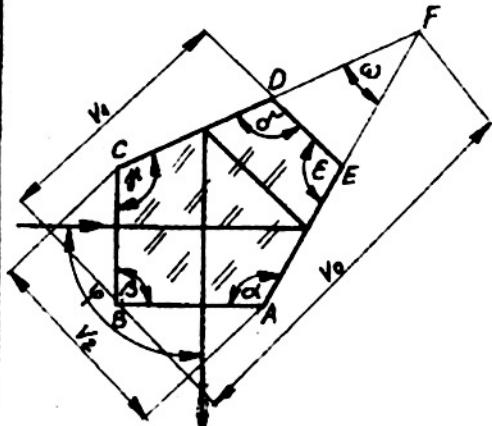
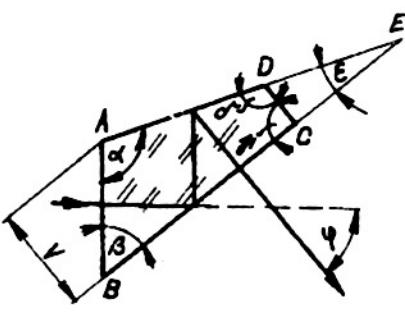
## 16. PŘÍLOHA

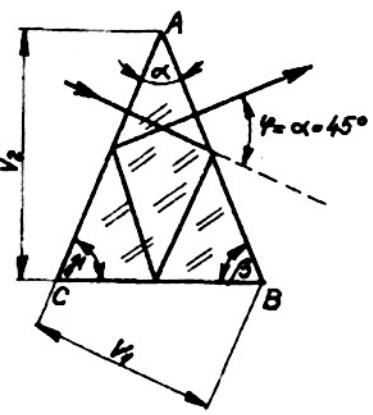
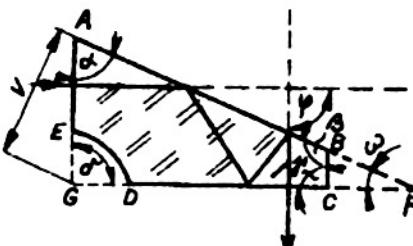
### PŘEHLED NEJUŽÍVANEJŠÍCH HRAÑOLŮ A VZTAHŮ PRO URČENÍ JEJICH KONSTRUKČNÍCH PARAMETRŮ

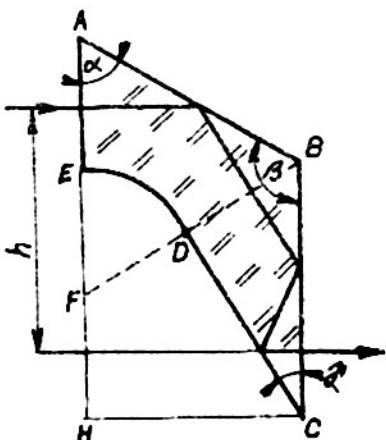
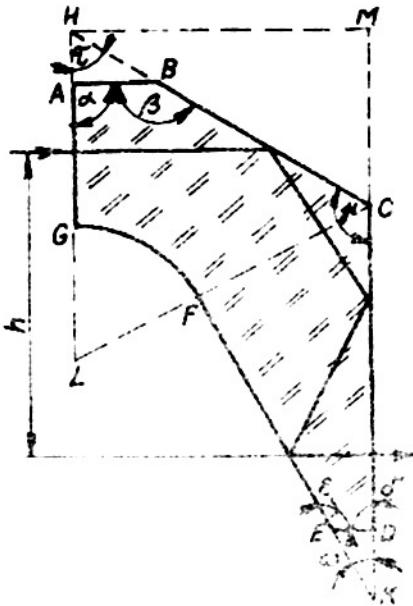
Druh hran.	Název	Schema hranolu a charakteristika	Konstrukční parametry
Hranoly s jednou odrazenou plochou	Obecný hranol s jednou odrazenou plochou	 <p>Odchylka paprsku odchýleného hranolem se rovná úhlu, který spolu svírají vstupní a výstupní ploche hranolu</p>	<p>a) <u>Úhly</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Úhel při hraně E <math>\gamma</math></li> <li>Úhel při hranách A a B</li> </ol> $\alpha = \beta = \frac{180^\circ - \gamma}{2}$ <ol style="list-style-type: none"> <li>Úhel při hranách C a D</li> </ol> $\delta = \beta = \frac{180 + \gamma}{2}$ <p>b) <u>Délkové rozměry</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrany <math>\overline{AD} = \overline{CB} = D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{AB} = D_M \sqrt{\frac{2}{1 - \cos \gamma}}</math></li> <li>Hrany <math>\overline{AE} = \overline{BE} = \frac{D_M}{1 - \cos \gamma}</math></li> <li>Výška <math>v_1 = D_M \sqrt{\frac{1 + \cos \gamma}{2}}</math></li> <li>Výška <math>v_2 = \frac{D_M}{1 - \cos \gamma} \sqrt{\frac{1 + \cos \gamma}{2}}</math></li> <li>Výška <math>v_3 = D_M \cdot \frac{\sin \gamma}{1 - \cos \gamma}</math></li> <li>Dráha ve skle</li> </ol> $l = \frac{\sin \gamma}{1 - \cos \gamma}$
Pravoúhlý hranol	Pravoúhlý hranol	 <p>Pravoúhlý hranol je zvláštním případem obecného hranolu s jednou odrazenou plochou pro <math>90^\circ</math>.</p>	<p>a) <u>Úhly</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Úhel při hranách A a B</li> </ol> $\alpha = \beta = 45^\circ$ <ol style="list-style-type: none"> <li>Úhel při hraně C</li> </ol> $\gamma = 90^\circ$ <p>b) <u>Délkové rozměry</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrany <math>\overline{AC} = \overline{BC} = D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{AB} = D_M \sqrt{\frac{2}{1 - \cos \gamma}} = D_M \cdot \sqrt{2} = 1,414 D_M</math></li> <li>Výška <math>v = \frac{D_M}{1 - \cos \gamma} \sqrt{\frac{1 + \cos \gamma}{2}} = \frac{D_M}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot D_M</math></li> <li>Dráha ve skle <math>l = D_M</math></li> </ol>

Druh hran.	Název	Schema hranolu a charakteristika	Konstrukční parametry
Hranoly s jednou odrazenou plochou	Vzpřímovací hranol lomový (Doseho)	<p>Schema hranolu s charakteristikou:</p> <p>Hranol se používá jako vzpřímovací hranol především u panoramatických dalekohledů. Musí být začleněn do rovnoběžného paprskového chodu, jak je to naznačeno v následující soustavě.</p> <p>Jeho délkové rozměry jsou závislé na indexu lomu skla použitého k jeho výrobě.</p>	<p><u>a) Úhly</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Úhel při hranách A a B je <math>\alpha = \beta = 45^\circ</math></li> <li>2. Úhel při hranách C a D je <math>\gamma = \delta = \frac{180 + \epsilon}{2} = 135^\circ</math></li> <li>3. Úhel při hraně E <math>\epsilon = 90^\circ</math></li> </ol> <p><u>b) Délkové rozměry</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hranы <math>AD = BC = 1,414 D_M</math></li> <li>2. Hranы <math>AB = \frac{\sqrt{2n^2-1}}{\sqrt{2n^2-1-1}} \cdot D_M</math></li> <li>3. Hranы <math>CD = \frac{2}{\sqrt{2n^2-1-1}} \cdot D_M</math></li> <li>4. Výška <math>v = D_M</math></li> <li>5. Výška <math>v_o = \frac{\sqrt{2n^2-1}}{\sqrt{2n^2-1-1}} \cdot D_M</math></li> </ol> <p><u>c) Délkové rozměry hranolu pro případ <math>n = 1,51633</math> (BK7)</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>a) <math>AD = BC = 1,414 D_M</math></li> <li>b) <math>AB = 4,2297 \cdot D_M</math></li> <li>c) <math>CD = 2,2297 \cdot D_M</math></li> <li>d) Výška <math>v = D_M</math></li> <li>e) Výška <math>v_o = 2,1149 \cdot D_M</math></li> <li>f) Dráha ve skle <math>\ell = 3,3881 \cdot D_M</math></li> </ol>

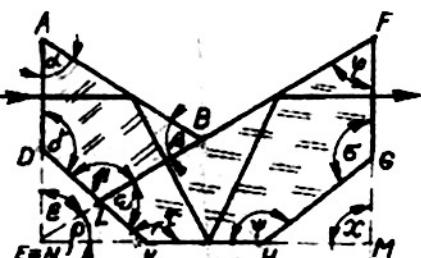
Druh hran.	Název	Schema hranolu a charakteristika	Konstrukční parametry
Hranoly se dvěma odstřípnými plochami	Pravoúhlý hranol	 <p>Odchylka paprsku <math>\varphi</math> (<math>=60^\circ</math>) se rovná úhlu <math>\alpha</math>, který spolu svírají vstupní a výstupní plochy. Hranol slouží pouze ke změně směru osy paprskového svažku (nepřevrací obraz).</p>	<p><b>a) Úhly</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Úhel při hraně A <math>\alpha = 60^\circ</math></li> <li>Úhel při hraně B <math>\beta = 30^\circ</math></li> <li>Úhel při hraně C <math>\gamma = 90^\circ</math></li> </ol> <p><b>b) Délkové rozměry</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrana AC = <math>D_M</math></li> <li>Hrana BC = <math>1,732 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana AB = <math>2 \cdot D_M</math></li> <li>Výška v = <math>0,866 D_M</math></li> <li>Dráha ve skle <math>l = 1,732 \cdot D_M</math></li> </ol>
	Rombický hranol s $h = D_M$	 <p>Rombický hranol slouží k rovnoběžnému posouvání optické osy paprskového svažku.</p> 	<p><b>a) Úhly</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Úhel při hraně A = C <math>\alpha = \gamma = 45^\circ</math></li> <li>Úhel při hraně B = D <math>\beta = \delta = 135^\circ</math></li> </ol> <p><b>b) Délkové rozměry</b></p> <p>Tyto rozměry jsou závislé na posunu svažku <math>h</math>.</p> <p>A) Nechť <math>h = D_M</math>. Potom je:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrana AD = BC = <math>D_M</math></li> <li>Hrana AB = CD = <math>1,414 D_M</math></li> <li>Výška v = <math>0,707 \cdot D_M</math></li> <li>Dráha ve skle <math>l = 2 D_M</math></li> </ol> <p>B) Nechť je <math>h = \Delta</math>. Potom je:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrana AB = CD = <math>1,414 D_M</math></li> <li>Hrana AD = BC = <math>\Delta</math></li> <li>Výška v = <math>D_M</math></li> <li>Dráha ve skle <math>l = \Delta + D_M</math></li> </ol>

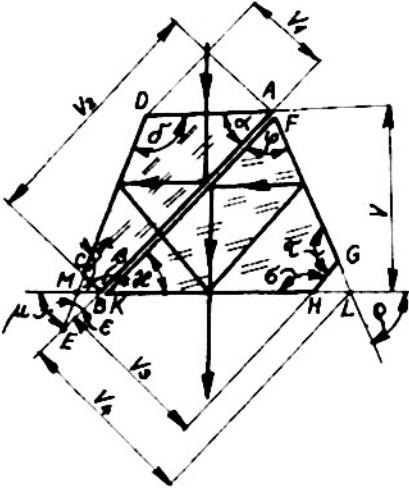
Druh hran.	Název	Scheme hranolu a charakteristika	Konstrukční parametry
Hranoly se dvěma odraznými plochami	Pentagonální hranol	 <p>Hranol odchyluje osu paprskového svazku o úhel <math>\varphi = 90^\circ</math>, který je nezávislý na úhlu dopadu osy paprskového svazku na vstupní plochu hranolu.</p>	<p><b>a) Úhly</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Úhel při hraně A,C,D a E <math>\alpha = \gamma = \delta = \epsilon = 112,5^\circ</math></li> <li>Úhel při hraně F <math>\omega = 45^\circ</math></li> <li>Úhel při hraně B <math>\beta = 90^\circ</math></li> </ol> <p><b>b) Délkové rozměry</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrana <math>\overline{AB} = \overline{BC} = D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{AE} = \overline{CD} = 1,082 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{DE} = 0,586 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{AF} = \overline{CF} = 1,848 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_0 = 2,414 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_1 = 1,707 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_2 = 1,414 \cdot D_M</math></li> <li>Dráha ve skle <math>\ell = 3,414 \cdot D_M</math></li> </ol>
Hranoly se dvěma odraznými plochami	Položitelný pentagonální hranol	 <p>Odchyluje osu paprskového svazku o úhel <math>\varphi = 45^\circ</math>. Odrazná plocha <math>\overline{AD}</math> se musí pokovit. Používá se k lomení optické osy zaměřovačů a binokulárních mikroskopů.</p>	<p><b>a) Úhly</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Úhel při hraně A a D <math>\alpha = \delta = 112,5^\circ</math></li> <li>Úhel při hraně C <math>\gamma = 90^\circ</math></li> <li>Úhel při hraně B <math>\beta = 45^\circ</math></li> <li>Úhel při hraně E <math>\epsilon = 22,5^\circ</math></li> </ol> <p><b>b) Délkové rozměry</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrana <math>\overline{AB} = D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{AD} = 1,082 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{BC} = 1,707 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{CD} = 0,293 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{AE} = 1,848 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v = 0,707 \cdot D_M</math></li> <li>Dráha ve skle <math>\ell = 1,707 \cdot D_M</math></li> </ol>

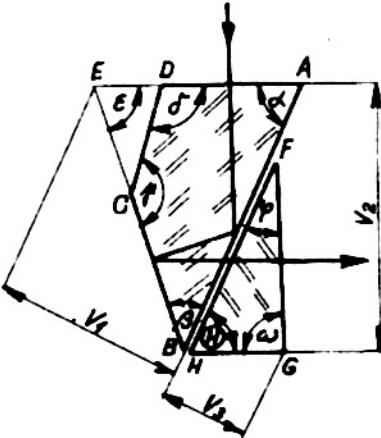
Druh hran.	Název	Schéma hranolu a charakteristika	Konstrukční parametry
Hranoly se třími odraznými plochami	Schmitův hranol	 <p>Hranol odchyluje osu svazku o úhel <math>\gamma = \alpha = 45^\circ</math>. Plocha BC se pokrývá. Užívá se k lomení optické osy a k podstatnému zkrácení stavby.</p>	<p><b>a) Úhly</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Úhel při hraně A <math>\alpha = 45^\circ</math></li> <li>Úhel při hraně B a C <math>\beta = \gamma = 67,5^\circ</math></li> </ol> <p><b>b) Délkové rozměry</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrana <math>\overline{AB} = \overline{AC} = 1,414 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{BC} = 1,082 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_1 = D_M</math></li> <li>Výška <math>v_2 = 1,307 \cdot D_M</math></li> <li>Dráha ve skle <math>l = 2,414 \cdot D_M</math></li> </ol>
	Pravouhlý hranol odchylující osu svazku o $90^\circ$	 <p>Hranol odchyluje osu paprskového svazku o úhel <math>\gamma = 90^\circ</math>. Plochu AB je nutno opatřit kovovou odraznou vratvou.</p>	<p><b>a) Úhly</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Úhel při hraně A <math>\alpha = 67,5^\circ</math></li> <li>Úhel při hraně B <math>\beta = 112,5^\circ</math></li> <li>Úhel při hraně C a G <math>\gamma = \delta = 90^\circ</math></li> <li>Úhel při hraně F <math>\omega = 22,5^\circ</math></li> </ol> <p><b>b) Délkové rozměry</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrana <math>\overline{AE} = \overline{CF} = \overline{EG} = \overline{DJ} = D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{AB} = 4,144 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{CD} = 2,828 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{EC} = 0,414 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{AG} = 2 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{AF} = 5,226 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{FG} = 4,828 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v = 1,848 \cdot D_M</math></li> <li>Dráha ve skle <math>l = 4,828 \cdot D_M</math></li> </ol>

Druh hran.	Název	Schema hranolu a charakteristika	Konstrukční parametry
Lemnádlo hranol		 <p>Hranol osu paprskového svazku pouze rovnoběžně posouvá. Plochu CD nutno pokovit.</p>	<p>a) Úhly</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Při hraně A <math>\alpha = 60^\circ</math></li> <li>Při hraně B <math>\beta = 120^\circ</math></li> <li>Při hraně C <math>\gamma = 30^\circ</math></li> </ol> <p>b) Délkové rozměry pro <math>h = 2 \cdot D_M</math></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrany AE=ED=DF=EF=FH=D_M</li> <li>Hrany AB=BC = <math>2 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana AH = <math>3 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana CD = <math>1,732 \cdot D_M</math></li> </ol> <p>Délka ve skle</p> $l = 3,464 \cdot D_M$
Hranoly se třemi odrezanými plochami		 <p>Plocha EF nutno opatřit kovovou vlastivou.</p>	<p>Nechť <math>h = 2 \cdot D_M + \Delta</math>, potom platí:</p> <p>a) Úhly</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Při hranách A a D <math>\alpha = \delta = 90^\circ</math></li> <li>Při hraně B <math>\beta = 150^\circ</math></li> <li>Při hraně C a E <math>\gamma = \varepsilon = 120^\circ</math></li> <li>Při hraně H <math>\tau = 60^\circ</math></li> <li>Při hraně K <math>\omega = 30^\circ</math></li> </ol> <p>b) Délkové rozměry</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrana AG = <math>0,25(h + 2 \cdot D_M)</math></li> <li>Hrana KB = <math>0,433(h - 2 \cdot D_M)</math></li> <li>Hrana EC = <math>0,5(h + 2 \cdot D_M)</math></li> <li>Hrana CD = <math>0,5(1,5h + D_M)</math></li> <li>Hrana CE = <math>0,164(h - 2 \cdot D_M)</math></li> <li>Hrana EF = <math>0,577(h - D_M)</math></li> <li>Hrana GF = <math>0,5h</math></li> <li>Hrana KE = <math>0,25(h - 2 \cdot D_M)</math></li> <li>Hrana HM = <math>0,866h</math></li> <li>Hrana HK = <math>0,25(h - 2 \cdot D_M)</math></li> <li>Hrana KK = <math>1,5h</math></li> </ol> <p>Délka ve skle</p> $l = 1,732 \cdot h$

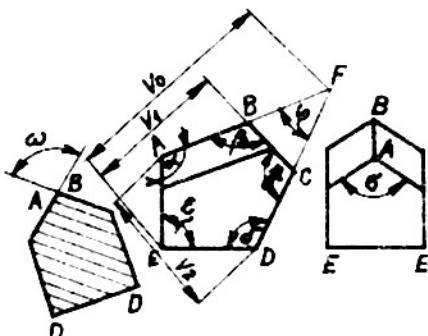
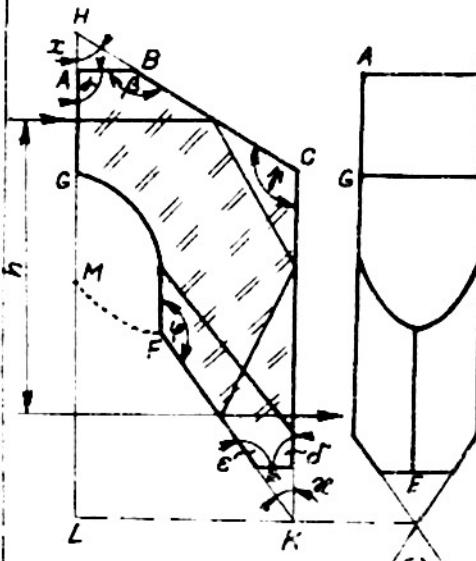
Druh hran.	Název	Scheme hranolu a charakteristika	Konstrukční parametry
Složené hranoly	Krychlový hranol	<p></p> <p>Krychlový hranol je sestaven ze dvou pravoúhlých hranolů, jejichž společné přeponové plochy jsou oploteny kovovou odreznou vrstvou.</p> <p>Používá se ho jako děliče světla podle obrázku 1. nebo k plynulé změně směru osy paprskového svazku, jak je naznačeno na dalším obrázku 2.</p> <p>Výrobně je velmi obtížný.</p> <p>Nepřesnost výroby vede ke zdrojení obrazu.</p> <p></p> <p>Obr. 1.</p> <p></p> <p>Obr. 2.</p> <p>V druhém případě umožňuje plynulou změnu směru osy svazku od <math>-20^\circ</math> až do <math>200^\circ</math>. Výroba je velmi náročná, netož nepřesnost výroby se projevuje zdrojením obrazu.</p> <p>Délkové rozměry krychlového hranolu závisí v druhém případě na indexu lomu skla, ze kterého je vytvořen.</p>	<p>Poněvadž použití krychlového hranolu jako děliče světla je v podstatě shodné s použitím pravoúhlého hranolu, určí se rozměry obou jeho částí stejně jako u pravoúhlého hranolu.</p> <p>V případě druhém, kdy je hranolu využito k plynulé změně směru osy paprskového svazku, určí se rozměry takto:</p> <p>a) <u>Úhly</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Při hranách B a D <math>\beta = \delta = 90^\circ</math></li> <li>2. Při hranách A,C <math>\alpha = \gamma = 45^\circ</math></li> </ol> <p>b) <u>Délkové rozměry</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Hrany <math>AB = BC = CD = AD = \frac{\sqrt{2} n^2 - 1}{\sqrt{2} \cdot (\sqrt{2n^2 - 1} - 1)} \cdot D_M</math></li> <li>2. Hrana <math>AC = \frac{\sqrt{2} n^2 - 1}{\sqrt{2n^2 - 1} - 1} \cdot D_M</math></li> <li>3. Výška <math>v = \frac{\sqrt{2n^2 - 1}}{2 (\sqrt{2n^2 - 1} - 1)} \cdot D_M</math></li> <li>4. Dráha ve skle</li> </ol> $l = \frac{n}{\sqrt{2n^2 - 1} - 1} \cdot D_M$ <p>Pro sklo o indexu lomu <math>n_D = 1,51633</math> (BK7) plyně pro jeho rozměry délkové:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <math>AB = BC = CD = AD = 1,495 \cdot D_M</math></li> <li>2. <math>BD = 2,115 \cdot D_M</math></li> <li>3. <math>v = 1,057 \cdot D_M</math></li> <li>4. <math>l = 1,691 \cdot D_M</math></li> </ol>

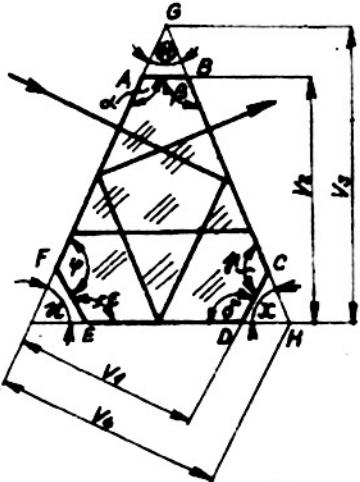
Druh hran.	Název	Schema hranolu s charakteristikou	Konstrukční parametry
Slotené hranoly	Hranol Abbého	 <p>Hranol působí jako vzdálovací hranol, avšak na rozdíl od Wolastonova hranolu může být použit i ve sbíhavém paprskovém chodu.</p>	<p><b>a) Úhly</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Při hranách A, B, E a F <math>\alpha = \beta = \epsilon = \varphi = 60^\circ</math></li> <li>Při hraně C <math>\gamma = 109^\circ</math> (přesně <math>109,1^\circ</math>)</li> <li>Při hranách D a G <math>\delta = \sigma = 131^\circ</math> (přesně <math>130,89^\circ</math>)</li> <li>Při hranách H a K <math>\tau = \gamma = 139^\circ</math> (přesně <math>139,1^\circ</math>)</li> <li>Při hraně L <math>\omega = 71^\circ</math> (přesně <math>70,89^\circ</math>)</li> <li>Při hraně N <math>\vartheta = 30^\circ</math></li> <li>Při hraně M <math>\chi = 90^\circ</math></li> </ol> <p><b>b) Délkové rozměry</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrany <math>AB=FG=DE=CM = D_M</math></li> <li>Hrany <math>AB=EG=AK=FH = 2 D_M</math></li> <li>Hrany <math>HK=HM=EN=EC = 1,155 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>CD = 0,882 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>GH=ED = 1,528 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>KL = 0,646 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>LF = 3,155 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>MN = 3,464 \cdot D_M</math></li> <li>Dráha ve skle <math>l = 5,196 \cdot D_M</math></li> </ol>

Druh hran.	Název	Schema hranolu a charakteristika	Konstrukční parametry
Složené hranoly	Pevný hranol	 <p>Obě části hranolu jsou odděleny vzduchovou mezerou, plochy <math>\overline{CD}</math> a <math>\overline{FG}</math> jsou opatřeny kovovými odraznými vrstvami. Funkcí se shoduje s Wollastonovým hranolem, lze jej však užít v nerovnoběžném paprskovém chodu. Výrobně je velmi náročný a užívá se ho při konstrukci panoramatických dalekohledů a malou stavební délce, neboť tento hranol potřebuje velmi mnoho ze stavební délky přístroje na dráhu ve skle.</p>	<p><b>a) Úhly</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Při hranách A a K <math>\alpha = \chi = 45^\circ</math></li> <li>Při hranách C,D a G <math>\gamma = \delta = \tau = 112,5^\circ</math></li> <li>Při hraně B <math>\beta = 90^\circ</math></li> <li>Při hraně E <math>\epsilon = 22,5^\circ</math></li> <li>Při hranách F, L a M <math>\varphi = \rho = \mu = 67,5^\circ</math></li> <li>Při hraně H <math>\zeta = 135^\circ</math></li> </ol> <p><b>b) Délkové rozměry</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrana <math>\overline{AD} = D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{AB}=\overline{FK}=\overline{KL} = 1,707 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{EC}=\overline{GH} = 0,293 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{AE} = 2,414 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{ED} = 1,848 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{HK} = 1,414 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{AL} = 1,307 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v = 1,207 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_1 = 0,707 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_2 = 1,577 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_3 = D_M</math></li> <li>Výška <math>v_4 = 1,207 \cdot D_M</math></li> <li>Dráha ve skle <math>\ell = 4,621 \cdot D_M</math></li> </ol>

Druh hran.	Název	Schema a charakteristika hranolu	Konstrukční parametry
Složené hranoly Bachmannův hranol		 <p>Obě části hranolu jsou odděleny vzduchovou mezírou. Hranol odchyluje osu paprskového svazku o <math>90^\circ</math> a tato odchylka je nezávislá na úhlu dopadu.</p>	<p><u>a) Úhly</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Při hranách A a H <math>\alpha = \beta = 60^\circ</math></li> <li>Při hraně B <math>\beta = 45^\circ</math></li> <li>Při hraně C <math>\gamma = 145^\circ</math> (přesně 144,9)</li> <li>Při hraně D <math>\delta = 110^\circ</math> (přesně 110,1)</li> <li>Při hraně E <math>\epsilon = 75^\circ</math></li> <li>Při hraně F <math>\zeta = 30^\circ</math></li> <li>Při hraně G <math>\omega = 90^\circ</math></li> </ol> <p><u>b) Délkové rozměry</u></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrana <math>AD=GF = D_M</math></li> <li>Hrana <math>AB = 2D_M</math></li> <li>Hrana <math>BC = 1,035 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>CD = 0,779 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>EA = 1,464 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>EB = 1,793 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>CH = 0,577 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>HF = 1,154 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_1 = 1,268 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_2 = 1,732 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_3 = 0,5 \cdot D_M</math></li> <li>Dráha ve skle <math>\ell = 2,309 \cdot D_M</math></li> </ol>

Druh hran.	Název	Schema a charakteristika hranolu	Konstrukční parametry
Střechové hranoly	Pravoúhlý střechový hranol	<p>Střecha je umístěna nad přeponou plochou pravoúhlého hranolu. Hranol převrací obraz výškově i stranově a užívá se ho jako převacející soustavy.</p>	<p><b>a) Úhly</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Při hranách A a D <math>\alpha = \delta = 90^\circ</math></li> <li>Při hranách B,C,E a F <math>\beta = \gamma = \epsilon = \varphi = 135^\circ</math></li> <li>Při hranách G a H <math>\rho = \eta = 45^\circ</math></li> <li>Pomocný úhel <math>\omega = 70,5^\circ</math></li> </ol> <p><b>b) Délkové rozměry</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrany <math>\overline{AF} = \overline{EH} = \overline{EE} = D_M</math></li> <li>Hrany <math>\overline{AB} = \overline{CD} = \overline{AG} = \overline{DH} = \overline{EK} = \overline{FK} = 0,366 D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{BC} = 1,414 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{EF} = 0,518 \cdot D_M</math></li> <li>Hrany <math>\overline{GK} = \overline{HK} = 1,732 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{GH} = 2,449 \cdot D_M</math></li> <li>Hrany <math>\overline{AK} = \overline{DK} = 1,366 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_0 = 1,225 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v = 0,966 \cdot D_M</math></li> <li>Dráha ve skle <math>\ell = 1,732 \cdot D_M</math></li> </ol>

Druh hran.	Název	Schema hranolu a charakteristika	Konstrukční parametry
Střechové hranoly	Pentagonální střechový hranol	 <p>Hranol převrací obraz pouze stranově a užívá se v některých periskopických dalekohledech.</p>	<p><b>a) Úhly</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Při hranách A,B,C a D <math>\alpha = \beta = \gamma = \delta = 112,5^\circ</math></li> <li>Při hraně E <math>\epsilon = 90^\circ</math></li> <li>Při hraně F <math>\varphi = 45^\circ</math></li> <li>Úhel střechy <math>\omega = 90^\circ</math></li> <li>Pomocný úhel <math>\delta = 85,5^\circ</math></li> </ol> <p><b>b) Délkové rozměry</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrany <math>\overline{AE}=\overline{DE} = 1,237 \cdot D_M</math></li> <li>Hrany <math>\overline{AB}=\overline{CD} = 1,082 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{EC} = 0,921 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{AF}=\overline{DF} = 2,285 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_1 = 1,875 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_2 = 1,749 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_0 = 2,986 \cdot D_M</math></li> <li>Dráha ve skle <math>\ell = 4,223 \cdot D_M</math></li> </ol>
Lemandov střechový hranol		 <p>Nechť <math>h = 2,618 D_M + \Delta</math>, kde <math>\Delta \geq 0</math>.</p>	<p><b>a) Úhlové rozměry</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Při hranách A a D <math>\alpha = \delta = 90^\circ</math></li> <li>Při hraně B <math>\beta = 150^\circ</math></li> <li>Při hranách C a E <math>\gamma = \epsilon = 120^\circ</math></li> <li>Při hraně H <math>\chi = 60^\circ</math></li> <li>Při hraně K <math>\varphi = 30^\circ</math></li> <li>Pomocný úhel <math>\omega = 53,1^\circ</math></li> </ol> <p><b>b) Délkové rozměry</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrana <math>\overline{AG} = 0,5(0,382.h+D_M)</math></li> <li>Hrana <math>\overline{AB} = 0,866 (0,382.h-D_M)</math></li> <li>Hrana <math>\overline{PC} = 0,382.h+D_M</math></li> <li>Hrana <math>\overline{CD} = 0,5 (1,618.h+D_M)</math></li> <li>Hrana <math>\overline{DE} = 0,289 (0,854.h-D_M)</math></li> <li>Hrany <math>\overline{GH}=\overline{GM}=\overline{FH} = 0,382.h</math></li> <li>Hrany <math>\overline{MH}=\overline{HC} = 0,764 \cdot h</math></li> <li>Hrana <math>\overline{CY} = 1,236 \cdot h</math></li> <li>Hrana <math>\overline{KL} = 0,662 \cdot h</math></li> <li>Hrana <math>\overline{LH} = 1,618 \cdot h</math></li> <li>Dráha ve skle <math>\ell = 1,732 \cdot h</math></li> </ol>

Druh hran.	Název	Schema hranolu a charakteristika	Konstrukční parametry
Střechové hranoly	Schmidtův střechový hranol	 <p>Schmidtův střechový hranol se používá jako převracející soustava u jednoduchých zaměřovačů s malou stavební délkou.</p>	<p><b>a) Úhly</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Při hranách A,B,D a E  <math>\alpha = \beta = \delta = \epsilon = 112,5^\circ</math></li> <li>Při hranách C a F  <math>\gamma = \varphi = 135^\circ</math></li> <li>Při hraně G <math>\text{(\textcircled{H})} = 45^\circ</math></li> <li>Při hranách H a K  <math>\chi = \vartheta = 67,5^\circ</math></li> </ol> <p><b>b) Délkové rozměry</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>Hrany AF=EC = <math>1,468 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana AE = <math>0,099 \cdot D_M</math></li> <li>Hrany CD=EF = <math>0,183 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana DE = <math>1,082 \cdot D_M</math></li> <li>Hrany EG=DH = <math>1,781 \cdot D_M</math></li> <li>Hrana HK = <math>1,363 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_1 = 1,130 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_2 = 1,526 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_3 = 1,645 \cdot D_M</math></li> <li>Výška <math>v_4 = 1,259 \cdot D_M</math></li> <li>Dráha ve skle  <math>\ell = 3,040 \cdot D_M</math></li> </ol>

**17. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

---

1. Danjon A., Couder A., Lunettes et télescopes, Paris, 1935.
2. Havelka B., Geometrická optika I. a II., Praha 1956.
3. Von Hofe Chr., Fernoptik, Leipzig, 1941
4. Jefros I.E., Osnovy ustrojstva pricelov dla bombometaniya, Moskva, 1947.
5. Klabazna J., Výpočet parametrů optických hranolů, Jemná mechanika a optika, příloha 133 - 180, 1961 - 1962.
6. Keprt E., Konstrukce geodetických strojů, Brno, 1951.
7. Keprt E., Volba parametrů dalekohledu, Jemná mechanika a optika, 101,4, 1957.
8. König A., Die Fernrohre und Entfernungsmesser, Berlin, 1937.
9. Maksutov D.D., Izgotovlenie i issledovanie astronomickej optiki, Moskva, 1948.
10. Martin L.C., Technical optics, I. a II., London, 1948.
11. Navašin M.C., Teleskop astronoma-ljubitelja, Moskva, 1962.
12. Rusinov M.M., Gaberitnye raschety opticheskikh sistem, Moskva, 1959.
13. Rusinov M.M., Technicheskaja optika, Moskva, 1961.
14. Tudorovskij A.J., Teoriya opticheskikh priborov I. a II., Moskva, 1952.
15. Vavilov S.J., Savostjanova M.V., Optika v vojennom děle, Moskva, 1948.
16. Voronov R.V., Optika v geodesičeskom priborostrojenii, Moskva, 1957.
17. Optika pricelov bombometanijs, Moskva.

**18. OBSAH**

---

	Strana
1. Úvod .....	3
2. Afokální (teleskopická) soustava .....	4
3. Dalekohled .....	6
4. Rozdílné funkce objektivu a okuláru dalekohledu .....	8
5. Rozdělení dalekohledů .....	9
6. Keplerov dalekohled .....	11
7. Galileov (holandský) dalekohled .....	13
8. Základní velikosti dalekohledů .....	14
8.1. Zvětšení dalekohledu .....	15
8.2. Zorné pole dalekohledu .....	15
8.3. Pupily dalekohledu .....	19
8.4. Světelnost dalekohledu .....	21
8.5. Praktické nekonečno dalekohledu .....	26
8.6. Rozlišovací schopnost dalekohledu .....	28
8.7. Paralaxa dalekohledu .....	30
8.8. Nastavení okuláru a jeho vliv na zvětšení dalekohledu .....	34
9. Objektiv dalekohledu .....	39
9.1. Achromatický objektiv .....	39
9.2. Návrh tmeleného achromatického objektivu .....	41
9.3. Konstrukce netmeleného achromatického objektivu .....	50
9.4. Zrcadlové objektivy .....	52
10. Okuláry .....	64
10.1. Huygenov okulár .....	66
10.2. Ramsdenov okulár .....	69
10.3. Kellnerov okulár .....	70
10.4. Abbedov okulár .....	70
10.5. Monocentrický okulár .....	71
10.6. Souměrný okulár .....	71
10.7. Širokouhlý Erfleov okulár .....	71
11. Převracející soustavy .....	73
11.1. Zrcadlové převracející soustavy .....	73
11.2. Čočkové převracející soustavy .....	87
11.3. Pankratické převracející soustavy .....	99
12. Binokulární dalekohledy .....	120
12.1. Fysiologie binokulárního vidění .....	120
12.2. Vynucené zdvojení obrazu .....	122
12.3. Prostorové vidění .....	123
12.4. Vnímání hloubky prostoru .....	124
12.5. Prostorové vidění a konvergenční úhel .....	126
12.6. Oční rozestup .....	126
12.7. Pseudostereoskopie .....	127
12.8. Některé základní pojmy stereoskopického vidění .....	127
12.9. Binokulární dalekohledy .....	130
12.10. Dovolené zkřížení optických os binokulárních dalekohledů ...	130
12.11. Stejnost zvětšení obou částí binokulárních dalekohledů ....	132

	Strana
13. Monokulární dalekohledy .....	132
13.1. Zaměřovací dalekohledy .....	132
13.2. Kolimátorové zaměřovače .....	145
14. Binokulární dalekohledy .....	147
14.1. Triedr .....	147
14.2. Nážkový stereoskopický dalekohled .....	149
15. Praktické navrhování monokulárních a binokulárních dalekohledů ....	150
15.1. Návrh konstrukce puškového dalekohledu .....	150
15.2. Návrh konstrukce dělového zaměřovače .....	156
15.3. Návrh konstrukce jednoduchého periskopu pro pozorování z ruky	170
15.4. Návrh triedru .....	175
16. Příloha - Přehled nejužívanějších odrazných hranolů a jejich parametry .....	187
17. Seznam použité literatury .....	200
18. Obsah .....	201



<b>Autor</b>	Prof. dr. Eng. Kepřt
<b>Název</b>	Theorie optických přístrojů I. Teorie a konstrukce dalekohledů + zaměřovačů
<b>Vydavatel</b>	Universita Palackého v Olomouci
<b>Určeno</b>	pro posluchače přírodovědecké fakulty
<b>Vedoucí katedry</b>	Prof. dr. E. Kepřt
<b>Povolení</b>	rektořátem University Palackého v Olomouci dne 5. 3. 1965, N. 644/65 — B-02*50106
<b>Nakladatel</b>	Státní pedagogické nakladatelství Praha 1
<b>Cílo publikace</b>	1212 - 4789
<b>Vydání</b>	první 1965
<b>Náklad</b>	300 výtisků
<b>Stran</b>	202
<b>AA / VA</b>	21,78 / 22,60
<b>Temat. skupina a podskupina</b>	17.99
<b>Tiskárna</b>	Knihtisk, n. p., provoz 6, Praha 1
<b>Druh tisku</b>	offset

17 - 583 - 65

Cena Kčs 16,30

63/I - 10

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou  
v redakci nakladatelství