



## **OM RAPPORTEN:**

**Titel:** Utomhusbelysning med LED: Fördelar och nackdelar ur ett hållbarhetsperspektiv

**Versionsdatum:** 2019-11-26

**Rapporten bör citeras såhär:** Jägerbrand, Annika K. (2019). Utomhusbelysning med LED: Fördelar och nackdelar ur ett hållbarhetsperspektiv. Rapport. Calluna AB.

**Omslag:** bilden illustrerar resultaten i rapporten och är baserad på sammanfattningstabellerna.

## **OM PROJEKTET:**

**Utfört av:** Calluna AB (organisationsnummer: 556575-0675)  
Adress huvudkontor: Calluna AB, Linköpings slott, 582 28 Linköping  
Hemsida: [www.calluna.se](http://www.calluna.se)  
Telefon (växel): +46 13-12 25 75

**På uppdrag av:** Bertil och Britt Svenssons Stiftelse för Belysningsteknik

**Beställarens kontaktperson:** Lena Gustafsson

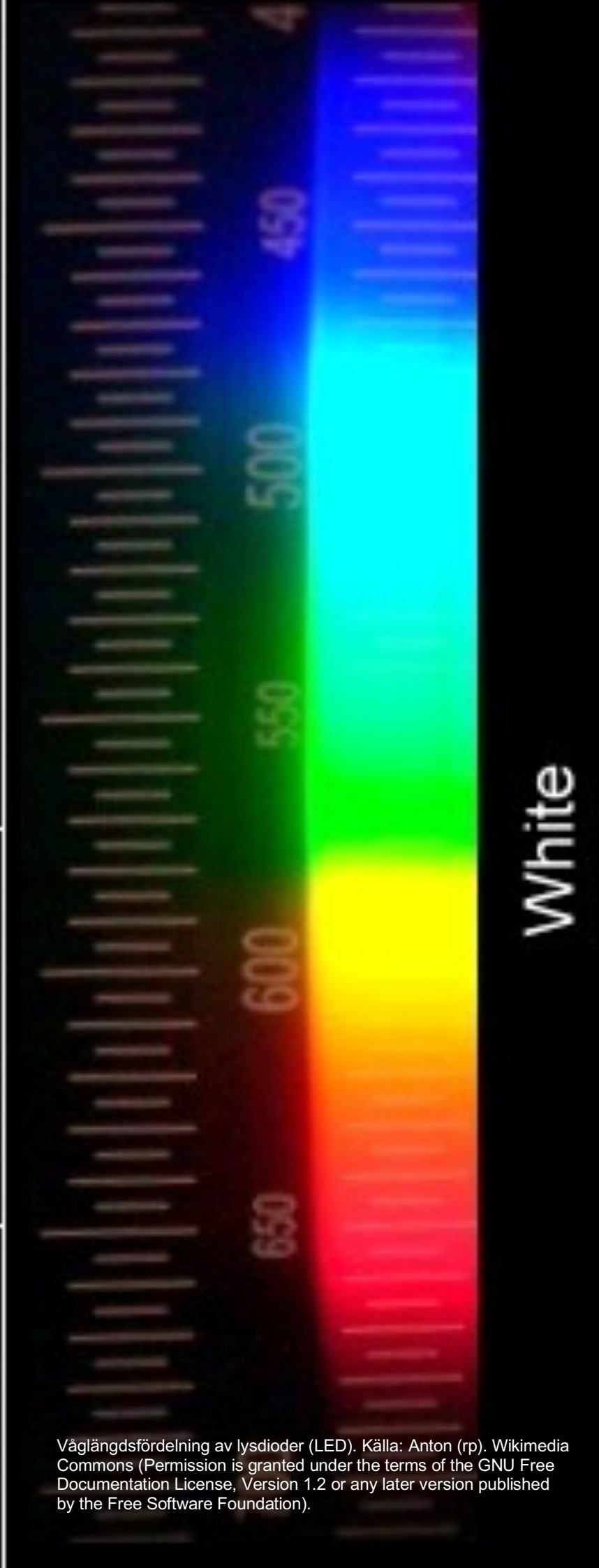
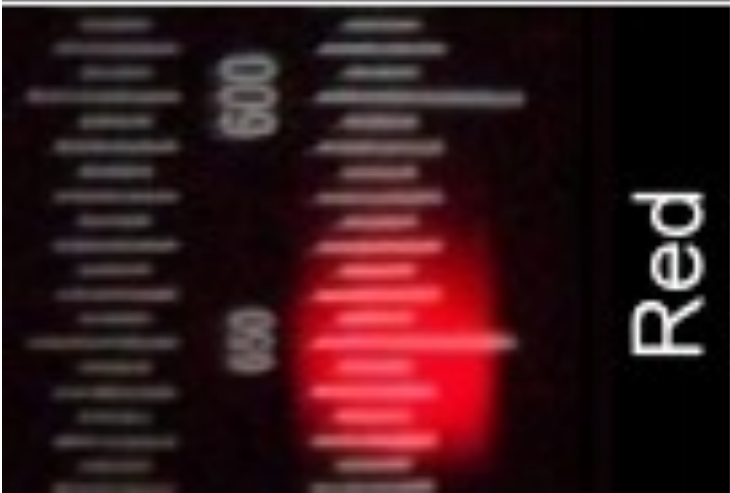
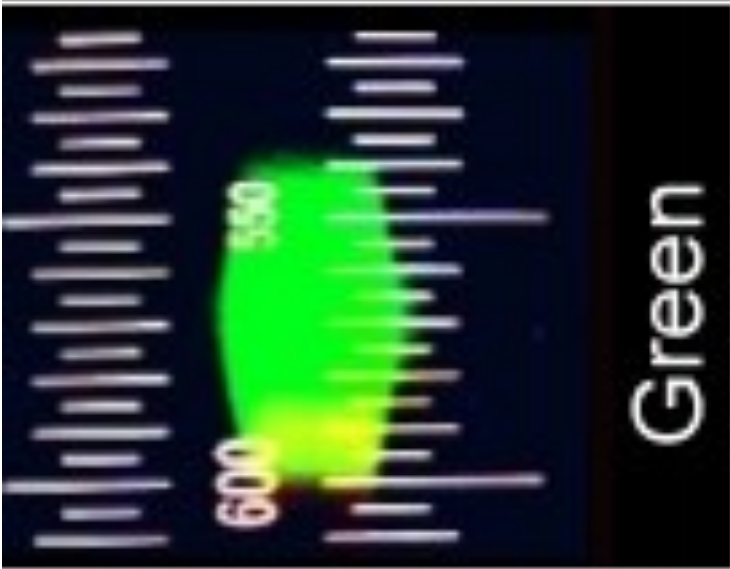
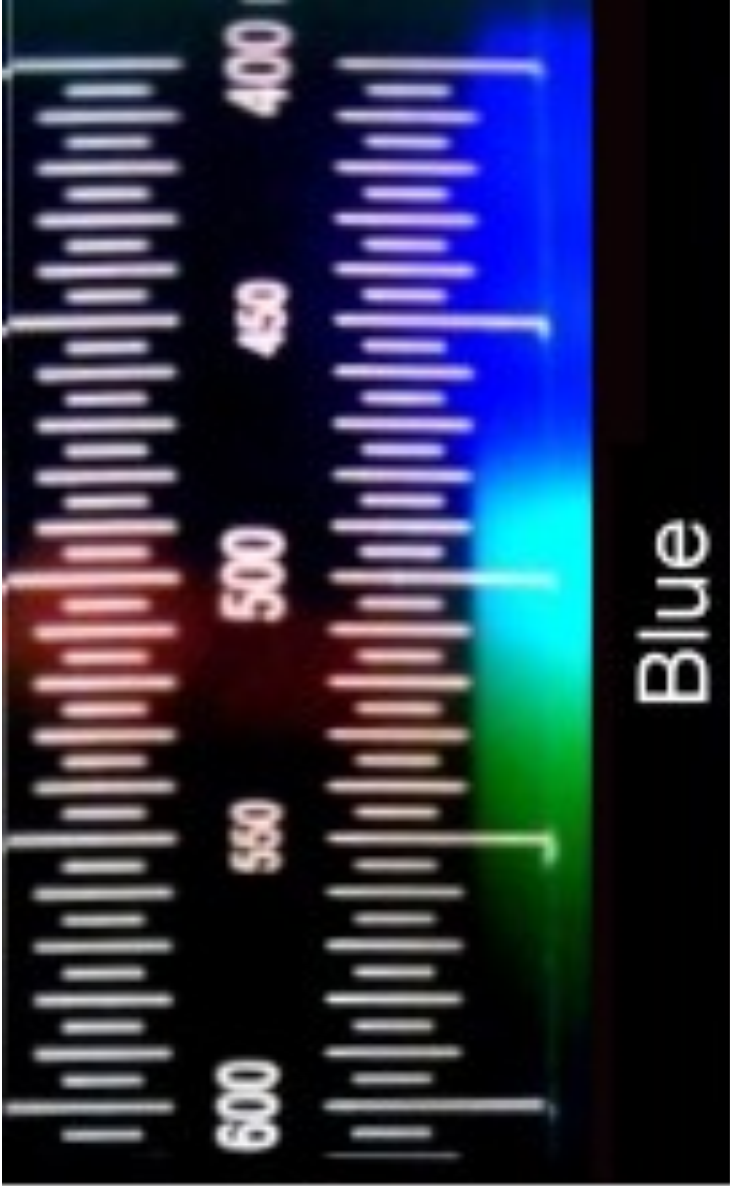
**Projektledare:** Annika K. Jägerbrand (Calluna AB)

**Rapportförfattare:** Annika K. Jägerbrand (Calluna AB)

**Layout:** Tove Adelsköld (Calluna AB)

**Kvalitetssäkring:** Jennie Barthel Svedén (Calluna AB)

**Intern projektkod:** AJD0004



Våglängdsfördelning av lysdioder (LED). Källa: Anton (rp). Wikimedia Commons (Permission is granted under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.2 or any later version published by the Free Software Foundation).

## Förord

I denna rapport presenteras för- och nackdelar med utomhusbelysning med lysdioder (LED). Arbetet i projektet är finansierat av Bertil och Britt Svenssons Stiftelse för Belysningsteknik. Projektet initierades av projektledaren Annika K. Jägerbrand (tidigare VTI, nu Calluna AB).

Rapporten är baserad på en *peer-review*-granskad vetenskaplig artikel "New Framework of Sustainable Indicators for Outdoor LED (Light Emitting Diodes) Lighting and SSL (Solid State Lighting)". Den publicerades i tidskriften *Sustainability* 2015, 7(1): 1028–2063, den 19 januari 2015. För att komplettera med ny kunskap som framkommit inom området efter att artikeln författades utfördes sedan uppdaterade litteratursökningar inom specifika områden och ämnen inom ramen för det här projekt.

Ett stort tack även till Magnus Frantzell som bidragit till rapportens möjliggörande på olika sätt.

Projektets budget har till största delen upparbetats på VTI, men projektet har slutförts på Calluna AB.

*Stockholm, oktober 2019*

**Annika Jägerbrand**

Projektledare, Calluna AB

# Innehåll

<b>Sammanfattning</b>	<b>6</b>
<b>English summary</b>	<b>8</b>
<b>Förkortningar och definitioner</b>	<b>10</b>
<b>1 Bakgrund</b>	<b>12</b>
1.1 Definition av hållbarhet .....	13
1.2 Översikt över hållbarhetsramverket för (LED) utomhusbelysning .....	13
<b>2 Syfte och avgränsningar</b>	<b>15</b>
<b>3 Metodik</b>	<b>16</b>
3.1 Litteratursökning .....	16
3.2 Kompletterande litteratursökning .....	16
3.3 Definition fördelar och nackdelar .....	16
<b>4 Resultat</b>	<b>17</b>
4.1 Tekniska förutsättningar och möjligheter .....	17
4.2 Dimensionen ekologi och miljö .....	21
4.3 Ekonomiska dimensioner.....	28
4.4 Sociala dimensioner .....	31
<b>5 Slutsatser</b>	<b>35</b>
<b>6 Referenser</b>	<b>36</b>

## Sammanfattning

Ny energieffektiv belysning såsom LED (lysdioder) har potential att spara mycket energi och reducera onödigt spilljus och ljusföroreningar när de används på rätt sätt. Belysningen har dock både för- och nackdelar i jämförelse med mer traditionella ljuskällor (såsom högtrycksnatrium eller keramisk metallhalogen). Dessa skillnader har inte blivit studerade i speciellt stor utsträckning, då LED och andra ljuskällor baserade på halvledare är relativt nya och ständigt utvecklas.

Detta projekt redovisar för- och nackdelar med att använda LED utifrån ett hållbarhetsramverk för utomhusbelysning. Definitionen av fördelar är att belysningen har en i första hand positiv påverkan på aspekter som avses, och för nackdelar gäller att belysningen har en i första hand negativ påverkan på de aspekter som avses.

Miljömässigt medför användning av LED-belysning utomhus många fördelar. Många av dessa är kopplade till minskad energikonsumtion, eftersom LED-ljuset kan regleras i tid, rum och styrka. Fördelarna omfattar minskningar av de ekologiska effekterna, ljusföroreningar, energiförbrukning och klimatpåverkan samt mindre negativ miljöpåverkan i livscykeln. Nackdelar på miljöområdet kan bland annat kopplas till LED-belysningens ökade användning i tid och rum. Dessutom kan den breda våglängdsbredden, med toppar i blått ljus, påverka fler arter inklusive skyddade arter eller känsliga arter och habitat samt innebär en risk för ekosystempåverkan. Det vita dagsljusliknande, artificiella ljuset från LED kan i kombination med ökad användning leda till oönskade effekter på naturen. Det kan även göra att ljusföroreningar ökar i omfattning. Livscykelanalyser visar på nackdelar kopplade till de metaller som används i LED-belysningen.

De tekniska fördelarna med LED-belysning, såsom ljusutbyte och livslängd, leder till besparingar i livscykelkostnader och återbetalningstid. Avseende ekonomisk tillväxt och kostnads-nyttoanalys finns en del osäkerheter, men exempelvis kan ett byte från uttjänta ljuskällor till LED med längre livslängd och lägre energikonsumtion leda till kostnadsbesparingar. Det finns dock oklarheter avseende sambandet mellan ekonomisk tillväxt över områden, såsom städer eller regioner, och de orsakssamband som finns med belysningen. Det finns även oklarheter avseende sociala fördelar, då dessa oftast inte har blivit ekonomiskt skattade.

Inom trafiksäkerheten omfattar fördelarna med LED-belysning bland annat en ökad kontrast med mer dagsljusliknande vägbelysning. Det innebär även energibesparingar från ljusreglering utan negativa effekter på trafiksäkerheten, högre säkerhet på grund av ökad jämnhet samt minskat spilljus och ljusföroreningar eftersom optiken hos LED möjliggör högre kontroll. Nackdelar inom trafiksäkerhetsområdet är att LED som ljuskälla har en tendens att orsaka bländning och att mer riktat ljus kan leda till att oskyddade trafikanter syns sämre.

Avseende hälsoaspekter kan LED-belysningen åstadkomma möjlighet till mer fysisk aktivitet genom ökad tillgänglighet till mer belysta och tryggare miljöer. En annan möjlighet med LED-tekniken är att anordna belysning på hälsofrämjande miljöer. Obekräftade nackdelar är att LED kan orsaka fotokemisk skada på näthinnan och hälsoeffekter på grund av flimmer, men det är tveksamt om dessa effekter kan uppstå för utomhusbelysning med LED. Även dygnsrytmen hos människor kan påverkas, exempelvis ifall det finns utomhusbelysning som lyser in i fastigheter.

**LED har som ljuskälla många tekniska fördelar som vi bör utnyttja för att göra utomhusbelysningen mer hållbar, dock utan att blunda för dess risker och nackdelar.**



De aspekter avseende livskvalitet som hittills har identifierats omfattar förändrade upplevelser kopplat till en ändring av färgtemperaturen (förändringen kan vara både för- och nackdel) och att LED möjliggör lägre belysningsstyrkor (en fördel är ifall inga personer vistas på platsen och en nackdel är ifall individer med synnedsättning inte kan röra sig tryggt och säkert). De tekniska fördelarna med LED, såsom anpassningar och samspel, kan leda till ökad trygghet och säkerhet, samtidigt som ljusreglering kan leda till minskad trygghet och säkerhet ifall det görs suboptimalt. Olika typer av förbättrad belysning och sensorstyrd aktivering kan minska risken för brott. En överdriven användning av LED kan dock leda till falsk trygghet och minskad säkerhet. Bländning och höga stolpar kan båda leda till ökad otrygghet.

Denna rapport visar mycket tydligt att ny teknik såsom LED har en rad tekniska fördelar som, ifall de utnyttjas på rätt sätt, kan ge mycket positiva effekter i form av minskad energikonsumtion, minskad ekologisk påverkan, reducerade mängder ljusföroreningar, bra ekonomiska förutsättningar för investeringar samt ökad trygghet och säkerhet.

Samtidigt bör man inte blunda för de risker och nackdelar som LED är förknippat med och speciellt inte avseende områden där det idag inte riktigt finns tillräckligt med kunskap. Detta gäller exempelvis påverkan av LED på en rad olika djur och organismer, effekterna på himlaglim av utbyte till LED, trygghetsaspekter och upplevelser av LED i olika belysningsstyrkor, ljusregleringsscenarios samt hur utformningen bör se ut i olika miljöer.

Sammanfattat har LED som ljuskälla många tekniska fördelar som möjliggör anpassningar i tid och rum på ett sätt som aldrig har varit möjligt tidigare och som vi bör utnyttja för att göra utomhusbelysningen mer hållbar.

## English summary

New energy-efficient lighting, such as LED (light emitting diodes), has the potential to save energy and reduce obtrusive light and light pollution when appropriately used. However, the lighting has both advantages and disadvantages compared to more traditional light sources (such as high-pressure sodium or ceramic metal halide) and these have not been studied to a great extent since LEDs and other light sources based on semiconductors are still relatively new and are constantly developing.

This project presents the advantages and disadvantages of using LEDs based on a sustainability framework for outdoor lighting. The definition of advantages is that the lighting has a primarily positive impact on the studied aspects, and for the disadvantages that the lighting has a primarily negative impact on the studied aspects.

Many of the technical advantages of LED lighting are linked to reduced energy consumption, as light can be regulated over time, space and strength. The technology that allows to reduce and control the light over time and space results in many environmental benefits. For example, less ecological impacts, light pollutions, energy consumption, climatic impact and negative impact in the life cycle. However, there are also drawbacks associated with the increased use of LED lighting in space and time, as well as the wide spectral power distribution with peaks in blue wavelengths, which may affect more species, protected species or sensitive species and habitats. The daylight-like character of the LED lighting in combination with increased use can lead to undesirable effects on nature, light pollution and sky glow. LCA shows that there are disadvantages associated with the metals used in the LED products.

**LEDs as a light source has many technical advantages that should be used to increase the sustainability of outdoor lighting, not forgetting its risks and disadvantages.**

The technical advantages of LED lighting, such as light output and increased service life, lead to cost savings in LCC and pay-back time. Regarding economic growth and cost-benefit analysis, there are some uncertainties but, for example, switching from old light sources to LEDs with longer lifetimes and lower energy consumption can lead to savings. However, there are uncertainties regarding the correlation between economic growth over areas such as cities or regions and the causal link that exists with the lighting. There's also uncertainties regarding the social benefits, since these have usually not been evaluated in monetary values.

Within traffic safety aspects the advantages of LED lighting include the increased contrast, and that adaptive or scheduled lighting can save energy without any adverse effects on traffic safety. Disadvantages are that LED as a light source tend to cause glare and that more directed light can lead to inferior visibility of the unprotected road users.

Regarding health aspects, LED lighting can result in more physical movements through opportunities for increased accessibility in more illuminated and safer environments. Unconfirmed disadvantages are that the LED can cause photochemical damage to the retina and health effects due to flicker, but it is doubtful that these effects can occur for outdoor lighting with LED. The circadian rhythm of humans can be affected, for example, if the outdoor lighting illuminates into real estate or apartments in unwanted ways.

The aspects identified so far regarding well-being include changed perceptions linked to a change in the colour temperature (can be both disadvantage and advantage), that the LED enables the use of lower illuminance which also can result in both advantages and disadvantages. The technical advantages of LEDs, such as adaptations and increased possibilities



of interactions with the environment can lead to increased security and safety, while adaptive lighting can lead to reduced safety and security if designed suboptimal. Excessive use of LEDs can lead to false feelings of safety and reduced security.

This report shows that new technology such as LED has several technical advantages which, if used properly, can result in positive effects in the form of reduced energy consumption, reduced ecological impact, reduced amounts of light pollution, good economic conditions for investment, as well as increased security and safety.

However, there are also risks and disadvantages with LED and areas where there is a lack of knowledge. This applies to, for example, the influence of LED on a number of different animals and organisms, the effects on the sky glow when switching to LED over larger areas, various safety aspects and the impact of uses of various illuminance levels, adaptive lighting scenarios, and the best lighting design in different environments.

In summary, LEDs as a light source have many technical advantages that enable adaptations in time and space in a way that has never been possible before, which we should use to increase the sustainability of the outdoor lighting.

## Förkortningar och definitioner

Begrepp	Förklaring
Armatyr	Infattning och utrustning för elektrisk belysning.
Artificiellt ljus	Ljus med antropogen (människt skapad) källa.
Belysningsstyrka	Fotometriskt mått på mängden ljus en yta belyses med (även kallat illuminans), anges i lux (E eller Ev). 1 lux = 1 lumen/m <sup>2</sup> . Mäts med luxmätare. Baseras på mänskligt seende.
Bibehållningsfaktor	Kvoten mellan den luminans/belysningsstyrka som anläggningen ger efter en viss tid och den luminans/belysningsstyrka anläggningen ger när den är ny.
Bländning	Svårigheter som uppstår att se när man utsätts för starkt ljus.
CMH	Keramisk metallhalogen (ljuskälla med vitt ljus).
Fotopiskt seende	Färgseende i dagsljus eller i höga ljuskvantiteter (med tapparna).
Fotoreceptorer	En fotoreceptorcell är en specialiserad typ av cell som finns i näthinnan och som kan omvandla elektromagnetisk strålning till en cellulär effekt (s.k. fototransduktion).
Fototaxis	Inriktning av fritt rörlig organisms rörelseriktning efter ljusets riktning. Kan vara positiv eller negativ beroende på ifall organismen rör sig till eller från ljuset.
Färgtemperatur	Ljusets färgton, enhet °Kelvin. Bygger på strålningsegenskaperna för svartkroppsstrålning.
Färgåtergivningsindex	R <sub>a</sub> , ett index. Ett system för att kunna mäta färger i jämförelse med en känd ljuskälla.
Himlaglim	Natthimlens diffusa luminans (ofta orsakad av ljusföroreningar) som är oberoende av mån- och stjärnljus. Synonymt med "himmelströljus".
HPS	Högtrycksnatrium (ljuskälla med huvudsakligen gult ljus).
LCA	Livscykelanalys.
LCC	Livscykelkostnad.
LED	Lysdioder (ljuskälla baserad på halvledarteknik). Från engelskans <i>Light-Emitting Diode</i> .
Ljusflöde	Totala mängden ljus som sänds ut över en rymdvinkel. SI-enhet: lumen (lm).
Ljusförorening	Används generellt för att referera till en oönskad effekt av artificiellt ljus, vilket kan inkludera: himlaglim, bländning, ljusstörning eller minskad synbarhet nattetid.
Ljusstyrka	Mängden ljus som strålar ut i en viss riktning från en ljuskälla. SI-enhet: candela (cd). En stearinljuslåga med en diameter på 25 mm har en ljusstyrka på ca 1 cd.
LPS	Lågtrycksnatrium (ljuskälla med monokromatiskt gult ljus i ca 589 nm).
Lumen	Lumen är SI-enheten för ljusflöde (mäts i candela). En lumen = 1 candela x 1 steradian (steradian = rymdvinkeln i vilket ljusets utsänds).
Luminans	Ljuset som strålar i viss riktning från en yta. SI-enhet: cd/m <sup>2</sup> .
Mesopiskt seende	Skymningsseende, hur ögat uppfattar ljus vid cirka 0,3–3 cd/m <sup>2</sup> .
Reflexionsegenskaper	Egenskaper hos en yta som reflekterar tillbaka ljuset.
S/P-kvot	Beskriver en ljuskällas frekvensinnehåll som kvoten mellan skotopiskt och fotopiskt ljusutbyte.
Skotopiskt seende	Mörkerseende under låga ljusförhållanden (oftast baserat på användning av synpigmentet rodopsin/synpurpur i stavarna).
Spilljus	Ljus som spiller över från där det borde vara, exempelvis i oönskade riktningar och områden.
SSL	Solid state lighting. Halvledarbelysning (exempelvis LED, OLED).

Begrepp	Förklaring
Tapetum lucidum	Ett lager vävnad i ögat innanför näthinnan som reflekterar synbart ljus tillbaka genom ögat så att synbarheten ökar eftersom ljuset strålar genom fotoreceptorerna i ögats celler två gånger. Förknippat med en lägre synskärpa. Finns hos många nattaktiva djur såsom rovdjur och vissa däggdjur.
Våglängdsfördelning	Det elektromagnetiska spektrumet för strålning och fotonvåglängder. Även kallat spektralfördelning. Synligt ljus för människan är cirka 380–780 nm. Våglängdsfördelningen hos en ljuskälla kan variera beroende på teknik och material.

# 1 Bakgrund

## Belysning med stor potential

Ny belysning i form av lysdioder (det vill säga light-emitting diodes, hädanefter kallat LED) implementeras redan i stor omfattning utomhus på exempelvis gator, gång- och cykelvägar och på fastigheter. Det görs därför stora investeringar, oftast med skattemedel från exempelvis kommunernas budget, när det gäller gatubelysning och det förväntas att belysningen är miljövänlig och har lång livslängd för att motivera investeringarna.

Det går ofta relativt lätt att räkna ut hur stor miljövinsten blir vid byte till lysdioder när det gäller hur mycket energi man sparar in. Exempelvis tillhandahåller upphandlingsmyndigheten mallar för uträkningar av LCC (livscykelkostnad). I det långa loppet vinner man oftast på att byta belysning. Även om LED-belysning kan vara mycket dyrare än traditionella ljuskällor, så har den ofta betydligt högre förväntad livslängd och mindre energiåtgång, vilket gör att LED på längre sikt är billigare i drift. Exempelvis uppges LED ha mellan 25 000–100 000 timmars livslängd jämfört med 12 000–22 000 timmar för högtrycksnatrium. Utomhusbelysningen är tänd cirka 4 000 timmar per år, vilket ger en livslängd mellan 6–25 år, förutsatt att tillverkarnas uppgifter är korrekta.

LED-belysning är i dagsläget dyrare vid installation, om man jämför kostnader rakt av utan att ta hänsyn till livslängd och livscykelkostnader. Utvecklingen av LED-belysning går dock snabbt framåt. Det är ganska säkert att det inom några år kommer att finnas fler tillgängliga alternativ som är prismässigt konkurrenskraftiga jämfört med dagens ljuskällor.

Användningen av LED-belysning kommer att öka, med fler belysningspunkter och områden som blir belysta, så länge som människor vill ha mer belysning, eftersom den utvecklas alltmer och med tiden blir billigare att använda till utomhusbelysning. Många upplever upplysta miljöer som trygga, trevliga och tillgängliga, vilket gör att behovet av utomhusbelysning är fortsatt stort, både i urbana miljöer och i glesbygden.

Det finns dock flera aspekter där LED-belysningen kan ha nackdelar jämfört med traditionell belysning, exempelvis avseende miljöaspekter och även inom trafiksäkerhet.

## Helhetsperspektiv och hänsyn behövs

Systemtänkande och helhetsperspektiv har identifierats av bland annat Energimyndigheten. Det innebär att dimensioner av ekonomisk, ekologisk och social hållbarhet är viktiga i bebyggda miljöer och att det finns behov av att väga samman alla strävanden till en "optimal helhet" (Energimyndigheten 2012). Detta är av mycket hög relevans för energieffektiv belysning i utomhusmiljöer, där påverkan på människor ur olika aspekter är stor.

Den svenska miljölagstiftningen omfattar hänsynsregler i miljöbalken (2 kap 3 §), vilka även inkluderar artificiella ljuskällor och deras påverkan utomhus (SFS 1998:808), se Faktaruta 1.

Utomhusbelysning kan påverka antalet trafikolyckor, människors sömn och välbefinnande, miljön, kriminalitet och trygghet. Därför bör relevanta hållbarhetsaspekter inkluderas i valet av utomhusbelysning, inte bara livslängd och energieffektivitet.



### FAKTARUTA 1

#### Miljöbalken 2 kap 3 §

"Alla som bedriver eller avser att bedriva en verksamhet eller vidta en åtgärd skall utföra de skyddsåtgärder, iakta de begränsningar och vidta de försiktighetsmått i övrigt som behövs för att förebygga, hindra eller motverka att verksamheten eller åtgärden medför skada eller olägenhet för människors hälsa eller miljön. I samma syfte skall vid yrkesmässig verksamhet användas bästa möjliga teknik."

## Kunskap saknas – eller finns men används inte

I dagsläget finns ett glapp mellan belysningseffekter verifierade av forskningssamhället och den praktiska implementeringen (belysningsansvarigas val av belysning). Det gör att den praxis som tillämpas vid nyinstallationer inte inkluderar viktiga aspekter för en hållbar samhällsutveckling. Det innebär även att det till stor del saknas ett evidensbaserat arbetssätt för utomhusbelysning.

Inom vissa områden är det dock uppenbart att det saknas forskningsresultat om lysdiodernas effekter och där är det svårt att veta vad som egentligen gäller. En av orsakerna till att man vet så lite inom vissa områden är att forskare i olika länder har använt helt olika metoder i sitt arbete. Belysningen eller utformningen av belysningen är såpass ny att det inte finns någon gemensam standard för forskarna att använda. Sådana kunskapssvaga aspekter eller krav är idag svåra att inkludera när man upphandlar och väljer ny belysning. Därför brukar dessa övriga aspekter ofta hamna i skymundan när ny belysning ska införskaffas.

Idag finns det inte något etablerat verktyg för att göra helhetsbedömningar av utomhusbelysningens hållbara utveckling. Ett ramverk för utveckling av ett sådant verktyg publicerades dock 2015 (Jägerbrand 2015) och det innefattar social, ekologisk och ekonomisk hållbarhet. Där ingår det exempelvis LCA (livscykelanalys) och ekologisk påverkan, men även trafiksäkerhet, energieffektivitet och olika sociala aspekter.

I denna rapport beskrivs hållbarhetsaspekterna med synsättet att det kan finnas för- och nackdelar att ta hänsyn till. För- och nackdelar kan ibland även bero på hur metoder används och bedömningen av LED-belysningen kan vara komplext eftersom det kan finnas både för- eller nackdelar. Så är exempelvis fallet med trafiksäkerhet, upplevelser eller trygghetsaspekter.

### 1.1 Definition av hållbarhet

I denna rapport definieras hållbarhet enligt konceptet hållbar utveckling, vilket fastställdes i Brundtland-rapporten (World Commission on Environment and Development 1987):

*"Hållbar utveckling är utveckling som tillfredsställer dagens behov utan att äventyra kommande generationers möjligheter att tillfredsställa sina behov"*

Vidare anses hållbar utveckling vara en process snarare än ett slutstadium. Exempelvis att i en kontinuerlig process stödja förändringar i beslut, investeringsriktning och omorientering av teknisk utveckling.

Under FN-toppmötet i Rio 1992<sup>1</sup> fastställdes att hållbar utveckling vilar på tre pelare som måste beaktas samtidigt, nämligen de ekologiska, ekonomiska och sociala dimensionerna. Dessa tre dimensioner kan överlappa varandra och det finns beroendeförhållanden dem mellan.

Inom belysning har det inte tidigare funnits några definitioner av vad som bör ingå i konceptet hållbarhet och indikatorer, vare sig för utomhus- eller inomhusbelysning. I avsnitt 1.2 tas det upp vad som rekommenderats att ingå i hållbarhetsramverket för utomhusbelysning.

### 1.2 Översikt över hållbarhetsramverket för (LED) utomhusbelysning

Nedanstående bild (Figur 1) redovisar uppbyggnaden och strukturen i de tre hållbarhetsdimensionerna som är identifierade för utomhusbelysning: ekologisk och miljöns hållbarhet, ekonomisk hållbarhet samt social hållbarhet. Identifierade områden som redovisas i figuren överensstämmer med de som finns med i ramverket för hållbarhet, förutom för de sociala områdena. Där har flera begrepp som omfattar social hållbarhet ("social well-being, quality of life, equity", samt ljusföroreningar och brott) istället sammanförts under ordet

<sup>1</sup> FN:s konferens om miljö och utveckling i Rio de Janeiro, Brasilien.

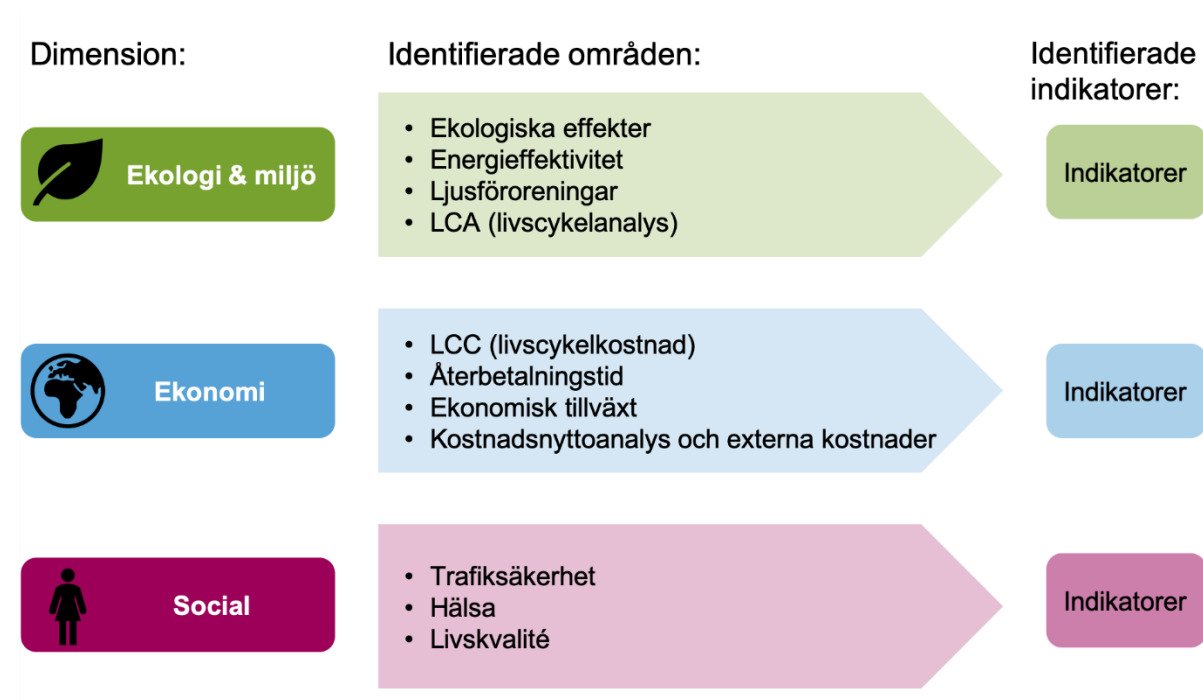
livskvalité. Detta är gjort för att förenkla arbetet och för att kunna fokusera på vilka aspekter av LED-belysningen som är relevanta i sammanhanget.

För varje identifierad dimension finns ett antal indikatorer identifierade (Jägerbrand 2015). Under exempelvis energieffektivitet ingår indikatorer som kan kvantifiera energiåtgång per installerad vägkilometer, men även besparingar i energi per år, antal belysningspunkter i ett område och luminans per kvadratmeter yta.

Indikatorer används ofta som ett verktyg för policyutformning och som beslutsstöd för att säkerställa att olika mål kan mätas, övervakas och uppfyllas. De möjliggör jämförelser mellan system eller produkter och ger nödvändig information för beslut om framtida förändringar i riktning mot hållbar utveckling.

En indikator måste vara en specifik variabel som härrör från ett värde eller mätning. Den är därför baserad på ett vetenskapligt begrepp och är lämplig för kvantifiering på ett neutralt sätt i termer av ett antal eller statistiska analyser. Som jämförelse är kvalitativa mätningar i allmänhet svårare att använda som indikatorer eftersom de inte är lika enkla att mäta och jämföra.

I denna rapport kommer indikatorer inte att beskrivas ingående, förutom när det är relevant för att beskriva för- och nackdelar.



**Figur 1.** Översikt över hållbarhetsramverket för utomhusbelysning, utvecklad efter (Jägerbrand 2015). Ljusreglering är ej med under ekonomi då den i denna rapport hamnar under tekniska förutsättningar och möjligheter.



## 2 Syfte och avgränsningar

Projektet syftar till att öka kunskapsläget om ny energieffektiv utomhusbelysning genom en rapport på svenska där för- och nackdelar med utomhusbelysning med LED redovisas. Rapporten baseras till stor del på hållbarhetsramverket för utomhusbelysning samt en mindre uppdatering med nya relevanta forskningsresultat.

Rapporten riktar sig till belysningsansvariga på kommuner och Trafikverket, andra ansvariga för utomhusbelysning samt allmänheten. Resultaten kan även vara relevanta för de som arbetar med olika slags planeringsfrågor och naturmiljöfrågor.

Projektet är inte avsett att ge en uttömmande litteraturöversikt för alla de enskilda områden som ingår i hållbarhetsramverket. Syftet är snarare att skapa en helhetsbild över de för- och nackdelar som LED-belysning innebär. Projektet inkluderar inte heller belysning från mobila källor (till exempel fordon).

## 3 Metodik

### 3.1 Litteratursökning

Den vetenskapliga artikel som ligger till grund för denna rapport är baserad på en systematisk litteraturoversikt av utomhusbelysning som gjordes 2013 och 2014. Sökningen gjordes då med fokus på hållbarhetsaspekter för att hitta både vetenskapliga forskningsresultat och resultat från den så kallade "grå" litteraturen (inte peer-review). En del litteratur hittades även genom "snöbollseffekten", det vill säga att man genom referenslistan i artiklar av intresse hittar andra publikationer. Sökningen beskrivs i detalj i Jägerbrand (2015).

Antalet databaser som användes i varje sökning berodde på mängden litteratur som ursprungligen hittades. Sökningarna finjusterades ibland under processen. Det fanns inget sätt att säkerställa att all relevant litteratur påträffades, men i vissa fall söktes det även på hållbar utveckling och LED/SSL-belysning i Google eller Google scholar för att hitta ytterligare litteratur och se till att de relevanta referenserna hade funnits. Databaser som användes var TRID, Scopus, Web of Science och portalen för transportforskning.

Sökningen delades upp i olika områden och omfattade grupperna: LED, artificiellt ljus, LCA, hållbarhet, CO<sub>2</sub>, energi, social och ekonomisk hållbarhet, hållbarhetsindikatorer, fordons hastighet, trafiksäkerhet, energieffektivisering, beslutsprocesser och rekyleffekter.

### 3.2 Kompletterande litteratursökning

Kompletterande litteratursökningar gjordes 8–9 september 2016 i Scopus, för att få med nyare vetenskapliga forskningsresultat inom området, samt kompletteringar där det saknas djupare information. Sökningarna gjordes bredare än de gjordes 2013–2014, med fokus på artiklar från 2014–2016 och i enlighet med följande sökord (antalet funna artiklar utan dubletter):

- Light emitting diode + outdoor (304 artiklar)
- Light emitting diode + pollution (287 artiklar)
- Light pollution + LED (465 artiklar)
- Road lighting + vehicle (2723 artiklar)
- Street lighting (427 artiklar)

Från denna kompletterande sökning togs enbart sökträffar från 2014 och framåt med i studien. Först lästes titlarna för sökträffarna igenom, sedan lästes sammanfattningar och fulltextartiklar av relevans för denna rapport. Snöbollseffekten har dock gett upphov till att litteratur från före 2014 som bedömdes relevant också tagits med i rapporten.

Snöbollssökningar utifrån relevant litteratur (citeringar och referenser som ingår i artiklarna) har även genomförts kontinuerligt under författandet av denna rapport. Ingen kontrollsökning har genomförts för att försäkra att allt relevant kommit med.

### 3.3 Definition fördelar och nackdelar

Under arbetet med rapporten har det visat sig att en del aspekter inte nödvändigtvis har en tydlig negativ eller positiv sida. Det beror oftast på hur teknik och metoder eller aspekter används, tolkas eller utnyttjas.

Det kan även vara så att det finns målkonflikter för aspekter som exempelvis beror på belysningens egenskaper, effektnivå, installation och installationsområde. I denna rapport definieras därför fortsättningsvis fördelar och nackdelar enligt:

**Fördelar:** belysningen har en i första hand önskvärd positiv påverkan på de aspekter som avses.

**Nackdelar:** belysningen har en i första hand negativ påverkan på de aspekter som avses.

## 4 Resultat

I detta kapitel diskuteras först de tekniska förutsättningarna och möjligheterna med LED (avsnitt 4.1), därefter följer en genomgång av för- och nackdelar inom dimensionerna miljö och ekologi (avsnitt 4.2), ekonomiskt (avsnitt 4.3) och socialt (avsnitt 4.4). I slutet av varje avsnitt presenteras de identifierade för- och nackdelarna i en sammanfattande tabell.

### 4.1 Tekniska förutsättningar och möjligheter

De tekniska fördelarna med LED jämfört med traditionella ljuskällor är många, men kan sammanfattas i ljusreglering, bibehållningsfaktor, möjligheter till bättre interaktion med ytans reflexionsegenskaper, samt möjligheten att kunna använda specifika våglängder av ljus.



#### 4.1.1. Ljusreglering och adaptivt ljus



LED-belysning är extra lämplig för ljusreglering, såsom smarta och adaptiva lösningar. Genom detta kan stora mängder energi sparas och det kan även leda till förlängd livslängd för ljuskällan. Ljusregleringen kan ske mellan 0 och 100 % och livslängden påverkas inte av antalet gånger som lamporna slås av och på. Uptändning sker oftast momentant och till (förvald) full styrka.

För ljusreglering av utomhusbelysning, speciellt vägbelysning, är det avgörande vilka tider som ljusregleras och vilka ljusnivåer som uppnås. Man måste upprätthålla kravnivåer för trafiksäkerheten samtidigt som man vill reducera energiåtgången, och dessutom bibehålla god synbarhet och sociala trygghetsaspekter.

Ljusreglering kan vara betydligt mer energibesparande än att reducera ljuset generellt till en lägre belysningsklass över hela anläggningen. Exempelvis visar en studie att ett ljusregleringsschema (Faktaruta 2) skulle kunna medföra besparingar på 49 %, medan en nedgång till en lägre belysningsklass för vägbelysning enbart skulle medfört besparingar på 6–35 % (Jägerbrand 2016).

Ljusregleringsscheman eller olika typer av intelligenta system med LED-belysning kan implementeras på många platser utan att det har någon inverkan på trafiksäkerheten, speciellt i områden där det saknas trafik under vissa tider. Trafiksäkerheten måste dock beaktas innan ljusreglering införs.

Även i områden med mycket låga nivåer av trafik vissa tider, exempelvis bostadsområden, är det inte alltid nödvändigt att ha full belysning för att uppfylla kravnivåerna (Jägerbrand och Carlson 2011). Ibland används dock vägbelysningen även för att belysa intilliggande gång- och cykelbanor. I de fallen är det kanske inte optimalt att införa ljusreglering, eftersom det kan påverka tryggheten för fotgängare och cyklister.

Adaptiv belysning och ljusreglering med exempelvis sensorer kan vara speciellt användbara ifall man kan införa behovsstyrd belysning. Belysning av andra typer av områden, exempelvis offentliga byggnader och monument, parkeringsplatser, industriområden, sportanläggningar och kommersiella centra, bör i möjligaste mån stängas av då den inte används. Även behovsstyrd ljusreglering eller adaptiva system kan användas. Förutom att belysning av sådana områden och byggnader drar onödig energi så ökar de även mängden ljusföroreningar.



#### FAKTARUTA 2

##### Exempel på ljusregleringsschema för vägbelysning i bostadsområde

- 50% klockan 00.00-05.00
- 80% klockan 05.00-07.00
- 80% klockan 19.00-00.00
- 100% övrig tid när inget dagsljus finns

LED med ljusreglering innebär att man kan reducera ekologisk påverkan eftersom man minskar tiden på dygnet som det artificiella ljuset orsakar störningar. För att begränsa de negativa ekologiska konsekvenserna av belysningen skulle det vara möjligt att ljusreglera vid kritiska tidpunkter för biologisk aktivitet. Förmodligen krävs dock väldigt specifika kunskaper om organismerna i fråga, om exempelvis deras migrationsmönster, reproduktion och födosök.

En nackdel med ljusreglering är att människor kan uppfatta ändringarna i ljus som negativa och störande. Detta beskrivs mer i detalj under social hållbarhet (avsnitt 4.4.3).

#### 4.1.2. Bibehållningsfaktor



Bibehållningsfaktorn används för att redan vid installationen kompensera för de kommande försämringar i ljusflöde som kommer av exempelvis nedsmutsning av armaturen och att ljuskällan åldras. På grund av bibehållningsfaktorn används ofta en högre belysningsnivå än den rekommenderade, eftersom man i traditionella belysningsanläggningar vill försäkra sig om att kravnivåerna uppnås även vid slutet av lampans livslängd. Bortfall av ljusflöde inkluderar aspekter av drift och underhåll, områdesspecifika förhållanden, lumenförsämring, nedsmutsning och att lampan går sönder.

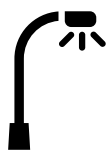
Ett belysningsystem som är överbelyst på grund av för låg bibehållningsfaktor riskerar leda till bländning, ljusföroreningar och störande ljus. Därför är det viktigt att försäkra sig om att en korrekt och realistisk bibehållningsfaktor används.

För LED-armaturer med konstantljusfunktion ska ett ljusflöde på 100 % bibehållas hela livslängden. I dessa fall behöver enbart korrigeringar göras för viss nedsmutsning. Genom att hålla ljusflödesnedgången så låg som möjligt kan man få en energisnål anläggning med färre belysningsstolpar (Royer 2014).

Det finns risk att ett system har för låga belysningsnivåer vid slutet av sin livstid. Det kan då vara bra att ha i åtanke att LED-tekniken utvecklas mycket snabbt, vilket gör det sannolikt att belysningen ersätts med mer energieffektiva lampor tidigare än planerat (på grund av bättre kvalitet och lägre priser i framtiden).

Med ett intelligent LED-belysningsystem är det möjligt att kontrollera nivån på belysningen och därmed försäkra sig om att det inte sker någon onödig energiåtgång när lampan är nyinstallerad. Man kan exempelvis reducera nivåerna vid start och öka mot slutet av livslängden för att kompensera.

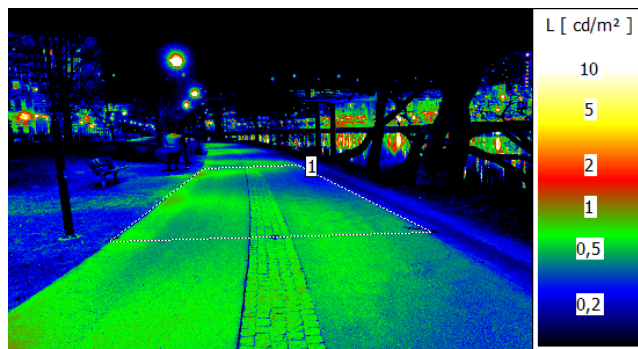
#### 4.1.3. Interaktion med ytans reflexionsegenskaper



Tekniken möjliggör att LED kan ljusregleras och anpassas efter de behov som brukarna har (oftast finns en miniminivå av ljus som är acceptabel för fotgängare, cyklister eller bilister). Man kan idag anpassa belysningsnivån utifrån ytors reflexionsegenskaper i högre grad än tidigare (Figur 2).

När man kan anpassa belysningsstyrkan till luminansnivåer kan man spara energi och ändå upprätthålla samma funktion. Användningen av en ljusare vägyta eller vertikala ytor kan leda till en höjning av luminansnivåerna vilket då möjliggör sänkning av belysningsstyrkan till de luminansnivåer man vill uppnå. Detta gäller även vid exempelvis snöförhållanden.

I förlängningen blir konsekvensen av anpassade ljusnivåer en minskad



Figur 2. Luminans hos 25W LED-belysning på gång- och cykelväg i Kungsholms strand, Stockholm. Skalan är i cd/m<sup>2</sup> enligt kolumnen till höger.

energiförbrukning (Ylinen m.fl. 2011a). Detta är särskilt användbart om systemet har intelligent kontroll, eftersom man då kan minska eller öka belysningen utifrån reflexionsegenskaper eller väderförhållanden.

Vid nyanläggningen är asfaltsytorna svarta på grund av asfaltens innehåll av bitumen. Allteftersom ytan eroderas förändras färgen till att bli mer lik stenmaterialet i asfaltblandningen. Om stenmaterial med en ljusare färg har använts kommer färgen att skifta mer efter en tids användning. Nackdelen är att ljusare stenmaterial kan vara dyrare än mörkt.

#### 4.1.4. Anpassning (mesopisk & ekologisk) av ljusets våglängdsfördelning



Våglängdsfördelningen (spektrat av ljusets energi fördelat på olika våglängder/färger) går enklare att kontrollera för LED-belysning än hos traditionella ljuskällor. Exempelvis kan dioder i olika färgspektra användas för att kombinera ihop till olika typer av färger. Detta ger tekniska fördelar som man kan använda för mesopisk och ekologisk anpassning.

##### *Mesopisk anpassning*

Det mänskliga seendet kan beskrivas med termerna fotopiskt, skotopiskt och mesopiskt:

- **Fotopiskt seende** – dagsljusseende, färgseende i dagsljus eller i höga ljuskvantiteter. Detta seende domineras av användningen av tappar i ögats näthinna.
- **Skotopiskt seende** – mörkerseende, under svaga ljusförhållanden och i mörker. Detta seende är baserat på stavar i ögats näthinna, med en topp i seendet vid ca 500 nm.
- **Mesopiskt seende** – skymningsseende, det vill säga hur ögat uppfattar ljus vid cirka 0,3–3 cd/m<sup>2</sup>. Detta seende använder kombinationer av både stavar och tappar.

Fotopiska förutsättningar ligger ofta till grund för standarder för utomhusbelysning och är baserade på seende under välbelysta förhållanden (från 5 cd/m<sup>2</sup> och vid våglängdsfördelningar mellan cirka 380–780 nm). Det är dock det mesopiska seendet som används vid intermediära ljusförhållanden, som vid artificiellt ljus när det är mörker utomhus. Genom anpassning av ljuskällors våglängdsfördelning till att mer likna seendet vid mesopiska förhållanden skulle utomhusbelysningen kunna bli mer optimal (CIE 2010). Till exempel kan lämplig nivå av upplevd ljushet, synbarhet och synskärpa uppnås även vid användning av ljuskällor med högre S/P-kvot men lägre effekt. Syftet med mesopisk anpassning av belysningen är att maximera förutsättningarna för mänskligt seende och samtidigt spara energi genom att anpassa våglängdsfördelning och mängden ljusenergi från ljuskällan.

För att räkna ut mesopiska värden för en belysningsanläggning måste man veta dess fotopiska bakgrundsluminans (så kallad "*adaptation luminance*") och S/P-kvot. Ljuskällor med hög S/P-kvot har vanligtvis en större del av sitt ljus i de kortare våglängderna. Vid kortare våglängder (som vitt eller blått ljus) får man en ökad synbarhet även vid lägre effektnivåer än med exempelvis gult ljus. Generellt gäller att ju högre S/P-kvot desto bättre ljuskälla ur ett mesopiskt designperspektiv. Man kan därför använda S/P-kvoten som en bra indikator på visuell funktion av en ljuskälla.

I dagsläget finns inga angivna normalvärden och gränser för S/P-kvoten för LED och det har visat sig att S/P-kvoten kan variera mellan exempelvis 1,16–2,18 beroende av produkt (Ylinen m.fl. 2011b). Färgtemperatur och färgåtergivningsindex påverkas också av våglängdsfördelningen. Färgtemperaturen är ofta lägre för ljuskällor med låg S/P-kvot. Tyvärr brukar inte tillverkare uppge S/P-kvot, medan färgtemperatur och färgåtergivningsindex brukar anges. Eftersom det finns vissa problem med att använda färgåtergivningsindex på grund av LED-belysningens snäva energitoppar i våglängdsfördelningen (Ylinen m.fl. 2011b) rekommenderas inte att färgåtergivningsindex används som mått på mesopisk anpassning.





### Ekologisk anpassning

För att åstadkomma belysning som inte påverkar känsliga eller skyddade arter i vår natur är det möjligt att göra ekologiska anpassningar av våglängdsfördelningen med LED. Hur detta kan möjliggöras och vilka begränsningar som existerar beskrivs under avsnittet om ekologiska effekter av utomhusbelysning (4.2.1).

#### 4.1.5. Sammanfattning av för- och nackdelar avseende tekniska förutsättningar och möjligheter

Många av de tekniska fördelarna med LED-belysning är kopplade till minskad energikonsumtion då ljuset kan regleras tidsmässigt. Detta medför mindre risk för påverkan på ekologi och människor, men nedsläckning och dimring kan samtidigt upplevas otryggt eller osäkert av människor. Möjligheter att bättre anpassa ljuskällors våglängdsfördelning till människors behov eller för att minska påverkan på vissa arter är en fördel som samtidigt kan leda till negativa konsekvenser.

**Tabell 1.** Sammanfattning av för- och nackdelar avseende tekniska förutsättningar och möjligheter av LED-belysning.

Aspekt	Fördel	Nackdel
Ljusreglering och adaptivt ljus 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minskad energikonsumtion</li> <li>• Minskad ekologisk påverkan</li> <li>• Minskad risk för påverkan på människor, t.ex. ljusföroreningar i sovrumsfönster</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kan upplevas otryggt eller osäkert av människor</li> </ul>
Bibehållningsfaktor 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minskad energikonsumtion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Låga belysningsnivåer i slutet av livslängden</li> </ul>
Interaktion med ytans reflexions-egenskaper eller yttre ljus 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Minskad energikonsumtion</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kräver dyrbar teknik</li> </ul>
Anpassning av ljusets våglängdsfördelning 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesopisk anpassning kan minska energikonsumtion</li> <li>• Ekologisk anpassning minskar ekologisk påverkan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kan leda till obehagligt ljus för människor</li> <li>• Risk för dåligt seende för synskadade</li> <li>• Anpassningar för minskad ekologisk påverkan kan leda till annan ekologisk påverkan</li> </ul>



## 4.2 Dimensionen ekologi och miljö

Detta avsnitt fokuserar på aspekter och metoder som kan vara för- och nackdelar ur ett ekologiskt och miljömässigt hållbarhetsperspektiv, där ekologiska effekter av artificiellt ljus, ljusföroreningar och himlaglim, livscykelanalys, energieffektivitet och rekyleffekter ingår.



Gällande påverkan från ljusföroreningar skiljer man vanligen mellan ekologisk och astronomisk påverkan. Ekologisk påverkan från ljusföroreningar definieras som "artificiellt ljus som ändrar de naturliga mönstren av ljus och mörker i ekosystem" (Rich & Longcore 2006). I denna rapport åtskiljs den ekologiska påverkan (avsnitt 4.2.1) från påverkan på människor av ljusföroreningar (exempelvis upplevelsen av minskad synbarhet av stjärnorna på natthimlen) (avsnitt 4.2.2).

### 4.2.1. Ekologiska effekter av artificiellt ljus av LED



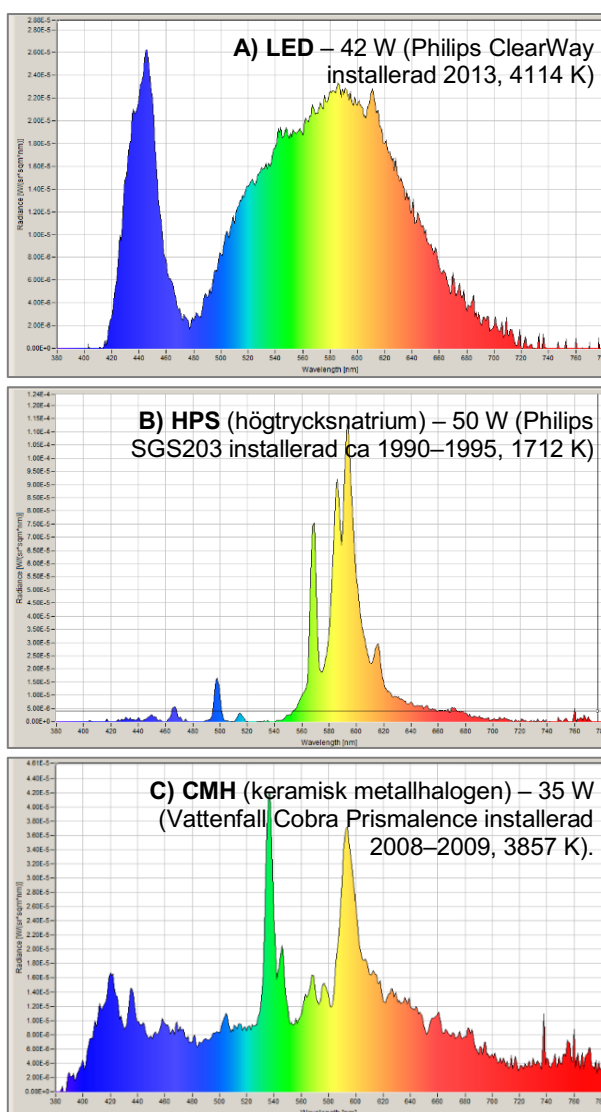
LED-belysning skiljer sig från tidigare använda ljuskällor, som högtrycksnatrium (HPS) eller keramisk metallhalogen (CMH) i och med att våglängds-

fördelningen är bredare och mer liknar dagsljus i sin komposition (Figur 3).

I dagsläget har den vanligaste LED-lampan utomhus toppar i blått och grönt (Elvidge m.fl. 2010). Den bredare våglängdsfördelningen i kombination med att användningen av LED-belysning ökar i vår utomhusmiljö (både offentlig och privat) gör att det finns risker att de ekologiska effekterna av LED kommer att bli mer omfattande än jämfört med de traditionella ljuskällorna.

De flesta djur och andra organismer uppfattar ljus annorlunda än människan, vilket gör det svårt att förutsäga vilka ekologiska effekter som kan uppstå. Människors och djurs seende skiljer sig exempelvis genom att:

- Djur kan se i andra våglängder än människan.
- Vissa djur kan se betydligt bättre i mörker än människor.
- Ljuskänsligheten hos djur för olika våglängder skiljer sig från människans känslighet.
- Många djur har synreceptorer för blått ljus och UV-ljus.
- En del arter har *tapetum lucidum*, ett lager vävnad bakom näthinnan som reflekterar ljus tillbaka och därmed ökar ljuskänsligheten i fotoreceptorerna i ögat.



**Figur 3.** Exempel på våglängdsfördelning uppmätt i fält hos tre ljuskällor (A-C) som visar hur LED-belysningen har en bredare våglängdsfördelning än de andra. Mätningar utförda i Botkyrka oktober 2014 och 2015 med Jeti Specbos 1201 (JETI Technische Instrumente GmbH, Jena, Germany).

Ljus uppfattas således olika och påverkar därmed olika beroende på art. Detta har beskrivits i detalj i rapporten "LED-belysningens effekter på djur och natur med rekommendationer: Fokus på nordiska förhållanden och känsliga arter och grupper" (Jägerbrand 2018). Effekter av LED-belysning på arters fysiologi, beteende och ekologi visar på varierande resultat beroende på vilka arter som studeras.



För insekter handlar belysningens ekologiska påverkan främst om att de attraheras till ljuskällor och då exempelvis upphör med födosök och andra nödvändiga aktiviteter (**Tabell 2**). Många insekter blir brända av lamporna eller tagna av predatorer och uppätta. LED-belysningen kan innebära fördelar för insekterna genom mindre attraktionskraft, men det beror på vilka äldre ljuskällor man jämför med. Exempelvis attraherar kvicksilverlampor insekter mer än vad LED gör, medan LPS attraherar insekter mindre än LED. Studier av insekters attraktion till LED-belysning visar att de kan attraheras dit, men i mindre omfattning än till traditionella ljuskällor. Studierna visade även indikationer på att rött ljus är mindre attraherande för insekterna. För LED-belysning med olika våglängdsfördelning sågs ingen skillnad i attraktion, förutom när våglängderna direkt hade anpassats för att inte matcha de som bin och nattfjärilar kan uppfatta.



Fladdermöss är nattaktiva djur och kan påverkas av belysning på många sätt, beroende på ifall de är ljusstoleranta eller ljusskyende. För dessa djur verkar en övergång från HG till LED minska påverkan, eller åtminstone inte leda till ökad påverkan som vid byte från LPS till LED. Rött ljus (cirka 590–650 nm) verkar inte påverka varken ljusstoleranta eller ljusskyende fladdermöss när man har jämfört med vitt respektive grönt ljus (som påverkar mer) och rött ljus är därför att rekommendera i speciellt känsliga miljöer.



Fåglars dygnsrytm, fysiologi och reproduktion kan påverkas av LED-belysning (Dominoni 2015). Platser av relevans för fåglars överlevnad, som exempelvis häckningsplatser, bör därför inte belysas. Effekterna av belysningen kan påverka fåglarna på okända eller negativa sätt. Studier av talgoxar indikerar att stresspåverkan av grönt ljus är mindre än av vitt och rött ljus. Nattmigrerande fåglar attraheras till ljus vilket kan leda till dödsfall då de blir desorienterade och inte kan flyga iväg bort från ljuskällan.



Fiskar kan reagera olika på ljus beroende på arternas ekologi, visuella system och habitat. Deras beteende kan påverkas redan vid mycket låga ljusintensiteter. Detta betyder att det är svårt att säga något generellt om LED-belysningens effekter på olika fiskarter. Det har visat sig att fiskar kan ha hög känslighet för även små ljusmängder i vattnet. Det finns också en potentiell risk för påverkan av LED-belysning på vissa arters möjlighet till överlevnad eftersom predationen kan förändras när predatorerna ser bytet bättre med hjälp av det artificiella ljuset.



Växter som är exponerade för 10–15 lux i nivå med markytan kan påverkas av LED-belysning. Detta kan i sin tur även påverka de insekter som lever på växterna. Det verkar troligt att LED-belysning påverkar träd på samma sätt som andra typer av ljuskällor har visat sig påverka dem (förändringar i lövsprickning och i lövfällning på hösten).



För övriga organismer så visar studier att plankton kan uppvisa positiv fototaxis (det vill säga röra sig i riktning mot ljuskällan) redan vid extremt låga nivåer av ljus. Det har även visats att bottenfaunans och bottenlevande organismers artsammansättning påverkas vid sådana belysningsstyrkor som förekommer när utomhusbelysning används i närheten av vatten.







Det saknas dock studier av LED-belysningens effekter på många arter, exempelvis större däggdjur, groddjur och många fågelarter. LED-belysning har många tekniska fördelar jämfört med annan belysning och erbjuder därför bra möjligheter att reducera den ekologiska påverkan. Åtgärder som reducerar spilljus och ljusföroreningar från belysningen är de som har störst potential att minimera ekologisk påverkan (Jägerbrand 2018). Genom att begränsa ljusets

rumsliga spridning från ljuskällan minskas både den direkta påverkan och den indirekta (av himlaglim och av vitt ljus på seendet samt icke-visuellt ljus). Begränsningar i ljusets spridning minskar risken att aktivera dagsljusseendet hos arter som har både fotopisk och skotopisk syn. Samtidigt minskas påverkan på nattaktiva arter, eftersom området som är belyst blir mindre. Mängden blått ljus i LED-belysning utomhus bör minskas eftersom det är väl känt att blått ljus kan påverka många arters dygnsrytm (detta gäller speciellt våglängder <500 nm).

LED-belysningen erbjuder bra tekniska möjligheter för att använda nattsläckning och nattreduktion, vilket leder till mindre ekologisk påverkan och samtidigt minskad energikonsumtion.

För att undvika att skyddade arter påverkas av LED-belysning utomhus bör striktare riktlinjer användas där så är relevant. Detta för att undvika påverkan som strider mot miljölagstiftningen och där användning av artificiellt ljus kan påverka överlevnaden för arter som bör skyddas.

**Tabell 2.** Översikt över LED-belysningens ekologiska för- och nackdelar för olika organismgrupper, baserat på Jägerbrand (2018).

Aspekt	Fördel	Nackdel
Insekter 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Attraktion till belysningen sker i mindre omfattning med LED än med äldre ljuskällor.</li> <li>• Anpassning av våglängdsfördelningen till bins och nattfjärilars seende ger minskad attraktion till belysningen.</li> <li>• Rött ljus kan ha mindre attraherande effekt än andra våglängder.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LED-belysning kan attrahera insekter, vilket kan leda till nedgångar i insektspopulationerna</li> </ul>
Fladdermöss 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Attraktion sker i mindre omfattning än med äldre ljuskällor (HG).</li> <li>• Röd LED (ljus i våglängder om ca 590–650 nm) verkar inte påverka vare sig ljusoleranta eller ljusskyende fladdermöss</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ljusskyende fladdermusarter undviker ljus, även från LED.</li> </ul>
Fåglar 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Studier av vuxna talgoxar indikerar att stresspåverkan av grönt ljus är mindre än av vitt och rött ljus, vilket eventuellt kan möjliggöra anpassningar i våglängdsfördelningen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dygnsrytm, fysiologi och reproduktion kan påverkas.</li> <li>• Nattmigrerande arter kan attraheras av ljus, vilket kan leda till fågeldöd.</li> </ul>
Fisk 		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fiskar kan ha hög känslighet för små ljusmängder i vattnet.</li> <li>• Risk för påverkan av LED-belysning på vissa arters överlevnad, eftersom predationen kan förändras.</li> </ul>
Träd & växter 		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Träds lövsprickning och lövfällning kan påverkas, samt det kan finnas indirekta effekter på exempelvis insekter</li> </ul>
Övriga 		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plankton kan ha positiv fototaxis (röra sig mot ljuset) vid extremt låga ljusnivåer.</li> <li>• Påverkan på artsammansättningen av bottenfauna och bottenlevande organismer sker vid belysningsstyrkor som kan förekomma när utomhusbelysning används i närheten av vatten.</li> </ul>

#### 4.2.2. Ljusföroreningar och himlaglim



Ljusföroreningar som ord används generellt för att referera till en önskad effekt av artificiellt ljus. Detta kan inkludera: himlaglim, bländning, ljusstörning, spilljus eller minskad synbarhet nattetid. I detta avsnitt omfattar ljusföroreningar (uppåtriktat) ljus som strålar upp i himlen, himlaglim och förminskad synbarhet av natthimlen och dess stjärnor.

Ljusföroreningar uppstår när önskat artificiellt ljus gör att natthimlens luminans ökar i ljusstyrka, vilket leder till att synligheten av himlen, stjärnorna och andra himlakroppar minskar.

Himlaglim är natthimlens diffusa luminans (ofta orsakad av ljusföroreningar på himlen ovanför belysta städer), vilket gör att stjärnorna inte längre syns. Det är oberoende av mån- och stjärnljus. Ett annat ord för himlaglim är "himmelströljus". Himlaglim uppstår när ljuset sprids från jorden upp genom atmosfären och sedan reflekteras tillbaka till jordens yta via damm, vatten och gasmolekyler. Himlens ökade ljushet leder då till minskad synbarhet av himlen, stjärnorna och andra astronomiska kroppar. Belysningsstyrkan hos himlaglim varierar utifrån en rad olika faktorer såsom avstånd, väder, andel reflekterande ljus, ljuskaraktär, etc.

Våglängdsfördelningen hos den LED-belysning som används idag är mer dominerande i de blå våglängderna. Dessa våglängder sprids och reflekteras mer i atmosfären än exempelvis gult ljus. Därför har det diskuterats att himlaglim kan öka med 10–20 % när HPS-lampor ersätts med LED (Bierman 2012). Simuleringsmodeller visar dock att ett byte till LED-belysning generellt kan minska himlaglimmet, men att en rad olika egenskaper spelar in och att det därför är svårt att generalisera till att säga att LED-belysning minskar eller ökar himlaglim (Kinzey m.fl. 2017).

En generell ökning av himlaglim kan ske ifall fler ljuskällor installeras eller om LED-belysning ersätter traditionell LPS eller HPS utan att effekten reduceras.

För de flesta typer av utomhusbelysning som orsakar himlaglim saknas idag riktlinjer för att minimera ljusföroreningarna. Detta gäller exempelvis belysning på:

- sportanläggningar
- kultur- eller arvobjekt (t.ex. kyrkor, vattentorn och monument)
- transportknutpunkter, broar
- flygplatser
- parkeringsplatser
- reklamskyltar
- höga byggnader och kommersiella, industriella byggnader
- arkitektonisk belysning, estetisk belysning och olika typer av bostadsbelysning.

Inomhusbelysning kan också bidra till ljusföroreningar genom att reflekteras uppåt (t.ex. från köpcentra eller centrala gator).

Högre energieffektivitet, nattreduktion, dimring, begränsad ljusspridning horisontellt och vertikalt samt möjligheten att kontrollera våglängder som används i LED-belysningen visar alla på möjligheter att åstadkomma minskade ljusföroreningar och himlaglim.

#### 4.2.3. LCA (livscykelanalys)



LCA är en metod för att åstadkomma en helhetsbild av total miljöpåverkan under en produkts livscykel. Livscykeln omfattar utvinning av råvaror, tillverkningsprocess, användning, avfallshantering samt transporter och energiåtgång i alla led.

Sett ur ett livscykelperspektiv medför LED-belysning många fördelar då den har högt ljusutbyte (lumen/W) och lång livslängd i timmar. När ljusutbytet är högre innebär det att en mindre mängd energi krävs för att skapa samma mängd ljus. Detta innebär minskad energikonsumtion och mindre utsläpp av koldioxid.

Nackdelar med LED-belysningens livscykel är att den högsta miljöpåverkan i tillverkningsprocessen är kopplad till delar med aluminium, elektroniken och pack-materialet. När det gäller miljöpåverkan från extraktion av sällsynta material (sällsynta jordartsmetaller som indium, yttrium och cerium) som används vid tillverkning saknas ofta tillförlitlig information, varför man kan göra bedömningen att det förmodligen finns en miljöpåverkan, men att denna inte har undersökts tillräckligt (Jägerbrand 2015).

Avfallsmaterial av LED-lampor har bedömts i USA genom utlakningstest, vilket avslöjade höga nivåer av till exempel koppar, bly, nickel och silver (Lim m.fl. 2013). Koncentrationerna i LED-lamporna visade sig dock vara relativt lika innehållet i andra typer av elektronik, såsom exempelvis mobiltelefoner (Tuenge m.fl. 2013).

#### 4.2.4. Energieffektivitet (och rekyleffekter)



Ersättning av gamla traditionella ljuskällor med LED leder generellt till energibesparingar på grund av högre ljusutbyte (lumen/W), lägre energiförbrukning och längre livslängd hos LED. På grund av att LED består av enskilda dioder är dock den sammanvägda energieffektiviteten beroende av att lamporna lyckas lysa upp tillräckligt stora ytor. Detta eftersom man annars måste använda fler belysningspunkter för att uppnå den belysningsstyrka eller luminans man eftersträvar. Det är därför viktigt för att inkludera hur stor yta som belyses för att få en korrekt bild av energieffektiviteten i jämförelse med andra ljuskällor. Även stolphöjd och stolpavstånd har betydelse eftersom de kan medföra störande bländning fastän anläggningen anses vara mycket energieffektiv.

Inom området utomhusbelysning finns olika gällande lagstiftningar och krav avseende t.ex. energieffektivitet. Det finns även krav och rekommendationer från Trafikverket och SKL (Sveriges Kommuner och Landsting) för utomhusbelysning på vägar (Trafikverket & SKL, 2015a, b). Jämförelsevis så är kraven på inomhusbelysning betydligt mer utvecklade än för utomhusbelysningen. Exempelvis finns det föreslagna nivåer för hur mycket effekt som inomhusbelysningen bör ha per kvadratmeter yta.

I de flesta uträkningar av LCC (livscykelkostnader), kostnader och energiåtgång tas ingen hänsyn till arean som belysningen är tänkt att lysa upp. Man utgår oftast från armatureffekt (inklusive driftförluster och systemeffekt) det vill säga kWh/år. Beräkningar baseras på energikostnad per år eller per livslängd som sedan konverteras till CO<sub>2</sub>-ekvivalenter enligt schablonberäkningar. Det har framförts förslag på hur man ska kunna göra mer korrekta beräkningar och uppskattningar av energieffektivitet på vägsträckor genom att ta med alla tre variablerna: effekt, belysningsstyrka/luminans och arean av den belysta ytan (Pracki 2011).

Enligt standarden EN 13201-5 (Vägbelysning – Del 5: Metoder för utvärdering av energiprestandan) ska man använda indikatorerna AECI (Wh/m<sup>2</sup>) och PDI (W/lux/m<sup>2</sup>) för beräkningar av vägars energiprestanda (CEN 2015), se Faktaruta 3.



Det hade varit lämpligt om den ”korrekta” energieffektiviteten av en anläggning (det vill säga baserat på effekt, styrka/luminans och belyst area) användes i beräkningar till grund för investeringsbeslut, livscykelkostnader och i utvärderingar av befintliga anläggningar. På så vis fås en mer korrekt bild av den verkliga energieffektiviteten och framtida förbättringspotential.

#### Rekyleffekter

Rekyleffekter är skillnaden mellan den förväntade eller beräknade energibesparingen och den verkliga energibesparingen för olika typer av åtgärder. Om rekyleffekterna inte tas med i beräkningar kan det motverka politiska åtgärder så att mål som är relaterade till energi och utsläpp inte uppnås eller blir försenade.

Trender av antal ljuskällor och energikonsumtion av utomhusbelysning har kunnat studeras under långa tidsserier. De visar att det finns stora rekyleffekter, och även ”backfire-effekter” (att den totala energianvändningen ökar istället för minskar efter införd åtgärd) över flera århundraden (Jägerbrand m.fl. 2014). Historiskt har energieffektiviteten hos artificiella ljuskällor visat sig leda till ökat ljusutbyte, lägre priser och en högre efterfrågan av belysning (Saunders & Tsao 2012; Tsao m.fl. 2010). Detta beror på att när priserna för den nya tekniken sjunker så ökar efterfrågan. En åtgärd eller riktlinje om ökad energieffektivisering leder därför till ökad energikonsumtion eller till att andelen sparad energi överskattas.

Exempelvis har utomhusbelysningen i Storbritannien kontinuerligt ökat mellan 1920–1996. Det har medfört 30 gångers ökning i energiförbrukning från utomhusbelysningen och en ökning i effektivitet med 20 gånger (Herring 1999). Antalet kilometer väg ökade dock enbart med 50 % under samma tidsperiod.

Rekyleffekterna uppkommer i direkt samband med de teknologiska revolutioner som har skett under de senaste seklen. Det är möjligt att försäljningen av utomhusbelysning med LED håller på att plana ut nu, vilket skulle kunna motverka framtida rekyleffekter.

#### 4.2.5. Sammanfattning av för- och nackdelar avseende ekologi och miljö

Många miljömässiga fördelar uppkommer av tekniken hos LED-belysningen som möjliggör att kunna reducera och kontrollera ljuset över tid och rum. Sådana anpassningar medför minskningar av ekologiska effekter, ljusföroreningar och negativ miljöpåverkan i livscykeln, samt leder till minskad energiförbrukning och klimatpåverkan (Tabell 3).

Samtidigt finns nackdelar kopplade till LED-belysningen. Dels till ökad användning i tid och rum, dels till den breda våglängdsbredden med toppar i blått, vilket kan påverka fler arter, skyddade arter eller känsliga arter och habitat, samt innebär risk för påverkan på ekosystem. LED-belysningens vita, dagsljusliknande artificiella ljus i kombination med ökad användning kan leda till oönskade effekter på naturen och att himlaglim ökar i omfattning. Livscykelanalyser (LCA) visar att det finns nackdelar kopplade till de metaller som används i LED-belysningen.



#### FAKTARUTA 3

##### Anläggningens energieffektivitet

AECI (Annual Energy Consumption Indicator):





- Effekt (W)
- Brinntid per år (timmar per år)
- Area (m<sup>2</sup>)

PDI (Power Density Indicator):

- Effekt (W)
- Medelbelysningsstyrka (lux)
- Area (m<sup>2</sup>)



**Tabell 3.** Sammanfattning av LED-belysningens för- och nackdelar avseende miljö och ekologi.

Aspekt	Fördel	Nackdel
Ekologiska effekter 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nattreduktion och dimring möjlig</li> <li>• Begränsning av ljusets spridning (horisontellt/vertikalt) möjlig</li> <li>• Anpassning av ljusets våglängder möjligt för att undvika ekologisk påverkan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Blå-vit baserad LED kan leda till ökad ekologisk påverkan (på skyddade arter, i känsliga/skyddade habitat, och ekosystemeffekter)</li> </ul>
Ljusföroreningar och himlaglim 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nattreduktion och dimring möjlig</li> <li>• Begränsning av ljusets spridning (horisontellt/vertikalt) möjlig</li> <li>• Kontrollera våglängder möjligt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ljus med bred våglängdsfördelning kan leda till ökning i himlaglim under vissa förutsättningar</li> </ul>
LCA 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ökat ljusutbyte</li> <li>• Minskad energikonsumtion</li> <li>• Minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp</li> <li>• Längre livslängd</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Miljöpåverkan pga. aluminiuminnehåll</li> <li>• Jordartsmetaller</li> <li>• Läckage av metaller vid avfallshantering</li> <li>• Avfallshantering/återvinning</li> </ul>
Energieffektivitet (och rekyleffekter) 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ökat ljusutbyte</li> <li>• Minskad energikonsumtion</li> <li>• Minskade CO<sub>2</sub>-utsläpp</li> <li>• Längre livslängd</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bländning (på grund av justeringar i stolphöjd eller stolpavstånd)</li> <li>• Risk att utveckling av ny teknik leder till ökad användning</li> </ul>

## 4.3 Ekonomiska dimensioner

Detta avsnitt fokuserar på aspekter och metoder som kan vara för- och nackdelar ur ett ekonomiskt hållbarhetsperspektiv, där livscykelkostnad, återbetalningstid, ekonomisk tillväxt och kostnads-nyttoanalys ingår.



### 4.3.1. LCC (livscykelkostnad)



Kostnaden för LED är oftast lägre än för andra ljuskällor sett ur ett livscykelkostnadsperspektiv. Det beror på att LED har betydligt längre livslängd, högre ljusutbyte (lumen/W) och ofta kräver mindre underhåll (byte av lampor eller rengöring från smuts) än andra typer av belysning. De ekonomiska fördelarna av att använda LED är således ofta tydliga, men de kan variera i storlek beroende på exempelvis användningsområde, tid för användning och produktkvalitet.

LCC-analys är en effektiv beräkningsmetod för att jämföra den totala kostnaden för belysningsystem och identifiera det mest kostnadseffektiva systemet (Faktaruta 4). Men det kan vara svårt att beräkna korrekt på grund av den höga utvecklingstakten och osäkerheter kring till exempel, kostnader för lampbyte och rengöring samt olika typer av underhållskostnader (t.ex. Ylinen m.fl. 2011b). Att få verifierade och kontrollerade uppgifter från tillverkarna om livslängden kan också svårt.

För LED-belysning är den initiala kostnaden för att köpa ett nytt system ganska hög. Detta gör det ännu viktigare att genomföra en LCC, eftersom cirka 90 % av alla driftskostnader hör till energiförbrukningen (De Almeida m.fl. 2014).

En bra design av armaturer och belysningsstolpar kommer att minska underhållskostnaderna.

Exempelvis kommer en armatur som lätt öppnas utan verktyg eller som har en lampa som är enkel att byta att minska den nedlagda arbetstiden i framtiden. Armaturer med IP65 eller högre kräver mindre underhåll, eftersom de är mer motståndskraftiga mot damm och vatten. Lyktstolpar av galvaniserat stål har lägre totala kostnader än målade stålstolpar (Kostic & Djokic 2009).

Fördelar med LCC är att den totala kostnaden för belysningen är känd, medan osäkerheter kan innebära nackdelar som man missar i LCC:n. Exempelvis kan det finnas osäkerheter avseende livslängd och underhåll, vilka båda kan ha stor påverkan på LCC.

### 4.3.2. Återbetalningstid



Återbetalningstid handlar om hur snart en åtgärd kan betala tillbaka investeringskostnaden genom de besparingar som åtgärden medför. För belysningsystem kan detta beräknas på flera sätt, se exempel i Faktaruta 5.

Investeringskostnaderna för ny belysning omfattar i allmänhet inköp av lampor och armaturer, styrsystem och stolpar samt installationskostnader. LED-belysning har generellt en längre livslängd än mer traditionella ljuskällor, vilket innebär en klar fördel eftersom det minskar



#### FAKTARUTA 4

##### Livscykelkostnad (LCC)

Beräknas enligt:

**$LCC = C_b + C_m + C_e + C_r - RV$** , där:

$C_b$  (Cost to buy) = kostnad för inköp (inköpspriset för lampan och/eller systemet och installationskostnader)

$C_m$  (Total maintenance cost) = totala underhållskostnaderna (reparation och rengöring av armaturen för att hålla den i funktionsdugligt skick)

$C_e$  (Cost of energy) = energikostnad för hela livslängden

$C_r$  (Cost of replacing) = kostnad för byte av lampa

$RV$  (Residual Value) = restvärde



#### FAKTARUTA 5

##### Återbetalningstid (SPB)

Kan beräknas enligt:

**$SPB$  (simple payback period) =  $C_i / (S / t)$** , där:

$C_i$  = investeringskostnaden

$S$  = besparingar

återbetalningstiden. En förenklad beräkning av återbetalningstid kan användas som investeringskalkyl (med eller utan kalkylränta).

#### 4.3.3. Ekonomisk tillväxt

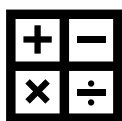


Ekonomisk aktivitet, till exempel bruttonationalprodukten (BNP), korrelerar med mängden ljus och ljusföroreningar i ett område eller en region (Gallaway m.fl. 2010). Mängden utomhusbelysning kan alltså ses som ett direkt mått på ekonomiskt välmående eller ekonomisk tillväxt. Det verkar som att när människor uppnår ett högre ekonomiskt välmående så prioriterar de att skaffa utomhusbelysning, vilket leder till fördelar för både individer och samhället (Boyce 2019). För individerna leder utomhusbelysningen till ökad säkerhet när de rör sig utomhus och även en ökad upplevd trygghet. Utomhusbelysningen ökar även användningen av utomhusmiljöer under dygnets mörka timmar vilket kan vara ekonomiskt gynnsamt då behovet av tjänster och service ökar.

Det finns dock oklarheter avseende sambandet mellan ekonomisk tillväxt över områden såsom städer eller regioner och de orsakssamband som finns med belysningen, samt oklarheter avseende de sociala fördelarna då dessa oftast inte blivit monetärt skattade.

Eftersom LED har högre ljusutbyte än traditionella ljuskällor finns möjligheter att byta ut befintliga ineffektiva eller uttjänta ljuskällor och på så vis spara energi och pengar.

#### 4.3.4. Kostnads-nyttoanalys



Belysningsinstallationer innebär ofta samhällsnyttor, men även kostnader av investeringarna. Detta är särskilt relevant vid exempelvis infrastruktursatsningar och vägbelysning. Vägbelysningen leder till ett lägre antal dödsolyckor med fordon och oskyddade trafikanter i mörker (Høye m.fl. 2018). Vägbelysningen verkar ha större effekt på olyckor med fotgängare än olyckor med motorfordon, och effekten av vägbelysningen är högre i korsningar än mellan korsningar inom tätbebyggt område (Høye m.fl. 2018).

Kostnadsberäkningar av olyckor och skador kan göras ifall priset på ett liv eller skador bestäms (det "statistiska värdet" av liv och skador), om antalet olyckor i förhållande till trafikflödet för vald vägsträcka är känt och om övriga relevanta effektsamband som bör ingå är kända. Kostnaderna kan sedan användas för att beräkna samhällsnytta och besparingar med respektive utan vägbelysning för en väg med en viss mängd trafik. Detta kan sedan jämföras med kostnaderna för belysningens installation och underhåll. Sådana lönsamhetsberäkningar är vanligtvis baserade på nationell statistik och används av Trafikverket i transportplaneringen (Trafikverket 2018). I dagsläget används en enklare modell för vägbelysning och istället för att bedöma olycksrisk för vald vägsträcka sätts miniminivåer för belysningen (belysningsstyrka eller luminans samt jämnhet).



I och med att LED-belysning har högt ljusflöde, går att reglera och leder till besparingar (i energi och kostnader ur ett livscykelperspektiv) finns anledning att vidareutveckla kostnads-nyttoanalysen för utomhus- och vägbelysningen. Mer optimala effektsamband kan då fås mellan olycksrisk, skadekonsekvenser och samhällsnytta av belysningen. Detta är särskilt relevant med tanke på att även fordonsbelysningen utvecklas och får längre och längre räckvidd och kvalitet.





För områden av hög social och kommersiell relevans skulle man kunna göra ingående beräkningar av belysningens förekomst och olika nivåer av belysningsstyrka och effekter. På så

vis skulle ett bättre underlag fås avseende de ekonomiska fördelarna med belysning på exempelvis torg, köpcentra, bostadsområden eller parkeringsplatser.

#### 4.3.5. Sammanfattning av för- och nackdelar avseende ekonomiska dimensioner

LED-belysningens tekniska fördelar, såsom större ljusutbyte och längre livslängd, leder till kostnadsbesparingar i LCC och kortare återbetalningstid (se Tabell 4). Avseende ekonomisk tillväxt och kostnads-nyttoanalys finns en del osäkerheter, men exempelvis kan byte från uttjänta ljuskällor till LED med längre livslängd och lägre energikonsumtion leda till kostnadsbesparingar.

Tabell 4. Sammanfattning av LED-belysningens för- och nackdelar avseende ekonomi.

Aspekt	Fördel	Nackdel
LCC 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Längre livslängd</li> <li>Mindre underhållskostnader</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>LCC beräkningen är beroende av livslängd och andra faktorer som kan vara lite osäkra att få korrekt information om för LED.</li> </ul>
Återbetalningstid 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Relativt kort återbetalningstid eftersom livslängden är lång</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beroende av livslängd som ibland är osäker.</li> </ul>
Ekonomisk tillväxt 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lägre kostnader med ny belysning</li> <li>Korrelation ekonomisk tillväxt och användning av utomhusbelysning</li> <li>Ökad användning av utomhusmiljöer och därmed ökad efterfrågan på service och tjänster</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ekonomisk tillväxt som leder till ökad användning och ökad energikonsumtion</li> </ul>
Kostnads-nyttoanalys 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kostnadsnyttan av LED-belysning går att uppskatta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>De sociala fördelarna och nyttan är relativt utforskade</li> </ul>

## 4.4 Sociala dimensioner

*Detta avsnitt fokuserar på aspekter och metoder som kan vara för- och nackdelar ur ett socialt hållbarhetsperspektiv, där trafiksäkerhet, hälsa och livskvalitet ingår. De sociala aspekterna diskuteras utifrån LED-belysningen och vilka för- och nackdelar som den innebär.*



### 4.4.1. Trafiksäkerhet



Vägbelysning bidrar till att minska antalet dödsolyckor och antalet svårt skadade i olyckor som sker i mörker. Vid användning av LED-belysning längs vägarna upprätthålls fortfarande samma standard som med traditionella ljuskällor, varför det eventuellt inte blir så stor skillnad i belysningsstyrka, luminans och jämnhet.

LED är energieffektiv belysning med lång livslängd och innebär ett minskat behov av drift- och underhållsåtgärder som i sig utgör en trafiksäkerhetsrisk.

En övergång till LED-belysning på vägar har hög potential att spara energi och förbättra färgkontrast och synlighet genom det bredare våglängdsspektrumet hos LED. Det är en fördel att byta ut HPS och LPS mot LED eftersom synbarheten blir högre med dagsljusliknande ljus.

Regleringsscheman och adaptiva, smarta belysningslösningar kan implementeras på många platser utan någon risk för påverkan på trafiksäkerheten. Särskilt i områden där det inte är någon trafik under specifika tider. En ännu bättre anpassning vore att justera ljusmängden i relation till antalet fordon som passerar per timma, för att få en direktstyrd anpassning till trafikmängd och risk för trafikolyckor. För vägar med mycket låg trafiknivå under vissa timmar är det inte alltid nödvändigt att ha full belysning. Dock går sådana vägar ibland parallellt med gång- och cykelvägar och då behöver specialanpassningar göras. Eftersom olyckor med oskyddade trafikanter är överrepresenterade vid trafikolyckor är det viktigt att utreda hur användningen av vägen ser ut innan man genomför några minskningar av belysningsnivåerna i tid och rum.

Bländning kan indirekt vara orsaken till olyckor och är därmed en negativ konsekvens direkt förknippad med LED. Lysdioderna har nämligen en mycket fokuserad och stark ljusutstrålning jämfört med mer traditionella ljuskällor. Risken för att de skall uppfattas som bländande är därför hög. Användningen av LED i våra transportsystem kan således öka risken för bländning.

Med mer avancerad LED-optik kan ljusets jämnhet över vägytan justeras i allt högre grad och bli mer optimal sett till de krav som ställs. Det innebär att det i planeringen sker en optimering mot högre jämnhet, medan stolpavstånd och stolphöjd är mer flexibelt. När anläggningar optimeras mot högre energieffektivitet, samtidigt som kravet på jämnhet kvarstår, sker en automatisk utveckling mot glesare stolpavstånd och högre stolpar. Detta ökar i sin tur risken för bländning, och påverkar även trygghetsupplevelsen negativt. Detta beskrivs under avsnittet livskvalité (4.4.3).

Med LED-belysning och mer avancerad optik kan ljuset bättre riktas mot den yta som avses att belysas. På så vis kan spilljus och ljus på omkringliggande ytor reduceras. Ifall de närliggande ytorna utgörs av gång- och cykelvägar eller bostadsgator kan effekten bli att oskyddade trafikanter blir svårare för motorförare att se i tid.

### 4.4.2. Hälsa



Hälsaaspekter av relevans att diskutera utifrån användning av LED-belysning är dels risk för skador på näthinnan, effekter av flimmer, icke-visuella effekter och påverkan från oönskat ljus inomhus, dels positiva effekter i form av ökad tillgänglighet och rörelse.

LED-belysningens dioder kan utgöra en risk för fotokemisk skada på näthinnan på grund av strålningsexponering av blått och violett ljus. För belysning utomhus är det dock mycket låg risk

för denna typ av skador eftersom avståndet till ljuskällan är mycket stort (Martinsons & Zissis 2014).

Flimmer kan ha hälsoeffekter i form av huvudvärk, migrän och yrsel. LED-belysning har generellt högre förekomst av flimmer än andra ljuskällor. Det är dock oklart huruvida eventuellt flimmer av utomhusbelysning kan ha effekter på människans hälsa.

Icke-visuella biologiska effekter av artificiellt ljus kan medföra en påverkan på människans dygnsrytm. Lite förenklat är ändringar i dygnsrytm kopplat till flera sjukdomar, som diabetes, fetma och cancer. De icke-visuella effekterna på dygnsrytmen beror av belysningsstyrka, exponeringstid, tidpunkt för exponering och vilket våglängdsspektra ljuset har. I en genomgång av potentiella hälsoeffekter av SSL-belysning konstaterar Martinsons och Zissis (2014) att den nya tekniken sannolikt inte kommer att medföra en mer negativ påverkan på grund av icke-visuella effekter än äldre belysning. Ökad användning av LED och andra SSL-produkter kan dock öka den totala ljusexponeringen för människor, vilket indirekt kan leda till ökade icke-visuella effekter.

Installationer av LED-belysning utomhus som leder till oönskat ljus inomhus, exempelvis i sovrum, innebär en tydlig negativ hälsoeffekt. Eftersom LED-belysningen kan skapa skarpa ljusstrålar från de enskilda dioderna kan sådant ljus upplevas mycket störande. Så pass störande att det kan blända och även påverka dygnsrytmen för de boende som exponeras för ljuset. Principiellt bör därför artificiellt ljus utomhus inte anordnas på så vis att det utsätter människor inomhus för bländning eller leder till sömnstörningar.

Det är oklart i vilken mån utomhusbelysningen har en signifikant och evidens-baserad effekt på människor i termer av ökad vakenhet eller förändrad dygnsrytm. Det är däremot troligt att förekomsten av belysta miljöer utomhus kan stimulera människor till ett mer aktivt liv genom ökad tillgänglighet och fler möjligheter att röra sig. Detta gäller dock under vissa förutsättningar, exempelvis att miljöerna upplevs som trygga och säkra. LED-belysning innebär bättre möjligheter att reglera ljuset under dygnet och kan användas för att skapa mer attraktiva och hälsofrämjande miljöer, utan att skapa negativa effekter i termer av ljusföroreningar. Detta gäller exempelvis utegym, fotbollsplaner och motionsspår.

#### 4.4.3. Livskvalité



Inom området livskvalité och LED ryms en rad olika aspekter som är kopplade till människans välmående, exempelvis socialt välbefinnande, tillgänglighet, kriminalitet, upplevelse och säkerhet.

En övergång till LED från traditionella ljuskällor som HPS kan leda till förändrad upplevelse av utomhusmiljön. LED innehåller generellt mer blå-vitt ljus, vilket kan uppfattas som kallare och ödsligare än gult ljus. Om man däremot jämför LED med traditionella kvicksilverlampor och CMH är skillnaden mindre. Då kan det vara svårt att notera signifikanta skillnader i färgtemperaturen, speciellt före respektive efter ett byte. Det är därför troligt att LED-belysningen upplevs annorlunda än andra ljuskällor, men huruvida det är en fördel eller nackdel är svårt att avgöra. Det beror på vilken ljuskälla som användes tidigare och hur miljön i övrigt upplevdes och såg ut.

Användning av ljusreglering kan medföra både nackdelar och fördelar. LED medför möjligheter att använda betydligt lägre belysningsstyrkor i utomhusmiljön och att belysningsstyrkan kan justeras under dygnets timmar på olika sätt. Principiellt innebär detta många fördelar då energikonsumtion och miljöpåverkan kan minskas, men det innebär även en risk att upplevelsen av miljön förändras. För de flesta individer innebär en högre belysningsstyrka en starkare positiv upplevelse av utomhusmiljön. Ljusregleringar riskerar därmed att uppfattas som mindre positiva, trots att det är åtgärder som innebär minskat avtryck i miljön.



För äldre krävs ofta hänsyn till att det finns behov av en högre belysningsstyrka än vad som normalt krävs, då denna grupp har en försämrad syn (p.g.a. att ögonen åldras). Ljusregleringar i tid och rum kan därför leda till att ljusbehoven inte blir tillräckligt uppfyllda för att äldre. Även synskadade kan ha behov av högre belysningsstyrka eller anpassad belysning för att de ska kunna transportera sig säkert och tryggt. En annan nackdel med ljusreglering är att människor kan uppfatta själva förändringarna i ljuset som negativa och störande. Ljusreglering av större vägar kan även påverka upplevelsen i bostadsområden som ligger en bit ifrån.

Antalet brott kan minskas av förbättrad belysning. Bättre övervakning av potentiella förövare (genom ökad synbarhet och indirekt av ett ökat antal personer i utemiljön) kan ha en brottsförebyggande effekt (Farrington & Welsh 2007). Indirekt kan förbättrad belysning även leda till minskad brottslighet genom ökade investeringar i renovering, vilket ökar känslan av stolthet och trygghet bland invånarna. Social trygghet och kontroll ökar som en indirekt effekt av förbättringarna i utomhusbelysning, vilket kan leda till lägre kriminalitet både dag och natt (Farrington & Welsh 2007). Ljusreglering och automatiska sensorer kan leda till ökad synbarhet vid kritiska tidpunkter när risken för brott är större. På så vis kan LED-belysningen leda till färre brott.

Belysningens samspel med omgivande miljö kan ofta leda till en ökad trygghetskänsla. LED-belysningens lampor kan fysiskt vara mycket små. De utgör därmed relativt flexibla ljuskällor som passar bra att använda till att samspela med övrig belysning på olika sätt och i olika miljöer. Exempelvis kan punktbelysning och effektbelysning användas för att förstärka upplevelse av rum i utemiljön och även skapa bättre orientering för brukarna. Samtidigt är det viktigt att anpassa belysningen i tid och rum så man undviker onödig ekologisk påverkan i omgivningen, exempelvis på skyddade eller ljuskänsliga arter (se avsnitt 4.2.1).

LED underlättar åtgärder för att åstadkomma bättre tillgänglighet och jämställdhet. LED-belysningens användningsmöjligheter är nästintill obegränsade i termer av färgtemperatur, tidsreglering och rumsfördelning. Här är det snarare så att en prioritering behöver göras för att inte åstadkomma attraktiv belysning där miljön i sig egentligen är otrygg. Det gäller platser med risk för att skada sig eller hamna i instängda områden där man känner sig hotad, trots optimal belysning. Exempelvis områden i parker och på höjder som är olämpliga att vistas i när det är mörkt på grund av stor risk att ramla (speciellt vintertid). Instängda områden eller återvändsgränder där man hamnar i trånga lägen är inte heller optimala att belysa för ökad trygghet.

Åtgärder för ökad energieffektivitet hos LED-belysningen riskerar att leda till glesare stolpavstånd och högre stolphöjder. Högre stolphöjd kan påverka upplevelsen negativt, samtidigt som högre effektnivåer på LED-belysningen leder till ökad risk för bländning. Bländning är en personlig upplevelse av att ljuskällans styrka är för hög, så att det blir störande att vistas i miljöer med sådan belysning. Exempelvis kan bländning från LED på höga stolpar göra att blicken söker sig till marken för att slippa obehaget av det starka ljuset. Då får man inte samma möjlighet att söka av omgivningen för orientering, identifiera ojämnheter i underlaget som kan leda till snubbel och fall, och svårare att skanna av de personer man möter för att försäkra sig om att man är trygg. Sammantaget leder de höga stolparna och bländningen till att miljön upplevs som obehaglig. Det är oklart ifall sådana miljöer går att åtgärda med hjälp av fler ljuskällor, exempelvis belysningspunkter på pollare eller lägre höjd. Då finns det istället en risk att de leder till än mer förvirring i ljusmiljön. Användningen av LED-belysning under sådana förhållanden riskerar att leda till minskad tillgänglighet, eller att oskyddade trafikanter använder alternativa vägar för att ta sig fram. LED-belysning på höga stolpar som även har bländningseffekter innebär dessutom att det blir svårare att samspela med andra trafikanter, vilket kan leda till påkörningsolyckor.

Ytterligare sociala aspekter vid användning av LED-belysning berör livscykeln, närmare bestämt tillverkningen och under vilka förutsättningar som exempelvis de sällsynta jordartsmetallerna

produceras och anrikas. Detta är en tydlig nackdel när material importeras från länder där mänskliga rättigheter har satts ur spel.


#### 4.4.4. Sammanfattning av för- och nackdelar avseende de sociala dimensionerna

Fördelar med LED-belysning inom trafiksäkerhet omfattar ökad kontrast och bättre synbarhet med mer dagsljusliknande vägbelysning, att ljusreglering kan spara energi utan några negativa effekter på trafiksäkerheten, att en ökad jämnhet i ljuset kan gynna trafiksäkerheten samt minskat spilljus och ljusföroreningar då optiken hos LED möjliggör högre kontroll, se Tabell 5. Nackdelar är att LED som ljuskälla har en tendens att orsaka bländning och att mer riktat ljus kan leda till sämre synbarhet av oskyddade trafikanter.

Avseende hälsoaspekter kan LED-belysningen åstadkomma mer fysisk rörelse genom möjligheter till ökad tillgänglighet vid mer belysta och tryggare miljöer. En annan möjlighet med LED-tekniken är att ordna belysning av hälsofrämjande miljöer. Obekräftade nackdelar är att LED kan orsaka fotokemisk skada på näthinnan och hälsoeffekter på grund av flimmer, men det är osäkert ifall dessa effekter kan uppstå från utomhusbelysning med LED. Dygnsrytmen hos människor kan påverkas, exempelvis om det finns utomhusbelysning som lyser in i fastigheter.

De aspekter avseende livskvalitet som hittills har identifierats omfattar förändrad upplevelse kopplad till ändring av färgtemperaturer (kan vara både för- och nackdel), att LED möjliggör användning av lägre belysningsstyrkor (en fördel om inga personer vistas där, men nackdel ifall individer med synnedsättning inte kan röra sig tryggt och säkert). LED-belysningens tekniska möjligheter till anpassningar och samspel kan leda till ökad trygghet och säkerhet, samtidigt som ljusreglering kan leda till minskad trygghet och säkerhet ifall det görs suboptimalt. Olika typer av förbättrad belysning och sensorstyrd aktivering kan minska risken för brott. En överdriven användning av LED kan dock leda till falsk trygghet och minskad säkerhet. Bländning och höga stolpar kan båda leda till ökad otrygghet.

Tabell 5. Sammanfattning av LED-belysningens för- och nackdelar avseende sociala dimensionerna.

Aspekt	Fördel	Nackdel
Trafiksäkerhet 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ökad färgkontrast (med LED:s vita ljus) kan ge förhöjd synbarhet</li> <li>• Ljusreglering – sparar energi utan trafiksäkerhetspåverkan</li> <li>• Ökad jämnhet kan öka trafiksäkerhet</li> <li>• Minskat spilljus/ljusstörningar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risk för bländning</li> <li>• Riktad belysning minskar ljus på omgivande ytor – oskyddade trafikanter är då svårare att upptäcka</li> </ul>
Hälsa 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gynnar fysisk rörelse genom möjligheter till ökad tillgänglighet (mer belysta och trygga miljöer)</li> <li>• Tillgängliggör hälsofrämjande miljöer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eventuella effekter av flimmer</li> <li>• Kan påverka dygnsrytmen på oönskade sätt</li> </ul>
Livskvalité 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Förbättrad belysning minskar risken för brott</li> <li>• Tekniska fördelar kan utnyttjas för att skapa ökad trygghet, jämställdhet, orientering och samspel med omgivande miljö</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Möjliggör lägre belysningsstyrkor vilka kan försämra för personer med synnedsättningar</li> <li>• Ljusreglering kan leda till känslan av mer otrygg utemiljö</li> <li>• Överdriven användning av LED kan leda till falsk trygghet i osäkra miljöer för brukarna</li> <li>• Otrygghet av bländning och höga belysningsstolpar</li> <li>• Rättvisa och jämställdhet i livscykeln (sällsynta jordartsmetaller)</li> </ul>

## 5 Slutsatser

De tekniska förutsättningar som LED-belysning är förknippade med innebär både fördelar och nackdelar ur ett hållbarhetsperspektiv.

En av de tydligaste fördelarna är att LED är mer energieffektiv än traditionella ljuskällor, vilket resulterar i minskad energikonsumtion men även i nackdelar kopplade till att det ljus som LED avger är vitt och dagsljusliknande. Den dagsljusliknande färgen ger upphov till bättre synbarhet samtidigt som det kan ge större ekologisk miljöpåverkan.

Ljusreglering innebär en teknisk fördel av att ljuset kan regleras till de förhållanden man önskar skapa, vilket är positivt ur miljösynpunkt eftersom man då kan reducera energikonsumtion och miljöpåverkan ytterligare. Samma ljusreglering kan dock även leda till försämrade synbarhet och därmed bland annat sämre trafiksäkerhet och upplevd trygghet.

Tekniska möjligheter genom alltmer utvecklad LED-optik innebär att man kan öka ljusets jämnhet över ytan samtidigt som energikonsumtionen kan minskas. Samtidigt finns en risk att ytterligare optimering av belysningen leder till en press mot glesare stolpavstånd och högre stolpar, vilket i sin tur kan ge ökad bländning, en upplevelse av otrygghet och minskad säkerhet.

Denna rapport visar att ny teknik som LED har en rad tekniska fördelar som, ifall de utnyttjas på rätt sätt, kan ge mycket positiva effekter i form av minskad energikonsumtion, minskad ekologisk påverkan, reducerade mängder ljusföroreningar, bra ekonomiska förutsättningar för investeringar. Ifall tekniken används hänsynsfullt kan den leda till ökad trygghet och säkerhet.

Samtidigt bör man inte blunda för de risker och nackdelar som LED är förknippade med. Särskilt inte avseende områden där det idag inte riktigt finns tillräckligt med kunskap. Detta gäller exempelvis påverkan av LED på en rad olika djur, effekterna på himlaglim från utbyte till LED, trygghetsaspekter och upplevelse av LED i olika belysningsstyrkor, ljusregleringsscenarios samt hur utformningen bör se ut i olika miljöer.

Sammanfattningsvis har LED som ljuskälla många tekniska fördelar som möjliggör anpassningar i tid och rum på ett sätt som aldrig har varit möjligt tidigare och som vi bör utnyttja för att göra utomhusbelysningen mer hållbar.

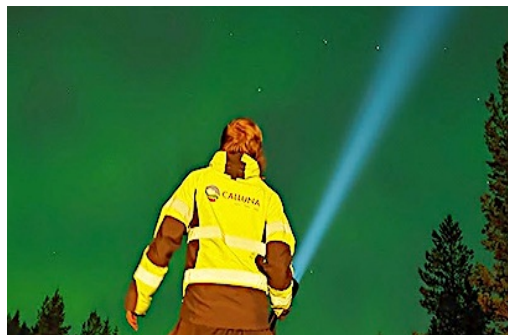


## 6 Referenser

- Bierman, A. (2012). *Will switching to LED outdoor lighting increase sky glow?* Lighting Research and Technology **44**(4): 449-458.
- Boyce, P. R. (2019). *The benefits of light at night.* Building and Environment **151**: 356-367.
- CEN (2015). *Road Lighting - Part 5: Energy performance indicators.* CEN, European Committee for standardization.
- CIE (2010). *Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance.* CIE Publication 191:2010. Vienna, Commission Internationale de l'Eclairage
- De Almeida, A., B. Santos, B. Paolo & M. Quicheron (2014). *Solid state lighting review - Potential and challenges in Europe.* Renewable and Sustainable Energy Reviews **34**: 30-48.
- Dominoni, D. M. (2015). *The effects of light pollution on biological rhythms of birds: An integrated, mechanistic perspective.* J. Ornithol **156**: 409-418.
- Elvidge, C. D., D. M. Keith, B. T. Tuttle & K. E. Baugh (2010). *Spectral identification of lighting type and character.* Sensors **10**(4): 3961-3988.
- Energimyndigheten (2012) *UP-rapport Byggnader i energisystemet. Underlag från Utvecklingsplattformen Bygg till Energimyndighetens strategiarbete FOKUS.* ER 2012: 10. Tillgänglig: <<https://www.energimyndigheten.se/globalassets/nyheter/2012/er-2012-10-up-rapport-byggnader-i-energisystemet.pdf>> [2019-10-14].
- Farrington, D. P. & B. C. Welsh (2007). *Förbättrad utomhusbelysning och brottsprevention. En systematisk forskningsgenomgång.* Rapport 2007:28. Brottsförebyggande rådet, Stockholm.
- Gallaway, T., R. N. Olsen & D. M. Mitchell (2010). *The economics of global light pollution.* Ecological Economics **69**: 658-665.
- Herring, H. (1999). *Does energy efficiency save energy? The debate and its consequences.* Applied Energy **63**(3): 209-226.
- Høye, A., R. Elvik, M. Sørensen, W.J. & T. Vaa (2018). *Kapitel 1.18 Vegbelysning.* Trafikksikkerhetshåndboken. Tillgänglig: <<https://tsh.toi.no/doc634.htm>> [2019-10-14].
- Jägerbrand, A. K. (2015). *New framework of sustainable indicators for outdoor LED (light emitting diodes) lighting and SSL (solid state lighting).* Sustainability (Switzerland) **7**(1): 1028-1063.
- Jägerbrand, A. K. (2016). *LED (Light-Emitting Diode) road lighting in practice: An evaluation of compliance with regulations and improvements for further energy savings.* Energies **9**(5).
- Jägerbrand, A. K. (2018). *LED-belysningens effekter på djur och natur med rekommendationer: Fokus på nordiska förhållanden och känsliga arter och grupper.* Rapport, Calluna AB.
- Jägerbrand, A. K. & A. Carlson (2011). *Potential för en energieffektivare väg- och gatubelysning: jämförelse mellan dimning och olika typer av ljuskällor.* VTI rapport R722. VTI, Statens väg- och transportforskningsinstitut, Linköping.
- Jägerbrand, A. K., J. Dickinson, A. Mellin, M. Viklund & S. Dahlberg (2014). *Rebound effects of energy efficiency measures in the transport sector in Sweden.* VTI Report 827A. VTI, Statens väg- och transportforskningsinstitut, Linköping.
- Kinzey, B., T. E. Perrin, N. J. Miller, M. Kocifaj, M. Aubé & H. S. Lamphar (2017). *An investigation of LED street lighting's impact on sky glow.* Prepared for U.S. Department of Energy, Pacific Northwest National Laboratory. Tillgänglig: <[https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/2017\\_led-impact-sky-glow.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/2017_led-impact-sky-glow.pdf)> [2019-10-14].
- Kostic, M. & L. Djokic (2009). *Recommendations for energy efficient and visually acceptable street lighting.* Energy **34**(10): 1565-1572.
- Lim, S. R., D. Kang, O. A. Ogunseitan & J. M. Schoenung (2013). *Potential environmental impacts from the metals in incandescent, compact fluorescent lamp (CFL), and light-emitting diode (LED) bulbs.* Environmental Science and Technology **47**(2): 1040-1047.

- Martinsons, C. & G. Zisis (2014). *Solid State Lighting Annex - Potential Health Issues of Solid State Lighting Final Report*. Tillgänglig: < [https://ssl.iea-4e.org/files/otherfiles/0000/0068/IEA\\_4E\\_SSL\\_Report\\_on\\_LCA.pdf](https://ssl.iea-4e.org/files/otherfiles/0000/0068/IEA_4E_SSL_Report_on_LCA.pdf) > [2019-10-14].
- Pracki, P. (2011). *A proposal to classify road lighting energy efficiency*. *Lighting research & technology* **43**: 271-280.
- Rich, C. & T. Longcore (2006). *Ecological consequences of artificial night lighting*. Washington, Covelo, London, Island Press.
- Royer, M. (2014). *Lumen maintenance and Light loss factors: Consequences of current design practices for LEDs*. *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America* **10**(2): 77-86.
- Saunders, H. D. & J. Y. Tsao (2012). *Rebound effects for lighting*. *Energy Policy* **49**: 477-478.
- SFS (1998). *Miljöbalk* (1998:808). Svensk författningssamling.
- Trafikverket (2018). *Analysmetod och samhällsekonomiska kalkylvärden för transportsektorn: ASEK 6.1*. Trafikverket.
- Trafikverket & SKL (2015). *Krav för vägars och gators utformning*. 2015:086, Trafikverket.
- Trafikverket & SKL (2015). *Råd för vägars och gators utformning*. 2015:087, Trafikverket.
- Tsao, J. Y., H. D. Saunders, J. R. Creighton, M. E. Coltrin & J. A. Simmons (2010). *Solid-state lighting: An energy-economics perspective*. *Journal of Physics D: Applied Physics* **43**(35).
- Tuenge, J. R., Hollomon, B., Dillon, H. E. & Snowden-Swan, L. J. (2013) *Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products, Part 3: LED Environmental Testing*. Report, March 1, 2013; Richland, Washington. United States Department of Energy.
- World Commission on Environment and Development (1987). *Our common future*. Oxford University Press, Oxford: 1-398.
- Ylinen, A. M., T. Pellinen, J. Valtonen, M. Puolakka & L. Halonen (2011a). *Investigation of pavement light reflection characteristics*. *Road Materials and Pavement Design* **12**(3): 587-614.
- Ylinen, A. M., L. Tähkämö, M. Puolakka & L. Halonen (2011b). *Road lighting quality, energy efficiency, and mesopic design - LED street lighting case study*. *LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America* **8**(1): 9-24.





**CALLUNA**

Hemsida: [www.calluna.se](http://www.calluna.se) • E-post: [info@calluna.se](mailto:info@calluna.se) • Telefon växel: 013-12 25 75

Huvudkontor: Calluna AB, Linköpings slott, 582 28 Linköping