

# Lysregulering – teori og praksis

## Løsninger på problemer ved lysregulering

**Af Erwin Petersen, civilingeniør, ph.d. seniorforsker**

Nærværende artikel er et delresultat af et projekt udført på Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm.

Den sædvanlige placering af lyssensoren på loftet giver ofte en utilfredsstillende regulering og kræver et indgående kendskab til virkemåden. Målinger på anlæg med lysregulering, har vist, at der er forskellige problemer med lysreguleringen, fordi lyssensoren ikke ser belysningsstyrken fra dagslyset og kunstlyset på samme måde. Det betyder, at bidraget til belysningsstyrken på arbejdsplanet fra den kunstige belysning aftager hurtigere end tilvæksten fra dagslyset, fordi lyssensoren ”tror”, der er mere dagslys på arbejdsplanet, end der er i virkeligheden. Resultatet bliver, at belysningsniveauet bliver væsentligt mindre end ønsket, og brugeren bliver utilfreds med lysreguleringen. For at undgå at brugerne sætter reguleringssystemet ud af kraft, er det nødvendigt at forbedre systemerne og installationen af disse.

### Placering af lyssensoren

Ved den ideelle regulering vil man under nedreguleringen fastholde et konstant belysningsniveau på arbejdsplanet ved en kombination af kunstlys og dagslys. Man burde derfor teoretisk placere lyssensoren på arbejdsplanet, hvilket dog er meget uhensigtsmæssigt. I stedet for placeres lyssensoren på loftet over arbejdsplanet. Hvis åbningsvinklen for lyssensoren er meget lille, måler lyssensoren kun det reflekterede lys fra arbejdsplanet, og den målte ”belysningsstyrke” er afhængig af arbejdsplanets skiftende reflektanser. Åbningsvinklen for lyssensoren gøres i praksis derfor større. For samme belysningsstyrke på arbejdsplanet fra kunstlyset eller dagslyset, vil lyssensoren imidlertid ikke registrere samme belysningsstyrke. Årsagen er, at lysfordelingen fra kunstlys og dagslys er forskellig. Belysningsstyrken på loftet fra kunstlyset er reflektlys fortrinsvis fra gulv og møbler, mens dagslyset fra et sidevindue også belyser loftet direkte.

Forholdet mellem belysningsstyrken fra dagslyset på arbejdsplanet og loftet varierer mellem 1:1 og 2:1 på en overskyet dag afhængig af vinduesstørrelse, rumdybde, overfladernes reflektanser m.m. Det samme forhold mellem belysningen på arbejdsplanet og lyssensoren for den kunstige belysning varierer derimod mellem 4:1 til 10:1 for et anlæg med indbyggede loftsarmaturer eller nedadlysende armaturer. *For at opnå den ideelle regulering skal forholdet mellem belysningen på arbejdsplanet og lyssensoren være det samme for både kunstlys og dagslys.*

### Teoretiske beregninger

Ved beregningerne er det forudsat, at lyssensoren måler belysningsstyrken på loftet og er korrigeret til øjets følsomhedskurve, således at den ikke kan se forskel på kunst- og dagslys samt at lyssensoren regulerer belysningsstyrken lineært. Forholdet mellem belysningsstyrken på arbejdsplanet  $E_{arb}$  og loftet  $E_{loft}$  for kunstlys og dagslys er henholdsvis  $K$  og  $D$ , dvs.

$$E_{arb}^K = K \cdot E_{loft}^K \quad \text{og} \quad E_{arb}^D = D \cdot E_{loft}^D \quad \text{hvor}$$

$E_{arb}^K$  og  $E_{loft}^K$  er belysningsstyrken fra kunstlyset på arbejdsplanet og loftet (lyssensoren) og  $E_{arb}^D$  og  $E_{loft}^D$  er belysningsstyrken fra dagslyset på arbejdsplanet og loftet (lyssensoren).

Der kræves endvidere, at belysningsanlægget skal holde en minimumsbelysningsstyrke på arbejdsplanet på  $E_{arb,min}$  dvs. lyssensoren på loftet skal indstilles, således at belysningsstyrken på loftet  $E_{loft,min}$

ikke bliver mindre end det, der er nødvendigt, for at belysningsstyrken på arbejdsplanet fra dagslyset eller kunstlyset ikke bliver mindre end  $E_{\text{arb,min}}$ .

### Tilfældet hvor $K > D$ og lyssensoren indstilles til at regulerer efter $E_{\text{arb,min}}^K$

For tilfældet med anlæg, der er fortrinsvis nedadlysende er  $K > D$ . Lyssensoren på loftet indstilles således, at reguleringen begynder, når belysningsstyrken på arbejdsplanet fra belysningsanlægget er lig med den ønskede minimumsværdi  $E_{\text{arb,min}}$ . Belysningsstyrken på lyssensoren er da

$E_{\text{loft,min}}^K = E_{\text{arb,min}}^K / K$ , svarende til den værdi der er, når der ikke er dagslys. Når dagslyset tiltager, stiger belysningsstyrken på loftet, og reguleringen går straks i gang, idet lyssensoren vil holde en konstant belysningsstyrke på loftet til lyset er slukket.

Når anlægget er slukket er  $E_{\text{arb}}^D = E_{\text{arb,min}}^K \cdot D / K$  (ligning 1) se note 1

#### Note 1

Under reguleringen vil lyssensoren holde en konstant belysningsstyrke på loftet til lyset er slukket

$$E_{\text{loft}}^K + E_{\text{loft}}^D = E_{\text{arb}}^K / K + E_{\text{arb}}^D / D = \text{konstant} = E_{\text{loft,min}}^K = E_{\text{arb,min}}^K / K \quad \text{eller}$$

$E_{\text{arb}}^D = (E_{\text{arb,min}}^K - E_{\text{arb}}^K) \cdot D / K$ . Når anlægget slukker, er

$$E_{\text{arb}}^K = 0, \text{ dvs. } E_{\text{arb}}^D = E_{\text{arb,min}}^K \cdot D / K \quad (\text{ligning 1})$$

#### Eksempel 1 $K > D$

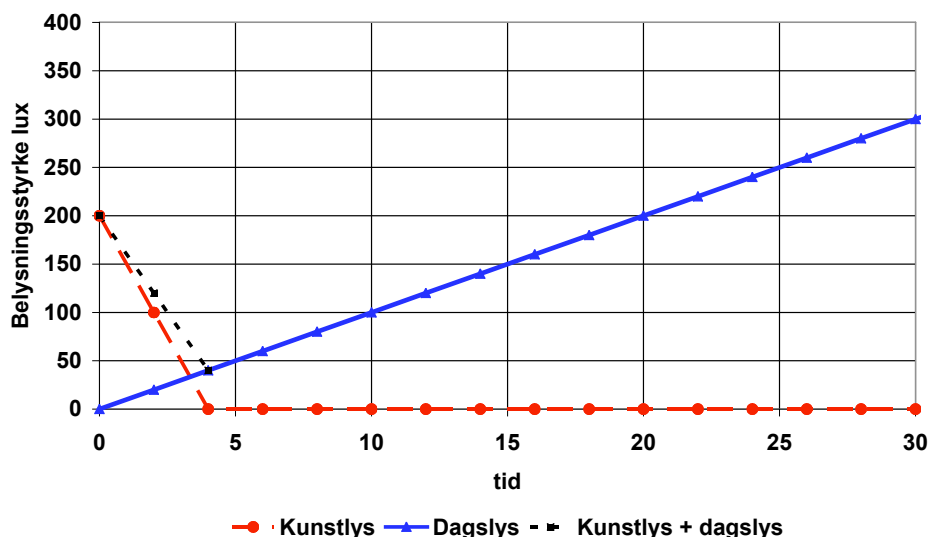
Når armaturerne er monteret på loftsfladen, vil man i praksis ofte have  $K = 10$ , og for dagslys vil man typisk have  $D = 2$ . Belysningsanlægget kan give 200 lux på arbejdsplanet dvs.  $E_{\text{arb,min}}^K = 200$  lux.

Hvis lyssensoren er indstillet til at begynde reguleringen, når belysningsniveauet på arbejdsplanet er større end 200 lux, er belysningsstyrken på loftet da

$$E_{\text{loft}}^K = E_{\text{arb,min}}^K / K = 200 / 10 = 20 \text{ lux.}$$

Når anlægget er reguleret til 0 er belysningsstyrken fra dagslyset da (ligning 1)

$E_{\text{arb}}^D = E_{\text{arb,min}}^K \cdot D / K = 200 \cdot 2 / 10 = 40$  lux, dvs. langt under den ønskede minimumsværdi på 200 lux, og brugeren bliver utilfreds med reguleringen. Forløbet af belysningsstyrken under reguleringen er vist på figur 1.



Figur 1. Beregnet belysningsstyrke på arbejdsplan ved nedadlysende armaturer, når dagslyset tiltager og anlægget regulerer. Forholdet for kunstlys og dagslys er henholdsvis  $K=10$  og  $D=2$  og den ønskede belysningsstyrke er mindst 200 lux på arbejdsplanet med kunstig belysning. Belysningsstyrken er kun 40 lux, når anlægget slukker.

## Beregning af setpunkt for lyssensor, så belysningsstyrken på arbejdsplanet ikke må blive mindre end $E_{\text{arb,min}}^K$

Når reguleringen slukker anlægget, skal belysningsstyrken på arbejdsplanet fra dagslyset ikke være mindre end den ønskede værdi for kunstlys  $E_{\text{arb,min}}^K$ . Belysningsstyrken på loftet må da ikke være lavere end setpunktet  $E_{\text{loft,set}}^K$  og setpunktet for belysningsstyrken på arbejdsplanet bliver da

$$E_{\text{arb,set}}^K = E_{\text{arb,min}}^K \cdot K/D \quad (\text{ligning 2}).$$

Når reguleringen begynder er belysningsstyrken på arbejdsplanet  $E_{\text{arb}}^{K+D} = (2 - D/K) \cdot E_{\text{arb,min}}^K$  (ligning 3). Se note 2

### Note 2

Reguleringen af belysningsstyrken på arbejdsplanet begynder, når belysningsstyrken på loftet har nået setpunktet  $E_{\text{loft,set}}^K$ , idet  $E_{\text{loft,set}}^K = E_{\text{arb,set}}^K/K = E_{\text{arb,min}}^K/D$ . Setpunktet for belysningsstyrken på arbejdsplanet da  $E_{\text{arb,set}}^K = E_{\text{arb,min}}^K \cdot K/D$  (ligning 2)

Belysningsstyrken på loftet fra kunstlys og dagslys er da

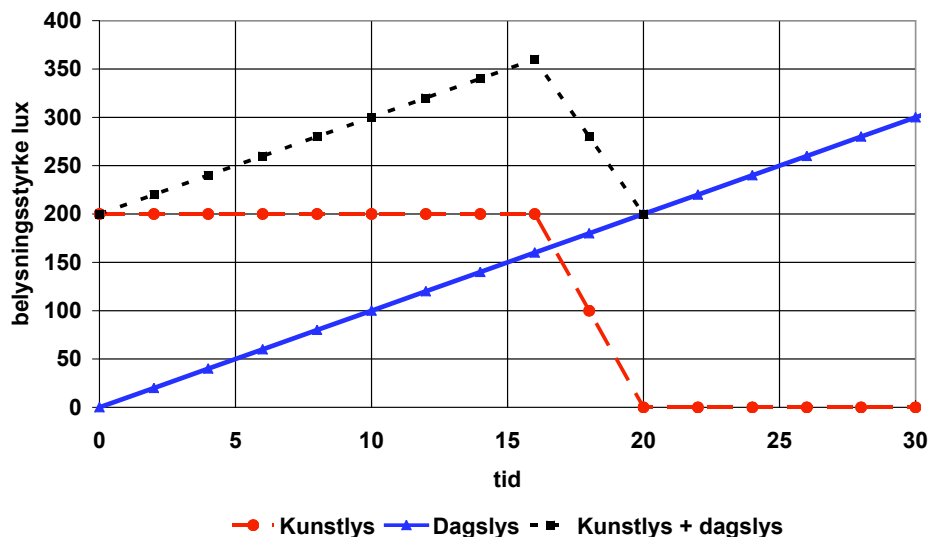
$$E_{\text{loft}}^{K+D} = E_{\text{arb,min}}^K/K + E_{\text{arb}}^D/D = E_{\text{loft,set}}^K = E_{\text{arb,min}}^K/D$$

Heraf fås, at belysningsstyrken på arbejdsplanet fra dagslyset bliver

$E_{\text{arb}}^D = (1 - D/K) \cdot E_{\text{arb,min}}^K$  og den samlede belysningsstyrke på arbejdsplanet, når reguleringen begynder er  $E_{\text{arb}}^{K+D} = (2 - D/K) \cdot E_{\text{arb,min}}^K$  (ligning 3)

### Eksempel 2

Når  $K = 10$  og  $D = 2$  og man ikke vil have en belysningsstyrke, der er lavere end 200 lux, skal setpunktet for reguleringen for kunstlyset sættes til  $E_{\text{arb,set}}^K = 200 \cdot 10/2 = 1000$  lux (ligning 2). Når reguleringen begynder, er belysningsstyrken på arbejdsplanet  $E_{\text{arb}}^{K+D} = (2 - 2/10) \cdot 200 = 360$  lux (ligning 3). Forløbet af belysningsstyrken under reguleringen er vist på figur 2.



Figur 2. Beregnet belysningsstyrke på arbejdsplan, når dagslyset tiltager og anlægget regulerer. Forholdet for kunstlys og dagslys er henholdsvis  $K=10$  og  $D=2$  og den ønskede belysningsstyrke er mindst 200 lux.. Setpunktet er 1000 lux på arbejdsplanet med en kunstig belysning, som kun kan give 200 lux. Reguleringen begynder når kunst- og dagslys giver 360 lux og niveauet bliver ikke lavere end 200 lux..

### Regulering ved oplys $K < D$

Ved belysningsanlæg med oplys har man høje belysningsstyrker på store dele af loftet, og forholdet  $K$  kan derfor blive mindre end  $D$ . Når dagslyset tiltager, stiger belysningsstyrken på loftet, og reguleringen går straks i gang, da den søger at holde et samlet konstant belysningsniveau på loftet.

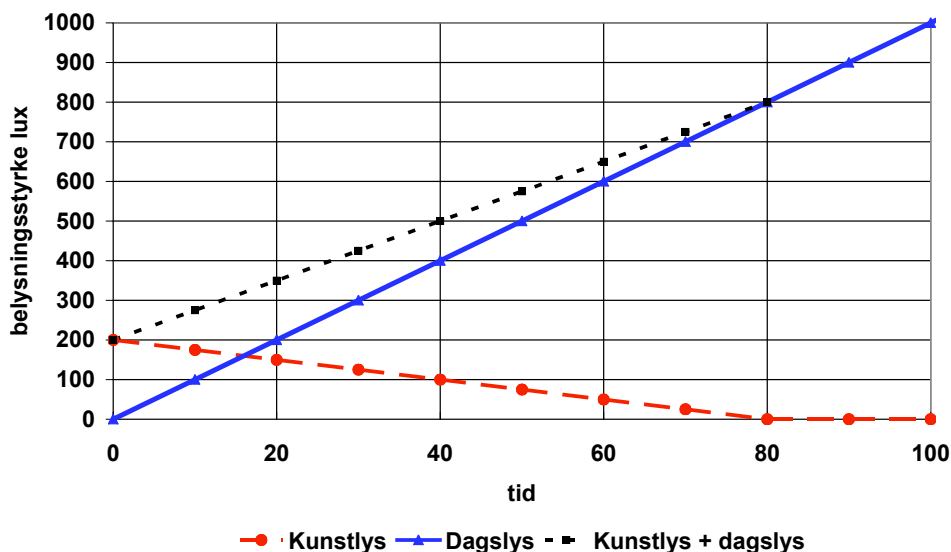
Når anlægget slukker, er  $E_{\text{arb}}^D = E_{\text{arb,min}}^K \cdot D/K$ .

Da  $K < D$  vil en tilvækst af belysningsstyrken på arbejdsplanet fra dagslyset blive registreret af lys-sensoren som en mindre tilvækst i kunstlyset (i modsætning til eksempel 1), og kunstlyset nedreguleres derfor mindre end den samtidige tilvækst af dagslyset, dvs. den samlede belysningsstyrke på arbejdsplanet stiger.

### Eksempel 3 $K < D$

Eksempelvis kan man have  $K = 0,5$  og  $D = 2$ , hvilket giver følgende regulering, hvis belysningsanlægget giver 200 lux på arbejdsplanet.

Reguleringen begynder så snart dagslyset tiltager og slukker lyset, når belysningsstyrken på arbejdsplanet er  $E_{\text{arb}}^D = E_{\text{arb,min}}^K \cdot D/K = 200 \cdot 2/0,5 = 800$  lux (ligning 1). Forløbet af belysningsstyrken under reguleringen er vist på figur 3.



Figur 3. Beregnet belysningsstyrke på arbejdsplan ved opadlysende armaturer, når dagslyset tiltager og anlægget regulerer. Forholdet for kunstlys og dagslys er henholdsvis  $K=0,5$  og  $D=2$  og den ønskede belysningsstyrke er mindst 200 lux. Setpunktet er 200 lux på arbejdsplanet med kunstig belysning. Den kunstige belysning slukker først ved 800 lux

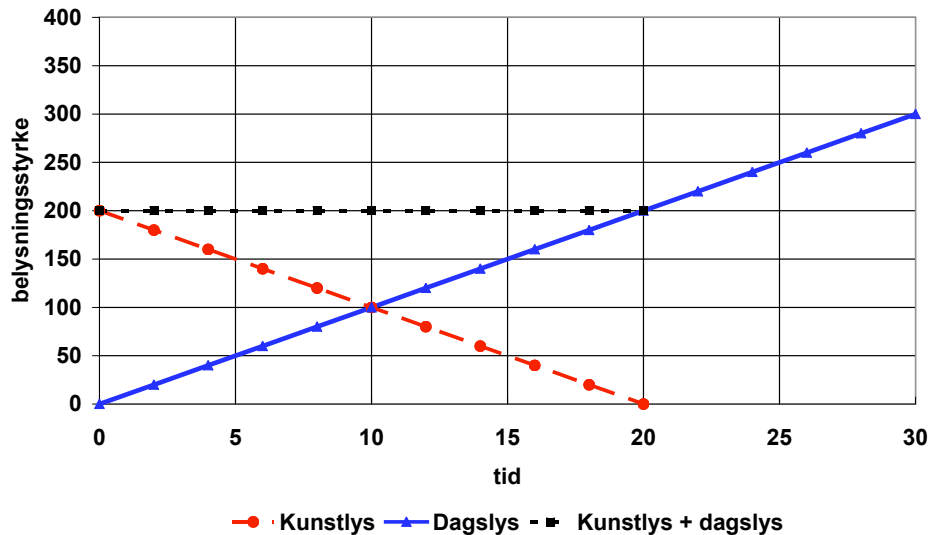
### Ideel regulering

Når  $K = D$  vil man have den "ideelle" regulering, hvor en ændring af belysningen på loftet fra både kunstlys og dagslys er proportional med belysningsstyrken på arbejdsplanet. Når belysningsstyrken på arbejdsplanet fra dagslyset tiltager vil bidraget fra den kunstige belysning aftage tilsvarende, således at belysningsstyrken er konstant svarende til setpunktet indtil bidraget fra dagslyset er større end denne værdi. Setpunktet for belysningsstyrken er  $E_{\text{arb,set}}^K = E_{\text{arb,min}}^K \cdot K/D$  (ligning 2) dvs. den ønskede belysningsstyrke, idet  $K = D$ .

Når anlægget slukker er  $E_{\text{arb}}^D = E_{\text{arb,min}}^K \cdot D/K$  (ligning 1) dvs. ved den ønskede belysningsstyrke.

Når reguleringen begynder er belysningsstyrken på arbejdsplanet  $E_{\text{arb}}^{K+D} = (2 - D/K) \cdot E_{\text{arb,min}}^K$  (ligning 3) dvs. den ønskede belysningsstyrke.

På figur 4 er vist resultatet af en regulering når  $K = D$ , idet ønsket til belysningsstyrken på arbejdsplanet er 200 lux.



Figur 4. Beregnet belysningsstyrke på arbejdsplan, når dagslyset tiltager og anlægget regulerer. Forholdet for kunstlys og dagslys er det samme  $K = D$  og den ønskede belysningsstyrke er mindst 200 lux. Setpunktet er 200 lux på arbejdsplanet. Når dagslyset tiltager, aftager den kunstige belysning tilsvarende og niveauet holdes konstant på 200 lux under reguleringen (Ideel regulering)

### Konklusion 1

Indstilles reguleringsniveauet ved kunstlys for den ønskede belysningsstyrke, får man kun denne, når  $K = D$ . Er  $K > D$  vil man få for lave belysningsstyrker under nedreguleringen, og det er nødvendigt at indstille setpunktet for belysningsstyrken til et højere niveau. Når  $K < D$  nedreguleres belysningen uden gener for brugeren, men elbesparelsen bliver reduceret.

### Praksis

Ved de teoretiske beregninger er det forudsat, at lyssensoren måler belysningsstyrken på loftet, at lyssensoren regulerer belysningsstyrken lineært og er korrigeret til øjets følsomhedskurve, således at den ikke kan se forskel på kunst- og dagslys. Da dette ikke er tilfældet i praksis, er det nødvendigt, at producenterne af lysreguleringssystemer leverer disse med kurver for sammenhæng mellem belysningsstyrken på lyssensoren og styresignalet til systemet dels for kunstlys, dels for dagslys. Da spektralfordelingen for kunstlys kan variere meget for forskellige lyskilder, skal der være kurver for forskellige lyskilder, med mindre lyssensoren er korrigeret til øjets følsomhedskurve.

Hvis lyssensoren ikke er cosinuskorrigeret, gælder kurverne kun for en given lysfordeling. Da lysfordelingen for både kunstlys og dagslys er afhængig af reflektanser, møblering, vinduesstørrelser m.m. skal der ved målinger i lokalet korrigeres for dette ved indreguleringen af belysningsanlægget. Ved indreguleringen skal der måles med kunstlys alene og dagslys i overskyet vejr. Når der er direkte sol på vinduet, ændres lysfordelingen fra dagslyset meget, og situationen kan ikke anvendes ved indreguleringen.

Hvis man skal undgå for lave belysningsstyrker under nedreguleringen er der to principper at vælge imellem.

#### Princip 1

Man beregner eller måler, hvor på loftet eller sidevæggen at forholdet mellem belysningsstyrken på arbejdsplanet og lyssensoren er det samme for både kunst- og dagslys dvs.  $K = D$  og lyssensoren placeres der.

Beregningen af belysningsstyrken fra kunstlys og dagslys på lokalets flader kan foretages med forskellige Edb-programmer og punkter hvor  $K = D$  kan bestemmes. Da beregningen foretages i et umøbleret lokale og med et vindue med en jævnt overskyet himmel, er resultatet kun retningsgivende og skal korrigeres med målinger i det aktuelle lokale, idet der samtidig tages hensyn til lyssensorens korrektionskurver.

Armaturerens lysfordeling og lokalets reflektanser er meget bestemmende for, hvor lyssensoren kan placeres, og i flere tilfælde er det umuligt at finde et sted på loftet hvor  $K = D$ . I mange tilfælde kan man i stedet finde et sted på sidevæggen, hvor  $K = D$ . Princippet er verificeret ved forsøg i Sbi's dagslyslaboratorium, hvor lyssensoren er placeret på sidevæggen i nærheden af lyspletten fra lyspletten fra loftarmatur (figur 5). I tilfælde med downlights bliver belysningsstyrken på loftet ofte så lille, at lyssensoren kun kan placeres på en vægflade. I andre tilfælde kan det forekomme, at der slet ikke findes et punkt for den ideelle regulering og princip 2 må tages i anvendelse.

I anlæg med oplys skal lyssensoren ligeledes placeres hvor  $K = D$ , da nedreguleringen ellers vil gå for langsom (figur 3) og el-besparelsen mindre.



Fig. 5. Placering af en lyssensor på sidevæggen i Sbi's dagslyslaboratorium, hvor det beregnede og målte sted opfylder kravet  $K = D$ , og hvor man opnåede en ideel regulering. Lyssensoren sidder på sidevæggen nær lyspletten fra kunstlyset,

## Princip 2

Når lyssensoren er placeret på loftet af andre hensyn, skal man finde belysningsstyrken (setpunktet) for hvornår reguleringen skal begynde. Setpunktet for belysningsstyrken kan da beregnes af (ligning 2), når  $K$  og  $D$  målt.

For nedadlysende armaturer vil denne belysningsstyrke være højere end den værdi den kunstige belysning kan give. Det skal derfor være muligt at indstille setpunktet ved hjælp af kurverne over målte belysningsstyrker og lyssensorens signal.

## Konklusion 2

En tilfredsstillende lysregulering fås kun ved en nøjere undersøgelse af de reelle fordelinger af belysningen i det enkelte lokale fra kunst- og dagslys. En præcis indstilling vil være vanskelig med de eksisterende reguleringsfabrikater, da det skal være muligt at indstille lyssensorens reguleringssignal efter den belysningsstyrke, der er på sensoren, og kalibreringskurverne for lyssensorene skal være tilgængelige.

Ud fra kendskabet til den teoretiske del for reguleringen, er det dog muligt at placere lyssensoren på et sted, der giver en bedre regulering, end den der fås ved den sædvanlige placering på loftet.