



Samband mellan synbarhet och vägbelysningens färg

En litteraturstudie om mätmetoder och synbarhetsexperiment

Carina Fors

Utgivare:  581 95 Linköping	Publikation: VTI publikation 687		
Författare: Carina Fors	Utgivningsår: 2010	Projektnummer: 40832	Dnr: 2010/0278-26
Titel: Samband mellan synbarhet och vägbelysningens färg – en litteraturstudie om mätmetoder och synbarhetsexperiment			
Referat (bakgrund, syfte, metod, resultat) max 200 ord: Befintliga metoder för att mäta och beskriva vägbelysningsparametrar bygger på hur ögat uppfattar ljus i dagsljusförhållanden. I mörkertrafik där ljusnivåerna är låga – i det så kallade mesopiska området – kan dagens metoder ge missvisande resultat. Mer korrekta mätmetoder kan ge bättre och mer enhetliga ljusförhållanden, men även energibesparingar om belysningsstyrkan för vissa typer av vägbelysning kan sänkas. Den här rapporten sammanfattar litteratur om nya mesopiska mätmetoder och modeller som bättre än dagens metoder predicerar synförmåga i olika typer av vägbelysning/belysningsfärg vid låga ljusnivåer. Vidare granskas och sammanfattas resultat från empiriska studier där man undersökt sambandet mellan synförmåga och belysningens färg. I litteraturen finns flera metoder och modeller föreslagna. Metoderna visar tämligen entydigt att vitt ljus ger bättre synförmåga än gult ljus vid låga (ca 0,1 cd/m ² eller lägre) luminansnivåer men att det är ganska liten skillnad vid högre nivåer (ca 1 cd/m ² eller högre). En begränsning med de föreslagna metoderna är att de är utvecklade i labbmiljö och ännu inte är utvärderade i naturliga trafikmiljöer, bortsett från enstaka studier. Litteraturgenomgången visar att det i dagsläget inte finns tillräckligt vetenskapligt stöd för att göra ändringar i gällande rekommendationer för vägbelysning.			
Nyckelord: Vägbelysning, mesopiskt seende, synbarhet, mätmetoder, S/P-kvot			
ISSN: 0347-6030	Språk: Svenska	Antal sidor: 43	

Publisher:  SE-581 95 Linköping Sweden	Publication: VTI rapport 687		
	Published: 2010	Project code: 40832	Dnr: 2010/0278-26
	Project: S/P ratio and visibility in street lighting applications – a literature review		
Author: Carina Fors	Sponsor: Swedish Transport Administration		
Title: The relationship between visibility and light source colour – a literature review			
Abstract (background, aim, method, result) max 200 words: <p>Available methods for measuring and describing street lighting parameters are based on how the human eye perceives light in daylight conditions. In night-time traffic where the light levels are low – in the so called mesopic range – the current methods can be misleading. Better measurement methods can give better and more uniform light conditions, but also energy savings.</p> <p>This report summarizes literature on new mesopic measurement methods and models that better than today's methods predict visual performance in different types of street lighting at low light levels. Furthermore, studies on the relationship between visual performance and the colour spectrum of the light are reviewed.</p> <p>Several methods and models have been suggested in the literature. The methods show that white light gives better visual performance than yellow light at low (ca 0.1 cd/m² or lower) luminance levels, but that the difference is small at higher levels (ca 1 cd/m² or higher). A limitation with the methods is that they are developed in a lab environment and are not yet evaluated in natural traffic environments, with a few exceptions.</p> <p>The literature review shows that today there is not enough scientific evidence to suggest any changes in the current recommendations for street lighting.</p>			
Keywords: Street lighting, mesopic vision, visibility, measurement methods, S/P ratio			
ISSN: 0347-6030	Language: Swedish	No. of pages: 43	

Förord

Den här litteraturstudien har finansierats av Trafikverket med Peter Aalto som handläggare.

Carina Fors har läst litteraturen och författat rapporten. Claes Eriksson, informations-specialist vid VTI:s Bibliotek och informationscenter (BIC) har genomfört litteratursökningarna. Sara Nygårdhs, VTI, och Sven-Olof Lundkvist, VTI, har gett värdefulla synpunkter på rapportens innehåll i samband med granskningsseminariet.

Tack till alla som har bidragit till arbetet med rapporten!

Linköping juni 2010

Carina Fors

Kvalitetsgranskning

Granskningsseminarium genomfört 2010-06-24, där Sara Nygårdhs var lektor. Carina Fors har genomfört justeringar av slutligt rapportmanus. Forskningschef Jan Andersson har därefter granskat och godkänt publikationen för publicering 2010-08-17.

Quality review

Review seminar was carried out on 24 June 2010 where Sara Nygårdhs reviewed and commented on the report. Carina Fors has made alterations to the final manuscript of the report. Research director Jan Andersson examined and approved the report for publication on 17 August 2010.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	5
Summary	7
Ordlista	9
1 Inledning	11
1.1 Människans syn	11
1.2 Belysningstekniska begrepp	14
1.3 Vägbelysningsklasser	15
1.4 Ljuskällor	17
1.5 Mätning av ljusparametrar	17
1.6 Mätning av synförmåga	18
1.7 Mesopiskt seende och vägbelysning – historik	18
2 Litteratursökning	20
3 Metoder för att beskriva sambandet mellan synförmåga och ljuskällans färgspektrum i det mesopiska området	21
3.1 Klassificering av ljuskällan	22
3.2 Effektivitetsfaktor	23
3.3 Mesopiska känslighetsfunktioner	24
3.4 Diskussion och sammanfattning av metoder och modeller	27
4 Samband mellan synbarhet och ljuskällans färgspektrum	31
4.1 Experiment i fält	32
4.2 Experiment i laboratoriemiljö	34
4.3 Kostnadsberäkningar	36
4.4 Olycksrisker	37
5 Diskussion och rekommendationer	38
5.1 Rekommendationer	39
Referenser	41

Samband mellan synbarhet och vägbelysningens färg – en litteraturstudie om mätmetoder och synbarhetsexperiment

av Carina Fors
VTI
581 95 Linköping

Sammanfattning

Befintliga metoder för att mäta och beskriva vägbelysningsparametrar bygger på hur ögat uppfattar ljus i dagsljusförhållanden. I mörkertrafik där ljusnivåerna är låga – i det så kallade mesopiska området – kan dagens metoder ge missvisande resultat. Ljusheten från gulaktiga ljuskällor, såsom högtrycksnatriumbelysning, tenderar att överskattas, medan ljusheten från vitt ljus tenderar att underskattas. Bättre och mer korrekta mätmetoder kan ge bättre och mer enhetliga ljusförhållanden, men även energibesparingar om belysningsstyrkan för vissa typer av vägbelysning kan sänkas.

Den här rapporten sammanfattar litteratur om nya mesopiska mätmetoder och modeller som bättre än dagens metoder predicerar synförmåga i olika typer av vägbelysning/belysningsfärg vid låga ljusnivåer. Vidare granskas och sammanfattas resultat från empiriska studier där man undersökt sambandet mellan synförmåga och belysningens färg.

I litteraturen finns ett flertal metoder och modeller föreslagna. Metoderna visar tämligen entydigt att vitt ljus ger bättre synförmåga än gult ljus vid låga (cirka $0,1 \text{ cd/m}^2$ eller lägre) luminansnivåer, men att det är ganska liten skillnad vid högre nivåer (cirka 1 cd/m^2 eller högre). Olika metoder ger något olika resultat, vilket delvis kan förklaras av att man använt olika mått på synförmåga. En begränsning med de föreslagna metoderna är att de är utvecklade i labbmiljö och ännu inte är utvärderade i naturliga trafikmiljöer, bortsett från enstaka studier.

Litteraturgenomgången visar att det i dagsläget inte finns tillräckligt vetenskapligt stöd för att göra ändringar i gällande rekommendationer för vägbelysning. Det finns förhållandevis få studier från reell trafik och de ger inte entydiga resultat. Mycket forskning pågår dock och den internationella belysningsorganisationen CIE förväntas inom kort föreslå nya rekommendationer för mesopisk fotometri.

Resultaten från litteraturstudien kan sammanfattas i följande rekommendationer till Trafikverket:

- Kunskapsspridning – det kan vara bra att känna till att dagens mätmetoder kan ge felaktiga resultat i mesopiska förhållanden
- Bevaka forskningen – mesopisk fotometri är ett aktuellt område inom belysningsforskningen
- Avvakta nya rekommendationer från CIE – nya rekommendationer för mesopisk fotometri för vägbelysning förväntas inom kort
- Helhetsgrepp i fortsatt forskning – synbarheten påverkas av en mängd faktorer och det är ännu inte klarlagt vilken påverkan enskilda faktorer har på synbarheten eller hur de interagerar.

The relationship between visibility and light source colour – a literature review

by Carina Fors

VTI (Swedish National Road and Transport Research Institute)

SE-581 95 Linköping Sweden

Summary

Available methods for measuring and describing street lighting parameters are based on how the human eye perceives light in daylight conditions. In night-time traffic where the light levels are low – in the so called mesopic range – the current methods can be misleading. The brightness from yellowish light sources, such as high pressure sodium lamps, tends to be overestimated while the brightness from white light tends to be underestimated. Better and more correct measurement methods can give better and more uniform light conditions, but also energy savings if the illuminance for some light sources can be lowered.

This report summarizes literature on new mesopic measurement methods and models that better than today's methods predict visual performance in different types of street lighting (i.e. lighting with different colour spectrum) at low light levels. Furthermore, studies on the relationship between visual performance and the colour spectrum of the light are reviewed.

Several methods and models have been suggested in the literature. The methods show quite unambiguously that white light gives better visual performance than yellow light at low (ca 0.1 cd/m² or lower) luminance levels, but that the difference is small at higher levels (ca 1 cd/m² or higher). The suggested methods give somewhat different results, which partly can be explained by the fact that different measures on visual performance have been used. A limitation with the methods is that they are developed in a lab environment and are not yet evaluated in natural traffic environments, with a few exceptions.

The literature review shows that today there is not enough scientific evidence to suggest any changes in the current recommendations for street lighting. There are relatively few studies from real traffic environments and they show ambiguous results. However, a lot of research is going on in this area and the international lighting organization CIE is expected to suggest new recommendations for mesopic photometry in a short time.

The results from the literature review can be summarized in the following recommendations to the Swedish Transport Administration:

- Spread of knowledge – it might be important to know that today's measurement methods can be misleading in the mesopic range
- Pay attention to research – mesopic photometry is an area that has generated a lot of publications the last few years
- Await new recommendations from CIE – new recommendations for mesopic photometry are expected in a short time
- A comprehensive view on further research – the visual performance is a result of many factors and it is not fully known how every single factor affects visibility or how different factors interact.

Ordlista

Ord och begrepp

Fotopisk	Syftar på dagsljus-/färgseende
Mesopisk	Syftar på en blandning av dagsljus- och mörkerseende
Skotopisk	Syftar på mörker-/monokromatiskt seende

Förkortningar

CIE	<i>Commission internationale de l'éclairage</i> , internationell belysningsorganisation
HPS	<i>High pressure sodium</i> (högtrycksnatrium)
LPS	<i>Low pressure sodium</i> (lågtrycksnatrium)
MH	Metallhalogen
S/P	Skotopisk/fotopisk
VGU	Vägar och gators utformning, rekommendationer utgivna av Vägverket och Svenska Kommunförbundet 2004
ÅDT	Årsmedeldygnstrafik

Storheter och enheter

Belysningsstyrka, E [lx]	Ljusflödet mot en yta, viktat efter ögats känslighetsfunktion
Luminans, L [cd/m ²]	Ljusheten hos en yta, viktat efter ögats känslighetsfunktion
V_{λ}	Ögats känslighetsfunktion i fotopiska förhållanden
V'_{λ}	Ögats känslighetsfunktion i skotopiska förhållanden

1 Inledning

Vägbelysning syftar till att öka säkerheten och tryggheten för dem som vistas i trafiken under dygnets mörka timmar. *Vägar och gators utformning* (VGU) ger riktlinjer för hur vägbelysningen ska utformas i olika trafikmiljöer, där bland annat vägtyp och årsmedeldygnstrafik (ÅDT) styr vilken belysning som ska väljas (Vägverket, 2004). Belysningen delas in i ett antal belysningsklasser baserat på belysningsstyrka eller vägytans luminans (ljushet). Belysningsstyrka och luminans mäts med instrument som är anpassade efter hur människan uppfattar ljus under dagsljusförhållanden. I mörker förändras ögats känslighet för ljus, vilket innebär att två ljuskällor med olika färgspektrum som uppfattas ge samma luminans vid höga ljusnivåer kan uppfattas ge olika luminans vid låga ljusnivåer.

Den vanligaste lamptypen för vägbelysning är högtrycksnatriumlampor som är driftsäkra och ses som förhållandevis energi- och kostnadseffektiva. Högtrycksnatrium ger ett gulaktigt sken (beskrivs även som orange-rosa) och används främst på vägar för motortrafik. Ljuskällor med vitt ljus ger en bättre färgåtergivning men anses i allmänhet som mindre energieffektiva och används därför mer sparsamt och i huvudsak på gång- och cykelvägar.

Nyare forskning indikerar att vitt ljus kan vara fördelaktigt både ur synbarhets- och energisynpunkt, se t.ex. (Morante, 2008). Resultaten kan delvis förklaras av att det sker en teknikutveckling där nya, mer energieffektiva lamptyper kommer ut på marknaden. En annan del av förklaringen ligger i mätmetodiken. Genom att använda metoder som bättre än en vanlig luminansmätare återger hur ögat uppfattar ljus vid låga luminansnivåer fås en annorlunda bild av vilka ljuskällor och -nivåer som ger en god synbarhet.

Syftet med den här studien är att sammanställa litteratur om sambandet mellan synbarhet och ljuskällans färgspektrum samt om metoder för att mäta detta samband. Målet är att studien ska ge konkreta och vetenskapligt baserade rekommendationer för hur man ska bedöma inverkan av ljuskällans färg på synbarheten, för att man i förlängningen ska kunna välja ljuskällor och -nivåer som ger en god synbarhet med minsta möjliga energiförbrukning.

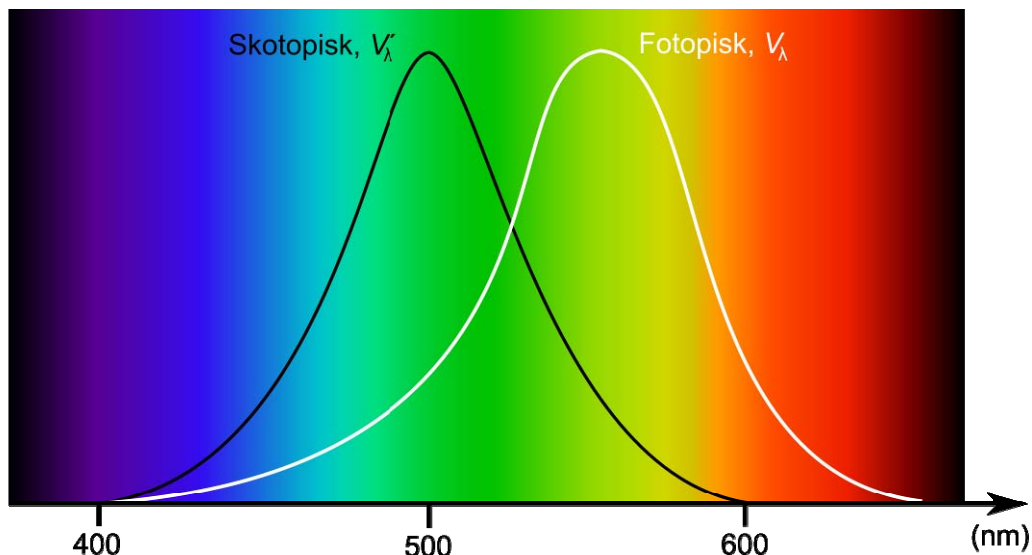
Rapporten är indelad i två delar. Den första delen handlar om nya metoder och modeller för att mäta och beskriva ljus. Den andra delen handlar om synbarhetsexperiment i olika typer av belysning.

1.1 Människans syn

Ögats känslighet varierar med ljusets färg. Dagsljusseendet kallas för **fotopiskt** seende och ögat kan då uppfatta alla färger i hela det synliga spektrat, med högst känslighet för gul-gröna nyanser, Figur 1. Vid mycket låga luminansnivåer ser ögat omgivningen i en gråskala – vilket kallas **skotopiskt** seende – men även då varierar känsligheten med färgen på ljuset. Grön-blå uppfattas som ljusast medan blå-lila och gula nyanser upplevs som mörka. Rött kan inte detekteras alls, utan upplevs som svart. Förskjutningen av den maximala känsligheten från gul-grönt i dagsljus till grön-blått i mörker kallas Purkinjeskift. (Blake och Sekuler, 2006)

Ljusförhållandena i mörkertrafik gör att både det fotopiska och det skotopiska seendet bidrar till hur ögat detekterar ljus. Blandningen av fotopiskt och skotopiskt seende kallas **mesopiskt** seende.

Ögats känslighet för färger under mesopiska förhållanden kan inte beskrivas lika enkelt som under rent fotopiska eller skotopiska förhållanden (Figur 1). Under mesopiska förhållanden bidrar det fotopiska och det skotopiska seendet olika mycket beroende på luminansnivå. De varierande luminansnivåerna i mörkertrafik, där förhållandevis starka, punktformiga ljuskällor och helt mörka områden kan finnas i synfältet samtidigt, komplicerar bilden ytterligare.



Figur 1 Ögats känslighetsfunktion i skotopiska (mörker), V_{λ}' , respektive fotopiska (dagsljus), V_{λ} , förhållanden. Kurvorna i figuren är normerade.

Uttryckt i luminansnivåer (se även nästa avsnitt) motsvarar fotopiskt seende $\geq 10 \text{ cd/m}^2$, mesopiskt seende 10^{-1} - 10 cd/m^2 och skotopiskt seende $\leq 10^{-1} \text{ cd/m}^2$ (Blake och Sekuler, 2006). Här kan tilläggas att något olika siffror förekommer i olika källor. I vetenskapliga artiklar benämns ofta intervallet 10^{-3} - 3 cd/m^2 som mesopiskt område (Lewin, 1999; Bullough och Rea, 2004; Fotios och Cheal, 2005), men även andra intervall förekommer i litteraturen (Eloholma, Viikari et al., 2005).

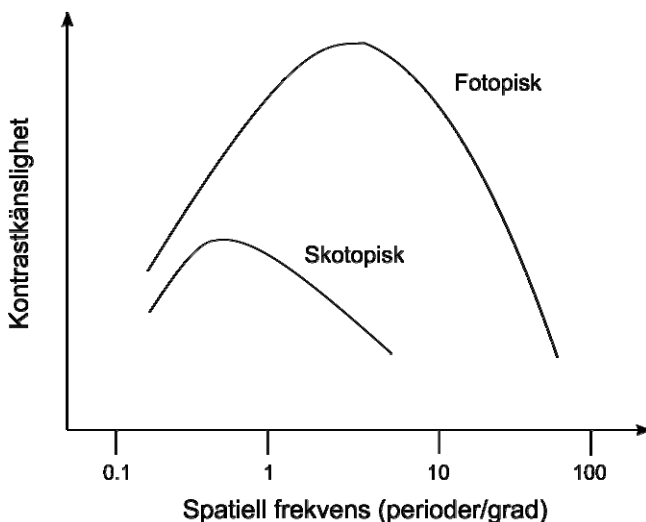
Ögat har två typer av ljuskänsliga receptorer: tapparna och stavarna. Tapparna står för färgseendet och det foveala seendet, dvs. detaljseendet i synfältets centrum, medan stavarna i huvudsak finns i det perifera synfältet. Stavarna har högre ljuskänslighet än tapparna, men kan inte urskilja färger. De fotopiska och skotopiska känslighetsfunktionerna motsvaras ungefär av tapparnas respektive stavarnas ljuskänsligheter. Det innebär att vid de ljusförhållanden som råder i mörkertrafiken – då både tapparna och stavarna är aktiverade – så kan belysningens färg ha olika inverkan i olika delar av synfältet. (Lewin, 1999).

Ögat urskiljer objekt från omgivningen med hjälp av kontraster, dvs. en skillnad i t.ex. luminans, färg eller textur (Olson och Farber, 2003). I mörkertrafik är det framförallt luminanskontrast som bidrar till att objekt kan upptäckas, men även färg- och texturkontraster kan bidra till upptäckbarheten där belysningen är god. Ögat uppfattar skillnader i luminans snarare än absoluta luminansvärden, vilket illustreras av Figur 2, där det horisontella fältet i mitten har samma nyans, men uppfattas vara ljusare till vänster än till höger, beroende på omgivningens luminans. Kontrastkänsligheten varierar både med luminansnivå och med spatiell frekvens, Figur 3. Fina detaljer, t.ex. text är därför svårare att urskilja i mörker än i dagsljus, medan kontraster hos större föremål kan uppfattas i såväl ljus som mörker.



Figur 2 Det horisontella fältet i mitten har en konstant nyans, men uppfattas variera i ljushet beroende på det omgivande fältets variation i ljushet. (Bild: Wikipedia)

Färgkontrast kan påverkas av belysningens färg. Monokromatiska ljuskällor (t.ex. lågtrycksnatriumlampor) ger en mycket dålig färgåtergivning och därmed låga färgkontraster. Däremot ändras färgkontrasten inte mycket då ljuskällans färg varierar, förutsatt att ljuskällan är bredbandig. Färger och färgkontraster uppfattas ungefär lika i blåaktigt dagsljus som i gulaktigt glödlampssken, eftersom ögat och synsinnet kan anpassa sin färgkänslighet i viss utsträckning (Blake och Sekuler, 2006). Detta kan jämföras med fotografier tagna inomhus utan blix. Om inte kameran är inställd på att kompensera för inomhusljuset får bilderna en gulaktig ton. I synsinnet sker den kompensationen automatiskt.



Figur 3 Kontrastkänsligheten varierar med luminansnivå och spatiell frekvens.

Kontrastkänsligheten försämras med åldern och äldre kan därför behöva starkare belysning än yngre för att uppnå en god synförmåga. Äldre är även mer känsliga för bländning och de kan ha förändrat färgseende beroende på att linsen gulnar med åldern. (Puell, Palomo et al., 2004; Blake och Sekuler, 2006).

1.2 Belysningstekniska begrepp

Ljus och belysning kan mätas och beskrivas med ett antal olika parametrar. I VGU används i huvudsak belysningsstyrka och/eller luminans för att klassificera belysningen (Vägverket, 2004). Nedan beskrivs dessa och några ytterligare parametrar som förekommer i belysningssammanhang.

- **Strålningsflöde**, Φ [W]. Totala effekten av den elektromagnetiska strålning som emitteras från en ljuskälla. Enheten är watt.
- **Ljusflöde**, Φ_v [lm]. Den från en ljuskälla utstrålade effekten som kan uppfattas av det mänskliga ögat (fotopiskt eller skotopiskt). Enheten är lumen.
- **Ljusutbyte**, [lm/W]. Anger hur stort ljusflöde som alstras per förbrukad watt.
- **Ljusstyrka**, I [cd]. Ljusflöde per rymdvinkel. Enheten är candela. $I = \Phi_v / \Omega$, där Ω betecknar rymdvinkel (steradianer).
- **Belysningsstyrka**, E [lx]. Ljusflöde per ytenhet. Enheten är lux. $E = \Phi_v / A$, där A betecknar ytans area (m^2). Belysningsstyrka benämns även illuminans (eng: *illuminance*).

Fem belysningsstyrkemått används för att klassificera vägbelysning i VGU:

- **Medelbelysningsstyrka (horisontell)**, \bar{E} [lx]. Aritmetiska medelvärdet av datorberäknade (horisontella) punktbelysningsstyrkor på vägbanan.
 - **Halvsfärisk belysningsstyrka**, E_{hs} [lx]. Ljusflödet som faller på en uppåtvänd halvsfär dividerat med halvsfärens yta. (Till exempel belysningsstyrka på kullersten.)
 - **Vertikal belysningsstyrka**, E_v [lx]. Ljusflödet som faller på en vertikal yta (används vid belysning på t.ex. en fasad).
 - **Halvcylindrisk belysningsstyrka**, E_{sc} [lx]. Ljusflödet som faller på en vertikal halvcylinder dividerat med halvcylinderns yta (används vid belysning där identifikation av personer är viktig).
 - **Belysningsstyrkejämnhet**, [-]. Kvoten mellan den lägsta (horisontella) punktbelysningsstyrkan och det aritmetiska medelvärdet av datorberäknade (horisontella) punktbelysningsstyrkor *eller* den maximala (horisontella) punktbelysningsstyrkan. E_{h-min} / \bar{E} eller E_{h-min} / E_{h-max} .
- **Luminans**, L [cd/m^2]. Reflekterad ljusstyrka per ytenhet. Enheten är candela per kvadratmeter. $L = I/A$, där A betecknar ytans area.

Vägbelysning klassificeras utifrån tre luminansmått:

- **Medelluminans**, \bar{L} [cd/m^2]. Aritmetiska medelvärdet av datorberäknade punktluminansvärden på körbanan.
- **Luminansjämnhet**, U_o [-]. Kvoten mellan det lägsta luminansvärdet på körbanan och medelluminansen. $U_o = L_{min} / \bar{L}$.
- **Längsgående luminansjämnhet**, U_1 [-]. Kvoten mellan det lägsta och det högsta punktluminansvärdet i en längsgående rad av punktluminansvärden, längs med mitten av varje medriktat körfält. $U_1 = L_{min} / L_{max}$.

- **Ströjlusluminans**, L_s [cd/m^2]. Den bländning som uppstår i ögat och som beror på infallande ljusflöde och synriktning i förhållande till ljuskällan. Ströjlusluminansen kan uppskattas med formeln $L_s \approx 9.2E/\theta^2$, där E är belysningsstyrkan vid ögat och θ är vinkeln mellan ljuskällan och observationsriktningen.
- **Threshold increment**, TI [%]. Beskriver den procentuella ökning i vägyteluminans som krävs för att ett objekt ska bli precis synligt vid närvaro av bländande ljus, jämfört med den vägyteluminans som krävs för att objektet precis ska vara synligt i frånvaro av bländande ljus (Crabb och Steele, 2006). För detaljer, se (Boyce, 2009).
- **Luminanskoefficient**, Q_d [$\text{cd}/\text{m}^2/\text{lx}$]. Beskriver förhållandet mellan luminans och belysningsstyrka vid diffus belysning. $Q_d = L/E$. Används för att beskriva ljusheten hos vägytor eller vägmarkeringar.
- **Retroreflektion**, R_L [$\text{cd}/\text{m}^2/\text{lx}$]. Beskriver förhållandet mellan luminans och belysningsstyrka. $R_L = L/E$. Används för att beskriva retroreflekterande material.
- **Luminanskontrast**, C [-]. Beskriver synbarheten hos (stora) objekt. $C = (L_o - L_b)/(L_b + L_s)$, där L_o är objektets luminans, L_b är bakgrundens luminans och L_s är ströjlusluminansen.
- **Ra-index**, - [-]. Beskriver färgåtergivningen hos en ljuskälla relativt en referenskälla, som för färgtemperaturer $<5\ 000$ K är en upphettad svartkropp och $>5\ 000$ K dagsljus. Ra-index anges på en skala från 0 till 100, där 100 motsvarar referenskällans färgåtergivning.
- **S/P-kvot**, - [-]. Beskriver en ljuskällas frekvensinnehåll som kvoten mellan skotopiskt och fotopiskt ljusutbyte (Bullough och Rea, 2004; Fotios och Cheal, 2005).
- **Färgtemperatur**, - [K]. Beskriver ljusets färgton. Enheten är Kelvin. Röda toner har låg färgtemperatur medan blåa toner har hög färgtemperatur.

I rapporten används ordet *ljusnivå* som ett samlat begrepp för nivå på ljusstyrka, belysningsstyrka eller luminans.

1.3 Vägbelysningsklasser

Vägbelysning delas in i ett antal klasser. På vägar och trafikleder för motorfordon används luminansklasser som betecknas ME/MEW (W står för *wet*, dvs. våt vägbana). I konfliktzoner såsom korsningar och rondeller baseras klasserna på belysningsstyrka och betecknas CE. Även på GC-vägar baseras klasserna på belysningsstyrka, men betecknas då S (vägar med plan beläggning) eller A (vägar med icke-plan beläggning). Utöver dessa klasser finns ytterligare klasser för att beskriva avskärmning och belysning i särskilda miljöer. Luminans- och belysningsvärdena i VGU följer europastandarden SS-EN 13201. Klasserna ME/MEW, CE och S beskrivs kortfattat i Tabell 1, Tabell 2 och

Tabell 3. En fullständig beskrivning över samtliga belysningsklasser återfinns i VGU (Vägverket, 2004).

Tabell 1 Belysningsklassen ME/MEW. Används på vägar och trafikleder för motorfordon.

Klass	Torr vägbana, ME			Våt vägbana, MEW
	\bar{L} (cd/m ²) [min]	U_o [min]	$U_i^{(1)}$ [min]	U_o [min]
ME/MEW1	2,0	0,4	0,6	0,15
ME/MEW2	1,5	0,4	0,6	0,15
ME/MEW3	1,0	0,4	0,6	0,15
ME/MEW4	0,75	0,4		0,15
ME/MEW5	0,5	0,4		0,15

1) Användning av U_i är frivillig och tillämpas på motorväg.

Tabell 2 Belysningsklassen CE. Används i konfliktzoner.

Klass	\bar{E} (lx) [min]	U_o [min]
CE0	50	0,4
CE1	30	0,4
CE2	20	0,4
CE3	15	0,4
CE4	10	0,4
CE5	7,5	0,4

Tabell 3 Belysningsklassen S. Används på GC-vägar med plan beläggning.

Klass	\bar{E} (lx) [min]	\bar{E}_{\min} (lx) [min]
S1	15	5
S2	10	3
S3	7,5	1,5
S4	5	1
S5	3	0,6
S6	2	0,6
S7	–	–

VGU ger rekommendationer för vilken belysningsklass som ska användas på en viss typ av väg eller plats. Rekommendationerna baseras bland annat på vägtyp, ÅDT, trafikmiljöns komplexitet och skyltad hastighet.

1.4 Ljuskällor

VGU rekommenderar sju olika typer av ljuskällor för vägbelysning (Vägverket, 2004). Ljuskällorna och deras egenskaper listas i Tabell 4.

Tabell 4 Ljuskällor för vägbelysning (Vägverket, 2004).

Ljuskälla	Ljusutbyte (lm/W)	Livslängd (1000 h)	Ra-index	Färgtemp. (K)	Användningsområden
Keramisk metallhalogen (MH)	70–95	8–16	80–90	3 000–4 200	Gator, GC-vägar, torg, parker
Högtrycksnatrium (HPS)	70–120	12–22	20–60	2 000–2 200	Vägbelysning
Kvicksilver	40–50	12–16	55	3 400–4 100	Komplettering på befintl.
Kompaktlysrör	60–75	8–12	80–90	2 700–4 000	GC-vägar, torg, parker
Lysrör	100	11–40	80–90	2 700–4 000	Väg- och GC-tunnlar
Induktionslampa	60–70	60	80	2 700–3 000	GC-vägar, torg, parker
Lysdioder ¹	–	–	–	–	Visuell ledning

1) Lysdioder finns i olika utföranden som ger olika värden.

På vägar för motortrafik används vanligtvis högtrycksnatriumlampor (HPS), eftersom de är förhållandevis energieffektiva och driftsäkra. I tätort, framförallt på gator och platser där gående och cyklister vistas, väljs i första hand belysning med vitt ljus – t.ex. metallhalogen (MH) – som ger bättre färgåtergivning. Lågtrycksnatrium (LPS), som har ett gulaktigt ljus, var tidigare en vanligt förekommande lamptyp för vägbelysning men används i stort sett inte alls idag.

1.5 Mätning av ljusparametrar

VGU ger anvisningar för hur vägbelysningens egenskaper skall beräknas, vilket vanligtvis görs med ett datorprogram. Med hjälp av ett datorprogram kan man enkelt variera olika parametrar för att sedan kunna välja en belysning som uppfyller kraven i en viss belysningsklass.

Fysikalisk mätning av belysningsparametrar medför vissa svårigheter. Belysningsstyrka kan mätas förhållandevis enkelt med en luxmeter, men omgivningsljus från t.ex. fordon och byggnader påverkar mätningen. En luxmeter ger vanligtvis fotopisk belysningsstyrka, men även skotopiska instrument finns.

Vägyteluminans kan mätas med en luminansmätare. Luminansen är dock i hög grad riktningsberoende, vilket ställer krav på hur instrumentet placeras och riktas. Även avståndet mellan instrument och mätområde påverkar det uppmätta mätvärdet. Vägens lutning och kurvatur komplicerar mätningarna ytterligare och på samma sätt som vid

mätning av belysningsstyrka störs luminansmätningar lätt av omgivningsljus. I en litteraturstudie av Nygårdhs ges exempel på några olika metoder för att mäta luminans (Nygårdhs, 2006), men det finns idag ingen enkel, snabb och standardiserad metod. Att en befintlig vägbelysningsanläggning uppfyller de rekommendationer som ges i VGU kan därför inte mätas och kontrolleras på ett enkelt sätt.

1.6 Mätning av synförmåga

Kontrasttröskel beskriver förmågan att se en skillnad i ljushet mellan ett föremål och dess bakgrund. En låg kontrasttröskel innebär att ögat kan urskilja små skillnader i ljushet, dvs. synbarheten är hög (Lewin, 1999). **Reaktionstid** som funktion av luminansnivå kan mätas på olika sätt. Ett sätt är att mäta tiden det tar för en försöksperson att identifiera ett objekts orientering (Lewin, 1999). **Ljushetsmatchning** (eng. *brightness matching*) innebär att två fält – ett referensfält och ett testfält – med olika färg placeras intill varandra. En försöksperson får sedan justera luminansnivån på testfältet tills hon/han uppfattar att de två fälten har samma ljushet. I **flickerfotometri** visas omväxlande (med ca 15–20 Hz) ett referensfält (vanligtvis vitt) och ett färgat fält för en försöksperson. Försökspersonen får sedan justera luminansnivån för det färgade fältet så att hon/han nätt och jämnt uppfattar att fältet flimrar. **Synskärpan** mäts vanligtvis med hjälp av en teckentavla placerad på ett givet avstånd från försökspersonen. Storleken på de minsta tecknen försökspersonen kan identifiera utgör ett mått på synskärpan.

1.7 Mesopiskt seende och vägbelysning – historik

Belysningsparametrar har historiskt sett beskrivits och mätts i fotopiska mått. Olika forskargrupper har under årens lopp uppmärksammat att synförmågan i mesopiska förhållanden skiljer sig på fler sätt än vad som kan förklaras av skillnaden i (fotopisk) luminans, jämfört med dagsljusförhållanden, se t.ex. (Lewin, 2001). Berman skriver i en artikel från 1992 att nyligen genomförd forskning visat att stavarna – som i huvudsak står för det skotopiska seendet – också påverkar synförmågan vid ljusnivåer motsvarande inomhusbelysning, vilket kan förklara till synes märkliga resultat i många tidigare studier, där skillnader i synförmåga vid olika typer av belysning inte har visat ett tydligt samband med fotopisk luminansnivå (Berman, 1992). Lewin sammanfattar forskningsläget i en artikel i slutet av 1990-talet (Lewin, 1999), då forskningen om mesopisk fotometri för vägbelysningstillämpningar började ta fart (Lewin, 2002). Ett antal studier hade vid den tidpunkten visat att både kontrasttröskel och reaktionstid varierar beroende på ljuskälla vid låga luminansnivåer och Lewin understryker i artikeln behovet av fortsatt forskning.

År 2000 tillsatte *Commission Internationale de L'éclairage* (CIE) en teknisk kommitté (TC 1-58) för att samla resultat från forskning om mesopisk visuell förmåga (Lin, Chen et al., 2006). År 2001 drog CIE slutsatsen att det ännu var för tidigt att rekommendera någon av de då tillgängliga mesopiska modellerna som ett tillägg till befintliga fotometrisk metoderna (Eloholma, Viikari et al., 2005).

Forskningen som bedrivits genom åren har resulterat i en mängd olika slags modeller som var och en oftast bara är giltig under vissa specifika förhållanden (Goodman, 2009). Under det senaste decenniet har forskningen svängt mot ett mer tillämpat tillvägagångssätt, där man strävat efter att ta fram en modell som är mindre noggrann men som täcker in ett större antal betingelser (luminansnivå, mått på synförmåga etc.) och som är tillräckligt enkel för att den ska vara praktiskt användbar.

Under 2000-talet har ett flertal projekt inom området mesopisk fotometri och vägbelysning genomförts. EU-projektet NumeLiTe syftade till att ta fram verktyg för dimensionering av optimal belysning, både ur synbarhets- och energisynpunkt (Crabb och Burtwell, 2004). Ett annat EU-projekt, benämnt MOVE, har tagit fram en mesopisk modell baserad på synfaktorer som är viktiga vid mörkerkörning (Eloholma och Halonen, 2005). Även Lighting Research Center i USA har i en serie studier utvecklat en mesopisk modell (Rea, Bullough et al., 2004). I ett brittiskt projekt har man tittat närmare på användningen av vitt ljus för fotgängare, i samband med att man tillät belysning av en S-klass högre då ljuskällan har vitt ljus (se även kapitel 3.1.1 och kapitel 4.2) (Fotios och Cheal, 2005).

CIE har utvärderat de modeller som tagits fram av MOVE-konsortiet och Lighting Research Center (Goodman och Eloholma, 2007). År 2010 meddelades vid CIE-konferensen *Lighting Quality and Energy Efficiency*¹ att CIE:s tekniska kommitté 1-58 har tagit fram en ny modell, baserad på de utvärderade modellerna, vilken kommer att rekommenderas som en ny CIE-modell för mesopisk fotometri.

Trots de förhållandevis många studier som publicerats det senaste decenniet saknas det i stor utsträckning resultat från fältstudier i reell trafik.

¹ 14–17/3 2010, Wien, Österrike

2 Litteratursökning

Litteratursökningen gjordes av VTI:s Bibliotek och Informationscenter (BIC). Följande databaser inkluderades i sökningen:

- ITRD – International Transport Research Documentation. Innehåller mer än 400000 referenser inom trafik och transport
- TRIS – Transportation Research Information Services. Innehåller mer än 600 000 referenser inom trafik och transport
- TRAX – VTI:s bibliotekskatalog. Innehåller omkring 125 000 referenser inom trafik och transport
- Scopus. Innehåller 40 miljoner referenser inom naturvetenskap, teknik, medicin och humaniora.

Sökorden som valdes var:

S/P-ratio, mesopic luminous efficiency function, mesopic vision, street lighting (inkl synonymer), *light source, spectral distribution, colour rendering, energy consumption/reduction, white light*.

I den allmänna databasen Scopus användes sökordet *mesopi** och sökningen begränsades till förare, trafik och vägar. Därefter gjordes kompletterande sökningar med orden *eye* spectral sensitiv*, spectral sensitivit* (function*), spectral distribut*, colour render*, color render*, lumin* efficiency (function*)* och *heterochromatic brightness*. Även de begränsades till förare, trafik och vägar. I transportdatabaserna användes i huvudsak *mesopi**. Övriga sökord tillförde inte något i de databaserna.

Litteratursökningen begränsades inte i tid, men mycket få publikationer fanns från åren före 2000. De flesta referenser är därför från 2000-talet. Sökningen resulterade i omkring 70 referenser, varav ca hälften valdes ut och beställdes. Ytterligare ett antal referenser har tillkommit under arbetets gång. Totalt har omkring 50 referenser använts. Majoriteten är vetenskapliga artiklar, konferensbidrag eller tekniska rapporter.

3 Metoder för att beskriva sambandet mellan synförmåga och ljuskällans färgspektrum i det mesopiska området

Specifikationer för en ljuskälla, såsom ljusflöde och ljusutbyte, anges vanligtvis som fotopiska värden. Vidare mäts luminans och belysningsstyrka med fotopiska instrument, dvs. instrument som är kalibrerade efter ögats fotopiska känslighetsfunktion. Vissa instrument kan även mäta ljus skotopiskt. Den fotopiska känslighetsfunktionen benämns V_λ medan den skotopiska känslighetsfunktionen benämns V_λ' , Figur 1. V_λ och V_λ' gäller för synfält på 2 grader, dvs. ett smalt område i synfältets centrum. Ögats känslighet i det perifera synfältet skiljer sig lite från känsligheten i synfältets mitt. $V_{10\lambda}$ betecknar känslighetsfunktionen för perifert seende (10 grader) i fotopiska förhållanden. (Lewin, 1999; Lewin, 2001; Bullough och Rea, 2004).

V_λ , V_λ' och $V_{10\lambda}$ är standardiserade funktioner framtagna av *Commission Internationale de L'éclairage* (CIE) och de bygger på ljushetsmatchning och flickerfotometri (Eloholma, Viikari et al., 2005; Stockman och Sharpe, 2006). Redan när funktionerna togs fram (1924, 1951 resp. 1964) var det känt att ljushetsmatchning och flickerfotometri ger olika resultat, varför känslighetsfunktionerna består av medelvärden från de två metoderna. För korta våglängder ger V_λ direkt felaktiga värden (Stockman och Sharpe, 2006). En ytterligare begränsning med CIE:s definition av känslighetskurvor är att den förutsätter additivitet, vilket inte alltid stämmer överens med hur ögat fungerar (Eloholma, Viikari et al., 2005; Stockman och Sharpe, 2006). Om t.ex. två monokromatiska belysta ytor kombineras, uppfattas luminansen vanligtvis som lägre än summan av källornas luminans var för sig. Nyare forskning har visat att de standardiserade känslighetsfunktionerna är kraftigt interpolerade och därför ger en förenklad bild (Crabb och Burtwell, 2004; Várady, Freiding et al., 2007).

Det finns idag ingen standardiserad känslighetsfunktion för det mesopiska området, men ett flertal forskargrupper strävar efter att utveckla och förfina den mesopiska fotometrin. Under 1900-talet har ett antal mesopiska modeller föreslagits i litteraturen, se t.ex. (Rea, Bullough et al., 2004; Eloholma, Viikari et al., 2005; Stockman och Sharpe, 2006). De flesta äldre modeller baseras på ljushetsmatchning, men på grund av de begränsningar metoden har (se ovan) så utgår nyare studier ofta från prestationsbaserade mått, såsom reaktionstid (Lewin, 2002; Eloholma, Viikari et al., 2005). Ett annat skäl till att välja andra mått än ljushetsmatchning är att måtten ska vara så relevanta som möjligt för just mörkerkörning.

Svårigheterna med att ta fram bra mesopiska modeller kan förklaras av att det mesopiska seendet och till viss del även det fotopiska seendet är långt mer komplext än det rent skotopiska (Stockman och Sharpe, 2006). Den skotopiska luminansfunktionen bestäms i huvudsak av fotoreceptorernas (stavarnas) respons, medan de fotopiska och mesopiska motsvarigheterna involverar även efterbearbetning av fotoreceptorernas (tappar och stavar) respons (t.ex. färgidentifiering). Stockman och Sharpe (2006) listar sex svårigheter med mesopisk fotometri:

- Mer än en typ av fotoreceptor är involverad
- Stavar och tappar interagerar
- Stavarnas respons mäts vid en viss ljusnivå vilket ger en snabb och ickelinjär förändring i det mesopiska ljusutbytet
- Stavar och tappar har olika spatiell fördelning på näthinnan (dvs. responderar på olika delar av synfältet)

- Stavar och tappar har olika spatiella kontrastkänsligheter (se även Figur 3)
- Stavar och tappar har olika temporal karakteristik (stavarna är långsammare än tapparna).

I det här kapitlet sammanfattas metoder för att hantera skillnaderna mellan fotopiskt och mesopiskt seende för att man på ett mer korrekt sätt ska kunna beskriva ljusparametrar i mesopiska förhållanden.

3.1 Klassificering av ljuskällan

Ett förhållandevis enkelt sätt att hantera skillnaderna mellan fotopiska mätvärden och den mesopiska verkligheten är att klassificera ljuskällan på ett sätt som beskriver dess prestanda i mesopiska förhållanden. Två metoder förekommer i litteraturen: Ra-index och S/P-kvot.

3.1.1 Ra-index

I Storbritannien används Ra-index som en parameter vid dimensionering av vägbelysning. Storbritannien liksom Sverige baserar sina riktlinjer för vägbelysning på den europeiska standarden SS-EN 13201. År 2003 antogs nya nationella riktlinjer där man tillåts använda belysning av en S-klass högre (dvs. t.ex. S5 istället för S4) då Ra-index ≥ 60 (Fotios och Cheal, 2005). Vidare rekommenderas att belysning på vägar i tätortsmiljö ska ha Ra-index ≥ 20 . I områden där många fotgängare vistas, t.ex. på affärsgator, rekommenderas Ra-index ≥ 60 .

Fotios och Cheal påpekar att riktlinjerna grundar sig på tyckande mer än vetenskap samt att man i riktlinjerna inte definierar begreppet ”vitt ljus”, utan bara anger ett lägsta Ra-index (Fotios och Cheal, 2005). De menar vidare att ljuskällans färgtemperatur påverkar synbarheten, vilket riktlinjerna inte tar hänsyn till. De brittiska riktlinjerna har, efter att de infördes, utvärderats i labbmiljö, se kapitel 4.2.

En begränsning med den nuvarande definitionen av Ra-index är att den inte fungerar särskilt väl för ljus som har färgspektrum med flera smala toppar, som t.ex. LED-lampor (Ohno, 2006). CIE har föreslagit att en ny definition av Ra-index ska tas fram som på ett bättre sätt – dvs. bättre överensstämmande med den visuella upplevelsen – beskriver färgåtergivningen för alla typer av ljuskällor, inklusive LED-lampor och andra icke bredbandiga källor (CIE 2007). Organisationen har därefter tillsatt teknisk kommitté (CIE TC 1-69) som har påbörjat arbetet med definition av och mätmetoder för färgåtergivning hos vita ljuskällor.

3.1.2 S/P-kvot

S/P-kvot är ytterligare en relativt enkel metod för att grovt beskriva en ljuskällas synbarhetsegenskaper i mesopiska förhållanden. S/P-kvot nämns i litteraturen redan på 1960-talet (Berman, 1992), men dyker inte upp i vägbelysningslitteraturen förrän omkring år 2000.

Tabell 5 visar S/P-kvot samt fotopiskt och skotopiskt ljusutbyte för ett antal olika ljuskällor.

Tabell 5 Fotopiskt och skotopiskt ljusutbyte samt S/P-kvot för olika ljuskällor (Bullough och Rea, 2004).

Ljuskälla	Fotopiskt ljusutbyte (lm/W)	Skotopiskt ljusutbyte (lm/W)	S/P-kvot
HPS (400 W)	127	80	0,63
MH (1000 W)	107	182	1,69
Glödlampa, 2815 K	15	20	1,38
Kvicksilver (400 W)	52	67	1,27
Xenon (1 000 W)	30	68	2,26
LPS (180 W)	180	41	0,23
Lysrör, 4 100 K	77	117	1,52
Lysrör, 3 500 K	85	116	1,37
Svavel/plasma (1 375 W)	94	213	2,26

S/P-kvoten kan inte användas för att direkt avgöra vilken belysning som ger bäst synbarhet. Det vill säga, ett högre värde på S/P-kvoten anger bara att belysningen har en större del av sitt spektrum i det skotopiska området än en källa med lägre S/P-kvot. Belysning med högre S/P-kvot som t.ex. MH-belysning har i studier visats ge bättre synbarhet än belysning med lägre S/P-kvot (se kapitel 4), men det finns rimligen en brytpunkt där ökande S/P-kvot ger minskande synbarhet.

3.2 Effektivitetsfaktor

Effektivitetsfaktorn (även benämnd spektral korrektionsfaktor, eng. *spectral correction factor, SCF*) är en faktor som beskriver vilket värde en viss ljusparameter (ljusutbyte, luminans) hos en viss ljuskälla ska multipliceras med för att ett visst mått på synförmåga ska bli lika som hos en annan ljuskälla. Några olika varianter på effektivitetsfaktor förekommer i litteraturen.

3.2.1 Lewis effektivitetsfaktor

Lewis effektivitetsfaktor baseras på (perifer) reaktionstid (Lewis 1998). Metallhalogenbelysning används som referens och har effektivitetsfaktor 1.0. Lewis effektivitetsfaktor beskriver vilket värde en ytas luminans – då den belyses med en viss lamptyp – ska multipliceras med för att reaktionstiden ska bli densamma som reaktionstiden i MH-belysning med en luminans på antingen 1 cd/m² eller 0,1 cd/m².

Tabell 6 Lewis effektivitetsfaktor vid fotopisk luminans 1,0 respektive 0,1 cd/m² (Lewis, 1998).

Ljuskälla	Effektivitetsfaktor, 1 cd/m ²	Effektivitetsfaktor, 0,1 cd/m ²
MH	1,0	1,0
Glödlampa	1,5	2,9
Kvicksilver	2,4	4,4
HPS	3,9	7,8
LPS	4,8	14,6

3.2.2 LEM effektivitetsfaktor

Lewin föreslår en mer generaliserad effektivitetsfaktor som benämns LEM (eng. *lumen effectiveness multiplier*) (Lewin, 2001). LEM ges av

$$LEM = \frac{\text{visual effectiveness of light source}}{\text{visual effectiveness of a referencelight source}} \quad (1)$$

Vilket mått som används för visuell effektivitet/förmåga och vilken ljuskälla som används som referens väljs utifrån tillämpningen. Författaren menar att t.ex. ljushetsbaserade mesopiska känslighetsfunktioner (kapitel 3.3) eller reaktionstidsbaserade känslighetsfunktioner (kapitel 3.3.1, 3.3.2) kan användas som indata till LEM-funktionen. HPS föreslås som referenskälla. Tabell 7 visar exempel på ljushetsbaserad och reaktionstidsbaserad effektivitetsfaktor med HPS som referens.

Tabell 7 Exempel på LEM vid fotopisk luminans 0,1 cd/m² (Lewin, 2001).

Ljuskälla	Ljushetsbaserad effektivitetsfaktor, 0,1 cd/m ²	Reaktionstidsbaserad effektivitetsfaktor, 0,1 cd/m ²
MH	2,11	1,88
Kvicksilver	1,43	1,53
HPS	1,00	1,00
LPS	0,51	0,64

Ljushetsbaserad och reaktionstidsbaserad effektivitetsfaktor från olika studier/forskargrupper har visat god överensstämmelse i vissa fall, men inte alltid (Lewin, 2002).

Luminansnivån kan variera kraftigt i synfältet under de förhållanden som råder i mörkertrafiken. Effektivitetsfaktorn ska därför multipliceras med luminansen för varje enskilt objekt i synfältet för att korrekt återge förväntad synförmåga (Lewin, 2002).

3.3 Mesopiska känslighetsfunktioner

CIE har under 1900-talet försökt ta fram mesopiska känslighetsfunktioner för olika luminansnivåer (Lewin, 2001). Dessa funktioner är dock mycket komplexa och därför

inte praktiskt användbara. Enklare funktioner har tagits fram, men de har haft sämre noggrannhet. CIE:s modeller har baserats på jämförelser av ljushet och involverar både fovealt och perifert seende. Vid låga luminansnivåer ger MH-lampor ungefär dubbelt så stort ljusutbyte som HPS-lampor när beräkningarna baseras på CIE:s metod.

Försöken att ta fram mesopiska känslighetsfunktioner har fortsatt under 2000-talet. Två forskargrupper har tagit fram varsin modell: X-modellen respektive MOVE-modellen. De två modellerna är förhållandevis lika, men har tagits fram med olika typer av experiment oberoende av varandra.

3.3.1 X-modellen

En mesopisk känslighetsfunktion, baserad på de befintliga fotopiska och skotopiska modellerna, föreslås av He och kollegor (He, Rea et al., 1996):

$$V_{mes\lambda} = k(xV_{10\lambda} + (1-x)V_{\lambda}') \quad (2)$$

x är en funktion av bakgrundsluminans, S/P-kvot och ljuskällans spektrala innehåll som anger hur stor vikt som läggs vid den (perifera) fotopiska respektive den skotopiska känslighetsfunktionen. k är en normeringsvariabel som beror på bakgrundsluminansen. Modellen har tagits fram utifrån visuell reaktionstid i HPS- respektive MH-belysning. Det har i ett par efterföljande studier visats att modellen stämmer väl överens med reaktionstider som uppmätts i en annan typ av visuellt experiment (Bullough och Rea, 2004; Szalmas, Bodrogi et al., 2006). Bullough och Rea menar att x skulle kunna användas som en parameter i belysningsspecifikationer, där två källor med samma värde på x kan förväntas ge ungefär samma perifera synförmåga (mätt i reaktionstid) (Bullough och Rea, 2004).

Modellen som tagits fram av He och kollegor har senare förenklats och fått benämningen X-modellen (Rea, Bullough et al., 2004):

$$V_{mes\lambda} = k(XV_{\lambda} + (1-X)V_{\lambda}') \quad (3)$$

X är som ovan en funktion av ljuskällans och den belysta ytans egenskaper, men antas vara linjär mellan 0,001 och 0,6 cd/m², vilket gör den mer praktiskt användbar. X finns tabellerad för olika S/P-kvoter (hos ljuskällan) och fotopiska luminansnivåer < 0,6 cd/m² (Rea, Bullough et al., 2004). Vid den fotopiska luminansnivån 1 cd/m² är $X=1$ och $V_{mes\lambda}$ övergår då i V_{λ} . Tabell 8 visar mesopisk luminans beräknad med X-modellen för fem olika ljuskällor vid en fotopisk luminansnivå på 0,1 cd/m².

Rea och kollegor menar att en mesopisk modell bör uppfylla följande fyra kriterier (Rea, Bullough et al., 2004):

- Modellen ska baseras på människans syn
- Abney's lag² ska vara uppfylld
- Modellen bör baseras på V_{λ} eftersom den är väletablerad
- Modellen ska vara enkel att använda.

X-modellen uppfyller enligt författarna dessa kriterier.

² Abney's lag: den totala luminansen från en bredbandig källa ska vara lika med summan av luminanserna från varje enskild våglängd.

Tabell 8 Mesopisk luminans vid fotopisk luminans $0,1 \text{ cd/m}^2$, beräknad med X-modellen.

Ljuskälla ¹	S/P-kvot	Mesopisk luminans $0,1 \text{ cd/m}^2$
MH	1,65	0,137
Glödlampa	1,35	0,122
Kvicksilver	1,25	0,116
HPS	0,65	0,074
LPS	0,25	0,035

1) Värden finns tabellerade för S/P-kvoter $n \cdot 0,1 + 0,05$, $n = [1, 27]$. Ljuskällornas S/P-kvoter har avrundats till närmsta tabellerade värde.

X-modellen benämns även *Unified photometry* på engelska.

3.3.2 MOVE-modellen

MOVE (*Mesopic Optimisation of Visual Efficiency*) var ett EU-projekt som genomfördes åren 2002–2004, med syfte att ta fram en mesopisk känslighetsfunktion samt att skapa en ny standard för prestationsbaserad mesopisk fotometri (Eloholma och Halonen, 2005; Eloholma och Halonen, 2006; Eloholma, Ketomäki et al., 2006; Goodman, Forbes et al., 2007). MOVE-modellen baseras på ett antal experiment där man strävat efter att mäta synegenskaper som är relevanta för mörkerkörning: kontrasttröskel, reaktionstid och detektionsförmåga. Projektet resulterade i två modeller, som båda är framtagna för eccentricitet 10 grader, dvs. föremål placerade 10 grader från synfältets centrum. Den första är till synes näst intill identisk med den modell som presenteras i kapitel 3.3.1:

$$M(x)V_{mes\lambda} = xV_{\lambda} + (1-x)V_{\lambda}' \quad (4)$$

$M(x)$ är en normeringsfunktion och x är en funktion av ljuskällans S/P-kvot (se även kapitel 3.1.2) och bakgrundens fotopiska luminansnivå (finns tabellerad i (Eloholma och Halonen, 2005)), där MOVE-modellens x -värden även jämförts med variabeln X i ekvation 3). Författarna har även undersökt möjligheten att använda $V_{10\lambda}$ istället för V_{λ} , men fann att de gav likvärdiga resultat och menar att V_{λ} då är att föredra eftersom det är en mer etablerad parameter inom fotometri. Modellen som ges av ekvation 4 är giltig då bakgrund och föremål har relativt bredbandigt färgspektrum. För föremål som är mer eller mindre monokromatiska (enfärgade) ser känslighetsfunktionen annorlunda ut. Kurvan får då tre distinkta toppar som tros vara relaterade till synsinnets mekanismer för färgseende. Den ”kromatiska” modellen ges av:

$$V_{mes\lambda} = a_1V_{\lambda} + a_2V_{\lambda}' + a_3|L_{\lambda} - a_4M_{\lambda}| + a_5S_{\lambda} \quad (5)$$

där a_i är konstanter och S_{λ} , M_{λ} och L_{λ} är känslighetsfunktioner för ögats tre olika typer av färgkänsliga synceller (se t.ex. (Blake och Sekuler, 2006)).

Tabell 9 visar mesopisk luminans beräknad med MOVE-modellen, för fem olika ljuskällor vid fotopisk luminansnivå på 1 cd/m^2 respektive $0,1 \text{ cd/m}^2$ (Goodman, Forbes et al., 2007).

Tabell 9 Mesopisk luminans för två olika fotopiska luminansvärden, beräknad med MOVE-modellen (Goodman, Forbes et al., 2007).

Ljuskälla ¹	S/P-kvot	Mesopisk luminans	
		1 cd/m ²	0,1 cd/m ²
MH	1,65	1,097	0,124
Glödlampa	1,35	1,053	0,114
Kvicksilver	1,25	1,038	0,110
HPS	0,65	0,943	0,085
LPS	0,25	0,874	0,064

1) Värden finns tabellerade för S/P-kvoter $n \cdot 0,1 + 0,05$, $n = [1, 27]$. Ljuskällornas S/P-kvoter har avrundats till närmsta tabellerade värde.

Forskarna inom MOVE-konsortiet menar att modellen som ges av ekvation 2 bör gälla i de flesta verkliga (mörkerkörnings-) situationer, men understryker också att modellen endast är giltig då bakgrund och föremål har bredbandiga färgspektrum.

3.4 Diskussion och sammanfattning av metoder och modeller

Experiment i labbmiljö visar tämligen entydigt att den nuvarande metoden för att mäta och beskriva ljusparametrar, dvs. utifrån den fotopiska känslighetsfunktionen, kan vara missvisande vid de ljusförhållanden som råder i trafiken under dygnets mörka timmar. Behoven av bättre verktyg för att hantera mesopiska förhållanden har lett till ett antal publikationer under framför allt det senaste decenniet, där man föreslagit och diskuterat olika tillvägagångssätt, vilka sammanfattats ovan.

Synsinnet är komplext och kan därför inte modelleras fullt ut, dvs. fotometri kan aldrig bli synonymt med synen (Rea, Bullough et al., 2004). Redan den fotopiska känslighetsfunktionen är en förenkling av verkligheten och mesopiska förhållanden i trafiken är ännu mer komplexa (Eloholma, Viikari et al., 2005). Stockman och Sharpe menar att en mesopisk modell baserad på en linjärkombination av den fotopiska och den skotopiska känslighetsfunktionen, som t.ex. MOVE- och X-modellerna, ger en alltför förenklad bild (Stockman och Sharpe, 2006). De anser därför att det enda konsekventa och reliabla sättet att mäta mesopiskt ljusutbyte är att mäta synförmågan i varje specifik tillämpning. Att ta fram en enda standard är inte möjligt, menar de.

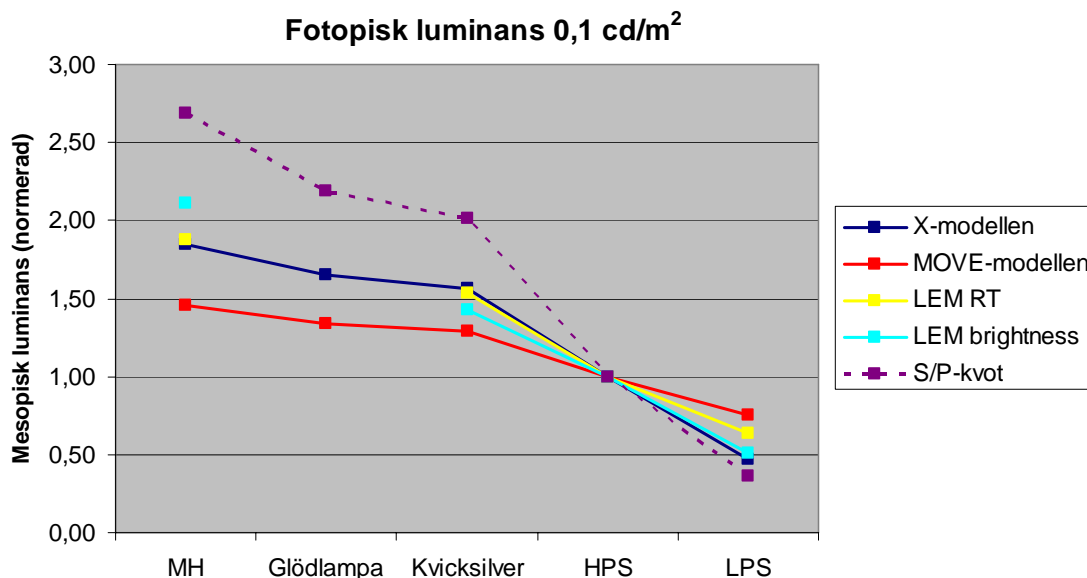
Forskarna bakom MOVE- och X-modellerna menar å andra sidan att deras förhållandevis enkla modeller är tillräckligt bra för att kunna utgöra en ny standard för den tillämpning, dvs. vägbelysning, som de är avsedda för. Modellernas giltighet, begränsningar, fördelar och nackdelar diskuteras i ett antal artiklar och tillhörande (publicerade) kommentarer (Eloholma och Halonen, 2006; Fotios, 2007; Goodman, 2007; Goodman, Forbes et al., 2007; Knight, 2007; Rea, 2007; Rea och Bullough, 2007). De två forskargrupperna har delvis olika syn på modellernas giltighet och prestanda och modellerna uppvisar både likheter och skillnader. Det senare visas av Eloholma och Halonen som har jämfört de två metodernas resultat och bland annat konstaterat att MOVE-modellen ger 27 % högre mesopisk luminans än X-modellen då den fotopiska luminansen är 0,6 cd/m² och ljuskällan är en MH-lampa (Eloholma och Halonen, 2006). De menar vidare att eftersom MOVE-modellen baseras på mer data, fler mått på synförmåga och fler mätpunkter (luminansnivåer, spektral sammansättning hos objekt etc.) så bör den

bättre än X-modellen beskriva mesopiska ljusförhållanden. Goodman och kollegor påpekar dock att för ljuskällor med S/P-kvoter i intervallet 0,7–1,5 så skiljer det mindre än 10 % i mesopisk luminans mellan MOVE- och X-modellerna, för alla luminansnivåer från 0,01 till 10 cd/m². Trots de skillnader som finns är forskarna bakom de två modellerna överens om att modellerna ändå ger så pass lika resultat att de tillsammans bör kunna utgöra grunden för en ny standard (Goodman, 2007; Rea, 2007).

Som nämnts i kapitel 1.7 kommer CIE inom kort publicera en ny mesopisk modell som bygger på just X- och MOVE-modellerna. Den nya modellen kommer vara förhållandevis enkel att använda, då det enda som i princip krävs är instrument som kan mäta både fotopiskt och skotopiskt (vilket finns redan idag) samt kunskap om ljuskällans S/P-kvot. Goodman påpekar att det sannolikt kommer att dröja ett tag innan den nya modellen blir etablerad och att det kommer krävas ett antal praktiska studier som bevisar nyttan med avseende på trafiksäkerhet och energibesparing (Goodman, 2009). En del studier som visat fördelar i specifika situationer har redan genomförts, men fler studier behövs, menar Goodman.

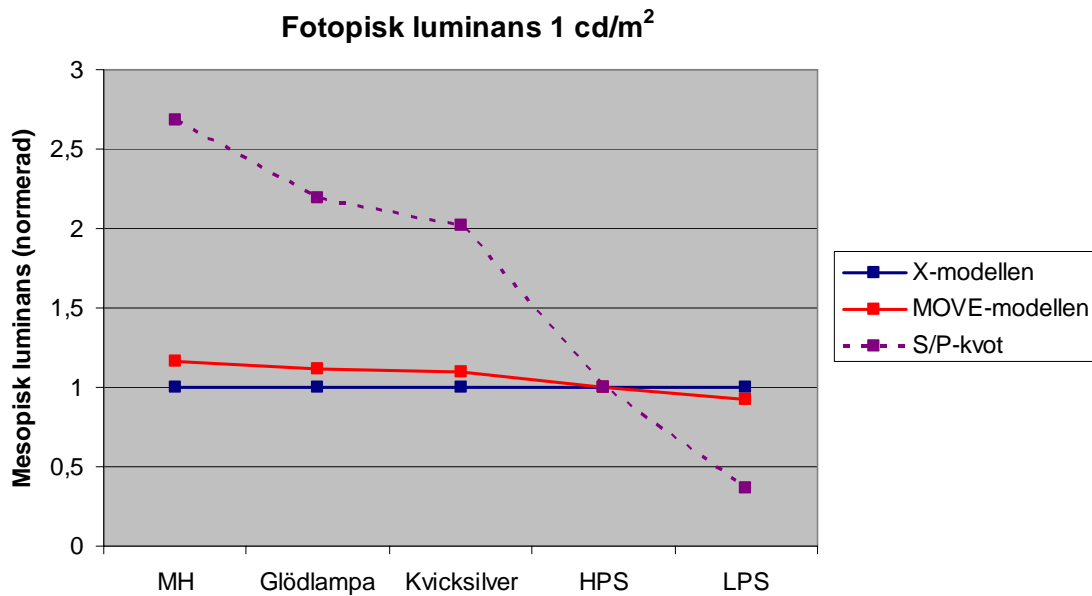
Bland sådant som behöver studeras ytterligare nämns mörker i kombination med andra specifika förutsättningar. Bullough och Rea påpekar att belysning som är anpassad efter mesopiska förhållanden kan försämra synbarheten i t.ex. snöfall eller dimma. Elwell nämner att ljuskällor med hög S/P-kvot kan vara negativt för äldre eftersom den linsgrumling som ofta uppkommer med ökande ålder leder till att kortvågigt (blått) ljus filtreras bort innan det når näthinnan (Elwell, 2009). Även Lewin et al. tar upp linsgrumling, men menar att eftersom stavarna är mest känsliga för kortvågigt ljus så kanske det ändå inte ger några fördelar att använda ljuskällor med låg S/P-kvot (Lewin, Box et al., 2003). Författarna understryker att man bör ta hänsyn till åldersfaktorer i framtida forskning.

En relevant frågeställning är hur stor praktisk betydelse en mesopisk modell kan väntas få. Samtliga metoder och modeller som presenterats ovan visar att luminansen i vit belysning underskattas om man mäter fotopiskt, medan luminansen från ljuskällor med gulaktigt ljus överskattas. Olika metoder korrigerar för detta i olika utsträckning. Figur 4 visar normerad mesopisk luminans beräknad med X-modellen, MOVE-modellen och LEM effektivitetsfaktor för fem olika ljuskällor vid en fotopisk luminans på 0,1 cd/m². (Lewis effektivitetsfaktor har inte tagits med i figuren då den skiljer sig markant från övriga metoder.). Resultaten från modellerna skiljer sig delvis åt, men uppvisar samtidigt likheter. En kvicksilverlampa som har samma fotopiska luminans som en HPS-lampa har nästan 50 % högre mesopisk luminans, medan en MH-lampa har 50–100 % högre mesopisk luminans än HPS-lampan, beroende på vilken metod som används.



Figur 4 Mesopisk luminans beräknad med X-modellen, MOVE-modellen och LEM effektivitetsfaktor för fem olika ljuskällor vid en fotopisk luminans på 0,1 cd/m². S/P-kvoten anger inte mesopisk luminans, men togs med som en jämförelse. Samtliga kurvor är normerade efter respektive HPS-värde. För LEM finns ej värden för glödlampa tillgängliga.

Belysningsklassen MEW omfattar luminansnivåer från 0,5 till 2,0 cd/m² (Tabell 1), dvs. vägbelysning ger vanligtvis högre luminans än de 0,1 cd/m² som visas i Figur 4. Vid högre luminansnivåer är inte skillnaderna i mesopisk luminans lika stora. Figur 5 visar mesopisk luminans beräknad med X- och MOVE-modellerna vid en fotopisk luminans på 1 cd/m². X-modellen ger här samma värden som den fotopiska modellen, dvs. 1 cd/m² för alla ljuskällor. För MOVE-modellen skiljer det ca 25 % mellan högsta (MH) och lägsta (LPS) värde, vilket ungefär motsvarar skillnaden mellan klasserna MEW3 och MEW4.



Figur 5 Mesopisk luminans beräknad med X-modellen och MOVE-modellen för fem olika ljuskällor vid en fotopisk luminans på 1 cd/m². S/P-kvoten anger inte mesopisk luminans, men togs med som en jämförelse. Samtliga kurvor är normerade efter respektive HPS-värde.

4 Samband mellan synbarhet och ljuskällans färgspektrum

Parallellt med den utveckling som har skett inom det mer teoretiska området där metoder och modeller tagits fram i huvudsak utifrån labbexperiment (kapitel 3) har det även genomförts en del mer tillämpade studier inom området vägbelysning och synbarhet. Syftet är delvis att validera de teoretiska modellerna, men forskningen motiveras också ofta av direkt tillämpbara och konkreta frågeställningar om hur man ska utforma vägbelysningsanläggningar för att få en optimal avvägning mellan synbarhet och trafik-säkerhet å ena sidan och energiåtgång, ljusföroreningar och driftskostnader å andra sidan.

Sambandet mellan synbarhet och ljuskällans färg är komplext. Lewin menar att sambandet i stor utsträckning beror på vilket mått på synförmåga man använder (Lewin, 2002). Många studier baseras på reaktionsförmåga och ljushetsperception och en vanlig slutsats i sådana studier är att ljuskällans spektrala innehåll inte påverkar det foveala seendet men däremot det perifera, speciellt vid låga luminansnivåer (Lewin, Box et al., 2003; Bullough och Rea, 2004; Fotios och Cheal, 2005; Goodman, Forbes et al., 2007), men det finns även studier som har gett andra resultat (Lewin, 2002; Fotios, Cheal et al., 2005). För att få resultat som är tillämpbara vid utformning av vägbelysningsanläggningar är det viktigt att experimentupplägget är relevant för just trafikmiljön och för de synförmågor som är av betydelse för den aktuella trafikantgruppen. *Vilka* synförmågor som är relevanta för mörkertrafik är inte givet. Detta diskuteras bland annat av Bierman och Eloholma som i kommentarer till en litteraturstudie av Fotios och kollegor understryker vikten av kunskap om vilka synförmågor som är av betydelse för olika trafikantgrupper och i olika trafikmiljöer och situationer (Bierman, 2005; Eloholma, 2005; Fotios, Cheal et al., 2005). De menar att utan den kunskapen är det svårt att bedöma vilken ljuskälla som är bäst i det specifika fallet.

Lewin och kollegor framför kritik mot det faktum att mycket av den synbarhetsforskning som görs, genomförs i monokromatiska förhållanden (Lewin, 2002; Lewin, Box et al., 2003). De påpekar att luminanskontrast bara förklarar en del av synbarheten och att man därför i högre utsträckning bör ta hänsyn till färgkontraster. Speciellt viktigt är detta när man utvärderar vita ljuskällor som ger en god färgåtergivning och på så sätt tillför en extra ”dimension” till synbarheten. Figur 6 illustrerar skillnaden i färgåtergivning hos vit och gulorange belysning.

En ytterligare aspekt hos vitt ljus är att det tenderar att uppfattas som mer uniformt än HPS-ljus. Lewin förklarar detta med hjälp av effektivitetsfaktorn (se även kapitel 3.2) (Lewin, 2002). Områden med minimal luminans ökar sin upplevda ljushet (effektivitetsfaktor) i vit belysning mer än områden med maximal luminans. Den fysiologiska förklaringen är att låga luminansnivåer i huvudsak ses av stavarna, vilka har större känslighet för vitt än för gult ljus. Skillnaderna mellan maximal och minimal luminans tenderar därför att jämnas ut mer i vitt ljus, dvs. vitt ljus upplevs som mer uniformt.

Färgkontrast och luminansjämnhet kan mycket väl ha betydelse för synbarhet och trafiksäkerhet, men de egenskaperna kan ha mycket liten inverkan i en studie där man till exempel studerat reaktionstid eller upplevd ljushet. En viss typ av experiment ger bara svar på en specifik fråga i en specifik situation. Detta bör man ha i åtanke vid tolkning av de resultat som presenteras nedan. Att två ljuskällor ger likvärdiga resultat i ett visst experiment behöver inte betyda att de alltid *är* likvärdiga.



Figur 6 Vitt ljus ger bättre färgåtergivning och kan även uppfattas som mer uniformt än gulorange ljus.

Litteratursökningen som ligger till grund för den här rapporten resulterade endast i ett fåtal studier där man i fält har undersökt sambandet mellan synbarhet och belysningens färg. Därtill kommer några artiklar om labbexperiment där man strävat efter att efterlikna trafikmiljön (t.ex. i simulator). Dessutom finns ett mindre antal publikationer där man diskuterar bland annat synbarhet, ljuskällor och kostnadseffektivitet, baserat på resultat från andra studier. Olycksrisker kopplade till vägbelysningens färg berörs nästan inte alls i litteraturen.

4.1 Experiment i fält

Två fältförsök där man studerat reaktionstider i belysning med olika ljusnivå och färgspektrum finns rapporterade i litteraturen. Crabb och kollegor har jämfört HPS och keramisk metallhalogen (CMH) med fyra olika effekter: 150, 95, 70 och 40 W (Crabb, Beaumont et al., 2006). I ett första experiment fick försökspersonerna ($n = 6$) köra bil på en provsträcka med en av de åtta möjliga belysningskombinationerna. På vägen placerades ett klot och avståndet på vilket försökspersonen upptäckte klotet mättes. Klotet flyttades mellan sex olika positioner. Det blev en signifikant skillnad mellan de två lamptyperna endast för en av klotpositionerna – den mest perifera positionen – och endast vid 70 och 40 W. HPS-belysningen gav i dessa fall *längre* detektionsavstånd än CMH. Här kan tilläggas att den uppmätta (fotopiska) luminansen för HPS var 0,51 respektive 0,21 cd/m^2 , medan motsvarande luminanser för CMH var 0,65 respektive 0,28 cd/m^2 . Det vill säga, trots att CMH hade högre fotopisk luminans och vitare ljus så var synbarheten bättre med HPS, vilket är tvärtemot vad de mesopiska modellerna i kapitel 3 predicerar. Skillnaderna (median) i detektionsavstånd var ca 20–25 m vid 40 W och 25–30 m vid 70 W. I det andra experimentet satt försökspersonerna i en stillastående bil med blicken fixerad rakt fram. I periferin – antingen vid 15 eller 25 graders excentricitet – fanns ett föremål som ändrade färg från svart till grå. Försökspersonernas reaktionstid mättes då föremålet ändrade färg. Resultaten visade att skillnaderna i reaktionstid för de olika ljuskällorna och –nivåerna var små. Skillnaden mellan

längsta och kortaste medelreaktionstid för de 16 betingelserna (2 lamptyper, 4 effekt-nivåer och 2 excentriciteter) var 114 ms, vilket motsvarar en körsträcka på 1,6 m i hastigheten 50 km/h. Kortast reaktionstid erhöles med HPS 95 W, medan CMH 150 W gav längst reaktionstid. Inget tydligt samband mellan ljuskälla, effekt/luminans och reaktionstid kunde ses. Författarna drar slutsatsen att de två ljuskällorna inte ger några större skillnader i synbarhet, men påpekar också att försöket har begränsningar, bland annat när det gäller antal försökspersoner och testscenario.

Det andra fältförsöket som undersökt reaktionstid i olika typer av belysning har genomförs av Akashi och kollegor (Akashi, Rea et al., 2007). Tretton försökspersoner fick köra bil med konstant hastighet längs en provsträcka med antingen HPS- eller CMH-belysning. Försökspersonernas uppgift var att identifiera åt vilket håll ett föremål på vägens högra sida rörde sig. Om föremålet rörde sig mot vägen skulle de bromsa och om föremålet rörde sig bort från vägen skulle de gasa. Uppgiften genomfördes under fyra betingelser, där föremålets luminans varierades. Den första betingelsen utgjordes av HPS-belysning som gav en fotopisk luminans på 0,057 cd/m². I den andra och tredje betingelsen användes CMH-belysning som i det ena fallet gav samma fotopiska luminans som HPS-belysningen och i det andra fallet samma mesopiska luminans som HPS-belysningen, beräknad enligt X-modellen (Rea, Bullough et al., 2004). Dagsljus utgjorde en fjärde betingelse. Resultaten visade att då HPS och CMH gav samma fotopiska luminans var reaktionstiden signifikant kortare i CMH-belysningen. Medel-skillnaderna i reaktionstid var dock små – ca 0,05 s för bromsreaktionstid och ca 0,12 s i gasreaktionstid. När de två ljuskällorna gav samma mesopiska luminans fanns ingen signifikant skillnad i reaktionstid. Dagsljus gav signifikant kortare reaktionstider än de övriga betingelserna. Författarna menar att resultaten stöder X-modellen men de påpekar också att synbarhet inte är samma sak som trafiksäkerhet och att det behövs mer forskning för att undersöka sambandet mellan synbarhet och olycksrisk.

Rea och kollegor har i en serie små kontrollerade fältförsök undersökt den subjektiva upplevelsen av HPS- och MH-belysning, för att ge empiriska belägg för sådant som visats i laborieförsök om mesopiska effekter (Rea, Bullough et al., 2009). I de tre första experimenten placerades en armatur med HPS-belysning och en med MH-belysning längs en väg. I det första försöket placerades försökspersonerna mellan de två armaturerna med uppgiften att bedöma belysningarna utifrån tre aspekter: ljushet, trygghet och trivsel (t.ex. vid en uteservering). Två nivåer på belysningsstyrka studerades, 5 och 15 lx. Den högre belysningsstyrkenivån skattades alltid som ljusare än den lägre, oavsett ljuskälla, av majoriteten av försökspersonerna (signifikant). När ljuskällorna hade samma belysningsstyrka skattades MH som ljusare än HPS av majoriteten av försökspersonerna (67 % för 5 lx och 71 % för 15 lx, den senare signifikant). Majoriteten (signifikant) skattade MH-belysningen som tryggare än HPS, då belysningsstyrkan var lika för båda nivåerna. Majoriteten skattade den högre belysningsstyrkenivån som tryggare än den lägre, oavsett ljuskälla. När det gäller trivsel fanns inga tydliga resultat som talade vare sig för belysningsstyrka eller ljuskälla. Det andra försöket var identiskt med det första, förutom att belysningsstyrkan var 7, 10 respektive 15 lx (istället för 5 och 15 lx). MH skattades som ljusare då dess belysningsstyrka var lika eller högre än HPS. HPS skattades som ljusare då dess belysningsstyrka var högre, förutom då MH var 7 lx och HPS 10 lx, då HPS och MH skattades som lika ljusa. MH skattades som tryggare då dess belysningsstyrka var lika eller högre än HPS. HPS skattades som tryggare då dess belysningsstyrka var högre än MH. Det fanns inga tydliga skillnader för trivsel. Det tredje experimentet gjordes med en lite annorlunda metod, men gav i stort samma resultat som de två tidigare experimenten. I ett fjärde experiment studera-

des ansiktsigenkänning vid belysningsstyrkan 8 lx. Resultaten visade inga skillnader mellan MH och HPS. Det femte och sista experimentet var ett ögonvittnesexperiment där försökspersonerna skulle beskriva två personers (av flera) attribut, bl.a. hårfärg och färg på kläder, genom att svara på tretton frågor. Försökspersonerna – som fick se frågeformuläret innan försöket startade – fick titta på personerna (som rörde sig i en trafikmiljö) i omkring en minut innan de fick vända sig bort och besvara frågorna. Belysningsstyrkan var antingen 5 eller 15 lx. I fem av de tretton frågorna erhöles signifikanta resultat, som talade för antingen MH eller den högre belysningsstyrkan. Utifrån de fem experimenten drar författarna slutsatsen att MH ger en bättre ljuskvalitet än HPS ur flera aspekter, bl.a. färgåtergivning. Sammantaget upplevdes MH-belysningen ha samma ljushet som HPS-belysningen då belysningsstyrkan hos MH var 79 % av belysningsstyrkan hos HPS. Motsvarande siffra för trygghet var 66 %.

Även Morante har studerat subjektiv upplevelse av olika lamptyper (Morante, 2008). I en förstudie byttes den befintliga 70 W HPS-belysningen på en vanlig gata ut mot 55 W lysrörsbelysning. Det var 25 personer, bosatta i området, som svarade på en enkät med 18 frågor om synbarhet, upplevelse, säkerhet och trygghet. Lysrörsbelysningen uppfattades som bättre än HPS ur alla 18 aspekter som undersöktes och i 13 fall var skillnaden signifikant, dvs. lysröret som förbrukar 30 % mindre energi än HPS bedömdes ge bättre ljus. Fotopisk luminansnivå på sträckan var i intervallet 0,004–0,33 cd/m² för HPS-belysningen. Mesopisk luminans beräknad med X-modellen var för HPS i medel 0,059 cd/m² och för lysröret 0,097 cd/m². Därefter genomförde författaren ett större tvådelat försök, där 100 W HPS jämfördes med 55 W induktionslampa (specialtillverkad, S/P-kvot 2,88) och 70 W CMH (S/P-kvot 1,6). Även detta försök gjordes som en före/efter-studie. I det första delförsöket gav den ursprungliga HPS-belysningen en fotopisk luminans på i medel 0,21 cd/m². Induktionslampan som den ersattes med, hade en fotopisk luminans på i medel 0,06 cd/m². I det andra delförsöket hade både den ursprungliga HPS-belysningen och den ersättande metallhalogenbelysningen en fotopisk luminans på 0,07 cd/m². Liksom i förstudien gjordes utvärderingen med hjälp av enkäter, där boende längs med provsträckorna fick bedöma de två belysningstyperna med avseende på synbarhet, säkerhet, trygghet, ljushet och färgåtergivning, både utifrån ett fotgängar- och ett förarperspektiv. Resultaten visade att de tillfrågade i den första delstudien föredrog induktionslampan före HPS samt att de tillfrågade i den andra studien föredrog den keramiska metallhalogenlampan före HPS. I den andra delstudien var det större skillnad mellan lamptyperna än i den första. Författarna påpekar dock att ljuset från metallhalogenlampan försämras över tiden och att enkätsvaren är från den period då lampan ger som mest ljus. Författarna har även gjort en energi- och kostnadsanalys för de tre lamptyperna, vilken redovisas i kapitel 4.3.

4.2 Experiment i laboratoriemiljö

Experiment i laboratoriemiljö är fördelaktiga såtillvida att de ger en hög grad av kontroll och är förhållandevis enkla att genomföra. Samtidigt förloras en del av realismen och det kan vara svårt att bedöma om resultaten är giltiga även i reell trafik.

Alferdinck har genomfört ett simulatorexperiment vid mesopiska ljusförhållanden (Alferdinck, 2006). Försökspersonernas (n = 21) uppgift var att – medan de körde i en enkel simulatormiljö utan annan trafik – upptäcka ett cirkulärt objekt och som beroendemaått användes reaktionstid och antal missade objekt. Bakgrunden var antingen vit, gul, blå eller röd och luminansen 0,01, 0,1, 1 eller 10 cd/m². Resultaten visade att förmågan att upptäcka objektet minskade med minskande luminans och ökande excentricitet

(≥ 15 grader), men det var inte någon skillnad mellan 5 och 10 graders excentricitet. Röd bakgrund tenderade att ge sämre resultat än de andra bakgrundsfärgerna vid de två lägsta luminansnivåerna.

Bullough och Rea rapporterar om en serie experiment med HPS- och MH-belysning, främst i laboratorium men även i fält (Bullough och Rea, 2004). Experimenten visade att det inte var någon skillnad i synförmåga i synfältets mitt för HPS- och MH-belysning med samma fotopiska luminans. Däremot fanns en mätbar skillnad i synförmåga i det perifera synfältet, som ökade med minskande luminansnivåer. MH, som har högre S/P-kvot än HPS, gav bättre perifer visuell reaktionsförmåga. Vid låga luminansnivåer krävdes att HPS-källan hade omkring 10–30 gånger högre fotopisk luminans än MH-källan, för att ge samma perifera reaktionstid. Här bör dock påpekas att skillnaderna i reaktionstid var små – omkring 10–20 ms – vilket har begränsad praktisk betydelse.

I Storbritannien tillåter de nationella riktlinjerna för utformning av vägbelysning att man använder en S-klass högre (t.ex. S5 istället för S4) då ljuskällans Ra-index är större än 60, dvs. vita ljuskällor tillåts ha lägre belysningsstyrka än t.ex. HPS på GC-vägar. Denna rekommendation baseras i huvudsak på tyckande och erfarenhet, men har efter att den infördes utvärderats i ett antal labbexperiment. I ett första experiment undersöktes akromatisk och kromatisk synskärpa, kontrasttröskel och färgigenkänning, i intervallet 0,1–1 cd/m², för HPS, LPS, lysrör och två typer av metallhalogen (Fotios och Cheal, 2007). Synskärpa, kontrasttröskel och färgigenkänning försämrades med minskade luminans. För akromatisk synskärpa och kontrasttröskel var det ingen skillnad mellan HPS och MH. För kromatisk synskärpa fanns en interaktion mellan lamptyp och färg på föremålet, men som helhet var det ingen lamptyp som gav bättre resultat än någon annan. Färgigenkänning var bättre med MH än HPS (2 lx MH motsvarade ungefär 15 lx HPS). Författarna menar att den sämre synskärpan och kontrastkänsligheten som fås med en MH-lampa av en högre S-klass åtminstone delvis kan uppvägas av den bättre färgigenkänningen. I ett andra experiment studerades ljushet med tre olika metoder (Fotios, Cheal et al., 2007). Resultaten visade att vitt ljus uppfattades ha ungefär lika ljushet som HPS, då det vita ljuset var en S-klass högre än HPS-ljuset. Författarna menar att resultaten som helhet stödjer rekommendationen att använda vitt ljus med en S-klass högre, men påpekar också att resultaten bör valideras i en naturlig trafikmiljö. Författarna understryker också att resultaten gäller för de testade lamptyperna och inte generellt för lampor med Ra-index ≥ 60 .

Fotios och Cheal har genomfört ytterligare en labbstudie som är av relevans för fotgängare (Fotios och Cheal, 2009). Då fallolyckor är en vanlig olycksorsak hos framförallt äldre, så bör en god vägbelysning synliggöra ojämnheter i gatan. I den aktuella studien fick elva yngre och tio äldre försökspersoner titta in i en låda. På golvet i lådan fanns sex ”gatstenar” som kunde flyttas i höjdlid. Försökspersonen fick fixera blicken på en punkt rakt fram och en slags slutare begränsade tiden personen fick titta in i lådan. Uppgiften var att upptäcka om någon av gatstenarna var upphöjd över marknivån. Gatstenarna justerades i åtta nivåer upp till ca 8 mm och höjden som krävdes för detektion utgjorde beroendevariabel. Lådan var belyst antingen med HPS, MH typ 1 eller MH typ 2 (S/P-kvot 0,57; 1,22 respektive 1,77) vid tre olika belysningsstyrkor: 0,2; 2,0 eller 20 lx, vilket motsvarade luminansnivåer på gatstenarna på ca 0,01; 0,1 och 1,2 cd/m². Vid de två högsta ljusnivåerna var det ingen skillnad i detektion för de olika lamptyperna, men vid den lägsta ljusnivån gav MH-lampan med högst S/P-kvot bäst resultat (signifikant). Vid den lägsta ljusnivån presterade de yngre deltagarna bättre än de äldre. Författarna har även jämfört resultaten med MOVE- och X-modellerna, som i stort gav liknande resultat som de uppmätta värdena, men där modellerna överskattade skillna-

derna mellan HPS och MH vid låga ljusnivåer (dock delvis baserat på extrapolerade data).

4.3 Kostnadsberäkningar

Vägbelysning väljs vanligtvis utifrån ekonomiska faktorer, dvs. ljusutbyte, livslängd, investeringskostnader, driftskostnader och driftsäkerhet (Lewin, Box et al., 2003). För att mesopiskt anpassad belysning ska kunna utgöra ett rimligt alternativ till den idag dominerande HPS-belysningen krävs att den är kostnadseffektiv. I litteraturen finns några kostnadsanalyser beskrivna.

Morante, som studerat subjektiv upplevelse av några olika lamptyper (se kapitel 4.1) har även gjort tre olika ekonomiska analyser (Morante, 2008). Induktionsbelysning eller keramisk metallhalogen (enligt konfigurationen i försöket) minskar energiförbrukningen med 53 respektive 28 % jämfört med HPS, men samtidigt ökar underhållskostnaderna. Resultaten från analysen visade att induktionsbelysningen men inte metallhalogenbelysningen är ett kostnadseffektivt alternativ till HPS. Författarens rekommendation är att induktionsbelysning väljs vid nya installationer och att man kan överväga att byta ut existerande HPS-belysning mot induktionsbelysning. Här bör dock understrykas att induktionslampan som användes i försöket var specialtillverkad och därför inte kommersiellt tillgänglig (åtminstone inte vid tiden för försöket). Det är okänt om lampan produceras idag och om dess egenskaper i så fall stämmer överens med den prototyp som användes i kostnadsanalysen.

Bullough och Rea har mätt upp luminansnivåer på tio olika platser/trafikmiljöer i staten New York och konstaterat att luminansnivåerna i framförallt förorter och på landsbygden ofta är så låga att man inte kan bortse från mesopiska effekter (Bullough och Rea, 2008). På samtliga studerade platser utgjordes vägbelysningen av HPS-lampor. Författarna har därefter använt X-modellen (se kapitel 3.3.1) för att beräkna hur stor fotopisk luminans som krävs hos MH- och induktionsbelysning för att de ska ge samma mesopiska luminans som den studerade HPS-belysningen. Därefter har man gjort kostnadsberäkningar för belysningsanläggningarna i förorter och på landsbygden. I de exempel/platser där HPS hade en fotopisk luminans 0,4–0,6 cd/m² så var HPS mest kostnadseffektiv sett över en 20-årsperiod (där man inkluderat både installationskostnader och driftskostnader), följt av MH och induktion. Där HPS hade en fotopisk luminans 0,2–0,3 cd/m² så var istället induktionslampan mest kostnadseffektiv, följt av MH och HPS. Sett till enbart energiförbrukning var induktionslampan mest energieffektiv i alla studerade exempel/platser. Författarna påpekar att förbättrade och/eller nya lamptyper väntas dyka upp på marknaden inom de närmsta åren, vilket kan förändra bilden av vad som är mest kostnads- och energieffektivt.

Kostic och kollegor har jämfört och gjort kostnadsberäkningar för HPS och MH baserat på ljushetsbaserad LEM (se även Tabell 7) för luminansnivåer 1,0; 0,75; 0,5 och 0,3 cd/m² vilket motsvarar klasserna ME3-6 (Kostic, Djokic et al., 2009). Beräkningarna gjordes för sex olika belysningsanläggningar och inkluderade både installations- och driftskostnader (över 24 år). Resultaten visade att kostnaderna för MH-belysning är jämförbara med kostnaderna för HPS-belysning för klasserna ME4-6, medan HPS är mest kostnadseffektiv för ME3. För ME4-6 är MH mellan 11,8 % dyrare och 15,4 % billigare än HPS, beroende på typ av anläggning. Kostnadsalkylen påverkas delvis av att lampor endast finns i vissa givna effekter. Författarna menar att MH-belysning ger betydande energibesparingar (men specificerar inte detta närmare) och bättre färgåtergivning, vilket kan uppväga de lite högre kostnaderna för vissa typer av anläggningar.

4.4 Olycksrisker

Lewin har gjort en litteraturstudie och genomfört en enkätstudie där ett stort antal amerikanska stater och städer samt internationella och nationella organisationer tillfrågats om de har gjort några olycksstudier relaterade till vägbelysningens färg (Lewin, Box et al., 2003). Varken litteraturstudien eller enkätstudien gav några resultat, dvs. inga relevanta studier om olycksrisker kunde identifieras.

Inte heller litteratursökningen som den här rapporten baseras på gav någon information om eventuella samband mellan olycksrisk och vägbelysningens färg.

5 Diskussion och rekommendationer

Ett flertal forskargrupper har med olika metoder och oberoende av varandra i labbmiljö kunnat visa att fotopiska mått är missvisande i mesopiska ljusförhållanden. Störst effekter har noterats vid låga luminansnivåer och vid perifera synuppgifter. Den praktiska innebörden av detta är att vitt ljus tenderar att ge bättre synförhållanden än gulaktigt ljus (t.ex. högtrycksnatriumbelysning), då de fotopiska luminanserna är lika. Införandet av mesopiska mått kan därför komma att förändra bilden av vilka ljuskällor som har stort ljusutbyte och därmed är energieffektiva.

En relevant frågeställning är hur stor praktisk betydelse de mesopiska effekterna har. Enligt de modeller som tagits fram är det vid låga luminansnivåer (ca $0,1 \text{ cd/m}^2$) möjligt att sänka ljusnivån hos vita ljuskällor med omkring 20–50 % men ändå få samma synbarhet som med en HPS-belysning vid den aktuella (fotopiska) luminansnivån. Vid högre luminansnivåer (ca 1 cd/m^2) är skillnaderna mindre och där är motsvarande sänkning av ljusnivå mindre än 15 %. Här bör man dock komma ihåg att de mesopiska modellerna och metoderna i huvudsak är framtagna i labbmiljö och att mycket få studier har gjorts i naturlig trafikmiljö. I labbmiljö använder man t.ex. ofta en homogen bakgrund. Den verkliga mörkertrafikmiljön är betydligt mer visuellt komplicerad, vilket kan göra att resultat från labbexperiment har begränsad relevans (Mayeur, Brémond et al., 2010).

De få fältstudier som har gjorts visar inte entydiga resultat, vilket sannolikt delvis kan förklaras av att man har använt olika mått på synförmåga. Vilka synförmågor som är av betydelse vid exempelvis bilkörning, cykling eller promenerande i mörker är inte helt klarlagt i litteraturen och det innebär givetvis en begränsning vid utvärdering av olika typer av belysning. Ytterligare svårigheter vid jämförelser av resultat från olika studier är att man har använt olika mått på belysningen (luminans, belysningsstyrka, medelvärden, punktvärden etc.), det finns olika varianter av samma lamptyp och att det finns ett flertal andra faktorer än ljusets färg som påverkar synbarheten, t.ex. luminansjämnhet, närvaro av andra ljuskällor, ev. fordonsbelysning, placering i synfältet, bländning, bakgrund/kontraster, visuell komplexitet osv. Man kan inte heller bortse från eventuella interaktionseffekter mellan t.ex. belysningens färg och luminansjämnhet.

Att det endast finns mycket få fältstudier som dessutom inte har gett entydiga resultat gör att det i dagsläget inte går att dra några slutsatser om huruvida man i reell trafik bör ta hänsyn till de i labbmiljö konstaterade mesopiska effekterna. Det finns alltså inte tillräckligt vetenskapligt stöd för att göra några förändringar i gällande riktlinjer för vägbelysning.

I Storbritannien tillåter man en högre luminansklass då belysningen är vit, vilket är ett sätt att kompensera för mesopiska effekter. Det bör poängteras att denna rekommendation infördes mer baserat på tyckande än på vetenskap. Den utvärdering som senare gjordes gav visst stöd för rekommendationerna, men den genomfördes i labbmiljö och det är därför osäkert om resultaten gäller även i naturlig trafikmiljö.

Viljan att använda vit belysning istället för t.ex. den gulaktiga HPS-belysningen motiveras ofta av argument av typen ”trafikanter gillar vitt ljus bäst” eller ”vitt ljus upplevs som tryggast”. Även om (overifierade) påståenden inte bör utgöra en grund för rekommendationer och riktlinjer så kan argumenten i sig – dvs. trafikanternas subjektiva upplevelse av belysningen – vara viktiga att ta hänsyn till vid utformning och/eller revidering av riktlinjer. I vissa fall, t.ex. i parker och längs promenadstråk, är sannolikt den subjektiva upplevelsen av belysningen betydligt mer viktig än vetenskapliga och

kvantifierbara mått på synbarhet. Men att trafikanter verkligen föredrar en viss typ av belysning i en viss miljö bör givetvis verifieras genom fältundersökningar. Man bör inte generalisera resultat från enskilda studier, eftersom det finns många olika typer av vitt ljus som kan upplevas ganska olika. Ett enkelt exempel att vitt ljus med en blåaktig ton upplevs som kallt, medan vitt ljus med en gul eller röd ton upplevs som varmt.

En faktor som inte ska glömmas bort när man diskuterar vägbelysning och synbarhet är fordonsbelysningen. Fordonets belysning – som vanligtvis är relativt vit – bidrar i vissa situationer väsentligt till den totala belysningen i förarens synfält. En vit fordonsbelysning kan delvis kompensera för dålig färgåtergivning hos vägbelysningen, vilket man bör ha i åtanke vid utvärdering av studier som jämför synbarhet i olika typer av vägbelysning. Vid fältförsök är det önskvärt att fordonsbelysningen inkluderas i försöksupställningen.

En viktig anledning till varför man vill ta fram mesopiska mätmetoder är att det kan bidra till minskad energiförbrukning. Baserat på den kunskap som finns idag kan införandet av mesopiska mätmetoder i bästa fall (på gator med låga belysningsnivåer) ge en minskning av energiförbrukningen på åtminstone några tiotals procent, vilket givetvis inte är försumbart. Samtidigt finns det många andra sätt att spara energi som är värda att nämna. Utveckling av nya energisnåla lamptyper, t.ex. LED-lampor, kan förväntas ge energibesparingar på sikt (Li, Chen et al., 2009). Även förbättrade styrdon och armaturer kan ge vissa energibesparingar (Boyce, Fotios et al., 2009). Av ännu större betydelse är sannolikt styrningen av belysningen, dvs. bättre anpassning av belysningsnivån till rådande förhållanden, t.ex. omgivande ljus, väder, trafikmängd och tid på dygnet (Boyce, Fotios et al., 2009). Sist men inte minst har klassificeringen av vägbelysning en stark koppling till energiåtgång. Lewin och kollegor menar att de standarder som föreskriver vilka ljusnivåer olika vägtyper ska ha sällan bygger på kontrollerade studier och att det saknas djupare kunskap om kopplingen mellan synförmåga och olycksrisker (Lewin, Box et al., 2003). Vidare görs valet av belysningsklass delvis utifrån en subjektiv bedömning (Kostic och Djokic, 2009). Boyce och kollegor påpekar att vägbelysningsklasserna ser olika ut i olika länder (Boyce, Fotios et al., 2009). Ett intressant exempel är att det i USA krävs högst luminans på vägar där fotgängare förekommer, medan Storbritannien rekommenderar högst luminans på motorvägar. USA:s luminansrekommendationer på motorvägar är mindre än en tredjedel av motsvarande rekommendationer i Storbritannien.

Framtida studier bör alltså inte bara ge svar på vilken inverkan belysningens färg har på synbarheten, utan de bör även inkludera en utvärdering av de befintliga belysningsnivåerna/-klasserna eftersom litteraturen antyder att de har begränsad vetenskaplig förankring. Man ska också komma ihåg att synbarhet är komplext och påverkas av en mängd faktorer utöver belysningsnivå och ljuskällans färg. I framtida studier är det därför önskvärt att man tar ett helhetsgrepp om de faktorer som kan tänkas påverka synbarheten. Vidare behöver kunskapen om vilka synförmågor som är relevanta i mörkertrafik förbättras och man behöver ta hänsyn till att äldre ofta har en försämrad syn. Viktigt är också att man genomför studier i naturlig trafikmiljö, för att få tillämpbara resultat.

5.1 Rekommendationer

Utifrån resultaten från litteraturstudien ges följande rekommendationer till Trafikverket:

- **Kunskapspridning.** Att dagens fotopiska mätmetoder kan ge missvisande resultat i mesopiska förhållanden kan vara värdefullt att känna till för dem som

utformar vägbelysningsanläggningar. Luminansen från gulaktigt ljus, t.ex. HPS, tenderar att överskattas med dagens metoder, medan luminansen från vitt ljus underskattas, men i vilken utsträckning är ännu oklart

- **Bevaka forskningen.** Mycket har hänt inom mätmetodikområdet det senaste decenniet och fler studier kan förväntas (se även nästa punkt). Dessutom sker en teknikutveckling där nya energieffektiva lamptyper, t.ex. LED, kommer ut på marknaden
- **Avvakta nya rekommendationer från CIE.** I dagsläget finns inte tillräckligt vetenskapligt stöd för att göra förändringar i VGU med avseende på vägbelysningens färg. CIE förväntas dock inom kort att ge ut nya rekommendationer för mesopisk fotometri för vägbelysning, vilket bör leda till en översyn av riktlinjerna för vägbelysning i VGU. En förutsättning för att de nya rekommendationerna ska vara tillämpbara är att de har validerats i naturlig trafikmiljö
- **Helhetsgrepp i fortsatt forskning.** Synbarheten påverkas av en mängd faktorer som inte alltid kan separeras. Nivå på luminans/belysningsstyrka, luminansjämnhet, färg på belysningen och placering av armaturer är sådant som går att variera och kontrollera. För att hitta belysningsnivåer som ger en god avvägning mellan synbarhet och energiförbrukning/kostnader behöver man kunskap om alla dessa faktorer och hur de interagerar. Man bör även ta hänsyn till att äldre – som utgör en stor del av trafikanterna – ofta har försämrad syn, vilket kan göra att de behöver bättre belysning än yngre och därför i många fall bör vara dimensionerande.

Referenser

- Akashi, Y., Rea, M. S., et al. (2007). "Driver decision making in response to peripheral moving targets under mesopic light levels." *Lighting Research and Technology* **39**(1): 53–67.
- Alferdinck, J. W. A. M. (2006). "Target detection and driving behaviour measurements in a driving simulator at mesopic light levels." *Ophthalmic and Physiological Optics* **26**(3): 264–280.
- Berman, S. M. (1992). "Energy efficiency consequences of scotopic sensitivity." *Journal of the illuminating engineering society* **21**(1): 3–14.
- Bierman, A. (2005). "Comment 1 on 'Light source spectrum, brightness perception and visual performance in pedestrian environments: a review'." *Lighting Research and Technology* **37**(4): 292.
- Blake, R. & Sekuler, R. (2006). *Perception*. New York, NY, US, McGraw-Hill.
- Boyce, P. R. (2009). *Lighting for driving: roads, vehicles, signs, and signals*. Boca Raton, Florida, US, CRC Press Taylor & Francis group.
- Boyce, P. R., Fotios, S., et al. (2009). "Road lighting and energy saving." *Lighting Research and Technology* **41**: 245–260.
- Bullough, J. D. & Rea, M. S. (2004). "Visual performance under mesopic conditions – Consequences for roadway lighting." *Transportation Research Record* **1862**: 89–94.
- Bullough, J. D. & Rea, M. S. (2008). Innovative, energy-efficient lighting for New York state roadways: Opportunities for incorporating mesopic visibility considerations into roadway lighting practice, Lighting research center, Rensselaer Polytechnic Institute.
- CIE (2007). Colour rendering of white LED sources, CIE.
- Crabb, G. & Steele, D. (2006). Are street lighting levels too high? *TRL Annual Research Review 2005*.
- Crabb, G. I., Beaumont, R. J., et al. (2006). Visual performance under CMH and HPS street lighting at different power and dimming levels. *TRL Limited*.
- Crabb, G. I. & Burtwell, M. H. (2004). *The application of mesopic vision models to street lighting*.
- Eloholma, M. (2005). "Comment 2 on 'Light source spectrum, brightness perception and visual performance in pedestrian environments: a review'." *Lighting Research and Technology* **37**(4): 292–293.
- Eloholma, M. & Halonen, L. (2005). Performance based model for mesopic photometry. Helsinki, Finland, Helsinki university of technology.
- Eloholma, M. & Halonen, L. (2006). "New model for mesopic photometry and its application to road lighting." *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America* **2**(4): 263–293.
- Eloholma, M., Ketomäki, J., et al. (2006). "Visual performance in night-time driving conditions." *Ophthalmic and Physiological Optics* **26**(3): 254–263.
- Eloholma, M., Viikari, M., et al. (2005). "Mesopic models – From brightness matching to visual performance in night-time driving: A review." *Lighting Research and Technology* **37**(2): 155–173.

- Elwell, M. (2009). "The world in a different light: mesopic lighting, energy use and LEDs." *Lighting journal* **74**(6): 22–26.
- Fotios, S. & Cheal, C. (2005). "Is white light the right light?" *The Lighting Journal* **January/February**: 22–25.
- Fotios, S. & Cheal, C. (2009). "Obstacle detection: A pilot study investigating the effects of lamp type, illuminance and age." *Lighting Research and Technology* **41**(4): 321–342.
- Fotios, S., Cheal, C., et al. (2005). "Light source spectrum, brightness perception and visual performance in pedestrian environments: A review." *Lighting Research and Technology* **37**(4): 271–294.
- Fotios, S. A. (2007). "Comment 2 on 'Making the move to a unified system of photometry' by MS Rea and JD Bullough." *Lighting Research and Technology* **39**(4): 405.
- Fotios, S. A. & Cheal, C. (2007). "Lighting for subsidiary streets: Investigation of lamps of different SPD. Part 1 – Visual performance." *Lighting Research and Technology* **39**(3): 215–232.
- Fotios, S. A., Cheal, C., et al. (2007). "Lighting for subsidiary streets: Investigation of lamps of different SPD. Part 2 – Brightness." *Lighting Research and Technology* **39**(3): 233–252.
- Goodman, T. (2007). "Comment 3 on 'Making the move to a unified system of photometry' by MS Rea and JD Bullough." *Lighting Research and Technology* **39**(4): 405–406.
- Goodman, T. & Eloholma, M. (2007). "Author's response to C Knight and MS Rea." *Lighting Research and Technology* **39**(4): 391–392.
- Goodman, T., Forbes, A., et al. (2007). "Mesopic visual efficiency IV: A model with relevance to nighttime driving and other applications." *Lighting Research and Technology* **39**(4): 365–388.
- Goodman, T. M. (2009). "Measurement and specification of lighting: A look at the future." *Lighting Research and Technology* **41**(3): 229–243.
- He, Y., Rea, M.S., et al. (1996). *Evaluating light source efficacy under mesopic conditions using reaction times*. Illuminating Engineering Society of North America Annual Conference, 236–257, Illuminating Engineering Society of North America.
- Knight, C. (2007). "Comment 1 on 'Mesopic visual efficiency I–IV'." *Lighting Research and Technology* **39**(4): 388–389.
- Kostic, M. & Djokic, L. (2009). "Recommendations for energy efficient and visually acceptable street lighting." *Energy* **34**(10): 1565–1572.
- Kostic, M., Djokic, L., et al. (2009). "Technical and economic analysis of road lighting solutions based on mesopic vision." *Building and Environment* **44**(1): 66–75.
- Lewin, I. (1999). "Lamp spectral effects at roadway lighting levels." *The Lighting Journal* (March/April).
- Lewin, I. (2001). "Lumen effectiveness multipliers for outdoor lighting design." *Journal of the Illuminating Engineering Society* **30**(2): 40–47.

- Lewin, I. (2002). "White v. sodium light – The newest developments." *Lighting Journal (Rugby, England)* **67**(6): 40–47.
- Lewin, I., Box, P., et al. (2003). Roadway lighting: an investigation and evaluation of three different light sources, Arizona Department of Transportation.
- Lewis, A. L. (1998). "Equating light sources for visual performances at low luminance levels." *Journal of the illuminating engineering society* **27**(1).
- Li, F., Chen, D., et al. (2009). *LEDs: A promising energy-saving light source for road lighting*.
- Lin, Y., Chen, D., et al. (2006). "The significance of mesopic visual performance and its use in developing a mesopic photometry system." *Building and Environment* **41**(2): 117–125.
- Mayeur, A., Brémond, R., et al. (2010). "Effects of the viewing context on target detection. Implications for road lighting design." *Applied Ergonomics*.
- Morante, P. (2008). Mesopic street lighting demonstration and evaluation final report. Troy, New York, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute.
- Nygårdhs, S. (2006). Vägbelysning – En litteraturstudie. VTI rapport 535. VTI, Linköping.
- Ohno, Y. (2006). *Optical metrology for LEDs and solid state lighting*. Fifth symposium optics in industry, SPIE.
- Olson, P. L. & Farber, E. (2003). *Forensic aspects of driver perception and response*. Tucson, AZ, USA, Lawyers & Judges Publishing Company.
- Puell, M. C., Palomo, C., et al. (2004). "Mesopic contrast sensitivity in the presence or absence of glare in a large driver population." *Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology* **242**(9): 755–761.
- Rea, M. (2007). "Comment 2 on 'Mesopic visual efficiency I–IV'." *Lighting Research and Technology* **39**(4): 389–391.
- Rea, M. S. & Bullough, J. D. (2007). "Authors' response to SA Fotios, T Goodman and I Lewin." *Lighting Research and Technology* **39**(4): 406–408.
- Rea, M. S., Bullough, J. D., et al. (2009). "Several views of metal halide and high-pressure sodium lighting for outdoor applications." *Lighting Research and Technology* **41**(4): 297–320.
- Rea, M. S., Bullough, J. D., et al. (2004). "A proposed unified system of photometry." *Lighting Research and Technology* **36**(2): 85–111.
- Stockman, A. & Sharpe, L. T. (2006). "Into the twilight zone: The complexities of mesopic vision and luminous efficiency." *Ophthalmic and Physiological Optics* **26**(3): 225–239.
- Szalmas, A., Bodrogi, P., et al. (2006). "Characterizing luminous efficiency functions for a simulated mesopic night driving task based on reaction time." *Ophthalmic and Physiological Optics* **26**(3): 281–287.
- Várady, G., Freiding, A., et al. (2007). "Mesopic visual efficiency III: Discrimination threshold measurements." *Lighting Research and Technology* **39**(4): 355–364.
- Vägverket (2004). Vägar och gators utformning. Borlänge, Vägverket.

VTI är ett oberoende och internationellt framstående forskningsinstitut som arbetar med forskning och utveckling inom transportsektorn. Vi arbetar med samtliga trafikslag och kärnkompetensen finns inom områdena säkerhet, ekonomi, miljö, trafik- och transportanalys, beteende och samspel mellan människa-fordon-transportsystem samt inom vägkonstruktion, drift och underhåll. VTI är världsledande inom ett flertal områden, till exempel simulatorteknik. VTI har tjänster som sträcker sig från förstudier, oberoende kvalificerade utredningar och expertutlåtanden till projektledning samt forskning och utveckling. Vår tekniska utrustning består bland annat av körsimulatorer för väg- och järnvägstrafik, väglaboratorium, däckprovsningsanläggning, krockbanor och mycket mer. Vi kan även erbjuda ett brett utbud av kurser och seminarier inom transportområdet.

VTI is an independent, internationally outstanding research institute which is engaged on research and development in the transport sector. Our work covers all modes, and our core competence is in the fields of safety, economy, environment, traffic and transport analysis, behaviour and the man-vehicle-transport system interaction, and in road design, operation and maintenance. VTI is a world leader in several areas, for instance in simulator technology. VTI provides services ranging from preliminary studies, highlevel independent investigations and expert statements to project management, research and development. Our technical equipment includes driving simulators for road and rail traffic, a road laboratory, a tyre testing facility, crash tracks and a lot more. We can also offer a broad selection of courses and seminars in the field of transport.

vti

HUVUDKONTOR/HEAD OFFICE

LINKÖPING

POST/MAIL SE-581 95 LINKÖPING

TEL +46 (0)13 20 40 00

www.vti.se

BORLÄNGE

POST/MAIL BOX 920

SE-781 29 BORLÄNGE

TEL +46 (0)243 446 860

STOCKHOLM

POST/MAIL BOX 55685

SE-102 15 STOCKHOLM

TEL +46 (0)8 555 770 20

GÖTEBORG

POST/MAIL BOX 8077

SE-402 78 GÖTEBORG

TEL +46 (0)31 750 26 00