Fotometria świateł mijania i drogowych — podsumowanie

Wynik: projektor bi-LED spełnia w symulacji wszystkie punkty i strefy UN R149 dla klasy B (ruch prawostronny) przy strumieniu nominalnym, minimalnym i maksymalnym. W analizie wrażliwości 24 z 27 przypadków odchyłek montażowych spełnia komplet wymagań.

Nie spełniają: LED mijania: z +0,30 mm (B1+B2+B3, B4+B5+B6); LED mijania: z −0,30 mm (75R, Strefa I (max ≤ 2·I50R)); LED drogowe: z −0,30 mm (HV ≥ 0,8·I_M). Te przypadki wyznaczają granicę pola tolerancji położenia diod w osi z: ±0,20 mm (łańcuch L2, raport R3).

Wielkość	Wartość
Światłość maksymalna świateł mijania	29 823 cd przy H = -0,85°, V = -1,35°
Światłość maksymalna świateł drogowych (z mijania)	57 241 cd przy H = 0,95°, V = 0,45° (wymagane ≥ 40 500 cd)
Strumień źródła: mijania / drogowe (stan nagrzany)	1161 lm / 1415 lm
Strumień na drodze: mijania / drogowe	469 lm / 458 lm (sprawność optyczna 40 % / 32 %)
Strumień obiektywny modułu mijania (maks. grupa LED)	1648 lm < 2 000 lm → urządzenie do czyszczenia reflektorów nie jest wymagane (UN R48)
Gradient granicy światła i cienia G (2,5° L)	0,37 (granica na −0,57°; nastawa geometryczna krawędzi 0,95°)
Liczba promieni	mijania 40 mln, drogowe 24 mln, siatka kątowa 0,1°

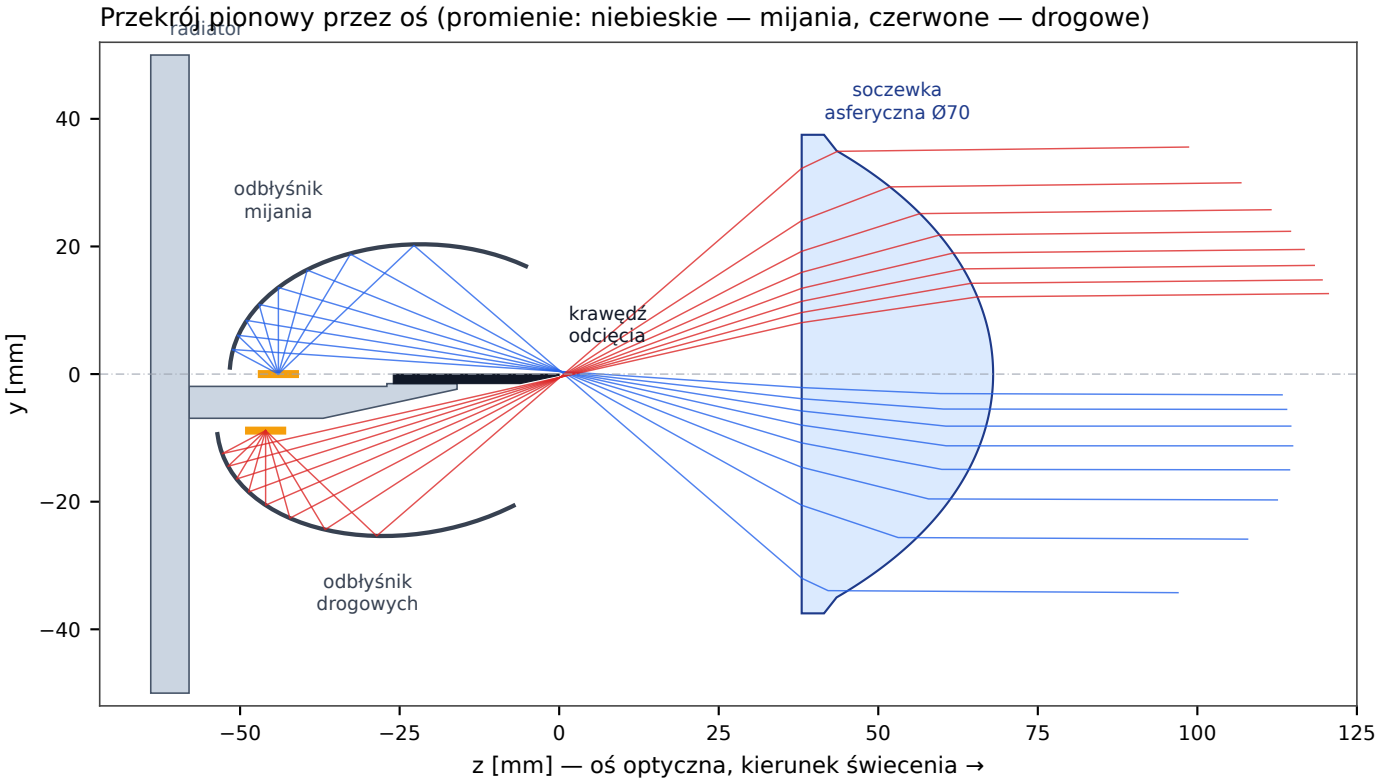
Metoda

- Własny kod śledzenia promieni metodą Monte Carlo (Python, numpy). Źródło: 4 chipy 1,03 × 1,03 mm o rozkładzie lambertowskim (KW H4L531.TE).
- Odbłyśniki: elipsoidy trójosiowe (przecięcie analityczne), R = 0,88. Przesłona-lustro z krawędzią typu Z i ostrzem 0,20 mm. Soczewka plano-asferyczna B270 ze stratami Fresnela. Klosz PC jako płytka pochylona (kąty z modelu CAD).
- Światło nad granicą (punkty B1–B8): pas pryzmatyczny u dołu tylnej powierzchni soczewki oraz mikrostruktura soczewki (model rozproszenia: 3,7 % strumienia, σ = 2,5°).
- Minima sprawdzono przy strumieniu × 0,92, maksima przy strumieniu × 1,27 (grupy jasności LED z kompensacją prądu ±8 %, start zimny).

Granice ważności

- Kod sprawdzono na czterech przypadkach z rozwiązaniem analitycznym (str. 3). Nie jest to narzędzie zwalidowane pomiarowo jak LucidShape czy Speos.
- Udział i kąt rozproszenia mikrostruktury soczewki to założenie modelu. Punkty B50L, B7, B8 i strefa III zależą od niego bezpośrednio — wymagają pomiaru próbek soczewki.
- Nie modelowano: rozszczepienia barwnego na granicy, odbić wielokrotnych w kloszu i soczewce, światła rozproszonego od ramki, rozkładu luminancji w chipie.
- Homologację UN R149 wydaje organ na podstawie pomiarów próbek w laboratorium. Symulacja jej nie zastępuje.

Układ optyczny projektora



Soczewka i przesłona	
Szkło / współczynnik załamania	B270 / n = 1,523
Ogniskowa / odległość ogniska od płaszczyzny tylnej	57,70 mm / 38,0 mm
Grubość w osi / na brzegu Ø70	30,0 mm / 5,47 mm
Promień w wierzchołku R / stała stożkowa k	30,175 mm / -1,6331
A4 / A6	4.9950e-06 / -5.2152e-10
A8 / A10	4.2875e-13 / -5.9639e-17
Krawędź przesłony z(x)	$0.01563 \cdot x^2 + 1.987e\text{-}06 \cdot x^4$
Stopień krawędzi (strona prawa drogi)	0,42 mm pod kątem 45°

Odbłyśniki	x w prawo, y w górę, z do przodu [mm]
Mijania: ogniska F1 / F2	(0,00; 0,00; -44,00) / (-7,00; 0,50; 0,00)
Mijania: półosie a / b / poprzeczna	30,00 / 20,09 / 26,50 mm
Drogowe: ogniska F1 / F2	(0,00; -8,86; -46,00) / (-0,30; -0,50; 0,15)
Drogowe: półosie a / b / poprzeczna	31,00 / 20,27 / 20,80 mm

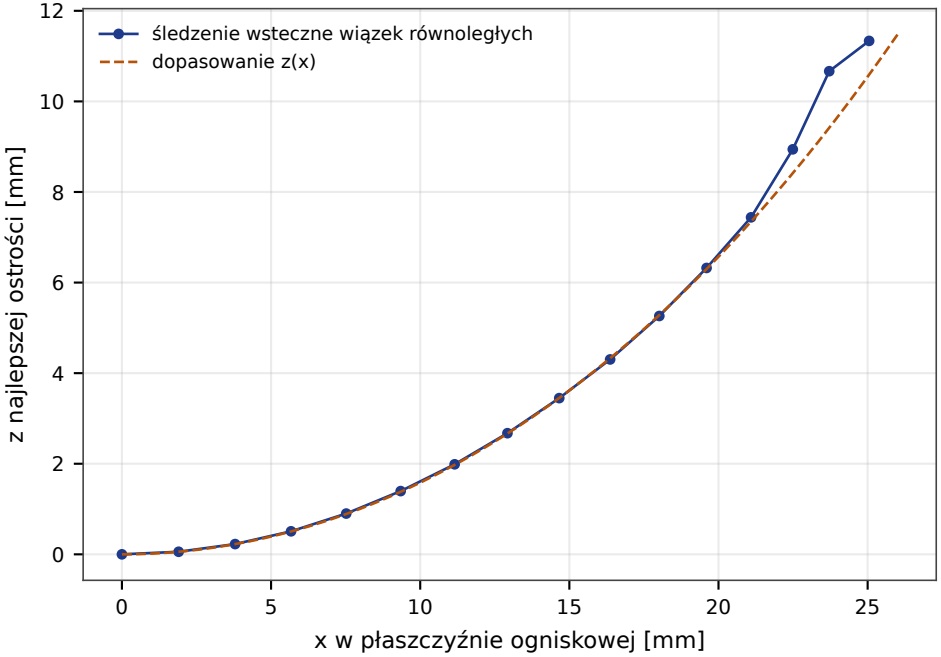
Zasada działania. Dioda mijania świeci w górę z ogniska F1 odbłyśnika górnego. Odbłyśnik skupia światło w okolicy krawędzi przesłony (F2), która leży w ognisku soczewki. Promienie, które zeszłyby poniżej krawędzi, odbija lustro przesłony — dzięki temu całe światło trafia poniżej granicy. Soczewka odwzorowuje krawędź w nieskończoność jako granicę światła i cienia. Dioda drogowych świeci w dół na odbłyśnik dolny. Jej światło przechodzi tuż przed ostrzem przesłony od spodu i wypełnia obszar nad granicą. Układ nie ma części ruchomych. Półoś poprzeczna odbłyśnika mijania większa od pionowej daje rozsył poziomy.

Sprawdzenie kodu na przypadkach analitycznych

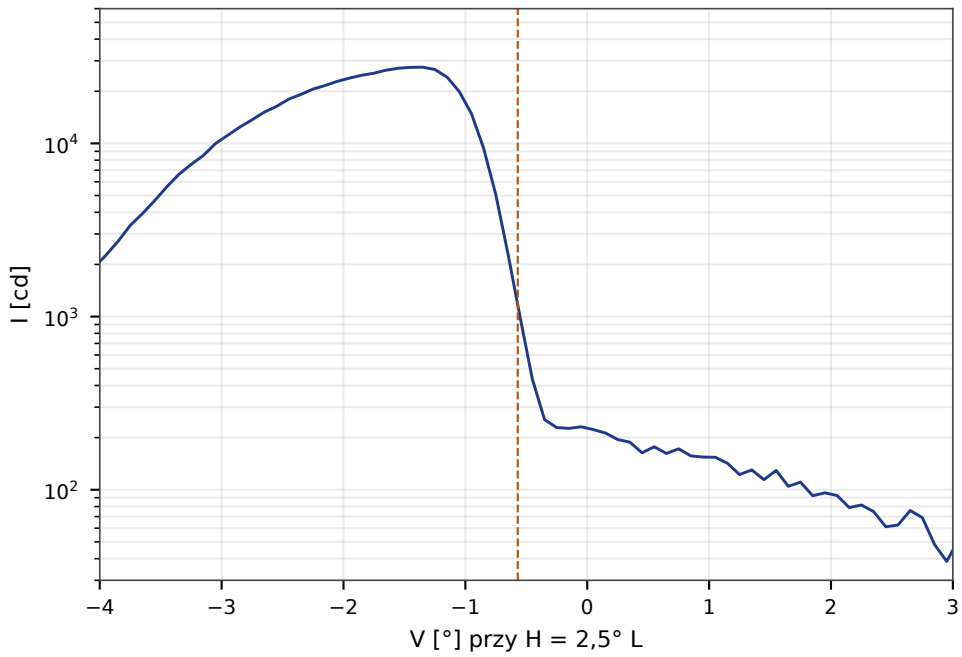
Nr	Przypadek	Wynik kodu	Wartość analityczna	Ocena
V1	Punkt w ognisku soczewki → wiązka równoległa	odchyłka kierunku: RMS 0,00015°, maks. 0,00070°	0° (profil stygmatyczny); dopasowanie asfery 0,03 µm	zgodne
V2	Promienie z ogniska F1 elipsoidy trafiają w F2	błąd 4.7e-14 mm	0 mm (własność elipsy)	zgodne
V3	Zachowanie luminancji: źródło lambertowskie 1 mm² w ognisku, światłość w osi	1225,7 cd/lm (Monte Carlo)	1225,0 cd/lm = L · A źrenicy (r = 35,0 mm)	różnica 0,06 %
V3b	Udział strumienia lambertowskiego w stożku apertury	0,4215	$\sin^2\theta = 0{,}4213$	różnica 0,05 %
V4	Transmisja Fresnela, padanie normalne, n = 1,523	0,95703	$1 - ((n-1)/(n+1))^2 = 0{,}95703$	zgodne

Przypadki obejmują: załamanie i przecięcie z asferą (V1), odbicie od kwadryki (V2), próbkowanie źródła i bilans energii (V3, V3b) oraz straty odbiciowe (V4). Niepewność statystyczna map: przy 40 mln promieni i oknie 0,2° punkt o światłości 350 cd zbiera ok. 147 promieni (błąd względny ok. 8,2 %).

Krzywizna pola soczewki → kształt krawędzi przesłony

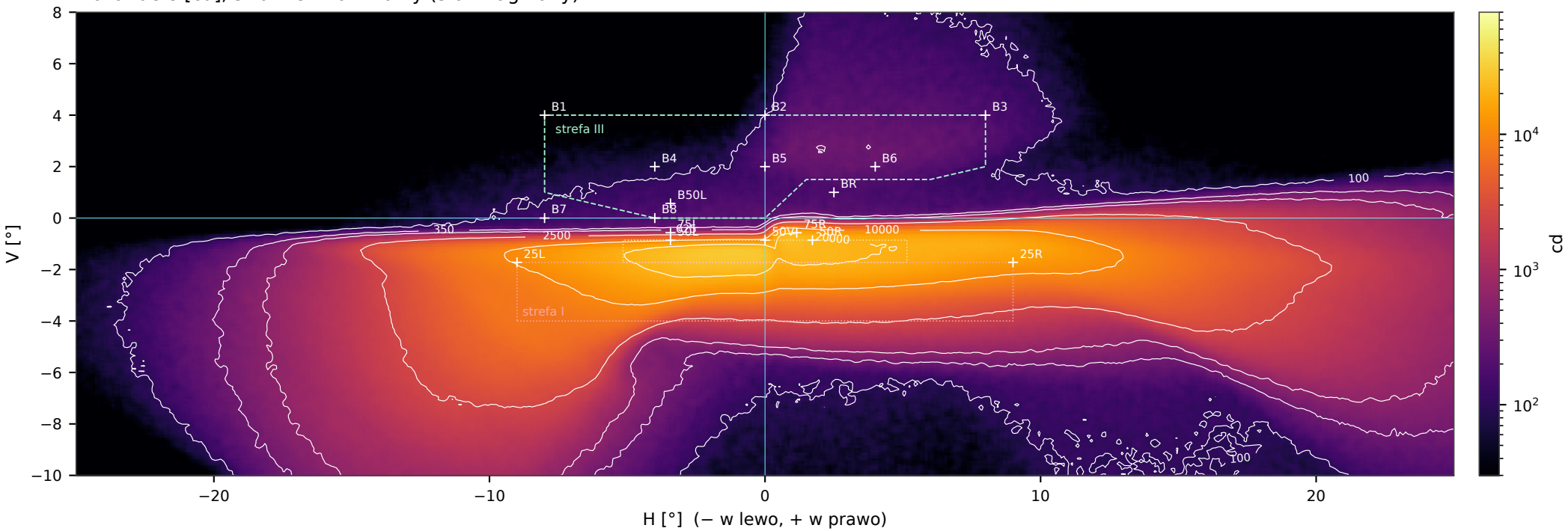


Przekrój pionowy przez granicę światła i cienia



Światła mijania — rozsył i ocena wg tabeli 8 UN R149 (klasa B)

Izokandele [cd], strumień nominalny (stan nagrzany)



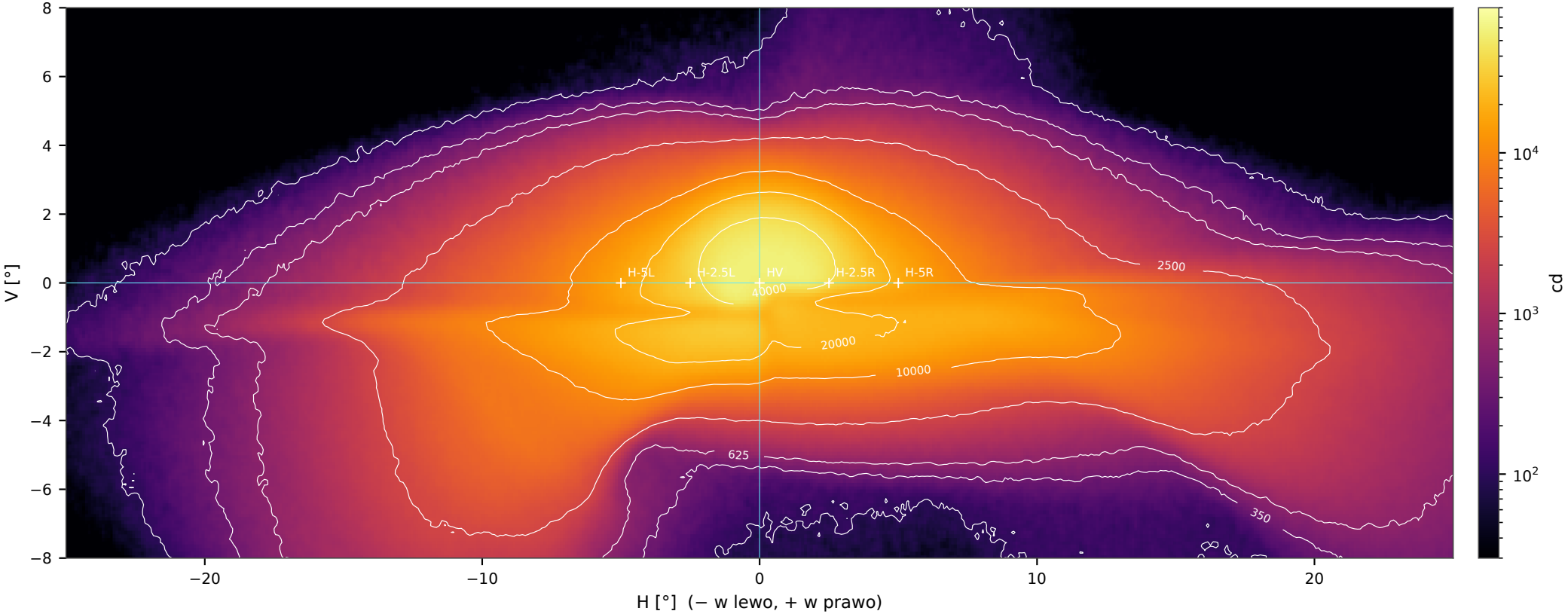
Punkt / strefa	H / V [°]	I [cd]	min	maks.	zapas	ocena
B50L	-3,43 / 0,57	159	—	350	+42 %	spełnia
BR	2,50 / 1,00	180	—	1750	+87 %	spełnia
75R	1,15 / -0,57	19 241	10 100	—	+75 %	spełnia
75L	-3,43 / -0,57	1449	—	10 600	+83 %	spełnia
50L	-3,43 / -0,86	10 767	6800	18 500	+26 %	spełnia
50R	1,72 / -0,86	22 415	10 100	—	+104 %	spełnia
50V	0,00 / -0,86	13 677	5100	—	+147 %	spełnia
25L	-9,00 / -1,72	10 256	1700	—	+455 %	spełnia

Punkt / strefa	H / V [°]	I [cd]	min	maks.	zapas	ocena
25R	9,00 / -1,72	13 642	1700	—	+638 %	spełnia
B7	-8,00 / 0,00	139	65	—	+97 %	spełnia
B8	-4,00 / 0,00	196	125	—	+45 %	spełnia
B1+B2+B3		291	190	—	+41 %	spełnia
B4+B5+B6		527	375	—	+29 %	spełnia
Strefa III (max)	1,95 / 2,65	348	—	625	+29 %	spełnia
Strefa IV (min)		10 596	2500	—	+290 %	spełnia
Strefa I (max ≤ 2·I50R)		26 689	—	44 831	+24 %	spełnia

Zapas liczony po uwzględnieniu rozrzutu strumienia (minima × 0,92, maksima × 1,27). Punkt 50L: granica 18 500 cd dla modułów LED ze sterownikiem; minimum 6 800 cd przyjęto zachowawczo z odczytu tabeli 8. Strefa III: wartość największa i jej położenie.

Światła drogowe — rozsył i ocena wg tabeli 5 UN R149 (klasa B)

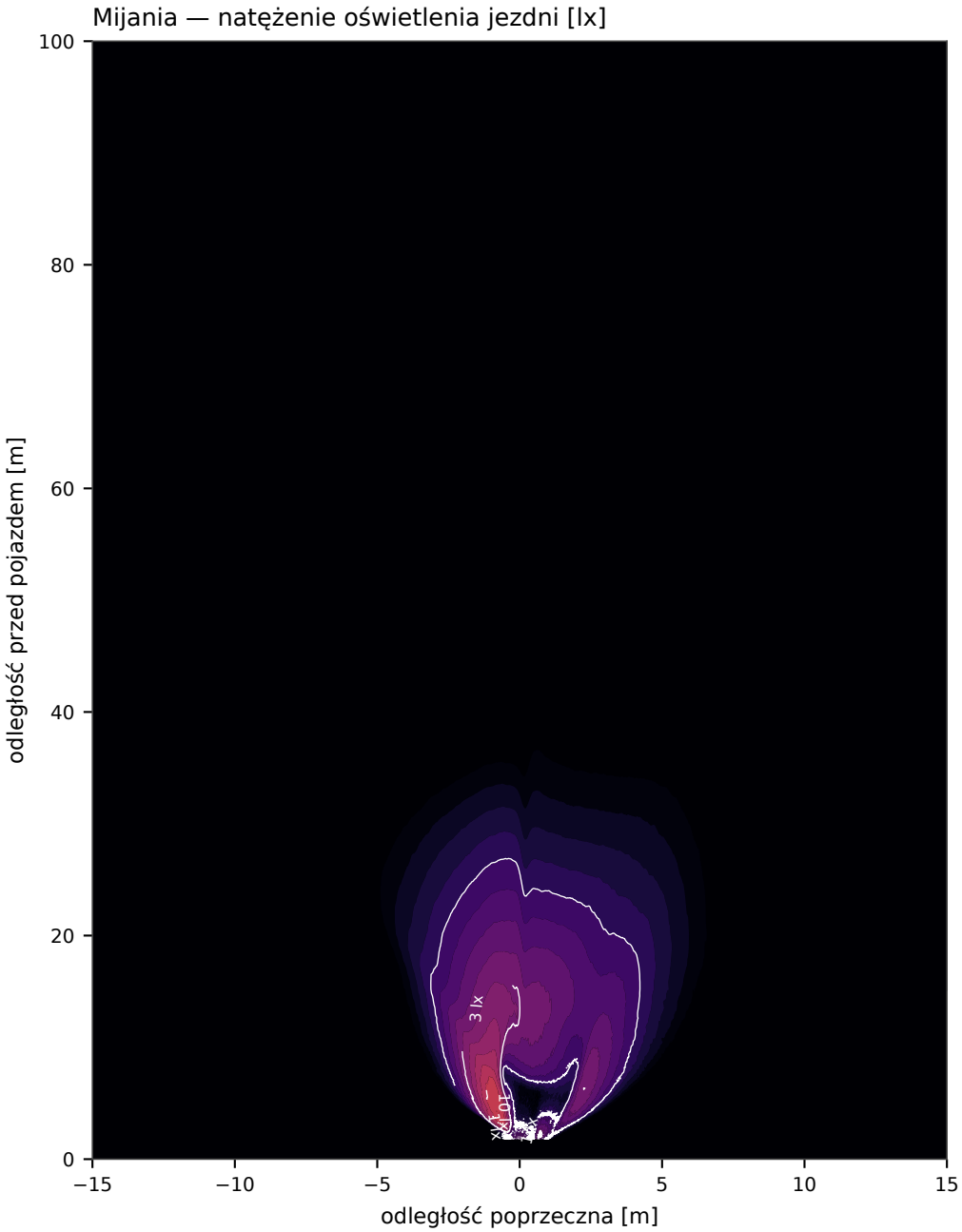
Izokandele [cd]: drogowe + mijania (pracują jednocześnie), strumień nominalny

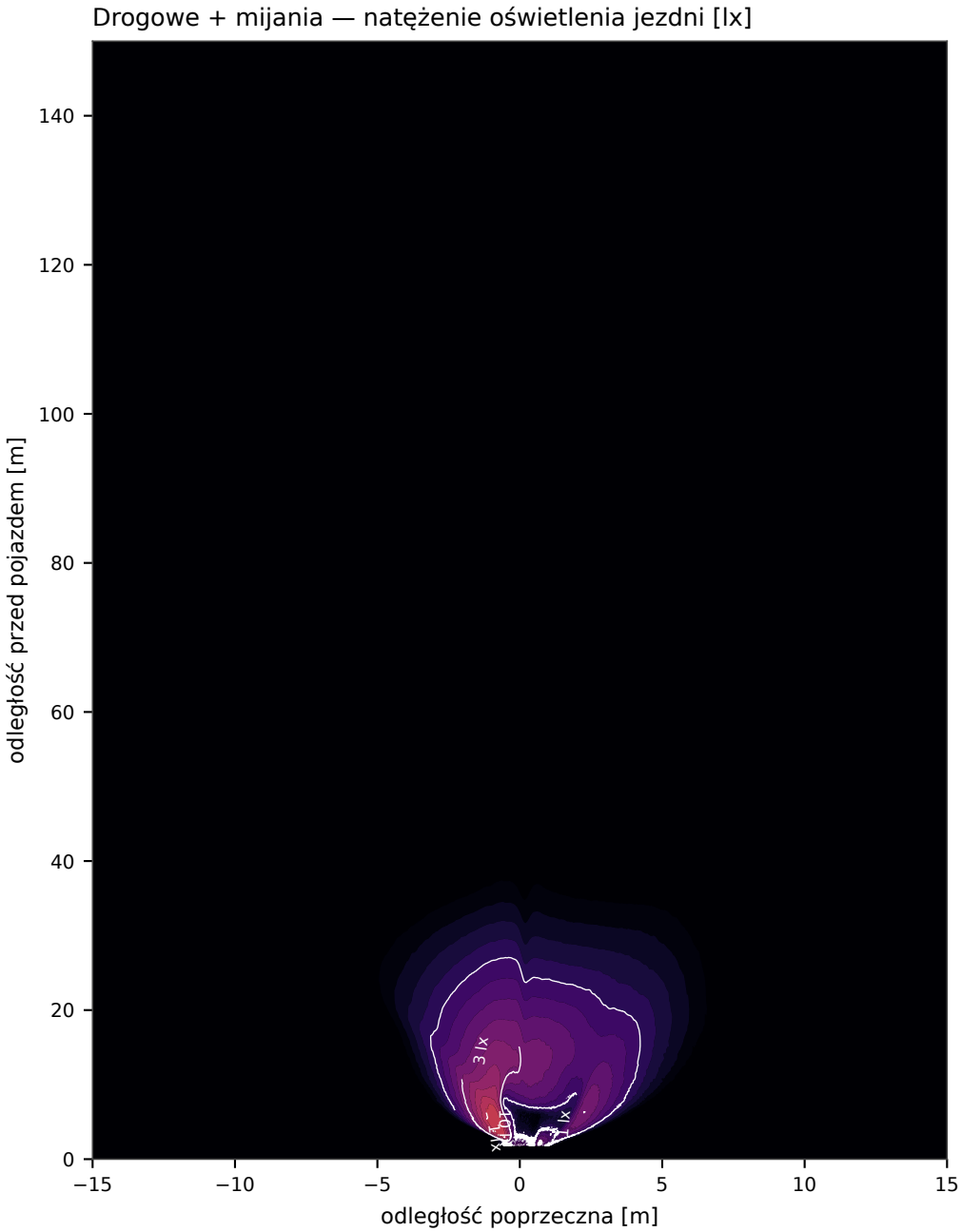


Punkt / strefa	H / V [°]	I [cd]	min	maks.	zapas	ocena
I_M (maksimum)	0,95 / 0,45	57 241	40 500	215 000	+30 %	spełnia
H-5L	-5,00 / 0,00	16 382	5100	—	+196 %	spełnia
H-2.5L	-2,50 / 0,00	33 414	20 300	—	+51 %	spełnia
HV	0,00 / 0,00	53 306	—	—	—	spełnia
H-2.5R	2,50 / 0,00	39 371	20 300	—	+78 %	spełnia
H-5R	5,00 / 0,00	18 520	5100	—	+234 %	spełnia
HV ≥ 0,8·I_M	0,00 / 0,00	53 306	45 793	—	+7 %	spełnia

Maksimum I_M = 57 241 cd daje znak odniesienia I'M = 13,3 (I_M / 4 300). Punkt HV leży wewnątrz izokandeli 80 % I_M. Między wiązką mijania a drogową zostaje szczelina kątowa ok. 0,20° (grubość ostrza przesłony 0,20 mm), wypełniona rozmyciem obu wiązek.

Oświetlenie drogi (jedna lampa, wysokość montażu 0,65 m)





Analiza wrażliwości na odchyłki montażowe

Każdy przypadek liczono z ponowną nastawą granicy światła i cienia (metoda gradientowa, 2,5° L) — tak jak na stanowisku nastaw w produkcji. Ocena obejmuje komplet punktów R149 z rozrzutem strumienia.

Przypadek	nastawa [°]	75R	50R	50L	75L	B50L	B8	str. III	I_M	HV	2,5L	2,5R	ocena
nominał	0,94	18 906	22 788	10 618	1491	189	210	373	58 084	53 655	33 412	39 280	spełnia
LED mijania: z +0,20 mm	0,95	24 120	27 903	9461	1401	185	196	370	57 952	53 613	33 629	40 562	spełnia
LED mijania: z −0,20 mm	0,94	12 442	15 814	11 644	1485	155	239	370	58 014	53 266	33 292	39 242	spełnia
LED mijania: x +0,20 mm	0,95	17 724	20 638	10 548	1794	181	171	385	57 863	53 738	33 538	39 868	spełnia
LED mijania: y +0,10 mm	0,95	19 626	23 291	11 163	1372	174	196	400	57 810	53 685	33 494	39 943	spełnia
LED drogowe: z +0,20 mm	0,94	18 906	22 788	10 618	1491	189	210	373	59 039	59 109	29 943	34 736	spełnia
LED drogowe: z −0,20 mm	0,94	18 906	22 788	10 618	1491	189	210	373	55 823	45 848	36 581	40 769	spełnia
LED drogowe: y −0,10 mm	0,94	18 906	22 788	10 618	1491	189	210	373	57 318	50 261	35 924	41 165	spełnia
soczewka: z +0,15 mm	0,98	18 400	22 934	8973	1090	198	200	376	58 137	55 227	32 778	40 416	spełnia
soczewka: z −0,15 mm	0,95	17 988	21 805	10 696	1551	172	212	372	58 441	52 724	33 607	36 744	spełnia
soczewka: z +0,30 mm	1,01	17 612	22 714	7820	1102	187	198	356	58 198	56 042	31 873	40 192	spełnia
soczewka: z −0,30 mm	1,00	15 352	20 416	9186	1475	163	202	381	58 498	52 277	34 734	36 224	spełnia
soczewka: y +0,20 mm	1,15	19 015	22 976	10 940	1543	187	208	362	58 721	53 982	33 943	39 340	spełnia
przesłona: y +0,05 mm	0,87	21 063	23 228	11 901	1717	184	199	371	57 711	53 308	32 784	36 935	spełnia
przesłona: y −0,05 mm	0,97	19 047	21 856	12 015	1877	179	215	378	57 729	53 565	33 197	38 810	spełnia
przesłona: z +0,20 mm	0,99	17 474	22 173	8892	1151	181	203	365	57 938	53 863	33 694	37 861	spełnia
LED mijania: y +0,25 mm	0,97	17 080	20 859	9742	1192	144	208	386	57 713	53 730	33 326	40 913	spełnia
LED mijania: y −0,25 mm	0,94	18 410	20 481	9379	972	180	192	362	58 144	53 336	33 392	39 356	spełnia
LED mijania: z +0,30 mm	0,94	25 677	29 139	9364	1385	144	198	356	58 125	53 603	33 471	40 341	NIE: B1+B2+B3, B4+B5+B6
LED mijania: z −0,30 mm	0,91	9212	11 621	11 910	2219	174	236	345	57 934	52 944	32 683	37 783	NIE: 75R, Strefa I (max ≤ 2·I50R)
LED mijania: x +0,30 mm	0,93	18 095	18 964	11 495	1601	166	171	368	57 993	52 881	33 455	39 035	spełnia
LED mijania: x −0,30 mm	0,93	21 147	23 942	11 152	1948	183	217	395	58 003	52 805	33 358	38 935	spełnia
LED drogowe: y +0,25 mm	0,94	18 906	22 788	10 618	1491	189	210	373	61 423	58 644	30 914	34 626	spełnia
LED drogowe: y −0,25 mm	0,94	18 906	22 788	10 618	1491	189	210	373	51 937	46 179	38 829	41 890	spełnia
LED drogowe: z −0,30 mm	0,94	18 906	22 788	10 618	1491	189	210	373	54 459	42 063	35 790	39 799	NIE: HV ≥ 0,8·I_M
przesłona: y −0,10 mm	1,08	16 960	20 459	9580	1335	167	202	385	57 832	55 859	33 546	40 496	spełnia
przesłona: y +0,10 mm	0,83	21 501	23 058	11 232	1473	200	201	379	58 113	53 614	32 534	37 127	spełnia