

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUC

PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Katedra optiky

Digitální a přístrojová optika

**Diplomová práce**

Měření a úprava směrových  
charakteristik svítilen pro návěstidla

Silvie Gótzová

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a použila jen uvedenou literaturu a zdroje.

V Olomouci dne 3.5.2018

Silvie Gótzová

Tímto děkuji Ing. RNDr. Janu Podlouckému za odborné vedení diplomové práce a za poskytování materiálů k práci.

## Abstrakt

Práce se zabývá měřením a úpravou směrové charakteristiky svítlen pro návěstidla, ve kterých je jako zdroj použita pouze jedna LED dioda, namísto stávajícího zdroje – speciální žárovky 12V/20W. Měření směrové charakteristiky v optické laboratoři se provádí s využitím luxmetru a pomocného objektivu. Svítlna je přitom umístěna na stolcích s horizontálním a vertikálním náklonem. Následně jsou v práci popsány možné úpravy směrové charakteristiky svítlny tak, aby vyhovovala normovaným parametrům.

## Abstract

This thesis deals with measurement and modification of the angular light distribution of lamp for railway signals, where one LED diode is used instead of current special light bulb 12V/20W. Measurement of angular light distribution in the optical lab is realized with a photometer and an auxiliary objective. The lamp for railway signalizing device is tested at tables with horizontal and vertical tilt. Possible modification of the angular light distribution of the lamp is described in the thesis in order to comply with the requirement of standards.

## Obsah

ÚVOD.....	7
1 Návěstidla.....	8
1.1 Návěstidla v železniční dopravě .....	8
1.2 Přejezdníky .....	9
1.2.1 Konstrukce.....	10
1.2.2 Modernizace.....	11
2 Měření svítivosti .....	11
2.1 Pomocí jasu .....	11
2.2 Pomocí osvětlení .....	12
2.3 S pomocným objektivem.....	12
3 Měření směrové charakteristiky .....	13
3.1 Definice směrové charakteristiky.....	13
3.2 Popis měřicí sestavy .....	15
3.3 Popis měření.....	17
4 Výsledky měření .....	18
4.1 Měření s celou aperturou.....	18
4.1.1 Měření se zdrojem v nulové poloze .....	18
4.1.2 Měření se zdrojem v poloze +5 mm .....	20
4.1.3 Měření se zdrojem v poloze -5 mm.....	22
4.2 Měření dílčích subapertur .....	24
4.2.1 Měření se zdrojem v nulové poloze .....	24
4.2.2 Měření se zdrojem v poloze +5 mm .....	26
4.2.3 Měření se zdroje v poloze -5 mm .....	28
4.3 Měření samotného zdroje – LED diody .....	30
5 Toleranční pole .....	30
5.1 Horní hranice tolerančního pole .....	30
5.2 Spodní hranice tolerančního pole .....	31
5.2.1 Výpočet pro rovnou trať.....	31
5.2.2 Výpočet pro obloukovou trať.....	35
6 Úprava směrové charakteristiky.....	42
6.1 Etendue .....	42
6.2 Tvarované světlovody.....	43
6.3 Vypracované návrhy.....	44
6.3.1 Světlovody s kulatým profilem .....	44

6.3.2	Světlovody s pravoúhlým profilem.....	47
6.3.3	Sestava svítilny se světlovodem .....	52
	Závěr .....	55
	Literatura .....	56
	Seznam obrázků .....	57
	Seznam tabulek .....	58
	Seznam grafů .....	59
	Příloha 1 – výsledky měření s využitím celé apertury .....	i
	Příloha 2 – výsledky měření vybraných subapertur .....	xvi
	Příloha 3 – Skript pro výpočet tolerančního pole.....	xxix

## ÚVOD

Cílem práce je měření a úprava směrových charakteristik svítlen pro návěstidla, ve kterých je jako zdroj použita jedna LED dioda namísto stávajícího zdroje, tedy speciální žárovky 12V/20W.

Motivací pro vznik této práce je modernizace návěstidel v železniční dopravě. Tato návěstidla jsou postavena u železničních tratí, mají různé barvy a prostřednictvím svícení těchto svítlen se předává informace strojvedoucímu. Optickým systémem, který je sestavený z dvojice Fresnelových čoček, je světelný tok soustředěn do úhlu  $3^{\circ}$ - $5^{\circ}$ .

V současné době výrobce těchto svítlen (AŽD Praha s.r.o.) nahrazuje tyto speciální žárovky konstrukcí se sedmi LED diodami.

Firma ATE s.r.o. (zadávací firma) používá tyto svítlny pro přejezdíky. Jsou to návěstidla jejichž použití je omezeno pro nižší rychlosti na trati. Tyto tratě jsou často vedené v obloucích o malých poloměrech.

Zadávací firma vznesla požadavek nahradit žárovku pouze jednou LED diodou. Jak se ukazuje z provedených měření, z hlediska svítivosti to není problém. Potíž nastává právě v obloukových tratích, kde svítlna není viditelná ze všech definovaných míst. Z tohoto důvodu zde vzniká požadavek na rozšíření směrové charakteristiky světelného toku a to tak, že ve vodorovném směru by ze stávajících  $5^{\circ}$  měla být rozšířená přibližně na  $20^{\circ}$ .

Kvůli jednoduché kontrole funkčnosti je uveden požadavek na zachování konstrukce s pouze jednou LED diodou. Jako nejjednodušší řešení se pak nabízí vložení dodatečného optického členu a zachování optického systému s dvěma Fresnelovými čočkami.

# 1 Návěstidla

Pod pojmem návěstidlo si můžeme představit technický prostředek, který slouží v oboru dopravy k předávání pokynů a informací účastníkům provozu. V dnešní době jsou tato návěstidla nejčastěji realizovaná pomocí světelných signálů.

## 1.1 Návěstidla v železniční dopravě

Návěstidla v železniční dopravě se používají k předávání informace strojvedoucímu. Používají se mechanická a světelná návěstidla. Jednoduchá mechanická návěstidla se v železniční dopravě používají už od poloviny 19. století. Pro noční provoz byla vybavená osvětlením, které bylo zpočátku realizováno pomocí petrolejových lam a lamp na řepkový olej. V dnešní době jsou mechanická návěstidla vybavena elektrickým osvětlením nebo jsou nahrazována návěstidly světelnými.

U světelných návěstidel se nemění jejich tvar jako u mechanických. Informace se předává pomocí různé kombinace barev. Barevné rozlišení se u návěstidel realizuje dvěma způsoby:

- Svítidla má samostatný zdroj světla i optiku pro každé světlo (obvyklé v Evropě)
- Svítidla má společný zdroj světla i optiku, je vybavena pohyblivými barevnými filtry (obvyklé v Americe a Austrálii)

Základní technické požadavky na použití světelných návěstidel jsou popsány v technické normě železnic TNŽ 34 2610. V normě jsou soustředěna ustanovení týkající se světelných návěstidel z ostatních technických norem železnic. Jsou zde uvedeny základní požadavky pro svícení návěstních znaků, umístování návěstidel, označování návěstidel, zřizování a úpravu návěstidel a jejich dohlednost. Požadavky se liší pro různé použití a konstrukci návěstidel.

Světelná návěstidla lze rozřadit dvěma následujícími způsoby.

Třídění podle nosné konstrukce:

- a) Stožárová
- b) Trpasličí
- c) Krakorcová
- d) Speciální

Třídění podle provozního použití:

- a) Hlavní
- b) Předvěstí
- c) Opakovací předvěstí



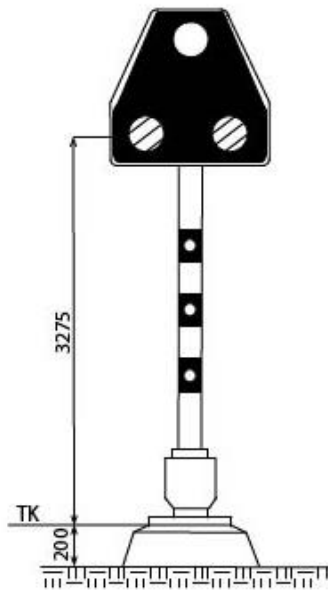
- d) Seřadovací návěstidla
- e) Opakovací seřadovací návěstidla
- f) Spádovištní návěstidla
- g) Opakovací spádovištní návěstidla
- h) Přejezdníky
- i) Indikátory
- j) Vložená návěstidla

## 1.2 Přejezdníky

Přejezdník je stožárové nepřenosné návěstidlo, které informuje strojvedoucího o stavu přejezdového zabezpečovacího zařízení (PZZ), což je zařízení (světelná výstraha /závora), které varuje účastníky silničního provozu o blížícím se železničním vozidle v místě křížení dvou rozdílných druhů dopravních cest.

Tento typ návěstidla je zobrazen na obrázku 1 - Nákres přejezdníku. Ve štítě lichoběžníkového tvaru jsou umístěna tři světla. Spodní světla jsou žlutá a signalizují, že je přejezd otevřen, strojvedoucí si musí počínat velmi opatrně a jet přes něj maximální rychlostí 10 km/h. Tato žlutá světla jsou v dnešní době často nahrazována bílými odrazovými skly umístěnými v černých polích na stožáru přejezdníku. Ve vrcholu štítu je umístěno světlo bílé, pokud svítí signalizuje to, že je přejezd uzavřen, železniční vozidlo může tedy projet maximální povolenou rychlostí.

[BC. JIŘÍ PAVLAS. Zabezpečovací technika v dopravě [online]. [cit. 14.4.2018]. Dostupný na WWW: <https://publi.cz/books/147/19.html>]



Obrázek 1 - Nákres přejezdníku

Umístění přejezdníku je na zábrzdě vzdálenosti před přejezdem a je před ním upozornění přejezdníku. Pokud je víc přejezdů v těsné blízkosti, jejich stav je sloučený v jeden přejezdník.

Maximální dohlednost přejezdníku je definovaná podle rovnice (1),

$$d = \frac{10 v}{6} \quad (1)$$

kde  $d$  je dohlednost uváděná v metrech a  $v$  je maximální povolená rychlost v km/h.

### 1.2.1 Konstrukce

Přejezdníky mají shodnou optiku a zdroj s návěstidlem AŽD70, což je návěstidlo používané pro několik možných sestav návěstí. Stávající konstrukce jsou tvořeny speciální žárovkou 12 V/20W. Optickým systémem je světelný tok soustředěn do úhlu 3° až 5°. Tento optický systém je tvořený dvojicí skleněných, lisovaných Fresnelových čoček.



Obrázek 2 - Fotografie svítilny pro přejezdník

### 1.2.2 Modernizace

Výrobce návěstidel typu AŽD70 v současné době nahrazuje zdroj ve svítelnách (speciální žárovky) konstrukcí ze sedmi LED diodami. Firma ATE s.r.o. používá tyto návěstidla pro přejezdníky na tratích kde je povolena nižší rychlost a často jsou vedené v obloucích. Vzhledem k nižší povolené rychlosti se snižuje i zábrzdňá dráha a nutná dohlednost přejezdníku. Z ekonomických důvodů je tedy výhodné nahradit stávající zdroj pouze jednou LED diodou. Ukazuje se, že z hlediska svítivosti to není problém, ale nastává zde komplikace právě v obloukových tratích, kde přejezdník není viditelný ze všech definovaných míst, kvůli úzké směrové charakteristice.

Vzniká zde tedy otázka, zda je možné použít pouze jednu LED diodu, zachovat konstrukci optické sestavy dvou Fresnelových čoček a pomocí vložení dodatečného členu do sestavy rozšířit směrovou charakteristiku svítilny.

## 2 Měření svítivosti

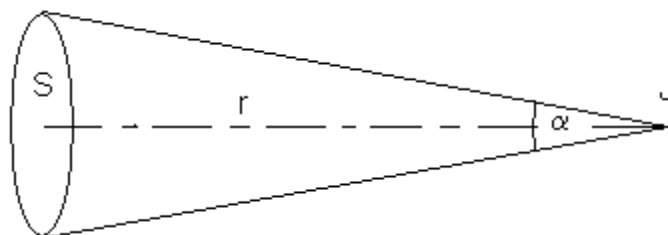
Svítivost v daném směru je definovaná jako podíl světelného toku, vyzářeného bodovým zdrojem do tohoto směru a velikosti elementárního prostorového úhlu, podle rovnice (2).

$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} [cd] \quad (2)$$

Pro porovnání svítilek a hodnocení viditelnosti je rozhodující parametr právě svítivost. V dnešní době neexistuje přístroj na přímé měření svítivosti, využívá se nepřímé měření pomocí jasoměru nebo luxmetru popsané v následujících kapitolách.

### 2.1 Pomocí jasů

Svítivost je možné vypočítat s využitím fotometrické veličiny – jasů. Jasoměrem J je možné změřit jas určité vymezené plochy. Velikost měřené plochy se vymezuje pomocí kruhové polní clony, umístěné v ohniskové rovině jasoměru. Vzdálenost mezi jasoměrem a měřenou plochou je označena jako  $r$  a pozorovací úhel jasoměru je označen jako  $\alpha$ . Nákres takové měřicí sestavy je znázorněn na obrázku 3 - Schéma měření pomocí jasoměru.



Obrázek 3 - Schéma měření pomocí jasoměru

Svítivost této plochy lze vypočítat pomocí rovnice (3).

$$I = L S [cd] \quad (3)$$

Za předpokladu že zdroj zaměřený v zorném poli jasoměru se celý nachází v měřeném poli, a přitom toto pole zcela nevyplňuje, platí rovnice (3), kterou můžeme upravit a získat tak svítivost definovanou podle rovnice (4)

$$I = L \pi r^2 \operatorname{tg}^2\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4)$$

## 2.2 Pomocí osvětlení

Za předpokladu bodového zdroje, je možné svítivost měřit pomocí luxmetru, který je umístěn ve vzdálenosti  $r$  od zdroje. Osvětlení  $E$  čidla luxmetru, které je umístěno kolmo ke směru dopadajícího svazku paprsků lze určit podle rovnice (5):

$$E = \frac{I}{r^2} [lx] \quad (5)$$

Z toho je svítivost pak

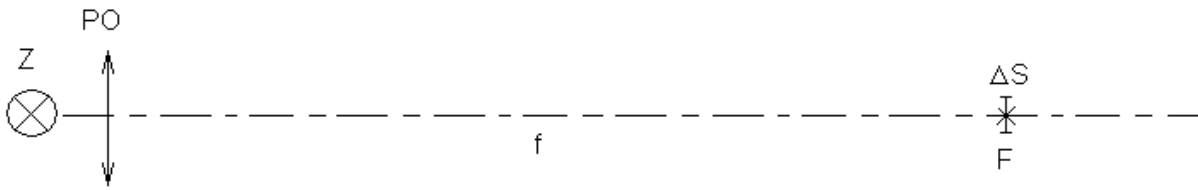
$$I = E r^2 [cd] \quad (6)$$

Musí také platit, že rozměr čidla luxmetru je mnohem menší, než vzdálenost mezi zdrojem a luxmetrem.

Měření rozlehlého zdroje, tedy takového, který nelze považovat za bodový je poněkud komplikovanější. Je možné takový zdroj rozdělit na jednotlivé elementární zářiče a svítivost definovat jako součet svítivostí těchto elementárních zářičů. Tohle měření lze realizovat luxmetrem ve vzdálenosti 10x větší, než je rozměr zdroje.

## 2.3 S pomocným objektivem

Výhodou měření svítivosti s využitím luxmetru a pomocného objektivu je, že je možné realizovat měření rozlehlého zdroje v optické laboratoři. Měřicí sestava je schématicky načrtnutá na obrázku 4 - Schéma měření s pomocným objektivem. Měřený světelný zdroj  $Z$  je umístěn před pomocným objektivem  $PO$  a čidlo luxmetru s plochou  $\Delta S$  je umístěno v ohnisku pomocného objektivu  $F$ .



Obrázek 4 - Schéma měření s pomocným objektivem

Díky tomuto uspořádání je zajištěno, že všechny paprsky vycházející ze zdroje Z rovnoběžně s optickou osou se sbíhají v ohnisku F. Plocha  $\Delta S$  čidla luxmetru pak kolem každého paprsku vycházejícího se zdroje rovnoběžně s optickou osou vymezuje prostorový úhel  $\Delta\Omega$ . Paprsky z tohoto prostorového úhlu pak také dopadají na citlivou plochu čidla luxmetru. Platí rovnice (7):

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta S}{f^2} \quad (7)$$

kde  $f$  je ohnisková vzdálenost pomocného objektivu.

Osvětlení je definováno podle rovnice (8), jako podíl světelného toku a plochy na kterou tento světelný tok dopadá.

$$E = \frac{\Delta\phi}{\Delta S} [lx] \quad (8)$$

Když z rovnice (8) dosadíme za  $\Delta S$  do rovnice (7) a tuto hodnotu pro  $\Delta\Omega$  dosadíme do rovnice (2), dostaneme rovnici (9), pro výpočet svítivosti.

$$I = E f^2 [cd] \quad (9)$$

Podmínkou pro toto měření je, že pomocným objektivem musí procházet všechny paprsky, které vycházejí ze zdroje Z rovnoběžně s optickou osou, a i ty paprsky, které se rozbíhají tak, že vyplňují prostorový úhel  $\Delta\Omega$ . Z toho je tedy zřejmé, že zdroj musí být aperturní clonou pro pomocný objektiv.

### 3 Měření směrové charakteristiky

#### 3.1 Definice směrové charakteristiky

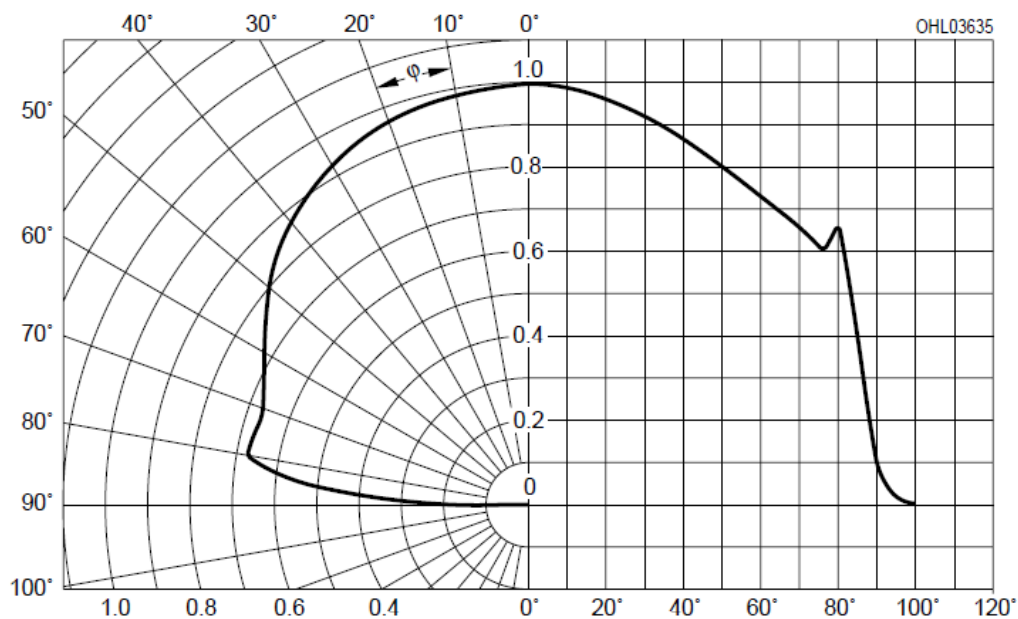
Směrovou charakteristikou rozumíme závislost intenzity, osvětlení nebo světelného toku na úhlu odklonu od optické osy měřeného zdroje. Tato závislost je často vyjádřena pomocí relativní veličiny. Pro ilustraci je přiložen obrázek 5 - Směrová charakteristika LED diody, na kterém je zobrazen graf průběhu směrové charakteristiky LED diody typu LUW W5AM od výrobce Osram, která je umístěna ve svítelně.

V této práci je použit způsob zakreslení směrové charakteristiky, který je patrný z obrázku 6 - Směrová charakteristika svítilny. Používáme absolutní hodnoty naměřeného osvětlení, svítivost lze

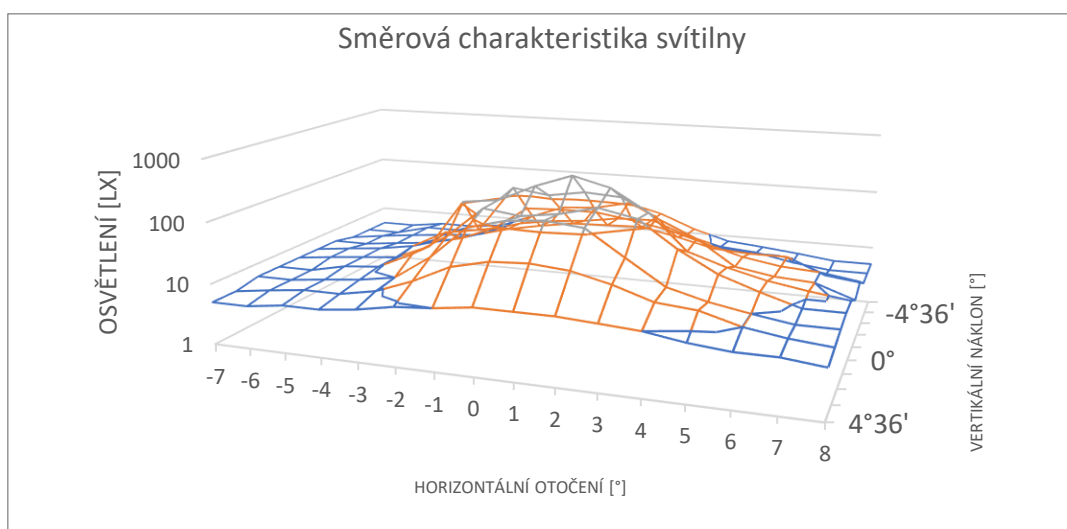
pak získat s využitím rovnice (9), do které je zavedena korekce na propustnost objektivu. Po dosažení konkrétních hodnot použitého pomocného objektivu, tedy propustnosti cca 82 % a velikosti ohniskové vzdálenosti 2,86 m platí rovnice (10). Pro lepší názornost jsou hodnoty v grafu vykresleny pomocí logaritmického měřítka. U jednotlivých výsledků měření jsou uvedeny také řezy touto směrovou charakteristikou.

$$I = 6,71 E \text{ [cd]} \quad (10)$$

[AUTOR NEUVEDEN. Datasheet LUW W5SM: OSRAM Opto Semiconductors, 2008]



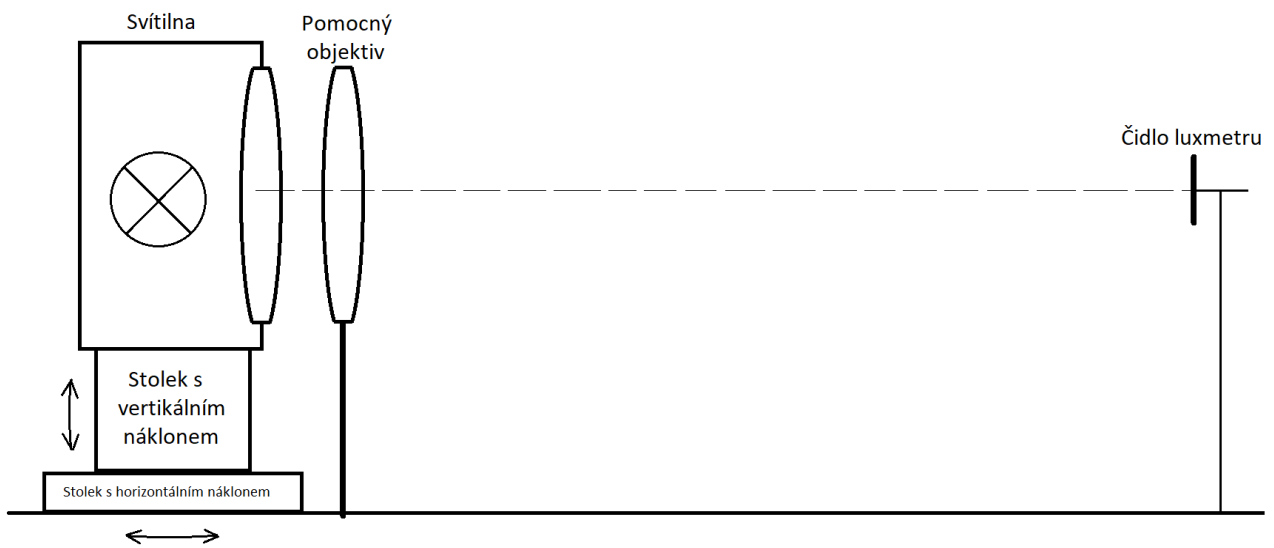
Obrázek 5 - Směrová charakteristika LED diody



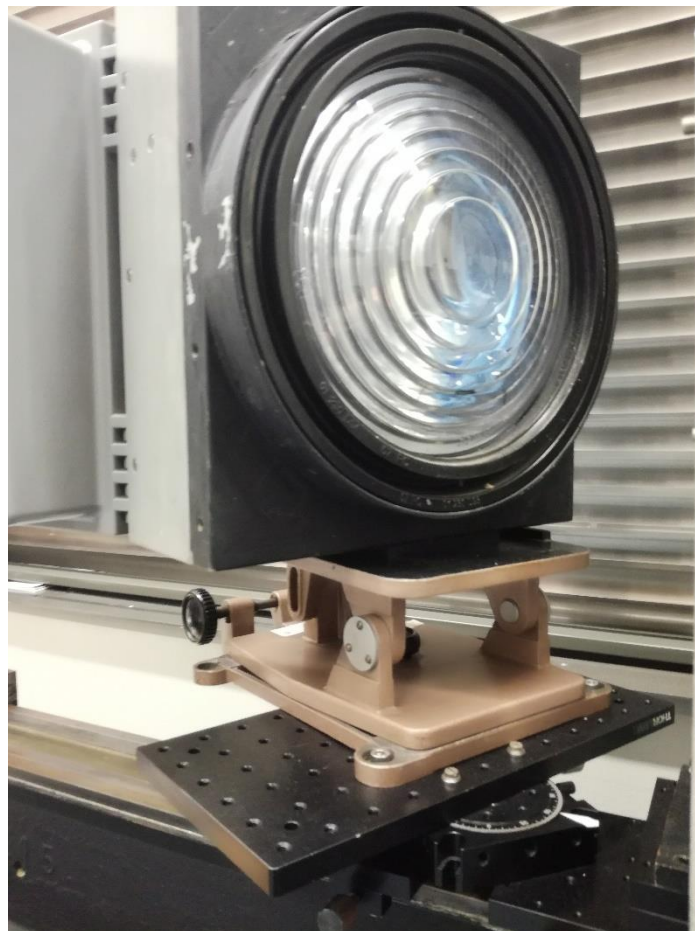
Obrázek 6 - Směrová charakteristika svítidel

### 3.2 Popis měřící sestavy

Uspořádání na optické lavici je znázorněno na Obrázku 7 - Nákres měřící sestavy.



Obrázek 7 - Nákres měřící sestavy

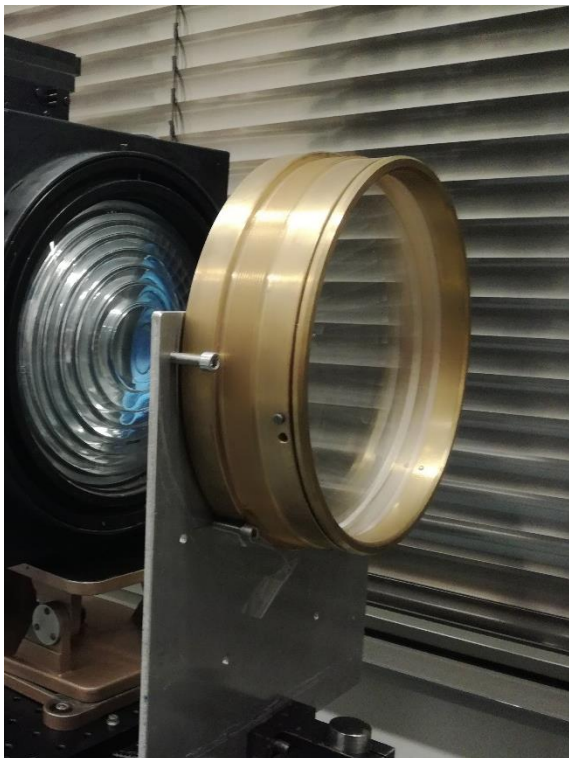


Obrázek 8 - Svítilna se stolky

Je zde umístěna svítilna, která se nachází na otočných stolcích viz. Obrázek 8 - Svítilna se stolky. První stůlek, na kterém je svítilna upevněna má možnost vertikálního náklonu v rozmezí přibližně deseti úhlových stupňů ( $\pm 5^\circ$  nahoru a dolů). Tento stůlek nemá vlastní stupnici, bylo potřeba ho tedy před měřením nacejchovat pomocí sklonoměru. Jako krok se při cejchování volilo jedno otočení manipulačním šroubem stolku, což odpovídá  $1^\circ 9'$ . Druhý stůlek je otočný v horizontální směru. Rozsah horizontálního otáčení je přibližně  $90^\circ$  (30 stupňů doprava a 60 doleva) a to z důvodů umístění mechaniky před pomocný objektiv.

Za svítilnou je umístěný pomocný objektiv o průměru 200 mm a s ohniskovou vzdáleností 2860 mm – obrázek 9 - Pomocný objektiv. V ohnisku tohoto objektivu je umístěn digitální luxmetr – obrázek 10 - Luxmetr Unitest. Umístění luxmetru do ohniska objektivu bylo provedeno s využitím autokolimační metody, pomocí zobrazení pomocné žárovky. S ohledem na vnímání délek lidským okem lze říct, že přesnost umístění se pohybuje do 5 mm. Před měřením jsme zakryli optickou lavici černou látkou, aby nedocházelo k nežádoucímu odrazu.

Experimentálně bylo zjištěno, že ohnisková vzdálenost optické soustavy ve svítelně je přibližně 78 mm.



Obrázek 9 - Pomocný objektiv



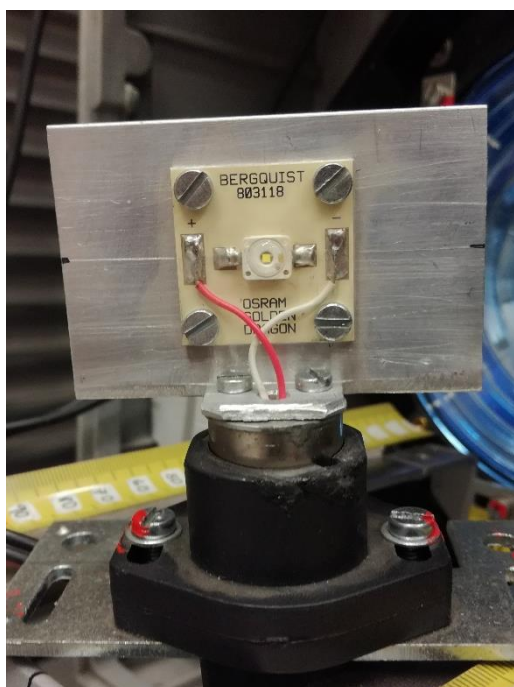
Obrázek 10 - Luxmetr Unitest



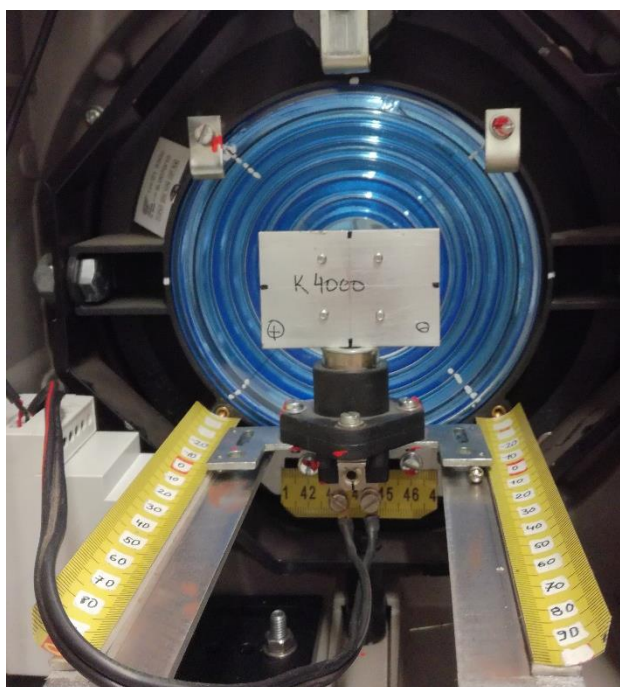
### 3.3 Popis měření

Ve svítelně je možnost náklonu optické soustavy – dvojice Fresnelových čoček, ty byly nakloněny tak aby byl zisk na luxmetru maximální.

Bylo provedeno několik měření. Ve svítelně je možnost podélného pohybu zdroje. V prvním měření byl zdroj nastaven tak, aby jeho stopa, zobrazená optickou soustavou byla nejmenší - tj. do nulové polohy, poté byl zdroj posunut o +5 mm – blíže ke svítelně a -5 mm – dále od svítilny. Zdroj a možnost jeho pohybu lze vidět na obrázcích – 11 - Uvnitř svítilny a 12 - LED dioda.



Obrázek 12 - LED dioda



Obrázek 11 - Uvnitř svítilny

Pro další měření byla vyrobena čtvercová clona, která se skládala z 25 dílčích čtvercových subapertur o velikosti 30x30mm. Návrh této clony a způsob značení jednotlivých otvorů lze vidět na obrázku 13- Clona. Proměřili jsme úhlovou charakteristiku jednotlivých subapertur při umístění zdroje v nulové poloze a při posunu o  $\pm 5$  mm.

V dalším měření jsme určili směrovou charakteristiku samotného zdroje

1A	1B	1C	1D	1E
2A	2B	2C	2D	2E
3A	3B	3C	3D	3E
4A	4B	4C	4D	4E
5A	5B	5C	5D	5E

Obrázek 13 - Clona

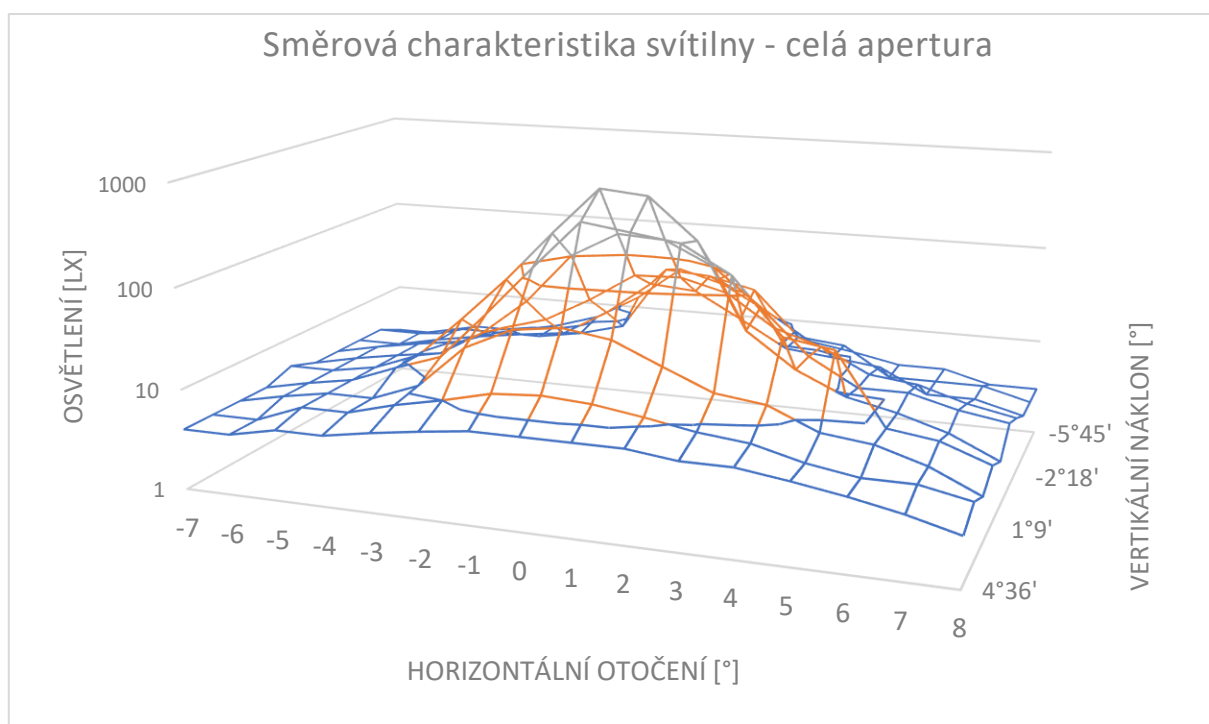
## 4 Výsledky měření

Výsledky měření byly zapisovány do Excelu, tabulky a grafy z těchto souborů jsou přiložené v přílohách. Vybrané grafy, které znázorňují směrovou charakteristiku byly vytvořeny také v Excelu a jsou vloženy v následujících kapitolách. Všechny grafy jsou znázorněny v logaritmickém měřítku.

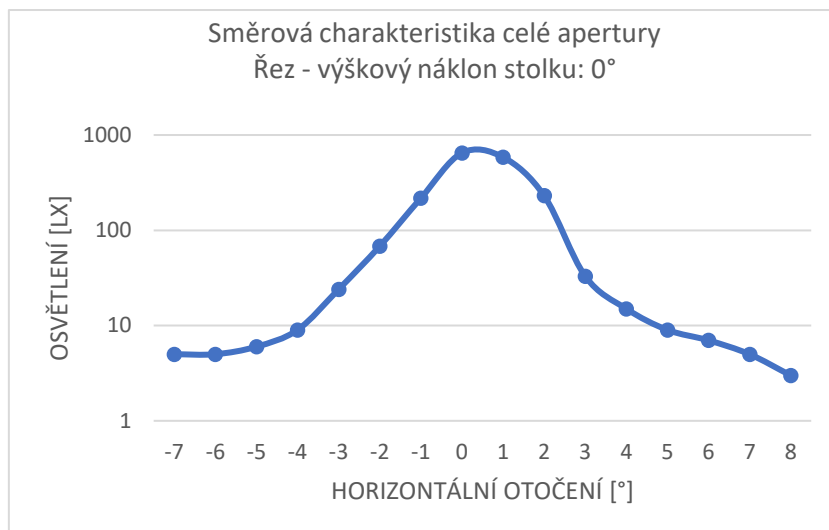
### 4.1 Měření s celou aperturou

#### 4.1.1 Měření se zdrojem v nulové poloze

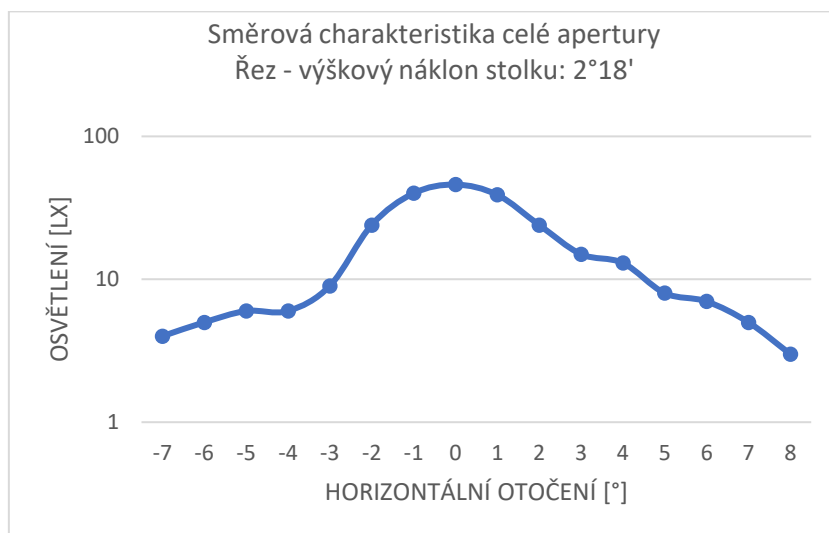
Lze předpokládat, že směrová charakteristika v této poloze je nejužší a signál dosahuje nejvyšších hodnot. Šířka směrové charakteristiky se pohybuje okolo  $\pm 3^\circ$  při poklesu na 5 %. Lze také říct, že pokles je rovnoměrný a neobjevují se zde žádné anomálie.



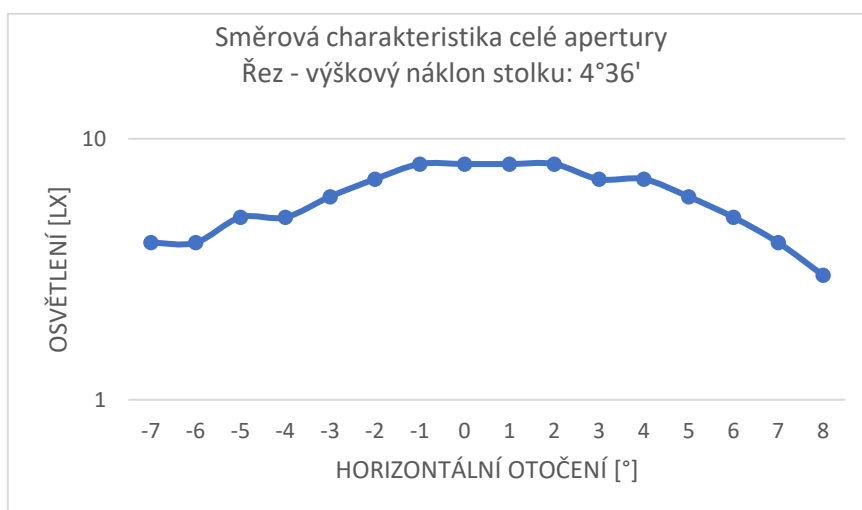
Graf 1 - Celá apertura, zdroj v nulové poloze



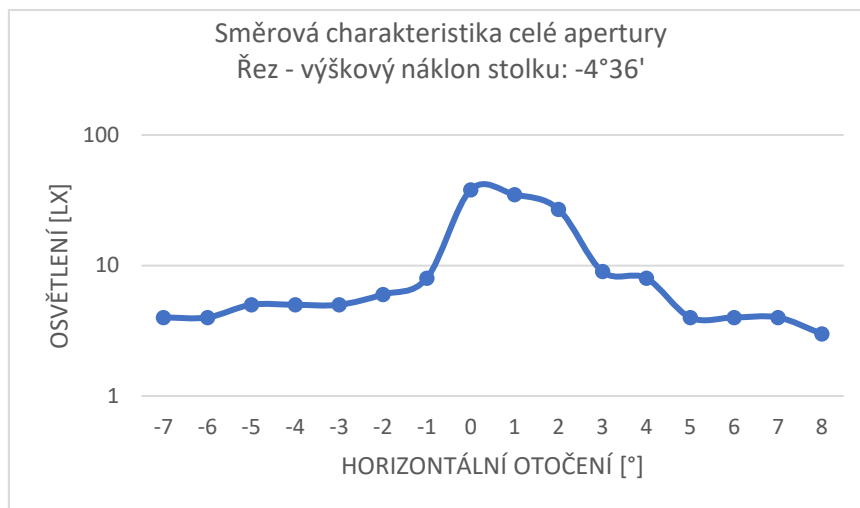
Graf 2 - Celá apertura, řez 0°, zdroj v nulové poloze



Graf 3- Celá apertura, řez 2°18', zdroj v nulové poloze



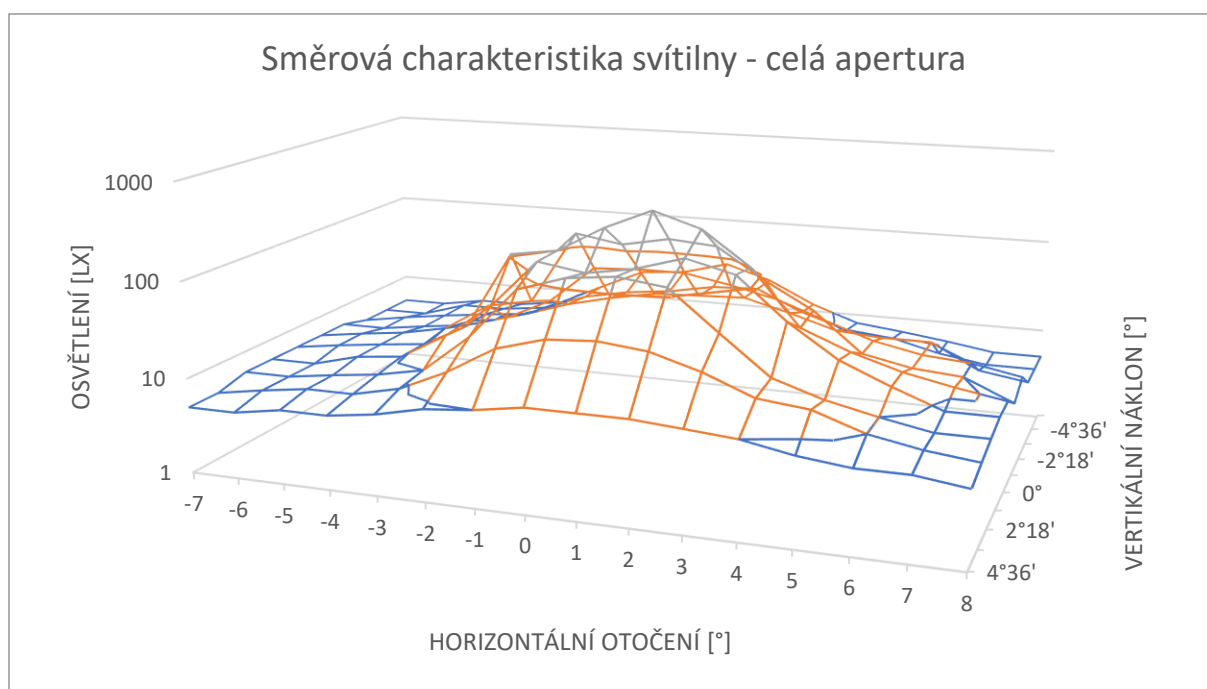
Graf 4 - Celá apertura, řez 4°36', zdroj v nulové poloze



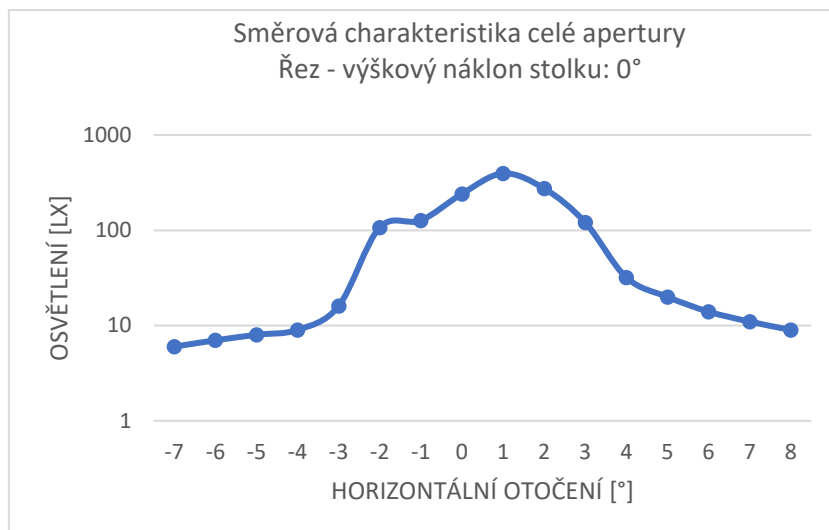
Graf 5 - Celá apertura, řez -4°36', zdroj v nulové poloze

#### 4.1.2 Měření se zdrojem v poloze +5 mm

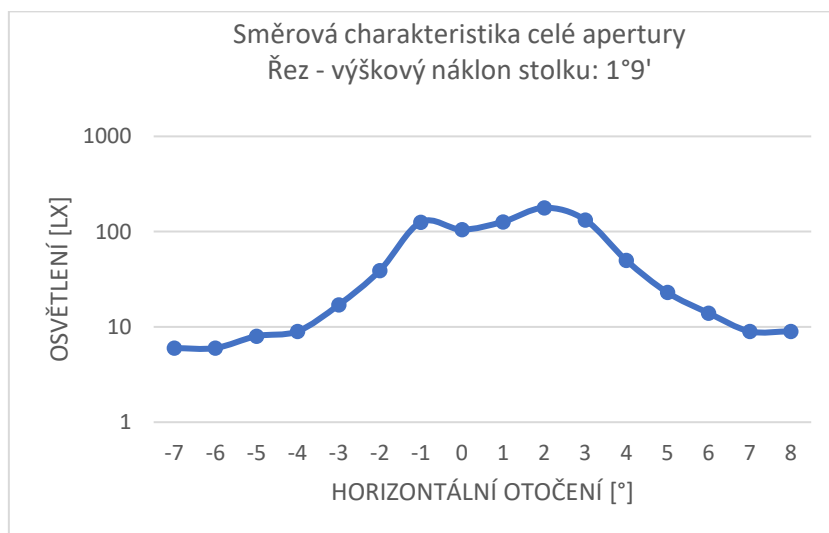
V rozostřené poloze je stopa svítivny viditelně větší, což dokazuje i měření. Širší směrová charakteristika je však doprovázena menší svítivostí, maximální hodnoty v tomto měření jsou pouze poloviční než při umístění zdroje v ohnisku. Šířka směrové charakteristiky se pohybuje okolo  $\pm 5^\circ$  při poklesu na 5 %. Pokles směrové charakteristiky se dá považovat za rovnoměrný.



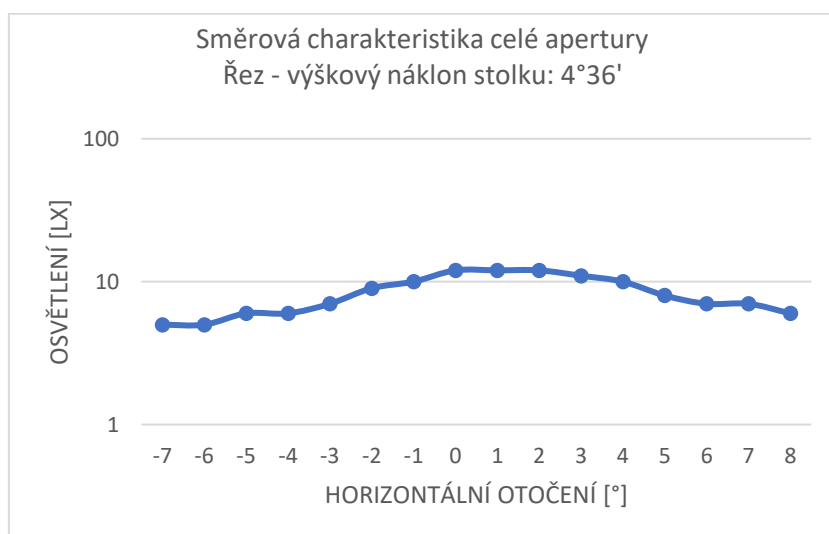
Graf 6 - Celá apertura, zdroj v +5 mm



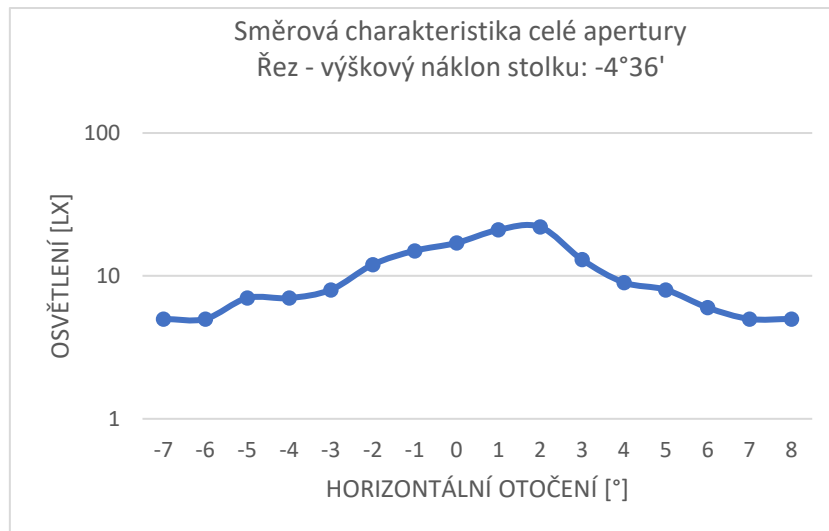
Graf 7 - Celá apertura, řez 0°, zdroj v +5 mm



Graf 8 - Celá apertura, řez 1°9', zdroj v +5 mm



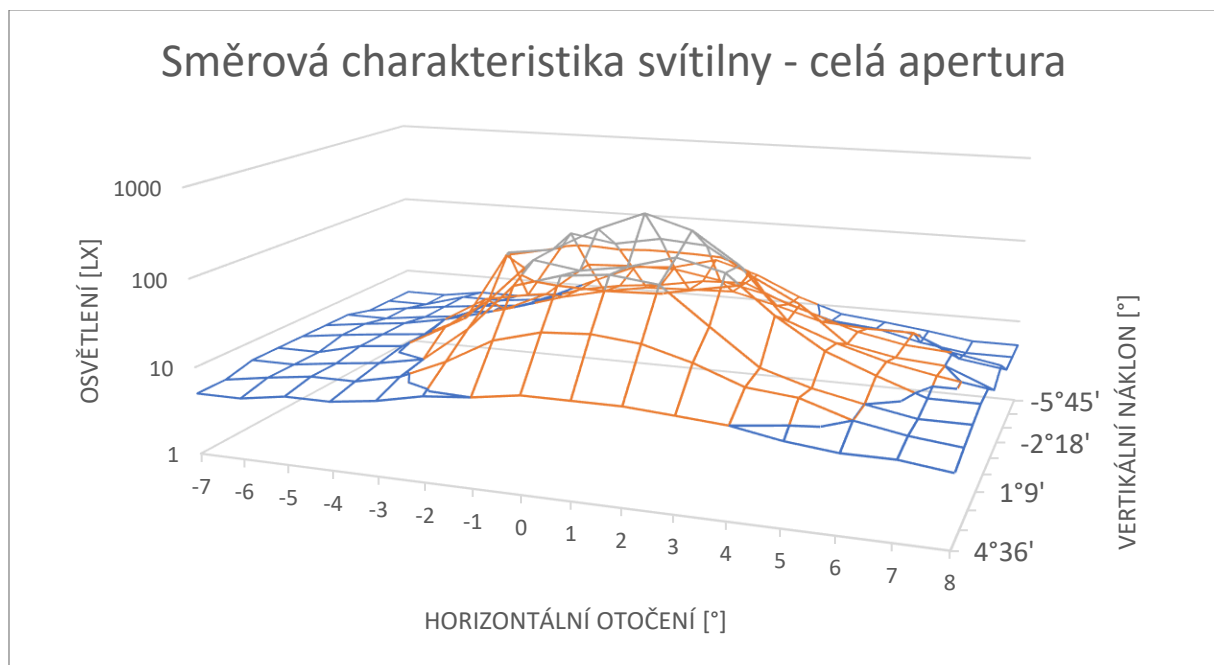
Graf 9 - Celá apertura, řez 4°36', zdroj v +5 mm



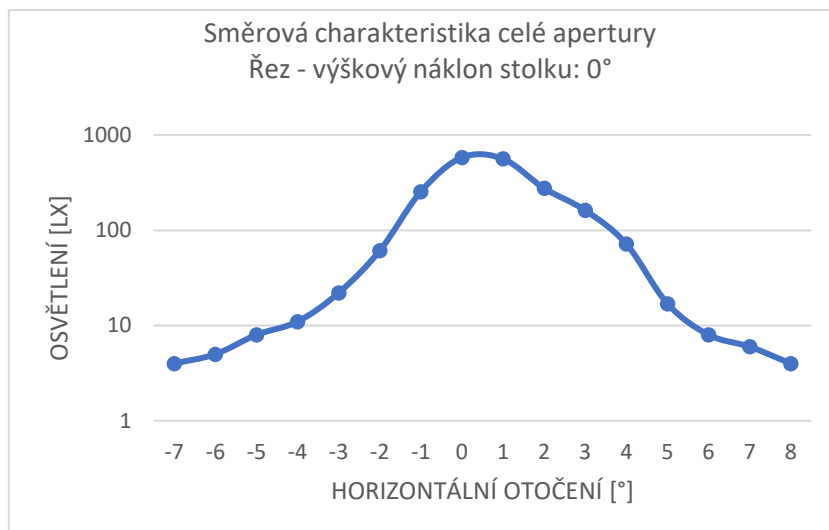
Graf 10 - Celá apertura, řez  $-4^{\circ}36'$ , zdroj v +5 mm

#### 4.1.3 Měření se zdrojem v poloze -5 mm

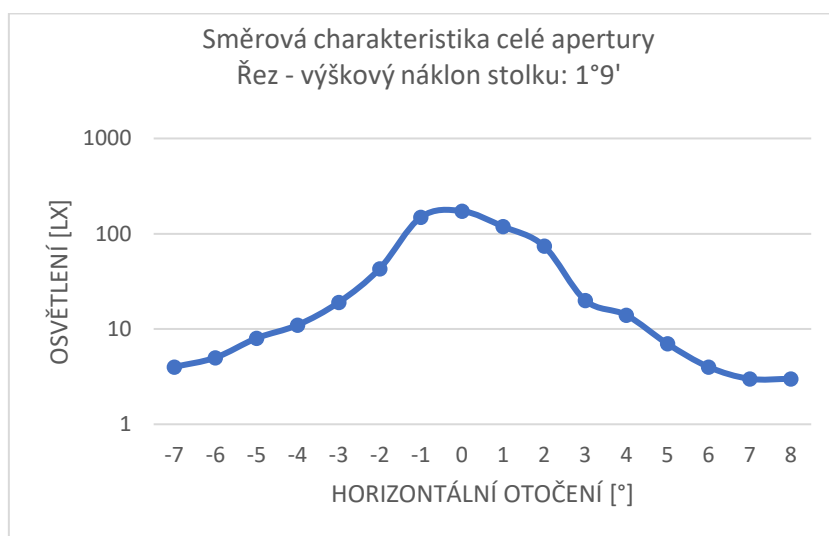
Rozostření do polohy -5mm se ukazuje být nevýhodné. Směrová charakteristika není viditelně širší než v nulové poloze, její šířka při poklesu na 5 % je pouze  $\pm 4^{\circ}$ . Maximální hodnoty jsou znatelně nižší. V jednotlivých řezech, zejména při vertikálním náklonu  $4^{\circ}36'$ , lze vidět nerovnoměrnosti v poklesu směrové charakteristiky, což může být způsobeno vadami optické soustavy.



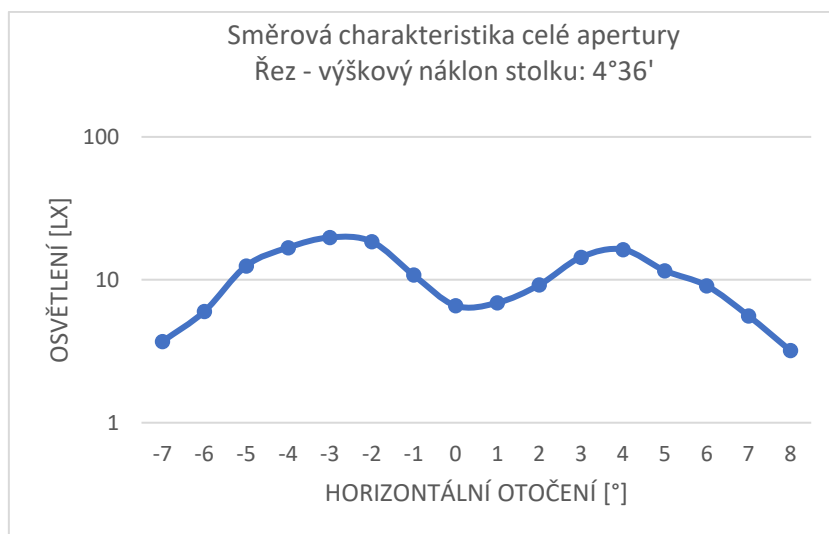
Graf 11 - Celá apertura, zdroj v -5 mm



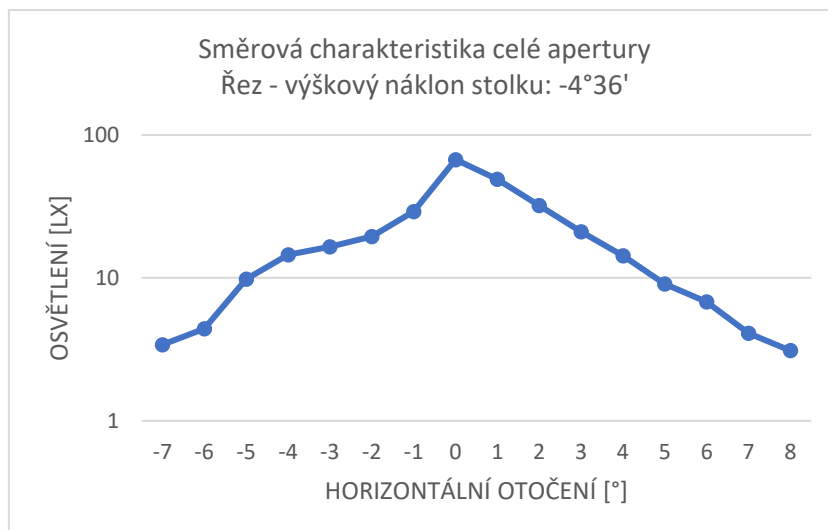
Graf 12 - Celá apertura, řez 0°, zdroj v -5 mm



Graf 13 - Celá apertura, řez 1°9', zdroj v -5 mm



Graf 14 - Celá apertura, řez 4°36', zdroj v -5 mm



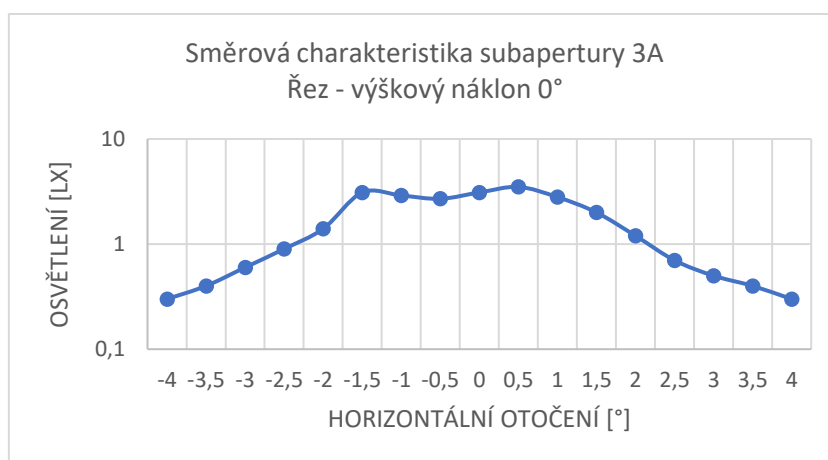
Graf 15 - Celá apertura, řez  $-4^{\circ}36'$ , zdroj v  $-5\text{ mm}$

## 4.2 Měření dílčích subapertur

U měření dílčích apertur byl výškový náklon stolku nastaven stále na  $0^{\circ}$ , pro lepší srovnání výsledků. V samotné práci jsou uvedeny pouze výsledky z otvorů označených 3A – 3E. Další výsledky měření lze dohledat v Příloze 2 – výsledky měření vybraných apertur.

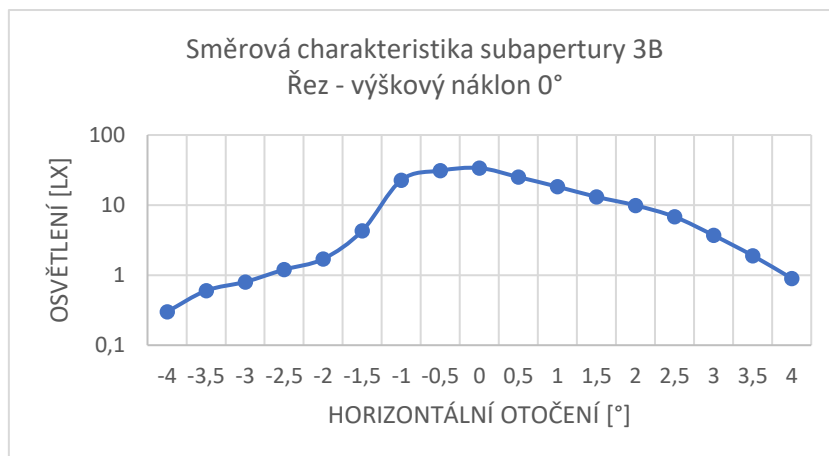
### 4.2.1 Měření se zdrojem v nulové poloze

Šířka světelného kužele pro jednotlivé otvory při umístění zdroje v nulové poloze se pohybuje okolo  $\pm 2^{\circ}$  při poklesu na 5%. Nerovnoměrnosti v jednotlivých měřeních, zejména u okrajových otvorů 3A a 3D, jsou pravděpodobně způsobeny optickými vadami Fresnelových čoček. V prostředním otvoru 3C je svítivost největší a pokles směrové charakteristiky rovnoměrný.

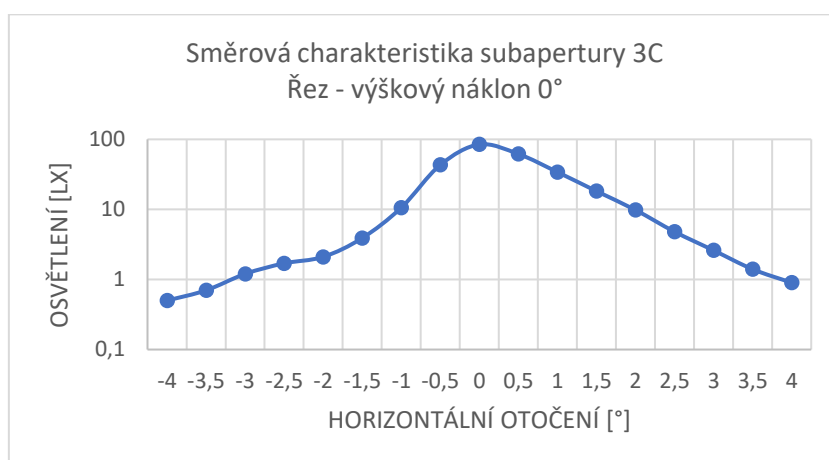


Graf 16 - Subapertura 3A, zdroj v nulové poloze

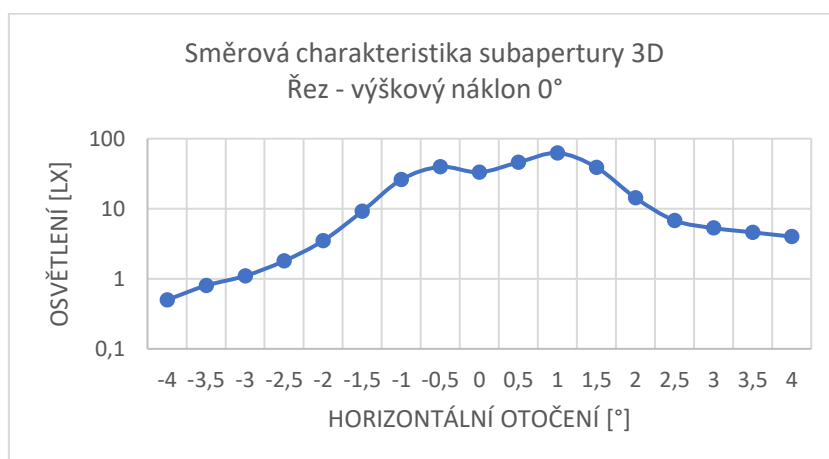




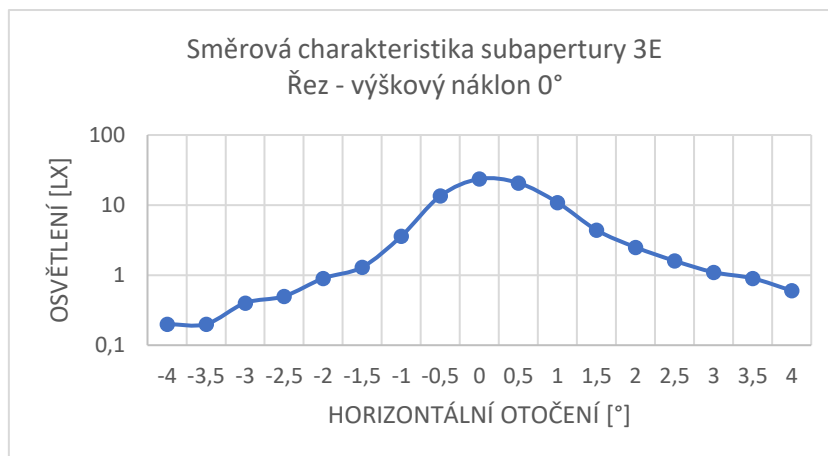
Graf 17 - Subapertura 3B, zdroj v nulové poloze



Graf 18 - Subapertura 3C, zdroj v nulové poloze



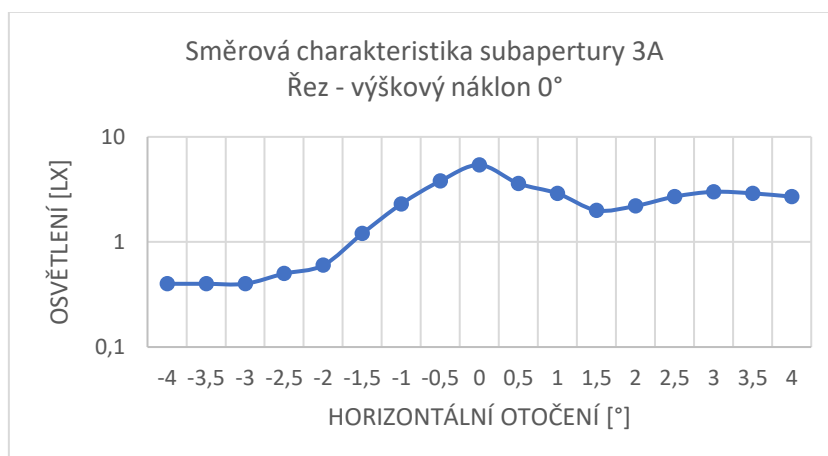
Graf 19 - Subapertura 3D, zdroj v nulové poloze



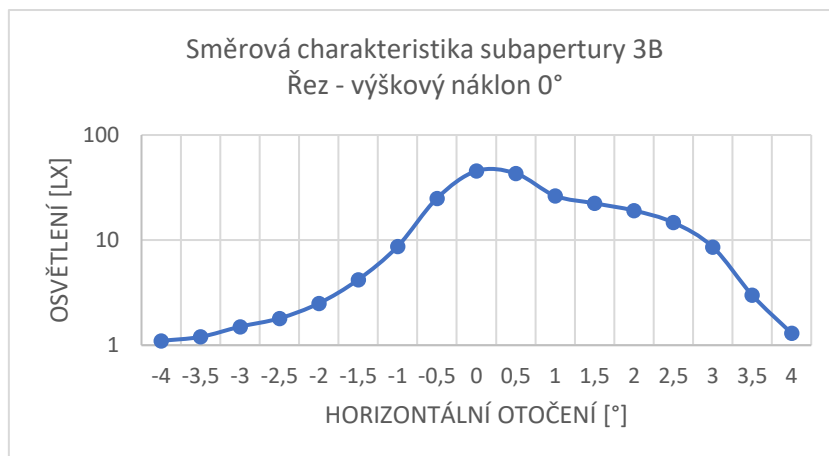
Graf 20 - Subapertura 3E, zdroj v nulové poloze

#### 4.2.2 Měření se zdrojem v poloze +5 mm

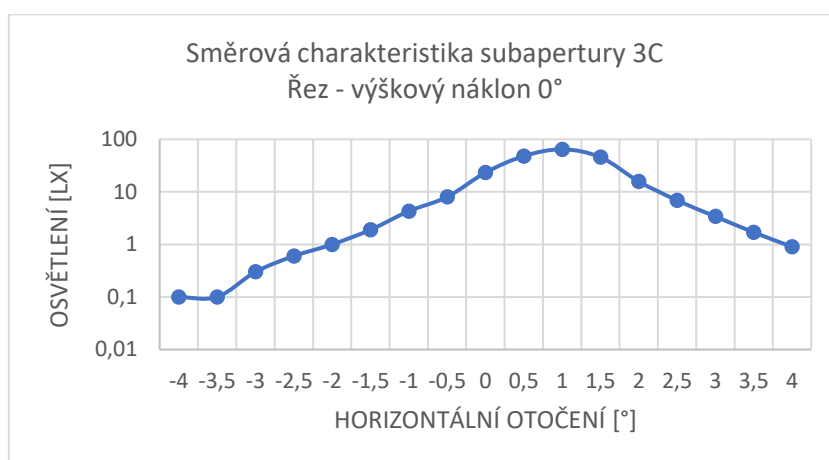
V poloze +5mm (blíže k optické soustavě) je směrová charakteristika jednotlivých otvorů rovnoměrnější než v nulové poloze. Jednotlivé otvory mají nepatrně širší světelné kužely ovšem za cenu menší svítivosti v maximu. Ze získaných dat lze usoudit, že právě tato poloha zdroje může být nejvýhodnější.



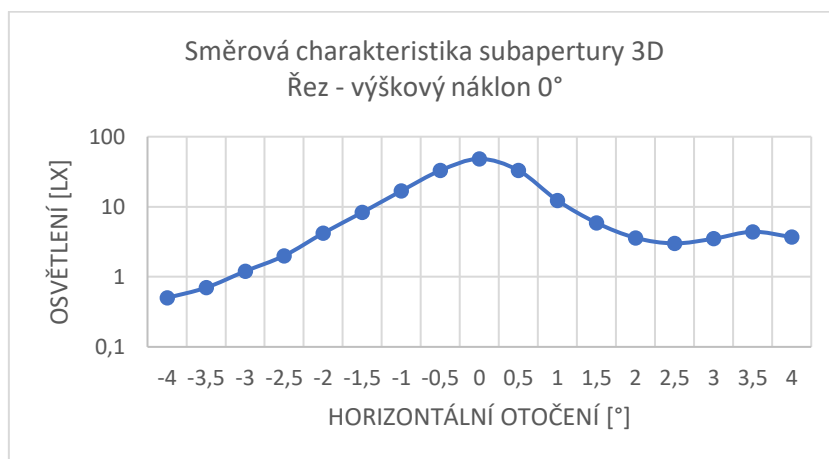
Graf 21 - Subapertura 3A, zdroj v +5 mm



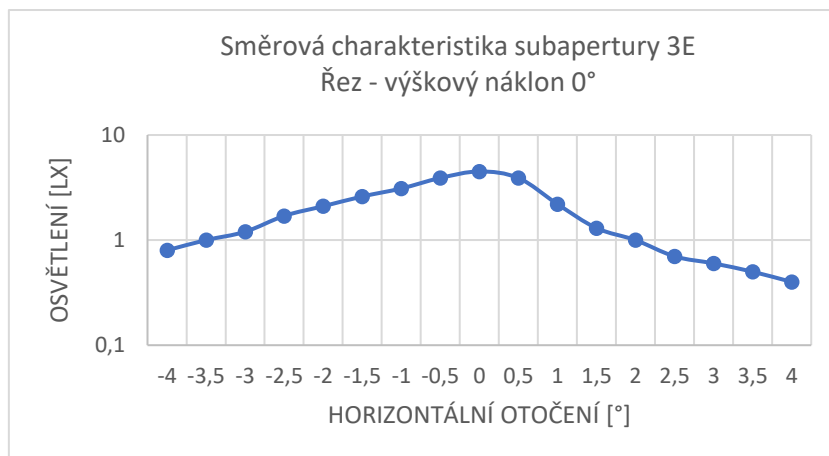
Graf 22 - Subapertura 3B, zdroj v +5 mm



Graf 23 - Subapertura 3C, zdroj v +5 mm



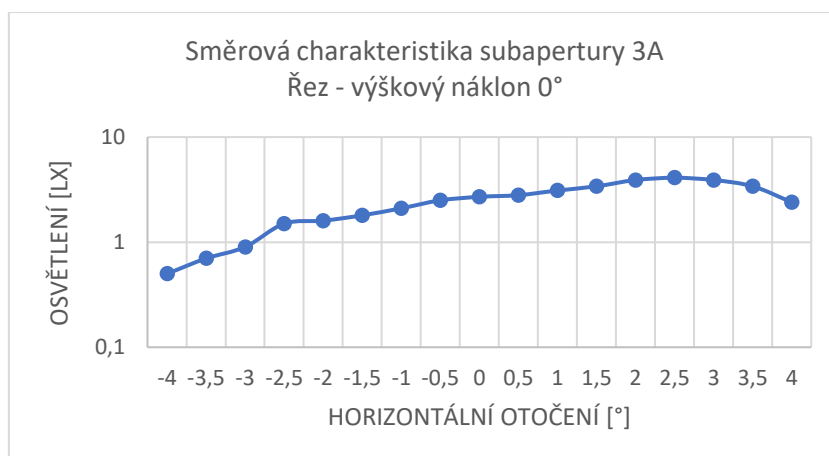
Graf 24 - Subapertura 3D, zdroj v +5 mm



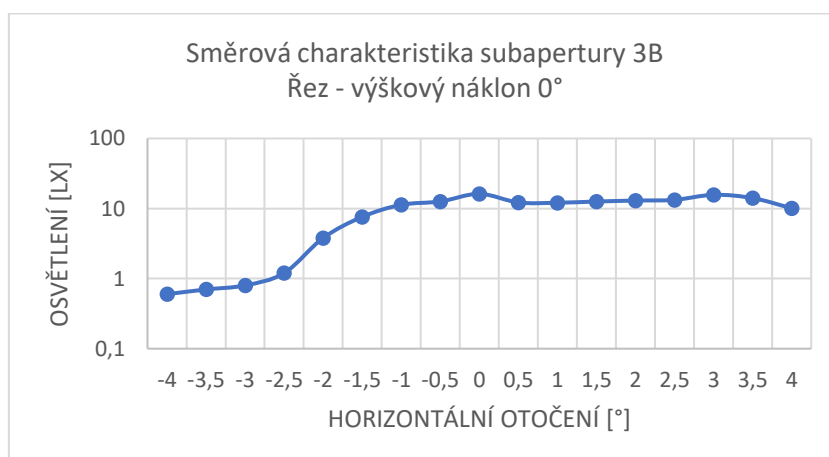
Graf 25 - Subapertura 3E, zdroj v +5 mm

#### 4.2.3 Měření se zdroje v poloze -5 mm

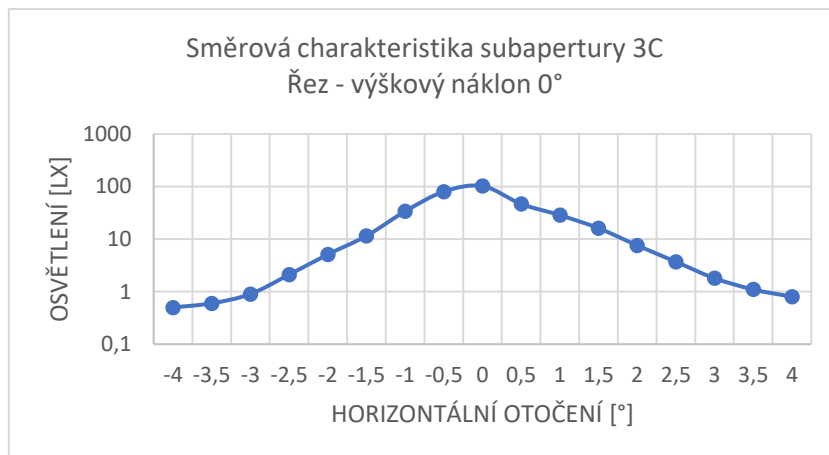
V poloze -5mm (dále od svítliny) jsou směrové charakteristiky jednotlivých otvorů významně nerovnoměrné, zejména v krajních otvorech. S ohledem na předchozí měření, se tato poloha umístění zdroje nejví jako výhodná.



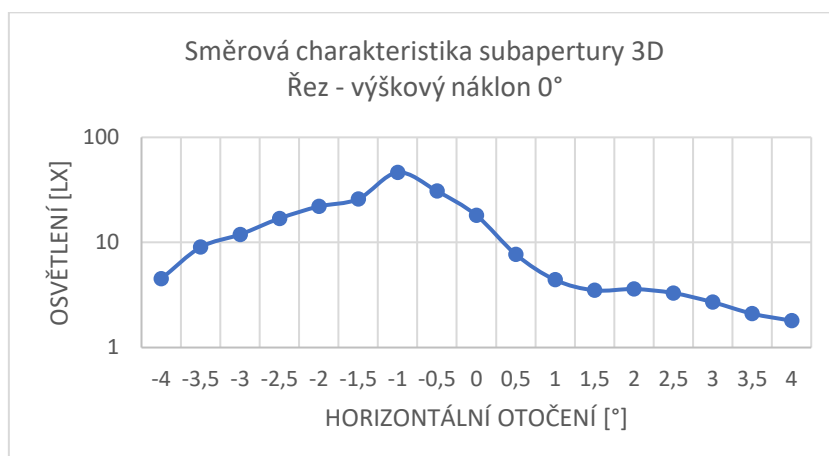
Graf 26 - Subapertura 3A, zdroj v -5 mm



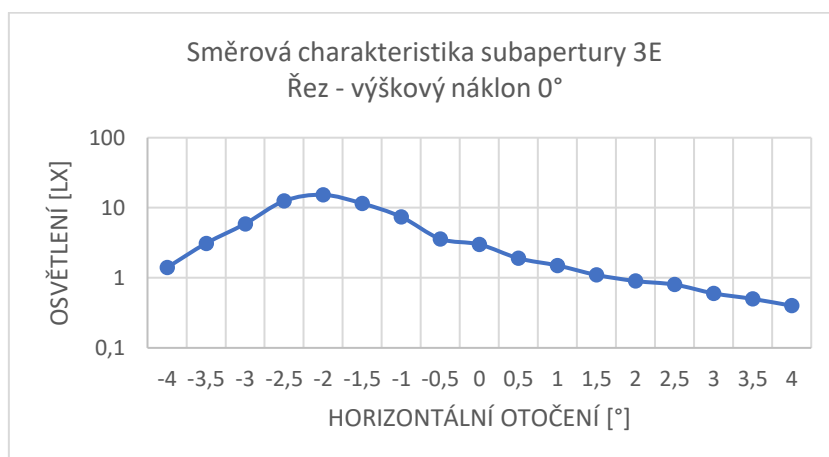
Graf 27 - Subapertura 3B, zdroj v -5 mm



Graf 28 - Subapertura 3C, zdroj v -5 mm



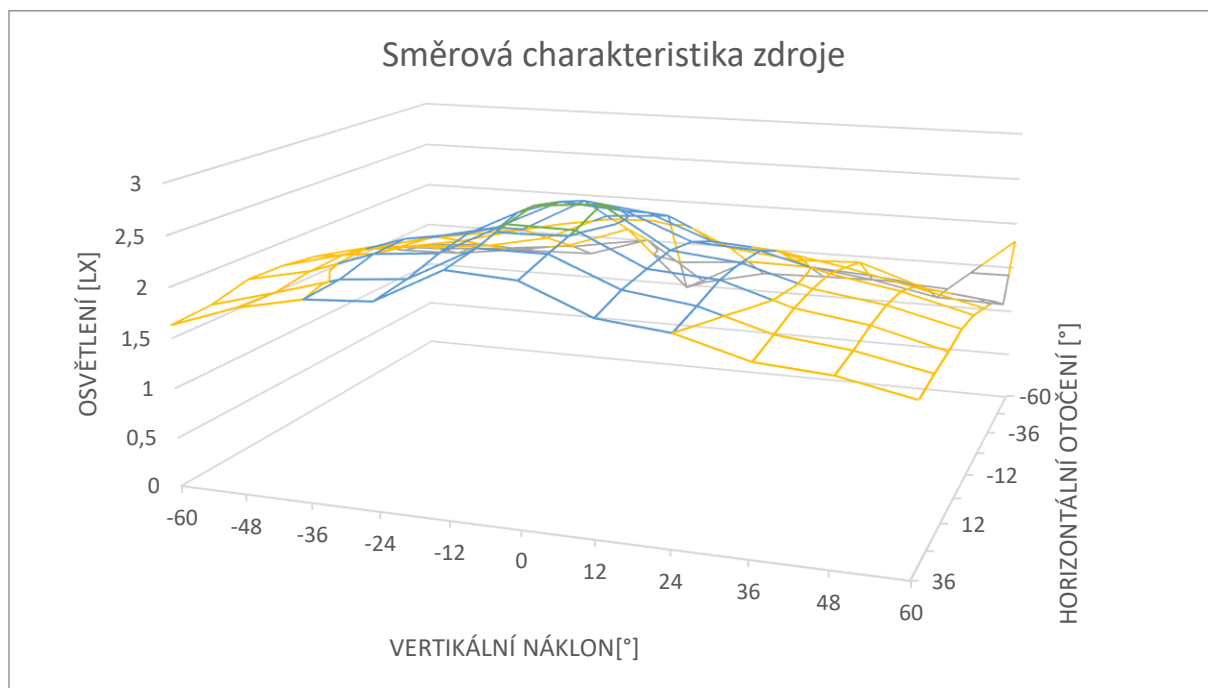
Graf 29 - Subapertura 3D, zdroj v -5 mm



Graf 30 - Subapertura 3E, zdroj v -5 mm

### 4.3 Měření samotného zdroje – LED diody

Jak lze předpokládat, směrová charakteristika LED diody je poměrně široká. Mechanické umístění horizontálně otáčejícího se stolku nám nedovoluje proměřit celou šířku světelného kužele a pokles osvětlení na nulu. Dá se ale předpokládat, že směrová charakteristika je poměrně věrně zobrazena v datasheetu LED diody.



Graf 31 - Směrová charakteristika svítilny

## 5 Toleranční pole

Pro to, abychom mohli upravovat směrovou charakteristiku svítilny musíme vytvořit toleranční pole, které definuje minimální a maximální šířku světelného kužele. Tato pole definujeme jako závislost svítivosti ( $I$ ) a úhlu odklonu směru šíření světla od optické osy ( $\varphi$ ). Při vytváření tolerančních polí předpokládáme, že osa svítilny je nastavená tak, že směřuje do nejzazšího bodu, ze kterého je nutné svítilnu zahlédnout. Ve všech případech také předpokládáme, že maximální požadovaná dohlednost svítilny je 250 m.

### 5.1 Horní hranice tolerančního pole

Horní hranice tolerančního pole je definovaná podle technické normy železnic jednoduše. Aby nedocházelo k oslnění strojvedoucího ve tmě, nesmí tato hranice přesáhnout hodnoty svítivosti 2000 cd. V následujících grafech, které znázorňují toleranční pole není tato hodnota uváděna z důvodu nepřehlednosti.

## 5.2 Spodní hranice tolerančního pole

Při určování spodní hranice tolerančního pole vycházíme z technické normy železnic, kde je uveden vzorec pro minimální (prahové) hodnoty svítivosti – rovnice (11).

$$I = E_0 d^2 T^{-d} 10^6 [cd] \quad (11)$$

kde  $E_0$  je prahové osvětlení oka (liší se pro různé barvy světla a pro den / noc –doporučená hodnota je 2mlx pro všechny barvy),  $d$  je požadovaná dohlednost v km a  $T$  je činitel propustnosti atmosférou ( $T=0,035$ ).

Vypočítané hodnoty se liší pro různé umístění svítilny (2,5 m nebo 5 m) od osy trati a pro různé poloměry křivosti oblouku trati.

### 5.2.1 Výpočet pro rovnou trať

Při výpočtu tolerancí pro rovnou trať vycházíme z trigonometrie načrtnuté na obrázku 14 - Náčrt rovné trati, kde maximální vzdálenost  $l_{max}$  je 250 m, minimální vzdálenost  $l_{min}$  je 10 m a  $b$  značí vzdálenost svítilny od osy trati. Podle rovnic (12) a (13) lze dopočítat maximální úhel  $\alpha_{max}$  a minimální úhel  $\alpha_{min}$ .

$$\alpha_{max} = \arctan \frac{l_{max}}{b} \quad (12)$$

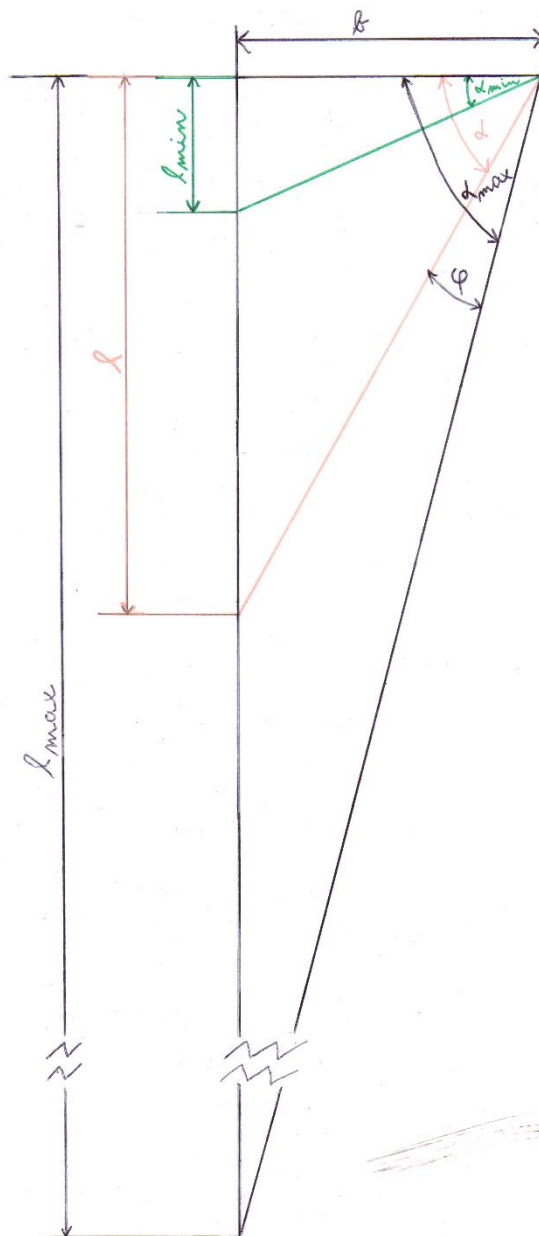
$$\alpha_{min} = \arctan \frac{l_{min}}{b} \quad (13)$$

Úhel  $\alpha$  se mění v rozsahu od  $\alpha_{min}$  do  $\alpha_{max}$ . Podle rovnice (14) je možné určit odpovídající vzdálenost  $l$ , ze které dopočítáme odpovídající hodnotu svítivosti  $I$  podle rovnice (11).

$$l = b \tan \alpha \quad (14)$$

Za předpokladu, že optická osa svítilny je nastavená tak, že směřuje do nejzazšího bodu, ze kterého je nutné svítilnu zahlédnout, dopočítáme pak úhel odklonu směru šíření od optické osy  $\varphi$  podle rovnice (15).

$$\varphi = \alpha_{max} - \alpha \quad (15)$$



Obrázek 14 - Náčrt rovné trati

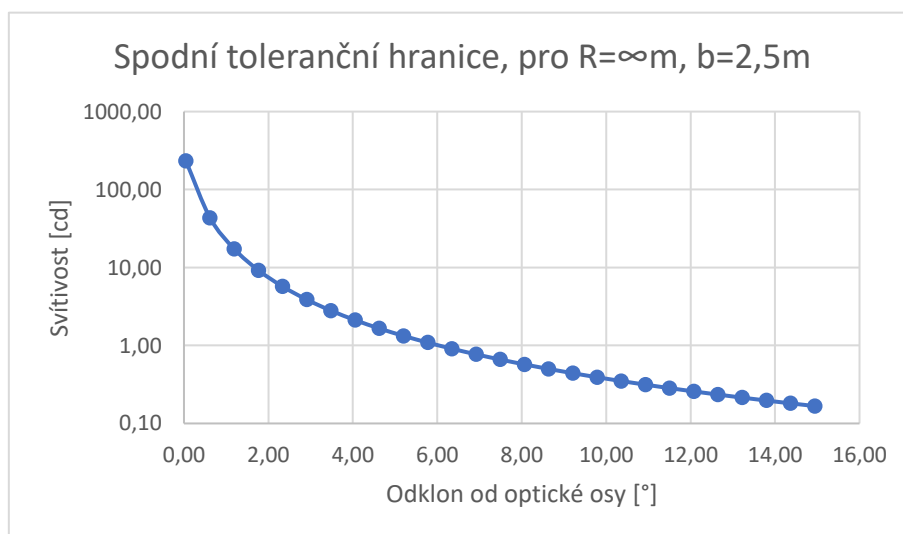
Po odvození potřebných vztahů byl vytvořen skript v Matlabu, s jehož využitím byly vytvořeny tabulky závislosti úhlu  $\varphi$ , vzdálenosti  $l$  a tomu odpovídající svítivosti  $I$ . Tyto tabulky byly následně vloženy do Excelu a byly z nich vytvořeny grafy odpovídající spodní hranici tolerančního pole. Vytvořené tabulky a grafy jsou uvedeny v následujících bodech.



### Vzdálenost svítelní $b = 2,5 \text{ m}$

Tabulka 1 - Závislost svítivosti  $I$ , vzdálenosti  $l$  a úhlu  $\varphi$ , pro  $R=\infty$ ,  $b=2,5 \text{ m}$

$I$ [cd]	$l$ [m]	$\varphi$ [°]
0,18	9,37	14,37
0,20	9,76	13,80
0,21	10,18	13,22
0,23	10,64	12,65
0,26	11,14	12,08
0,28	11,68	11,50
0,31	12,28	10,93
0,35	12,94	10,36
0,39	13,68	9,79
0,44	14,49	9,21
0,50	15,41	8,64
0,57	16,45	8,07
0,66	17,64	7,49
0,77	19,00	6,92
0,91	20,60	6,35
1,09	22,47	5,78
1,33	24,72	5,20
1,65	27,46	4,63
2,11	30,87	4,06
2,80	35,25	3,48
3,87	41,07	2,91
5,70	49,17	2,34
9,21	61,25	1,76
17,29	81,15	1,19
43,23	120,20	0,62
233,05	231,55	0,05

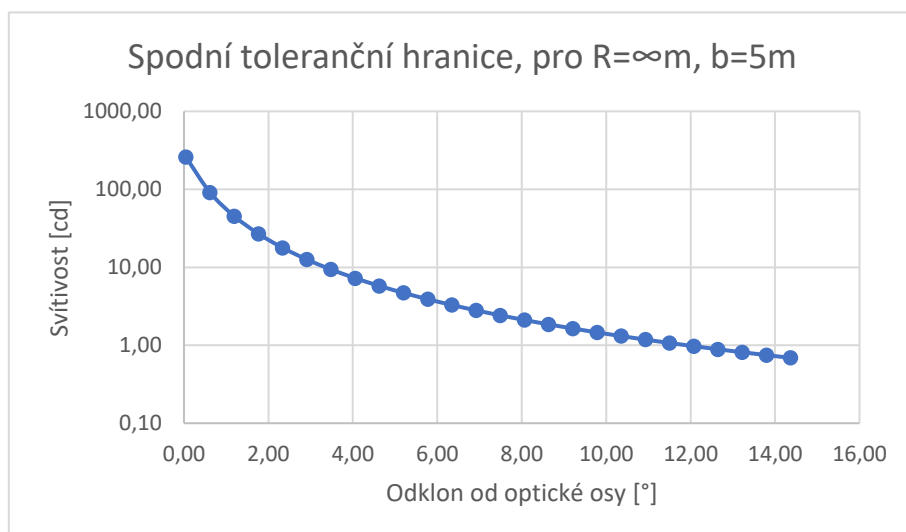


Graf 32 - Spodní toleranční hranice, pro  $R=\infty$ ,  $b=2,5 \text{ m}$

## Vzdálenost svítelní $b = 5\text{ m}$

Tabulka 2 - Závislost svítivosti  $I$ , vzdálenosti  $l$  a úhlu  $\varphi$ , pro  $R=\infty$ ,  $b=5\text{ m}$

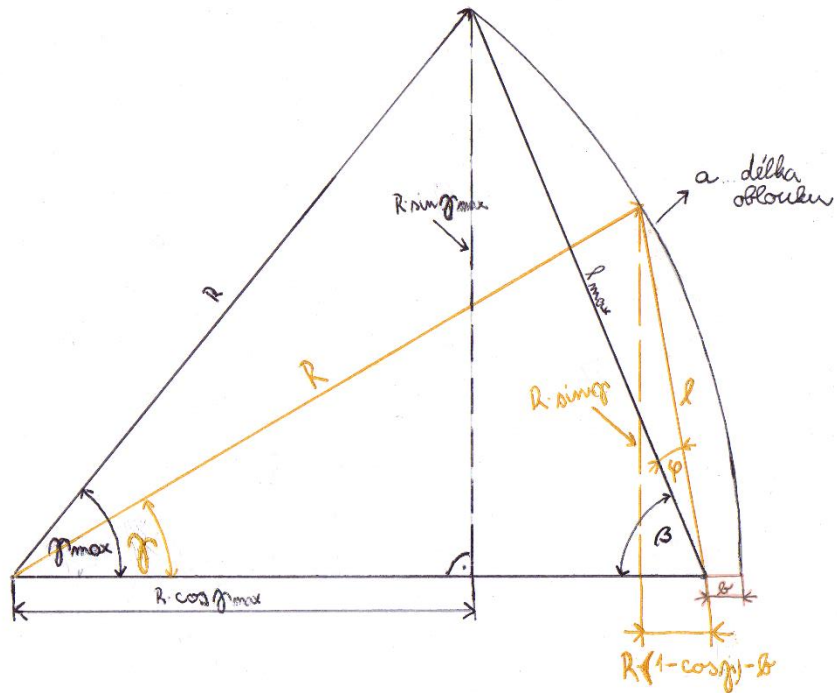
$I$ [cd]	$l$ [m]	$\varphi$ [°]
0,69	18,01	14,37
0,75	18,74	13,80
0,81	19,52	13,22
0,89	20,36	12,65
0,97	21,28	12,08
1,07	22,28	11,50
1,18	23,37	10,93
1,31	24,57	10,36
1,46	25,89	9,79
1,64	27,35	9,21
1,85	28,99	8,64
2,11	30,83	8,07
2,42	32,91	7,49
2,80	35,28	6,92
3,28	38,01	6,35
3,90	41,19	5,78
4,70	44,94	5,20
5,77	49,44	4,63
7,25	54,92	4,06
9,38	61,75	3,48
12,59	70,51	2,91
17,77	82,14	2,34
26,90	98,35	1,76
45,25	122,49	1,19
90,78	162,31	0,62
258,74	240,39	0,05



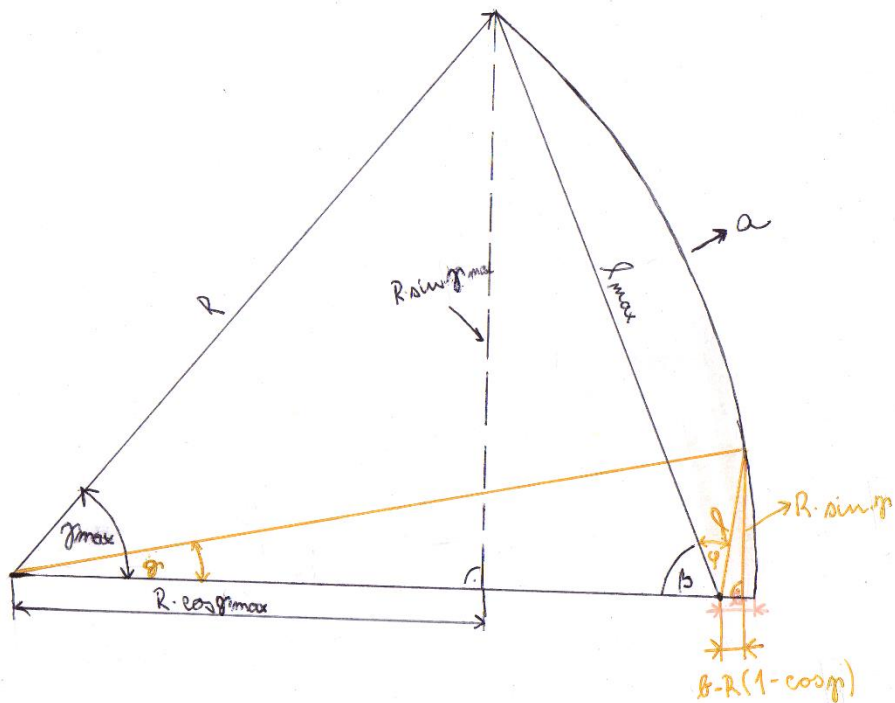
Graf 33 - Spodní toleranční hranice, pro  $R=\infty$ ,  $b=5\text{ m}$

### 5.2.2 Výpočet pro obloukovou trať

Při výpočtu tolerancí pro obloukovou trať vycházíme z obrázku 15 - Nákres obloukové trati 1 a obrázku 16 - Nákres obloukové trati 2.



Obrázek 15 - Nákres obloukové trati 1



Obrázek 16 - Nákres obloukové trati 2

Za předpokladu znalosti poloměru oblouku  $R$ , vzdálenosti svítilny od osy trati  $b$  a délky oblouku  $a$ , lze dopočítat hodnoty pomocných úhlů  $\gamma$  a  $\beta$ , hodnotu úhlu  $\varphi$ , což je právě úhel odklonu směru šíření světla od optické osy a dále vzdálenost  $l$ , což je vzdálenost vlaku od svítilny a její maximální hodnota je pak  $l_{max}$ . Po dosazení vzdálenosti do rovnice (11) získáme odpovídající prahovou hodnotu svítivosti.

#### Odvození vztahů pro výpočet tolerančního pole

Z náčrtů obloukových tratí určíme vztahy (16), (17) a (18)

$$\gamma_{max} = \frac{a}{R} \text{ [rad]} \quad (16)$$

$$\tan \beta = \frac{R \sin \gamma_{max}}{R(1 - \cos \gamma_{max}) - b} \quad (17)$$

$$\beta = \arctan \frac{R \sin \gamma_{max}}{R(1 - \cos \gamma_{max}) - b} \quad (18)$$

Ze znalosti úhlu  $\beta$  pak lze dopočítat maximální vzdálenost  $l_{max}$  podle rovnice (19)

$$l_{max} = \frac{R(1 - \cos \gamma_{max}) - b}{\cos \beta} \quad (19)$$

Při změně vzdálenosti se zmenšuje úhel mezi průvodičem pozorovatele na trati a spojnicí středu oblouku s návěstidlem. Tento úhel označíme  $\gamma$ . Jak lze vidět už z náčrtů, je nutné odvodit dvě skupiny vztahů, které jsou uvedené níže v bodě A. a B. Pro první případ, kdy  $\beta + \varphi < 90^\circ$  a pro případ druhý, kdy  $\beta + \varphi > 90^\circ$ . Spočítáme tedy limitní úhel  $\gamma_{lim}$  podle rovnice (20), pro který platí  $\beta + \varphi = 90^\circ$ .

$$\gamma_{lim} = \arccos \left( \frac{R - b}{R} \right) \quad (20)$$

#### **A. $\beta + \varphi < 90^\circ$ ; $\gamma_{lim} > \arccos \left( \frac{R-b}{R} \right)$**

Pokud je součet  $\beta + \varphi < 90^\circ$  vycházíme z obrázku 15 - Nákres obloukové trati 1 a odvodíme rovnice (21) a (22).

$$\cos(\beta + \varphi) = \frac{R(1 - \cos \gamma) - b}{l} \quad (21)$$

$$\sin(\beta + \varphi) = \frac{R \sin \gamma}{l} \quad (22)$$

Z rovnic (21) a (22) odvodíme vztah pro vzdálenost  $l$  a úhel  $\varphi$ .

$$l = \sqrt{R^2 \sin^2 \gamma + [R(1 - \cos \gamma) - b]^2} \quad (23)$$

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{R \sin \gamma}{l}\right) - \beta \quad (24)$$

Výsledné rovnice (23) a (24) jsou použity pro první část výpočtu tolerancí.

**B.  $\beta + \varphi > 90^\circ$ ;  $\alpha_{lim} < \arccos\left(\frac{R-b}{R}\right)$**

Pokud je součet  $\beta + \varphi > 90^\circ$  vycházíme z obrázku 16 - Nákres obloukové trati 2a odvodíme rovnice (25) a (26).

$$\cos(180 - \beta - \varphi) = \frac{b - R(1 - \cos \gamma)}{l} \quad (25)$$

$$\sin(180 - \beta - \varphi) = \frac{R \sin \gamma}{l} \quad (26)$$

Z rovnic (25) a (26) odvodíme vztah pro vzdálenost  $l$  a úhel  $\varphi$ .

$$l = \sqrt{R^2 \sin^2 \gamma + [b - R(1 - \cos \gamma)]^2} \quad (27)$$

$$\varphi = -\arcsin\left(\frac{R \sin \gamma}{l}\right) - \beta + \pi \quad (28)$$

Výsledné rovnice (27) a (28) pak používáme pro druhou část výpočtu tolerancí.

Po odvození všech potřebných vztahů byl opět vytvořen skript v Matlabu, pomocí kterého jsou spočítány tabulky závislosti úhlu  $\varphi$ , vzdálenosti  $l$  a tomu odpovídající svítivosti  $I$ . Tyto tabulky jsou vloženy do Excelu a z nich jsou vytvořeny grafy odpovídající spodní hranici tolerančního pole. Vytvořené tabulky a grafy jsou uvedeny v následujících bodech.

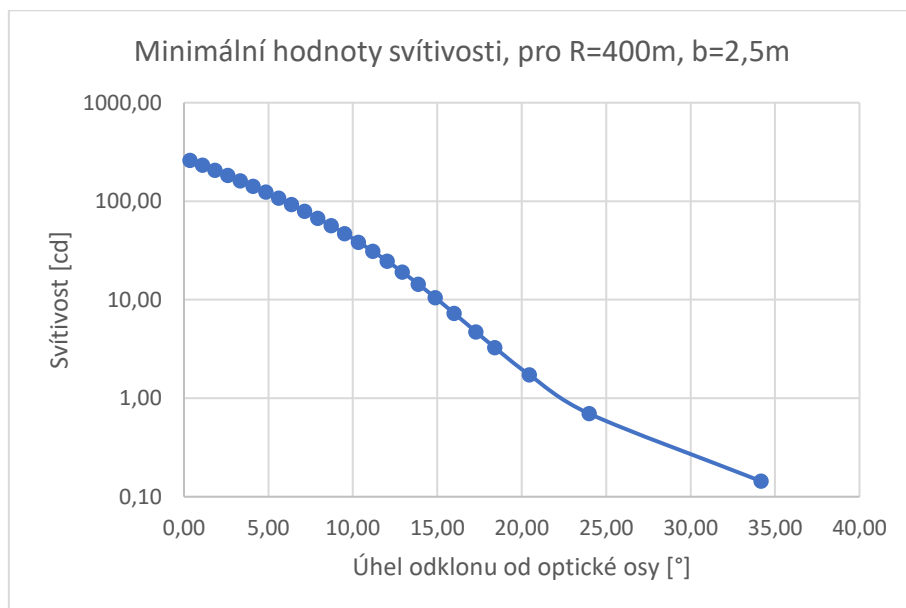
#### 5.2.2.1 Poloměr trati $R=400$ m

##### Vzdálenost svítilny $b = 2,5$ m

Tabulka 3 - Závislost svítivosti  $I$ , vzdálenosti  $l$  a úhlu  $\varphi$ , pro  $R=400$  m,  $b=2,5$  m

$I$ [cd]	$l$ [m]	$\varphi$ [°]
34,18	8,36	0,14
23,99	18,12	0,70
20,46	28,02	1,72
18,40	37,95	3,27
17,29	45,05	4,72
16,00	54,99	7,27
14,88	64,92	10,48
13,87	74,84	14,40

12,93	84,75	19,09
12,04	94,66	24,61
11,18	104,54	31,03
10,34	114,42	38,42
9,52	124,27	46,85
8,72	134,11	56,39
7,93	143,92	67,11
7,15	153,71	79,11
6,38	163,48	92,46
5,61	173,22	107,26
4,85	182,94	123,59
4,09	192,63	141,55
3,34	202,28	161,24
2,59	211,91	182,75
1,85	221,50	206,20
1,10	231,06	231,68
0,36	240,58	259,32

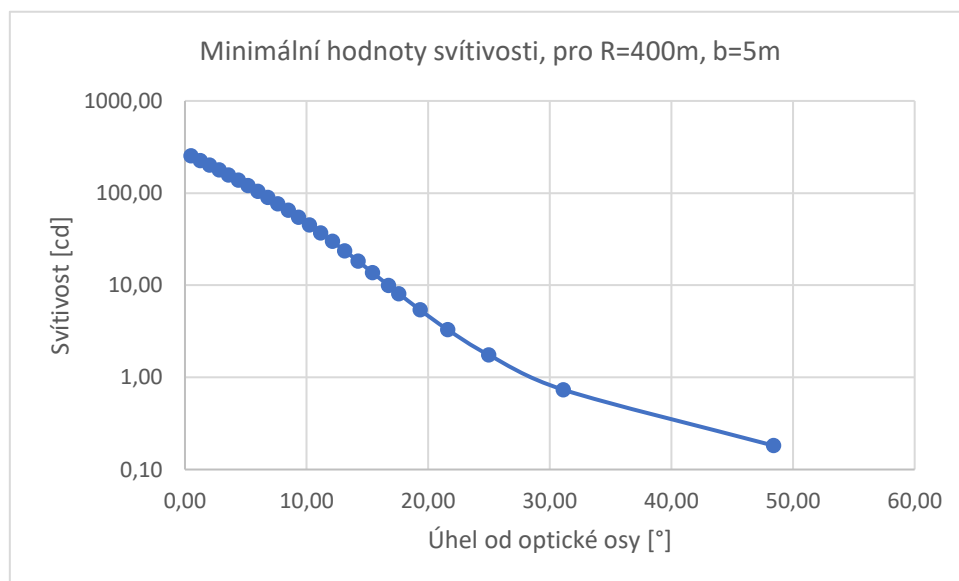


Graf 34 - Spodní toleranční hranice, pro  $R=400\text{ m}$ ,  $b=2,5\text{ m}$

### Vzdálenost svítiviny $b = 5\text{ m}$

Tabulka 4 - Závislost svítivosti  $I$ , vzdálenosti  $l$  a úhlu  $\varphi$ , pro  $R=400\text{ m}$ ,  $b=5\text{ m}$

$I$ [cd]	$l$ [m]	$\varphi$ [°]
0,18	9,39	48,38
0,73	18,57	31,12
1,76	28,26	24,97
3,29	38,08	21,61
5,40	47,93	19,33
8,11	57,80	17,59
9,96	63,44	16,73
13,75	73,32	15,40
18,29	83,19	14,22
23,65	93,05	13,14
29,90	102,89	12,12
37,09	112,73	11,16
45,30	122,55	10,24
54,60	132,35	9,35
65,06	142,13	8,48
76,78	151,89	7,63
89,82	161,63	6,80
104,28	171,34	5,98
120,25	181,03	5,17
137,82	190,69	4,37
157,08	200,32	3,58
178,13	209,91	2,80
201,08	219,48	2,02
226,03	229,01	1,25
253,10	238,51	0,48



Graf 35 - Spodní toleranční hranice, pro  $R=400\text{ m}$ ,  $b=5\text{ m}$

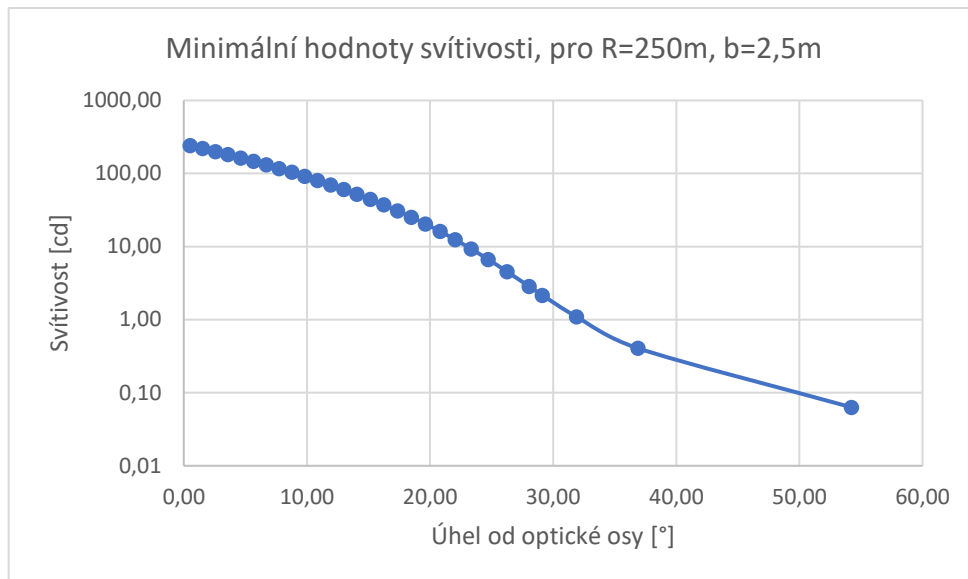
### 5.2.2.2 Poloměr trati $R=250\text{ m}$

#### Vzdálenost svítilny $b = 2,5\text{ m}$

Tabulka 5 - Závislost svítivosti  $I$ , vzdálenosti  $l$  a úhlu  $\varphi$ , pro  $R=250\text{ m}$ ,  $b=2,5\text{ m}$

$I$ [cd]	$l$ [m]	$\varphi$ [°]
0,06	5,57	54,23
0,41	13,91	36,90
1,09	22,52	31,91
2,16	31,17	29,13
2,84	35,51	28,06
4,53	44,18	26,27
6,66	52,83	24,73
9,29	61,47	23,34
12,43	70,09	22,05
16,13	78,70	20,82
20,41	87,28	19,64
25,33	95,83	18,49
30,90	104,36	17,36
37,18	112,85	16,25
44,20	121,31	15,16
52,00	129,73	14,07
60,62	138,11	13,00
70,09	146,46	11,94
80,47	154,75	10,88
91,78	163,00	9,83
104,06	171,20	8,78
117,37	179,35	7,74
131,72	187,44	6,70
147,17	195,48	5,66
163,74	203,45	4,63
181,48	211,36	3,59
200,41	219,21	2,57
220,57	226,99	1,54
241,98	234,70	0,51





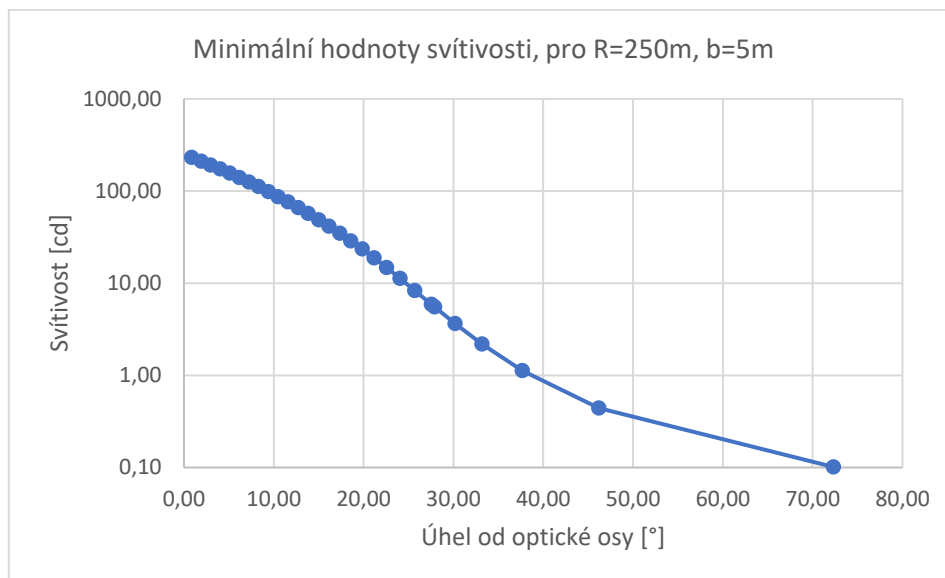
Graf 36 - Spodní toleranční hranice, pro R=250 m, b=2,5 m

Vzdálenost svítilny  $b = 5 \text{ m}$

Tabulka 6 - Závislost svítivosti  $I$ , vzdálenosti  $l$  a úhlu  $\varphi$ , pro R=250 m, b=5 m

$I$ [cd]	$l$ [m]	$\varphi$ [°]
0,10	7,04	72,30
0,44	14,50	46,18
1,12	22,82	37,65
2,18	31,32	33,18
3,63	39,87	30,19
5,52	48,44	27,90
5,91	49,99	27,53
8,35	58,57	25,68
11,29	67,13	24,05
14,76	75,68	22,56
18,81	84,22	21,16
23,46	92,72	19,84
28,76	101,21	18,58
34,74	109,66	17,35
41,43	118,08	16,16
48,88	126,47	14,99
57,12	134,82	13,84
66,20	143,13	12,71
76,15	151,39	11,59
87,01	159,61	10,49
98,81	167,78	9,39
111,61	175,90	8,30
125,42	183,97	7,22
140,30	191,98	6,15
156,28	199,93	5,08

173,38	207,82	4,02
191,65	215,65	2,96
211,12	223,41	1,91
231,81	231,11	0,86



Graf 37 - Spodní toleranční hranice, pro R=250 m, b=5 m

## 6 Úprava směrové charakteristiky

### 6.1 Etendue

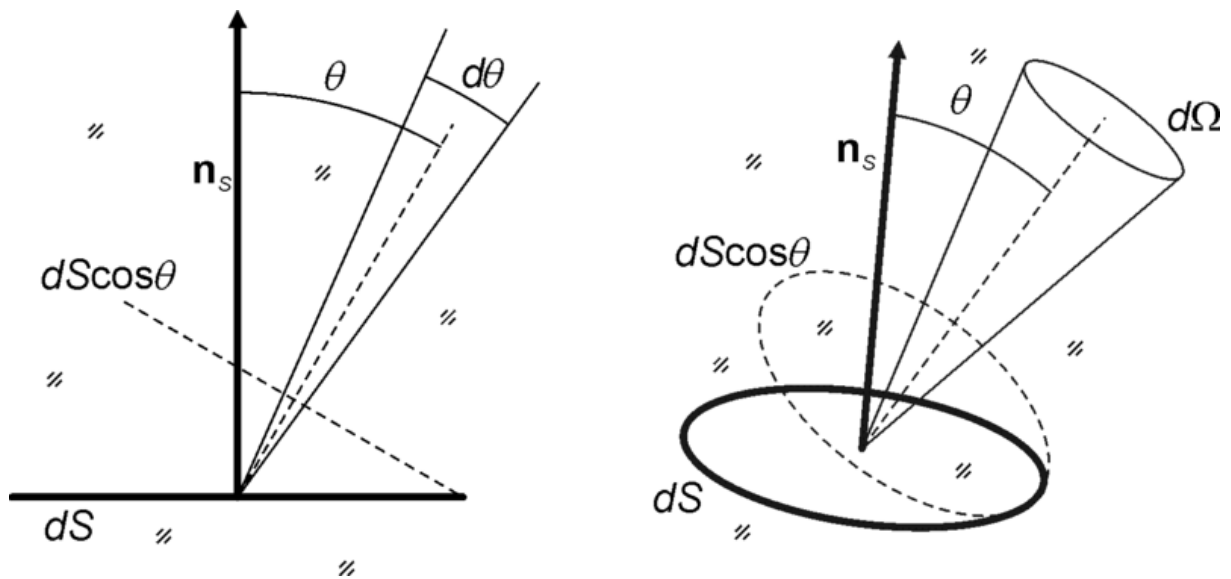
Pro charakteristiku svazků v nezobrazovací optice je typickou veličinou Etendue (z francouzského „*étendue géométrique*“ = *geometrický rozměr*). Popisuje vazbu mezi průřezem a aperturou svazku v dané optické soustavě. Tato veličina umožňuje určit maximální koncentraci nebo požadované rozptýlení světla.

Etendue je označováno písmenem G a je definováno podle rovnice (29) a znázorněno na obrázku 17 - Definice Etendue.

$$dG = n^2 dS \cos \theta d\Omega \quad (29)$$

Infinitesimálním elementem plochy  $dS$ , s normálou  $n_s$ , který se nachází v prostředí s indexem lomu  $n$  prochází světlo (nebo je plocha přímo zdrojem). Množství světla je definováno prostorovým úhlem  $d\Omega$ , do kterého se světlo šíří. Směr šíření světla je definován úhlem  $\theta$ , což je úhel, který svírá normála plochy se směrem šíření.

[AUTOR NEUVEDEN. wikipedia.org [online]. [cit. 10.4.2018]. Dostupný na WWW: [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Etendue\\_for\\_differential\\_surface\\_element\\_in\\_2D\\_and\\_3D.png](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Etendue_for_differential_surface_element_in_2D_and_3D.png)]

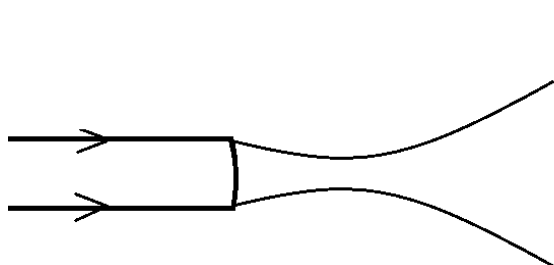


Obrázek 17 - Definice Etendue

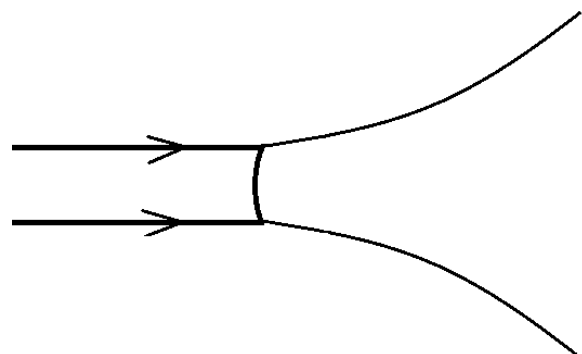
## 6.2 Tvarované světlovody

Pro požadované rozšíření směrové charakteristiky svítilny je nutné dosáhnout dostatečného prosvětlení větší části optického systému ve svítelně. To lze realizovat rozšířením světelného bodu zdroje s využitím různě tvarovaných světlovodů (rozšiřujícím se profilem nebo ohýbáním), různě tvarovaného čela světlovodu a případným zmatněním výstupního povrchu světlovodu.

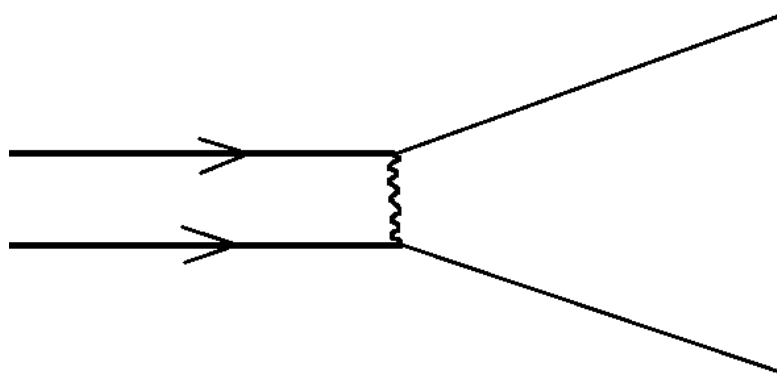
Na obrázcích níže jsou znázorněny možné způsoby tvarování čela světlovodu a odpovídající obálka svazku. Obrázek 18 - Světlovod s konvexním čelem znázorňuje světlovod, jehož čelo působí jako spojná plocha. Obrázek 19 - Světlovod s konkávním čelem znázorňuje světlovod, jehož čelo působí jako rozptylná plocha. Obrázek 20 - Světlovod s matným čelem znázorňuje rozptýlení paprsků pomocí matného čela, přičemž zmatnění plochy může mít různý charakter.



Obrázek 18 - Světlovod s konvexním čelem



Obrázek 19 - Světlovod s konkávním čelem



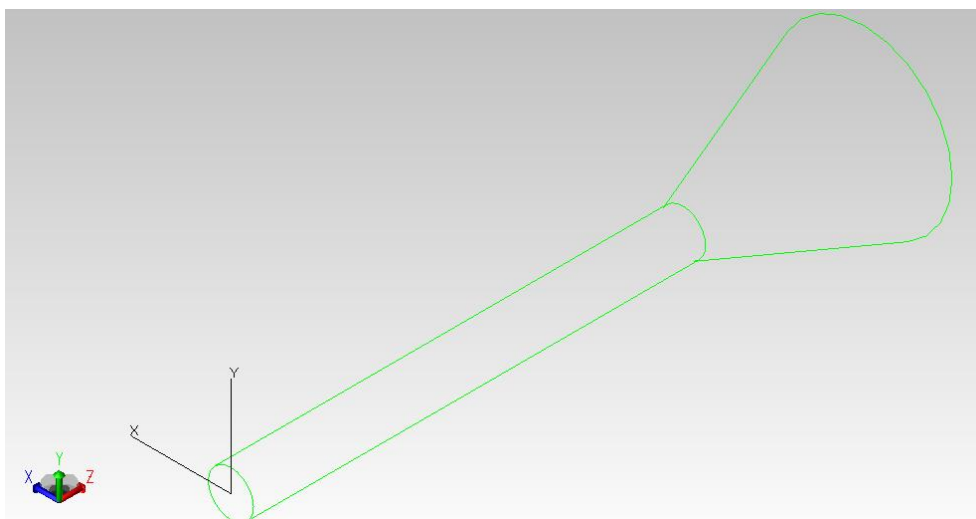
Obrázek 20 - Světlovod s matným čelem

### 6.3 Vypracované návrhy

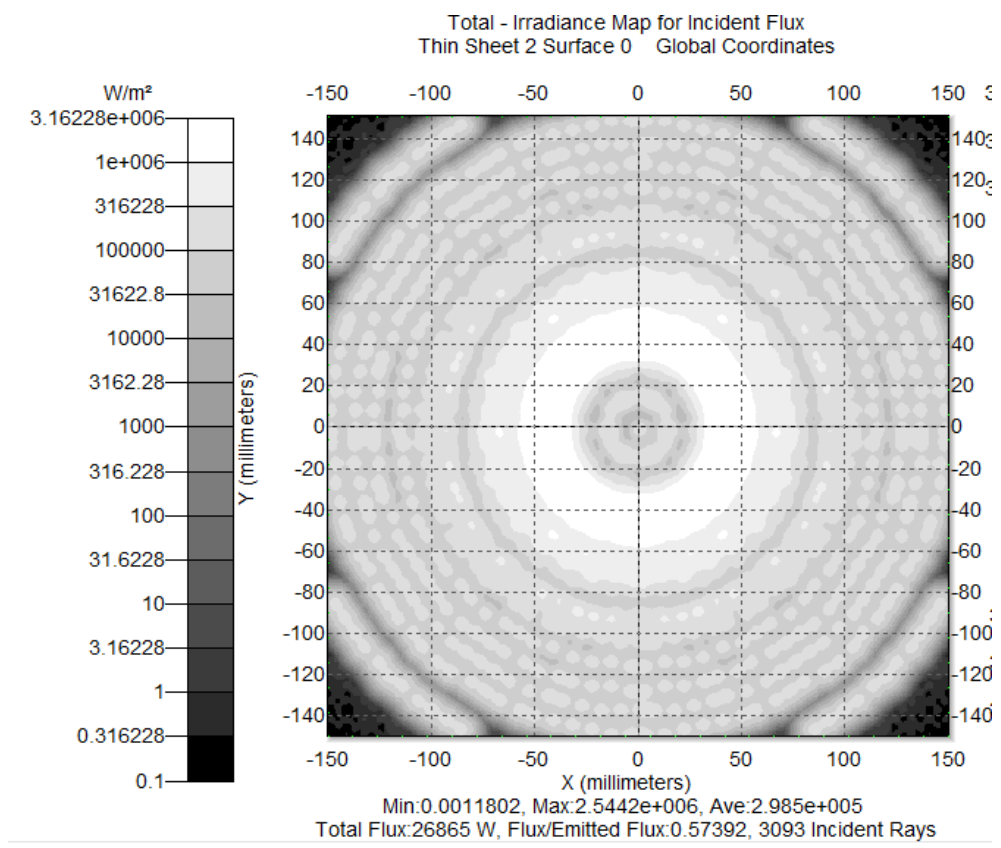
Možnosti použití tvarovaných světlovdů jsou znázorněny pomocí programu TracePro od společnosti Lambda Research Corporation. Materiálem použitým pro návrh světlovdů je sklo BK7 z katalogu SCHOTT. Zdroj je definován pomocí funkce „Grid Source“ tak, že má stejné vlastnosti ve všech vytvořených návrzích. Světelnou stopu za světlovodem vyhodnocujeme v rovině vzdálené 150 mm za výstupní plochou světlovodu. Pro lepší názornost a srovnání je v intenzitních mapách použito logaritmické měřítko.

#### 6.3.1 Světlovody s kulatým profilem

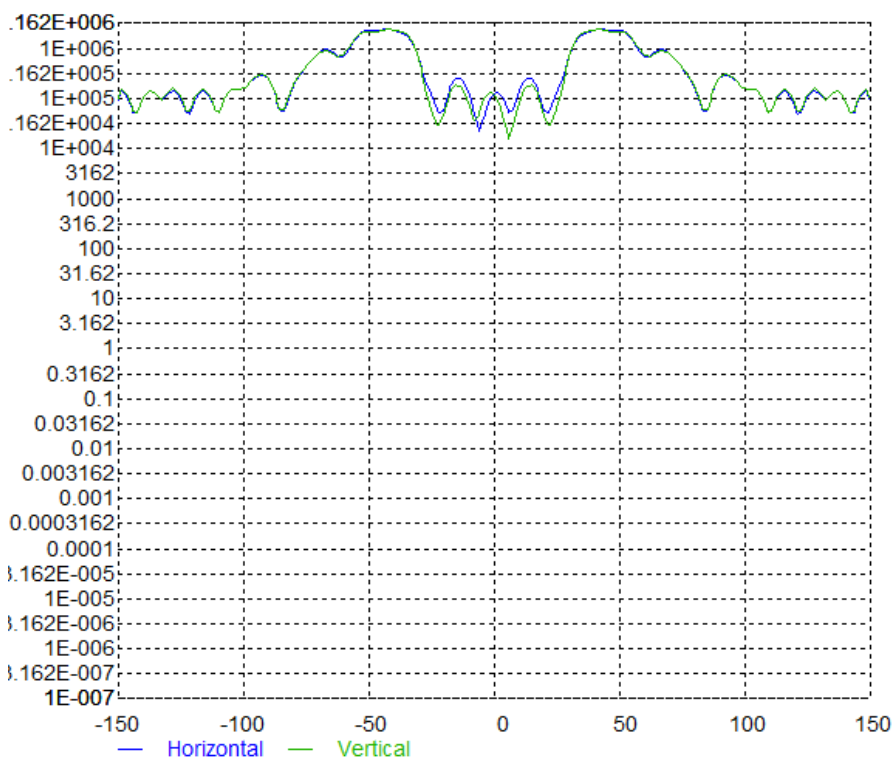
##### **Rozšířený světlovod**



Obrázek 21 - Model světlovodu s kulatým profilem (rozšířený na konci)

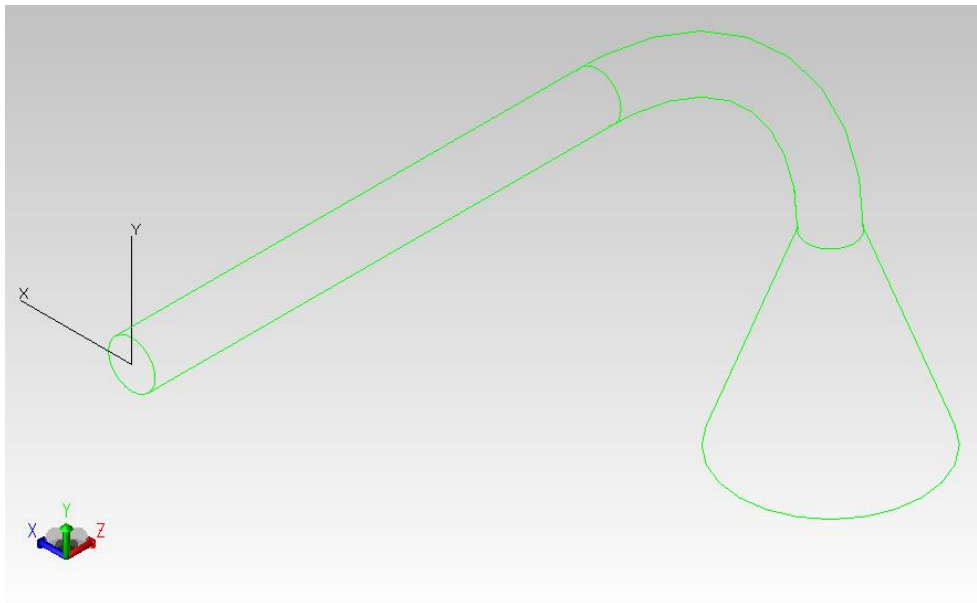


Obrázek 22 – Intenzitní mapa

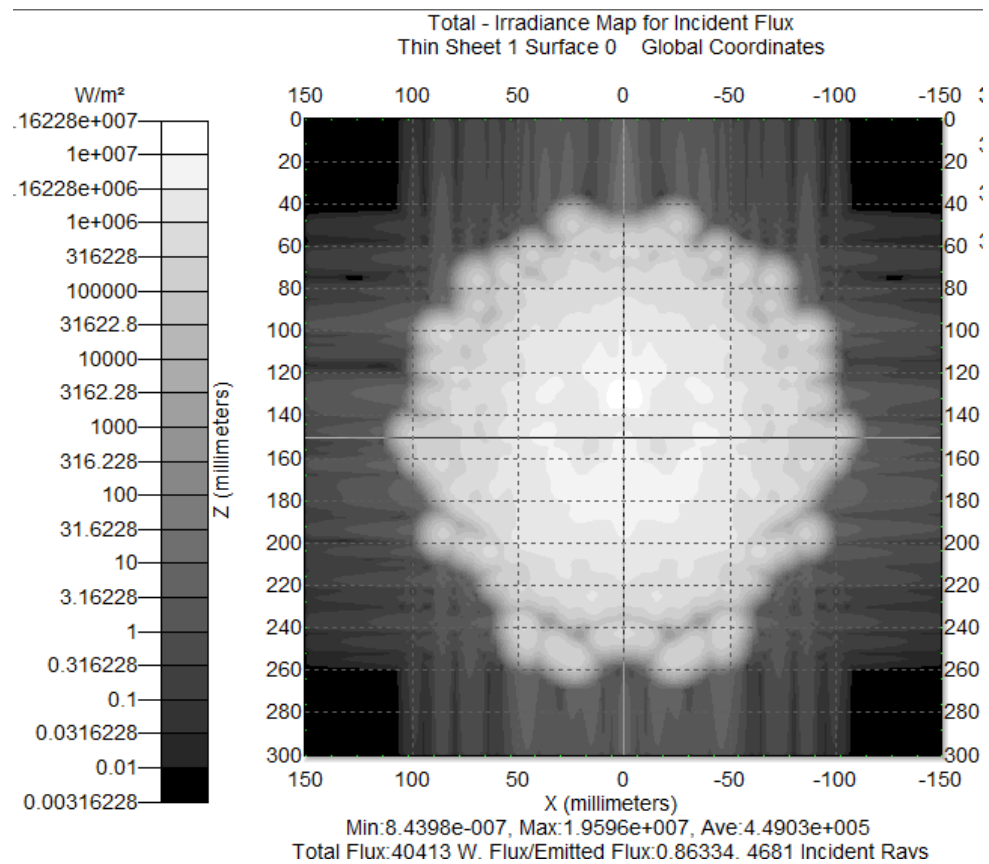


Obrázek 23 - Intenzitní profil

## Rozšířený a ohnutý světlovod



Obrázek 24 - Model světlovodu s kulatým profilem (ohnutý a rozšířený)



Obrázek 25 - Intenzitní mapa

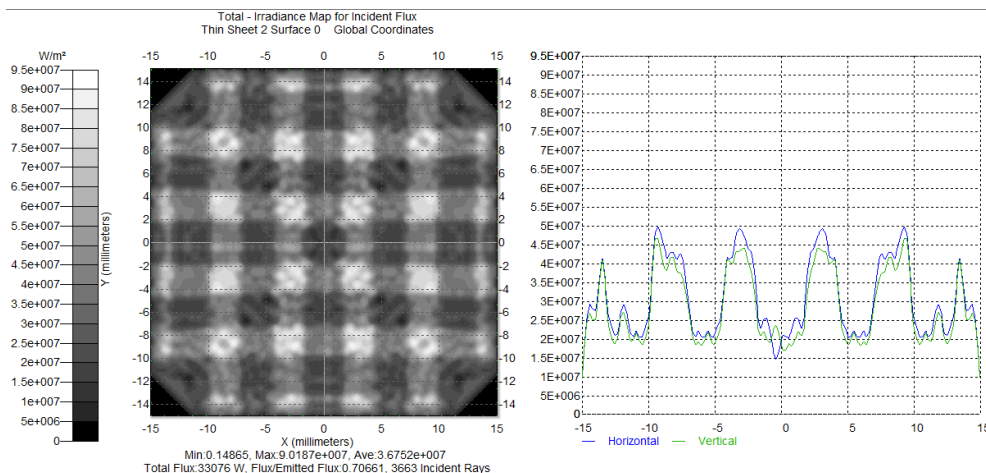


Obrázek 26 - Intenzitní profil

U světlovodů s kulatým profilem je výhodou symetričnost intenzitního profilu a nenáročnost výroby. Avšak světelná stopa za světlovodem se zdá být co do velikosti nedostačující a musí se přistoupit k možnosti tvarovaných světlovodů s pravoúhlým profilem.

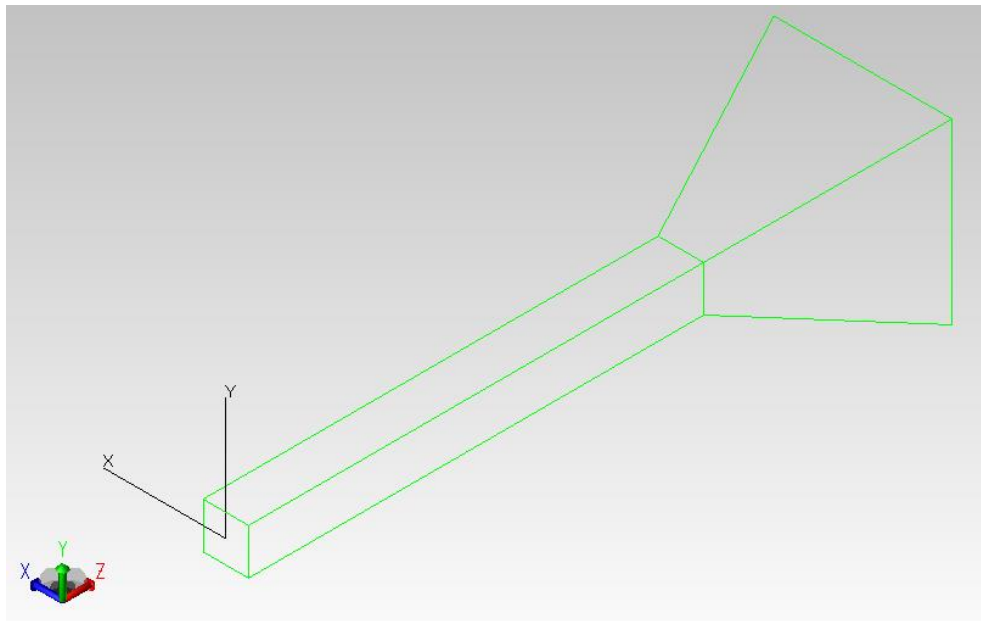
### 6.3.2 Světlovody s pravoúhlým profilem

U světlovodů s pravoúhlým profilem se vyskytuje jev, kdy při pohledu na čelo světlovodu lze vidět zdroj, který se zrcadlí díky odrazu světla na stranách světlovodu. Tento jev je znázorněn na obrázku 27 - Zrcadlení zdroje. Projevuje se zejména u světlovodů čtvercového nebo obdélníkového profilu. Lze předpokládat, že při použití světlovodu pravoúhlého profilu, který má zmatněné čelo, bude směrová charakteristika díky tomuto zrcadlení dostatečně rozšířena.

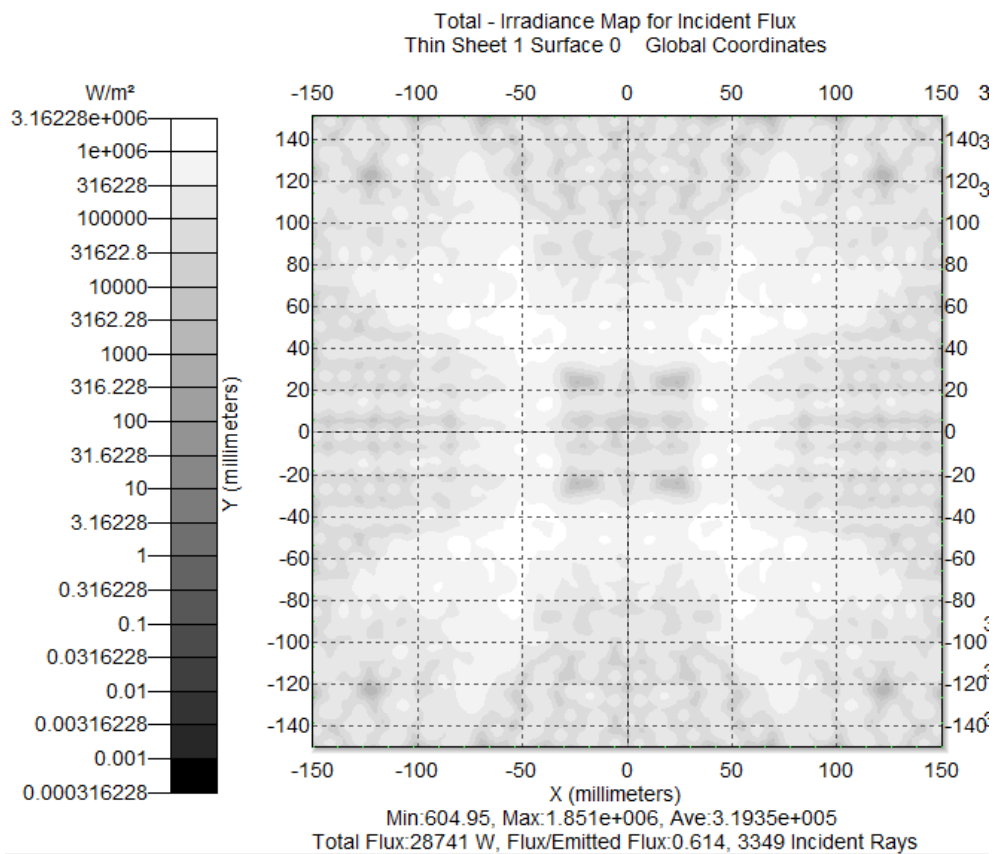


Obrázek 27 - Zrcadlení zdroje

## Rozšířený světlovd – symetricky

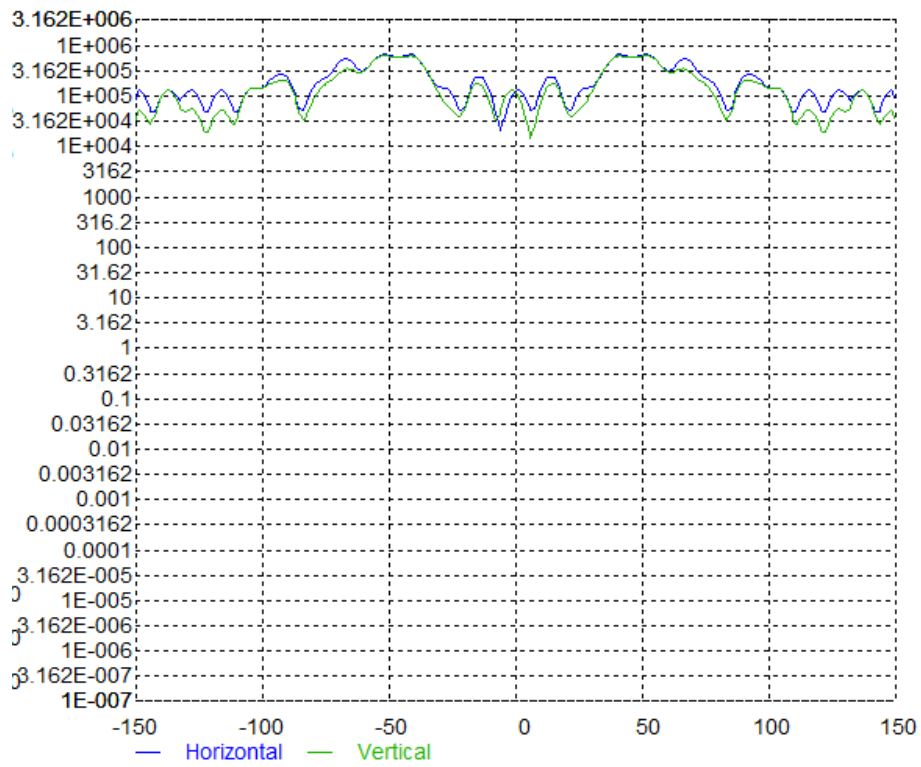


Obrázek 29 - Model světlovodu se čtvercovým profilem (rozšířený na konci)



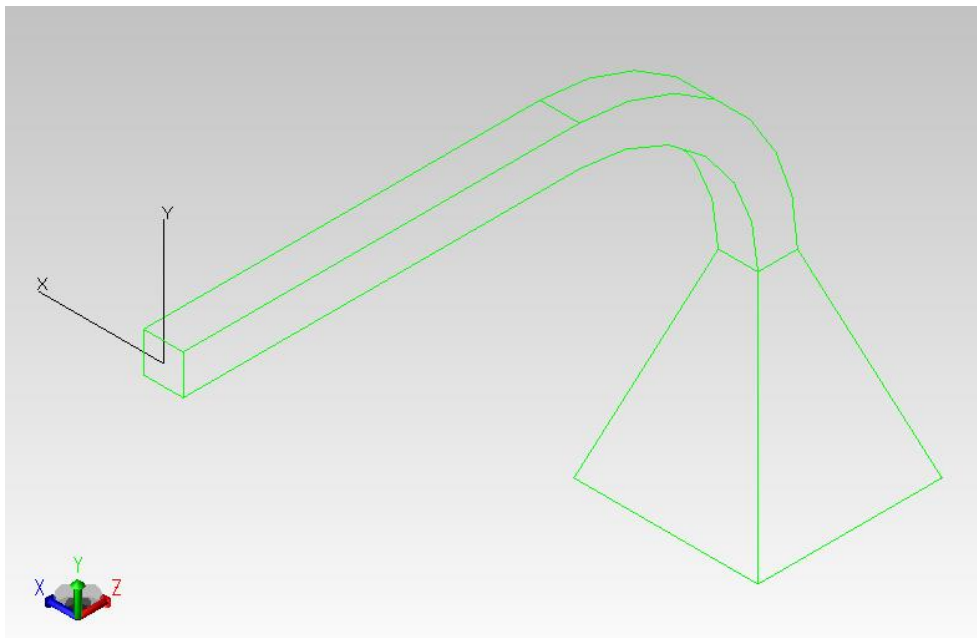
Obrázek 30 - Intenzitní mapa



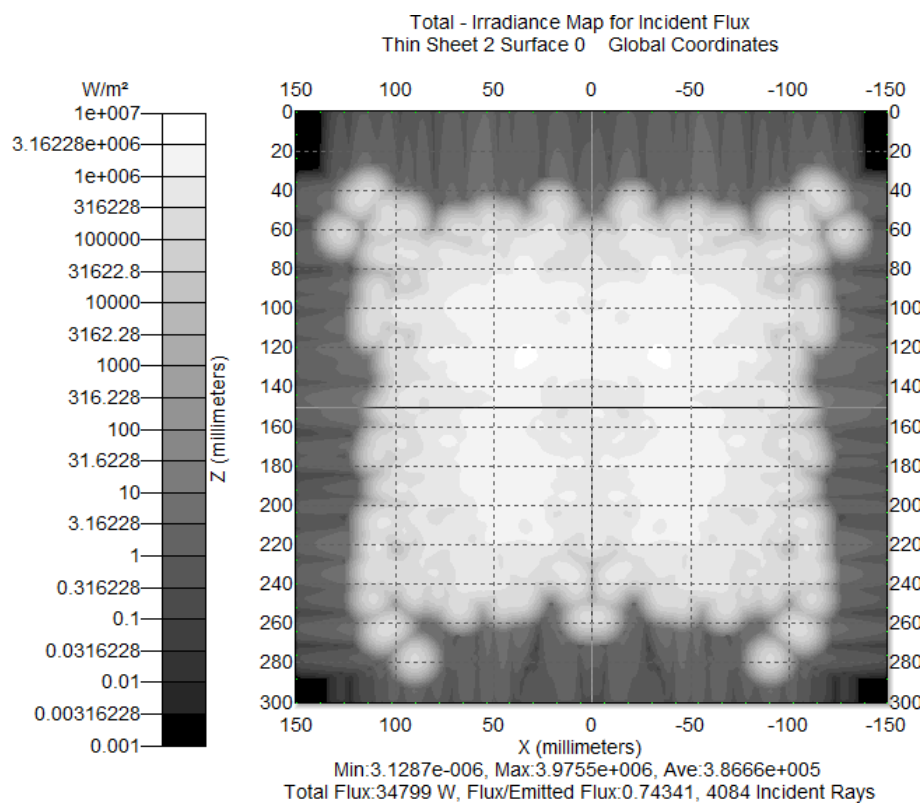


Obrázek 31 - Intenzitní profil

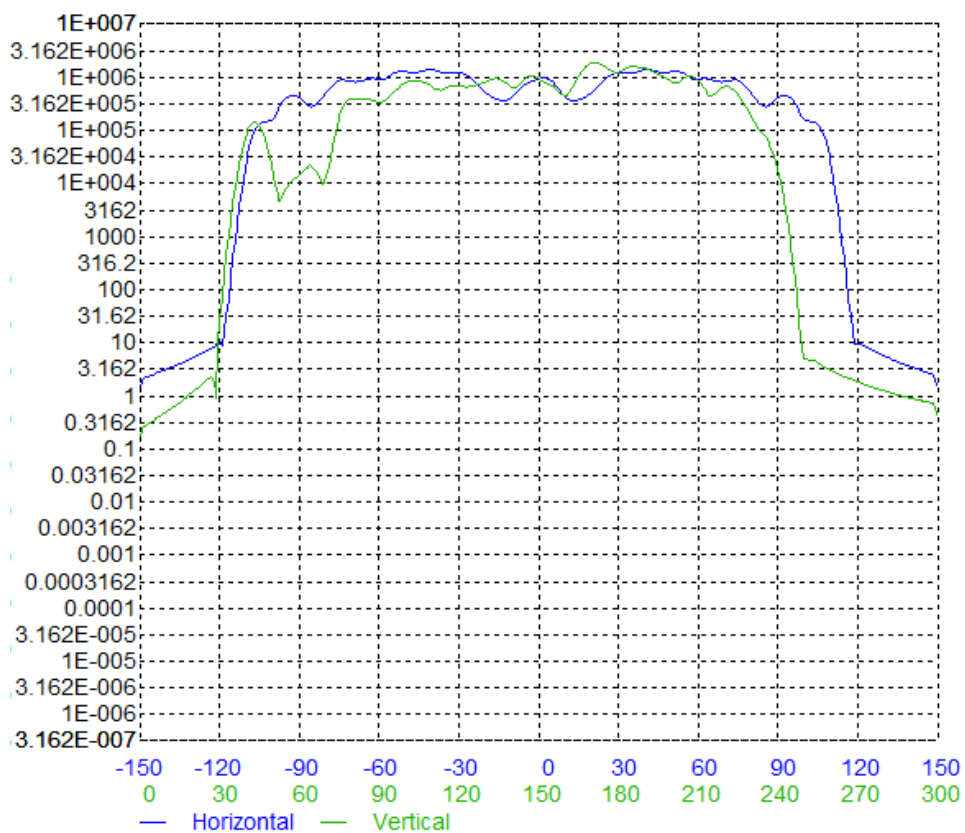
### Rozšířený a ohnutý světlovod



Obrázek 32 - Model světlovodu se čtvercovým profilem (ohnutý a rozšířený)

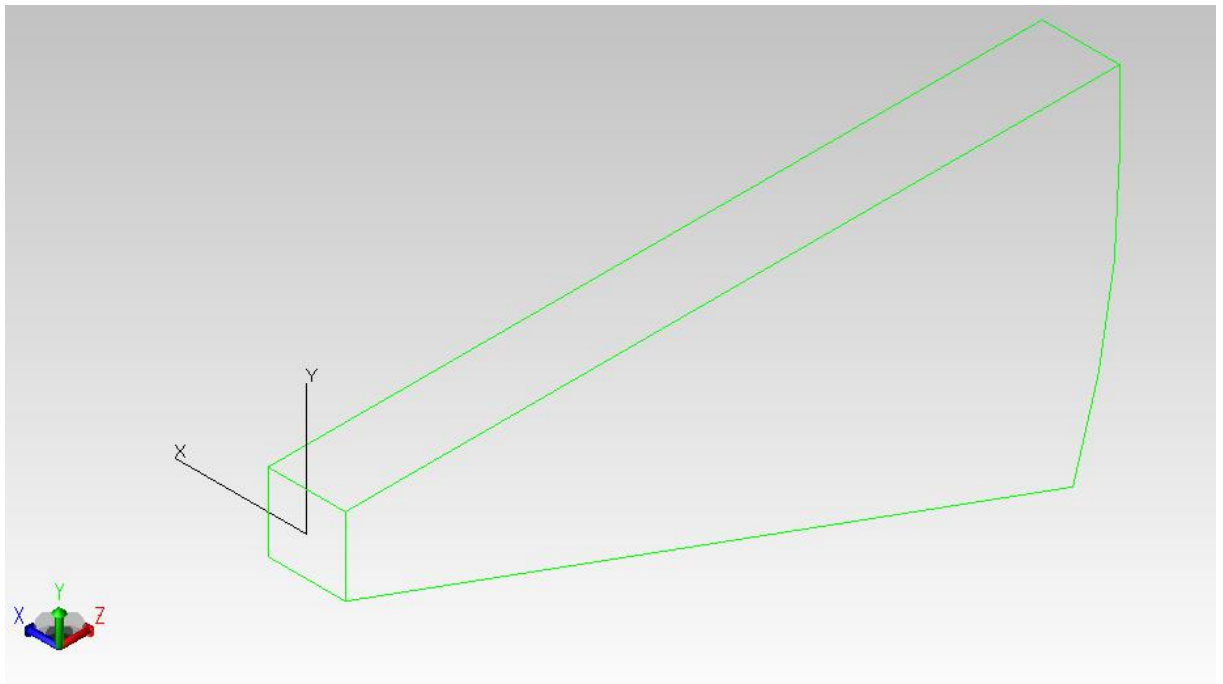


Obrázek 33 - Intenzitní mapa

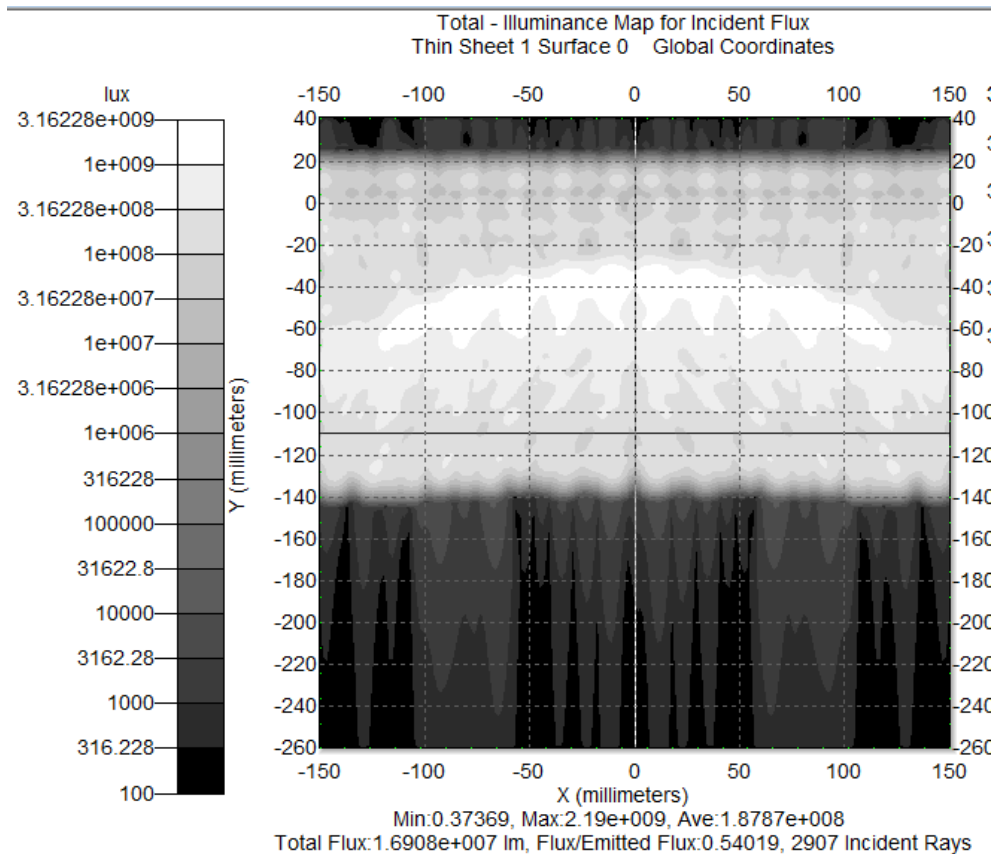


Obrázek 34 - Intenzitní profil

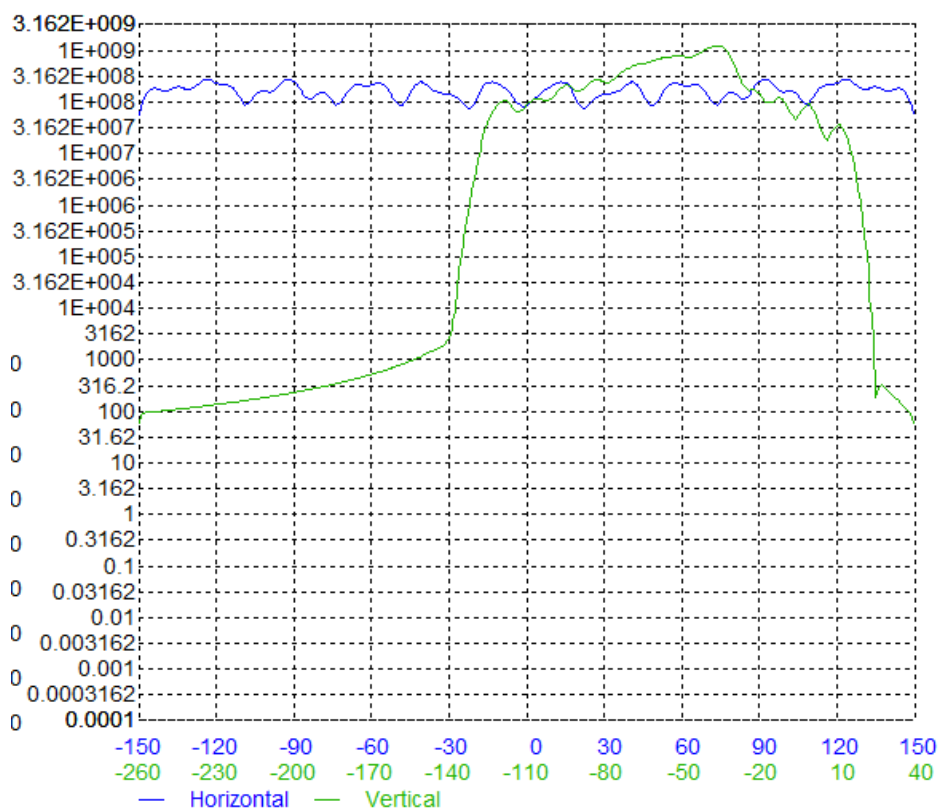
## Rozšířený světlovd – nesymetricky



Obrázek 35 - Model světlovodu se čtvercovým profilem (nesymetricky rozšířený)



Obrázek 36 - Intenzitní mapa



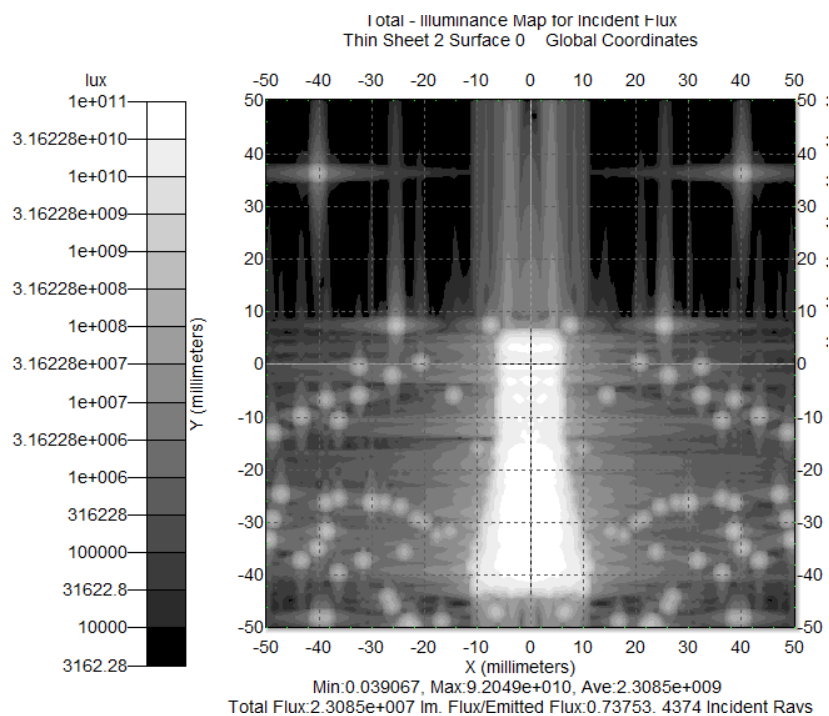
Obrázek 37 - Intenzitní profil

U světlovodů s pravoúhlým profilem je světelná stopa rozšířena příznivěji než u světlovodů s kulatým profilem. Můžeme si také všimnout, že ohýbání světlovodu odstraňuje jev zrcadlení zdroje, ale také zmenšuje rozšíření světelné stopy, což je nežádoucí. Ukazuje se, že nesymetrické rozšíření světlovodu vede k dobrému výsledku rozšíření světelné stopy, a to zejména v horizontální rovině, což je žádoucí. Tento typ tvarovaného světlovodu by tedy s výhodou mohl být použit k rozšíření světelné stopy a následnému rozšíření světelného kužele.

### 6.3.3 Sestava svítilny se světlovodem

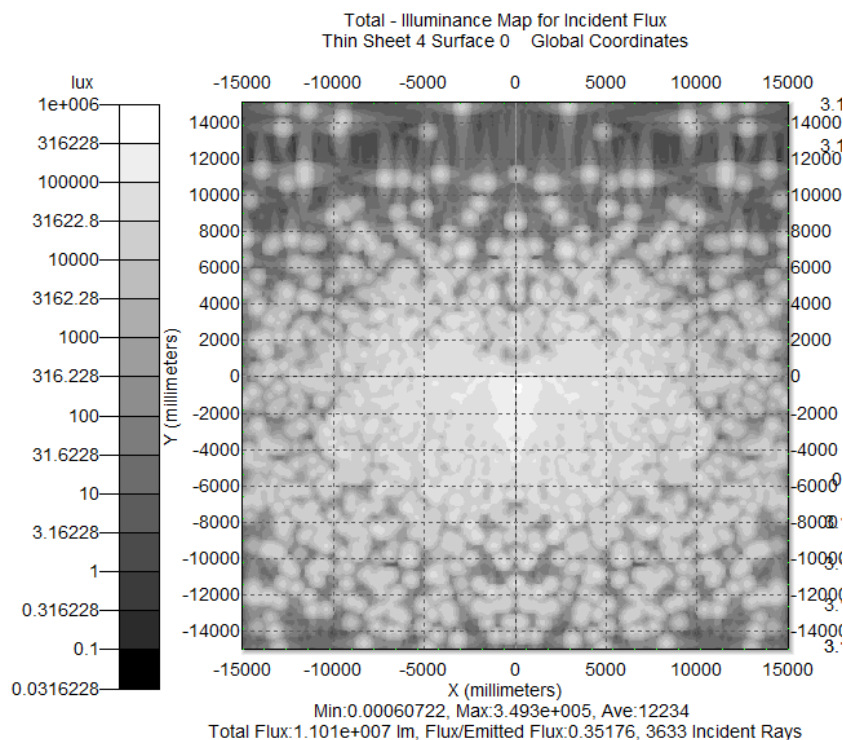
Po modelování několika různých světlovodů se jako nejvýhodnější jeví konstrukce světlovodu s nesymetrickým rozšířením, zobrazena na obrázku 35 - Model světlovodu se čtvercovým profilem (nesymetricky rozšířený). Mimoto, že tento světlovod příznivě osvětluje vstupní pupilu optického systému je také konstrukčně jednoduchý, což nás vede k závěru, že tato možnost je nejvhodnější.

Abychom ověřili, zda je výsledný světelný kužel dostatečně rozšířen namodelovali jsme v programu TracePro tento zmiňovaný světlovod společně s Fresnelovou čočkou, o stejné ohniskové vzdálenosti jako má čočka použitá ve svítilně. Intenzitní mapa v rovině za světlovodem je znázorněna na Obrázek 38 - Intenzitní mapa za světlovodem.



Obrázek 38 - Intenzitní mapa za světlovodem

Můžeme předpokládat, že výsledná intenzitní mapa v rovině vyhodnocení bude mít podobný tvar jako intenzitní mapa za světlovodem. Rovinu vyhodnocení jsme umístili do vzdálenosti 20 m za Fresnelovu čočku a vykreslili jsme intenzitní mapu, která je znázorněna na obrázku 39 - Intenzitní mapa ve vzdálenosti 20m.



Obrázek 39 - Intenzitní mapa ve vzdálenosti 20m

Z obrázků je patrné, že původní světelná stopa o velikosti 50 mm je příznivě rozšířena až na 13000mm, to odpovídá přibližně úhlu  $30^\circ$ , což při zohlednění vytvořených tolerančních polí je dostatečná šířka světelného kužele. Při zohlednění hodnot svítivosti pro jednotlivé úhly je pak možné i manipulovat s optickou osou svítilny a nastavit ji do polohy jiné, než tak aby směřovala do nejzaššího bodu, ze kterého je nutné svítilnu zhlédnout.

Při simulaci Fresnelovy čočky nejsou zahrnuty její optické aberace, což může zkreslovat výsledky. Je tedy vhodné vyrobit příslušný světlovod a ověřit výsledky měření v optické laboratoři. Dále také se program TracePro v některých případech chová neočekávaným způsobem, je vhodné ověření některých výsledků a jejich případná korekce.

## Závěr

Tato práce se zabývá měřením a úpravou směrové charakteristiky svítlen pro návěstidla. V rámci modernizace železniční dopravy se jako zdroje ve svítelnách využívají LED diody. Vzniká zde otázka, zda je možné použít pouze jednu diodu, a to na tratích kde není potřeba velká svítivost. Tyto tratě ale často vedou v obloucích, a proto zde vzniká požadavek na širší směrovou charakteristiku.

Pro účely měření byla na katedru optiky zapůjčena svítelna, která se používá na přejezdnicích. Na této svítelně byla provedeno podrobné měření směrové charakteristiky. Byl proměřen efekt z celé apertury svítilny, a to s různou polohou LED diody. Dále byly proměřeny jednotlivé směrové charakteristiky z dílčích čtvercových subapertur. Vybrané výsledky jsou pak uvedeny přímo v práci, všechny ostatní výsledky, včetně zaznamenaných tabulek jsou uvedeny v přílohách.

Pro úpravy směrové charakteristiky bylo na základě požadavků normy [6] vyčísleno toleranční pole, které definuje minimální svítivost na vymezeném světelném kuželu. Toto pole se liší pro různé poloměry oblouku trati a také pro různé vzdálenosti svítilny od trati. Aby bylo možné dopočítat jakékoliv toleranční pole je v přílohách uveden skript vytvořený v Matlabu na výpočet tolerančního pole.

Při návrhu na rozšíření směrové charakteristiky lze uplatnit světlovody. Pomocí různě tvarovaných světlovodů je možné rozšířit světelnou stopu a tím rozšířit šířku světelného kužele. Pro simulace, které znázorňují možné úpravy směrové charakteristiky byl využit program TracePro od firmy Lambda Research Corporation, kde bylo navrženo několik různě tvarovaných světlovodů s pravoúhlým a kruhovým průřezem. Numerické vyhodnocení v programu TracePro se chová občas neočekávaným způsobem, a proto je vhodné reálné ověření a případná korekce.

Nejvýhodnější konstrukcí se jeví nesymetricky rozšiřující se světlovod se čtvercovým profilem. Další možností úprav tohoto světlovodu je pak zmatnění jeho výstupní plochy, případně jiné tvarování výstupní plochy. Podle konstrukčních parametrů svítilny lze pak měnit i velikost světlovodu. S ohledem na velikost zdroje ve svítelně je pak ještě možné měnit velikost vstupní plochy světlovodu.

## Literatura

- [1] PODLOUCKÝ, Jan. *Studie metodiky hodnocení svítivosti svítilny návěstidla AŽD 70*. PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY PALACKÉHO V OLOMOUCI: KATEDRA OPTIKY, 2009
- [2] AUTOR NEUVEDEN. *TracePro Tutorial: Creating Source Files*. 25 Porter Rd, Littleton, MA 01460, Spojené státy americké: Lambda Research Corporation, 2013
- [3] AUTOR NEUVEDEN. *Lightpipe*. 25 Porter Rd, Littleton, MA 01460, Spojené státy americké: Lambda Research Corporation, 2013
- [4] AUTOR NEUVEDEN. *TracePro User's Manual*. 25 Porter Rd, Littleton, MA 01460, Spojené státy americké: Lambda Research Corporation, 2017
- [5] MARTINOVSKÝ, V. *Svítilna se světelným zdrojem s LED diodou*. Wolkerova 150/14, 350 02 Cheb: ATE s.r.o. automatizační technika, 2016
- [6] AUTOR NEUVEDEN. *Technická norma železnic: TNŽ 34 2610*. Praha: Ústřední ředitelství ČSD, 1992
- [7] AUTOR NEUVEDEN. *Mechanické návěstidlo* [online]. [cit. 14.4.2018]. Dostupný na WWW: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Mechanick%C3%A9\\_n%C3%A1v%C4%9Bstidlo](https://cs.wikipedia.org/wiki/Mechanick%C3%A9_n%C3%A1v%C4%9Bstidlo)
- [8] AUTOR NEUVEDEN. *Světelné návěstidlo* [online]. [cit. 14.4.2018]. Dostupný na WWW: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Sv%C4%9Bteln%C3%A9\\_n%C3%A1v%C4%9Bstidlo](https://cs.wikipedia.org/wiki/Sv%C4%9Bteln%C3%A9_n%C3%A1v%C4%9Bstidlo)
- [9] BC. JIŘÍ PAVLAS. *Zabezpečovací technika v dopravě* [online]. [cit. 14.4.2018]. Dostupný na WWW: <https://publi.cz/books/147/19.html>
- [10] Předpis pro používání návěstí při organizování a provozování drážní dopravy – díl první, Ředitelství českých drah, 1997
- [11] AUTOR NEUVEDEN. *Etendue* [online]. [cit. 14.4.2018]. Dostupný na WWW: <https://en.wikipedia.org/wiki/Etendue>
- [12] AUTOR NEUVEDEN. *Datasheet LUW W5SM*: OSRAM Opto Semiconductors, 2008



## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Nákres přejezdníku .....	9
Obrázek 2 - Fotografie svítilny pro přejezdník .....	10
Obrázek 3 - Schéma měření pomocí jasoměru .....	11
Obrázek 4 - Schéma měření s pomocným objektivem.....	13
Obrázek 5 - Směrová charakteristika LED diody.....	14
Obrázek 6 - Směrová charakteristika svítilny .....	14
Obrázek 7 - Nákres měřící sestavy .....	15
Obrázek 8 - Svítilna se stoly .....	15
Obrázek 9 - Pomocný objektiv.....	16
Obrázek 10 - Luxmetr Unitest .....	16
Obrázek 11 - Uvnitř svítilny .....	17
Obrázek 12 - LED dioda .....	17
Obrázek 13 - Clona .....	17
Obrázek 14 - Náčrt rovné trati.....	32
Obrázek 15 - Nákres obloukové trati 1.....	35
Obrázek 16 - Nákres obloukové trati 2.....	35
Obrázek 17 - Definice Etendue.....	43
Obrázek 18 - Světlovod s konvexním čelem.....	43
Obrázek 19 - Světlovod s konkávním čelem.....	43
Obrázek 20 - Světlovod s matným čelem .....	44
Obrázek 21 - Model světlovodu s kulatým profilem (rozšířený na konci).....	44
Obrázek 22 – Intenzitní mapa .....	45
Obrázek 23 - Intenzitní profil.....	45
Obrázek 24 - Model světlovodu s kulatým profilem (ohnutý a rozšířený).....	46
Obrázek 25 - Intenzitní mapa .....	46
Obrázek 26 - Intenzitní profil.....	47
Obrázek 27 - Zrcadlení zdroje.....	47
Obrázek 28 - Model světlovodu se čtvercovým profilem (rozšířen symetricky).....	48
Obrázek 29 - Model světlovodu se čtvercovým profilem (rozšířený na konci).....	48
Obrázek 30 - Intenzitní mapa .....	48
Obrázek 31 - Intenzitní profil.....	49
Obrázek 32 - Model světlovodu se čtvercovým profilem (ohnutý a rozšířený).....	49
Obrázek 33 - Intenzitní mapa .....	50
Obrázek 34 - Intenzitní profil.....	50
Obrázek 35 - Model světlovodu se čtvercovým profilem (nesymetricky rozšířený).....	51
Obrázek 36 - Intenzitní mapa .....	51
Obrázek 37 - Intenzitní profil.....	52
Obrázek 38 - Intenzitní mapa za světlovodem .....	53
Obrázek 39 - Intenzitní mapa ve vzdálenosti 20m .....	53

## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Závislost svítivosti $I$ , vzdálenosti $l$ a úhlu $\phi$ , pro $R=\infty$ , $b=2,5$ m .....	33
Tabulka 2 - Závislost svítivosti $I$ , vzdálenosti $l$ a úhlu $\phi$ , pro $R=\infty$ , $b=5$ m .....	34
Tabulka 3 - Závislost svítivosti $I$ , vzdálenosti $l$ a úhlu $\phi$ , pro $R=400$ m, $b=2,5$ m .....	37
Tabulka 4 - Závislost svítivosti $I$ , vzdálenosti $l$ a úhlu $\phi$ , pro $R=400$ m, $b=5$ m .....	39
Tabulka 5 - Závislost svítivosti $I$ , vzdálenosti $l$ a úhlu $\phi$ , pro $R=250$ m, $b=2,5$ m .....	40
Tabulka 6 - Závislost svítivosti $I$ , vzdálenosti $l$ a úhlu $\phi$ , pro $R=250$ m, $b=5$ m .....	41

## Seznam grafů

Graf 1 - Celá apertura, zdroj v nulové poloze.....	18
Graf 2 - Celá apertura, řez $0^\circ$ , zdroj v nulové poloze.....	19
Graf 3- Celá apertura, řez $2^\circ 18'$ , zdroj v nulové poloze.....	19
Graf 4 - Celá apertura, řez $4^\circ 36'$ , zdroj v nulové poloze.....	19
Graf 5 - Celá apertura, řez $-4^\circ 36'$ , zdroj v nulové poloze .....	20
Graf 6 - Celá apertura, zdroj v +5 mm .....	20
Graf 7 - Celá apertura, řez $0^\circ$ , zdroj v +5 mm .....	21
Graf 8 - Celá apertura, řez $1^\circ 9'$ , zdroj v +5 mm .....	21
Graf 9 - Celá apertura, řez $4^\circ 36'$ , zdroj v +5 mm .....	21
Graf 10 - Celá apertura, řez $-4^\circ 36'$ , zdroj v +5 mm.....	22
Graf 11 - Celá apertura, zdroj v -5 mm.....	22
Graf 12 - Celá apertura, řez $0^\circ$ , zdroj v -5 mm.....	23
Graf 13 - Celá apertura, řez $1^\circ 9'$ , zdroj v -5 mm.....	23
Graf 14 - Celá apertura, řez $4^\circ 36'$ , zdroj v -5 mm.....	23
Graf 15 - Celá apertura, řez $-4^\circ 36'$ , zdroj v -5 mm.....	24
Graf 16 - Subapertura 3A, zdroj v nulové poloze .....	24
Graf 17 - Subapertura 3B, zdroj v nulové poloze .....	25
Graf 18 - Subapertura 3C, zdroj v nulové poloze .....	25
Graf 19 - Subapertura 3D, zdroj v nulové poloze .....	25
Graf 20 - Subapertura 3E, zdroj v nulové poloze.....	26
Graf 21 - Subapertura 3A, zdroj v +5 mm.....	26
Graf 22 - Subapertura 3B, zdroj v +5 mm.....	27
Graf 23 - Subapertura 3C, zdroj v +5 mm.....	27
Graf 24 - Subapertura 3D, zdroj v +5 mm .....	27
Graf 25 - Subapertura 3E, zdroj v +5 mm .....	28
Graf 26 - Subapertura 3A, zdroj v -5 mm .....	28
Graf 27 - Subapertura 3B, zdroj v -5 mm.....	28
Graf 28 - Subapertura 3C, zdroj v -5 mm.....	29
Graf 29 - Subapertura 3D, zdroj v -5 mm .....	29
Graf 30 - Subapertura 3E, zdroj v -5 mm.....	29
Graf 31 - Směrová charakteristika svítilny.....	30
Graf 32 - Spodní toleranční hranice, pro $R=\infty$ , $b=2,5$ m .....	33
Graf 33 - Spodní toleranční hranice, pro $R=\infty$ , $b=5$ m .....	34
Graf 34 - Spodní toleranční hranice, pro $R=400$ m, $b=2,5$ m.....	38
Graf 35 - Spodní toleranční hranice, pro $R=400$ m, $b=5$ m.....	39
Graf 36 - Spodní toleranční hranice, pro $R=250$ m, $b=2,5$ m.....	41
Graf 37 - Spodní toleranční hranice, pro $R=250$ m, $b=5$ m.....	42

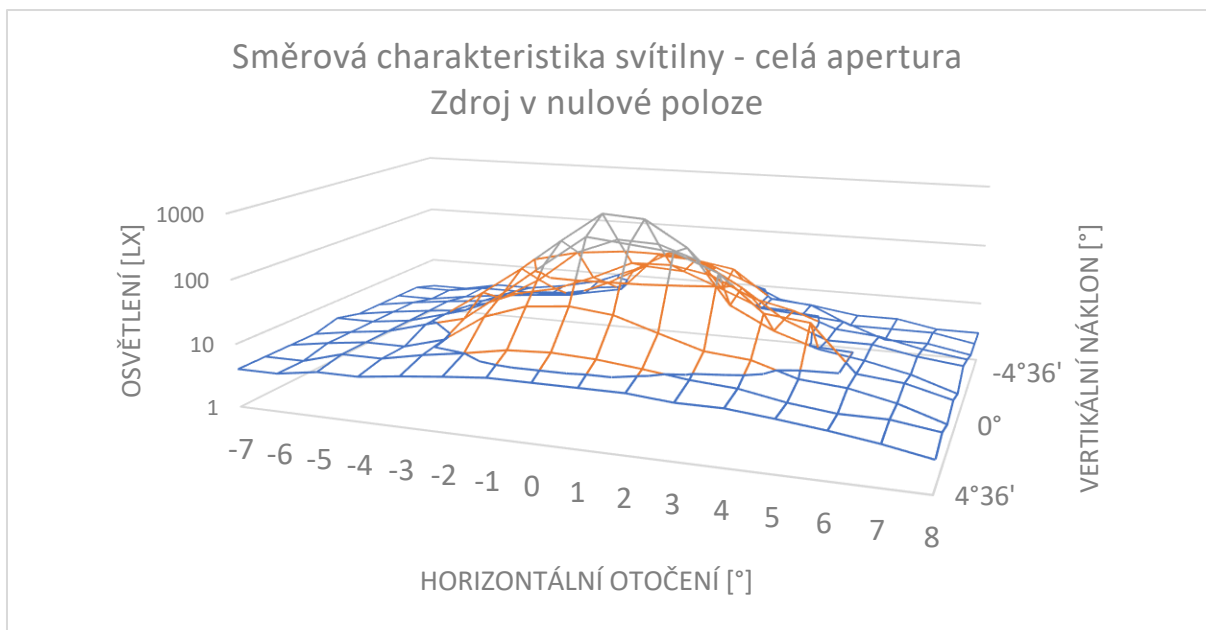
# Příloha 1 – výsledky měření s využitím celé apertury

## Výsledky měření celé apertury

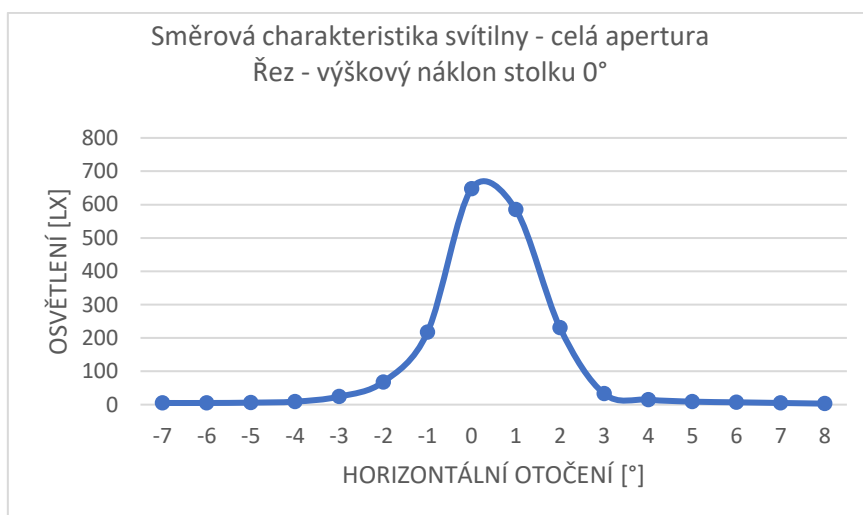
Měření se zdrojem v nulové poloze

Tabulka 7 - Měření v nulové poloze

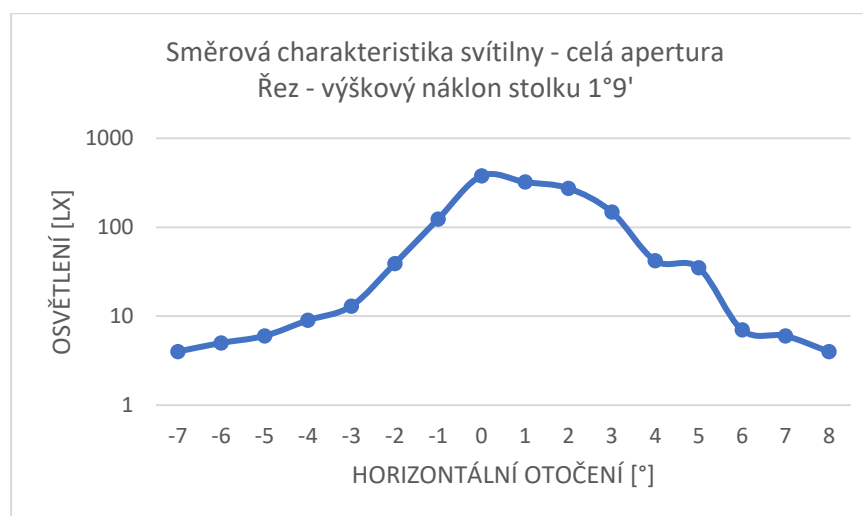
Výškový náklon	Náklon do stran [°]															
	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
4°36'	4	4	5	5	6	7	8	8	8	8	7	7	6	5	4	3
3°27'	4	4	6	6	8	10	13	14	13	11	9	8	6	5	5	4
2°18'	4	5	6	6	9	24	40	46	39	24	15	13	8	7	5	3
1°9'	4	5	6	9	13	39	124	378	322	274	148	42	35	7	6	4
0°	5	5	6	9	24	68	217	648	585	231	33	15	9	7	5	3
-1°9'	4	5	6	7	13	31	102	185	173	102	43	15	8	8	6	5
-2°18'	4	5	6	7	11	15	27	54	56	42	20	14	8	7	5	4
-3°27'	4	4	5	6	7	8	15	34	31	17	9	8	7	4	4	3
-4°36'	4	4	5	5	5	6	8	38	35	27	9	8	4	4	4	3
-5°45'	3	3	4	4	5	7	13	30	22	12	6	5	4	4	3	3



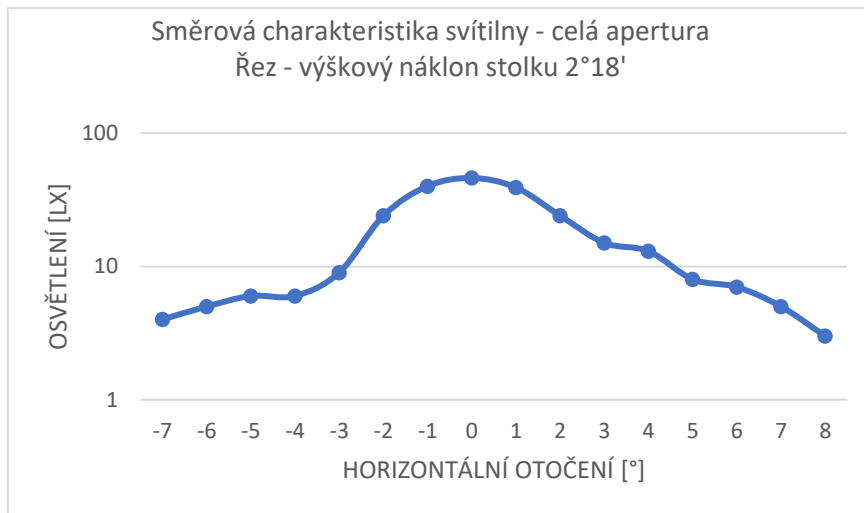
*Graf 38 - Celá apertura*



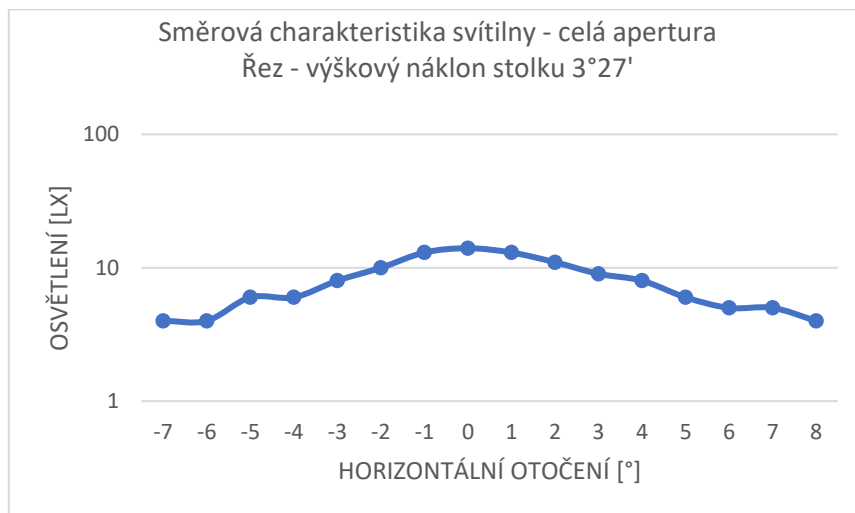
*Graf 39 - Řez, výškový náklon 0°*



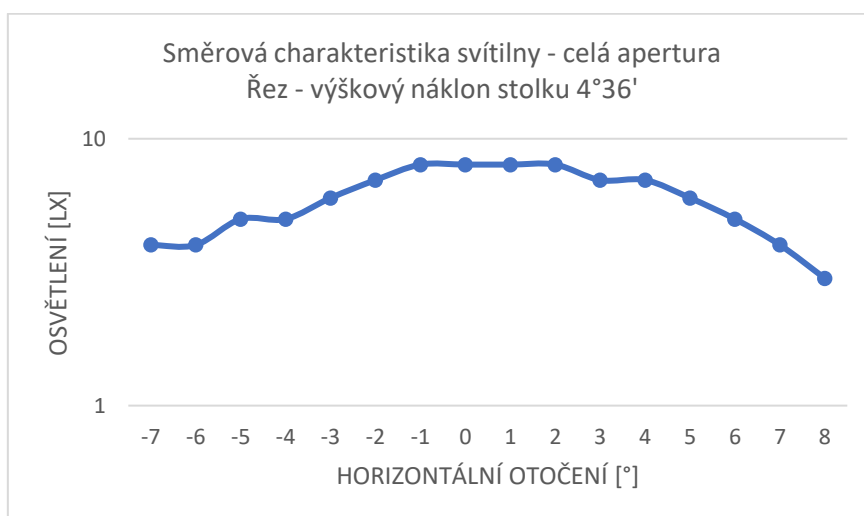
*Graf 40 - Řez, výškový náklon 1°9'*



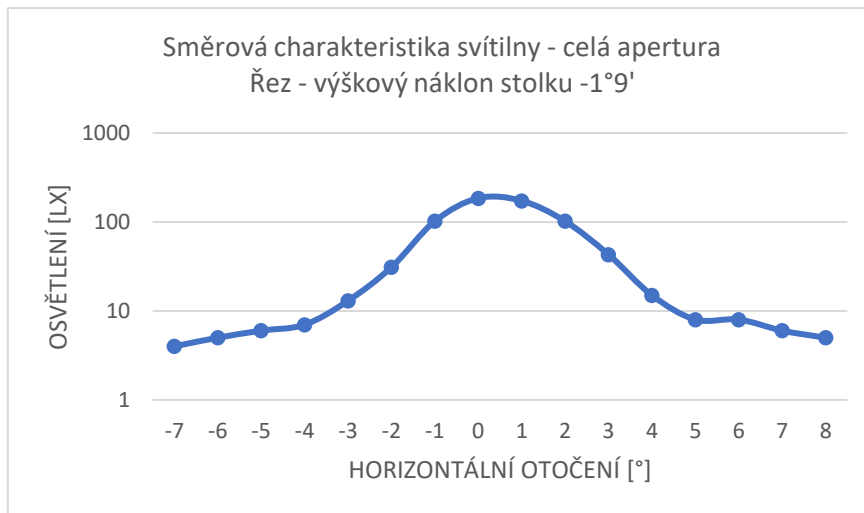
Graf 41 - Řez, výškový náklon 2°18'



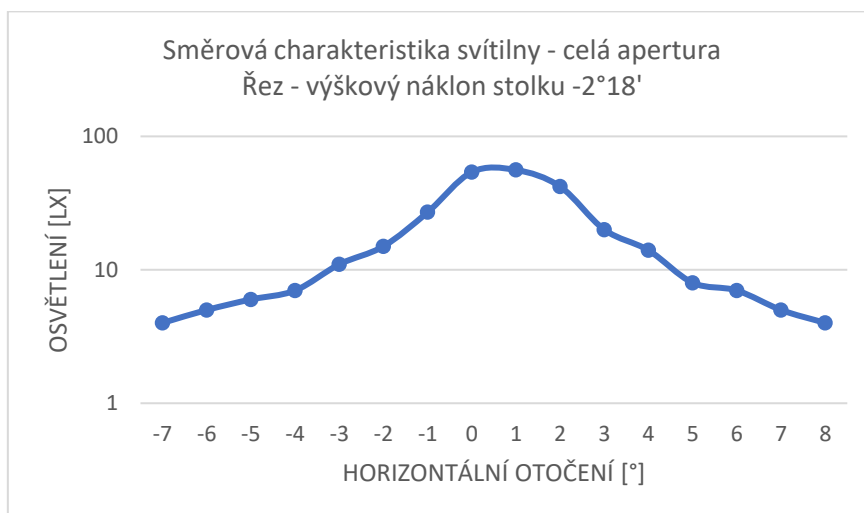
Graf 42 - - Řez, výškový náklon 3°27'



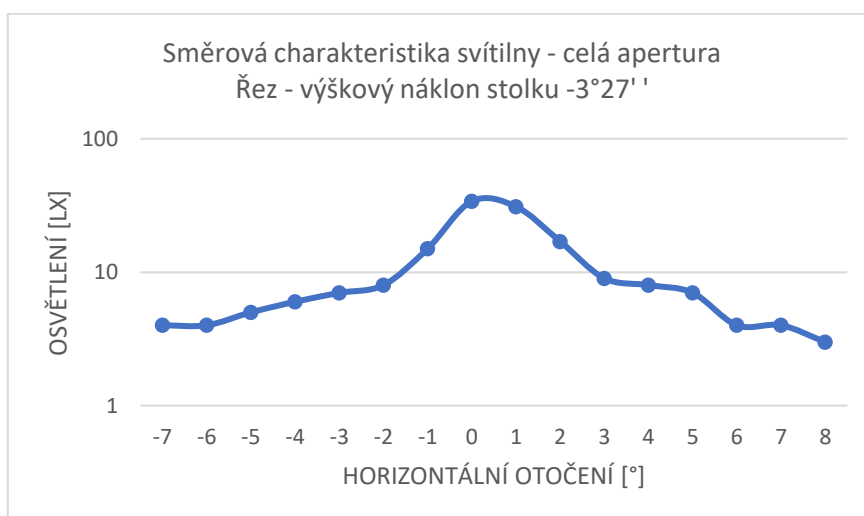
Graf 43 - Řez, výškový náklon 4°36'



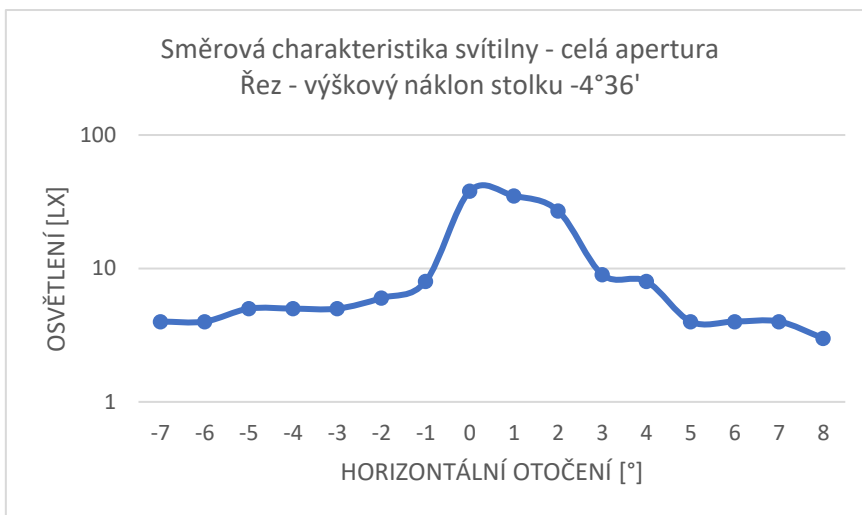
Graf 44 - Řez, výškový náklon -1°9'



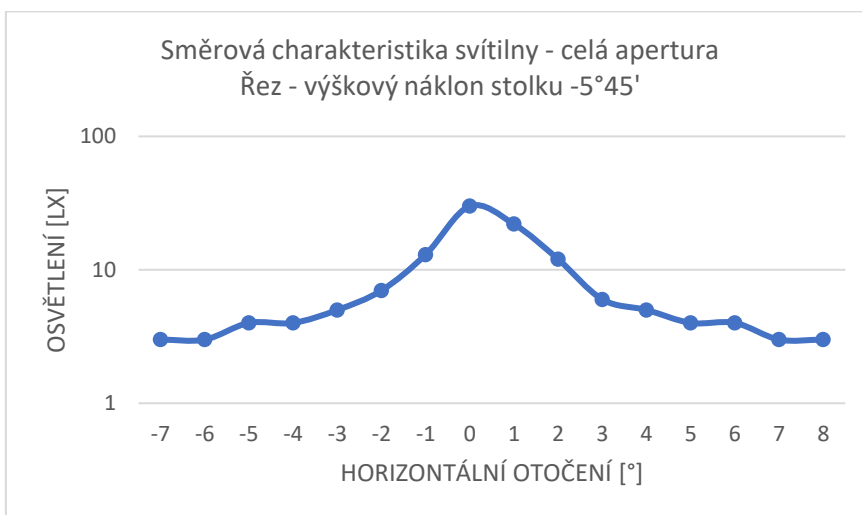
Graf 45 - Řez, výškový náklon -2°18'



Graf 46 - Řez, výškový náklon -3°27'



Graf 47 - Řez, výškový náklon -4°36'



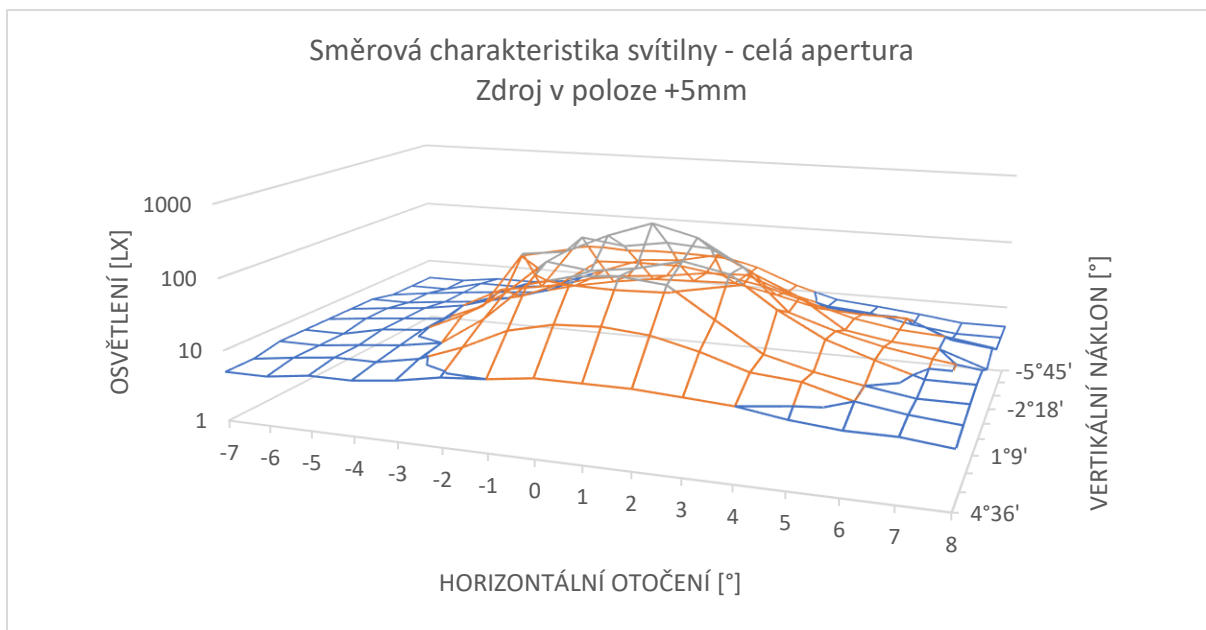
Graf 48 - Řez, výškový náklon -5°45'



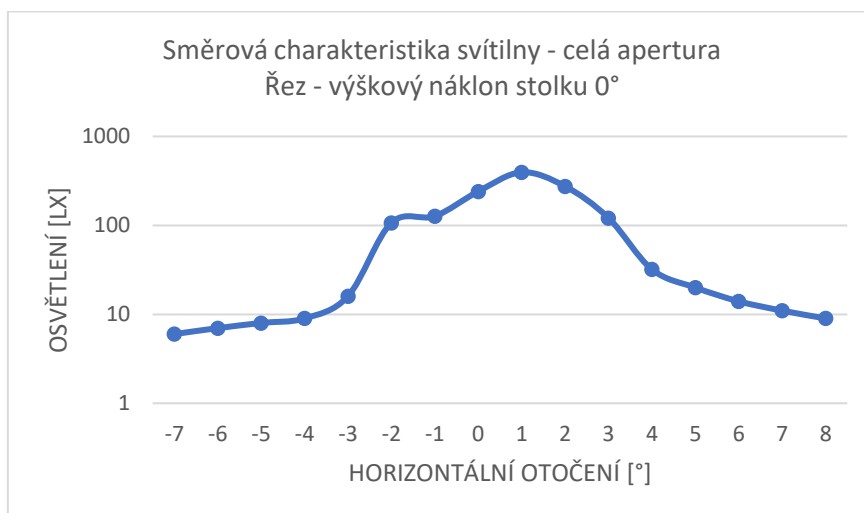
Měření se zdrojem v poloze +5mm

Tabulka 8 - Měření v poloze +5mm

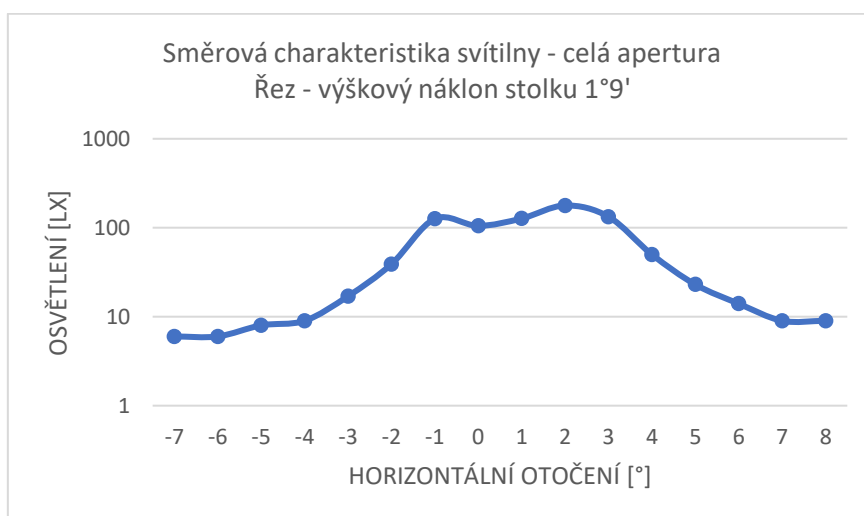
Výškový n	Náklon do stran [°]															
	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
4°36'	5	5	6	6	7	9	10	12	12	12	11	10	8	7	7	6
3°27'	5	6	7	7	9	15	29	40	43	38	27	17	15	10	8	7
2°18'	6	6	7	8	10	25	85	122	138	119	47	19	13	10	8	8
1°9'	6	6	8	9	17	39	126	105	127	178	133	50	23	14	9	9
0°	6	7	8	9	16	107	127	241	395	275	121	32	20	14	11	9
-1°9'	6	7	8	10	20	25	153	126	157	143	68	36	14	11	10	6
-2°18'	6	6	7	8	11	19	49	52	52	42	32	21	14	11	10	8
-3°27'	5	6	7	8	9	13	17	21	22	23	17	12	11	11	6	5
-4°36'	5	5	7	7	8	12	15	17	21	22	13	9	8	6	5	5
-5°45'	5	5	6	6	7	12	20	22	30	21	12	8	7	6	5	5



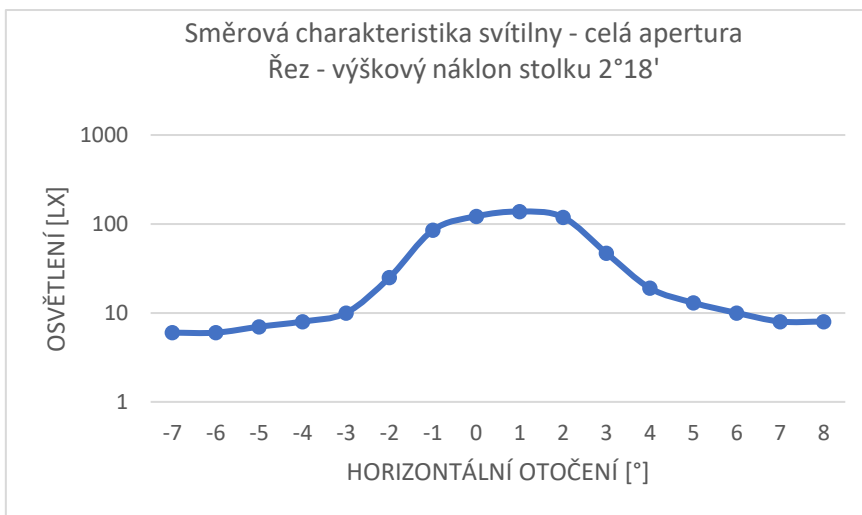
*Graf 49 - Celá apertura*



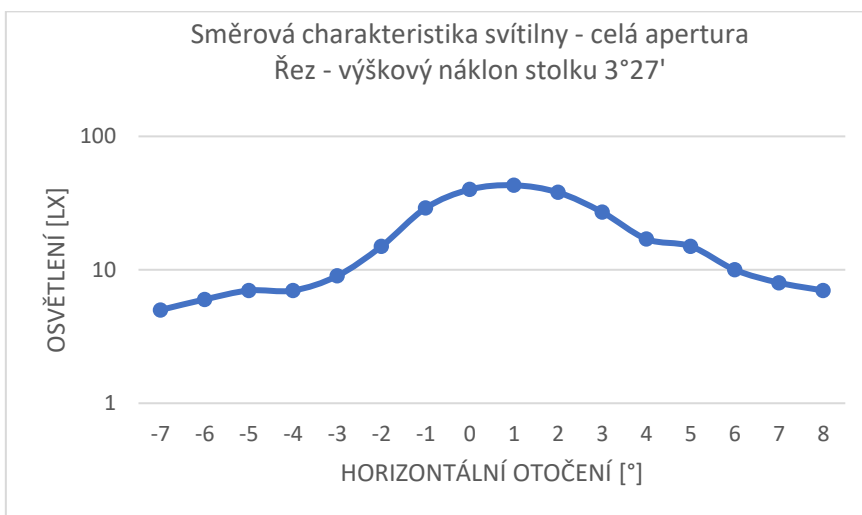
*Graf 50 - Řez, výškový náklon 0°*



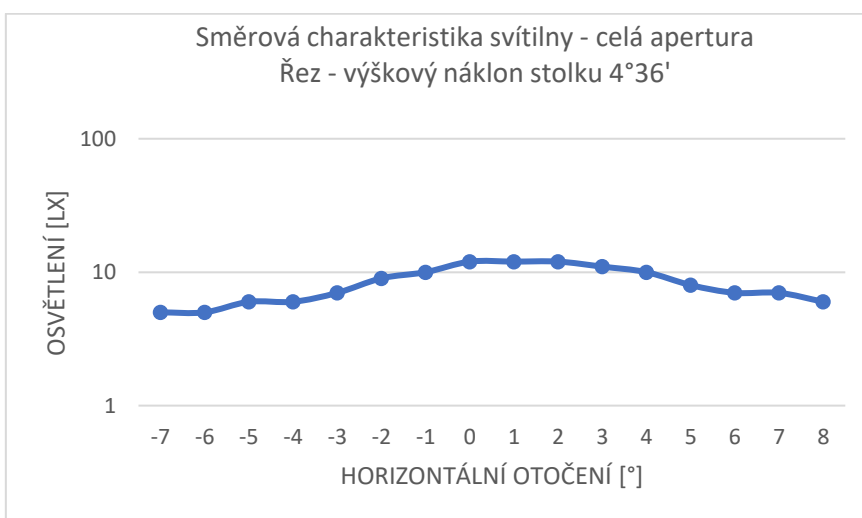
*Graf 51 - Řez, výškový náklon 1°9'*



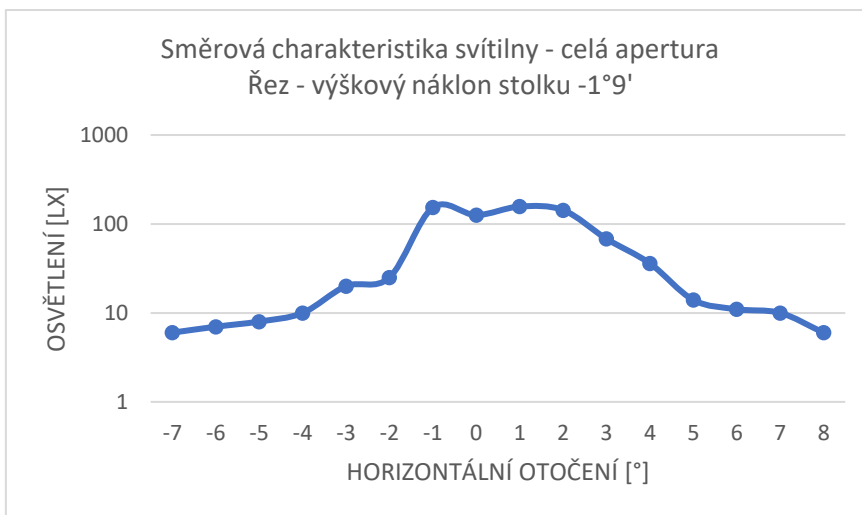
Graf 52 - Řez, výškový náklon 2°18'



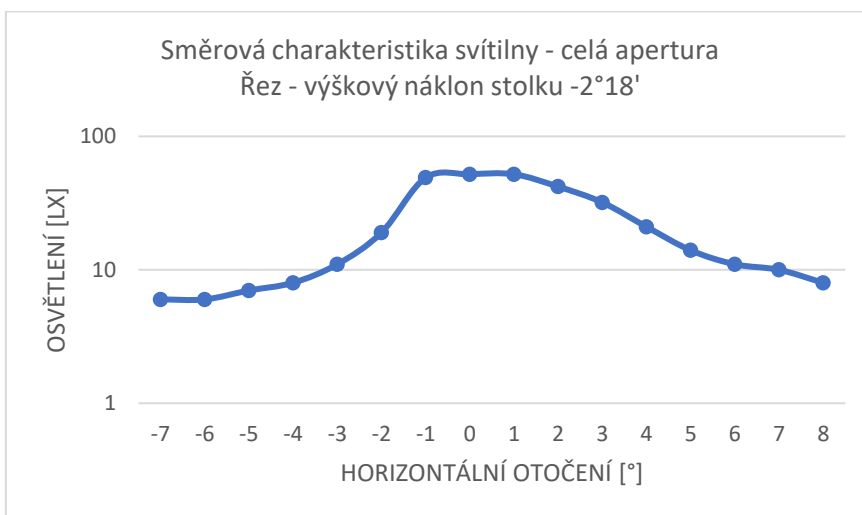
Graf 53 - Řez, výškový náklon 3°27'



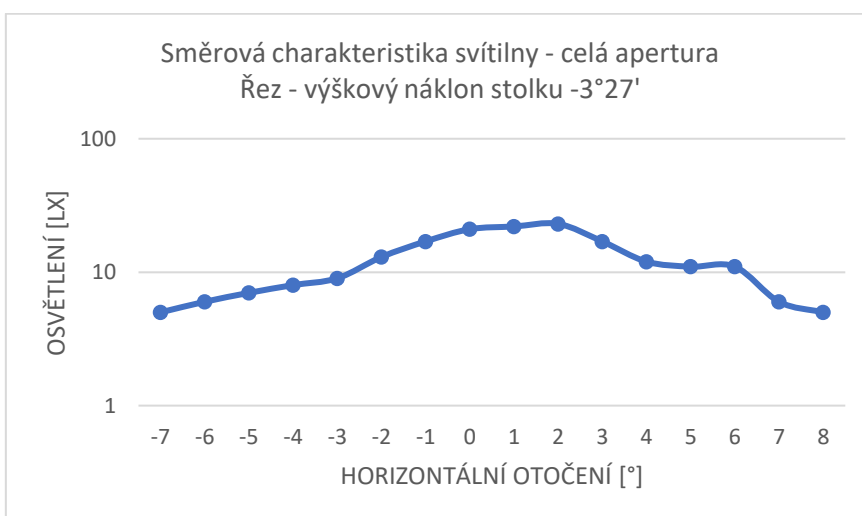
Graf 54 - - Řez, výškový náklon 4°36'



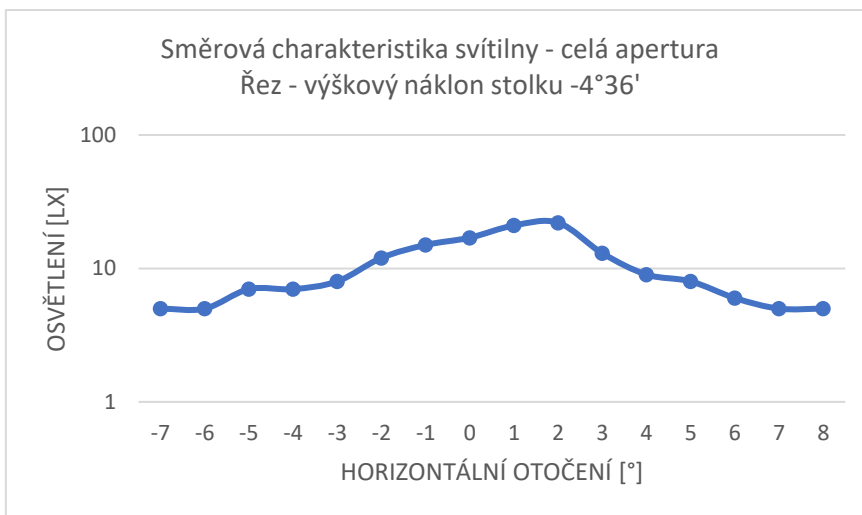
Graf 55 - Řez, výškový náklon -1°9'



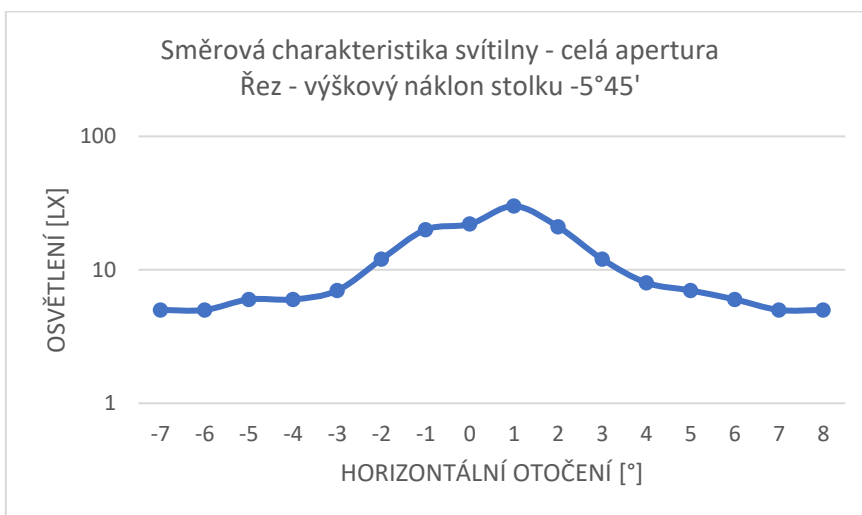
Graf 56 - Řez, výškový náklon -2°18'



Graf 57 - Řez, výškový náklon -3°27'



Graf 58 - Řez, výškový náklon -4°36'

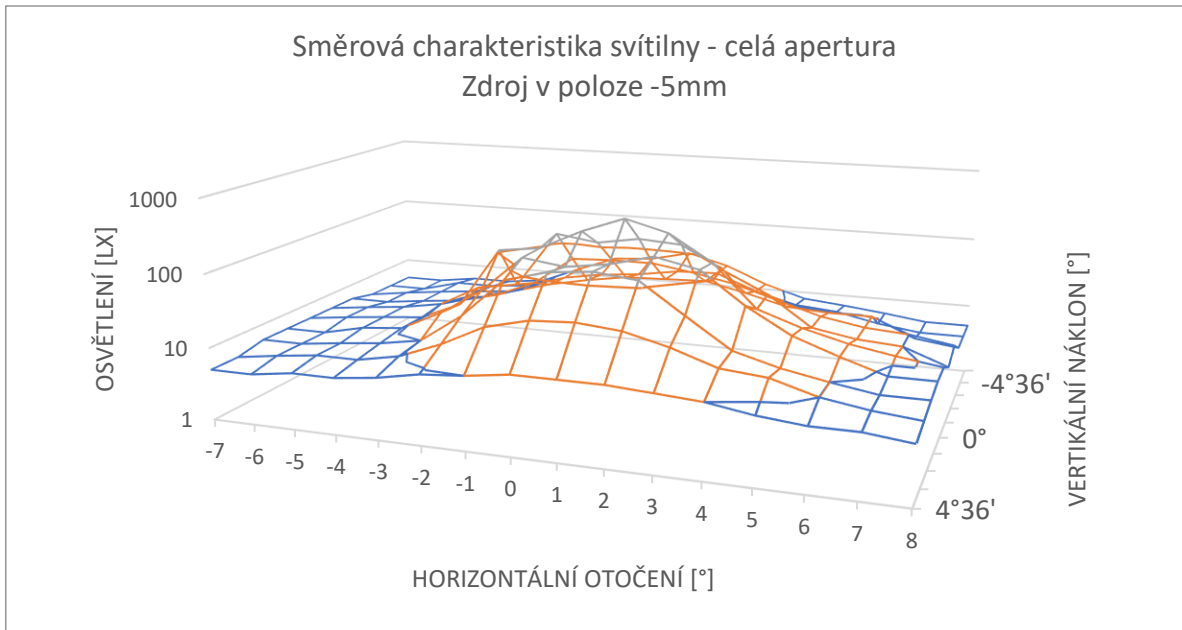


Graf 59 - Řez, výškový náklon -5°45'

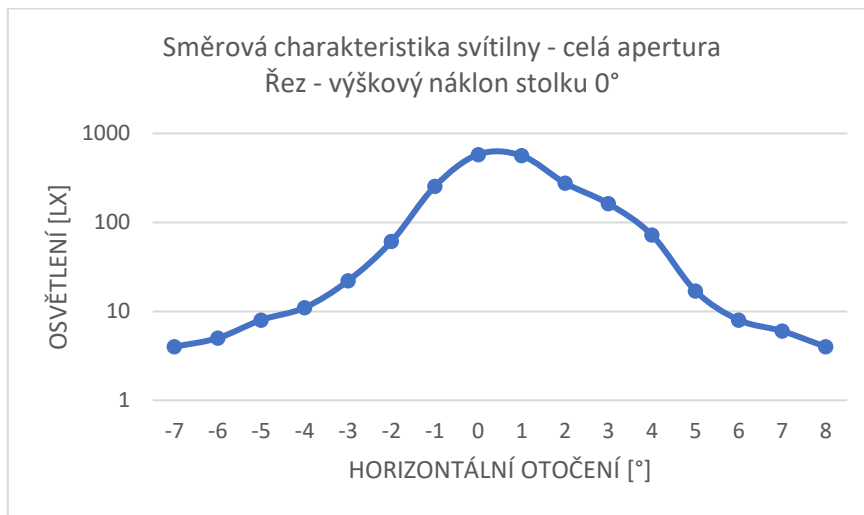
Měření se zdrojem v poloze -5mm

Tabulka 9 - Měření v poloze -5mm

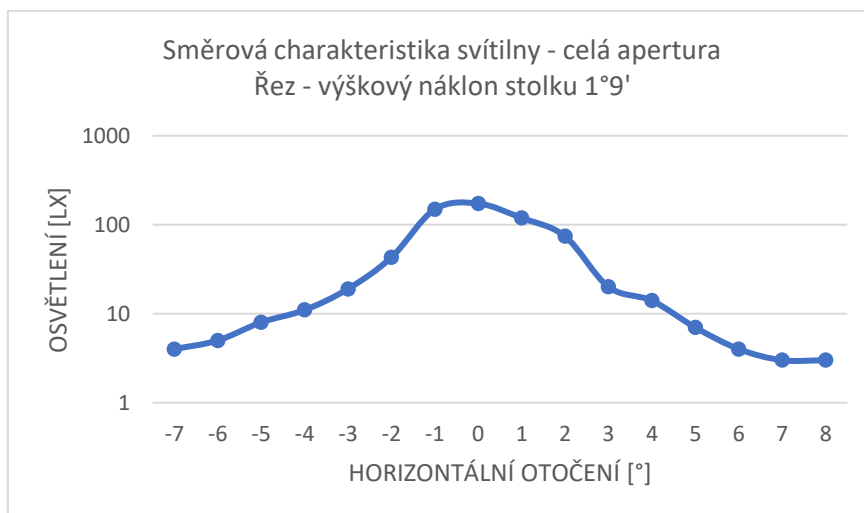
Výškový náklon	Náklon do stran [°]															
	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
4°36'	3,7	6	12,5	16,8	19,8	18,5	10,8	6,6	6,9	9,2	14,4	16,3	11,6	9,1	5,6	3,2
3°27'	5,2	11,9	19,3	22,6	24,3	32,7	17,1	13	13,6	19,2	21,9	21	19,8	17,6	11,2	6,1
2°18'	6,4	13,2	20,1	26,6	37,5	50,2	61	63,9	62,2	54,9	41,7	29,8	22,8	17,7	8,4	4,5
1°9'	4	5	8	11	19	43	149	173	119	739	20	14	7	4	3	3
0°	4	5	8	11	22	61	254	580	562	276	162	72	17	8	6	4
-1°9'	4	5	6	13	19	33	71	169	144	102	58	37	10	9	6	4
-2°18'	5,6	10,5	23,4	28,8	34,2	44,7	74,8	95,2	69,8	50,3	33,2	26	25,1	9,3	6,9	5
-3°27'	4	6,9	15,7	23,6	26,1	33,4	51,1	64,1	48,5	40,3	28,7	24	15,9	9,9	6,6	3,2
-4°36'	3,4	4,4	9,8	14,5	16,5	19,5	29,2	67,3	49	32,1	21	14,3	9,1	6,8	4,1	3,1
-5°45'	2,6	3,3	5	8,2	9,8	17,6	23,1	45,1	30,7	19,7	12,7	9,7	6,6	4,2	3	2,6



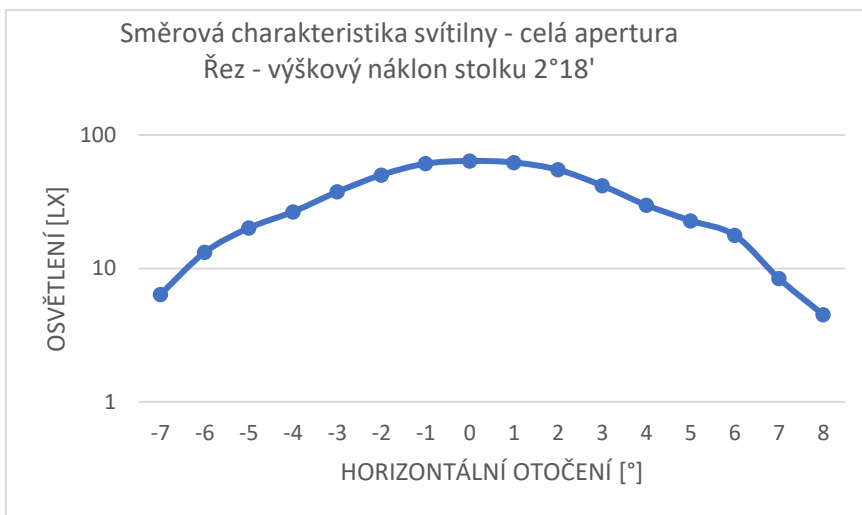
*Graf 60 - Celá apertura*



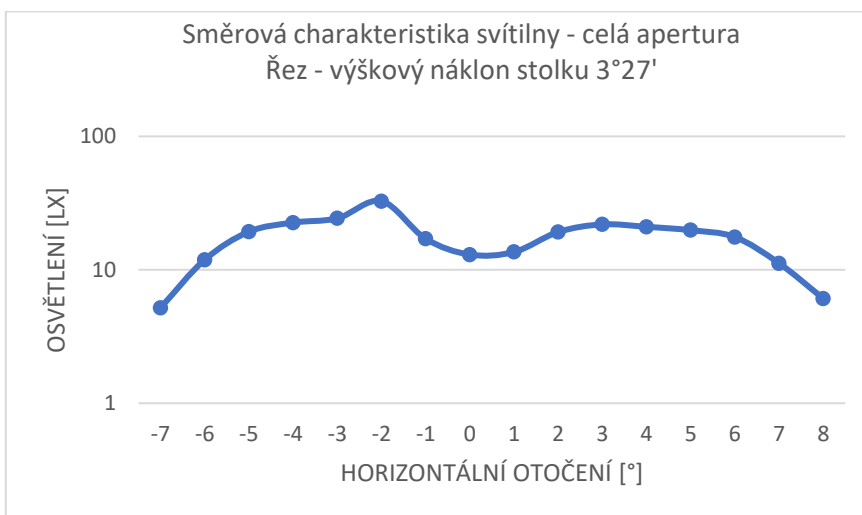
*Graf 61 - Řez, výškový náklon 0°*



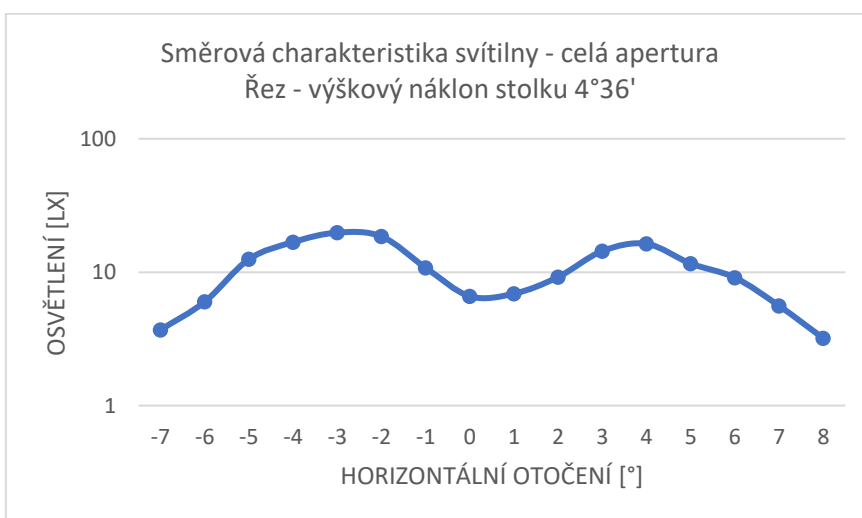
*Graf 62 - Řez, výškový náklon 1°9'*



Graf 63 - Řez, výškový náklon 2°18'

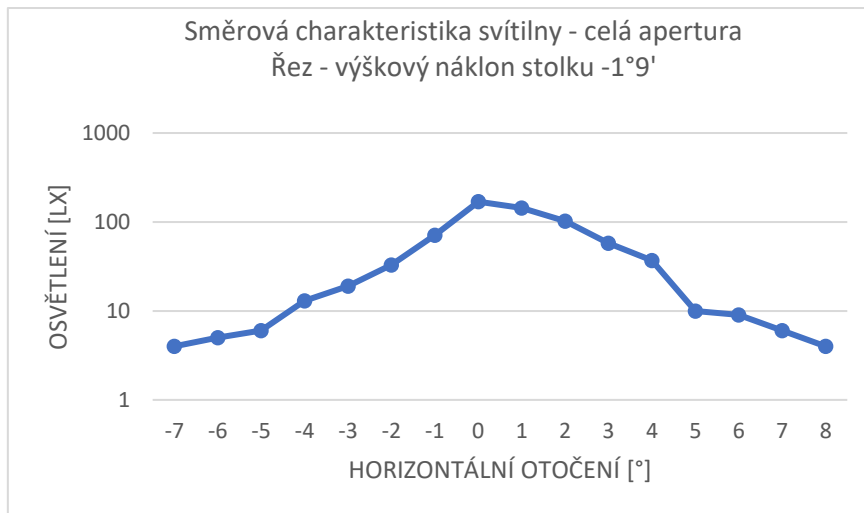


Graf 64 - Řez, výškový náklon 3°27'

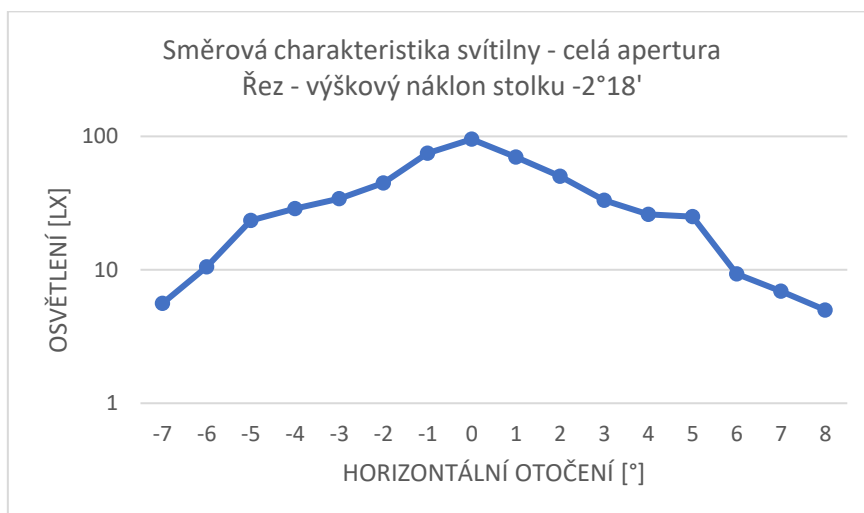


Graf 65 - Řez, výškový náklon 4°36'

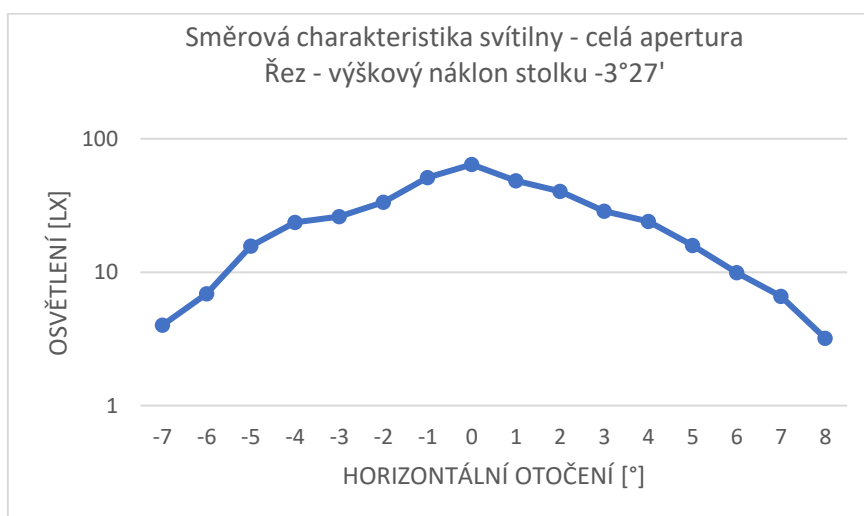




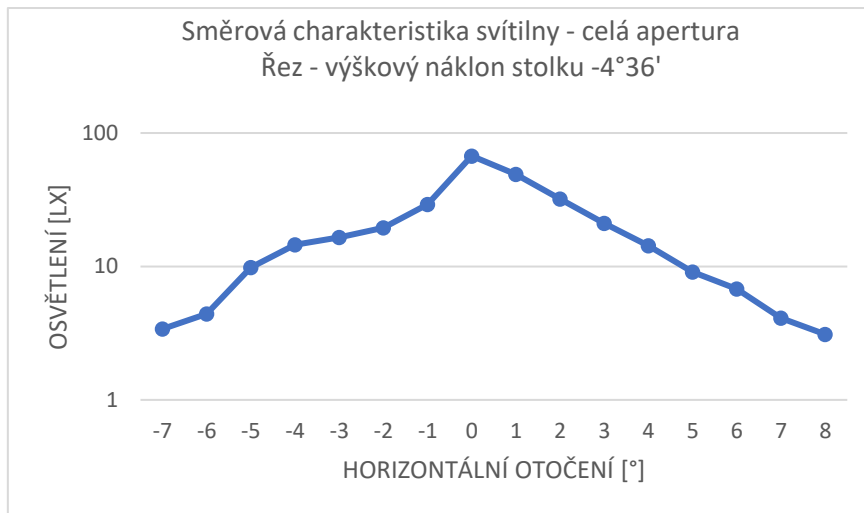
Graf 66 - Řez, výškový náklon -1°9'



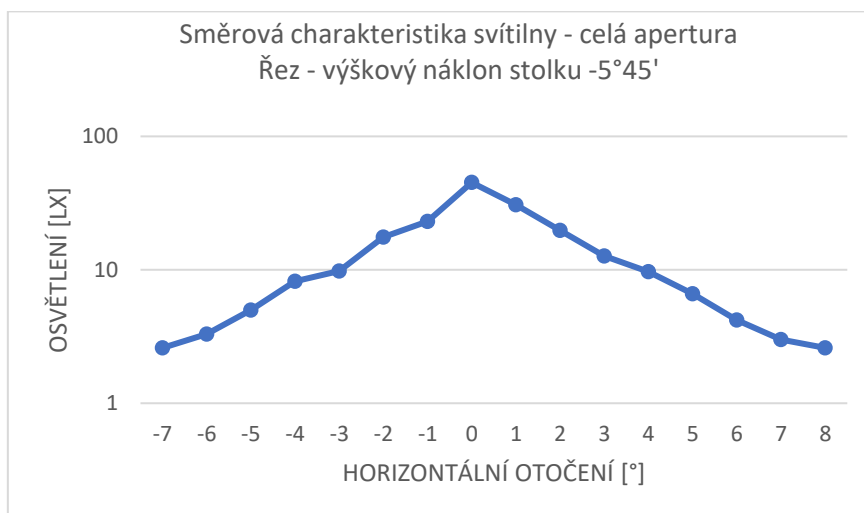
Graf 67 - Řez, výškový náklon -2°18'



Graf 68 - Řez, výškový náklon -3°27'



Graf 69 - Řez, výškový náklon -4°36'



Graf 70 - Řez, výškový náklon -5°45'

## Příloha 2 – výsledky měření vybraných subapertur

Zdroj v nulové poloze

Tabulka 10 - Měření v nulové poloze se clonou

### Otvor 3A

Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,3	0,4	0,6	0,9	1,4	3,1	2,9	2,7	3,1	3,5	2,8	2	1,2	0,7	0,5	0,4	0,3

### Otvor 3B

Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,3	0,6	0,8	1,2	1,7	4,3	23	31	34	25	18	13	9,9	6,8	3,7	1,9	0,9

### Otvor 3C

Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,5	0,7	1,2	1,7	2,1	3,9	11	43	85	62	34	18	9,8	4,8	2,6	1,4	0,9

### Otvor 3D

Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,5	0,8	1,1	1,8	3,5	9,2	26	40	33	46	62	39	14	6,8	5,3	4,6	4

### Otvor 3E

Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,2	0,2	0,4	0,5	0,9	1,3	3,6	14	24	21	11	4,4	2,5	1,6	1,1	0,9	0,6

### Otvor 1C

Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,7	1,4	3,1	3,8	1,2	0,7	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2

### Otvor 2C

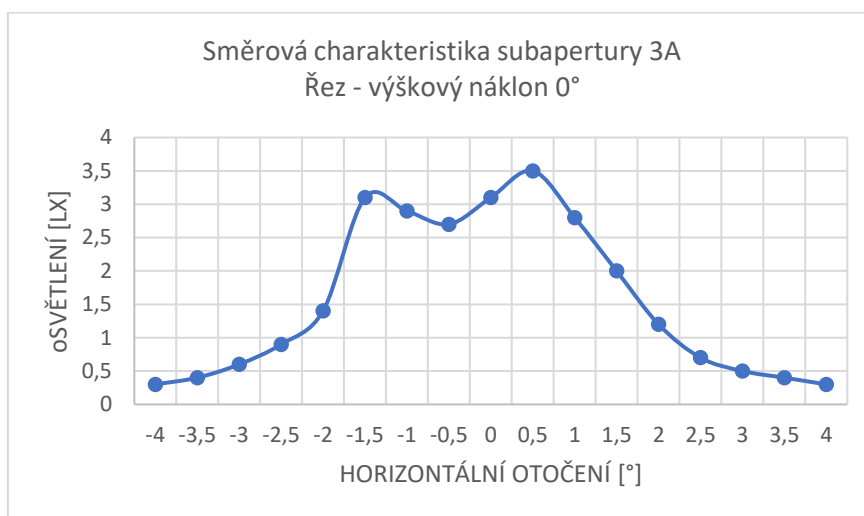
Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,3	0,4	0,5	0,7	1,1	3,1	4,7	14	50	48	13	5,3	2,8	1,4	1	0,9	0,5

### Otvor 4C

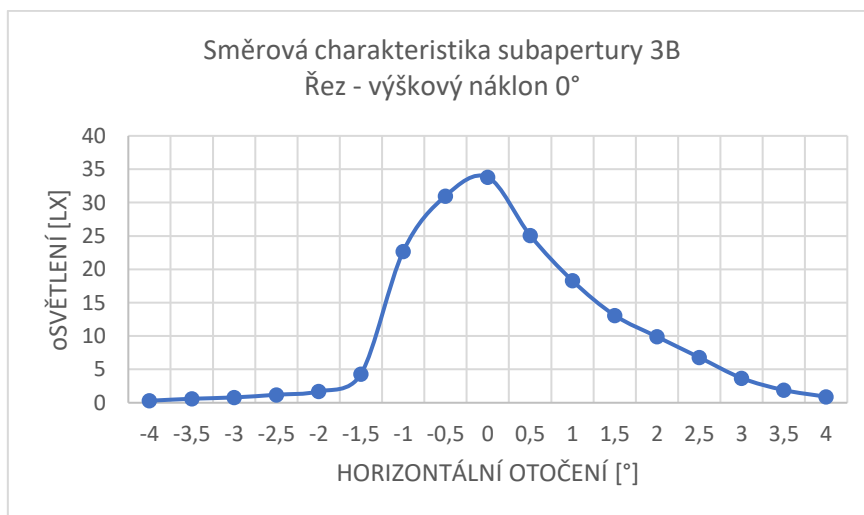
Výškový náklon	Stranový náklon																	
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	
0°	0,1	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4	0,6	1	2,3	3,4	2,8	1,7	0,9	0,5	0,4	0,3	0,3	

### Otvor 5C

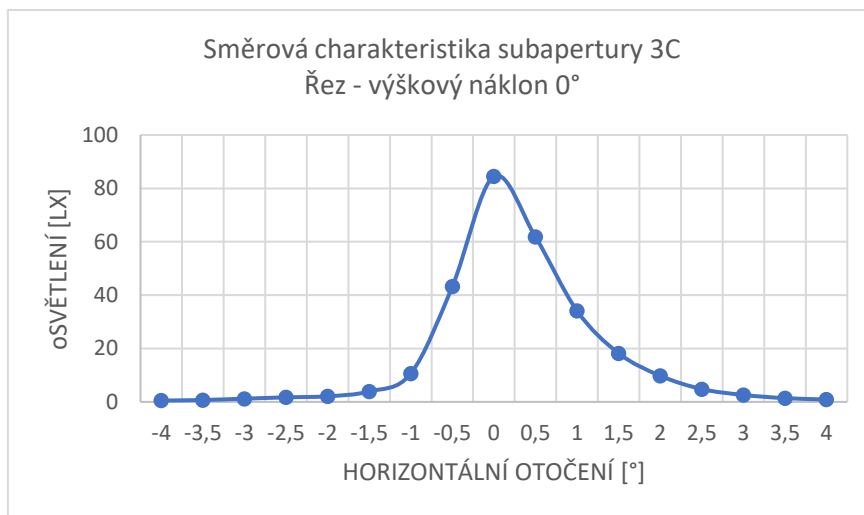
Výškový náklon	Stranový náklon																	
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	
0°	0,2	0,2	0	0,2	0	0,2	0,3	0,4	0,6	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	



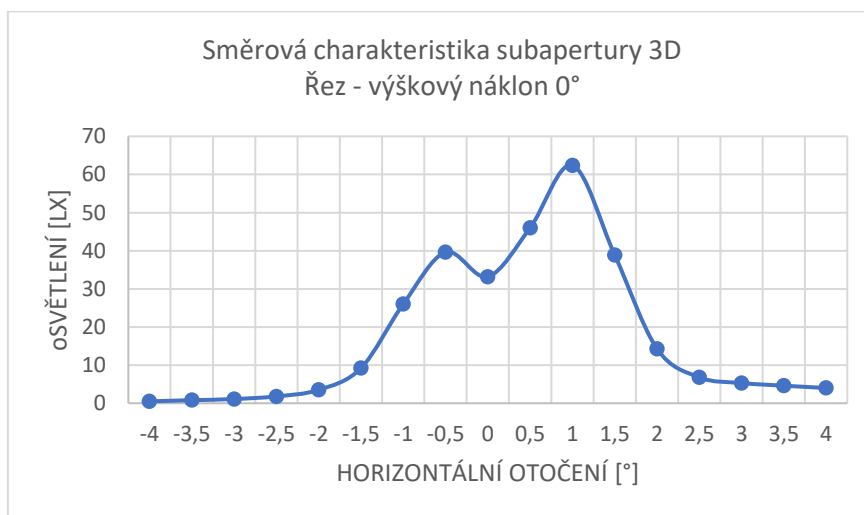
Graf 71 - Otvor 3A



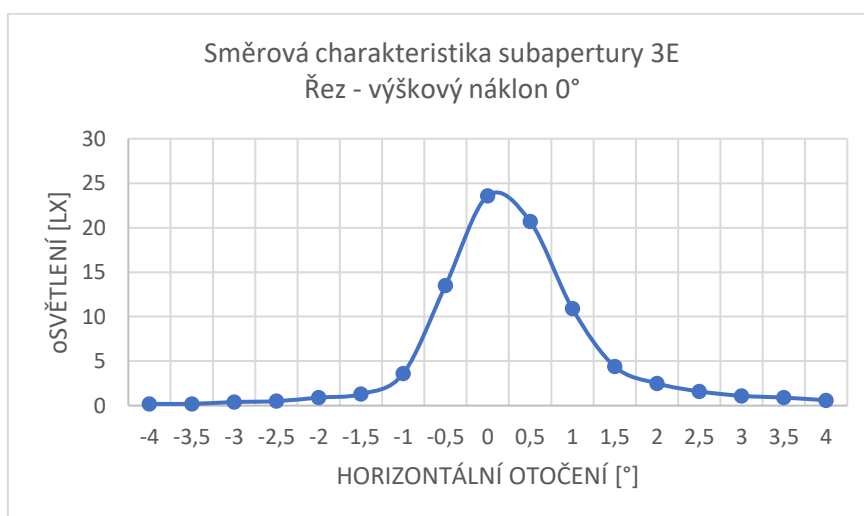
Graf 72 - Otvor 3B



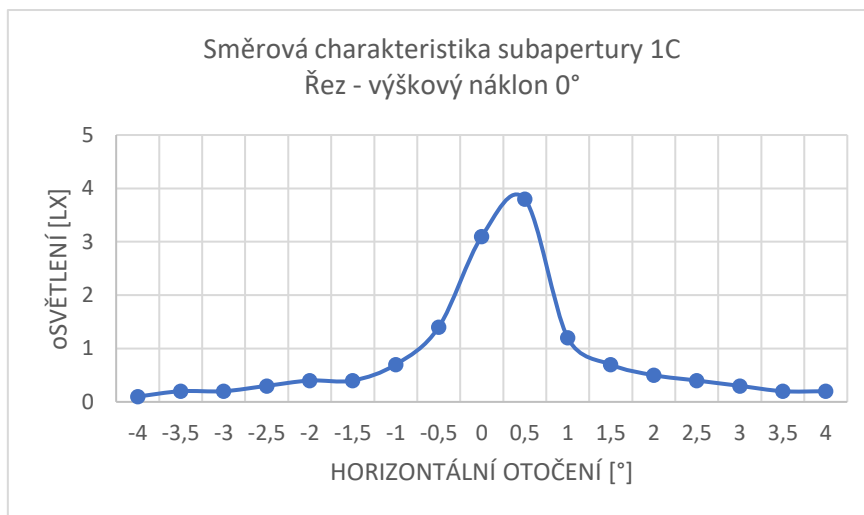
*Graf 73 - Otvor 3C*



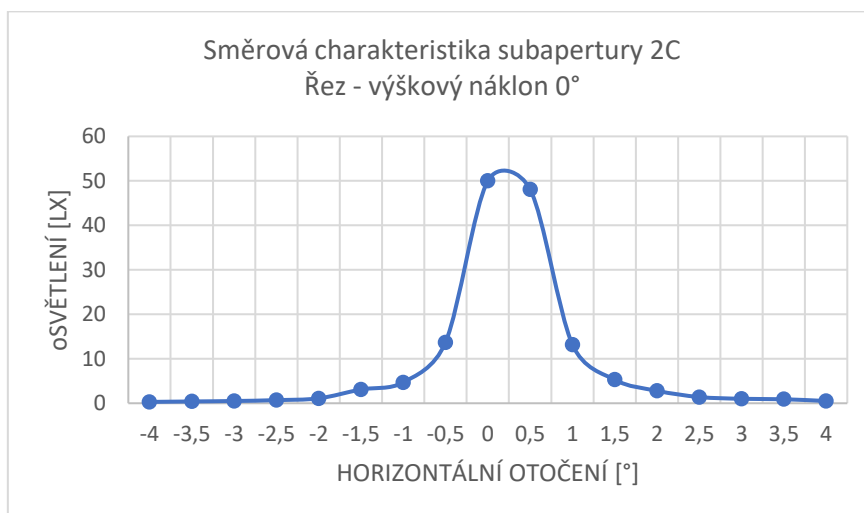
*Graf 74 - Otvor 3D*



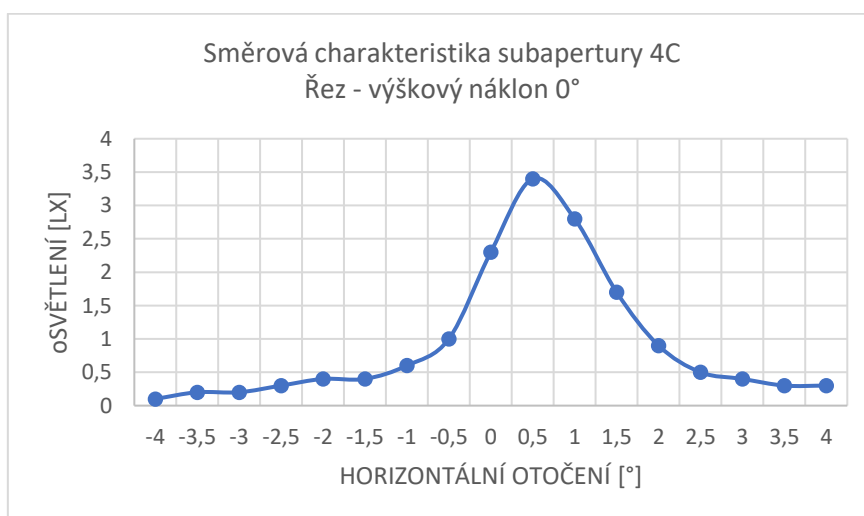
*Graf 75 - Otvor 3E*



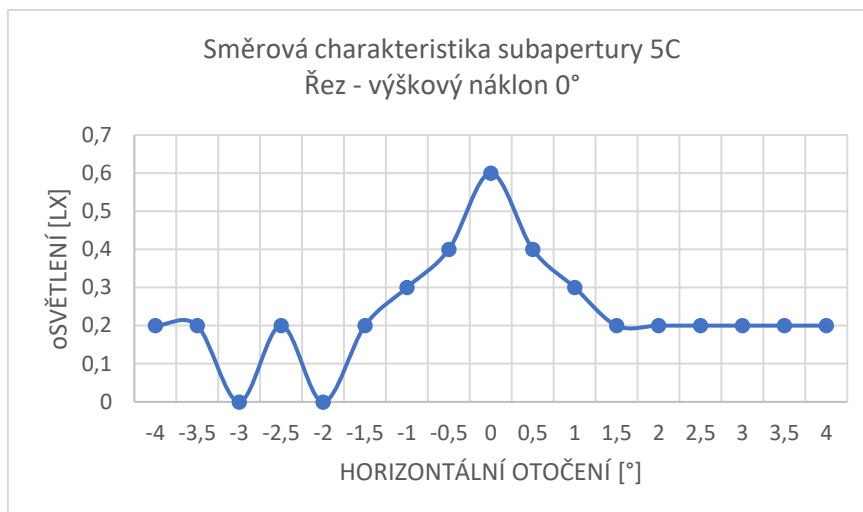
Graf 76 - Otvor 1C



Graf 77 - Otvor 2C



Graf 78 - Otvor 4C



Graf 79 - Otvor 5C

Měření se zdrojem v poloze +5mm

Tabulka 11 - Měření v poloze +5mm se clonou

**Otvor 3A**

Výškový náклон	Stranový náклон																
	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,4	0,4	0,4	0,5	0,6	1,2	2,3	3,8	5,4	3,6	2,9	2	2,2	2,7	3	2,9	2,7

**Otvor 3B**

Výškový náклон	Stranový náклон																
	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	1,1	1,2	1,5	1,8	2,5	4,2	8,7	25	45	43	26	22	19	15	8,6	3	1,3

**Otvor 3C**

Výškový náклон	Stranový náклон																
	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,1	0,1	0,3	0,6	1	1,9	4,3	8	23	48	65	46	16	6,9	3,4	1,7	0,9

**Otvor 3D**

Výškový náклон	Stranový náклон																
	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,5	0,7	1,2	2	4,2	8,3	17	33	48	33	12	5,9	3,6	3	3,5	4,4	3,7

**Otvor 3E**

Výškový náклон	Stranový náклон																
	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,8	1	1,2	1,7	2,1	2,6	3,1	3,9	4,5	3,9	2,2	1,3	1	0,7	0,6	0,5	0,4

### Otvor 1C

Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,5	0,7	2	4,7	2,6	0,8	0,6	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2

### Otvor 2C

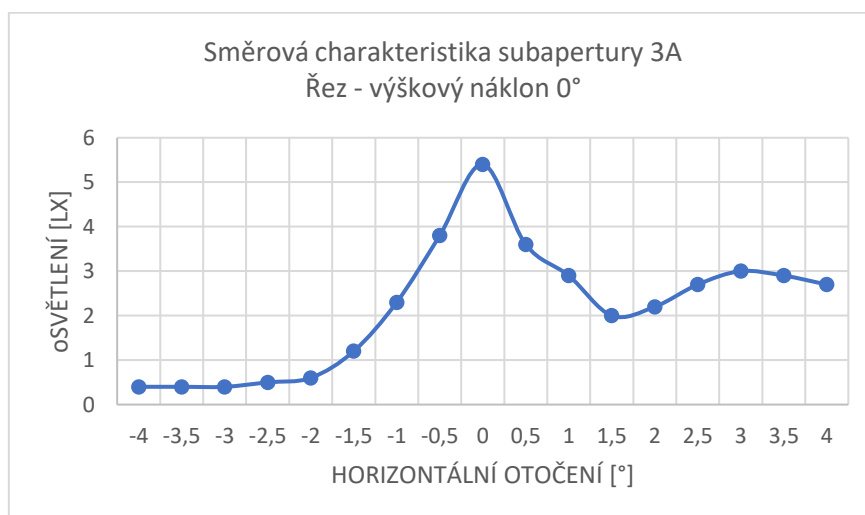
Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,6	0,7	1,2	1,9	3,6	6,3	11	22	44	31	14	6,4	3,2	1,8	1	0,6	0,5

### Otvor 4C

Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,1	0,2	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2	2,5	12	22	16	11	11	9,5	3,7	1,5	0,8

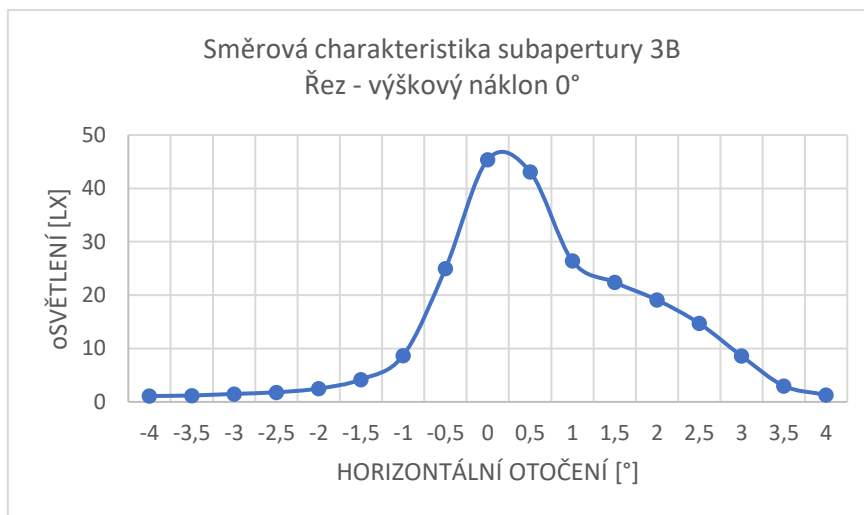
### Otvor 5C

Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-1	-1	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

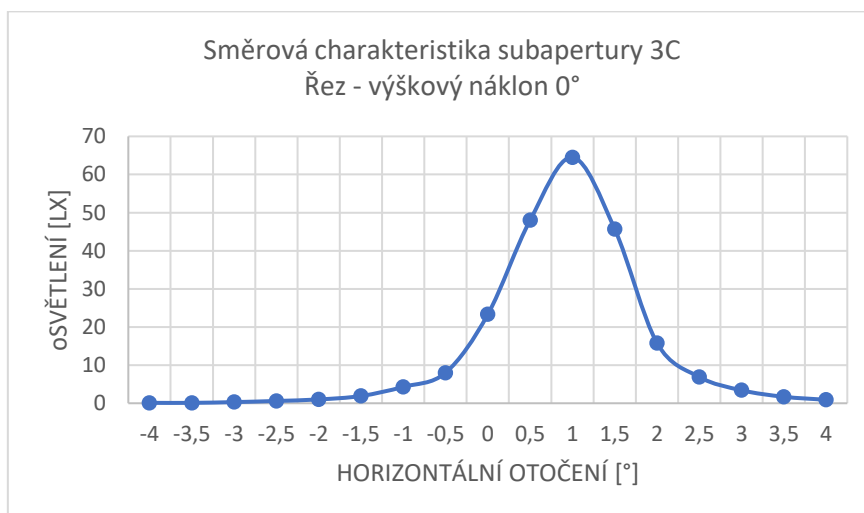


Graf 80 - Otvor 3A

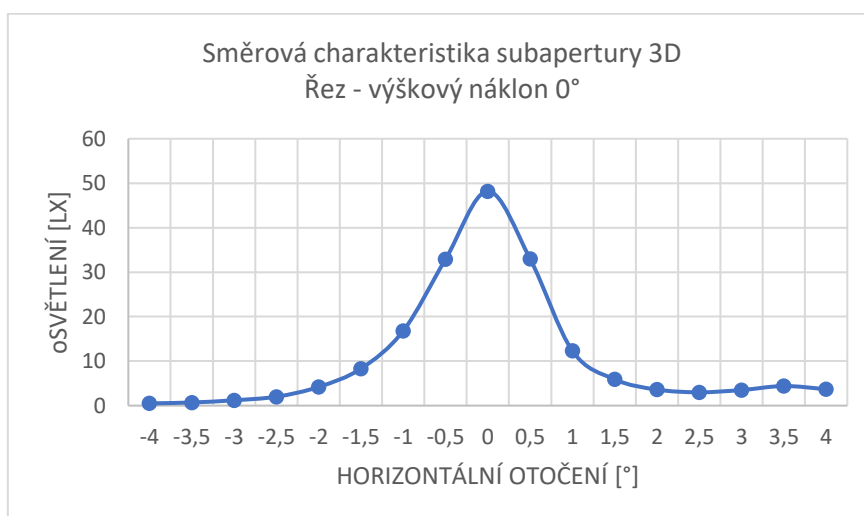




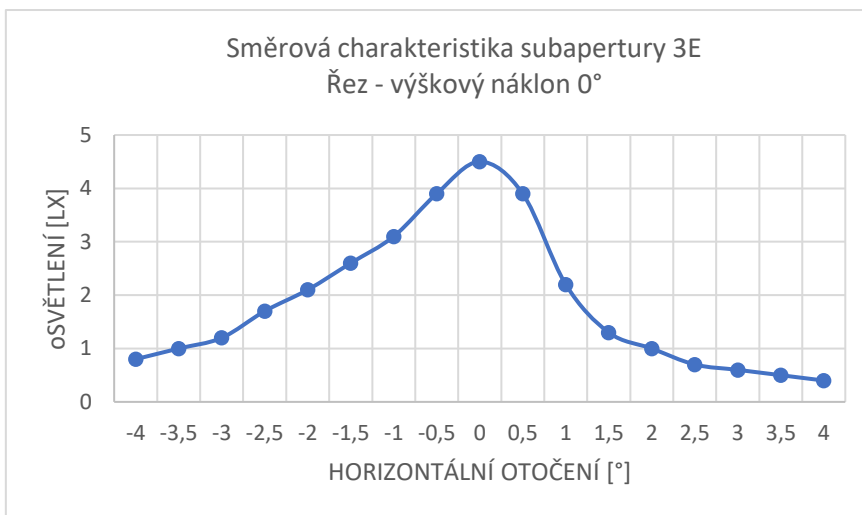
Graf 81 - Otvor 3B



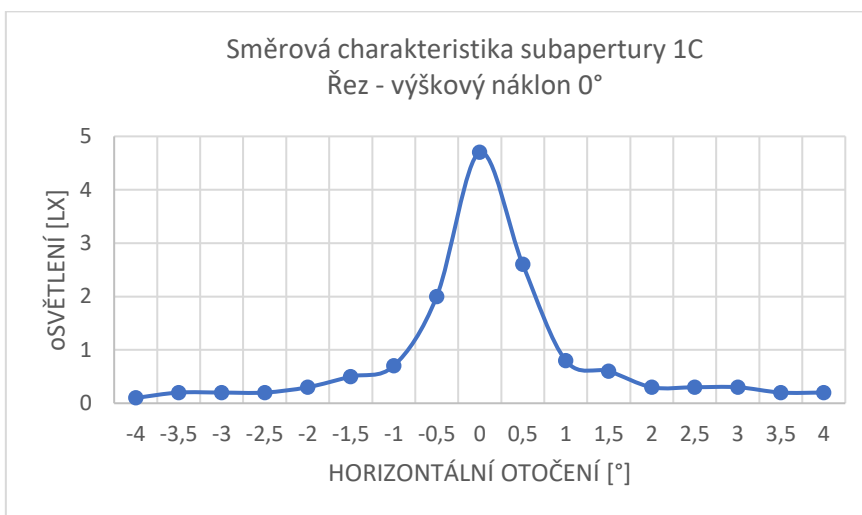
Graf 82 - Otvor 3C



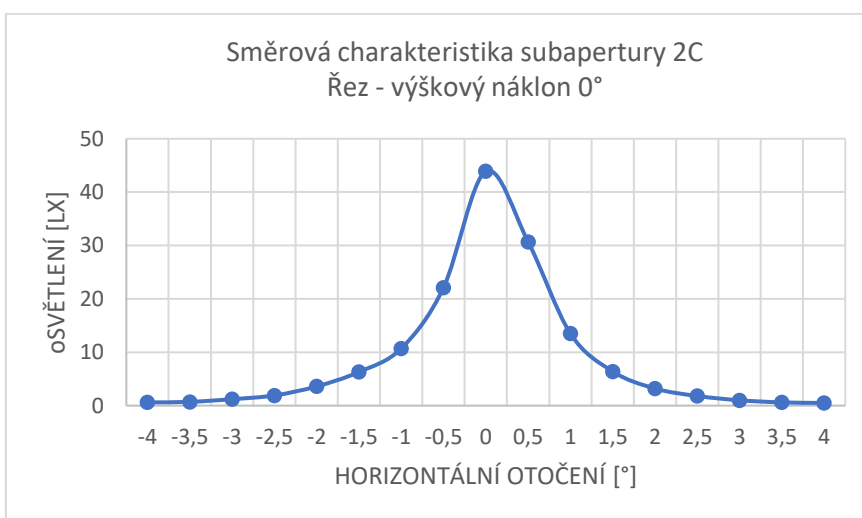
Graf 83 - Otvor 3D



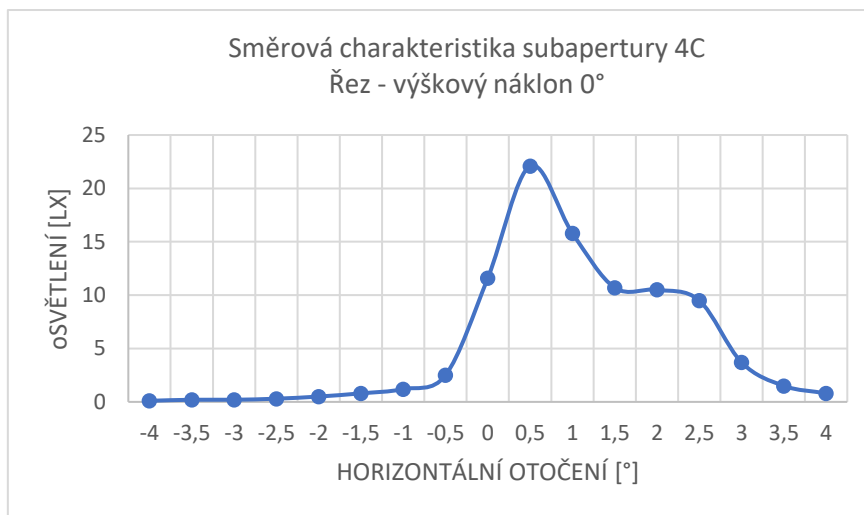
*Graf 84 - Otvor 3E*



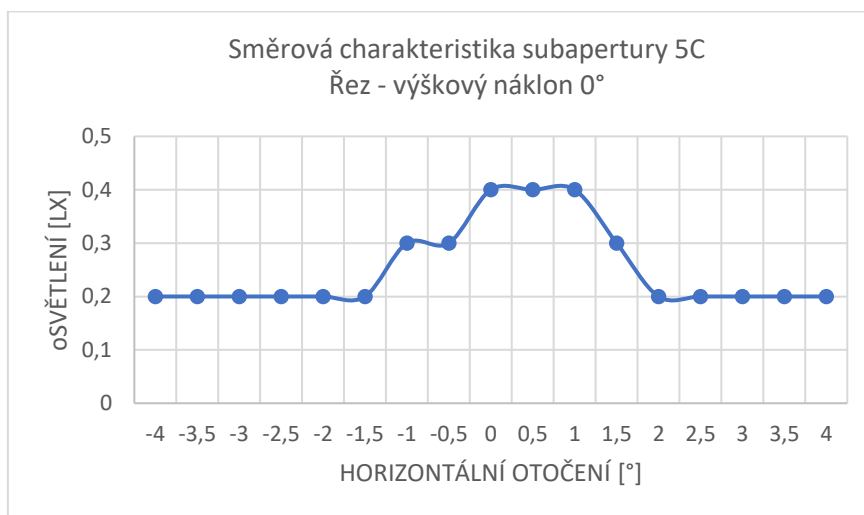
*Graf 85 - Otvor 1C*



*Graf 86 - Otvor 2C*



Graf 87 - Otvor 4C



Graf 88 - Otvor 5C

Měření se zdrojem v poloze -5mm

Tabulka 12 – Měření v poloze -5mm se clonou

**Otvor 3A**

Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,5	0,7	0,9	1,5	1,6	1,8	2,1	2,5	2,7	2,8	3,1	3,4	3,9	4,1	3,9	3,4	2,4

**Otvor 3B**

Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,6	0,7	0,8	1,2	3,8	7,6	11	13	16	12	12	13	13	13	16	14	10

**Otvor 3C**

Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,5	0,6	0,9	2,1	5,1	12	34	80	102	47	29	16	7,6	3,7	1,8	1,1	0,8

**Otvor 3D**

Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	4,5	9	12	17	22	26	46	31	18	7,7	4,4	3,5	3,6	3,3	2,7	2,1	1,8

**Otvor 3E**

Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	1,4	3,1	5,9	13	15	12	7,4	3,6	3	1,9	1,5	1,1	0,9	0,8	0,6	0,5	0,4

**Otvor 1C**

Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,2	0,4	0,3	0,5	0,6	1	2,1	6,8	5,7	1,6	0,9	0,6	0,4	0,5	0,4	0,3	0,3

**Otvor 2C**

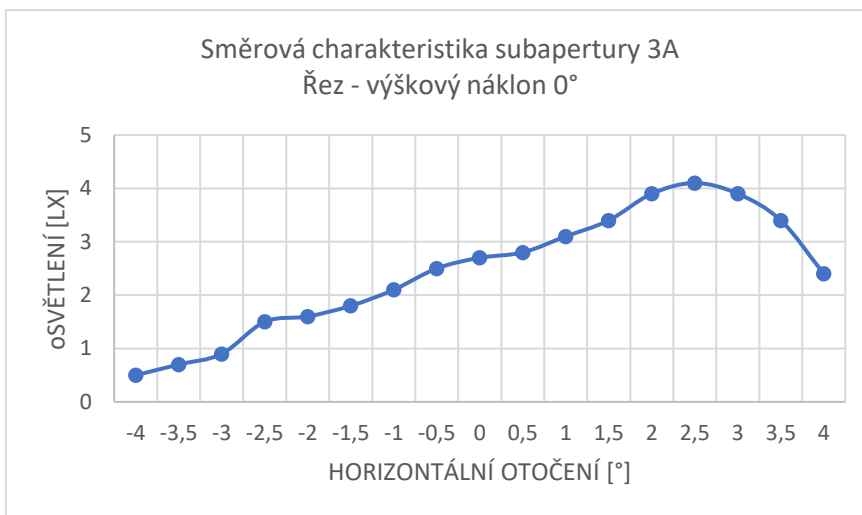
Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,5	0,9	1	1,5	2,9	5,1	16	44	46	17	6,7	3,6	1,9	1,1	0,8	0,7	0,6

**Otvor 4C**

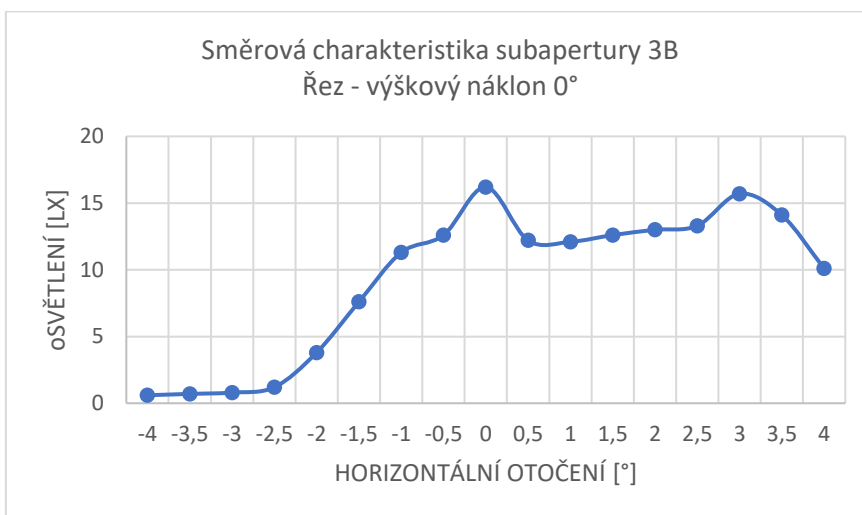
Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,2	0,3	0,3	0,4	0,6	1,1	1,8	4,3	5,3	3,8	2,3	1,2	0,7	0,5	0,6	0,7	0,4

**Otvor 5C**

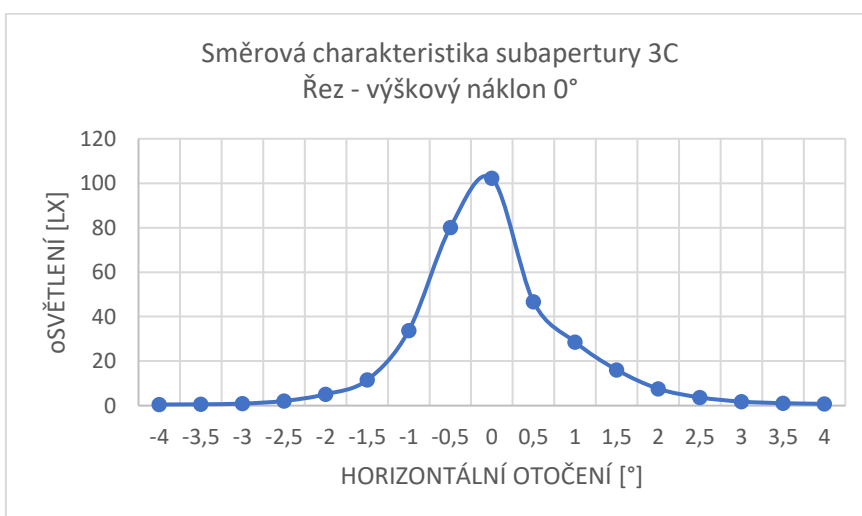
Výškový náklon	Stranový náklon																
	-4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
0°	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,4	0,3	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3



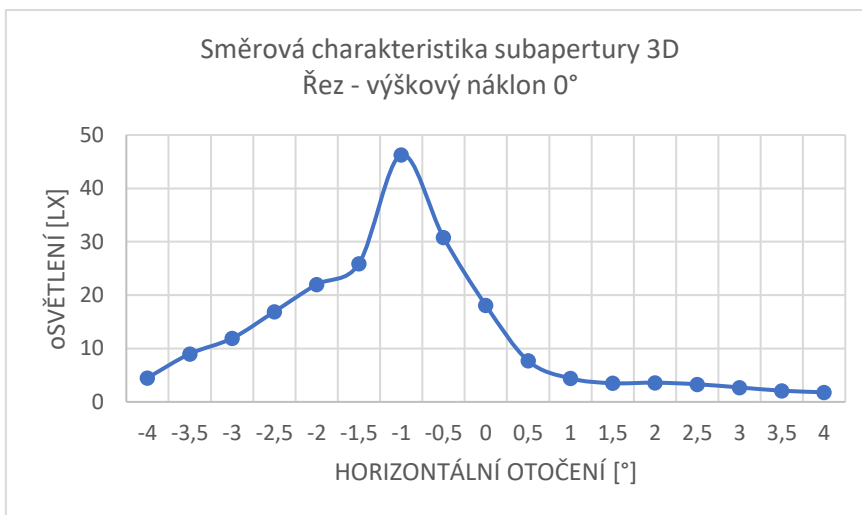
Graf 89 - Otvor 3A



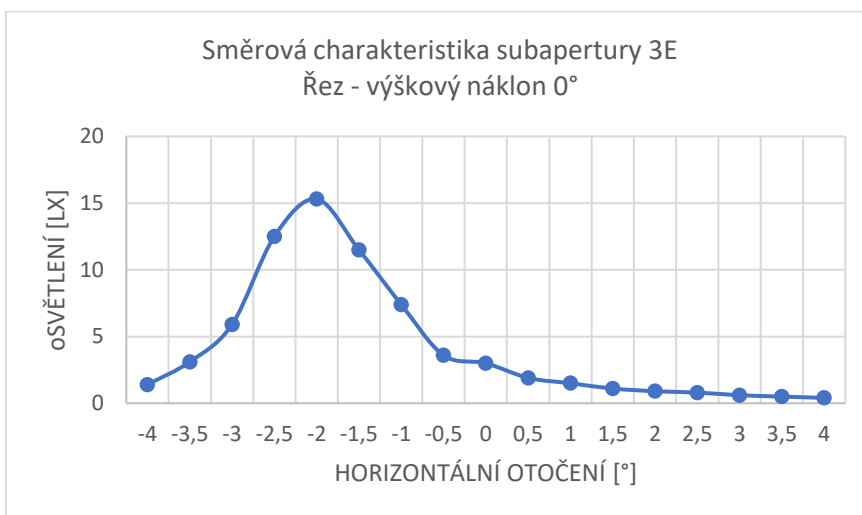
Graf 90 - Otvor 3B



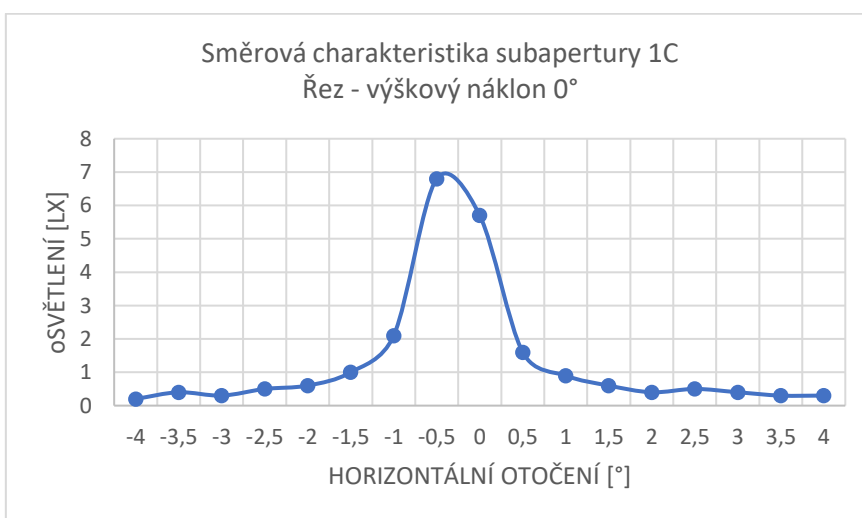
Graf 91 - Otvor 3C



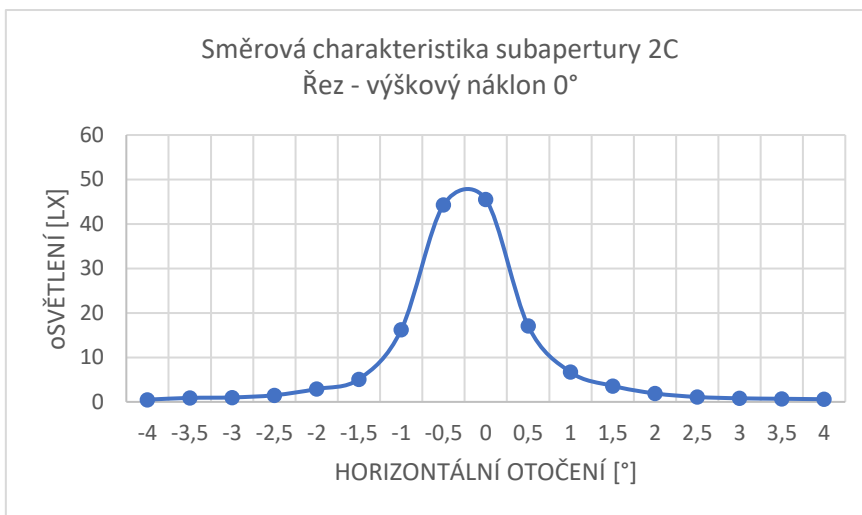
*Graf 92 - Otvor 3D*



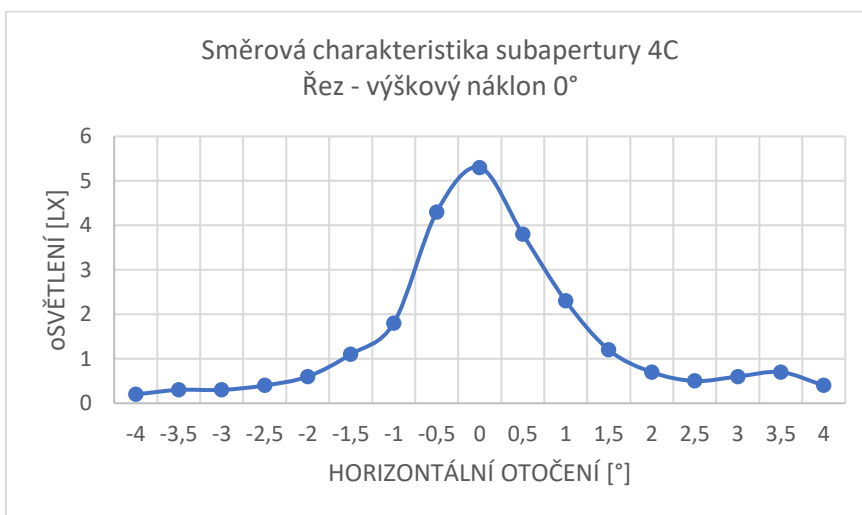
*Graf 93 - Otvor 3E*



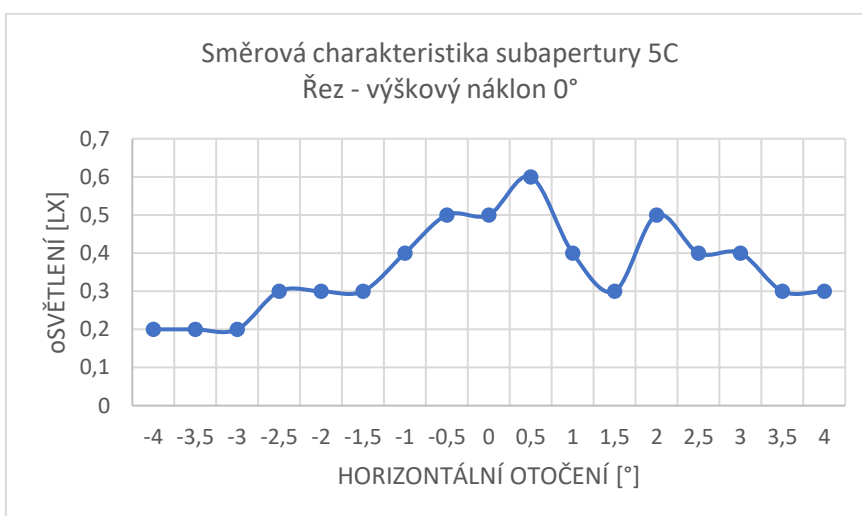
*Graf 94 - Otvor 1C*



*Graf 95 - Otvor 2C*



*Graf 96 - Otvor 4C*



*Graf 97 - Otvor 5C*

## Příloha 3 – Skript pro výpočet tolerančního pole

Kód napsaný v programu Matlab pro výpočet spodní hranice tolerančního pole

### **OBLOUKOVÁ TRÁŤ**

```
clear all
format compact

%% Vstupni parametry
R = 400; % poloměr oblouku 250 X 400
a = 250; % délka oblouku
b = 2.5; % vzdálenost svítilny 2,5 x 5

%% Vypočet dalších parametru z geometrie
alfa = a/R; % úhel kruhové výseče v radiánech
B=(R*sin(alfa))/(R*(1-cos(alfa))-b); %tangens úhlu beta
beta = atan(B); % uhel beta v radiánech

Lmax = (R*(1-cos(alfa))-b)/cos(beta); % maimalni vzdálenost

%% vypočet vzdálenosti a uhlu fi
% nejnízsi možny uhel alfa2 (tak aby součet beta+fi nepřesahl
pi/2)
A=(R-b)/R; %cosinus uhlu alfa, pro který plati: beta+fi=pi/2
alfamin=acos(A);

alfa2 = (alfamin+0.001:0.025:alfa); % promenny uhel - parametr
pro pripad 1 (beta+fi<pi/2)
alfa3 = (0.02:0.025:alfamin); % promenny uhel - parametr pro
pripad 2

% vektor vzdálenosti v závislosti na uhlu alfa2
L2 = sqrt((R^2)*(sin(alfa2)).^2+(R*(1-cos(alfa2))-b).^2);
L3 = sqrt((R^2)*(sin(alfa3)).^2+(b-(R*(1-cos(alfa3))))).^2);

% vektor uhlu fi v závislosti na uhlu alfa2
fi2=asin(R*sin(alfa2)./L2)-beta; % uhel od opt. osy - v
radiánech
fis2=fis2*180/pi;

fi3=-asin(R*sin(alfa3)./L3)-beta+pi; % uhel od opt. osy - v
radiánech
fis3=fis3*180/pi;

%% Spojení jednotlivých vektoru
L=zeros(1,25);
L(1,1:4)=L3;
L(1,5:25)=L2;

fi=zeros(1,25);
```



```

fi(1,1:4)=fis3;
fi(1,5:25)=fis2;

%% Vypocet intenzity pro ruzne vzdalenosti
E0=2000*10^(-6); % prahove osvetleni oka ve dne - pro bile
svetlo
T=0.035; % cinitel propustnosti atmosfery
Lkm=L/1000; %vzdalenosti v kilometrech
t=T.^Lkm; % vektor cinitele T
I1=E0*(Lkm.^2)*10^6; % pomocny mezivypocet pro intenzitu (bez
vynasobeni cinitelem T)
I=I1.*t;

%% Vytvoreni tabulky hodnot

M=zeros(25,3);
M(:,1)=I;
M(:,2)=L;
M(:,3)=fi;

```

## ROVNÁ TRAŤ

```

clear all
format compact

%% Vstupni parametry
b1=2.5;
b2=5;
Lmax=250;

%% Vypocet dalsich parametru z geometrie
A1=Lmax/b1;
alfa1=atan(A1);
A2=Lmax/b2;
alfa2=atan(A2);

% promenne uhly
fi1=(1.3:0.01:alfa1);
fi2=(1.3:0.01:alfa2);

% uhly odklonu od opticke osy
fis1=(fi1*180/pi)-(alfa1*180/pi);
fis1=-fis1;
fis2=(fi2*180/pi)-(alfa2*180/pi);
fis2=-fis2;

%% Vzdalenost odpovidajici jednotlivym uhlum

```

```

L1=b1*tan(fi1);
L2=b2*tan(fi2);

%% Intenzita odpovidajici vzdalenostem

E0=2000*10^(-6); % prahove osvetleni oka ve dne - pro bile
svetlo
T=0.035; % cinitel propustnosti atmosfery
Lkm1=L1/1000; %vzdalenosti v kilometrech
Lkm2=L2/1000; %vzdalenosti v kilometrech
t1=T.^(-Lkm1); % vektor cinitele T, pro b1
t2=T.^(-Lkm2); % vektor cinitele T, pro b2

I1=E0*(Lkm1.^2)*10^6; % pomocny mezivypocet pro intenzitu (bez
vynasobeni cinitelem T)
I1=I1.*t1;

I2=E0*(Lkm2.^2)*10^6; % pomocny mezivypocet pro intenzitu (bez
vynasobeni cinitelem T)
I2=I2.*t2;

%% Vytvoreni tabulek hodnot

M1=zeros(27,3);
M1(:,1)=I1;
M1(:,2)=L1;
M1(:,3)=fis1;

M2=zeros(26,3);
M2(:,1)=I2;
M2(:,2)=L2;
M2(:,3)=fis2;

```

## ANOTACE

<b>Jméno a příjmení:</b>	Silvie Gótzová
<b>Katedra:</b>	Optiky
<b>Vedoucí práce:</b>	Ing. RNDr. Jan Podloucký
<b>Rok obhajoby:</b>	2018
<b>Název práce:</b>	Měření a úprava směrových charakteristik svítlen pro návěstidla
<b>Název v angličtině:</b>	Measurement and modification of angular light distribution of railway signal lamps
<b>Anotace práce:</b>	Diplomová práce se zabývá problematikou měření svítivosti a směrové charakteristiky svítlen pro návěstidla. Vytvářením tolerančních polí pro různě zakřivené tratě. Úpravou směrové charakteristiky s využitím světlovodů.
<b>Klíčová slova:</b>	Měření svítivosti, směrová charakteristika, úprava směrové charakteristiky, světlovody
<b>Anotace v angličtině:</b>	This thesis deals with the measurement of luminous intensity and angular light distribution of railway signal lamps. Calculation of tolerance fields for different railway curve radii. Modification of angular light distribution with light guides.
<b>Klíčová slova v angličtině:</b>	Measurement of luminous intensity, angular light distribution, modification of angular light distribution, light guides
<b>Přílohy vázané v práci:</b>	Tabulky, Grafy, Skripty v Matlabu
<b>Rozsah práce:</b>	59 stran
<b>Jazyk práce:</b>	Český jazyk