Ministerstvo životního prostředí

Metodika měření podílu modré složky pro stanovení parametru U500

Metodický pokyn

duben 2026

Zadavatel: Ministerstvo životního prostředí, Vršovická 1442/65, 100 10 Praha 10

Zhotovitel: VUT v Brně – Fakulta elektrotechniky a komunikační techniky, Ústav elektroenergetiky
Doc. Ing. Petr Baxant Ph.D., Ing. Martin Motyčka, Ph.D., Ing. Jan Škoda, Ph.D.,

Spolupráce: ČVUT v Praze, FEL, katedra elektroenergetiky
Ing. Petr Žák, Ph.D., Ing. Marek Bálský, Ph.D.

Datum: duben 2026

1. PŘEDMĚT METODIKY

Předmětem metodiky je popis provozního měření podílu modré složky pro stanovení parametru U500 u venkovního osvětlení. Metodika je určena pro ověřování nových venkovních osvětlovacích soustav pro případy, kde je taková kontrola požadovaná v rámci právních předpisů, smluvních vztahů nebo podmínek v rámci přidělování dotací (zákon č. 505/1990 Sb.).

Tato metodika navazuje na Metodiku měření spektrálních vlastností venkovního osvětlení radiometry (dále jen obecná metodika) a doplňuje ji o definici kontrolních bodů, postup měření a vyhodnocení naměřených hodnot specifických pro stanovení parametru U500.

2. PRÁVNÍ PŘEDPISY, TECHNICKÉ NORMY A DOPORUČENÍ

Tato metodika úzce navazuje na obecný metodický pokyn MŽP **„Metodika měření spektrálních vlastností venkovního osvětlení radiometry“** (listopad 2020). Požadavky uvedené v tomto obecném pokynu platí pro měření podílu modré složky pro stanovení činitele U500 v plném rozsahu, pokud tato metodika nestanoví jinak.

S navrhovanou metodikou souvisejí zejména tyto předpisy a normy:

- **Zákon č. 505/1990 Sb.**, o metrologii, ve znění pozdějších předpisů.
- **Vyhláška č. 345/2002 Sb.** ve znění vyhlášky č. 127/2024 Sb., kterou se stanoví měřidla k povinnému ověřování a měřidla podléhající schválení typu. (*Novelou s účinností 1. 7. 2024 byly radiometry vyřazeny ze seznamu stanovených měřidel.*)
- **ČSN EN 13201-4** Osvětlení pozemních komunikací – Část 4: Metody měření.
- **ČSN 36 0011-4** Měření osvětlení prostorů – Část 4: Měření umělého osvětlení venkovních prostorů.
- **ČSN EN 12665** Světlo a osvětlení – Základní termíny a kritéria pro stanovení požadavků na osvětlení.
- **MODF – SMARTNET Č. 1/2025, PUBGRID** – dotační výzva Modernizačního fondu (dostupné online: https://sfzp.gov.cz/files/documents/storage/2025/11/03/1762159296_SMARTNET-PUBGRID_1-2025.pdf), pro jejíž účely je tato metodika určena k expost ověřování stanovených limitů

Nad rámec tohoto seznamu se pro měření parametru U500 dále vztahuje:

- Galadí-Enríquez, D. (2017): Beyond CCT: The spectral index system as a tool for the objective, quantitative characterisation of lamps. – Metodický podklad pro definici parametru U500.
- Metodika výpočtu parametru U500 (Modernizační fond, ČR) – definice způsobu výpočtu a limitních hodnot podle zón světelného prostředí (Dostupné online: https://sfzp.gov.cz/files/documents/storage/2025/11/10/1762787247_Pod%C3%ADl%20energie%20modr%C3%A9%20slo%C5%BEky%20sv%C4%9Btla_metodika%20v%C3%BDpo%C4%8Dtu%20parametru%20U500.pdf)

3. NÁZVOSLOVÍ, DEFINICE

Názvosloví a definice jsou obsaženy v příslušných normách (ČSN EN 12665, ČSN IEC 50 (845)), v publikacích o metrologické terminologii (TNI 01 0115) a v metodice pro měření spektrálních vlastností venkovního osvětlení radiometry. Další pojmy (náhradní teplota chromatičnosti, radiometr, spektroradiometr, kolorimetr, nejistota měření aj.) viz obecná metodika.

Pro účely tohoto dokumentu dále platí:

3.1 Parametr U500

Hodnota vyjadřující relativní podíl ozářenosti v pásmu vlnových délek 380–500 nm k celkové ozářenosti ve viditelném pásmu 380–780 nm:

$$U500 = \frac{\int_{380\ nm}^{500\ nm} E_\lambda(\lambda)d\lambda}{\int_{380\ nm}^{780\ nm} E_\lambda(\lambda)d\lambda} \cdot 100 \qquad (\%) \qquad (1)$$

kde $E_\lambda(\lambda)$ je spektrální hustota ozářenosti [$W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$].

POZNÁMKA 1 k heslu Pro ekvidistantní vzorkování vlnové délky lze použít výpočet pomocí podílu sumací jednotlivých spektrálních vzorků:

$$U500 = \frac{\sum_{\lambda=380nm}^{500nm} E_\lambda(\lambda)}{\sum_{\lambda=380nm}^{780nm} E_\lambda(\lambda)} \cdot 100 \qquad (\%) \qquad (2)$$

POZNÁMKA 2 k heslu Pokud spektroradiometr neposkytuje ekvidistantní krok, je nutné provést interpolaci vzorků a převzorkování na doporučené kroky 1, 2 nebo 5 nm. Vzorkování s krokem 10 nm se nedoporučuje kvůli zvýšené odchylce. Doporučená interpolace je např. dle algoritmu AKIMA.

(Ref.: AKIMA, Hiroshi. A New Method of Interpolation and Smooth Curve Fitting Based on Local Procedures. Journal of the ACM. 1970, 17(4), 589–602. ISSN 0004-5411. Dostupné také z: doi:10.1145/321607.321609)

POZNÁMKA 3 k heslu Integrace a vyčíslení U500 lze numericky provést pomocí aplikace LUOXtech (https://luoxtech.app/).

3.2 Zóna světelného prostředí (Z0–Z4)

Klasifikace venkovního prostředí podle míry přirozené tmy určující maximální přípustnou hodnotu U500. Definována v Metodice výpočtu parametru U500 (Modernizační fond).

3.3 Vztažný směr

Svislý směr dolů (nadir) z optického středu svítidla.
Poznámka: U svítidel osazených na stožáru bez výložníku leží optický střed přibližně v ose stožáru. U svítidel s výložníkem leží optický střed v místě optického středu optické sestavy svítidla, nikoli v ose stožáru — kontrolní bod tak může ležet mimo osu stožáru

4. KVALIFIKACE OSOB PROVÁDĚJÍCÍCH MĚŘENÍ

Osoba provádějící provozní měření podílu modré složky venkovního osvětlení radiometrem musí vhodným způsobem prokázat svoji odbornou způsobilost, například:

- osvědčením o interním zaškolení od akreditované organizace,
- osvědčením o absolvování odborného kurzu v měření světelných parametrů, nebo
- certifikátem odborné způsobilosti vydaným organizací s příslušnou akreditací.

5. HLAVNÍ A POMOCNÁ MĚŘICÍ ZAŘÍZENÍ

5.1 Hlavní měřicí zařízení

Pro provozní měření podílu modré složky venkovního osvětlení se používá jako hlavní měřicí zařízení radiometr. Provozní měření spektrálních vlastností venkovního osvětlení radiometry popisuje „Metodika měření spektrálních vlastností venkovního osvětlení radiometry" (listopad 2020), zpracovaná ČVUT v Praze, FEL, katedrou elektroenergetiky (Ing. P. Žák, Ph.D. a kol.) ve spolupráci s VUT v Brně, FEKT, Ústavem elektroenergetiky (doc. P. Baxant, Ph.D. a kol.) a s ČMI, Laboratořemi primární metrologie Praha. Metodika je dostupná na portálu Ministerstva životního prostředí. Pozn.: Metodika byla zpracována v době, kdy optické radiometry byly stanoveným měřidlem podle položky 5.1.1 vyhlášky MPO č. 345/2002 Sb. s dobou platnosti ověření 1 rok a povinnou zkouškou typu podle OOP č. 0111-OOP-C046-15. Novelou vyhlášky č. 127/2024 Sb. s účinností 1. 7. 2024 byla tato položka z druhového seznamu stanovených měřidel vypuštěna a radiometry se nyní používají jako pracovní měřidla nestanovená s metrologickou návazností zajištěnou kalibrací.

– Rozsah vlnových délek radiometru musí pokrýt celé viditelné spektrum: dolní mez ≤ 380 nm, horní mez ≥ 780 nm.

– Pro popis vlastností spektroradiometrů se používá 11 charakteristik definovaných v CIE 233:2019.
– Hlava radiometru musí být vybavena kosinusovým nástavcem pro minimalizaci směrové chyby.

5.2 Pomocná měřicí zařízení a pomůcky

– Luxmetry – pro určení osvětlenosti v kontrolním bodě.
– Voltmetry – pro měření napájecího napětí světelného obvodu.
– Teploměry – pro měření teploty okolí.
– Měřidla vzdálenosti (laserové nebo mechanické) – pro vytyčení kontrolních bodů.
– Stativy – pro přesné nastavení polohy radiometru v kontrolních bodech.
– Měřidlo času – pro měření doby stabilizace osvětlení.

Požadavky na měřicí techniku

Měření musí být provedeno přístroji s platnou metrologickou návazností. Pro radiometry jakožto nestanovená pracovní měřidla (od 1. 7. 2024 po novele vyhlášky č. 127/2024 Sb.) zajišťuje metrologickou návaznost kalibrace; žádný právní předpis nestanoví povinnou periodicitu kalibrací – ta je v odpovědnosti organizace vlastnící měřidlo. Norma ČSN 36 0011 doporučuje doby mezi kalibracemi, avšak jako norma není právně závazná. Příslušnou dobu platnosti kalibrace stanoví vlastník přístroje zpravidla na základě doporučení výrobce, zkušeností z provozu nebo požadavků akreditačního orgánu.
Vzhledem k charakteru parametru U500, který je definován jako podíl spektrální distribuce energie, se jako hlavní měřicí zařízení používají **radiometry (spektroradiometry)** schopné měřit v užších intervalech vlnových délek. Pro určení doplňkových parametrů (např. osvětlenosti v kontrolním bodě) lze použít luxmetr. Použití jasoměrů nebo jasových kamer není pro přímé stanovení parametru U500 v rámci této metodiky přípustné.

6. METROLOGICKÉ MEZE VYUŽITÍ METODY MĚŘENÍ

Metodika slouží pro terénní měření, není určena pro měření laboratorní. Meze vlnových délek, pro které je metodika určena:

Parametr	Hodnota
λ min – dolní rozsah	380 nm
λ max – horní rozsah	780 nm

7. OBECNÉ PODMÍNKY MĚŘENÍ – VELIČINY OVLIVŇUJÍCÍ VÝSLEDKY

Parametr U500 je obzvláště citlivý na změny spektrálního průběhu. Následující vlivy je nutné pečlivě zaznamenat a zohlednit:

- Teplota okolí – ovlivňuje spektrální složení LED světla i přesnost radiometru. Měřit na začátku a konci měření.
- Napájecí napětí – u svítidel s elektronickými předřadníky je vliv zpravidla zanedbatelný; napětí je třeba zaznamenat.
- Stárnutí zdrojů – doba stárnutí u žárovek a halogenových žárovek je 1 hodina, u výbojových zdrojů 100 hodin a u LED modulů pro všeobecné osvětlování 0 hodin (ČSN EN 62717), pokud výrobce neuvede jinak.
- Stabilizace – minimální doba stabilizace výbojových svítidel a svítidel s jinými typy zdrojů s luminoforem (LED) je 20 minut. Za stabilizované se veličiny považují, pokud měřená hodnota při měřeních s odstupem několika minut třikrát po sobě nevykazuje výrazné změny.

- Parazitní světelné zdroje – eliminovat vliv denního světla, světlometů automobilů, reklam, případně jiných blízkých osvětlovacích soustav.

8. PŘÍPRAVA NA MĚŘENÍ

Příprava měření je podrobně popsána v obecné metodice (kap. 8). Doplňující požadavky specifické pro měření podílu modré složky :

– Před měřením shromáždit informace o typu svítidla, teplotě chromatičnosti (náhradní teplotě chromatičnosti), indexu podání barev a napájecím systému.
– Ověřit, zda osvětlovací soustava dosáhla předepsané doby stárnutí a zda je zajištěna stabilizace.
– Radiometry před měřením teplotně stabilizovat; při výrazných změnách teplot je nutné provést před každým měření kalibraci na tmu (dark calibration).

9. POSTUP MĚŘENÍ

9.1 Doplňkové měření

Měření teploty

Měření teploty okolí venkovního prostředí se doporučuje provést na začátku a konci měření. Teplota může ovlivňovat spektrální složení světla vyzařovaného svítidly i přesnost radiometru.

Měření napětí

Napětí se měří na svorkách měřeného světelného obvodu osobou s odpovídající kvalifikací (zákon č. 250/2021 Sb. a nařízení vlády č. 194/2022 Sb.). Při měření svítidel s elektronickými předřadníky je toto měření pouze orientační.

9.2 Stanovení kontrolních bodů

Kontrolní body pro měření parametru U500 se umísťují podle následujících zásad:

- Kontrolní bod leží ve vodorovné rovině v průsečíku se svislicí vedené z optického středu svítidla (vztažný směr).
- V případě, že není možné do výše uvedené polohy kontrolní bod umístit, je možné jej umístit uvnitř tolerančního pásma v rámci vodorovné roviny, vymezeného kružnicí o poloměru 1 m se středem v původně definovaném kontrolním bodě.
- Výška kontrolního bodu je definovaná osvětleností v kontrolním bodě. Minimální výška radiometru je vymezena minimální osvětleností definovanou výrobcem radiometru.

9.3 Hlavní měření

- U radiometrů s kalibrací na tmu se tato kalibrace provede na začátku a konci každého měření.
- Radiometr se postupně umisťuje do stanovených kontrolních bodů a odečtené hodnoty se zaznamenají.
- Při umisťování radiometru do kontrolních bodů je nutno dodržet správnou polohu, výšku a orientaci fotočlánku. Spektroradiometr by měl být umístěn nad hlavou pro zamezení odrazům a chybě měření. Spektroradiometr musí být ve vertikální pozici ve svislici (nadiru) přímo pod fotometrickým středem svítidla (viz obrázek č. 1). Výšku měření je třeba uvést do protokolu. V případě svítidla na stožáru bez výložníku je přípustné umístit radiometr do vzdálenosti maximálně 0,5 metru od stožáru. Pro zajištění dostatečné přesnosti je možné pro upevnění radiometru použít stativ.
- Pro ověření podílu modré složky U500 jednoho typu svítidla se provede měření u dvou vybraných svítidel jednoho typu se shodným nastavením provozního režimu a sklonem.
- U každého svítidla se v kontrolním bodě provedou 3 kontrolní měření, aby se eliminovaly možné náhodné rušivé vlivy.
- Z naměřených hodnot pro jeden typ svítidla (6 hodnot) se stanoví průměrná hodnota $U500_{0,avg}$.
- Při měření je třeba eliminovat veškeré parazitní zdroje světla (denní osvětlení, světlo ze světlometů automobilů, reklam apod.), které by ovlivňovaly měření.

- Při měření je třeba zajistit, aby nedocházelo k clonění světla, dopadajícího z osvětlovací soustavy do kontrolních bodů (překážky, osoba provádějící měření);
- V případě, že je osvětlovací soustava vybavena řídicím systémem osvětlení, nastaví se hladina osvětlenosti, pokud je to možné, na maximální hodnotu.
- V případě, že soustava pracuje v různých provozních režimech (např. normální a adaptivní osvětlení u pozemních komunikací) provádí se měření spektrálních vlastností v normálním provozním režimu.
- V případě, že jsou svítidla osazena barevně laditelnými LED, provede se měření parametru U500 pro obě mezní hodnoty náhradní teploty chromatičnosti.



Obrázek 1 Vizualizace měření se spektroradiometrem

Poznámka – statistická robustnost

Tento postup (2 svítidla × 3 měření = 6 hodnot) je nastaven s ohledem na terénní provozní realitu. Je méně statisticky robustní, než postup metodiky pro měření CCT (3 × 5 = 15 hodnot). V případě pochybností nebo hraničních hodnot se doporučuje počet měření zvýšit.

10. VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

U naměřených hodnot se vypočítá aritmetický průměr z celkem 6 měření $U500_{0,i}$ (dvě svítidla a tři měření na svítidlo). U vypočtené hodnoty aritmetického průměru $U500_{0,avg}$ se provede korekce přechodu od hodnoty ve vztažném směru na celkovou váženou průměrnou hodnotu svítidla:

$$U500_{lum} = 0{,}85 \cdot U500_{0,avg} \quad (\%) \qquad (3)$$

Pokud je naměřena průměrná hodnota $U500_{0,avg}$ = 8 %, tak korigovaná hodnota bude vycházet $U500_{lum} = 6{,}8\,\%$. Faktor 0,85 vyjadřuje korekci při přechodu od měření průměrné hodnoty ve vztažném směru na váženou průměrnou hodnotu $U500_{lum}$ celého svítidla (prostorové rozložení záření), které bývá měřeno například v kulovém integrátoru se spektroradiometrem jako detektorem. Pro stanovení hodnoty korekčního faktoru bylo měřené biodynamické svítidlo Tungsram SLBt 100K

pro režimy 1750 K, 2200 K, 2700K a 4000 K. V následující tabulce jsou hodnoty parametru U500 pro tyto režimy měřeny ve vztažném směru a jako integrální hodnoty (měření v kulovém integrátoru).

Tabulka 1 Odchylky parametru U500 změřeného ve vztažném směru proti integrální hodnotě celého svítidla (Tungsram SLBt 100K)

Režim LED svítidla	1750 K	2300 K	2700 K	4000 K
Hodnota U500 (vztažný směr)	0.6 %	7.4 %	14.0 %	22.9 %
Celé svítidlo (kulový integrátor)	0.6 %	6.7 %	12.6 %	20.8 %
Odchylka absolutní	0.1 %	0.8 %	1.4 %	2.1 %
Odchylka relativní	9.5 %	11.6 %	11.2 %	10.2 %

Z naměřených hodnot je patrné, že relativní odchylka dosahuje až 11,6 % pro režim 2300 K. Pro tento typ svítidel (adaptivní v rozmezí 1800-4000 K) se na základě empirických naměřených dat stanovuje korekční faktor na hodnotu 0,85.

Následně se stanoví nejistoty měření podle kapitoly 11. Rozšířená nejistota se přepočítá z procent na hodnotu U500 a připojí se k výsledným korigovaným hodnotám. Například pokud korigovaná hodnota $U500_{lum} = 6{,}8\ \%$ a rozšířená relativní nejistota $U_{U500,rel}$ = 8,4 % ($U_{U500,abs}$ =0,57 %), pak výsledný tvar zápisu bude:

$$U500_{lum} = (6{,}8 \pm 0{,}57)\ \ \%$$

Naměřené hodnoty s nejistotami se porovnávají s limitními hodnotami pro danou zónu světelného prostředí (Z0–Z4). Mohou nastat čtyři situace:

a) Hodnota i s intervalem nejistoty (±U) je v toleranci: **vyhovující stav**.
b) Hodnota i s intervalem nejistoty je mimo toleranci: **nevyhovující stav**.
c) Hodnota v toleranci, ale horní mez nejistoty mimo toleranci: **nelze prohlásit za vyhovující**.
d) Hodnota mimo toleranci, ale dolní mez nejistoty v toleranci: **nelze prohlásit za nevyhovující**.

11. NEJISTOTY MĚŘENÍ

Výpočet nejistot měření je náročná úloha, která vyžaduje často měření v laboratorních podmínkách, pokud výrobce spektroradiometru neposkytuje dostatečné informace o chybách měření. Výrobce nejčastěji udává nejistotu měření osvětlenosti a náhradní teploty chromatičnosti pro světlo typu A (2856 K). V následujících podkapitolách je zjednodušený a odborný postup pro stanovení nejistoty měření.

11.1 DOPORUČENÝ ZJEDNODUŠENÝ POSTUP

Pokud nebude proveden přesný výpočet nejistot měření parametru U500, je doporučeno počítat s relativní rozšířenou nejistotou měření u_{U500_rel} = 10 % (pro LED s *Tcp* ≤ 3000 K). Tato hodnota je pouze platná u spektroradiometru s platnou kalibrací a po provedení kalibrace na tmu (dark calibration) a to s teplotně ustáleným přístrojem a také za nepřítomnosti parazitních zdrojů záření v nejbližším okolí (reklamy, světlomety).

Nejistoty typu B způsobené metodou by zahrnovaly změny v metodice měření, které by mohly ovlivnit hodnoty měřených parametrů U500 jako je například nedodržení pozice měření přímo pod svítidlem, případně pokud by se nepodařilo zabránit rušivému světlu, aby neovlivňovalo měření. Pokud ale budou splněny požadavky na měření stanovených v této metodice, tak lze tyto nejistoty zanedbat.

11.2 ODBORNÉ STANOVENÍ NEJISTOT MĚŘENÍ

Postup stanovení nejistot měření parametru U500 není triviální a mělo by být provedeno kvalifikovaným personálem. V následující tabulce č. 2 jsou zobrazeny základní typy nejistot měření.

Tabulka 2 Základní typy nejistot měření

Typ nejistoty	Zdroj
Typ A	Opakování měření
Typ B – přístroj	Charakteristiky radiometru dle KL
Typ B – metoda	Prostorové umístění, clonění, ostatní
Kombinovaná	Složení všech složek
Rozšířená (k = 2)	Pokrytí 95 %

Nejistotu typu A lze vypočítat jako směrodatnou odchylku střední hodnoty/výběrového průměru z výběrového souboru dat (n prvků). Pro výpočet lze využít následujícího vztahu

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)}\sum_{n=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \tag{4}$$

,kde *n* je rozsah souboru, x_i je i-tý prvek souboru a $\bar{x}$ je aritmetický průměr souboru. Získání souboru dat by mělo být měřením za stejných podmínek. Nejistotu typu A lze i změřit například referenčním měřením (alespoň 20 hodnot), pokud měření samotným spektroradiometrem a uložení hodnot trvá delší dobu. Takto vyčíslená nejistota typu A by měla být změřena pro několik referenčních spekter a hodnot osvětleností. Při měření spektra žárovky s 2856 K byla naměřena nejistota typu A v hodnotě $U_A = 0{,}3\ \%$.

Nejistoty typu B souvisí s chybami měření přístroje, ale i chybami v metodě, kdy se zanedbávají či mění jisté podmínky. Nejistoty měření spektroradiometru jsou částečně popsány v CIE 198:2011, kde se zejména jedná o fotometry. V CIE 233:2019 jsou popsány kvalitativní ukazatelé spektroradiometrů, které již mohou mít určitou míru korelace s nejistotami měření, ale tyto nejistoty jsou vždy pro určité spektrum a podmínky. Pro simulaci vzniku chyb lze využít metody Monte Carlo nebo numerické metody a citlivostní analýzy. Citlivostní analýza vychází z modelu, kdy ze vstupních hodnot (vybuzení řádkového snímače) se vypočítá výsledná veličina jako například náhradní teplota chromatičnosti nebo parametr U500. Citlivostní analýza byla provedena pro modelový spektroradiometr vycházejí z parametrů spektroradiometru UPRTEK MK305S. Pro parametr U500 jsou významné pouze některé nejistoty, které plynou hlavně ze spektrálního posunu, rozptýleného záření uvnitř spektroradiometru, šumu na snímači a návaznosti na světelný normál. Nejistotu typu B lze vypočítat následujícím vztahem

$$u_B = \frac{\delta_m}{k_u} \tag{5}$$

Kde δ_m je chyba přístroje nebo metody a k_u je koeficient rozšíření, který je typický pro různá pravděpodobnostní rozložení. Pro rovnoměrné chyby (například šum) se uvažuje $k_u = \sqrt{3}$. Pro normální rozložení (návaznost na světelný normál) je $k_u = 2$.

Spektrální posun naměřených průběhů

Vliv spektrálního posunu na měření parametru U500 bude mít vysoký dopad, protože z podstaty výpočtu parametru U500 je zřejmé, pokud se spektrum posune například o 1 nm směrem ke kratším vlnovým délkám, tak parametr U500 naroste. Velikost způsobené chyby bude záviset na měřeném spektru. Tato chyba se nejvíce projeví, pokud světelný zdroj má značný signál ve spektru kolem 500 nm. Pokud světelný zdroj bude vyzařovat pouze v pásmu od 505 do 780 nm, tak U500 = 0 a žádná chyba ze své podstaty nemůže vzniknout.

Pokud provedeme citlivostní analýzu pro vybraná spektra s maximálním přípustným posunem vlnové délky ±1 nm (maximální přípustná odchylka podle specifikace UPRTEK MK350S), tak dostaneme

následující odchylky v hodnotách U500. Odchylky jsou v absolutních hodnotách a nejsou vztaženy k hodnotě U500 samotné.

Tabulka 3 Citlivostní analýza parametru U500 na posun ve spektru

Světelný zdroj	*Tcp* (K)	*U500* (%)	*ΔU500*(+1nm)	*ΔU500*(-1nm)
LED Amber	1683	0.3 %	0.00 %	0.00 %
LED 2300 K	2297	0.2 %	0.01 %	-0.01 %
LED 3000 K	2640	9.7 %	0.19 %	-0.20 %
LED 4000 K	3643	17.5 %	0.24 %	-0.24 %
LED 5000 k	5228	28.8 %	0.32 %	-0.33 %
LED 6000 K	5973	31.4 %	0.30 %	-0.31 %

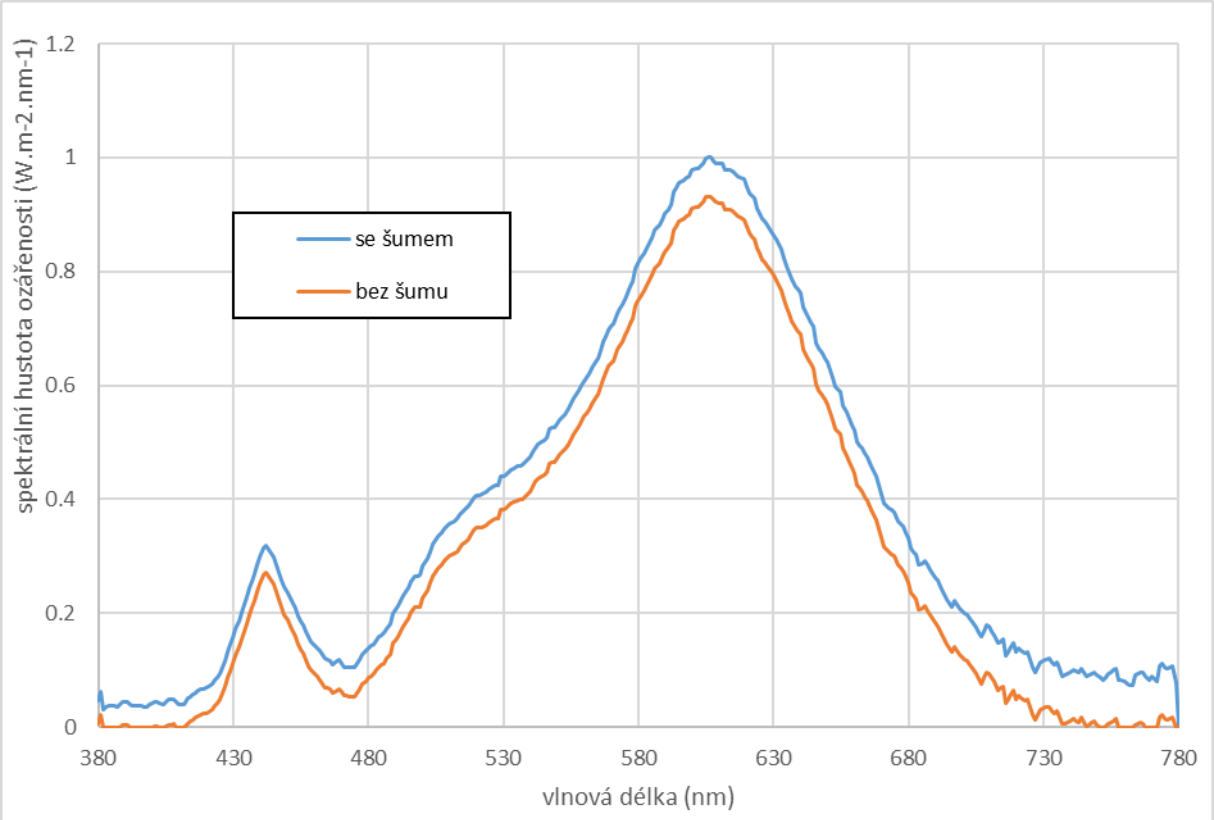
Z tabulky je patrné, že odchylka U500 roste s náhradní teplotou chromatičnosti podle předpokladu. Pokud bude splněna podmínka pro měření světelných soustav s náhradní teplotou chromatičnosti s T_{cp} < 3000 K, tak chyba spektrálního posunu bude menší nebo rovna $\Delta U500$ < 0,2 %.

Vliv rozptýleného záření uvnitř spektroradiometru

Vliv rozptýleného záření uvnitř spektroradiometru může také přispět k naměřené odchylce vůči pravé hodnotě U500. Zde je důležité, jak výrobce spektroradiometru definuje údaj o hodnotě rozptýleného záření. Obecně měření probíhá měřením pomocí monochromatického záření a měření odezvy. Pokud se ve spektru objeví signál mimo měřený vrchol monochromatického záření, tak údaj o rozptýleném záření většinou udává relativní obsah signálu mimo spektrální vrchol vůči obsahu spektrálního vrcholu. Hodnoty jsou pak nejčastěji uváděny v procentech a pro jakou vlnovou délku byly naměřeny. Nejvyspělejší laboratorní spektroradiometry dokáží korigovat naměřené spektrum pomocí korekčních matic, které rozptýlený signál vrací zpět ke zdroji monochromatického záření. Výrobce UPRTEK pro model MK350S udává hodnotu rozptýleného záření na hodnotu -25 dB pro 550 nm, což odpovídá hodnotě 0,31 %. Z tohoto důvodu bude vliv na parametr U500 téměř zanedbatelný vliv, protože jen malá část tohoto záření navýší energetickou část spektra od 380 do 500 nm a zároveň navýší i část od 501 do 780 nm. Pro důkladnější analýzu by bylo nezbytné změřit spektroradiometr na vliv rozptýleného záření s krokem 10 nm. Pak by bylo možné důkladněji simulovat vliv rozptýleného záření na výpočet U500. Chybu způsobenou rozptýleným zářením bude uvažována s hodnotou δ = 0,1 %.

Vliv šumu snímače na parametr U500

Mobilní spektroradiometry mohou mít značný šum napříč spektrem, pokud je úroveň osvětlenosti nízká (řádově luxy). Dále může značný šum – offset hodnot způsobit kalibrace spektroradiometru na tmu (dark current calibration nebo dark calibration) a to zejména, když se mění teplota snímače (snímač se zahřívá nebo chladne). Následující spektrum bylo měřeno spektroradiometrem UPRTEK MK305S v terénních podmínkách, kdy při kalibraci na temný proud, byl spektroradiometr ochlazený a po jeho následném ohřátí byly naměřeného spektrální průběhy se značným offsetem. I tato skutečnost musí být zohledněna jako potenciální chyba měření. V následujícím obrázku je zobrazen graf s naměřeným spektrem svítidla s náhradní teplotou chromatičnosti 2700 K, kde je tato chyba patrná. Druhý průběh byl zbaven tohoto offsetu a hodnoty U500 byly pro obě spektra vypočítány.



Obrázek 2 Spektrum LED 2700 K s chybou způsobenou šumem snímače

V tomto případě je parametr U500 = 11,2 % pro naměřené spektrum a U500 = 8,9 % pro korigované spektrum (bez šumu). Chyba způsobená šumem dosahuje v tomto případě 2,3 % absolutně. V případě Amber diod může být tato chyba ještě vyšší, protože zpravidla mají téměř nulový obsah spektrální energie v rozsahu 380-500 nm. Spektroradiometr s takovým šumem v naměřených hodnotách by nebylo možné použít pro měření U500 pro zóny Z0 a Z1. Pro omezení vzniku chyby je tady nezbytné, aby přístroj byl teplotně ustálen a před zahájením měření provedena kalibrace na tmu. Pro vzorový výpočet nejistoty měření U500 nebude tato nejistota uvažována. Pokud naměřená data budou vykazovat prokazatelný šum, tak je zapotřebí vypočítat chybu měření U500, ze které se vypočítá standardní nejistota, která bude zahrnuta v rozpočtu nejistot. Při měření běžného spektra LED zpravidla oblasti 380-400 nm a 760-780 nm nabývají nulových hodnot spektrální hustoty záření. Tyto oblasti lze tedy využít pro kontrolu, zda kalibrace na tmu proběhla v pořádku. V rozpočtu nejistot bude nejistota kalibrace na tmu vyčíslena jako směrodatná odchylka jednoho měření.

Návaznost na světelný normál

Další nejistota vychází z návaznosti na normál spektrální ozářenosti, na který je spektroradiometr kalibrován. Výrobce udává hodnotu nejistoty měření teploty chromatičnosti U_{Tcp} = 2 %. Tato nejistota má návaznost hlavně na normál spektrální ozářenosti. Pro přepočet je ale zapotřebí znát citlivostní koeficient pro přepočet nejistoty náhradní teploty chromatičnosti žárovky s 2856 K. Za účelem stanovení hodnoty citlivostního koeficientu lze postupovat vygenerováním Planckova tepelného zářiče s 2836 K a 2876 K a stanovením citlivostního koeficientu pro parametry U500 lineární směrnicí. Citlivostní koeficient (hodnota směrnice v pracovním bodě) pro tyto hodnoty vychází na hodnotu c = 0,0088 %/K a tedy standardní nejistota světelného normálu pro měření U500 je rovna

$$u_{U500,n} = c \cdot \frac{U_{Tcp}}{k} = 0{,}0088 \cdot \frac{20}{2} = 0{,}09\ \%$$

Standardní nejistota světelného normálu byla vyčíslena na hodnotu $U_{U500,n} = 0{,}09\ \%$.

Dalším krokem je stanovení kombinované standardní nejistoty u_c a to pomocí Gaussova zákona šíření nejistot (bez korelačního členu)

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + \sum_{i=1}^{n} C_{j,i}^2 \cdot u_{Bi}^2} \tag{6}$$

Z kombinované nejistoty typu C se následně vypočítá rozšířená nejistota měření *U* vztahem

$$U = k_u \cdot u_c \tag{7}$$

Kde k_u je koeficient rozšíření, který nabývá pro normální rozložení hodnoty $k_u = 2$.

Rozšířenou nejistotu měření v absolutní hodnotě lze přepočítat do relativní formy pomocí vztahu

$$U_{rel} = \frac{U}{U500} \cdot 100\ \% \tag{8}$$

V následující tabulce je rozpočet nejistot pro měření U500 pro spektroradiometr UPRTEK MK350S.

Název nejistoty	Nejistota	Koeficient rozšíření	Standardní nejistota	Citlivostní koeficient	Příspěvek k nejistotě měření U500
Kalibrace na tmu	0.15	1.00	0.15	1	0.15 %
Návaznost na světelný normál	20	2.00	10.00	0.0088 %/K	0.09 %
Spektrální přesnost	0.30	1.73	0.17	1	0.17 %
Vliv rozptýleného záření	0.10	1.73	0.06	1	0.06 %
Opakovatelnost měření	0.32	1.00	0.32	1	0.32 %
Kombinovaná standardní nejistota					0.41 %
Absolutní hodnota rozšířené nejistota					0.81 %
Relativní hodnota rozšířené nejistoty					8.4 %

Relativní hodnota rozšířené nejistoty měření parametru U500 byla stanovena na hodnotu $U_{U500,rel}$ = 8,4 %. Tato hodnota byla vyčíslena pro testované LED svítidlo s náhradní teplotou chromatičnosti *Tcp* = 3000 K a U500 = 9,7 %. Rozšířená nejistota měření parametru U500 bude vyšší pro vyšší náhradní teploty chromatičnosti z důvodu dominantnější vrcholu ve spektru v pásmu 430-500 nm.

12. PROTOKOL O MĚŘENÍ

Protokol o provozním měření podílu modré složky osvětlení pomocí parametru U500 musí obsahovat všechny informace potřebné pro kontrolu a ověření měření. Protokol musí mít jedinečné kódové označení pro jeho jednoznačnou identifikaci a jednotlivé strany musí být očíslovány.

Protokol musí obsahovat minimálně tyto informace:

- označení venkovního prostoru nebo pozemní komunikace;
- datum a čas měření;
- účel, druh a stupeň přesnosti měření;
- informace o použitých měřicích přístrojích (typ, výrobce, číslo, datum kalibrace / kalibrační list);
- informace o odborné způsobilosti osoby provádějící měření;
- charakteristiku prostoru (geometrie, účel, typ komunikace, zóna světelného prostředí Z0–Z4);

- popis osvětlovací soustavy (typ svítidel, LED modul, řídicí systémy);
- stav údržby (znečištění svítidel, lhůty čištění apod.);
- podmínky a postup měření (napájecí napětí, teplota vzduchu, stabilizace, eliminace parazitního světla, clonění);
- výkresy se zakreslením svítidel a kontrolních bodů;
- výška měřicího bodu nad zemí;
- naměřené a korigované hodnoty U500 v kontrolních bodech, použité korekční činitelé;
- vyhodnocení měření, porovnání výsledků s limity U500 dle příslušné zóny světelného prostředí (Z0–Z4);
- seznam osob účastnících se měření;
- objednatel;
- podpis odpovědného pracovníka.

Doporučená obsahová struktura protokolu je popsána v oddílech A–H níže.

A. Identifikační údaje

Kód	Popis položky
A1	Název projektu
A2	Druh měření – měřená veličina (obsah modré složky), typ měření (provozní ověření)
A3	Objednatel (název, adresa)
A4	Zpracovatel (název, adresa)
A5	Osoby provádějící měření (jméno, příjmení, číslo dokladu způsobilosti)
A6	Datum a čas měření

B. Podklady

Kód	Popis položky
B1	Seznam vstupních podkladů (projektová dokumentace, situační plán, fotodokumentace)
B2	Seznam použitých technických norem a právních předpisů

C. Prostor, prostředí, okolí

Kód	Popis položky
C1	Geometrie prostoru nebo pozemní komunikace (rozměry, situace, půdorysné schéma)
C2	Okolní prostředí (charakter zástavby, zeleň, přirozená temnota)
C3	Účel prostoru nebo komunikace (třída komunikace, přiřazená zóna světelného prostředí Z0–Z4)
C4	Stínicí překážky a parazitní osvětlení (popis, přijatá opatření k eliminaci)

D. Osvětlovací soustava

Kód	Popis položky
D1	Typ osvětlovací soustavy (výložníkové, závěsné apod.)
D2	Svítidla (výrobce, typ, počet, výška instalace [m], sklon [°], krytí IP)
D3	LED modul / světelný zdroj (výrobce, typ, barevná teplota CCT [K], index podání barev

Kód	Popis položky
	CRI, příkon [W])
D4	Ovládací a řídicí zařízení a jejich nastavení v době měření (stmívání [%], provozní režim, hladina osvětlenosti)
D5	Stav údržby (datum poslední údržby, stupeň znečištění svítidel, lhůty čištění)

E. Parametry prostředí

Kód	Popis položky
E1	Klimatické podmínky v době měření (sucho, mlha, déšť, sněžení – uvést aktuální stav)
E2	Teplota okolního vzduchu na začátku a konci měření [°C]
E3	Napájecí napětí na svorkách světelného obvodu [V]

F. Měřicí přístroje

Kód	Popis položky
F1	Hlavní měřicí přístroj – radiometr: typ, výrobce, výrobní číslo, datum kalibrace / číslo kalibračního listu
F2	Pomocné měřicí přístroje: luxmetr (typ, výr. číslo, datum kalibrace), teploměr, voltmetr

G. Měření

V tomto oddíle se zaznamenávají všechny podstatné okolnosti vlastního měření a jeho výsledky, včetně korekcí specifických pro parametr U500.

Kód	Popis položky
G1	Popis měřeného prostoru nebo pozemní komunikace (název, adresa, GPS souřadnice)
G2	Stav osvětlovací soustavy v době měření (počet nefunkčních zdrojů, nastavení regulace, provozní režim)
G2a	Typ a výrobce svítidla, jmenovitá teplota (náhradní) chromatičnosti CCT a CRI dle technického listu výrobce
G3	Popis eliminace parazitního světla a clonění – opatření přijatá při měření
G4	Počet opakování měření: 3 měření u každého svítidla, celkem 2 svítidla téhož typu (6 hodnot na typ)
G5	Kontrolní body: umístění (vzdálenost od svítidla [m], poloha v průsečíku svislice z optického středu) a výška měření [m]
G6	Nekorigované hodnoty $U500_{0,i}$ v kontrolních bodech pro každé jednotlivé měření (%) – viz příloha P2
G6a	Průměrná hodnota $U500_{0,avg}$ ze 6 měření daného typu svítidla
G7a	Výsledná hodnota svítidla $U500_{lum} = 0{,}85 \cdot U500_{0,avg}$ (%) s vyjádřením relativní rozšířené nejistoty $U_{U500,rel}$ a absolutní rozšířené nejistoty $U_{U500,abs}$
G8	Výsledný zápis: $U500_{lum}$ = (xx,x ± yy) % (viz kap. 10)

H. Vyhodnocení měření

Kód	Popis položky
H1	Porovnání výsledné hodnoty $U500_{lum}$ s limitní hodnotou pro danou zónu světelného prostředí
H1a	Výsledek posouzení pro každý typ svítidla: osvětlení vyhovuje / nevyhovuje požadavkům na parametr U500
H2	Celkové zhodnocení měření – jednoznačný závěr o souladu s právními předpisy, technickými normami nebo projektem
H3	Podpis odpovědné osoby a datum vyhotovení protokolu

Přílohy

Příloha	Obsah
P1	Výkresy situace s rozmístěním svítidel a vyznačením kontrolních bodů (půdorys, případně pohled)
P2	Naměřené hodnoty U500 v kontrolních bodech – tabulky nebo výkresy; průměrná hodnota $U500_{0,avg}$ a výsledná hodnota $U500_{lum} \pm U_{U500,abs}$ pro každý typ svítidla
P3	Kalibrační list radiometru; ověřovací list luxmetru
P4	Doklad o odborné způsobilosti osoby zodpovědné za měření (zákon č. 250/2021 Sb. a nařízení vlády č. 194/2022 Sb.)

Doporučený vzor záznamu výsledků měření U500 (příloha P2)

Pro každý měřený typ svítidla (2 svítidla × 3 měření) se doporučuje zaznamenat hodnoty do tabulky:

Svítidlo	Měření 1 [%]	Měření 2 [%]	Měření 3 [%]	Průměr [%]
Svítidlo A	xx,x	xx,x	xx,x	xx,x
Svítidlo B	xx,x	xx,x	xx,x	xx,x

Průměrná hodnota ze 6 měření	$U500_{0,avg}$	xx,x (%)
Výsledná hodnota svítidla	$U500_{lum} = 0{,}85 \cdot U500_{0,avg}$	xx,x (%)
Relativní hodnota rozšířené nejistoty	$U_{U500,rel}$	±x,x (%)
Absolutní hodnota rozšířené nejistoty	$U_{U500,abs}$	±x,x (%)
Výsledná hodnota vč. nejistoty		(xx,x ± x,x) %
Limit pro danou zónu (Z0–Z4)	Zx	xx %
Výsledek:		**vyhovuje / nevyhovuje**