



LED for belysning i tunneler

Per Melander Often

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Eilif Hugo Hansen, ELKRAFT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for elkraftteknikk

NTNU



MASTEROPPGAVE

Kandidatens navn : Per Melander Often

Fag : ELKRAFTTEKNIKK

Oppgavens tittel (norsk) : **LED for belysning i tunneler**

Oppgavens tittel (engelsk) : LED for Tunnel Lighting

Oppgavens tekst : Norge har mange og lange tunneler med krav til belysning. Tradisjonelt er disse belyst med damplamper, i hovedsak høytrykk natriumlamper. Generelt benyttes imidlertid nå LED som lyskilder i en rekke ulike belyningsanlegg, og LED er også benyttet i et mindre antall veitunneler. LED har andre egenskaper enn damplamper, og dette kan gi mulighet for nye utforminger av tunnellysanlegg.

Kandidaten skal

- vurdere mulighetene for anvendelse av LED i tunneler, og spesielt se på anvendelser som ikke bare er en ren 1-til-1 erstatning for konvensjonelle løsninger
- undersøke muligheten for energisparing ved bruk av LED som tunnelbelysning

Oppgavens gitt : 20.01.16
Besvarelsen leveres innen : 19.06.16
Besvarelsen levert : 19.06.16
Utført ved (institusjon, bedrift) : NTNU
Kandidatens veileder : Eilif Hugo Hansen

Trondheim, 20.01.16

faglærer

Forord

Denne oppgaven utgjør sluttproduktet av min Masteroppgave i 10. semester ved studieprogrammet Energi Miljø ved NTNU i Trondheim. Oppgaven er gjennomført ved Institutt for elkraftteknikk ved Fakultet for informasjonsteknologi, matematikk og elektronikk. Oppgaven har en belastning på 30 studiepoeng.

Fra å kunne svært lite om tunnelbelysning i starten av januar, har det vært svært spennende og lærerikt å se oppgaven ta form gjennom semesteret. Det har til tider vært krevende å oppdrive informasjon, men det store antallet personer jeg har vært i kontakt med har bidratt etter beste evne, og hjulpet meg videre.

Jeg vil rette en stor takk til min veileder ved NTNU, Eilif Hugo Hansen. Han har kommet med gode idéer og innspill gjennom hele prosessen, og ikke minst hjulpet meg å definere oppgavens problemstilling etter en idé av Stian Wirgenes i Electronova AS. I tillegg ønsker jeg å takke: Haakon Nergaard (SVV) for informasjon og tilgang til anlegg i regi Statens vegvesen. Hans Øien (Thorn Lighting), Svein Eriksen (DEFA) og Magne Bjørklund (DEFA) for informasjon om eksisterende belysningsanlegg og hjelp til generelle spørsmål tilknyttet oppgaven. Anton Stolbunov (Luxsave AS) for hjelp til spørsmål og informasjon rundt styresystemer. Børge Lundhaug (Controltec AS) for tilgang på data for Marienborgtunnelen og hjelp til generelle spørsmål. Trond Einar Kristiansen og Stian Wirgenes (begge Electronova AS) for innspill og muligheten til å bli kjent med bransjen gjennom et opphold i bedriften sommeren 2015. Til slutt ønsker jeg å takke alle som har hjulpet meg med diverse småspørsmål, noe det har blitt mange av gjennom semesteret.

Trondheim 21.06.2016

Per Melander Often

Sammendrag

Norge er et land med 1200 biltunneler som tradisjonelt har blitt belyst med trinnstyring av dampplamper. På grunn av LED-teknologiens voldsomme utvikling innen belysningsformål de siste årene, er dette i ferd med å endre seg.

Hensikten med denne oppgaven har vært å undersøke mulighetene ved å benytte LED-teknologien til å skape bedre og mer effektive belysningsløsninger i tunneler. På bakgrunn av egenskapene til LED, har løsninger som ikke er 1:1-utskiftning av konvensjonelle armaturer og styringsmetoder vært spesielt interessante. Det har vært ønsket å studere om disse belysningsløsningene kan benyttes til å lage bedre og mer effektive belysningsanlegg, sammenlignet med de konvensjonelle løsningene. For å vurdere dette er fire parametere lagt til grunn: Energibruk, trafiksikker belysning, levetidskostnad og førerens opplevelse. Studiet er avgrenset til biltunneler og all belysning i kjørebanelen.

Et bakgrunnsstudie og en teoretisk utforming med påfølgende vurdering, utgjør kjernen i oppgaven.

Bakgrunnsstudiet gir en oversikt over undersøkte belysningsløsninger med LED, som potensielt kan møte kravene på en bedre måte enn dagens konvensjonelle løsninger.

Den teoretiske utformingen bruker utvalgte muligheter fra bakgrunnsstudiet til å skape en LED-belysningsløsning i Marienborgtunnelen, lokalisert i Trondheim. Her eksisterer det i dag et moderne konvensjonelt anlegg. Armaturgrunnlaget for den teoretiske utformingen er hentet fra det moderne LED-anlegget i Stavsjøfjelltunnelen, som også er lokalisert i Trondheimsområdet.

Vurderingen av anleggene, viser at det teoretiske LED-anlegget møter kravene til Statens vegvesen på en bedre, eller like god måte, for alle vurderingsparametere. Spesielt er det totale energisparingspotensialet og levetidskostnadene for indre sone, svært mye bedre ved LED-anlegget. Levetidskostnadene for et LED-anlegg vil også ha et enormt potensiale i fremtiden. Vurderingen viser også at trafiksikker belysningskvalitet ved å benytte LED vil være bedre i innkjøringssonen, og like god i indre sone. LED er også overlegent best for fleksibel belysningstilpassning for økt brukervennlighet og trafiksikkerhet i tunneler. Diskusjonen kommer frem til at resultatene har en stor overføringsverdi til andre tunneler. Hovedkonklusjonen for oppgaven er at LED-teknologien har kommet så langt i utviklingen, at den i dag utkonkurrerer konvensjonelle løsninger dersom teknologiens muligheter tilpasses tunnelen som skal belyses.

Abstract

Norway's 1 200 car tunnels have traditionally been illuminated with step control of vapor lamps. However, due to the rapid development within LED technology for illumination in the recent years, this is starting to change.

The purpose of this thesis has been to examine opportunities by using LED-technology for creating a better and more efficient lighting solution in tunnels. Based on the LED's properties, solutions that are not a 1:1-replacement of conventional luminaires and control systems have been particularly interesting. The purpose of this thesis has been to study if these luminaire systems can be used to create a better and more efficient lighting system compared to conventional solutions. In order to evaluate this, four parameters have been used: energy consumption, traffic safe lighting, life cycle cost and the experience for the driver of the vehicle travelling through the tunnel. In general, it has been particularly interesting to study if the LED-technology has come to a maturity level where it can outperform conventional solutions if used properly. The study is limited to lighting of the roadway and all illumination in the carriageway.

A background study and a theoretical design, with a following evaluation make up the core of the thesis. The background study provides an overview of LED lighting solutions which potentially could meet the industry demands in a better way than conventional solutions today. The theoretical design uses selected options from the background study to create a LED lighting solution in the Marienborg tunnel, located in Trondheim, Norway. A modern conventional system is currently installed in the tunnel. The model for the theoretical design of the lighting is based on a modern LED-system in Stavsjøfjelltunnelen, also located in the Trondheim area in Norway.

The evaluation of the systems shows that the theoretical LED-system meets all requirements set by Statens vegvesen in a better, or equally good way, for all four parameters. There is a large potential for energy saving and lower life cycle costs using a LED-system. The life cycle cost for LED is also found to have a tremendous potential in the future. In addition to this, the traffic safe lighting is better in the entrance zone of the tunnel using LED. LED is a superior solution for flexible lighting adjustment in order to improve the user experience in tunnels. The discussion concludes that the results are very relevant for other tunnels. The main conclusion is that LED-technology has come so far that it today outperforms conventional solutions if adjusted to the individual tunnel's parameters.

Innhold

1	Introduksjon	1
1.1	Bakgrunn	1
1.2	Formål	1
1.3	Oppbygning og avgrensninger i oppgaven	2
1.3.1	Teoristudie	2
1.3.2	Bakgrunnsstudie	2
1.3.3	Utforming	2
1.3.4	Metoder for vurdering av utforming	2
1.3.5	Resultater, diskusjon og konklusjon	2
2	Teori	3
2.1	LED	3
2.1.1	Oppbygning og virkemåte av LED-chipen	3
2.1.2	Kjøling og produksjon av varme	5
2.1.3	Optikk og oppbygning av LED-armaturet	5
2.1.4	Hvitt lys	6
2.1.5	Lyskvalitet	7
2.1.6	Styring og dimming på armaturnivå	9
2.1.7	Lysutbytte og levetid	11
2.1.8	Fordeler med LED - Oppsummering	11
2.2	Tunnelbelysning	12
2.2.1	Inndeling i ulike soner	12
2.2.2	Kontrast i tunneler - Symmetrisk lys og motlys	14
2.2.3	Luminansjevnhet i tunnelbelysning	15
2.2.4	Blending og flimmer i tunnelbelysning	15
2.2.5	Ledelys	16
2.2.6	Nødbelysning	16
2.2.7	Oppbrytning av monoton	16
2.2.8	Lystilbakegang og vedlikeholdsfaktor	17
2.3	Forskrifter og krav for norske tunneler	17
2.3.1	Krav for belysning	17
2.3.2	Krav for bruk av LED i tunneler	20
2.4	Styring av belysning i tunneler	20
2.4.1	Utgangspunkt	21
2.4.2	Oppbygning av et styresystem	21
2.4.3	Styresystemer med konvensjonell belysning	21
2.4.4	Styresystemer med LED	22
2.4.5	Vegvesentes ønsker for styresystemer i tunneler	22

3	Bakgrunnsstudie av belygningsmuligheter i tunneler som følge av egenskapene til LED	23
3.1	Generelle muligheter for tunnelbelysning med LED	24
3.2	Dynamisk innkjøringssone	25
3.3	Dynamisk overgangssone	27
3.4	Regulering etter vedlikeholdsfaktoren	29
3.5	Kjøretøydeteksjon	30
3.6	Dynamiske lede-/rømingsslys	33
3.7	LED til oppbrytning av monotoni	35
3.8	Kommunikasjon med LED	37
4	Utforming av belygningsanlegg basert på mulighetene til LED	39
4.1	Presentasjon av tunnel	39
4.1.1	Fysiske parametere og forsyning	40
4.1.2	Belysning	40
4.2	Utforming av LED-anlegg	41
4.2.1	Styresystem	42
4.2.2	Innkjøringssone	43
4.2.3	Overgangssone	44
4.2.4	Indre sone	46
4.2.5	Dynamisk nattbelysning	47
4.2.6	Ledelys/Rømingsslys	48
4.2.7	Oppbrytning av monotoni	49
4.2.8	Kommunikasjon	50
5	Metoder for vurdering av utforming	51
5.1	Energibruk	52
5.1.1	Metode for beregninger	52
5.1.2	Beregningsgrunnlag for adaptasjonsluminans	54
5.1.3	Beregningsgrunnlag for teoretisk utformet LED-anlegg	54
5.1.4	Beregningsgrunnlag for eksisterende konvensjonelt anlegg	55
5.2	Belysningskvalitet	56
5.2.1	Metode for målinger	56
5.3	Levetidskostnad	57
5.3.1	Metode for beregning	57
5.3.2	Beregningsgrunnlag	58
6	Resultater	60
6.1	Energibruk	60
6.1.1	Teoretisk utformet anlegg	60
6.1.2	Resultater fra eksisterende belygningsanlegg i Marienborgtunnelen	62
6.1.3	Sammenligning av energibruk	63
6.2	Trafikksikker belygningskvalitet	65
6.2.1	Resultater fra LED-belygningsanlegg i Stavsjøfjelltunnelen	65
6.2.2	Resultater fra eksisterende belygningsanlegg i Marienborgtunnelen	65
6.2.3	Sammenligning av belygningskvalitet	65
6.3	Levetidskostnad	67
6.3.1	Levetidskostnad for LED-anlegg	67
6.3.2	Levetidskostnad for konvensjonelt anlegg	67
6.3.3	Sammenligning av levetidskostnader	67

7	Diskusjon	70
7.1	Vurdering av teoretisk utforming	70
7.1.1	Vurdering av energibruk	70
7.1.2	Vurdering av trafikksikker belysning	72
7.1.3	Vurdering av levetidskostnad	73
7.1.4	Vurdering av førerens opplevelse	74
7.1.5	Svakheter ved vurderingsparametere	75
7.2	Overførbarhet til andre anlegg	75
7.2.1	Overførbarhet av resultatene til lengre tunneler	76
7.2.2	Overførbarhet av resultatene til kortere tunneler	77
7.2.3	Vurdering av armaturgrunnlag	78
7.2.4	Oppsummering	78
7.3	Generell oppsummering og fremtidig bruk av LED-teknologien i tunnelbelysning	78
8	Konklusjon	80
9	Videre arbeid	81
A	Teoretisk besparing for LED i indre sone	i
B	Armaturer Marienborgtunnelen	iii
C	Armaturer Stavjøfjelltunnelen	vii
D	Relux-beregning for Stavjøfjelltunnelen	ix
E	Relux-beregning for konvensjonelt anlegg	xii
F	Trafikktetthet Marienborgtunnelen	xv
G	Matlab-skript for energiberegninger i LED-anlegg	xvii
H	Matlab-skript for energiberegninger ved kjøretøydeteksjon	xxi
I	Matlab-skript for energiberegninger i konvensjonelt anlegg	xxiii
J	Matlab-skript for LCC-beregninger	xxv

Figurer

2.1	Tversnitt av LED-pakke. [3]	3
2.2	Tversnitt av LED-celle	4
2.3	Rekombinasjon av et fritt elektron fra ledningsbåndet til valensbåndet.	4
2.4	LED-chipen leder kun strøm en vei, akkurat som en diode.	5
2.5	Optikk i et LED-modul	6
2.6	Fosforkonvertering og fargemiksing	7
2.7	Driver for LED	9
2.8	Ulike duty-cycles ved pulsbreddemodulasjons-dimming (PWM).	10
2.9	Soneinndeling med luminansforløp	13
2.10	Bilde med hhv: ordinert kamera (t.v) og luminanskamera (t.h). [25]	15
2.11	Ledelys i Nestunnelen. [23]	16
2.12	Krav til midlere luminans i tunnelsonene [20]. Innkjøringssonen er gitt som % av adaptasjonsluminansen.	18
2.13	CIEs-Luminansreduksjonskurve for dagslysforhold [20]	18
2.14	Mulig oppbygning av sentralt styresystem med LED	21
2.15	Powerline/DALI-løsning fra Osram [32]	22
3.1	Kontinuerlig dimming av LED sammenlignet med tradisjonell trinnstyring [37].	25
3.2	Harangstunnelen [29].	26
3.3	Ulike krav for midlere luminans i overgangssonen.	27
3.4	Innkjøringssone med LED-armaturer i Brekktunnelen [19]	28
3.5	Mulighet for justering av LED ved hjelp av lukket sløyfe.	29
3.6	Kjøretøydeteksjon som følge av bevegelsessensorer.	31
3.7	Nattbelysning i Toventunnelen [33].	32
3.8	Dynamiske LED-ledelys i Oslofjordtunnelen. [34]	34
3.9	Hondsrug tunnel i Nederland [38]	35
3.10	Snunisje med blått lys i Toventunnelen [24]	36
3.11	LiFi, internett ved hjelp av LED. [44]	37
4.1	Geografisk plassering av Marienborgtunnelen [51]	39
4.2	Profiltegning av Marienborgtunnelen [51]	40
4.3	Styresystem for den teoretiske utformingen.	42
4.4	Kalenderfunksjon for pådrag til armaturer i innkjøringssonen.	43
4.5	Midlere luminans ved maksimal lengde for overgangssonen, $L_{20} = 3000cd/m^2$ (Overgangssonen markert med rødt)	44
4.6	Midlere luminans ved ulike adaptasjonsluminanser.	45
4.7	Slukkeforløp for overgangssonearmaturer.	45
4.8	Soneinndeling for nattbelysning ved kjøretøydeteksjon	47
4.9	Ledelys ved hjelp av LED-striper [25]	48
4.10	Dynamiske grønne rømningslys	48

4.11	Belysning i rundkjøring (bilde fra Karmøy-tunnelen i Rogaland). [35]	49
5.1	Forenklet flyttdiagram for beregning av effekt i LED-anlegg.	52
5.2	Filtrert adaptasjonsluminans	54
5.3	Spektrometer.	56
5.4	Levetidskostnad. [46].	57
6.1	Total effekt over hele perioden for teoretisk utforming.	60
6.2	Effekt for ulike måter å styre overgangssonen.	61
6.3	effekt for dagens konvensjonelle anlegg.	62
6.4	Sammenligning av effekt til de to anleggene.	63
6.5	Sammenligning av effekt for innkjøringssonen til de to anleggene.	63
6.6	Sammenligning av effekt for indre sone til de to anleggene.	64
6.7	Sammenligning av spektre.	65
6.8	Sammenligning av Ra-verdier.	66
6.9	Sammenligning av Macadamps-ellipser.	66
6.10	Sammenligning av totale levetidskostnader.	67
6.11	Sammenligning av levetidskostnader for innkjøringssonen.	68
6.12	Sammenligning av levetidskostnader for indre sone.	68
7.1	Relativ energibesparing for summerte soner.	76
7.2	Relativ levetidskostnad for summerte soner (ikke korrigert for kjøretøysdeteksjon).	77
F.1	Antall kjøretøy per time i gjennomsnitt i 2015 gjennom Marienborgtunnelen [27].	xvi

Tabeller

2.1	Oppbygning av LED-armatur	6
2.2	Oppsummerte fordeler ved LED	12
4.1	Fysiske parametere Marienborgtunnelen	40
4.2	Krav for midlere luminans i Marienborgtunnelen	40
4.3	Armaturodata for dagens belysningsanlegg [51] [32]	41
4.4	Dimmeforløp for armaturer tilknyttet de ulike sonene ved ulike verdier for L20	46
5.1	Av/På-tid for sonene ved kjøretøy fra Marienborgtunnelen	53
5.2	Av/På-tid for sonene ved kjøretøy fra rundkjøringen	53
5.3	Armaturer i teoretisk utforming	54
5.4	Total effekt for dagens konvensjonelle armaturer inkludert forkoblingsstyr [32]	55
5.5	Effekt i Marienborgtunnelen	55
5.6	Reguleringsparametere for dagens konvensjonelle anlegg [52].	55
5.7	Frekvens og kostnad for utskiftning. [35] [32].	58
5.8	Parametere for energikostnader.	58
6.1	Energibruk i Marienborgtunnelen for teoretisk utformet anlegg	61
6.2	Sammenligning av energibruk med kuttet overgangssone	61
6.3	Belysning ved kjøretøydeteksjon	61
6.4	Besparing med kjøretøydeteksjon	62
6.5	Sammenligning av energibruk med kjøretøydeteksjon.	62
6.6	Energibruk i Marienborgtunnelen for dagens konvensjonelle anlegg	62
6.7	Sammenligning av maksimale effekter.	64
6.8	Sammenligning av effekter i indre sone.	64
6.9	Sammenligning av energi for perioden.	64
	65	
	65	
6.12	Nåverdier for LED-anlegg.	67
6.13	Nåverdier for konvensjonelt anlegg.	67
6.14	Sammenligning av levetidskostnader.	69

Kapittel 1

Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Norge er et land med nesten 1200 tunneler, som tradisjonelt har blitt belyst med dampalamper, i all hovedsak høytrykk-natriumslamper. Disse lampene møter alle krav satt til belysningen av tunnelene, og gir et godt og energieffektivt lys. Likevel blir disse armaturene i flere nye tunnelinstallasjoner nedprioritert til fordel for LED-armaturer. Dette grunnet LED-teknologiens voldsomme utvikling innen belyningsformål de siste årene. LED-teknologien har andre egenskaper enn de konvensjonelle lampene, og av den grunn gir dette muligheter for helt nye utforminger av tunnelbelyningsanlegg.

1.2 Formål

Formålet med denne oppgaven, er å undersøke LED-teknologiens muligheter til å skape belyningsløsninger i tunneler som møter kravene til norske tunneler på en bedre og mer effektiv måte enn dagens konvensjonelle armatur- og styringsløsninger. På bakgrunn av mulighetene til LED-teknologien, er løsninger som ikke er rene 1:1-erstatninger av konvensjonelle armaturer og styringsmetoder spesielt interessante. For å vurdere om løsningene med LED-teknologi møter kravene på en bedre og mer effektiv måte, skal de vurderes opp mot konvensjonelle belyningsløsninger i henhold til følgende parametere:

- Energibruk
- Trafikksikker belysning:
 - Lyskvalitet
 - Lystilpasning
- Levetidskostnad
- Førerens opplevelse

På bakgrunn av dette er det ønskelig å besvare følgende overliggende spørsmål: Er LED-teknologien så moden at den kan utkonkurrere de konvensjonelle lyskildene for tunnelbelysning dersom den brukes på riktig måte? Oppgaven er avgrenset til å omhandle biltunneler, og belysningen i kjørebanelen.

1.3 Oppbygning og avgrensninger i oppgaven

Opgaven består av åtte kapitler, fordelt over følgende fem deler:

1.3.1 Teoristudie

Kapittel 2 omhandler et teoristudie av LED, belysning i tunneler og styresystemer for lysstyring. Studiet av LED er avgrenset til virkemåte og fordeler, kontra konvensjonelle lyskilder. Studiet av tunnelbelysning er avgrenset til grunnleggende oppbygning og krav satt av Statens vegvesen. Studiet av styresystemer er avgrenset styresystemer benyttet i tunnelbelysning.

1.3.2 Bakgrunnsstudie

Kapittel 3 omhandler et bakgrunnsstudie hvor alternative belysningsløsninger i tunneler, skapt som følge av LED-teknologiens egenskaper, vil bli undersøkt. Avgrensningen er gjort ved å se på muligheter som potensielt kan møte kravene til Statens vegvesen på en bedre måte, sammenlignet med konvensjonelle løsninger. Bakgrunnsstudiet tar også for seg hvilke av disse løsningene som eksisterer i dagens tunneler, samt relasjon mot tidligere publikasjoner/rapporter.

1.3.3 Utforming

Kapittel 4 tar for seg en teoretisk utforming av et belysningsanlegg med LED-teknologien basert på undersøkte muligheter fra bakgrunnsstudiet. Utformingen er utført i Marienborgtunnelen, hvor det i dag eksisterer et moderne konvensjonelt belysningsanlegg fra 2010.

1.3.4 Metoder for vurdering av utforming

Kapittel 5 tar for seg metoder for praktiske målinger og beregninger utført for vurdering av den teoretiske utformingen, mot det eksisterende konvensjonelle anlegget. Beregningene og målingene er avgrenset til energibruk, trafiksikker belysningskvalitet og levetidskostnad.

1.3.5 Resultater, diskusjon og konklusjon

Kapittel 6, 7 og 8 presenterer resultater, og vurderer, diskuterer og konkluderer i henhold til parameterene under *formål* og den overliggende problemstillingen.

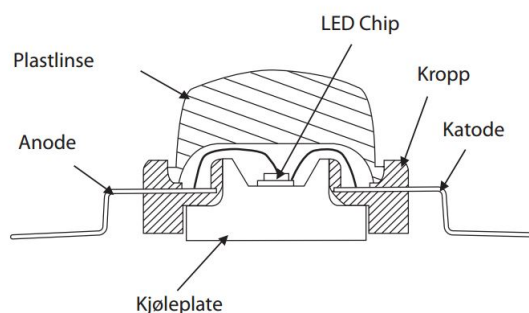
Kapittel 2

Teori

Dette kapitlet tar for seg elementær teori som er nødvendig for å løse problemstillingen. Dette innebærer virkemåten og fordelene til LED, tunnelbelysning og styring av tunnelbelysning.

2.1 LED

LED er en forkortelse for *LysEmiterende-Diode*, og er halvledere som bruker elektrisk energi til å skape energi i form av elektromagnetisk stråling. Dersom denne strålingen ligger innenfor spekteret til synlig lys, kan komponenten benyttes som lyskilde. Figur 2.1 viser tverrsnittet av en *LED-pakke*.



Figur 2.1: Tverrsnitt av LED-pakke. [3]

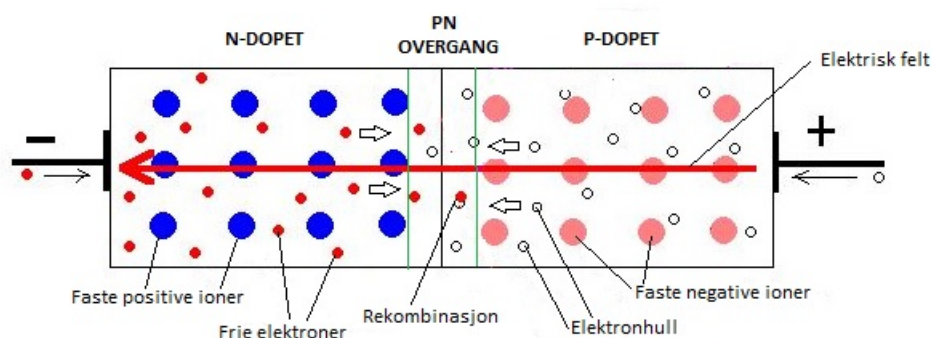
LED-pakken består av en LED-chip, enkel optikk i form av en linse og en kjøleplate. Svært ofte omfatter LED-pakken også en *driver* for og kunne regulere strømforsyningen.

2.1.1 Oppbygning og virkemåte av LED-chipen

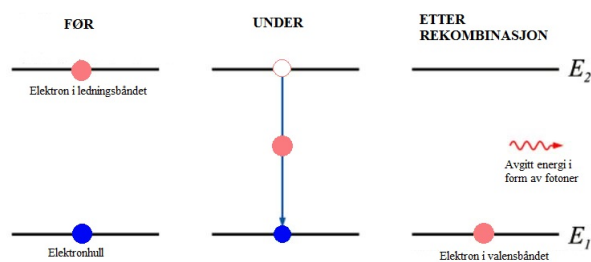
Selve LED-chipen i figur 2.1, består av to ulikt dopede halvledermaterialer satt sammen i serie. Total størrelse på chipen er omkring 1 mm^2 [14]. Begge halvledermaterialene har i utgangspunktet svært dårlig ledeevne, hvilket vil tilsi at de er laget av et stoff hvor alle elektronene er bundet. På atomært nivå betyr dette at det ytterste båndet rundt atomkjernen, som kan fylles opp med elektroner (valensbåndet), er fylt opp. Det eksisterer med andre ord ingen ledige plasser for elektroner (elektronhull) eller frie elektroner (disse beveger seg i lederbåndet, som har et høyere energinivå enn valensbåndet) i materialet som kan lede en elektrisk strøm. I dagens LED-chiper brukes typisk Aluminium-Gallium-Arsenid (AlGaAs) som utgangspunkt [1]. For

og skape egenskapene til LED-chipen, blir de to halvledermaterialene henholdsvis N-dopet og P-dopet. N-dopet vil si at halvleder materialet blir tilsatt et stoff som gjør at det er et overskudd av elektroner. Det vil med andre ord forekomme elektroner i lederbåndet, også kalt frie elektroner. P-dopet betyr det motsatte, nemlig at halvlederen er tilsatt et stoff som gjør at det er underskudd av elektroner. Med andre ord oppstår det elektronhull i valensbåndet. Ved påføre et elektrisk felt, vil disse elektronhullene kunne bevege seg mellom atomene ettersom elektronene bytter plass.

Når plussterminalen på et batteri kobles på den P-dopede siden, og den negative terminalen på den N-dopede, oppstår en såkalt PN-overgang i dioden. På grunn av det elektriske feltet som ligger over halvlederen, vil de frie elektronene på N-siden trekke mot P-siden, og hullene på P-siden trekke mot N-siden (fig 2.2). I området der de to ulikt dopede lederne møtes, oppstår en PN-overgang der de frie elektronene og elektronhullene finner sammen. Denne sammenkomsten heter rekombinasjon, og energi oppstår i form av fotoner når det frie elektronet faller i energinivå fra ledningsbåndet til valensbåndet [1] [2] (fig 2.3).



Figur 2.2: Tversnitt av LED-celle



Figur 2.3: Rekombinasjon av et fritt elektron fra ledningsbåndet til valensbåndet.

Avhengig av hvilket stoff halvlederen er laget av, varierer energimengden mellom båndene (båndgapet), og dermed også energimengden avgitt under rekombinasjonen. Som følge av dette kan ulike bølgelengder oppstå etter ligning (2.1) [2].

$$\lambda = \frac{hc}{E_{\text{båndgap}}} \quad (2.1)$$

Hvor h er Plancks konstant, λ er bølgelengden og c er lysfarten. Dersom det påtrykte elektriske feltet holdes konstant ved hjelp av en kilde, vil en kontinuerlig rekombinasjonsprosess,

med en påfølgende kontinuerlig utsendelse av fotoner oppstå så lenge spenningen over dioden er større eller lik spenningen i ligning (2.2) [2].

$$V_{diode} \geq \frac{E_{båndgap}}{e} \quad (2.2)$$

Der e tilsvarer elementærladningen.

Dersom påført spenning er høy nok, fungerer chipen som en lyskilde, der antall rekombinasjoner er proporsjonal med strømmen som sendes gjennom den.

Spekteret til strålingen som produseres av LED-chipen under rekombinasjonsprosessen, kjennetegnes ved at det er tilnærmet monokromatisk. Dette vil si at all utsendt stråling har nesten samme bølgelengde, og som resultat oppstår smale kurver på spesifikke steder i lysspekteret.

Endres polariteten over LED-chipen, slik at plussterminalen kobles til N-siden, vil det elektriske feltet trekke de frie elektronene og elektronhullene motsatt vei av tilfellet i figur 2.2. Resultatet er at ingen PN-overgang oppstår, og chipen vil blokkere all flyt av elektrisk ladning. Siden chipen kun leder strøm en vei, kan den elektrisk beskrives som en diode [1] (figur 2.4).



Figur 2.4: LED-chipen leder kun strøm en vei, akkurat som en diode.

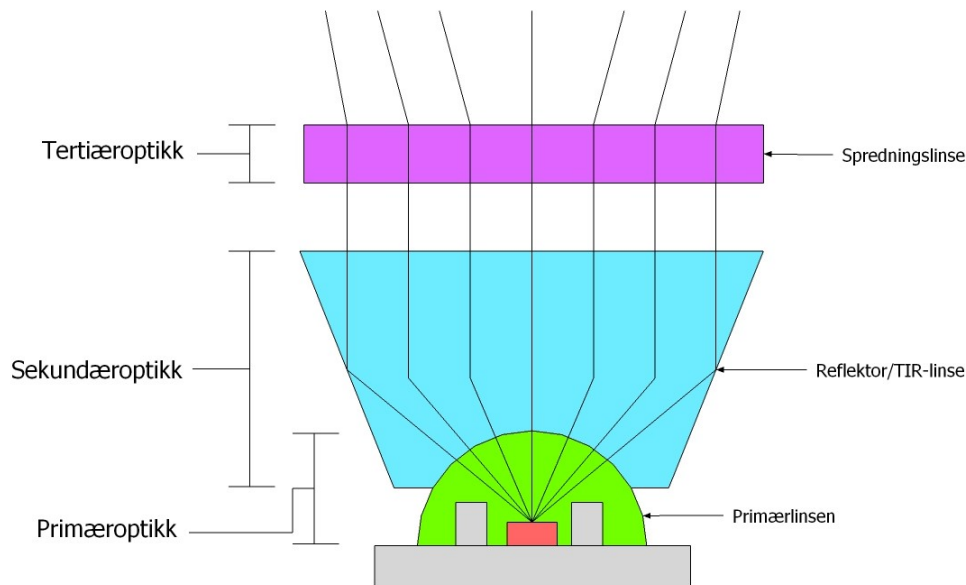
2.1.2 Kjøling og produksjon av varme

De første kommersielle LED-chipene på begynnelsen av 60-tallet, kunne bare produsere bølgelengder i spekteret som tilsvarer rødt lys [1]. Siden den gang har utviklingen gått utrolig raskt, og moderne LED-chiper kan i dag produsere bølgelengder helt fra den ultrafiolette til den infrarøde delen av bølgespekteret. Dersom LED kun brukes til å produsere synlig lys, avgir den på bakgrunn av det trange spekteret ikke infrarød stråling (varmestråling). Dette er en stor fordel kontra konvensjonelle armaturer, som i tillegg til synlig lys avgir store mengder infrarød stråling. Glødelamper kan for eksempel produsere varmestråling av over 90 % av energien den får tilført [14]. Til tross for dette genererer fortsatt LED termisk energi som følge av strømmen gjennom chipen og varmen til omgivelsene. Denne termiske energien kan ha en sterk innvirkning på levetid og antall lumen produsert [12] [3]. Av den grunn benyttes en kjøleplate under LED-chipen (fig. 2.1). Denne platen er laget av et sterkt varmeledende metall som leder varmen vekk fra chipen, ofte gjennom kjøleribber. Grunnet behovet for varmeavledning, fungerer LED faktisk bedre desto kaldere omgivelsestemperaturen er. [14]

2.1.3 Optikk og oppbygning av LED-armaturet

En enkelt LED-chip produserer omkring 50-100 lm , hvilket bare er 1/30 av fluksen fra et lysrør [3]. Av den grunn består en LED-pakke ofte av mange LED-chiper, slik at produsert lysfluks blir stor nok for belysningsformål. LED-chipenes fysiske oppbygning gjør at de utstråler alt produsert lys i en retning (hemisferisk utstråling), i motsetning til for eksempel lysrør hvor lyset går i alle retninger (sferisk utstråling) [14]. Plastlinsen i figur 2.1, kalles primærlinsen og er første del av optikken som kontrollerer utstrålingen. Linsen samler lyset noe, men ikke bedre enn at fordelingen på utgående stråling er alt for spredt til å ha noe praktisk nytte.[16]. Av den

grunn inkluderes sekundær optikk for å samle strålingen ytterligere. Den sekundære optikken består av en reflektor eller en TIR-linse (Total Internal Reflection). Sistnevnte er en spesiell linse som gir et mer samlet lys enn den tradisjonelle reflektoren [16].



Figur 2.5: Optikk i et LED-modul

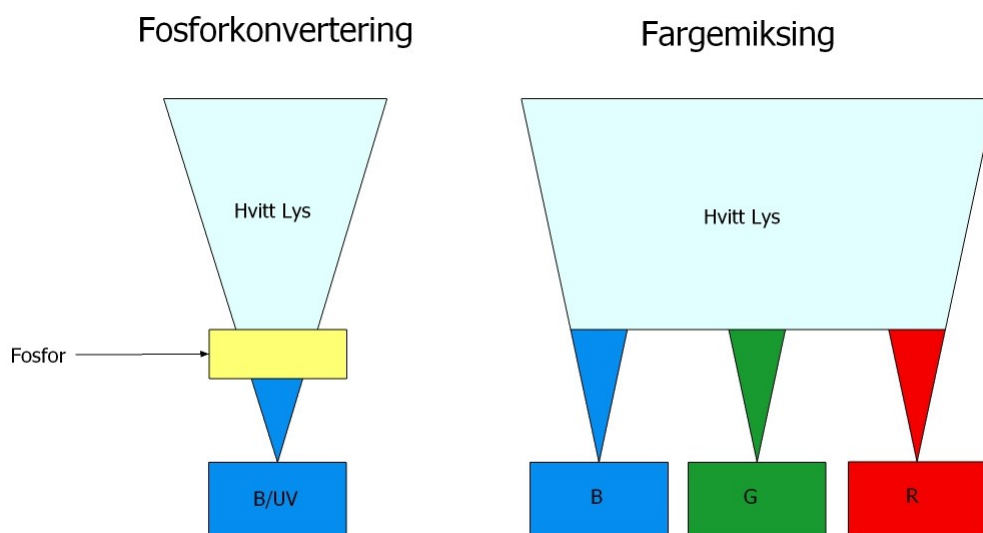
Dersom sekundær optikk og ytterligere mekaniske komponenter inkluderes, snakker vi ikke lenger om en LED-pakke, men om en *LED-modul* [10]. For spesifikke belysningsoppgaver, kan også tertiær optikk inkluderes i LED-modulen. Denne optikken består av en linse som sprer det samlede lyset fra sekundæroptikken til ønsket formål. Dersom LED modulen settes inn i et oppheng, ender vi opp med et *LED-armatur*.

LED-pakke	LED-chip, driver, varmeplate, primæroptikk
LED-modul	LED-pakke og sekundær optikk
LED-armatur	LED-modul og oppheng

Tabell 2.1: Oppbygning av LED-armatur

2.1.4 Hvitt lys

I henhold til praktiske belysningsformål, er det essensielt at LED-modulen må kunne levere hvitt lys. Dette gjøres i dag på følgende to måter: fosforkonvertering og fargemiksing (figur 2.6 [13]).



Figur 2.6: Fosforkonvertering og fargemiksing

Fosforkonvertering

Ved fosforkonvertering benyttes fosfor (lyspulver) til å produsere hvitt lys. Fosforet legges som et lag over chipen, slik at den absorberer strålingen. Ved å produsere høyenergi stråling, enten i det blå spekteret eller i UV-spekteret, sender fosforet ut hvitt lys på samme som i et lysrør. Spektralfordelingen til det utstrålte hvite lyset avhenger av hvilke lag fosforet er satt sammen av [13].

Fosforkonvertering er i dag den mest brukte metoden for produksjon av hvitt lys ved hjelp av LED [13]. Dette grunnet et rikt og behagelig lys, høy virkningsgrad og en fleksibel produksjonsmetode [7].

RGB-Fargemiksing

Ved RGB-fargemiksing (additiv fargeblanding) kombineres primærfargede LEDer (rødt, grønt og blått) med ellers smale spektrale, slik at de sammen danner et lysspekter som tilsvarer hvitt lys. [13] (fig 2.8).

Fordelen med denne metoden er muligheten til å endre farge etter behov, samt at den teoretisk skal ha bedre lysutbytte og levetid sammenlignet med fosforkonvertering [13]. Likevel er ikke denne løsningen foretrukket grunnet dårlig fargestabilitet [13] samt at flere LEDer satt sammen krever mer plass og er dyrere å produsere enn fosforkonvertering. [13]

Fosforkonvertering og fargemiksing kan også kombineres for å skape hvitt lys. Denne løsningen har bedre fargegjengivelse og varmere fargetemperatur, men kan gi en endret lysopplevelse. [3].

2.1.5 Lyskvalitet

LED er en forholdsvis ny teknologi i belysningsammenheng, og det eksisterer mange myter omkring lyskvaliteten i henhold til konvensjonell belysning. Dette underkapittelet tar for seg de vanligste parameterene for lyskvalitet, og relaterer de til LED.

Fargegjengivelse

En lyskildes evne til å gjengi farger, henger sammen med det fargespekteret kilden selv sender ut. Dersom utstrålingen mangler bølgelengder i spesifikke deler av spekteret, kan heller ikke farger i de aktuelle delene av spekteret gjengis. For hvit belysning, benyttes Ra-indeksen som et mål på hvor godt en kilde gjengir farger. Indeksen baserer seg på evnen til å gjengi åtte referansefarger, og indeksen går fra 0-100, hvor $R_a = 100$ er høyest oppnåelige verdi [3]. En typisk myte ved LED er at de leverer en fargegjengivelse som ikke er god nok til vanlige belysningsformål. Dette er ikke tilfellet da LED-produkter stort sett har en Ra-indeks på 80-talet, og kan levere verdier på over 95 [13] [3]. Dette er fullt på høyde med sparepærer og alminnelige lysrør, som vanligvis har en indeks på noe over 80 [3].

Fargetemperatur

Et annet mål på lyskilder, er fargetemperaturen. Dette er et mål på hvilken lysfarge lyskilden har, eller med andre ord hvilke farger i det synlige spekteret den fremhever. Fargetemperatur angis i Kelvin (K), og jo høyere den er, desto kaldere og mer blålig oppfattes lyset. Fargetemperaturen har en direkte sammenheng med lysspekteret fra kilden. Spekteret til lys fra en glødelampe for eksempel, har en høy fordeling av rødt lys. Av den grunn defineres den som varmt lys, med en fargetemperatur på omkring 2700 K. Halogenlampen er noe kaldere, og ligger normalt rundt 3000-3500 K. LED har et rykte på seg for å levere kaldt lys, noe som også stemmer ganske godt da den typiske verdien ligger på omkring 5000-6000 K. Dette kommer av det blå lyset som benyttes ved fosforkonvertering bidrar sterkt på det totale spekteret. For øvrig skjer det en utvikling hele tiden, og i dag finnes det fullt brukbare LED-armaturer med fargetemperaturer ned til 2700 K [3]. Dersom fargekonvertering benyttes, kan også fargetemperaturen endres som følge av forholdene. Ulempen med høy fargetemperatur og LED, er at armaturene blir mindre energieffektive enn om de opereres med kald fargetemperatur [12].

Blending

En av de største utfordringene knyttet til LED-belysning er å holde blendingen innenfor rimelige nivåer. På bakgrunn av det svært lille arealet til LED-chipen, kan belysningsstyrken overgå 300 000 cd/m^2 [8]. Dette er en svært høy verdi sammenlignet med et standard lysrør som vanligvis ligger omkring 17 000 cd/m^2 [8]. På bakgrunn av dette er det ekstremt viktig å velge riktig optikk/reflektor, samt en plassering av armaturet slik at det hindres direkte innsyn som kan forårsake blending.

Kromasitet og fargestabilitet

To andre parametere som er svært viktige når man skal vurdere lyskvaliteten til LED er kromasiteten og fargestabilitet.

Kromasiteten er et mål på en lyskildes evne til å angi ulike farger. Kromasiteten oppgis ofte ved hjelp av MacAdam-ellipser (SDCM) [15], som er ellipser plassert i spesifikke fargekoordinater i CIE-fargerommet. Ellipsene er basert på målinger for det gjennomsnittlige menneskelige øyet, og er ingen absolutte størrelser. Størrelsen på ellipsene angis i steg, og jo større ellipser/steg, desto større er fargeavviket fra referansen hvor fargen fortsatt oppfattes som den samme. Er med andre ord steglengden stor, vil forskjellen på farger oppleves som stor, og fargejevnheten mindre. Mellom 0-4 er toleransen liten, og LED-armaturer i dag produseres ofte med en fargetoleranse på 3 eller lavere [7]. Et stort problem med LED er at armaturer i samme produksjonsserie

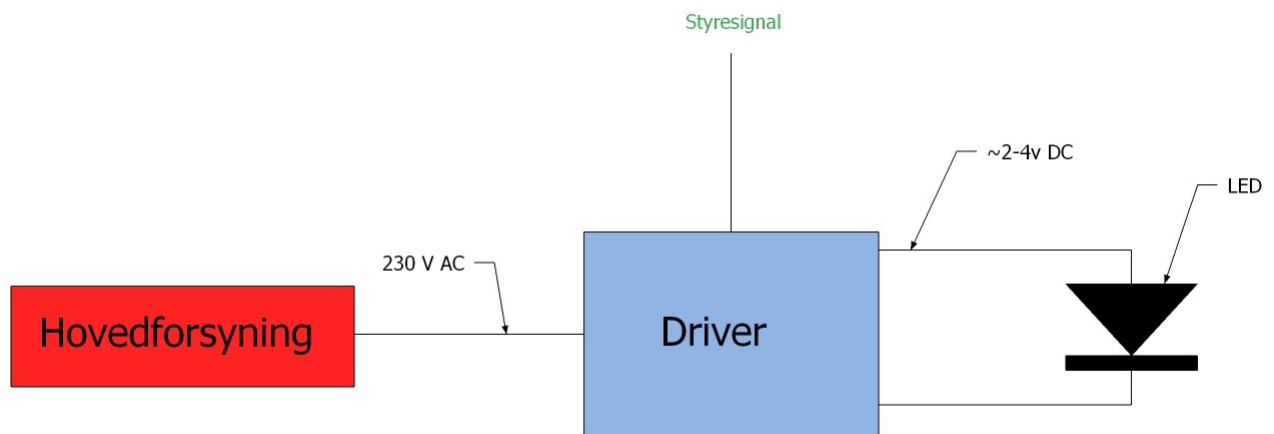
ofte kan ha ulik kromasitet. Av den grunn sorteres ofte armaturer med like Macadam-ellipser sammen, slik at de har samme evne til å angi farger. Dette kalles på fagspråket *binning*. En annen svært viktig parameter for LED er kromasitet over tid, også kjent som fargestabilitet. Fargestabiliteten for ulike LED-armaturer har vist seg å variere stort over tid, likevel er de generelt sett ikke verre/bedre enn konvensjonelle armaturer [15].

2.1.6 Styring og dimming på armaturnivå

En viktig egenskap ved all slags belysning er muligheten til å kunne styre og regulere armaturene. Dette underkapittelet presenterer hvordan LED kan styres og reguleres.

Driver og kontroller

I innledende kapittel ble det nevnt at LED-pakken ofte inneholder en driver. Dette er en forkobling til LED-komponenten som benyttes til å omforme primærforsyningen til egnet verdi for en ønsket drift. Driveren består av kraftelektronikk, som svært ofte er knyttet til en kontroller som muliggjør av/på-styring og dimming.



Figur 2.7: Driver for LED

Kontrolleren kommuniserer ved hjelp av et kontrollsignal basert på et analogt signal eller en digital protokoll. Sistnevnte er mest benyttet. Per dags dato finnes det ingen standardisert protokoll for LED-driverstyring, men mange ulike løsninger som for eksempel DALI, DMX og 1-10V analog-styring kan benyttes.

Hovedpoenget med driveren, er at den muliggjør situasjon- og øyeblikk-bestemte lysnivåer, på bakgrunn av kontrollsignalet den mottar. Driveren kan drive en enkelt LED, eller den kan drive flere LEDer koblet i parallell eller serie. Det er svært viktig å velge en dimmer som er kompatibel med en aktuell LED-pakke, da feil dimmer kan resultere i flimring, dårlig fargestabilitet eller totalt fravær av lys [14].

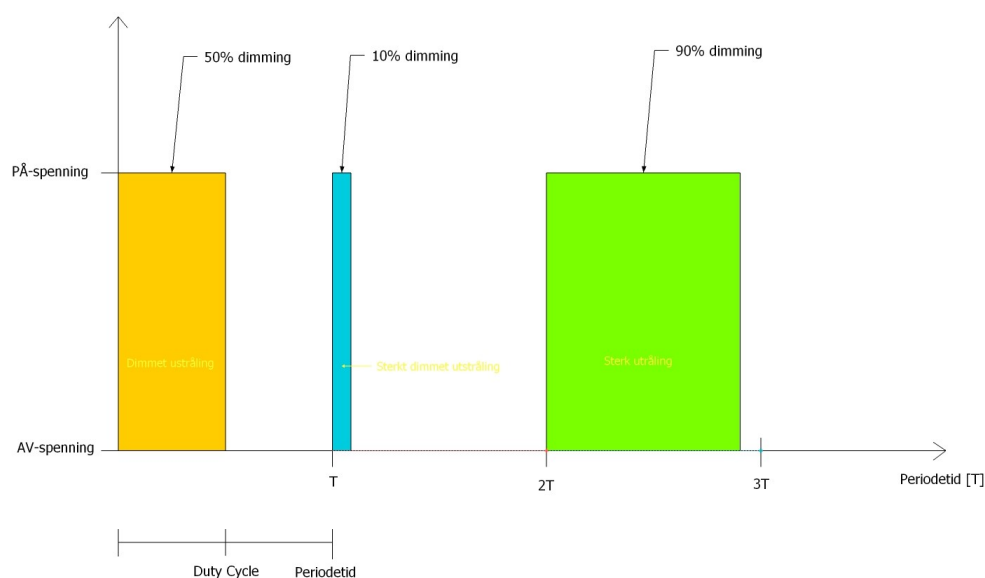
For at driveren skal kunne kontrolleres på bakgrunn av ulike parametere, er den som regel koblet mot en lampekontroller. Denne er igjen tilknyttet et overliggende system som vil bli presentert i kommende kapittel om Styresystemer med LED. Lampekontrolleren har funksjoner som dimming og av/på-styring, og kan også levere toveiskommunikasjon i form av overvåkingsparametere for armaturet. Dette kan være driftstatus (av/på, dimmeprosent), energiforbruk, effektfaktor og temperatur.

Momentan tenning

Det som gjør LED unik i forhold til konvensjonelle armaturer når det kommer til styring, er egenskapen til å tenne momentant med full styrke. Målinger har vist at LED tenner 170-200 millisekunder raskere enn glødelamper, noe som i en tunnelsituasjon med en fartsgrense på 90 km/t kan tilsvare en kjørt distanse på bortimot 6 meter [14]. Dette kan i enkelte situasjoner bety forskjellen på liv og død. I tillegg til lengre oppstartstid, bruker også konvensjonelle armaturer vesentlig lengre tid på å nå full belyningsstyrke. Høytrykk-natriumslamper trenger for eksempel over 10 minutter [14]. I tillegg til dette, trenger den også 2-20 minutter med kjøling, før den kan tennes igjen. LED har her ingen restriksjoner, og kan tennes og slukkes flere tusen ganger i sekundet uten at det påvirker levetid eller lysstyrke [14].

Dimming

En svært viktig egenskap som følge av tenningmulighetene til LED, er trinnløs dimming. I teorien kan LED dimmes på samme måte som konvensjonelle glødelamper, ved hjelp av en variabel motstand (analog dimming). Men dette har vist seg å ha flere ulemper som upresis regulering, dårlig fargestabilitet og unødig effekt i reguleringsmotstand [1] [11]. LED dimmes av den grunn ved hjelp av elektronikk, nærmere bestemt med pulsebreddemodulasjon (PWM, PulseWidthModulation). Dette er en metode hvor strømmen svitsjes binært (av og på) over en satt periode. $P_{\text{å}}$ tilsvarer en konstant amplitude på mellom 2-4 volt [3], mens A_{v} tilsvarer null spenning. Etersom hvor stor prosentandel av periodetiden signalet er på, produseres et bestemt antall rekombinasjoner i chipen. Siden antallet rekombinasjoner er proporsjonal med total utstrålt lysmengde, regnes utstrålingen som tilnærmet lineær med duty cycle.



Figur 2.8: Ulike duty-cycles ved pulsebreddemodulasjons-dimming (PWM).

Periodetiden for signalet velges så lav at signalet ikke oppleves som flimrende for det menneskelige øyet, uansett hvor lav duty cycle skulle være. Ved å benytte PWM kan LED dimmes fra 1-100 % [11], noe som er et vesentlig bredere dimmeområde enn hos konvensjonelle armaturer [14]. Ved å benytte PWM for dimming påvirkes heller ikke lysets fargetemperatur og fargestabilitet [11] [1], noe som er en stor fordel i forhold til analog dimming. PWM brukes også til

fargemiksing, siden antall mulig produserte farger for LED-modulen er proporsjonal med antall dimmenivåer for hver enkelt primærfargede LED-chip.[1]. Ved å for eksempel benytte en 12-bits kontroller kan en enkelt modul produsere 68.7 milliarder ulike farger [1].

2.1.7 Lysutbytte og levetid

LED er kjent for å være energigjerrige og vare lenge, dette underkapittelet går nærmere inn på disse parameterene.

Lysutbytte

Hvor effektivt en lyskilde omformer den elektriske energien til synlig lys, kalles lysutbytte. Det vanlige er å oppgi lysutbyttet i utstrålt fluks (lumen) dividert på effekt forbrukt (watt), lm/W [3]. For LED skal dette være oppgitt fra produsent, men verdien kan ofte være villedende da denne kun ser på utstråling direkte fra chipen, og ikke involverer termiske tap, samt tap i drivere og optikk [12]. Disse mekanismene kan tilsammen redusere effektiviteten med så mye som 30 % [12], og dersom de inkluderes snakker vi om *systemvirkningsgrad* [5]. LED-armaturer i enkeltfarger kan ha en systemvirkningsgrad på over 200 lm/W [12], mens hvite LED-armaturer har en virkningsgrad på typisk 70-140 lm/W . Til sammenligning har en konvensjonell høytrykk-natriumslampe en systemvirkningsgrad på omkring 120 lm/W . Per i dag er ikke forskjellen på hvite LED og konvensjonelle lampers virkningsgrad slående, men potensialet for LED er enormt da det har blitt produsert enkeltfargede LED med virkningsgrad helt opptil 276 lm/W [12]. Det regnes også med at hvite LED innen 2020 vil ha en systemvirkningsgrad på over 200 lm/W [7]. Ved dimming av LED er lysutbytte vesentlig bedre enn ved dimming av andre konvensjonelle lyskilder, da effektforholdet er tilnærmet lineært med utstrålt fluks [20].

Levetid

Fordi LED ikke har noen mekaniske komponenter, gasser under trykk eller glødetråder som kan ødelegges under rystelser, kan levetiden være ekstremt lang sammenlignet med konvensjonelle armaturer. Vanligvis defineres levetiden for LED ved hjelp av L_{70} . Dette er tiden det tar for diodens lysutbytte å falle til 70 % av startverdi. Standard L_{70} -verdi for de fleste LED-armaturer er 50 000 timer [8]. Til sammenligning må konvensjonelle lysrør skiftes ut 2-3 ganger før 50 000 driftstimer er oppnådd, og da taper de i tillegg 10-25 % av opprinnelig lysutbytte før de skiftes ut [7].

De to parameterne som i hovedsak bestemmer levetiden hos et LED-armatur, er varmeavledningen og driveren. Som nevnt taper dioden seg stort ved varme, og som en tommelfingerregel sies det ofte at om omgivelsestemperaturen øker 10 grader, så vil levetiden halveres [7]. Av den grunn er det svært viktig at varmeavledningen er godt designet, og at den holder på varmeledningsegenskapene over tid. Varmen i dioden påvirkes av omgivelsestemperatur og produksjon av termisk energi ved strømgjennomgang. Høyere driftsstrøm, betyr med andre ord kortere levetid. Driveren er også en viktig parameter for levetiden, og grunnet dens følsomhet kan den fort bli en flaskehals for systemsdesignet. Er for eksempel levetiden for driveren satt til 40 000 timer, bestemmer dette også levetiden til armaturen da et enkelt driverbytte ofte kan være svært vanskelig [7].

2.1.8 Fordeler med LED - Oppsummering

I belysningssammenheng er LED fortsatt en relativ ny teknologi, likevel har den flere store fordeler kontra konvensjonelle armaturer. Dette gjør at teknologien kan benyttes til å skape

nye og effektive løsninger for belysningsanlegg i tunneler. Under følger en oppsummering av de viktigste fordelene sammenlignet med konvensjonelle armaturer:

Egenskap	Fordel kontra konvensjonelle armaturer
Høyt lysutbytte (lm/W)	Lavere energibruk
Bedre drift jo lavere temperatur	Større driftssikkerhet
Øyeblikkelig slukking og tenning	Helt andre muligheter for dimming/styring
Liten fysisk størrelse	Få begrensninger for armaturplassering
Fleksibilitet med hensyn på optikk	Bedre muligheter for spesifikk lystilpasning
Fleksibilitet i lysfarge/fargetemperatur under drift	Åpner for helt nye løsninger
Lang levetid	Større driftssikkerhet
Robusthet	Bedre egnet for tøffere miljøer

Tabell 2.2: Oppsummerte fordeler ved LED

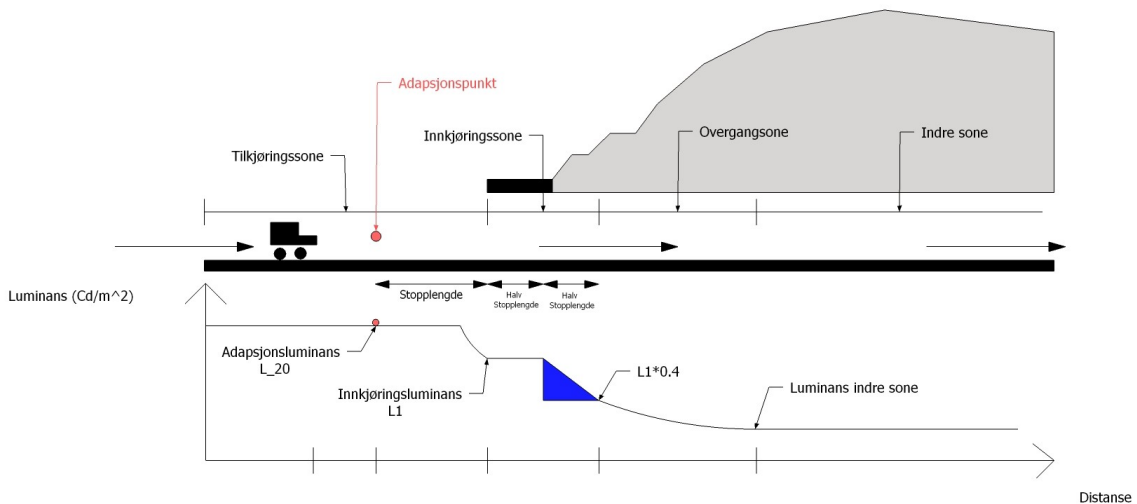
2.2 Tunnelbelysning

Dette kapittelet tar for seg grunnleggende teori omkring alle typer belysning som benyttes i dagens tunneler.

Hensikten med å belyse tunneler, er å muliggjøre at trafikken kan gå hurtig og uten uhell og ulykker [9]. Siden en tunnel på dagtid har en svært lav luminans på innsiden i forhold utsiden, er hovedutfordringen for tunnelbelysning å adaptere trafikantens øyne raskt nok. Adaptasjonstiden er lengre jo større forskjell det er mellom dagslys og mørke, og full adaptasjon oppnås først etter en halv time. Likevel er mye gjort i løpet av 15-20 sekunder. [20] Dersom ikke øynene rekker å adaptere raskt nok, har ikke trafikanten evnen til å oppfatte tunnelflater eller eventuelle hindringer, noe som kan være svært kritisk.

2.2.1 Inndeling i ulike soner

For å adaptere førerens øyne på best mulig måte, deles tunnelbelysningen inn i følgende fem soner med tilhørende tiltak [9] [20]:



Figur 2.9: Soneinndeling med luminansforløp

Tilkjøringssone

Dette er sonen foran selve tunnelåpningen hvor det settes i verk tiltak for å redusere luminansen, slik at differansen når føreren kommer inn i tunnelen blir minst mulig. Det finnes mange ulike tiltak, men det mest effektive er å legge tunnelinngangen slik at det blir minst mulig himmellys i synsfeltet frem mot tunnelen. I denne sonen bestemmes også *adaptasjonsluminansen*. Dette er en verdi som benyttes for dimensjoneringen av videre luminansnivåer i tunnelen. Definisjonen på adaptasjonsluminansen (L_{20}) er den midlere luminansen i et synsfelt som utgjør 20 grader fra bilførerens øye, med synsretning mot et punkt 1,5 meter over kjørebanelen i en avstand tilsvarende stopplengden fra tilkøringssonen til innkjøring i tunnelen. Plasseringen avhenger med andre ord av fartsgrensen. De nøyaktige kravene for avstand og fartsgrense er definert av Statens vegvesen, og vil bli ytterligere presisert i neste kapittel som omhandler krav.

Innkjøringssone

Dette er sonen umiddelbart etter tunnelåpningen, hvor luminansen er den høyeste i hele tunnelen. Den faktiske luminansverdien (L_1) settes som nevnt på bakgrunn av adaptasjonsluminansen, samt fartsgrensen og årsgjennsnittstrafikk (ÅDT). Poenget er at luminansen må være såpass nærme luminansen utenfor, at øynene uten problemer kan oppfatte videre tunnelforløp. Lengden på innkjøringssonen bør være minst like lang som stopplengden ved aktuelle hastighet. Etter omkring halvkjørt sone, dimmes luminansen lineært til 40 % av L_1 i løpet av den resterende halvdel (fig. 2.10).

Overgangssone

Dette er som navnet indikerer en overgang mellom innkjøringssonen og indre sone. Her reduseres luminansen ytterligere etter hvor langt inn i tunnelen føreren kommer, uten av synsbetingelsene blir utilstrekkelige. Lengden på denne sonen bestemmes av ÅDT, adaptasjonsluminans og kjørehastigheten. Spesifikke krav for overgangssonen kommer i neste kapittel som tar for seg forskrifter og krav i norske tunneler.

Indre sone

I denne sonen er luminansen på sitt laveste i hele tunnelen, da førerens øyne har tilpasset seg det lave luminansnivået. Nivået settes av ÅDT og fartsgrense, og spesifiseres ytterligere i neste kapittel.

Utkjøringssone

I denne sonen adapteres kjørerens øyne til luminansen utenfor mens han kjører ut av tunnelen. Dersom det er en tunnel med trafikk i begge retninger, innebærer dette det samme som innkjøringssonen i motsatt kjøreretning. Dersom det er separate løp, er adaptasjonen fra mørke til lys mye raskere en motsatt, slik at sonen har en vesentlig kortere lengde enn innkjøringssonen.

Nattbelysning

Ved nattbelysning settes luminansen i hele tunnelen som gjennomgående, tilsvarende luminansen i indre sone.

2.2.2 Kontrast i tunneler - Symmetrisk lys og motlys

For å kunne se et objekt i kjørebanelen, må objektluminansen (L_0) være forskjellig fra bakgrunns-luminansen (L) objektet sees mot [9]. Hvor synlig objektet er, angis av luminansforskjellen ($L_0 - L$) eller kontrasten (C), angitt av følgende likning.

$$C = \frac{|L_0 - L|}{L} \quad (2.3)$$

Luminansen fra vegbanen/tunnelveggene har med andre ord mye å si for hvor godt synlig et objekt er. Dette henger igjen sammen med hvordan tunnelen er belyst. De to prinsippene som er mest benyttet for tunnelbelysning er symmetrisk lys og motlys.

Symmetrisk lys

Symmetrisk lys fordeler lyset symmetrisk i vertikalplanet i tunnelens lengderetning. Dette fører til gode kontraster mellom flater med ulik refleksans. Dette er den vanligste formen for belysning, og brukes overalt i tunnelen, spesielt i indre sone og ved nattbelysning.

Motlys

I innkjørings- og overgangssoner, kan det benyttes motlys. Dette er armaturer hvor en større del av lyset reflekteres mot føreren, noe som skaper en negativ kontrast. Dette gjør at objekter i kjørebanelen blir lettere å detektere for føreren. Motlys kan også benyttes til å redusere strømforbruket med opptil 30 % mens det påkrevde luminansnivået opprettholdes, samt at installasjonskostnader er lavere enn ved symmetrisk lys. Motlys bør unngås i tunnelinn ganger som slipper inn mye dagslys, og tunneler med mye tungtrafikk, da det ved begge tilfeller kan gi redusert kontrast.

2.2.3 Luminansjevnhet i tunnelbelysning

God luminansjevnhet er nødvendig for å oppnå gode synsforhold og visuell komfort for trafikanter [9]. I praksis er det umulig å lage lysanlegg i tunneler som gir helt jevn luminans fra veidekket. Dette fordi mange parametere både i armaturer og veidekke/tunnelvegger kan spille inn. Eksempler er fuktighet og slitasje i veidekket eller forurensning, lystilbakegang og optisk design av armaturene. Av den grunn settes det krav til hvor stor grad av ujevnhet som kan tillates. Dette angis ofte ved hjelp av følgende parametere:

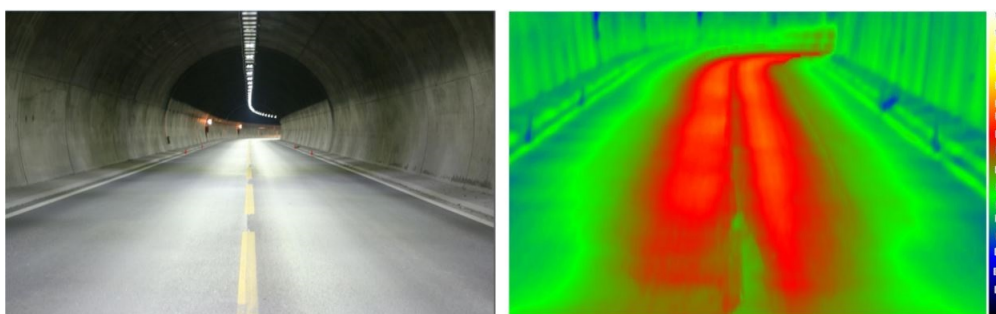
Total luminansjevnhet:

$$U_0 = \frac{L_{min}}{L_{mid}} \quad (2.4)$$

Langsgående luminansjevnhet (langs senterlinjen for hvert kjørefelt):

$$U_1 = \frac{L_{min}}{L_{max}} \quad (2.5)$$

For å bestemme nevnte luminansjevnhet, benyttes ofte et luminanskamera.



Figur 2.10: Bilde med hhv: ordinert kamera (t.v) og luminanskamera (t.h). [25]

Figuren på bildet har en verdi av $U_0 = 0.21$ [25], noe som betyr en sterk lysfordeling rett under armaturet og en dårlig jevnhet.

2.2.4 Blending og flimmer i tunnelbelysning

Blending og flimmer er fenomener som kan oppstå som følge av ugunstig utforming av tunnelbelysningsanlegg.

Blending

Tunnelbelysningen skal utformes slik at den ikke blander trafikanter. Blending minsker kontrasten, og hindrer synligheten til objekter som igjen kan skape farlige situasjoner. Ofte benyttes synsnedsettende blending, eller TI (Threshold Increment) som parameter for å måle blendingen. TI betegnes som den prosentvise økningen i luminans som må til for å gjøre et objekt som så vidt er synlig uten blending, synlig når blendingen er tilstede. Rent matematisk beregnes TI på følgende måte:

$$TI = \frac{\Delta L_2 - \Delta L_1}{\Delta L_1} 100\% \quad (2.6)$$

Hvor ΔL_1 er terskelverdien (minste luminansforskjell for å oppfatte objektet) uten syns- nedsettende blinding, mens ΔL_2 er terskelverdien med synsnedsettende blinding. TI tilnærmes ofte ved hjelp av andre formler [9].

Flimmer

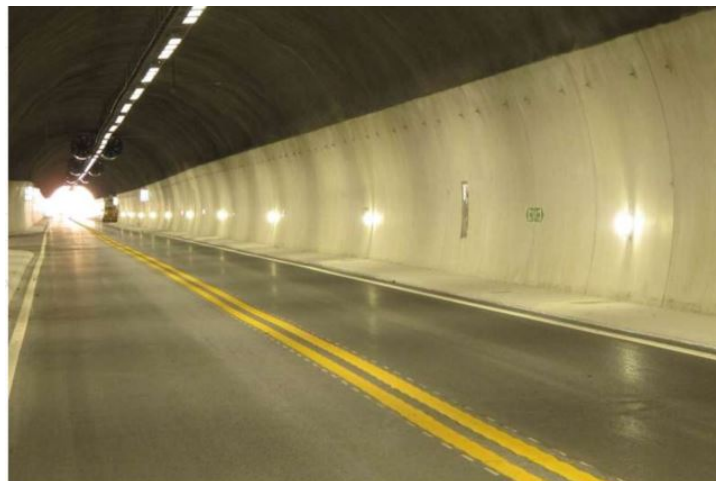
Dersom en ugunstig kombinasjon av fart og armaturavstand forekommer, kan det i lengderet- ningen oppstå flimmer som virker ubehagelig for føreren og kan føre til epilepsianfall. Flimmer- frekvensen i Hz er gitt av [21]:

$$f_{flimmer} = \frac{v}{d_{armaturer}} \quad (2.7)$$

hvor v er kjørefarten i m/s og $d_{armaturer}$ er senteravstanden mellom armaturene i m .

2.2.5 Ledelys

Ledelys som markerer videre forløp for veibanen/tunnelen, kan benyttes til å forbedre den visuelle ledningen i tunneler. Bruken av dette er særlig aktuelt i innkjørings- og overgangssonen, samt i dårlig belyste lavtrafikkstunneler. Ledelys kan plasseres i veibanen eller langs veggen i tunnelen, og kan benyttes som rømningslys ved eventuell brann.



Figur 2.11: Ledelys i Nestunnelen. [23]

2.2.6 Nødbelysning

Nødbelysning i tunneler omfatter sikkerhetsbelysning og rømningslys. Sikkerhetsbelysning er en reserveløsning ved strømbrytning, og arrangeres slik at hvert fjerde armatur skal fortsette å lyse ved strømbrytning. Rømningslys er markeringslys som skal gjøre det mulig å komme ut av tunnelen til fots i en nødsituasjon.

2.2.7 Oppbrytning av monotoni

Tunneler er i praksis like sikre eller sikrere enn tilsvarende vegstrekninger i friluft, likevel byr tunneler på følgende særegne utfordringer knyttet til førerens komfort [22]:

- Manglende referanserammer: ingen referanser i form av landskap eller bebyggelse. Vanskeligere for føreren å vurdere avstander og helningsgrader.
- Monotoni: ensformig opplevelse av å kjøre i tunnel i forhold til friluft. Føreren kan bli trøtt og ukonsentrert.
- Frykt og ubehag: en betydelig del av den norske befolkningen har et visst ubehag ved å kjøre i tunneler med tanke på brann, å bli innestengt, lysforhold, kollisjon med møtende trafikk eller dårlig tunnelkonstruksjon. I underkant av 1 % av befolkningen har også sykkelig tunnelangst.

Alle disse forholdene kan begrenses ved å innføre belysningstiltak som bryter opp monotonien. Dette kan for eksempel være endring av lysfarge i korte seksjoner underveis i indre sone.

2.2.8 Lystilbakegang og vedlikeholdsfaktor

Lysnivået for et tunnelbelysningsanlegg synker med levetiden grunnet lystilbakegang, og tilsmussing fra støv og andre partikler som opphoper seg på armaturer og tunnelflatene. Dette inngår i belysningsanleggets dimensjonerende vedlikeholdsfaktor, som refererer installert verdi mot faktisk verdi over et tidsforløp. En typisk verdi for vedlikeholdsfaktoren er 0,75, hvilket betyr at når anlegget er nyinstallert må det være minst 33 % overdimensjonert for holde kravene over tid.

2.3 Forskrifter og krav for norske tunneler

Dette kapittelet benytter teorien fra foregående kapittel, og tar for seg forskrifter og krav for norske tunneler.

Kravene for utforming av belysning og elektriske anlegg i norske tunneler er gitt av *veinormalene*, som utgis av Statens vegvesen [9]. Normalene er gitt med hjemmel i forskrifter etter vegloven paragraf 13, vedrørende anlegg av vei [21]. Samlingen omfatter både veier og tunneler, og bygger i stor grad på internasjonale standarder tilpasset særnorske behov. Ut i fra nevnte samlinger, har Statens vegvesen utarbeidet flere håndbøker som skal fungere som veiledninger for utbyggere. I henhold til denne oppgaven er de mest relevante:

Vegtunneler, N500 [21]: Tar for seg kravene til belysningsanlegget og det elektriske anlegget.

Teknisk planlegging av veg- og tunnelbelysning, V124 [20]: En veiledning for hvordan belysningsanlegget i tunneler bør utformes slik at kravene i N500 tilfredsstilles.

2.3.1 Krav for belysning

I Norge er grunnregelen at tunneler med lengde over 100 meter skal ha belysning [20]. Kravene for belysningen er i stor grad bygget på CIEs (Commission Internationale de l'Eclairage) internasjonale standard for belysning, 088:2004.

Krav for luminans i soner

Midlere luminans for de ulike tunnelsonene er som nevnt variabel gjennom tunnelen. Faktisk verdi reguleres av følgende parametere:

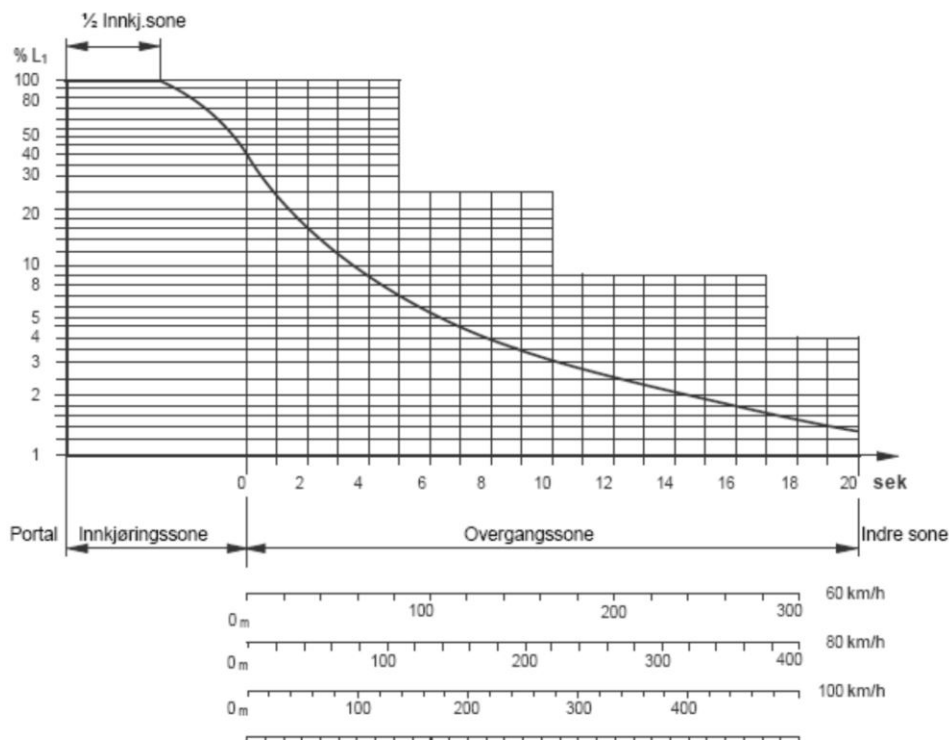
- Adaptasjonsluminansen
- Tunnellengden
- Trafikkmengden (ÅDT)
- Tunnelklassen (Størrelse på tunnelrom)
- Fartsgrensen

Statens vegvesen benytter følgende tabell for å fastsette luminansnivåene:

ÅDT (10)		<2 500	2 500–4 000	4 000–8 000	>8 000	
Sone	Fartsgrense ¹⁾	-	50 km/t	80 km/t	50 km/t	80 km/t
	Innkjøringssonens første halvdel	50 cd/m ²	1,5%	3,0%	2,5%	5,0%
	Indre sone dag	0,5 cd/m ²	2 cd/m ²	2 cd/m ²	2 cd/m ²	4 cd/m ²
	Indre sone natt	0,5 cd/m ²	1 cd/m ²	1 cd/m ²	1 cd/m ²	2 cd/m ²

Figur 2.12: Krav til midlere luminans i tunnelsonene [20]. Innkjøringssonen er gitt som % av adaptasjonsluminansen.

Innkjøringssonen skal være like lang som avstanden fra adaptasjonspunktet til tunnelåpningen, med andre ord stopplengden. Kravene presiserer at luminansnivået skal være konstant i henhold til figur 2.12 i første del av sonen, og deretter reduseres lineært til 40 % av startverdi før overgangssonen starter. Videre luminansreduksjon i overgangssonen skal basere seg på følgende kurve, definert av CIE:



Figur 2.13: CIEs-Luminansreduksjonskurve for dagslysførhold [20]

Ligning for kurven [20]:

$$L_{indre} = L_1(1,9 + t)^{(-1,4)} \quad (2.8)$$

L_1 tilsvarer verdi for innkjøringssonens første halvdel, som presisert i figur 2.12. For tunneler med ÅDT større enn 2500, kan overgangssonen avsluttes/kuttes der hvor kurven angir et luminansnivå som er tre ganger så høyt som indre sonens midlere luminans, dersom indre sonens luminans er $2cd/m^2$ på dagtid. Ved tilfeller i indre sone på $4cd/m^2$ eller høyere, kan overgangssonen avsluttes/kuttes der hvor kurven angir et luminansnivå som er to ganger høyere enn indre sonens luminans. Ved nattbelysningen skal belysningen være gjennomgående med samme verdi som indre sone natt. Vegvesenet har ingen krav for når systemet skal gå over til nattmodus, og ofte benyttes et tidspunkt basert på et astronomisk ur eller adaptasjonsluminans.

Krav for luminansjevnhhet

Vegvesenet har følgende krav for luminansjevnhhet i indre soner og overgangssoner [21]:

Total luminansjevnhhet:

$$U_0 = \frac{L_{min}}{L_{mid}} \geq 0,4 \quad (2.9)$$

Langsgående luminansjevnhhet (langs senterlinjen for hvert kjørefelt):

$$U_1 = \frac{L_{min}}{L_{max}} \geq 0,6 \quad (2.10)$$

I tillegg kreves det at tunnelveggen nedre del, fra bakken og opp til 2 meters høyde, skal ha en midlere luminans på minst 60 % av nærmeste kjørefelts midlere luminans. Dette blir lettere oppfylt dersom veggene males lyse. LED har vist seg å ha høy lysfordeling under armaturene, av den grunn er det viktig av luminansjevnhhet kontrolleres.

Krav for blending og flimmer

Ugunstig utforming av belysningsanlegg i tunnel kan som nevnt føre til blending og flimmer. I henhold til Vegvesenets retningslinjer bør verdier av $f_{flimmer}$ i ligning (2.7) ikke ligge mellom 4-11 Hz med varighet i over 20 sekunder [20].

For blending skal TI helst være lavere enn 10 %.

Krav for ledelys

Vegvesenets krav til ledelys er at de under normale trafikkforhold i en kon med vinkel $2 * 15^\circ$, ikke skal overstige 40 candela. Videre anbefaler Vegvesenet å bruke det i lavtrafikkerte tunneler med dårlig belysning, samt i innkjørings- og overgangssoner [20]. Det er også erfart at ledelys i kjørebanelen skaper store problemer i henhold til tilsmussing og skader, noe som gjør at ledelys plassert på veggen ca. 1 meter over kjørebanelen er å foretrekke.

Krav for nødbelysning

I henhold til sikkerhetsbelysning, har Vegvesenet et krav om at denne skal lyse minimum 1 time etter at strømmen har falt ut. Avstanden mellom armaturene behøver ikke være mindre enn 50 meter [20]. Rømningslys skal etter Vegvesenets krav ha maksimum 25 meters avstand, og plasseres maksimalt 1,5 meter over kjørebanelen. Minste opprettholdte lysstyrke fra hvert enkelt lys skal være $0,1cd^*$ (innbyrdes avstand mellom lysene [m]) i alle retninger som de kan sees fra.

Nødutganger skal markeres med grønne markeringslys, og i nødsituasjoner anbefales blinkende lys med frekvens 1-2 Hz og lysstyrke på minimum 150 cd i alle retninger [20]

Krav for oppbrytning av monotoni

I henhold til å bruke belysning for å bryte opp monotonien i tunneler konkluderer Vegvesenet med at det foreligger for lite forskning, og at det i dag ikke finnes noe dokumentasjon som viser at slike tiltak gir økt sikkerhetsgevinst [22]. Til tross for dette, presiseres det at oppmerksomhetsvekkende tiltak som oppbrytning av monotoni må risikovurderes [20].

Krav for lystilbakegang og vedlikeholdsfaktor

Vegvesenets ønsker at beregnede verdier for midlere luminans skal være oppgitt i *driftsverdier*. Dette vil si lik 75 % av nyverdi [20].

2.3.2 Krav for bruk av LED i tunneler

Vegvesenet har utviklet egne lystekniske og elektriske krav som bør tilfredsstilles ved bruk av LED-armaturer i deres tunneler. Kravene er som følger [20]:

- Fargetemperatur: 4000-6000 K
- $R_a \geq 75$
- $TI \leq 6\%$ (hele tunnelen)
- LED-armaturer skal være dimmbare.
- Lysutbytte for armatur: $\geq 90lm/W$
- Effektfaktor: Full drift: $\cos\phi \geq 0.95$, 20 % drift: $\cos\phi \geq 0.75$
- Overharmoniske: Full drift: $THD \leq 8\%$, 20% drift: $THD \leq 20\%$
- Maks inrush må tas hensyn til ved prosjektering
- Levetid skal være basert på L_{70} , og konsekvenser ved økt strømstyrke skal være kjent.
- Driftstrøm i mA knyttet til levetid skal være oppgitt.

Armaturene skal være enkle å vedlikeholde og hensiktsmessig utformet med tanke på utskifting. De skal også være enkle å holde rene, spesielt i kjøleribbene [20] slik at de ikke ødelegges av termisk varme. På bakgrunn av det sure miljøet som oppstår av utslipp fra eksos kan dette være et problem, da LED-armaturer ofte er laget av aluminium grunnet den gode varmeavledningen. Siden aluminium er mindre edelt enn for eksempel syrefast stål, korroderer det lettere, og av den grunn må det legges inn et galvanisk skille. Alt elektrisk utstyr i norske tunneler skal være CE-merket og ha en samsvarserklæring fra aktuelle produsent [21].

2.4 Styling av belysning i tunneler

For å møte kravene til Statens vegvesen på en god og energieffektiv måte, er det viktig at belysningen må kunne styres og reguleres.

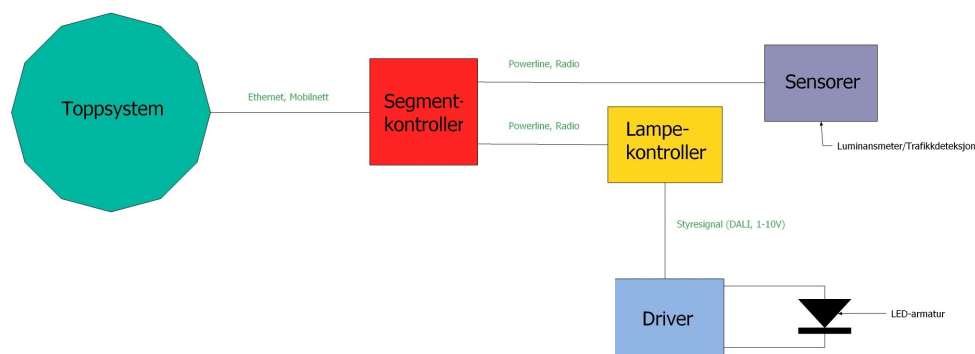
2.4.1 Utgangspunkt

Utgangspunktet for et styresystem i tunnel, er armaturenes evne til å endre belysningen som følge av forskjellige pådrag. Ved å benytte ulike styringsparametere, kan pådraget reguleres ved hjelp av en lampekontroller eller inn/ut-kobling av kurser til å gi ønsket luminans. I tunneler er følgende styringsparametere mest aktuelle:

- Forhåndsprogrammerte scenarioer: pådrag som følge av astronomisk ur eller tid på døgnet.
- Luminansmåler: sensor som måler luminans/adaptasjonsluminans utenfor tunnelåpningen.
- Bevegelsessensor/Detektor: sensorer som detekterer trafikk. Kan være optisk kamera, in-frarødt kamera, radar eller induktiv sløyfe.

2.4.2 Oppbygning av et styresystem

Armaturene kan enten styres lokalt eller sentralt. Ved lokal styring sendes parameterne rett inn på armaturene hvor pådraget reguleres, for eksempel. av/på-belysning som følge av deteksjon ved fotocelle. Denne styremåten har klare begrensninger, og av den grunn benyttes som regel sentral styring. Oppbygningen av et slik system kan variere, men en vanlig løsning er at armaturene er tilknyttet en segmentkontroller/PLS (Programmerbar Logisk Styring) som videre er koblet mot et toppsystem [17] [32] [18]. Ved konvensjonell belysning reguleres belysningen ved å koble kurser inn/ut med en PLS, mens det ved LED er mer aktuelt å benytte seg av en segmentkontroller som kommuniserer med lampekontrollere som vist i følgende figur:



Figur 2.14: Mulig oppbygning av sentralt styresystem med LED

PLS/segmentkontrollers oppgave er å automatisk regulere systemet på bakgrunn av forhåndsinstallert program og/eller aktuelle parametere. Den skal også sende informasjon til toppsystemet, som har til rolle å overvåke systemet. Mange toppsystemer har også muligheten for å gå inn og overstyre PLS/segmentkontroller, dersom dette skulle være hensiktsmessig. Toppsystemet i en tunnel, vil typisk være Vegtrafikksentralen (VTS) eller en lokal driftssentral. Det kan være flere PLS/segmentkontrollere under et toppsystem, og en segmentkontroller/PLS kan ha mange armaturer eller sensorer under seg.

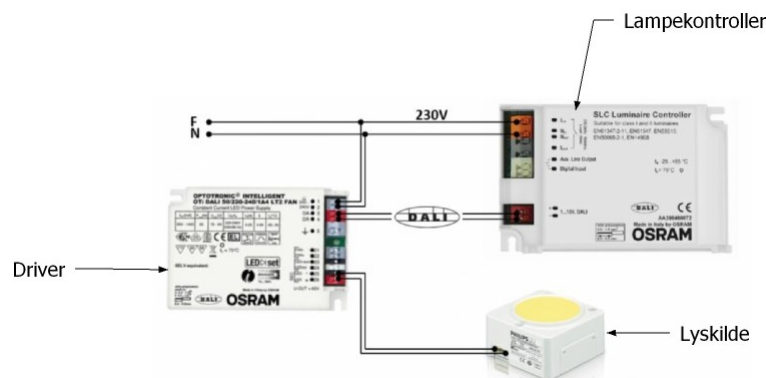
2.4.3 Styresystemer med konvensjonell belysning

Tradisjonelt har belysningen i tunneler vært styrt ved å koble inn/ut kurser med armaturer ved hjelp av kontaktstyring i fordelingen, slik at belysningen styres trinnvis i innkjørings- og

overgangssonen. Dette fordi konvensjonelle belysningskilder ikke har muligheten til å dimme armaturene trinnløst på samme måte som LED. Gjerne reguleres belysningen i tunnelen i 4 trinn, dag1, dag2, skumring og natt på bakgrunn av målinger fra lux/luminansmeter utenfor tunnelen [32].

2.4.4 Styresystemer med LED

Ved bruk av LED, har armaturene en vesentlig større fleksibilitet i styringen på bakgrunn av digital kommunikasjon mellom lampekontrolleren og segmentkontroller. Systemet kan på bakgrunn av adressering, dele armaturene inn i bestemte grupper eller styre de individuelt. Armaturene kan også kommunisere toveis for informasjon om effekt eller utfall. Pådraget til armaturene reguleres gjennom segmentkontrolleren, som er tilknyttet toppsystemet og sensorer som vist i figur 2.14. Kommunikasjonen mellom segmentkontroller og lampekontroller baserer seg som regel på *Powerline*, radiokommunikasjon eller egen styrekabel (bus). Powerline er en måte å sende et digitalt styresignal på den allerede eksisterende strømtilførselen til armaturene. Signalet skapes ved å benytte en frekvens som fraviker 50 Hz, for eksempel 116 Hz. Typisk benyttes protokollen LonWorks.



Figur 2.15: Powerline/DALI-løsning fra Osram [32]

Radiokommunikasjon utføres ved hjelp av radiosendere/mottakere, og baserer seg på Zigbee-protokollen i frekvensbandet 2.4 GHz. Fordelen med radiokommunikasjon er at den ikke blir påvirket av støy i form av overharmoniske på strømmettet, som kan være tilfellet dersom Powerline benyttes. Ved bus-styring benyttes en egen styrekabel mellom PLS/segmentkontroller og armaturene. Dette og powerline er de mest benyttede løsningene for kommunikasjon mellom segmentkontroller og lampekontroller, da det både er enkelt og robust. Det er viktig å velge utstyr som passer sammen, og det er tidligere skrevet en masteroppgave som ser på interoperabiliteten mellom segmentkontrollere og lampekontrollere [17].

Toppystemet kan overstyre og motta parametere for hvordan systemet oppfører seg, og fungerer som et brukergrensesnitt mellom veilysholderne og styresystemet. For å sende aktuell informasjon til segmentkontrollerne, kommuniseres det via en internettprotokoll eller trådløs mobilteknologi.

2.4.5 Vegvesentes ønsker for styresystemer i tunneler

Det finnes i dag mange aktører på markedet som leverer komplette løsninger for intelligent belysning i tunnel. Statens vegvesen ser helst at produsenteid programvare (proprietære løsninger), og separate løsninger som krever integrasjon mot øvrig styresystem i tunnel skal unngås [25].

Kapittel 3

Bakgrunnsstudie av belysningsmuligheter i tunneler som følge av egenskapene til LED

Dette kapitlet omhandler bakgrunnsstudiet for oppgaven, som har vært å undersøke alternative belysningsløsninger i tunneler skapt som resultat av LED-teknologiens egenskaper. Det har vært ønskelig å studere løsninger hvor LED benyttes på bakgrunn av teknologiens egenskaper, og ikke løsninger som er 1:1-erstatninger med konvensjonelle armaturer og styringsmetoder. Studiet er avgrenset til all belysning i kjørebanelen, og presenterte løsninger har til felles at de potensielt kan møte kravene til Statens vegvesen på en bedre og mer effektiv måte, sammenlignet med de konvensjonelle armaturene og styringsmetodene. For å vurdere en *bedre og mer effektiv belysningsløsning*, er følgende parametre lagt til grunn:

- Energibruk
- Trafikksikker belysning:
 - Lyskvalitet
 - Lystilpasning (Evnen å tilpasse belysningen slik at trafikksikkerheten ivaretas)
- Levetidskostnad (Investering, drift- og vedlikeholdskostnader)
- Førerens opplevelse

Studerte løsninger vil bli presentert med følgende avgrensninger: en beskrivelse av muligheten/systemet, en mulig teknisk implementasjon, et eller flere konkrete eksempler dersom løsningen benyttes i en eksisterende tunnel. I tillegg vil det henvises til eventuelt tidligere publikasjoner/rapporter som på en eller annen måte relaterer løsningen mot en eller flere av nevnte vurderingsparametrene.

3.1 Generelle muligheter for tunnelbelysning med LED

Utgangspunkt

LED har noen egenskaper som gjelder uavhengig hva armaturene brukes til. I henhold til tabell 2.2, er de aktuelle egenskapene høyt lysutbytte, fleksibilitet med hensyn på optikk, lengre levetid og større robusthet.

Kan skape en bedre belysningsløsning i henhold til

- Energibruk
- Trafikksikker belysningskvalitet
- Levetidskostnad

Beskrivelse

Ved å benytte seg av LEDs generelle egenskaper som høyere lysutbytte, lengre levetid og bedre optikk, kan alle former for belysning i tunnel potensielt møte kravene til SVV på en bedre måte. Et høyere lysutbytte vil bety lavere effekt ved samme luminansnivå, og av den grunn et lavere energibruk. Fleksibel optikk kan brukes til å skape belysning med bedre fargegjengivelse og kromasitet. Lang levetid kan bety færre utskiftninger, hvilket igjen kan bety en lavere levetidskostnad.

Eksisterende løsninger

I 2015 befinner det seg LED-armaturer i over 50 norske tunneler [19], og ved nye installasjoner blir det stadig vanligere å benytte LED. I Region midt er det for eksempel ønsket å ha LED ved alle nyinstallasjoner [27]. For de første installasjonene av LED i tunneler, var høye TI-vedier, dårlig luminansjevnhet og stor varmeproduksjon et vesentlig problem [31]. Dette har forandret seg stort bare i løpet av det siste året, og optikken og varmeavledningen er per dags dato så god at dette ikke lengre er et reelt problem [35].

Tidligere publikasjoner

I 2012 ble det gjort en studie ved KTH i Sverige for å se på lyskvaliteten til LED og høytrykk-natriumslamper ved samme lysstyrke. Konklusjonen her var at LED hadde vesentlig bedre fargegjengivelse og ga bedre sikt [50]. For generelle belysningsformål finnes det også flere undersøkelser som peker på at LED har vesentlige bedre R_a -verdier enn høytrykk-natriumslamper, og at de kan måle seg med R_a -verdier for T5 lysrør [48] [49]. I henhold til lysutbytte og levetid, er det ikke funnet noen publikasjoner som ser på LED i tunneler. For å finne noe datagrunnlag for dette er det tatt kontakt med Hans Øien i Thorn Lighting, som mener at et LED-armatur i dag kan oppnå 40 % besparing i indre sone foran lysrør med samme luminans [35]. Datagrunnlag for dette ligger i Tillegg A. Levetiden for samme LED-armatur kan forventes å være 100 000 timer, noe som er 3 ganger lengre enn det konvensjonelle armaturet [35]. Kostnad knyttet til investering og utskiftning er per dags dato høyere for LED enn konvensjonelle armaturer [35] [32], men grunnet lavere driftskostnader kan levetidskostnaden forventes å ha en lavere verdi.

3.2 Dynamisk innkjøringszone

Utgangspunkt

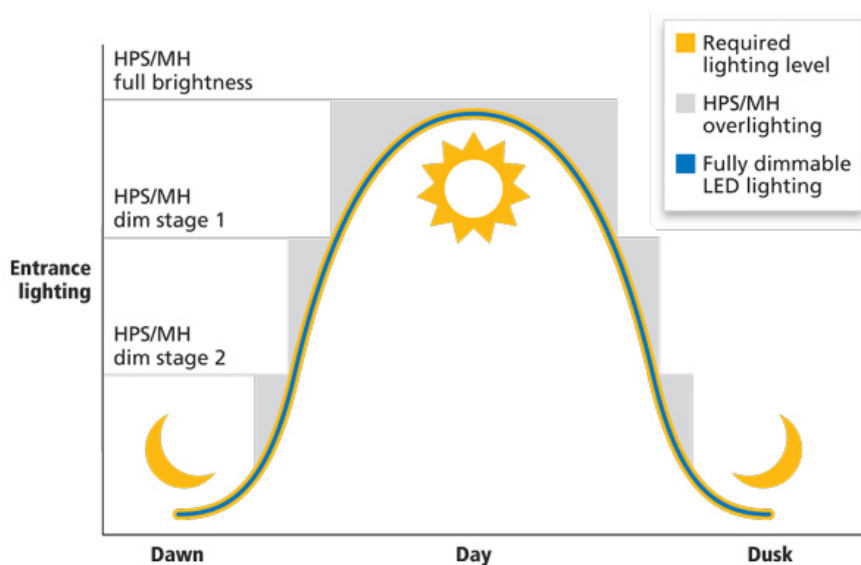
Kontinuerlig regulering av innkjøringssonen som følge av endring i adaptasjonsluminansen.

Kan skape en bedre belsningsløsning i henhold til

- Energibruk
- Trafikksikker belsningstilpasning

Beskrivelse

Ved å benytte seg av LED-teknologiens egenskap til å dimme trinnløst, kan dynamiske innkjøringssoner skapes. Siden adaptasjonsluminansen i tunnelåpningen hele tiden varierer som følge av tiden på døgnet og værforholdene, kan luminansen i innkjøringssonen kontinuerlig reguleres slik at den alltid møter kravene til Statens vegvesen for midlere luminans (figur 2.12). Pådraget bestemmes lineært som følge av adaptasjonsluminansen, og LED-armaturene kan dimmes momentant til ønsket nivå. Dette i sterk motsetning til konvensjonelle armaturer som følger av begrenset dimmeområde må reguleres med inn/ut-kobling av kurser. Følgende figur viser en sammenligning av kontinuerlig dimming mot tradisjonell trinnstyring i innkjøringssonen:



Figur 3.1: Kontinuerlig dimming av LED sammenlignet med tradisjonell trinnstyring [37].

Siden LED-armaturene ved denne løsningen alltid leverer minimal luminans i henhold til kravene, og belsningsstyrken til LED er tilnærmet lineær med effekt, betyr dette et minimalt forbruk av energi. Dette er i sterk kontrast med trinnstyring, hvor belsningen ved store deler av tiden er fryst på et høyere effektnivå enn nødvendig. En dynamisk innkjøringszone kan også gi bedre belsningsforhold enn trinnstyring, dersom adaptasjonsluminansen skulle være svært høy ved for eksempel sterk sol om sommeren. Mens et konvensjonelt belsningsanlegg her ville vært låst på maksimalt effektrinnsnivå, kan LED-armaturene (dersom de er overdimensjonert) dimmes opp slik at de sørger for sterk nok belsning i dette spesialtilfellet. Generelt sett gir dimming av LED i innkjøringssonen en enorm fleksibilitet i anlegget med resultater i form av bedre

energieffektivitet og belysningstilpasning. Sett fra et teknisk perspektiv, er løsningen ganske enkel å implementere: Ved å fysisk plassere armaturene slik at luminansen følger den lineære reduksjonen i siste halvdel av sonen, kan alle armaturer dimmes med samme pådrag. Dette betyr at alle innkjøringsarmaturer kan plasseres i samme digitale styringsgruppe, hvilket gjør systemet enkelt og raskt [26].

Eksisterende løsninger

Innkjøringssoner som benytter LED til trinnløs dimming på bakgrunn av adaptasjonsluminansen har blitt relativt utbredt, og i 2015 eksisterer det 13 tunneler i regi Statens vegvesen som har denne teknologien [19]. En av disse er Harangstunnelen langs E39 i Sør Trøndelag. Denne har installert LED-armaturer med trinnløs dimming i innkjøringssonen som er styrt ved hjelp av adaptasjonsluminansen [29]. Armaturene reguleres trinnløst ved bruk av Powerline, og belysningen kan overstyres ved hjelp av et toppsystem knyttet mot VTS.



Figur 3.2: Harangstunnelen [29].

I henhold til varmeutvikling i armaturene som følge av den høye effekten, er det ikke per dags dato ikke registrert noen problemer. Tunnelen har ikke vært i drift lenge nok til at lystilbakegangen har blitt målt [29].

Tidligere publikasjoner

Ved utbygningen av nevnte Harangstunnelen i 2012, ble det laget en LCC-beregning av konsulentfirmaet Rambøll for å sammenligne to LED-belysningsløsninger med konvensjonell belysning med damplamper [43]. En del av rapporten omhandler et estimat på energisparingspotensialet ved å benytte dimming av innkjøringssonen etter adaptasjonsluminansen. Konklusjonen er at installert effekt ved bruk av LED-løsningene er henholdsvis 29% og 14% lavere enn toppeffekten til damplampeanlegget. Over en periode på et år er det estimert at det totale energiforbruket er 46% og 38% lavere for LED-løsningene i forhold til det konvensjonelle anlegget [43]. Samme rapport ser også på investeringskostnaden og nåkostnaden for energi og lampeskift over en periode på 25 år. Konklusjonen er at LED-anleggene har omtrent samme eller en noe lavere investeringskostnad og at levetidskostnader ved LED-anleggene er vesentlig lavere (rundt 35%) [43]. Den tidligere masteroppgaven ved NTNU *Energisparing ved bedre styringskriterier for LED-belysning i veitunneler* benytter armaturgrunnlaget Brekkstunnelen og sammenligner det med et dimensjonert konvensjonelt anlegg. I denne oppgaven konkluderes det med at man ved dimming av innkjøringssonen etter luminansreduksjonskurven vil kunne forvente omtrent 30% sparing for tunneler rundt 500meter, med mest sparing ved lav ÅDT. Når lengden på tunnelen øker vil sparepotensialet minke [41].

3.3 Dynamisk overgangssone

Utgangspunkt

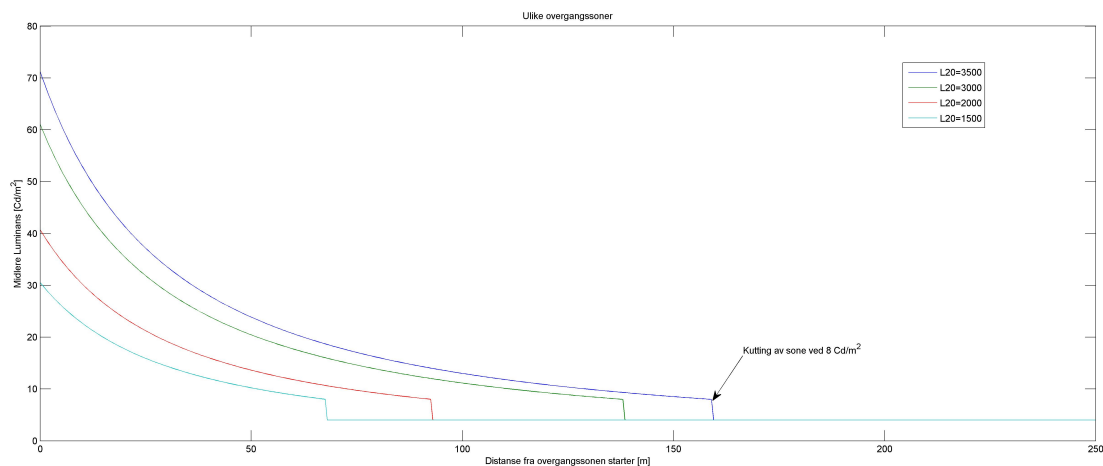
Kontinuerlig regulering og trinnvis slukking av armaturene tilknyttet overgangssonen, som følge av endring i adaptasjonsluminansen.

Kan skape en bedre belyningsløsning i henhold til

- Energibruk

Beskrivelse

LED-teknologiens muligheter til å dimme trinnløst kan benyttes til å lage dynamiske overgangssoner. På samme måte som innkjøringssonen, kan overgangssonen dimmes trinnløst som følge av adaptasjonsluminansen slik at den alltid følger kravene for midlere luminans bestemt av CIE-reduksjonskurve. Under følger en figur som viser hvordan kravene for overgangssonen endrer seg ved fire ulike adaptasjonsluminansnivåer (3500, 3000, 2000 og 1500 Cd/m^2), fartsgrense 80 km/t og luminanskrav i indre sone på 4 Cd/m^2 .



Figur 3.3: Ulike krav for midlere luminans i overgangssonen.

Ved å plassere armaturene fysisk slik at midlere luminans følger reduksjonskurven ved likt pådrag til alle overgangssonearmaturer, kan sonen kontinuerlig reguleres slik at belyningsnivået alltid er lavest mulig. Dette kan være svært energibesparende sammenlignet med konvensjonell trinnstyring, hvor belynings- og effekt nivå vil være overdimensjonert i henhold til kravene gjennom store deler av døgnet. Rent teknisk kan løsningen implementeres ved å plassere alle overgangssonearmaturer i samme styringsgruppe som innkjøringssonen. Dette er mulig da armaturene i begge soner dimmes med likt pådrag etter adaptasjonsluminansen (forutsetter fysisk plassering av armaturene etter reduksjonskurven).

Etter hvert som adaptasjonsluminansen minker, kommer det frem av figur 3.3 at kravene for midlere luminans i kanten av overgangssonen kan tilsvare indre-sone. Dette betyr i teorien at de ytterste armaturene kan slukkes etter hvert som adaptasjonsluminansen minker, og kun la den gjennomgående grunnbelysningen (som uansett er påskrudd) stå igjen. Etter hvert som adaptasjonsluminansen faller ytterligere, kan armatur etter armatur slukkes til sonen kun består av gjennomgående belysning. Ved å benytte denne løsningen kan ytterligere energi spares. Teknisk

er løsningen noe mer kompleks, da den krever individuell styring av alle overgangssonearmaturer.

Ved å ha en dynamisk overgangssone, kan belysningen reguleres som følge av trafikksituasjon. Dersom det for eksempel skulle være nødvendig å senke fartsgrensen eller trafikken går saktere som følge av kødannelser, kan sonen gjøres kortere og fortsatt følge kravene etter figur 3.2.

Eksisterende løsninger

Siden innkjøringssonen og overgangssonen henger sammen, har alle de samme 13 tunnelene med dynamiske innkjøringssoner også dynamiske overgangssoner med LED-belysning [19]. En av disse er Brekktunnelen langs E39 i Sør Trøndelag. I denne tunnelen er det installert LED i innkjørings- og overgangssonen, og ettersom adaptasjonsluminansen endrer seg er det forsøkt å treffe CIE-kurven mest mulig optimalt [31].



Figur 3.4: Innkjøringssone med LED-armaturer i Brekktunnelen [19]

Alle armaturene er styrt ved hjelp av DALI-interface og er tilkoblet et toppsystem levert av Italiske Reviberi. Dimmingen gjøres trinnløst med samme pådrag for innkjøring og overgang, og armaturene slukkes helt når dimmingen har nådd 15 % [52].

På bakgrunn av muligheten til å kontrollere LED-armaturene i overgangssonen, er det gjort forsøk i tunnelen på å programmere sonen til halv lengde for å se på effekten. Enkelte studier hevder at adaptasjonsprosessen baserer seg på tilvenning i forhold til blending ute, og at prosessen av den grunn er mye raskere enn lengden på dagens soner [31]. Dette benyttes ikke i tunnelen, og det er foreløpig ikke planlagt å innføre det igjen [31]. Det er ikke funnet noen tunneler som slukker overgangssonearmaturene trinnvis etter hvert som adaptasjonsluminansen minker.

Tidligere publikasjoner

Resultater fra publikasjoner henvist til i forrige kapittel, inkluderer dimming i overgangssonen med samme pådrag som i innkjøringssonen.

I henhold til å trinnvis slukke armaturer ved minkende adaptasjonsluminans, er det ikke funnet noen publikasjoner som ser på energisparingspotensialet ved dette.

3.4 Regulering etter vedlikeholdsfaktoren

Utgangspunkt

Kontinuerlig regulering av armaturene som følge av lystilbakegang og tilsmusning.

Kan skape en bedre belsningsløsning i henhold til

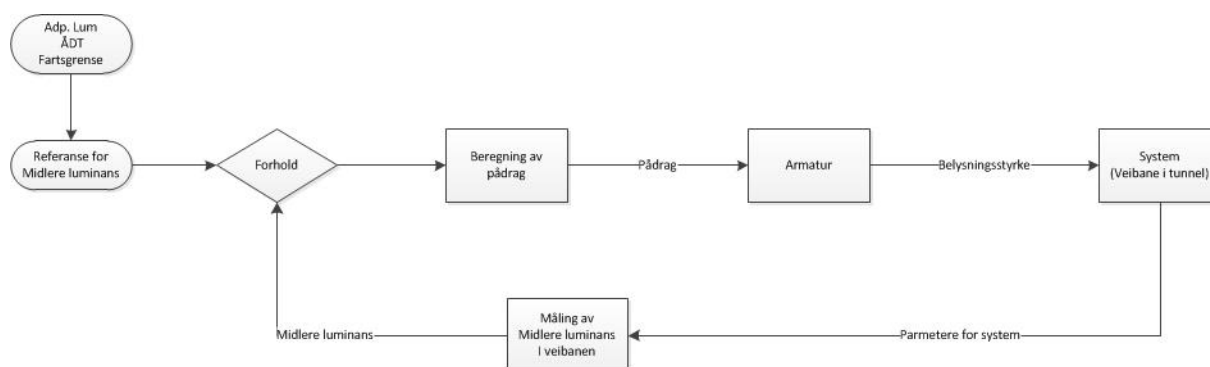
- Energibruk
- Trafikksikker belsningstilpasning

Beskrivelse

En spennende belsningsløsning som kan skapes som følge av LED-teknologiens egenskap til å dimme trinnløst, er regulering av armaturene som følge av vedlikeholdsfaktoren. Ved installasjon av nye armaturer, overdimensjoneres som nevnt armaturene slik at belsningsstyrken over tid med lystilbakegang og tilsmusning fortsatt vil tilfredsstille luminanskravene. I praksis betyr dette at armaturets effekt også er overdimensjonert, med unødvendig høy energibruk som resultat. Ved å benytte LEDs egenskap til å dimme trinnløst, kan armaturene kontinuerlig reguleres etter hvert som større effekt trengs for å opprettholde luminansnivået. Med tanke på at overdimensjoneringen ved nyinstallasjon er rundt 33 %, er det åpenbart at store mengder energi kan spares. Løsningen kan også gjøre tunnelbelysningen mer trafikksikker, ved at armaturene alltid reguleres slik at luminanskravet opprettholdes. Dette kan spesielt gjelde i skitne tunneler hvor det sjeldent vaskes, og armaturene er så tilsmussede at midlere luminans ligger under kravene. Rent teknisk kan løsningen implementeres på flere måter:

- Manuell måling med påfølgende pådragsjustering
- Astronomisk ur som justerer pådraget som følge av forventet tilbakegang
- Lukket sløye ved bruk av luminansmåler inne i tunnelen

Av disse, vil de to siste løsningene gi kontinuerlig regulering og høyest energibesparing. Lukket-sløye-løsningen kan fungere ved å installere en luminansmåler i tunnelen, og benytte konkret verdi av midlere luminans i kjørebane som reguleringsparameter for dimmeprosenten til LED-armaturene. Følgende figur viser et mulig flytdiagram for løsningen:



Figur 3.5: Mulighet for justering av LED ved hjelp av lukket sløye.

Ved å benytte en slik løsning kan det diskuteres om det holder med en måler som fungerer som en referanse for øvrige armaturer. Siden armaturene belastes forskjellig, er sannsynligheten stor for at flere målere må benyttes, hvilket kan være problematisk med tanke på investeringskostnad.

Eksisterende løsninger

I følge Haakon Nergaard ved Statens vegvesen, eksisterer det faktisk en lukke-sløyfe-løsning i Strindheimstunnelen i Trondheim. For øvrig er ikke denne tatt i bruk grunnet flere problemer knyttet til støv og integrasjonen mot konvensjonelle armaturer som utgjør dagens belysning [27]. I den kommende Soknedalstunnelen er det derimot planlagt å benytte både LED og en lukket-sløyfe-løsning. Her er den foreløpige ideen å benytte et luxmeter som relaterer armaturenes belysningsstyrke til midlere luminans for regulering. Hovedtanken bak dette er å skape trafikksikker belysning som alltid møter luminanskravene [27].

Pål Larsen i Norconsult har informert at han for øyeblikket jobber med en slags lukket-sløyfe-løsning ved muligheten for å koble styring av tunnellys opp mot vaskerutinene. I enkelte tilfeller blir sedimenteringsbassenger aktivisert/resatt ved hver tunnelvask, og hvis dette kunne hentes ut mot lysstyringssystem, kunne man hentet ut mye av energisparepotensialet ved en antatt utvikling av tilsmussing over tid og antatt lystilbakegang for lyskilden [31].

Tidligere publikasjoner

I tidligere nevnte masteroppgaven *Energisparing ved bedre styringskriterier for LED-belysning i veitunneler*, blir det fastsatt at man ved å installere LED-armaturer og kun legge til en dimming i henhold til vedlikeholdsfaktoren (0.7) og ellers styre konvensjonelt, vil kunne forvente et fast sparepotensiale på omtrent 40 % for alle lengder og ÅDT [41].

3.5 Kjøretøydeteksjon

Utgangspunkt

Av/På-styring av belysningen som følge av trafikk.

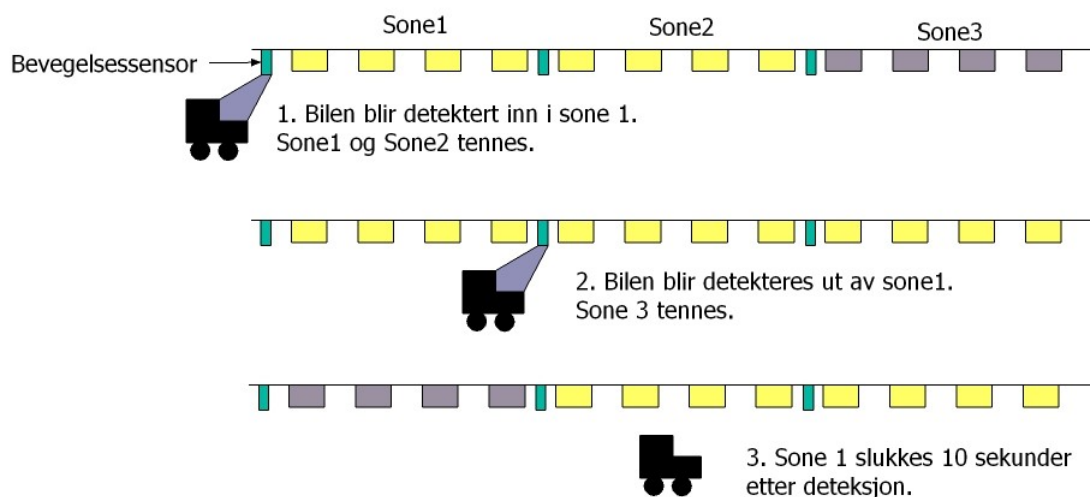
Kan skape en bedre belysningsløsning i henhold til

- Energibruk

Beskrivelse

Ved å benytte LED-teknologiens egenskap til å tenne momentant, kan innkjøringssonen gjøres *kjøretøysstyrt*. Dette vil si at belysningen i sonen reguleres av/på ettersom det er trafikk der eller ikke. Eventuell trafikk kan detekteres ved å benytte en bevegelsessensor, for eksempel en radar eller et IR-kamera. Ved deteksjon av trafikk på vei inn i tunnelen, kan bevegelsessensoren sende et logisk signal som benyttes som parameter for av-på-styring av armaturene. Siden LED kan tenne momentant med full styrke uten oppvarming, er det mulig å styre armaturene av/på uten forsinkelser som følge av tenningstregghet. Dette er ikke mulig med konvensjonelle lyskilder, da disse trenger oppvarming. Kjøretøydeteksjon kan utføres på flere måter, og en løsning kan være å styre alle armaturer individuelt ved å lage en bølge av lys som følger kjøretøyet gjennom hele tunnelen. Dette forutsetter at posisjonen til kjøretøyet alltid er kjent, samt at det stilles krav til lave tidsforsinkelser i systemet. Dette kan både bli kostbart og komplisert, og av den grunn kan en bedre løsning være å dele armaturene inn i grupper som styres av-på. Ved å for eksempel

benytte tidsstyrte grupper, kan deler av belysningen ved deteksjon av et kjøretøy skrus av/på i et bestemt tidsintervall. Belysningen må være på lenge nok på til at kjøretøyet kommer seg gjennom tunnelen uten risiko for å komme i en situasjon uten lys, og samtidig slukke raskt nok til at energisparingspotensialet blir høyest mulig. En annen mulighet for kjøretøydeteksjon kan være å benytte sensorer med en viss avstand gjennom hele tunnelen som registrerer kjøretøy inn og ut av soner. Ved deteksjon tenner soner foran kjøretøyet og står tent til kjøretøyet passerer ut av sonene inkludert litt tidsmargin. En mulig implementasjon er vist i figur 3.6.



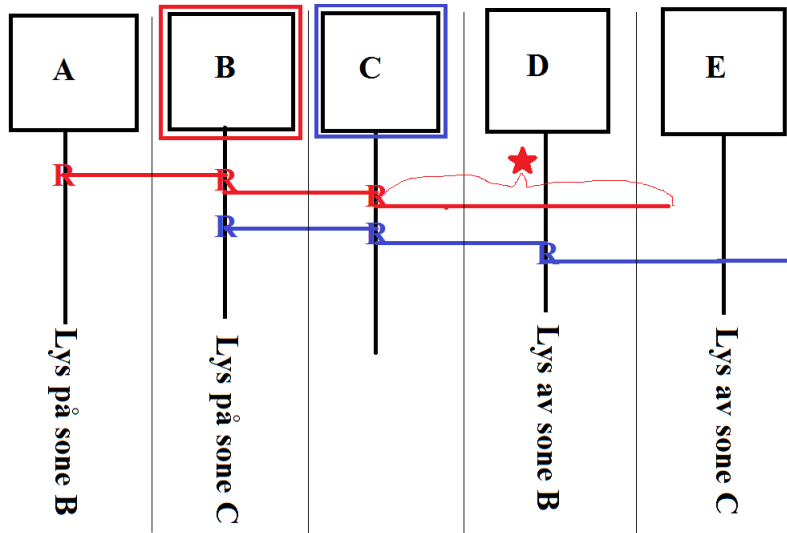
Figur 3.6: Kjøretøydeteksjon som følge av bevegelsessensorer.

Inn/ut-deteksjon krever mange sensorer og stiller svært høye krav til deteksjonssikkerheten og styresystemet.

Generelt sett kan kjøretøydeteksjon være svært energibesparende, spesielt i lange og lavtrafikkerte tunneler hvor belysningen kan stå påskrudd i lange tidsperioder uten trafikk. Sparingspotensialet er størst om dagen grunnet de høye effektene i innkjøring- og overgangssonen, men muligheten passer svært godt til bruk ved nattbelysning. Siden trafikk tettheten vanligvis avtar ved nattforhold, kan det skapes anlegg med døgnavhengig kjøretøydeteksjon. For eksempel kan deteksjonen kobles inn mellom 24.00 og 06.00, i en tunnel hvor det på dagtid er mye trafikk.

Eksisterende løsninger

Det finnes i dag 15 tunneler tilknyttet Statens vegvesen som benytter kjøretøydeteksjon ved bruk av LED, i tillegg til flere på planleggingsstadiet [19] [31]. En tunnel som benytter kjøretøysstyrt nattbelysning er Tøventunnelen langs fylkesvei 78 i Nordland. Systemet er designet av norske Scanmatic, og belysningen er delt inn i 11 soner som tilsvarer fordelingene inne i tunnelen inkludert underfordelinger [33]. Ved hver av disse underfordelingene, som i praksis vil si i midten av hver sone, er det plassert mikrobølgeradarer [33]. I tillegg er det to detektorer utenfor tunnelen (en i hver ende), fire fotoceller (to i hver ende) og to radarer (en i hver ende) rett innenfor tunnelåpningene. Det er en timer for hver sone som holder lyset på. Timeren blir resatt når en bil passerer en sensor i samme eller tilstøtende sone. Lengden på timeren er i teorien justert ut ifra hvor langt tid det tar for en bil som holder fartsgrensen å komme fra detektoren til den har kommet ut av neste sone + en sikkerhetsmargin. Følgende illustrasjon beskriver belysningsforløpet for en bil kjørende fra sone A:



Figur 3.7: Nattbelysning i Toventunnelen [33].

Lysset i sone B tenner i det bilen passerer sensoren midt i sone A. Timeren for sone B, resettes når bilen passerer sensoren i sone B, og når bilen passerer sensoren i sone C. Grunnen til at timeren resettes for sone B også når man passerer radaren i sone C, er at denne ikke detekterer bilens retning. Timeren er i dag satt til 5 minutter, hvilket i praksis vil si at lyset er på i $(2km/80km/h) + 5min \approx 6.5min$ i hver sone hvis det kommer en enslig bil midt på natta [33]. Den røde stjernen i figur 3.7 er tiden det tar fra kjøretøyet passerer en sone til den er ute av neste sone + sikkerhetsmargin.

I nevnte Brekktunnelen og Harangtunnelen er det også installert fotoceller inne i tunnelene som kan benyttes til å tidsstyre nattbelysningen med kjøretøydeteksjon. Per dags dato er ingen av disse tatt i bruk grunnet for høy ÅDT, og lever i dag kun som en mulighet [29] [31].

Tidligere publikasjoner

IEEE-rapporten *Fuzzy Control of LED Tunnel Lighting and Energy Conservation* [42] ser på regulering av tunnelbelysning på bakgrunn av en algoritme basert på fuzzy-kontroll. Parametere for beregningen er trafikkmengde målt ved hjelp av laser ved innkjøringen. Systemet dimmes ned til 10% av maksimum når det ikke er detektert noe trafikk. Systemet er implementert i Lengshui-tunnelen i Kina, og har etter 10 måneders drift gitt en reduksjon av energi på nærmere 87% i forhold til tidligere høytrykks-natriumlamper med konvensjonelt styresystem [42].

Masteroppgaven *Energisparing ved bedre styringskriterier for LED-belysning i veitunneler* [41] har også funnet store energibesparelser ved kjøretøydeteksjon. Det konkluderes med at dersom kontinuerlig kjøretøydeteksjon og dimming etter CIE-kurven inkluderes, kan det forventes et sparepotensiale fra 87% til 98% uavhengig av lengde og ved lav ÅDT (under 4000). [41]

3.6 Dynamiske lede-/rømningslys

Utgangspunkt

Fleksible LED-armaturer benyttet for en kombinert løsning for ledelys og rømningslys.

Kan skape en bedre belsningsløsning i henhold til

- Trafikksikker belsningstilpasning
- Førerens opplevelse
- Kostnad

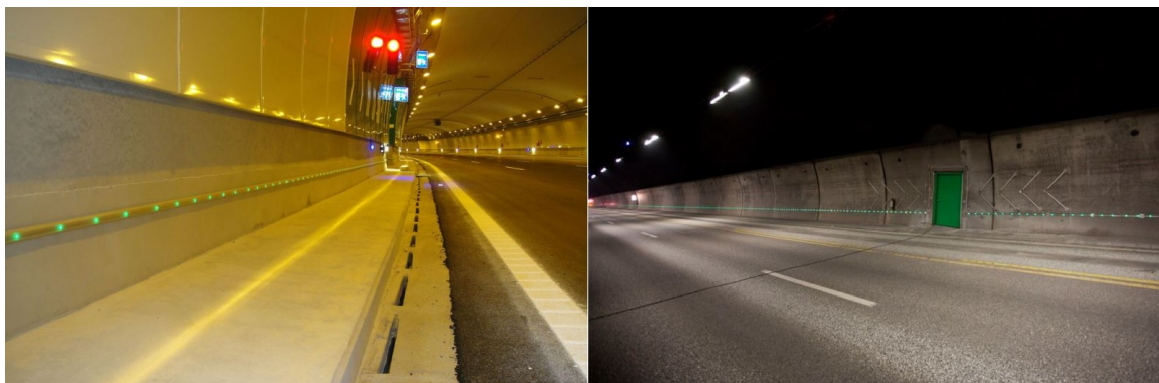
Beskrivelse

Ved å benytte LEDs egenskaper til å regulere trinnløst, tenne momentant og endre farge under drift åpner det seg en mulighet til å kombinere ledelys/rømningslys i en felles armaturløsning. Benyttes for eksempel dimmede LED som ledelys ved normale forhold, kan de ved en nødssituasjon settes opp til full styrke og blinke med av/på-styring. Dersom lampekontrolleren og armaturene i tillegg støtter RGB-fargeendring, kan det ved nødssituasjon lages en belsningsløsning som endrer lysfargen til for eksempel grønn. På bakgrunn av LEDs fysiske lille størrelse, passer den svært godt til ledelys/nødlys siden den har svært få begrensninger i plasseringen. Dette i sterk kontrast til konvensjonelle armaturer som ikke er like fleksible.

Ved å kombinere nevnte egenskaper for teknologien, er det generelt sett kun fantasien og investeringsvilligheten som setter grenser for mulighetene med en felles armaturløsning. Installerer for eksempel flere kameraer i en tunnel som kommuniserer mot VTS gjennom et toppsystem, kan lede/rømningslysene styres akkurat som ønskelig under en nødssituasjon. Dette kan enten gjøres ved å ha forhåndsprogrammerte scenarier for hele anlegget, eller gruppe/individuell styring av armaturene. Et spennende scenario kan være dersom en bilbrann oppstår i en tunnel, og VTS overvåker situasjonen ved hjelp av IR-kameraer. Personene beveger seg vekk bilen i en retning, men VTS vet at det er vesentlig kortere til en nødutgang i den andre retningen. Ved å benytte lede/rømningslysene til å markere den gale retningen med statisk rødt lys, og den riktige retningen med blinkende grønt lys, kan de uheldige personene ledes i sikkerhet. Denne løsningen må selvfølgelig risikotestes om den skal være til nytte, men gir et godt bilde av mulighetene til teknologien. En mer hensiktsmessig og mindre kompleks løsning kan være å gruppestyre armaturene med forhåndsstyrte scenarier. For eksempel kan hele anlegget gå over til en blinkende grønn farge som leder mot nødutgangene dersom anlegget skulle gå i nødmodus. Nødmodus kan trigges fra brannsensorer, utløsning av brannapparat eller overstyres fra toppsystemet. At belsningen har muligheten til å kombinere ledelys og rømningslys kan gjøre at totalkostnaden kan bli lavere i forhold til å investere dette i separate belsningsløsninger.

Eksisterende løsninger

Det å benytte LED-teknologien til ledelys/rømningslys er i dag svært vanlig i tunneler, likevel varierer måten det brukes på fra tunnel til tunnel. Oslofjordtunnelen langs riksvei 23 mellom Akershus og Buskerud har et svært avansert system for ledelys/nødlys basert på LED-teknologien. Systemet er levert av norske Smartec AS [34], og består av mange små innkapslede LED-armaturer som danner LED-striper montert i en meters høyde langs tunneleveggene.



Figur 3.8: Dynamiske LED-ledelys i Oslofjordtunnelen. [34]

Stripene kommuniserer ved hjelp av IP-kommunikasjon, og har en åpen kildekode som gjør at de kan knyttes til VTS gjennom et hvilket som helst toppsystem. Ved hendelse kan VTS manuelt aktivere belysningen som er dynamisk etter forhåndsinstallerte programmer. I praksis vil dette si at stripene «løper» i en spesifikk retning for å lede i bilistene mot nærmeste evakueringsrom. Om stripene leder mot venstre eller høyre, avhenger av hvilken utgang som er nærmest. Skillet går midt i mellom, såfremt ikke VTS overstyrer systemet for å markere den optimale fluktruten [34]. Levetiden for stripene er minimum 30 år, og energibruken er 0.3 W/m ved statisk- og 0.15 W/m ved dynamisk-belysning [34].

Tidligere nevnte Tøventunnelen benytter også LED til ledelys. Her er det installert 171 armaturer 1 meter over veibanen som står slukket hele tiden, og tennes dersom tunnelen går i steng. Dette vil si at de enten blir overstyrt av VTS, fra nødstyretablå eller aktiveres ved uttak av brannslukker i nødskap [30].

Tidligere publikasjoner

Rapporten *Experiences with LED-based visual guidance systems in tunnels* fra 2006 slår fast av sidemonterte LED-lys bidrar til økt kvalitet på trafikflyten og minsker stressfølelsen for sjåføren med henvisning til forsøk i Østerrike, Tyskland Sveits og Norge [36]. I følge Gunnar D. Jennsen, transportforsker ved SINTEF, er en løsning med grønne blinkende LED-lys montert 1 meter over vegbanen den beste løsningen for evakueringen av en tunnel [28].

3.7 LED til oppbrytning av monotoni

Utgangspunkt

Belysning med varierende farger for å bryte opp monotonen i en tunnel.

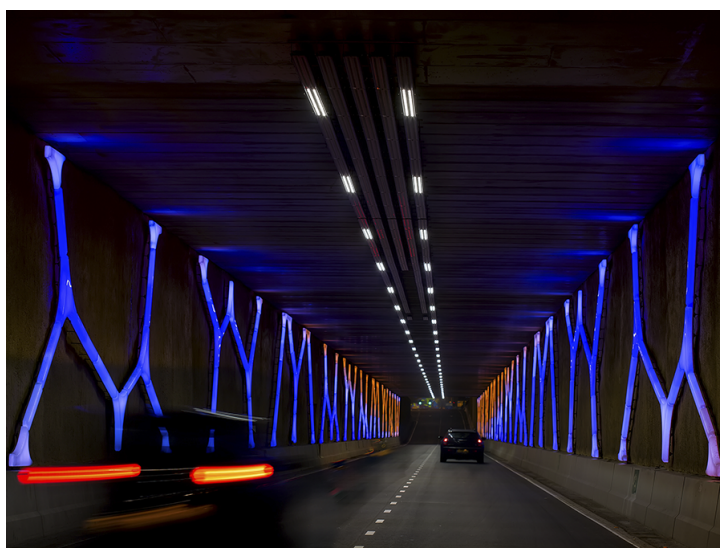
Kan skape en bedre belysningsløsning i henhold til

- Førerens opplevelse
- Trafikksikker belysningstilpasning og kvalitet

LED-teknologien byr på et uendelig antall muligheter som indikert i forrige kapittel, og i teorien er det kun fantasien som setter grenser for muligheter innen belysningsdesign for oppbrytning av monotoni. I lange tunneler, kan det for eksempel være en seksjoner i indre sone hvor den hvite belysningsfargen fra armaturene brytes. Dette kan enten gjøres ved å benytte armaturer i med en spesifikk lysfarge eller lampekontrollere+armaturer med støtte for RGB-fargeblanding. Dersom sistnevnte benyttes, kan lysfargen endres trinnløst på bakgrunn av et forhåndsinstallert program i lampekontroller eller segmentkontroller. Hvis systemet kobles mot sensorer utenfor tunnelen, for eksempel deteksjon av vær, kan belysningen reguleres til å bli blå hvis det regner og gul hvis det er sol. Egenskapene til LED-teknologien med fleksibel armaturplassering og robusthet, kan også benyttes til å lage løsninger for oppbrytning av monotoni. Armaturene kan plasseres overalt, uten at fysisk størrelse eller faren for ødeleggelse er begrensede parametere på samme måte som konvensjonell belysning. Generelt sett er det ingen grenser for hva som kan skapes med tanke på teknologien. Begrensende faktorer er kostnad og å ikke lage for prangende inntrykk som kan påvirke trafikksikkerheten.

Eksisterende løsninger

Per i dag eksisterer det flere tunneler i Norge og utlandet som benytter LED-teknologien til å bryte monotoni i tunneler. Store fremtidige norske tunnelprosjekter er også planlagt med lignende belysning [31]. En tunnel som bruker LED til å bryte opp monotonen, er Hondsrugtunnelen i Nederland. Denne tunnelen har en belysning som skal reflektere de store steinene som en gang var en naturlig del av landskapet tunnelen er lokalisert [38].



Figur 3.9: Hondsrug tunnel i Nederland [38]

Installasjonen består av LED-striper med 50 armaturer, som hver har sin egen unike adresse. Ved å benytte RGB, endrer lampekontrolleren fargene på bakgrunn av en forhåndsinstallert palett. Systemet bruker kjørehastighet som parameter, og belysningen er dynamisk. Dette betyr at fargekombinasjonen endres mens føreren kjører gjennom [38] [39]. Teknologien er levert av armaturprodusenten Philips og lyskonsulentfirmaet Titia Ex.

Tidligere nevnte Toventunnelen benytter også LED-teknologien til å bryte opp monotonien ved hjelp av belysning. Tunnelen har fem snunisjer, og disse belyst med blått LED-lys for å markere nisjene samt bryte opp monotonien for hver 2000 meter. [33] [30].



Figur 3.10: Snunisje med blått lys i Toventunnelen [24]

Armaturene er montert på kabelbrua i senter, og er vinklet opp på skrå slik at de lyser opp tunnelhvelvet som vist i figur 3.10. Teknologien er levert av armaturprodusenten Thorn og systemdesignerfirmaet Scanmatic. Vegvesenet har fått meget bra tilbakemeldinger på belysningen [30].

Tidligere publikasjoner

For den dynamiske belysningen i Hondsdruktunnelen, ble det i startfasen gjort et forsøk i kjøresimulatoren ved universitetet i Delft. Denne undersøkelsen kom frem til at førerne følte seg veldig velkomne inn i tunnelen, og at lyset videreførte den dynamiske opplevelsen førerne hadde utenfor tunnelen [38].

3.8 Kommunikasjon med LED

Utgangspunkt

Internett og kommunikasjonsflyt ved bruk av tunnelbelysningen.

Kan skape en bedre belysningsløsning i henhold til

- Førerens opplevelse
- Trafikksikker belysningstilpasning

Beskrivelse

Ved å benytte LED-teknologiens egenskap til å tenne av/på i stor hastighet, åpner det seg revolusjonerende mulighet for å sende store datamengder. Denne teknologien er i dag rykende fersk, men har allerede fått en internasjonal standard i form av navnet *LI-FI* (LightFidelity) [44].



Figur 3.11: LiFi, internett ved hjelp av LED. [44]

Teknologien fungerer enkelt forklart ved at en fotodetektor fanger opp små endringer i av/på-svitsjingen fra LED-armaturene, og skaper deretter et digitalt signal som kan prosesseres av hvilken som helst digitale enhet. Svitsjingen skjer på en frekvens som er høyere enn menneskets øyne kan oppfatte, og av den grunn kan den integreres med belysningsformål. Dataoverføringen skal være ekstremt rask, og i laborietester ved Universitet i Oxford har det være mulig å sende 224 Gb/s ved å benytte denne teknologien[44]. Dette er til sammenligning nesten 100 ganger raskere enn et topp moderne Wi-Fi-nettverk. Med tanke på belysningsanlegget i tunneler, åpner denne teknologien opp for helt nye muligheter.

Dersom mobiltelefoner i fremtiden installeres med en mikrochip som kan kommunisere med Li-Fi, betyr dette at man kan surfe på lynraskt internett mens man kjører gjennom tunneler. Dette er ikke bare fordelaktig for bilistenes internettopplevelse, men også fordelaktig med tanke på interferens med for eksempel nødnett da det ikke brukes elektromagnetisk stråling.

En annen mulighet med Li-Fi i tunneler, kan være at nye biler utstyres med en fotodetektor på taket. Dette åpner for at Li-Fi kan benyttes som en direkte kommunikasjonsmetode mellom kjøretøyet og tunnelen/VTS. For eksempel kan VTS sende informasjon til kjøretøyet om eventuelle ulykker eller værforholdene på den andre siden. Dersom systemet er toveis, er en mulighet at føreren kan kommunisere direkte med belysningen i tunnelen. Er for eksempel en bilisten gammel, kan kjøretøyet informere belysningen om at lysstyrken må skrus opp. Generelt sett er det igjen bare fantasien som setter grenser for hva denne teknologien kan gjøre.

Eksisterende løsninger og gjennomførbarhet

For øyeblikket eksisterer det ingen tunnelbelysningsanlegg med denne teknologien, men utviklingen har likevel kommet så langt at det har blitt implementert et fullt fungerende pilotsystem med toveis-hastigheter på rundt 1 Gb/s i et kontorlandskap i Estland [45].

For å kartlegge gjennomførbarheten ved å benytte Li-Fi i tunneler, er det blitt tatt kontakt med IT-konsulent Harald Wium Lie [40]. Han er blant få i Norge som har kjennskap til teknologien, og mener det trolig være teknisk mulig, men at det vil være en vesentlig handover-problematikk. Dette fordi mottakerne må forholde seg til mange ”mikro-basestasjoner” i form av alle lyskildene gjennom tunnelen. Siden signalene krever line-of-sight, vil en mottaker på taket av bilene være nødvendig. Dette skaper igjen problemer ved at man for eksempel er nødt til å sikre at lastebiler (som kommer fra hele EU) har en egen LIFI-enhet montert på taket. Det vil også være problemer knyttet til at teknologien må ha fiber for å fungere, noe som kan være svært kostbart i lange avsidesliggende tunneler. Er det generelt sett snakk om IP-baserte tjenester, vil mobildekning trolig være rimeligere og fungere like godt som et LIFI-nett [40].

Det er også forsøkt å finne ut hvordan Li-Fi vil påvirkes av forstyrrelser fra billys og ved høye effekter (innkjøringsarmaturer), men det er det ikke funnet noen håndfaste svar på disse spørsmålene.

Kapittel 4

Utforming av belysningsanlegg basert på mulighetene til LED

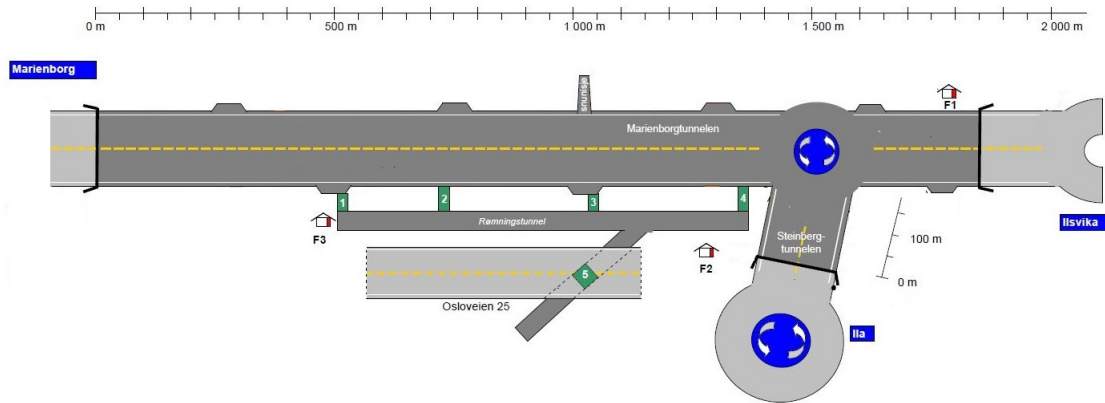
For å gjøre en målbar vurdering av potensialet til LED-teknologien i tunneler, er det utført en teoretisk utforming av et belysningsanlegg. Utformingen er gjort på i en eksisterende tunnel, og er basert på mulighetene studert i forrige kapittel. For å skape et best mulig sammenligningsgrunnlag, er det valgt en tunnel hvor det i dag eksisterer en moderne konvensjonell belysningsløsning levert av en seriøs aktør. Dette kapittelet presenterer den valgte tunnelen, dagens konvensjonelle belysningsanlegg, og utformingen av et alternativt teoretisk LED-anlegg.

4.1 Presentasjon av tunnel

I samarbeid med Statens vegvesen, er Marienborgtunnelen i Trondheim valgt for aktuelle utforming. Dette er en fjelltunnel med rundkjøring, som er tilknyttet Steinbergtunnelen. Følgende figurer viser geografisk plassering og profiltegning:



Figur 4.1: Geografisk plassering av Marienborgtunnelen [51]



Figur 4.2: Profiltegning av Marienborgtunnelen [51]

4.1.1 Fysiske parametere og forsyning

Under følger fysiske parametere for tunnelen [51]:

Lengde	1840 meter
Tversnitt	9,5 meter (klasse T9,5)
Kjørebanebredde	7,0 meter
Fartsgrense fra Marienborg til rundkjøring	60 km/t
Fartsgrense fra rundkjøring til Ilsvika	50 km/t
ÅDT	8000

Tabell 4.1: Fysiske parametere Marienborgtunnelen

Tunnelen er forsynt med strøm fra to sider. Fra et teknisk rom i Ilsvika, og et teknisk rom 500 meter inn i tunnelen fra Marienborg. Ved kortvarig nettutfall finnes avbruddsfri nødstrømsforsyning (UPS) for å levere strøm til overvåking, prioritert belysning og kommunikasjonsanlegg i en time. Data for trafikk tetthet er mottatt fra Statens vegvesen, og finnes i Tillegg F.

4.1.2 Belysning

Dagens belysningsanlegg består av konvensjonelle belysningskilder, og er dimensjonert etter en adaptasjonsluminans på 3000 cd/m^2 [32]. I henhold til Vegvesenets krav til midlere luminans i figur 2.13, gir dette følgende luminansnivåer:

Innkjøringsone	150 cd/m^2
Indre sone dag	4 cd/m^2
Indre sone natt	2 cd/m^2

Tabell 4.2: Krav for midlere luminans i Marienborgtunnelen

Dagens belysningsanlegg bygget opp på følgende måte:

Innkjøringszone (50m)	400 W høytrykk natriumslamper
Overgangssone1 (52m)	250 W høytrykk natriumslamper
Overgangssone2 (65 m)	100 W høytrykk natriumslamper
Indre sone	Lysstoffrør 58 W longlife rør

Tabell 4.3: Armaturdata for dagens belysningsanlegg [51] [32]

Armaturene i innkjørings- og overgangssonen veksler mellom fire belysningstrinn (Dag2-Dag1-Skumring-Natt), og er automatisk styrt av en luminansmåler utenfor portalen [32]. Systemet kan kontrolleres manuelt fra VTS, eller fra tekniske rom inne i tunnelen. Nattbelysningen er gjennomgående, og tunnelen er i tillegg utstyrt med ledelys på den ene siden av tunnelveggen ca. 1.0 meter over kjørebanelinjen [51].

4.2 Utforming av LED-anlegg

Eksisterende konvensjonelle belysningsanlegg er moderne (installert i 2010 [51]), og imøtekommer alle kravene til Statens vegvesen. Av den grunn, er motivasjonen for denne utformingen å finne ut om det er mulig å skape et bedre og mer effektivt belysningsanlegg ved å benytte LED. Et bedre og mer effektivt belysningsanlegg, vil som tidligere indikere en løsning som møter kravene bedre i henhold til følgende parametere:

- Total energibruk
- Trafikksikker belysning:
 - Lyskvalitet
 - Lystilpasning
- Levetidskostnad
- Førerens opplevelse

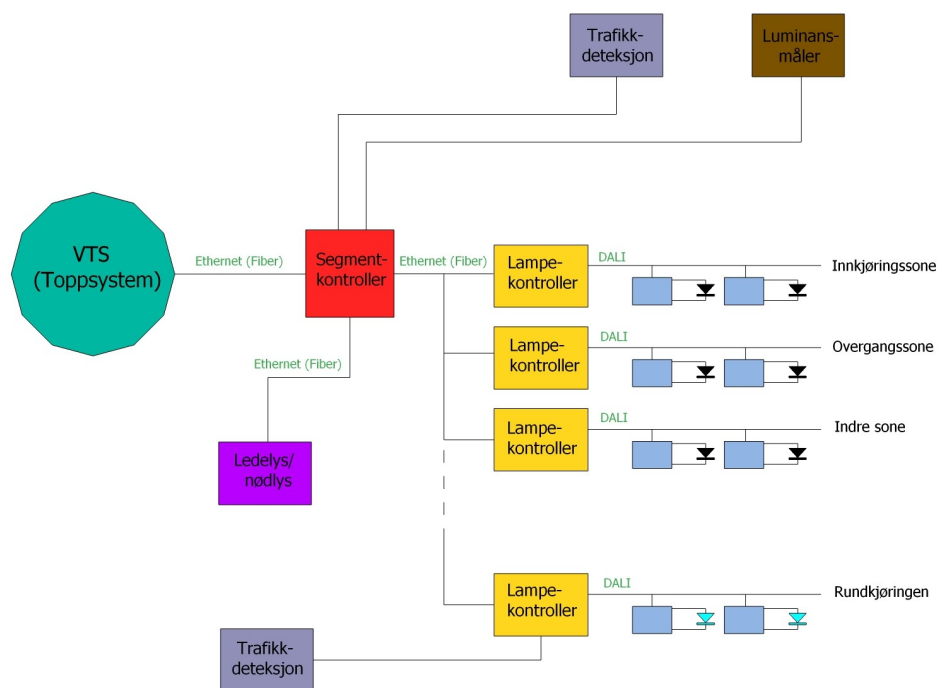
På bakgrunn av mottatt armaturdata og tunnelens ganske uvanlige form på Ila-siden, er det valgt å avgrense utformingen. Dette vil si en forkortet tunnel fra innkjøringen ved Marienborg, og frem til rundkjøringen. Avgrenset tunnel består av en innkjøringszone, og lengden er 1400 meter.

Detaljnivået for utformingen er satt til relativt grovt, da hovedpoenget er å sammenligne hovedtrekkene for LED-anlegget mot dagens konvensjonelle løsning. For at den teoretiske utformingen skal være mest mulig sammenlignbar med dagens konvensjonelle anlegg, er det satt fokus på at den skal være mulig å designe med dagens teknologi.

4.2.1 Styresystem

Styresystemet i denne teoretiske utformingen er utformet i samråd med Luxsave, og er i hovedsak basert på deres eksisterende system [26]. Dette for å få et system som er mulig å implementere med dagens teknologi.

Det er valgt å benytte et sentralt styresystem, med et kontrollerbart toppsystem fra VTS. Fra toppsystemet, skal alt av belysning i tunnelen kunne overvåkes og overstyres. Toppssystemet skal være knyttet mot en segmentkontroller gjennom IP/ethernet vde hjelp av fiber. Dette fordi tunnelen har en sentral plassering (fiber tilgjengelig), og dermed sikre høyest mulig kommunikasjonshastighet. Kommunikasjonen mellom segmentkontroller og lampekontrollerne er valgt til fiber (ethernet/IP), på bekostning av radiokommunikasjon med Zig-Bee. Dette fordi IP/ethernet er mindre følsom for forstyrrelser [26], noe som er svært fordelaktig i tunneler. Kommunikasjonen mellom lampekontroller og armaturer er valgt til DALI, da dette gir stor fleksibilitet for regulering av armaturene. For eksempel muliggjør dette individuell styring gjennom adressering, og gruppe-styring ved hjelp av broadcast. DALI kan også kommunisere toveis, og har mange nyttige funksjoner som trinnløst regulering av pådrag og RGB-fargestyring. Konkrete egenskaper og adressering/oppdeling for de ulike armaturene i utformingen varierer for de ulike belysningsformålene. Dette vil presenteres i kommende kapitler. Følgende figur viser en grov oversikt av styresystemet:



Figur 4.3: Styresystem for den teoretiske utformingen.

Det er valgt at systemet skal inneholde en segmentkontroller. Dette er hensiktsmessig fordi adaptasjonsluminansen fra luminansmåleren er dimensjonerende parameter for hele anlegget [26]. På grunn av begrensningene til DALI, kan distansen mellom hver lampekontroller maksimalt være 200 meter, og hver lampekontroller kan maksimalt ha 64 armaturer under seg [26]. Dette betyr at det totale antall lampekontrollere må være et sted mellom 7 og 9. Bevegelses-sensorer kan kobles via lampekontroller, for å sende informasjon til segmentkontrolleren [26].

4.2.2 Innkjøringszone

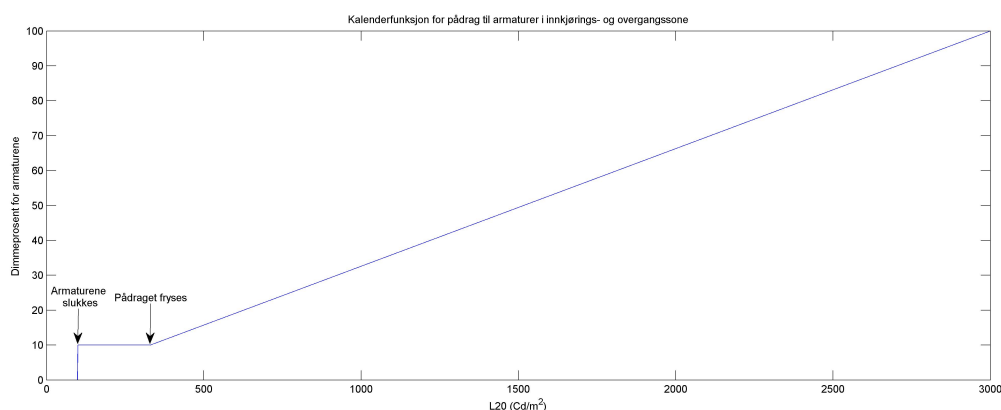
Innkjøringssonen er valgt å være utformet med følgende muligheter:

- Kontinuerlig dimming som følge av adaptasjonsluminansen

Beskrivelse

Innkjøringssonen skal være dynamisk på bakgrunn adaptasjonsluminansen (L_{20}). Denne måles utenfor portalen ved hjelp av en luminansmåler, med en samplefrekvens på ett minutt. L_{20} sendes til segmentkontrolleren, hvor pådraget beregnes med hjelp av en kalenderfunksjon [26]. Pådraget beregnes slik at armaturene til enhver tid møter Statens vegvesens laveste krav til midlere luminans i innkjøringssonen. I henhold til figur 2.12, og $\text{ÅDT} \geq 8000$, vil dette si at midlere luminans for første halvdel av sonen alltid skal tilsvare 5 % av adaptasjonsluminansen på dagtid. Siden fartsgrensen er 60 km/t , vil den totale lengden på innkjøringssonen være 60 meter. Dette på bakgrunn av kravene i figur 2.13 [21].

Alle armaturene i innkjøringssonen skal styres i en DALI-gruppe. Dette vil si at alle armaturer mottar det samme pådraget for dimmeprosent. Armaturene må derfor ha en fysisk plassering, slik at midlere luminans følger luminansreduksjonskurven ved likt pådrag. Armaturene brukt i innkjøringssonen har en begrensning for dimmingen på 10 % [35] (armaturgrunnlag presenteres senere). Av den grunn, skal pådraget fryses ved denne verdien når adaptasjonsluminansen er lav nok ($L_{20} = 330 \text{ cd/m}^2$). Armaturene skal holde denne verdien til belyningsanlegget skifter til nattbelysning ved $L_{20} = 100$. Denne løsningen kan fint implementeres med valgte segment- og lampekontrollere, ved hjelp av følgende kalenderfunksjon [26]:



Figur 4.4: Kalenderfunksjon for pådrag til armaturer i innkjøringssonen.

På bakgrunn av de høye trafikk tallene og tunnelens sentrumsnære plassering, er det valgt å ikke benytte trafikkdetektering på dagtid. Enkle beregninger fra trafikk tallene i Tillegg F, indikerer at belysningen uansett vil måtte være påskrudd hele tiden.

Det var lenge ønsket å implementere en løsning med luminansmåler inne i tunnelen, ved hjelp av tidligere nevnte lukkede-sløyfe. Denne løsningen kunne regulert armaturpådrag i henhold til lystilbakegang og gitt store besparelser i energibruk og armaturlevetid. Denne løsningen ble likevel forkastet etter samtaler med Hans Øien i Thorn. Øien kunne opplyse om problemer knyttet til tidligere nevnte løsning i Strindheimstunnelen [35]. Løsningen har vist seg å være svært følsom ovenfor forstyrrelser, og blir lett tilsmusset. Pål Larsen var også kritisk til denne løsningen på bakgrunn av tilsmussing. Av disse grunnene, samt kompleksiteten og usikkerheten rundt en slik løsning, ble det valgt at armaturene heller skal installeres med vedlikeholdsfaktor.

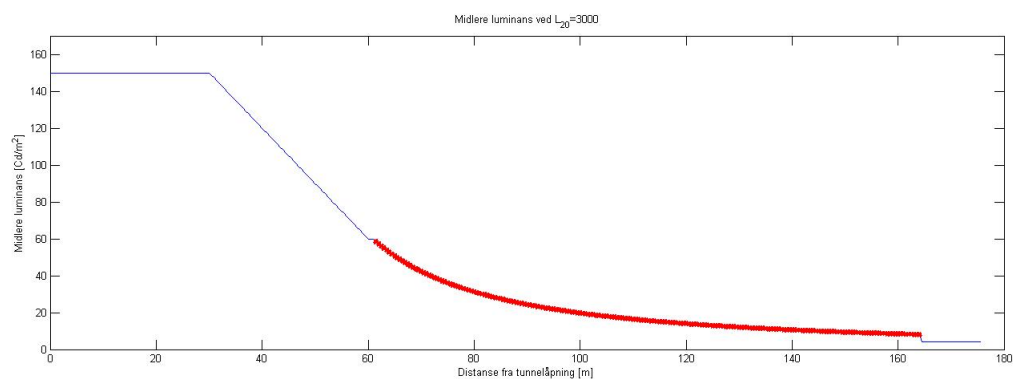
4.2.3 Overgangssone

Overgangssonen er valgt å være utformet med følgende muligheter:

- Kontinuerlig dimming som følge av adaptasjonsluminansen
- Gradvis utkobling av armaturer ved minkende adaptasjonsluminans

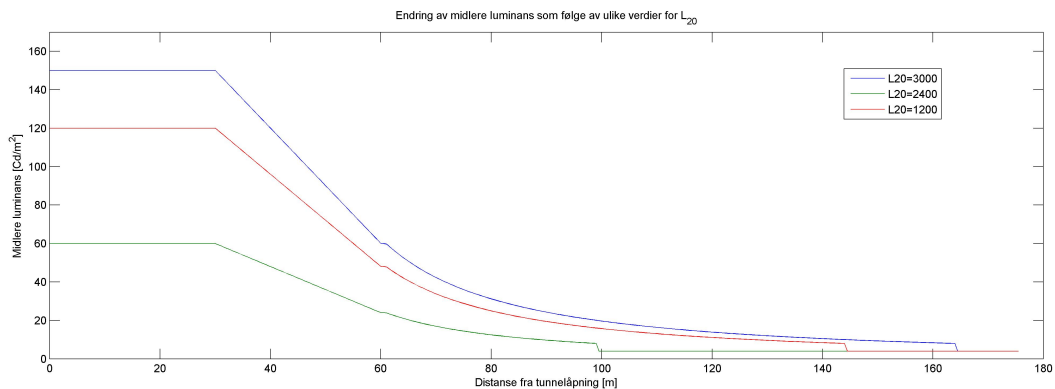
Beskrivelse

Overgangssonen begynner fra siste armatur i innkjøringssonen, og skal ha en fysisk plassering av armaturene slik at den midlere luminansen følger luminansreduksjonskurven når alle armaturer mottar det samme pådraget. Med en dimensjonerende adaptasjonsluminans på $L_{20} = 3000\text{cd}/\text{m}^2$, betyr dette en maksimal lengde på 104 meter for overgangssonen. Dette i henhold luminansreduksjonskurven (figur 3.2) og Statens vegvesens krav for overgang av midlere luminans til indre sone.



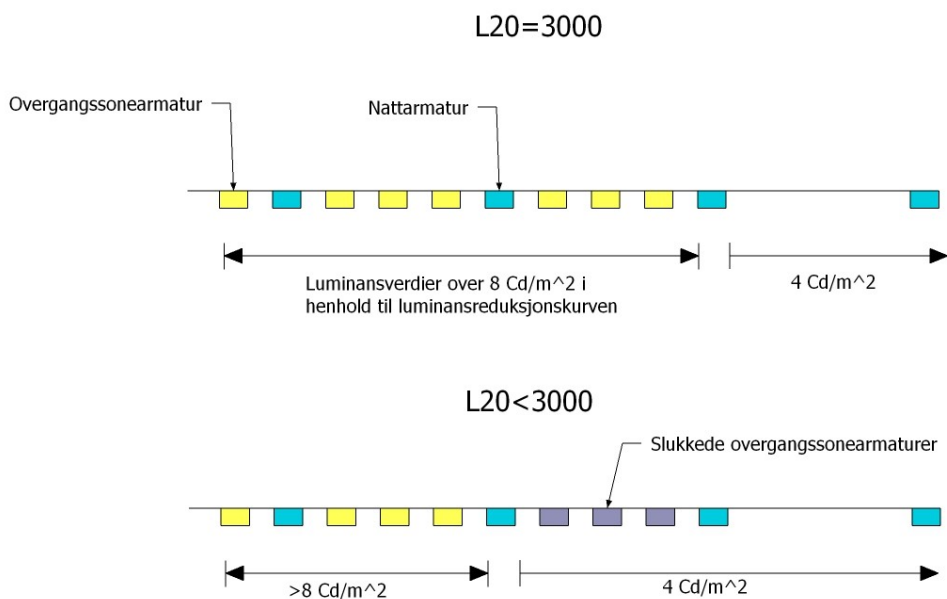
Figur 4.5: Midlere luminans ved maksimal lengde for overgangssonen, $L_{20} = 3000\text{cd}/\text{m}^2$ (Overgangssonen markert med rødt)

Armaturene i overgangssonen, skal motta det samme pådraget for dimmeprosent som armaturene i innkjøringssonen. Etter hvert som adaptasjonsluminansen minker, er det valgt å kutte overgangssonen som beskrevet i mulighetsstudiet. Siden alle armaturene i innkjørings- og overgangssonen mottar det samme pådraget som følge av L_{20} , vil den ytterste delen av overgangssonen etter hvert ha samme midlere luminans som indre sone ($4\text{Cd}/\text{m}^2$). Av den grunn slukkes de ytterste overgangsarmaturene etter hvert som adaptasjonsluminansen minker. Dette med resultat at overgangssonen forkortes, som vist i følgende figur:



Figur 4.6: Midlere luminans ved ulike adaptasjonsluminanser.

Rent teknisk skal dette gjøres ved å kontrollere alle overgangssonearmaturene med individuell DALI-adressering. Når den beregnede verdien for luminansreduksjonen tilsvarer $4 Cd/m^2$ for posisjonen til et indre-armatur, skal alle overgangssonearmaturer mellom dette og neste indre-armatur slukkes. Dette skal styres ved hjelp av forhåndsdefinerte verdier for adaptasjonsluminansen, og er i følge Luxsave fullt mulig å implementere [26]. Følgende figur viser utviklingen for hvordan sonen skal forkortes ved minskende verdi av adaptasjonsluminansen:



Figur 4.7: Slukkeforløp for overgangssonearmaturer.

Ved $L_{20} = 400cd/m^2$ vil midlere luminans i hele overgangssonen tilsvare verdien indre sone. Dette betyr at alle overgangssonearmatur vil være slukket, og kun grunnbelysningen står igjen. Som ved innkjøringssonen, er det valgt å ikke ha trafikkdetektering på dagtid i overgangssonen, på bakgrunn av trafikk tettheten.

4.2.4 Indre sone

Indre sone er valgt å være utformet med følgende muligheter:

- Energibesparende regulering

Beskrivelse

Indre sone er gjennomgående, og skal bestå av like armaturer med samme avstand gjennom hele tunnelen. Disse skal disse dimmes to ganger i løpet av døgnet, for å møte kravene til Statens vegvesen. Med tanke på ÅDT og fartsgrense (fig. 2.12), tilsier dette $4cd/m^2$ ved *Dag* og $2cd/m^2$ ved *Natt*. Dimmingen skal gjøres ved $L_{20} = 200$, da siste del av innkjøringssonen tilsvarer indre sone ved denne verdien ($4Cd/m^2$). Følgende tabell sammenfatter dimmeforløpet for armaturene i de ulike sonene:

L20	Innkjøring	Overgang	Indre sone (gjennomgående)
≥ 400	Dimmes trinnløst	Dimmes trinnløst	Konstant ($4 Cd/m^2$)
400-330	Dimmes trinnløst til 10 %	Slukket	Konstant ($4 Cd/m^2$)
330-200	Fryses på 10 %	Slukket	Konstant ($4 Cd/m^2$)
200-100	Fryses på 10 %	Slukket	Konstant ($2 Cd/m^2$)
≤ 100	Slukket	Slukket	Konstant ($2 Cd/m^2$)

Tabell 4.4: Dimmeforløp for armaturer tilknyttet de ulike sonene ved ulike verdier for L20

Rent teknisk skal indre sone styres ved å plassere alle armaturene i samme DALI-gruppe. Siden det vil være over 64 armaturer, betyr dette at indre-sone må styres av flere lampekonsollere [26].

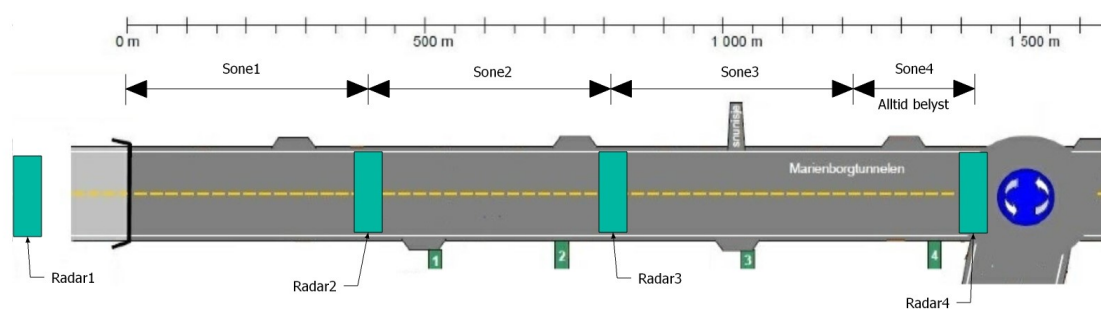
4.2.5 Dynamisk nattbelysning

Nattbelysningen er valgt å være utformet med følgende muligheter:

- Sonestyrt kjøretøydeteksjon

Beskrivelse

På bakgrunn av målinger for trafikk tetthet i tunnelen (Tillegg F), er det valgt å ha kjøretøydeteksjon mellom 00.01-05.00. Dette fordi det passerer kjøretøy med så lav frekvens, at det i gjennomsnitt aldri vil befinne seg mer enn et kjøretøy i tunnelen i løpet av denne perioden. På bakgrunn av dette, kan det være mye energi å spare ved å implementere dette. Kjøretøydeteksjonen er valgt å bli gjort seksjonsvis, som beskrevet i mulighetsstudiet. Løsningen skal bestå av tre like lange soner på 400 meter, og en statisk sone på 200 meter. Følgende figur viser soneinndelingen:



Figur 4.8: Soneinndeling for nattbelysning ved kjøretøydeteksjon

Deteksjonen skal gjøres ved hjelp av radarer, som registrerer kjøretøy inn og ut av sonene. Det forutsettes at radarene kan detektere og skille mellom trafikk i begge retninger. Sone4 er valgt å være påskrudd hele tiden, på grunn av trafikken som går fra Ila og ut Steinberg tunnelen. Dersom et kjøretøy kommer fra Marienborg (fra venstre side i figur 4.8), detekteres kjøretøyet med radar ca. 250 meter før tunnelens åpning. Deretter tennes sone 1 og 2. Når kjøretøyet detekteres inn i sone2, slukker sone1 etter 10 sekunder og sone 3 tennes. Når kjøretøyet registreres inn i sone 3, slukker sone 2 etter 10 sekunder. Til slutt når kjøretøyet registreres ut av sone 3, slukkes sone 3 etter 10 sekunder. Ved trafikk fra andre siden følger samme tenn/slukk-mekanisme, men i motsatt rekkefølge. I følge Luxsave er denne løsningen teknisk mulig å implementere, ved å benytte DALI-grupper for de ulike sonene. Likevel stiller løsningen svært høye krav til deteksjonssikkerheten. I tillegg må det implementeres en logikk med en teller som holder styr på antall biler som kommer inn og ut av sonene [26]. En enklere og sikrere løsning hadde vært å benytte tidsstyrt belysning. Dette ble valgt vekk, da det ble konkludert med at belysningen ved denne løsningen nesten ville vært konstant på. Siden dette kun er en teoretisk utforming, er det derfor interessant og se om denne løsningen kan ha noe for seg.

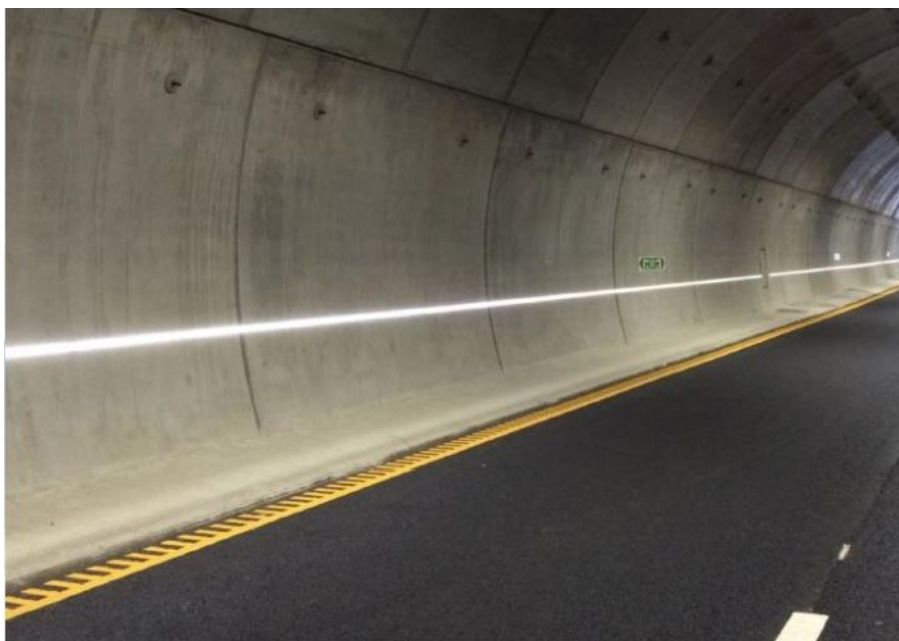
4.2.6 Ledelys/Rømningslys

Ledelys/rømningslys er det valgt å være utformet med følgende muligheter:

- Gjennomgående striper med små LED-armaturer
- Egen kontroller som styrer forhåndsinstallerte scenarier
- To scenarier (ledelys og rømningslys)

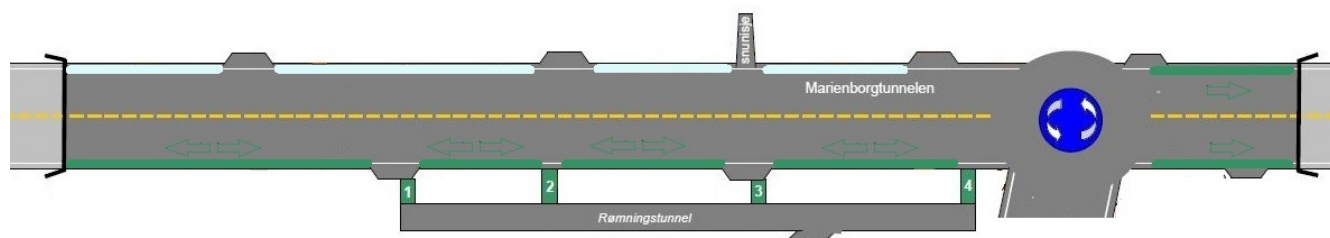
Beskrivelse

Stripene skal installeres 1,0 meter over veibanen på begge sider av veien, og ha to forhåndsinstallerte scenarier. Ved normal drift skal de være dimmet med hvitt lys, i henhold til Statens Vegvesens krav i kapittel 2.4.1.



Figur 4.9: Ledelys ved hjelp av LED-striper [25]

Dersom systemet settes i nødmodus, enten ved utløsning av et brannapparat, deteksjon fra brannsensor eller overstyring fra VTS, skal stripene gå i over til det andre scenariet. Dette vil si at den ene siden forblir uendret, men den andre skifter til grønt lys med dynamisk føring mot nødutgangene. Følgende figur illustrerer løsningen:



Figur 4.10: Dynamiske grønne rømningslys

Dette vil gjøre at personer som oppholder seg i tunnelen ved et nødsscenario, vil bli ført mot nødutgangene. Flere scenarioer for stripene kunne vært implementert, men med tanke på tunnelens lengde og sentrumsnære plassering, ble det vurdert at dette ikke var nødvendig. I tillegg ville det gjort systemet unødvendig komplekst. VTS skal likevel ha muligheten til å skru systemet av/på. Rent teknisk skal disse stripene styres med to ulike signaler fra segmentkontrolleren. Dette er mulig, da kontrolleren for stripene leveres med ferdig installert driver og logikk [26] [34]

4.2.7 Oppbrytning av monotoni

Siden Marienborgtunnelen er relativt kort (1840 m), er ikke oppbrytning av monotoni like viktig som i lange tunneler. Likevel er dette en teoretisk utforming, hvor motivasjonen er å se på mulighetene til LED-teknologien. Av den grunn er det valgt å bryte opp monotonien i rundkjøringen. Løsningen er utformet på følgende måte:

- Armaturer med varierende farger ved RGB-fargeendring

Beskrivelse

Belysningen skal bestå av RGB-armaturer som peker opp på kabelbrua. Løsningen skal gjøre bilistene oppmerksomme på at det skjer en endring i kjøremønsteret på vei inn i en rundkjøring. Belysningen kan se ut som dette:



Figur 4.11: Belysning i rundkjøring (bilde fra Karmøy-tunnelen i Rogaland). [35]

Alle RGB-armaturene skal i utgangspunktet være tilknyttet samme styringsgruppe, og fargen på belysningen skal endres gjennom årstidene ved hjelp av et forhåndsinnstilt program. På høsten er de gule, på vinteren er blåhvite, om våren blågrønne og om sommeren rødgrule. Armaturene skal også kunne individuelt overstyres av VTS. På denne måten kan belysningen tilpasses ved spesielle arrangementer i byen. Ved 17. mai kan for eksempel armaturene lyse rødt, hvitt og blått. I følge Luxsave skal denne løsningen være fullt mulig å implementere ved bruk av DALI og armaturer designet til formålet [26].

4.2.8 Kommunikasjon

Det hadde vært spennende å implementere et anlegg med Li-Fi, men grunnet teknologiens mange begrensninger som nevnt i mulighetsstudiet er dette valgt bort.

Kapittel 5

Metoder for vurdering av utforming

For å vurdere om det teoretisk utformede LED-anlegget er *bedre og mer effektivt* enn det eksisterende konvensjonelle anlegget, er det utført målinger og beregninger for begge anlegg. Dette kapitlet presenterer metodene som har blitt benyttet. Beregningene og målingene har blitt avgrenset til å omhandle belysningen i de ulike sonene. Belysning som innvolverer lede/rednings-lys og oppbrytning av monotoni, er med andre ord ikke inkludert. Dette fordi det ikke eksisterer noe sammenligningsgrunnlag i det konvensjonelle anlegget. Løsningene kommer likevel til å bli vurdert i diskusjonen.

For sonene, har målinger og beregninger blitt utført for følgende parametere:

- Energibruk
- Trafikksikker belysningskvalitet
- Levetidskostnad

For å gjøre sammenligningen mest relevant for hva som er mulig i dag, er det for den teoretiske utformingen valgt et moderne armaturgrunnlag fra en seriøs aktør. Valget falt på belysningsanlegget i Stavsjøfjelltunnelen, en annen tunnel i Trondheimsområdet. Dette er et belysningsanlegg bestående av LED-armaturer, installert august 2015 av Thorn Lighting. Anlegget har 5 dimmetrinn, innkjøringsluminans $175Cd/m^2$, fartgrense på $80km/t$, $\text{ÅDT} \geq 8000$, og samme tversnitt som det konvensjonelle anlegget (klasse T9,5). I følge leverandør, har anlegget det fremste innen dagens LED-teknologi [35]. I kombinasjon med de sammenfallende dimensjoneringsparameterne, gjør dette anlegget svært godt egnet som grunnlag.

5.1 Energibruk

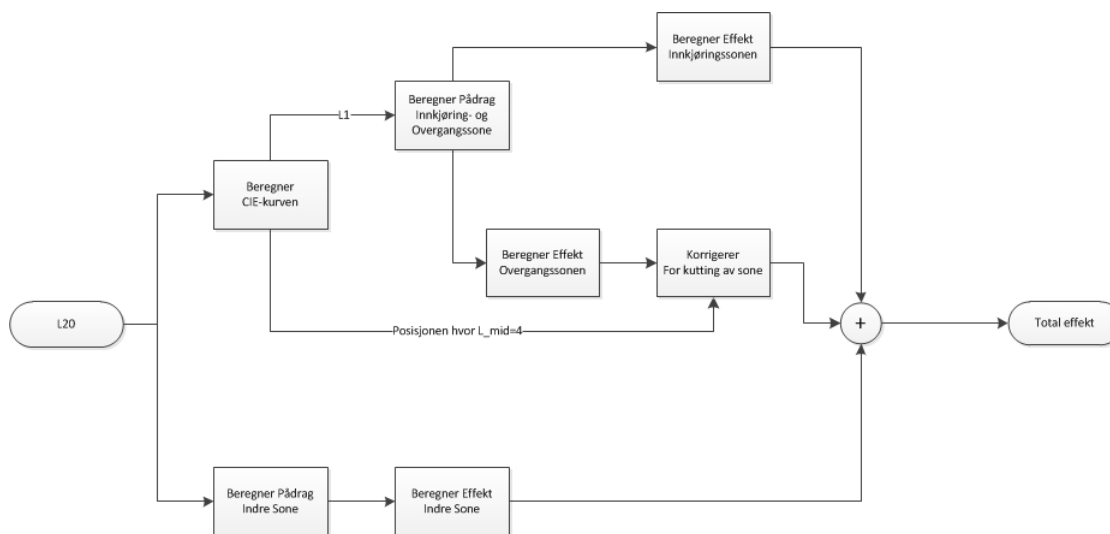
5.1.1 Metode for beregninger

For å vurdere energibruken til begge anleggene, er det gjort et estimat på bakgrunn armaturdata og målt adaptasjonsluminans. Sistnevnte er målt ved Marienborgtunnelens sørlige portal i perioden 09.05.2016-16.05.2016. For kjøretøydeteksjonen, er det utført separate beregninger. Alle beregninger er utført i Matlab, og skript benyttet finnes i Tillegg G, H og I. Generelt er følgende forutsetninger lagt til grunn for alle beregninger:

- Effekt og belysningsstyrke har et lineært forhold
- Belysningsstyrke og midlere luminans har et lineært forhold
- Alle armaturer er installert med samme vedlikeholdsfaktor (0,75)
- Systemet er perfekt regulerbart (ingen forsinkelser)

Metode for teoretisk utformet LED-anlegg

Energibruken for LED-anlegget er beregnet ved hjelp av målinger for L20 (presenteres senere). Disse målingene har en samplefrekvens på 60 sekunder, og denne verdien er også valgt som oppdateringsfrekvens for armaturene. Følgende forenklete flytdiagram viser programflyten for å beregne effekten til LED-anlegget ved hver nye oppdatering av L20:



Figur 5.1: Forenklet flytdiagram for beregning av effekt i LED-anlegg.

Korrigeringen for kutting av overgangssonen er gjort på bakgrunn av slukkeforløpet i figur 4.7. Armaturplasseringen i Stavsjøfjelltunnelen (Tillegg B), er benyttet som grunnlag for å gjøre et estimat av antall overgangssonearmaturer som vil være plassert mellom hvert indre-armatur. I skriptet blir posisjonen til indre-armaturene, sammenlignet med første posisjon hvor luminansnivået er på sitt laveste (4cd/m^2). Denne posisjonen blir hentet fra tunnelens luminansreduksjonskurve (CIE-kurve), som blir beregnet på nytt ved oppdatering av L20. For å beregne pådraget i armaturene i innkjøring/overgang, er kaldenderfunksjonen i figur 4.5 benyttet. Pådraget for indre sone er beregnet i henhold til tabell 4.4.

For å beregne total energimengde gjennom hele perioden, er effekt for hvert minutt summert

opp. I tillegg til total energimengde, er det utført beregninger som ser på besparingspotensialet ved å kutte overgangssonen. Dette var noe kandidaten ønsket å undersøke, da det ikke er funnet noen tidligere anlegg/publikasjoner som har tatt for seg potensialet til denne løsningen. For å beregne dette, er en kutte-løsningen sammelignet med en løsning der overgangssonearmaturene blir dimmet med samme pådrag som kalenderfunksjonen i figur 4.5.

Fullstendig skript for energiberegninger vedrørende LED-anlegget er plassert i Tillegg G.

Metode for konvensjonelt anlegg

Energibruken for det konvensjonelle anlegget er beregnet ved hjelp av samme målinger for L20 som LED-anlegget. Siden anlegget er trinnstyrt, er luminansnivåene som trigger de ulike trinnene benyttet i kombinasjon med beregnet effekt for hvert nivå. Nærmere grunnlag vil bli presentert senere. Fullstendig skript for energiberegninger vedrørende det konvensjonelle anlegget er plassert i Tillegg I.

Metode for kjøretøydeteksjon

Det er utført separate beregninger for effekt og energibruk for kjøretøydeteksjonen i det teoretisk utformede anlegget i tidsrommet 01-05. For beregningene er trafikk tettheten i Tillegg D blitt benyttet som grunnlag for å estimere av/på-tid i de forskjellige sonene. I tillegg er det gjort følgende forutsetninger:

- Kjøretøyet holder konstant fart gjennom hele tunnelen
- Kjøretøyene kommer med konstant intervall basert på tettheten per time
- Sonene slukker og tenner momentant ved deteksjon av kjøretøyet (ingen forsinkelse)

Med en fartgrense på 60 km/t , vil det ta 100 sekunder for et kjøretøy å passere alle de fire radarene, noe som gir følgende av/på-tider avhengig av hvilken retning kjøretøyet kommer fra:

Tid fra første radar [sek]	Sone1	Sone2	Sone3
0-40	PÅ	PÅ	AV
40-64	AV	PÅ	PÅ
64-100	AV	AV	PÅ

Tabell 5.1: Av/På-tid for sonene ved kjøretøy fra Marienborgtunnelen

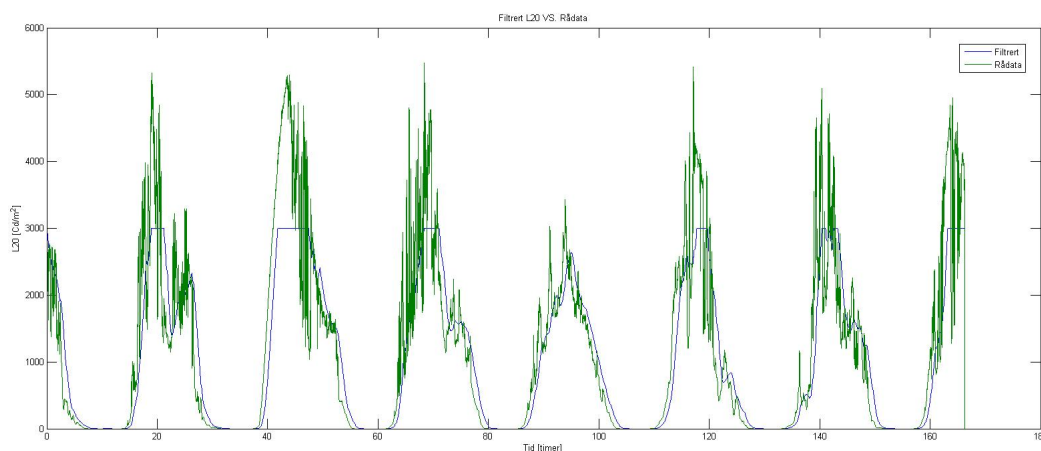
Tid fra første radar [sek]	Sone1	Sone2	Sone3
0-36	AV	PÅ	PÅ
36-60	PÅ	PÅ	AV
60-100	PÅ	AV	AV

Tabell 5.2: Av/På-tid for sonene ved kjøretøy fra rundkjøringen

Ut fra disse tabellene er det beregnet hvor lenge armaturene er på ved ulike trafikk tettheter, og igjen et estimat på effekt og energi. Det også utført utregninger på hvor mye energi som faktisk kan spares ved å benytte denne løsningen. Fullstendig skript for utregningene ligger i Tillegg H.

5.1.2 Beregningsgrunnlag for adaptasjonsluminans

For å beregne energibruken til belysningen regulert av adaptasjonsluminansen, er rådata for Marienborgtunnelens sørlige portal benyttet. Denne er motatt fra Controltec AS, firmaet som har prosjektert dagens styresystem. Rådata består av adaptasjonsluminans samlet med 60 sekunders mellomrom, og er vist med grønt i figur 6.3. Målingene er alt for oscillerende til å kunne benyttes til direkte regulering, noe som i følge Controltec AS kommer av varierende solforhold på grunn av skyer og lignende. [52]. Av den grunn er rådata filtret på samme måte som ved dagens anlegg, hvilket gjøres ved å ta et gjennomsnitt av de 100 foregående målingene [52]. Det er i tillegg lagt på en hystereseffekt, slik at maksimal verdi tilsvarer $L_{20} = 3000$. Dette fordi den maksimale dimensjoneringen av anlegget, tilsvarer denne verdien. Følgende figur viser filtret adaptasjonsluminans gjennom en uke (09.05.2016-16.05.2016), benyttet som beregningsgrunnlag:



Figur 5.2: Filtret adaptasjonsluminans

5.1.3 Beregningsgrunnlag for teoretisk utformet LED-anlegg

Ved å benytte armaturdata fra Stavsjøfjelltunnelen (Tillegg C), er armaturantall for det teoretiske belysningsanlegget estimert. Følgende antall armaturer med tilhørende effekt er benyttet for utregningene:

Sone	Lengde	Armaturer
Innkjøring	60m	52x263W
Overgang	104 meter	10x263W + 2x212W + 2x162W + 2x105W
Indre (gjennomgående)	1400m	117x133W

Tabell 5.3: Armaturer i teoretisk utforming

Armaturantallet er bekreftet av Hans Øien i Thorn Lighting som realistisk med tanke på Marienborgtunnelens parametere [35]. Armaturene kan maksimalt dimmes ned til 10 % [35], noe som også er tatt hensyn til i tidligere presenterte kalenderfunksjon.

5.1.4 Beregningsgrunnlag for eksisterende konvensjonelt anlegg

Følgende antall armaturer med tilhørende effekt (inkludert forkoblingsutstyr) er mottatt fra leverandør og benyttet for utregningene [32]:

400 W høytrykk natriumslamper	432 W
250 W høytrykk natriumslamper	278 W
100 W høytrykk natriumslamper	115 W
Lysstoffrør 58 W longlife rør	56 W

Tabell 5.4: Total effekt for dagens konvensjonelle armaturer inkludert forkoblingsutstyr [32]

På bakgrunn av armaturdata for Marienborgtunnelen (Tillegg B), gir dette følgende effekt for de ulike belysningstrinnene:

Dimmetrinn	Effekt
Dag2	42,8 kW
Dag1	38,1 kW
Skumring	31,3 kW
Natt	12,9 kW

Tabell 5.5: Effekt i Marienborgtunnelen

Følgende data er mottatt for regulering av trinnene [52]:

Trinn	Adaptasjonsluminans
Skumring	150
Dag1	750
Dag2	1500

Tabell 5.6: Reguleringsparametere for dagens konvensjonelle anlegg [52].

5.2 Belysningskvalitet

For å vurdere belysningskvaliteten, er det blitt utført målinger i begge anlegg. Målingene er blitt utført i innkjøringssonen og i indre sone ved høyeste effektrinns (Dag2).

5.2.1 Metode for målinger

Belysningsmålinger er blitt utført ved hjelp av et Spektrometer (UPRtek-MK350S). Følgende parametere er blitt målt:

- Fargegjengivelse (R_a)
- Fargetemperatur
- Kromastitet (Macadam-ellipser)
- Lysspekter

Målingene er utført ved å peke spektrometeret mot belysningen fra armaturene, og deretter lese ønskede verdier direkte fra måleredskapet. For begge tunneler er det gjort flere målinger i hver sone for å bekrefte resultatene.

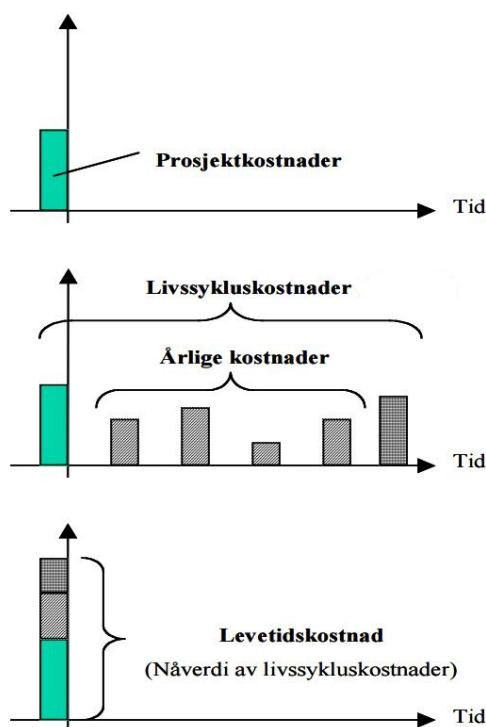


Figur 5.3: Spektrometer.

- I resultatene er det også inkludert TI-verdier og luminansjevnhet for begge anlegg. Disse er funnet i Relux-beregninger tilsendt fra aktuelle armaturprodusenter.

5.3 Levetidskostnad

For å vurdere levetidskostnaden for de to belysningsanleggene, er det valgt å gjøre en enkel LCC-analyse (livssyklus kostnadsanalyse). Dette er en økonomisk beregning hvor summen av investeringskostnader (prosjektkostnaden) for et anlegg slås sammen med nåverdien til kostnader for fremtidige drifts- og vedlikeholdforhold. Nåverdien tar hensyn til kostnad for utskifting i dagens penger. Resultatet er et konkret tall, som indikerer en total kostnad for en investering over en gitt tidsperiode, eller levetidskostnad. [46] [47].



Figur 5.4: Levetidskostnad. [46].

Levetidskostnaden er en svært interessant parameter for aktuelle utforming av to grunner: 1) Den kan si noe om hvordan kostnaden varierer over tid for de to anleggene. Dette er informativt, da det forteller noe om kostnader knyttet til energibruk og utskiftninger for de to anleggene. 2) Beregning av levetidskostnad omfatter oppgaver som skal utføres ved utbygging av nye veilysanlegg i regi Statens vegvesen [20].

5.3.1 Metode for beregning

For å beregne total nåverdi (NV_0) av en fremtidig kostnad er følgende formel benyttet [47]:

$$NV_0 = \sum_{n=1}^N \frac{K_n}{(1+r)^n} \quad (5.1)$$

Der K_n er en kostnad i år n , og N år i analyseperioden [47], med en kalkulasjonsrente r . Kalkulasjonsrenten representerer den realrenten som kunne vært oppnådd ved en alternativ pengeplassering og er vanskelig å fastsette. For tiden bruker Statens vegvesen en verdi $r = 4\%$ [47], en verdi som også er benyttet i denne beregningen.

For beregningene er det valgt å se på levetidskostnader knyttet til en tenkt installasjon av begge anleggene i dag, driftet over en periode på $N = 25\text{år}$. Følgende tre kostnader er inkludert i beregningen:

- Investeringskostnad (I)
- Nåverdi av energikostnader (N_{energi})
- Nåverdi av utskiftningskostnader (N_{uts}).

Følgende formel er benyttet for å finne levetidskostnaden til anleggene [47]:

$$\text{Levetidskostnad} = I + N_{\text{energi}} + N_{\text{utskiftning}} \quad (5.2)$$

5.3.2 Beregningsgrunnlag

For beregningene er følgende data benyttet:

Investering og utskiftning

Data mottatt fra armaturprodusenter for de to belysningsanleggene:

Anlegg	Frekvens for utskiftning	Hva må skiftes
Konvensjonelt	4 år	Kun lampe
LED-Indre	12 år	Innmaten av armatur (50 % av investeringskostnad)
LED- Innkj.	22 år	Innmaten av armatur (50 % av investeringskostnad)

Tabell 5.7: Frekvens og kostnad for utskiftning. [35] [32].

I tillegg er det mottatt data for armaturkostnader og installasjonkostnader, benyttet til beregning av investeringskostnad og kostnader ved utskiftninger. Etter ønske fra produsenter vil kun total-investeringskostnad presenteres. For investeringskostnaden til LED-anlegget, er det lagt til en ekstrakostnad for styrekabler, sensorer, kontrollere og programmering. Etter samtaler med Controltec AS som mente at denne kostnaden ville være ganske lav ved nye anlegg, er kostnaden satt til 50 000 kr per innkjøringsmulighet [52].

Energi

For estimat av årlige energikostnader, er nettleiepriser (effektmålt næring, lavspent) hentet fra hjemmesidene til Trønderenergi [53]. Strømpris er en svært usikker parameter, men er estimert etter anbefalinger fra daglig leder i Nord Østerdal Kraftlag [54].

Parameter	Verdi
Fastbeløp	8800 kr/år
Effektpris	500 kr/KW/år
Forbruksavgift	16 øre/kWh
Energipris	5 øre/kWh
Strømpris	30 øre/kWh

Tabell 5.8: Parametere for energikostnader.

For energibruken til belysningsanleggene, er det estimert at de har samme forbruk hver uke som resultatene fra energiberegningene gjennom hele året. For effektpris gjelder *den høyeste timeverdi de siste 12 måneder* [53], og av den grunn er årsbeløp estimert som følge av beregnet toppeffekt for hvert anlegg.

For konkrete beregninger henvises det til Matlab-skript for LCC-beregninger i Tillegg J.

Kapittel 6

Resultater

Dette kapitlet presenterer resultater fra beregninger og målinger ved de to belysningsanleggene.

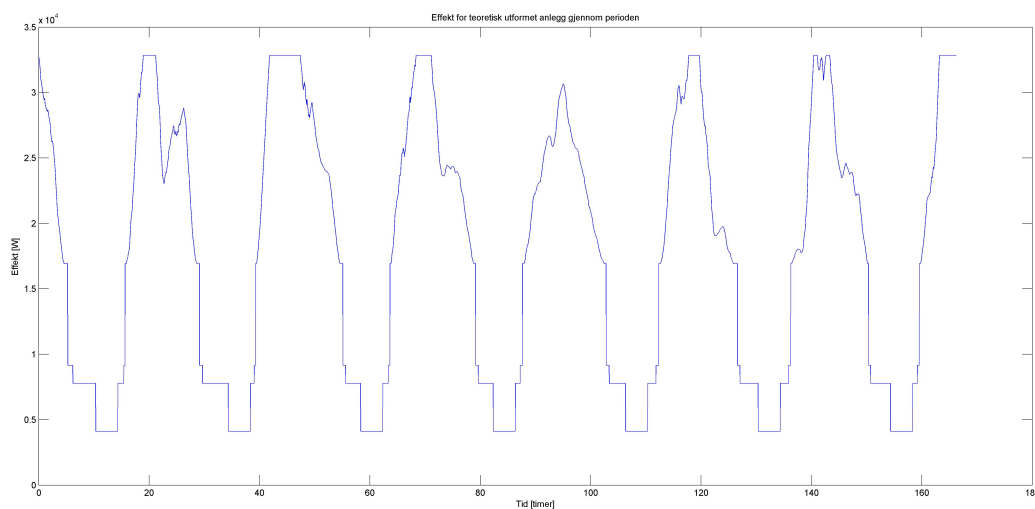
6.1 Energibruk

Følgende resultater for effekt og energibruk er blitt funnet:

6.1.1 Teoretisk utformet anlegg

Total effekt og energibruk

Følgende figur viser utregnet effekt gjennom hele perioden:



Figur 6.1: Total effekt over hele perioden for teoretisk utforming.

Effekten i de flate områdene varierer i praksis mellom 0 og grunnverdien til nattbelysningen, grunnet kjøretøydeteksjonen. I figuren er dette fremstilt som gjennomsnittseffekt. Mer konkrete resultater for kjøretøydeteksjonen kommer senere.

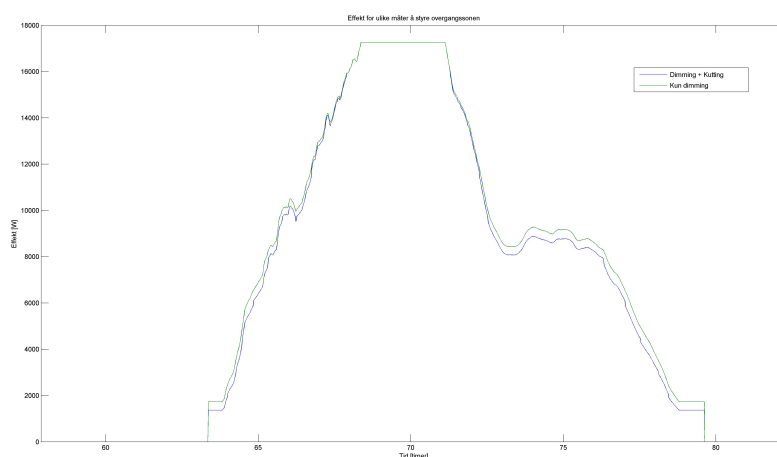
Ved å summere opp effekt for hele perioden, er følgende resultat funnet for totalt energiforbruk:

Belysning	Energibruk i perioden
Totalt	2959,9 kWh

Tabell 6.1: Energibruk i Marienborgtunnelen for teoretisk utformet anlegg

Energibruk - Kutting av overgangssonen

Følgende figur viser en sammenligning av effekten for innkjøringssonen over et døgn, ved ulike styringsmetoder for overgangssonen:



Figur 6.2: Effekt for ulike måter å styre overgangssonen.

Ved å summere opp effekten over hele perioden, er følgende resultater funnet for energibruk:

Styringsmetode	Kun dimmet	Dimmet og kuttet	Besparingspotensiale
Energibruk i perioden	2991,5 kWh	2959,9 kWh	1,1 %

Tabell 6.2: Sammenligning av energibruk med kuttet overgangssone

Kjøretøydeteksjon

Følgende tabell viser andelen AV-tid for armaturene ved bruk av kjøretøydeteksjon:

Tidspunkt	Belysning AV
01-02	48,9 %
02-03	56,4 %
03-04	58,1 %
04-05	47,4 %

Tabell 6.3: Belysning ved kjøretøydeteksjon

Hvilket gir følgende energimengder over hele perioden:

Tidspunkt	Energibruk uten deteksjon	Energibruk med deteksjon
01-02	54,5 kWh	26,8 kWh
02-03	54,5 kWh	30,8 kWh
03-04	54,5 kWh	31,7 kWh
04-05	54,5 kWh	25,9 kWh
Sum natt	218,1 kWh	115,2 kWh

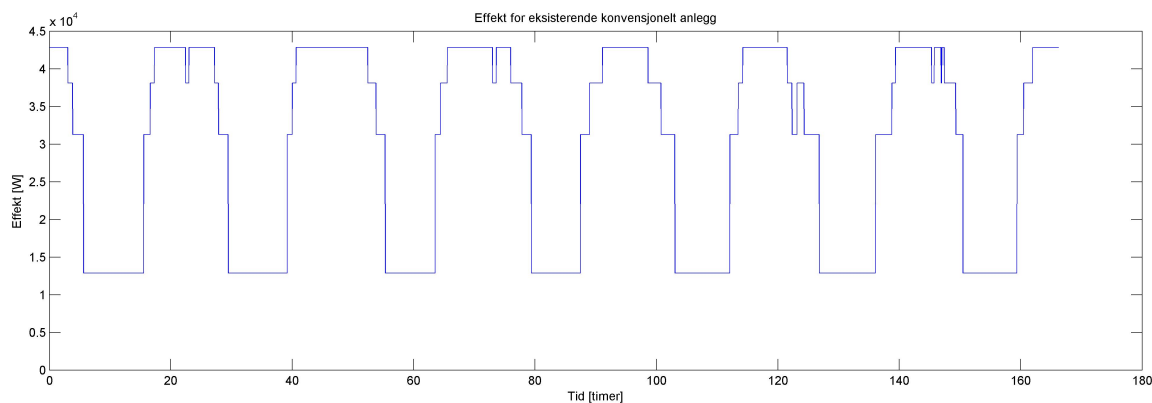
Tabell 6.4: Besparing med kjøretøydeteksjon

Styringsmetode	Ikke deteksjon	Deteksjon	Besparingspotensiale
Energibruk i perioden	3062,8 kWh	2959,9 kWh	3,8 %

Tabell 6.5: Sammenligning av energibruk med kjøretøydeteksjon.

6.1.2 Resultater fra eksisterende belyningsanlegg i Marienborgtunnelen

Følgende figur viser effekten over hele perioden for det eksisterende konvensjonelle anlegget:



Figur 6.3: effekt for dagens konvensjonelle anlegg.

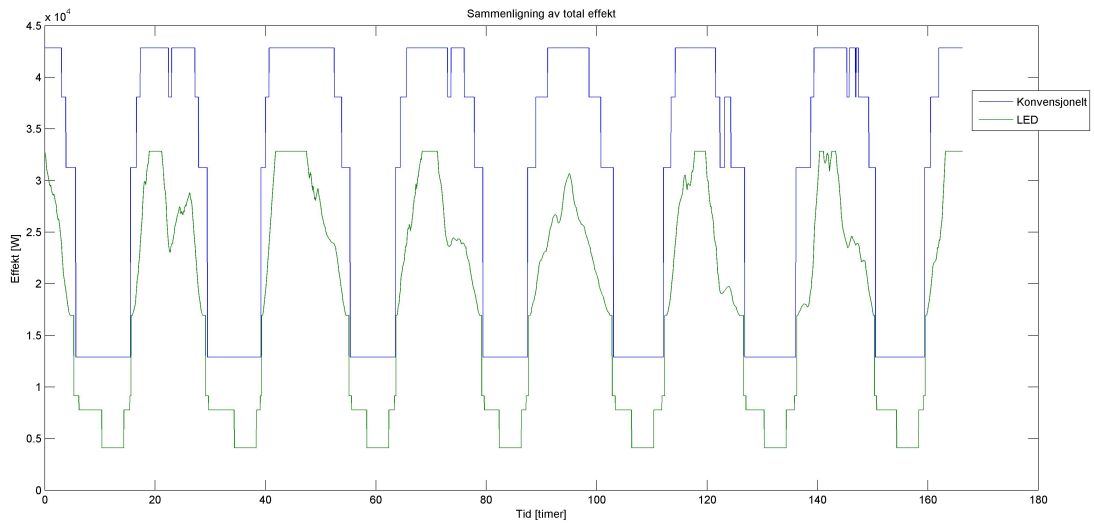
Hvilket gir følgende energibruk for hele perioden:

Belysning	Energibruk i perioden
Totalt	4868,7 kWh

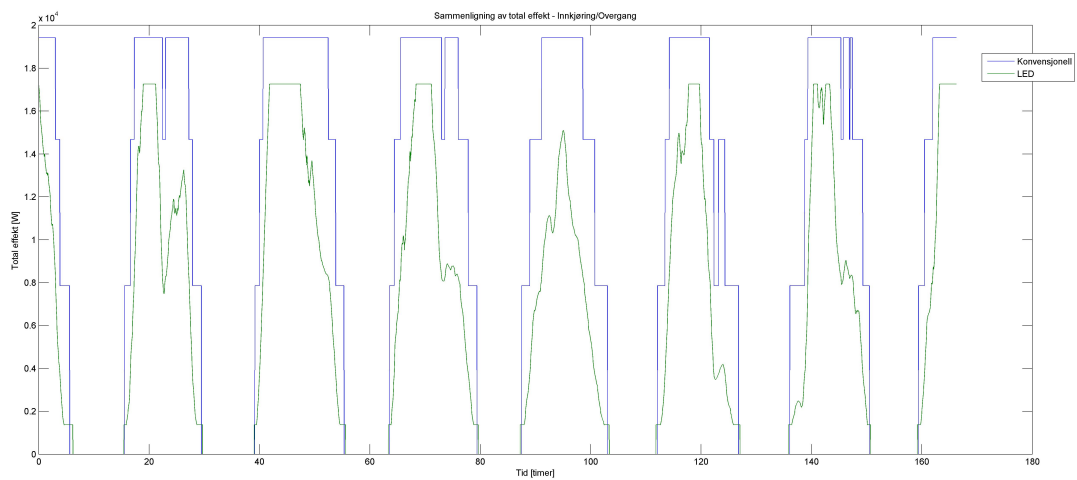
Tabell 6.6: Energibruk i Marienborgtunnelen for dagens konvensjonelle anlegg

6.1.3 Sammenligning av energibruk

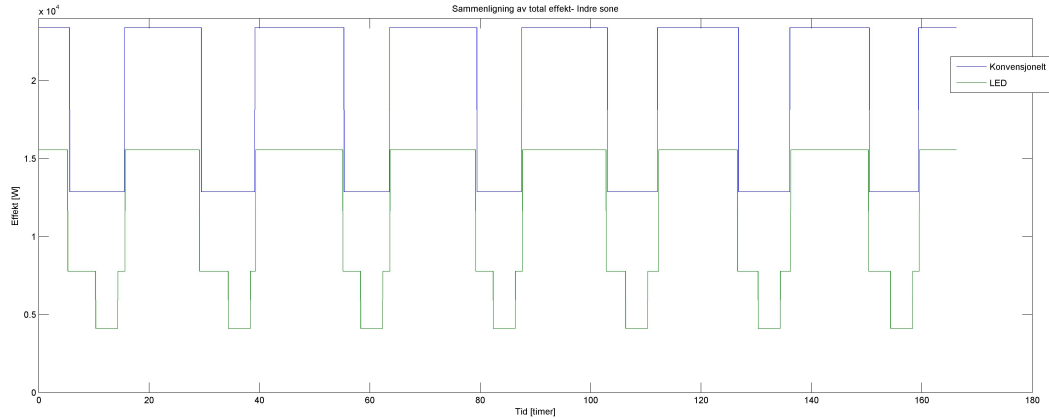
Følgende figurer viser effekt for de to anleggene mot hverandre (NB. *Innkjøringssonen* fra dette punktet i oppgaven, inkluderer både innkjørings- og overgangssone):



Figur 6.4: Sammenligning av effekt til de to anleggene.



Figur 6.5: Sammenligning av effekt for innkjøringssonen til de to anleggene.



Figur 6.6: Sammenligning av effekt for indre sone til de to anleggene.

Ut i fra disse figurene, er følgende tall beregnet for energi og effekter ved bruk av LED-anlegget i forhold til dagens konvensjonelle anlegg:

Belysning	Konvensjonelt anlegg	LED-anlegg	Besparingspotensiale
Innkjøring	19,4 kW	17,3 kW	10,8 %
Indre Sone	23,4 kW	15,5 kW	33,8 %
Totalt	42,8 kW	32,8 kW	23,4 %

Tabell 6.7: Sammenligning av maksimale effekter.

Belysning	Konvensjonelt anlegg	LED-anlegg	Besparingspotensiale
Indre Sone, dag	23,4 kW	15,5 kW	33,8 %
Indre Sone, natt	12,9 kW	7,8 kW	39,5 %
Indre Sone, kjøretøydeteksjon	12,9 kW	4,1 kW (snitt)	68,2 %

Tabell 6.8: Sammenligning av effekter i indre sone.

Belysning	Konvensjonelt anlegg	LED-anlegg	Besparingspotensiale
Innkjøring	1652,1 kWh	989,5 kWh	40,1 %
Indre Sone	3225,2 kWh	1970,4 kWh	38,9 %
Totalt	4868,7 kWh	2959,9 kWh	39,2 %

Tabell 6.9: Sammenligning av energi for perioden.

6.2 Trafikksikker belysningskvalitet

Følgende resultater for trafikksikker belysningskvalitet er blitt funnet:

6.2.1 Resultater fra LED-belysningsanlegg i Stavsjøfjelltunnelen

Sone	U0	U1	TI %	Fargetemp.	Ra	SDCM
Innkjøring	0,59	1,00	1,77	4063 K	70,4	5,0
Indre	0,72	0,90	5,22	4126 K	71,3	5,4

Tabell 6.10: Belysningsparametere for LED-anlegg i Stavsjøfjelltunnelen ¹

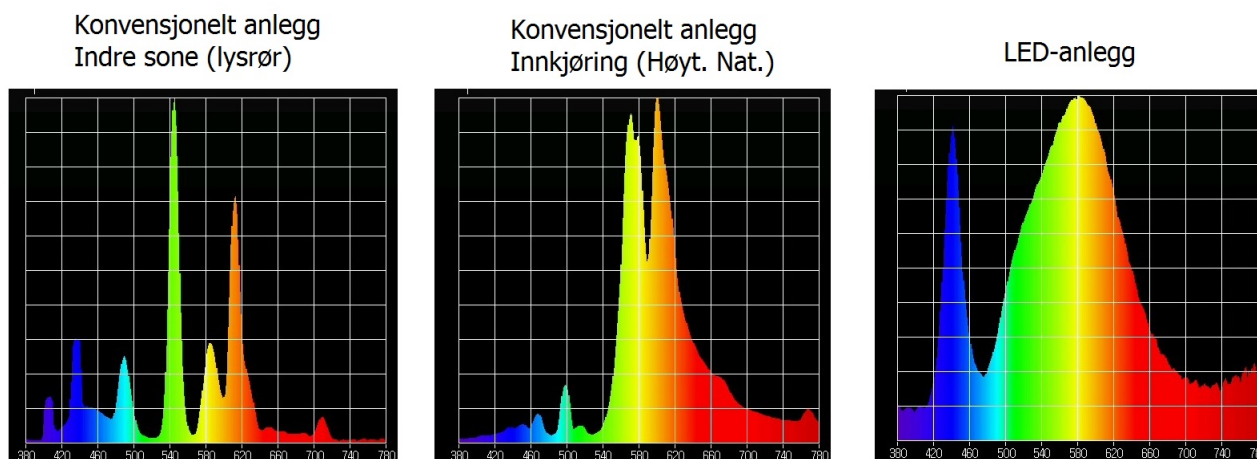
6.2.2 Resultater fra eksisterende belysningsanlegg i Marienborgtunnelen

Sone	U0	U1	TI %	Fargetemp.	Ra	SDCM
Innkjøring	0,60	0,99	0,59	2120 K	35,4	34,7
Indre	0,80	0,96	1,75	3957 K	78,7	5,7

Tabell 6.11: Belysningsparametere for konvensjonelt anlegg i Marienborgtunnelen ²

6.2.3 Sammenligning av belysningskvalitet

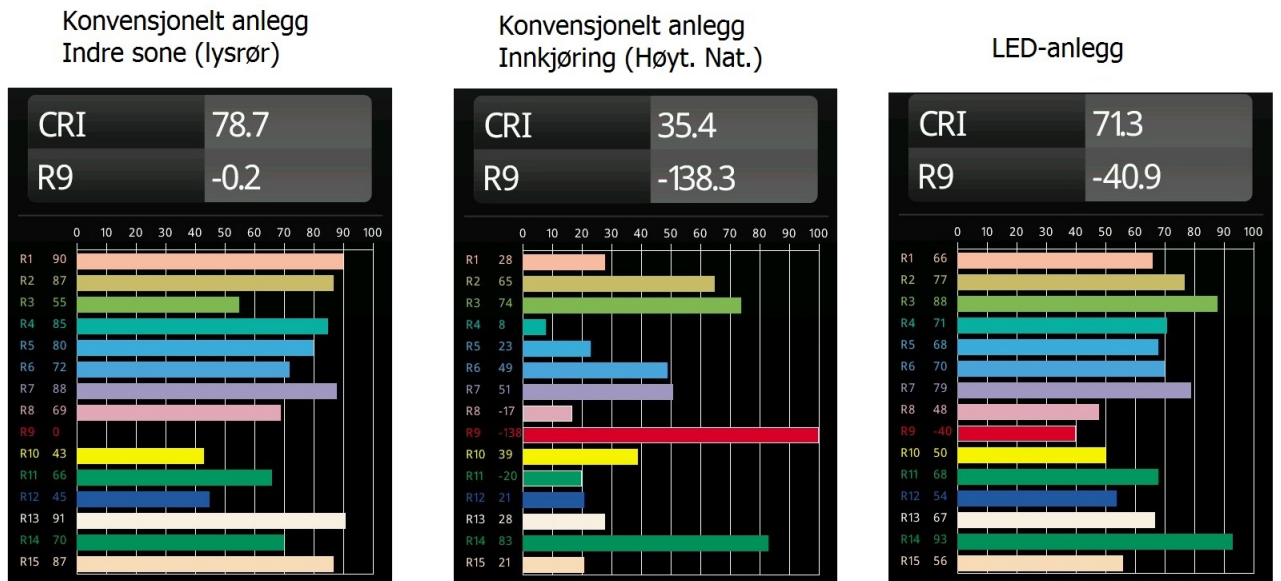
Følgende figurer viser en sammenligning av belysningsparametere for de ulike anleggene. For LED-anlegget var målingene tilnærmet identiske i innkjørings- og indre sone, og av den grunn presenteres kun en figur for hele LED-anlegget.



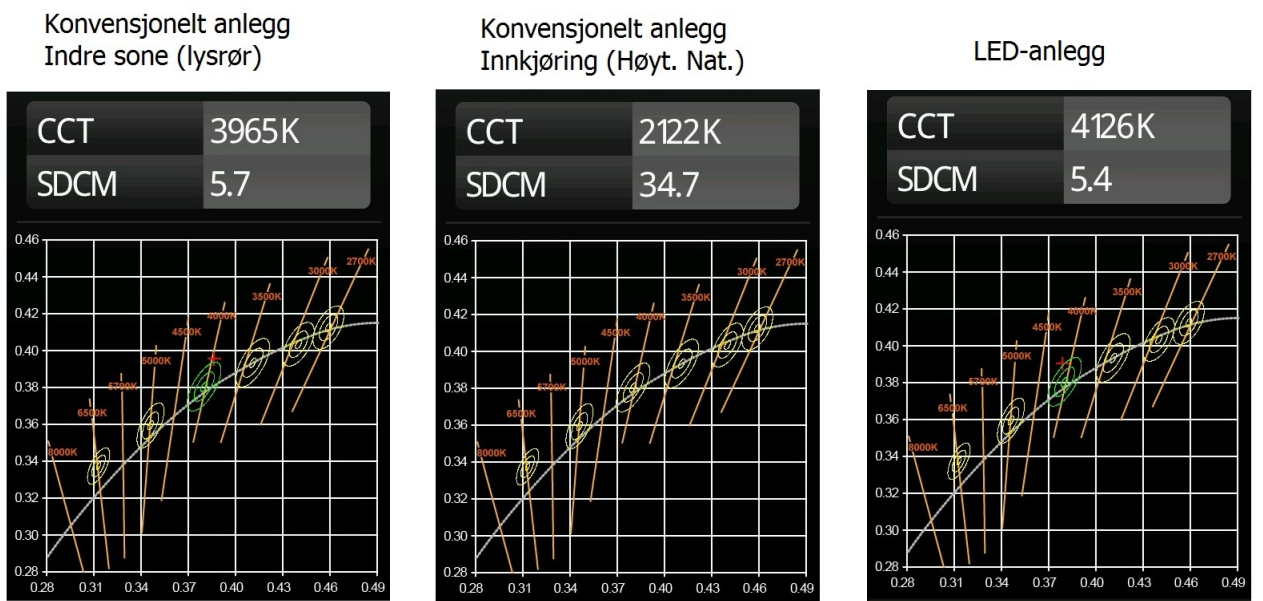
Figur 6.7: Sammenligning av spektre.

¹Utregninger for TI-verdier og luminansjevnhet ligger i Tillegg D. Observasjonspunkt Y=1,75 m benyttet.

²Utregninger for TI-verdier og luminansjevnhet ligger i Tillegg E. Observasjonspunkt Y=1,75 m benyttet.



Figur 6.8: Sammenligning av Ra-verdier.



Figur 6.9: Sammenligning av Macadamps-ellipser.

6.3 Levetidskostnad

6.3.1 Levetidskostnad for LED-anlegg

Følgende levetidskostnader er blitt funnet for det teoretisk utformede LED-anlegget:

Kostnad	Nåverdi
Investering	1,55 mill. kr
Total energi	1,62 mill. kr
Total utskifting	0,43 mill. kr
Totalt	3,60 mill. kr

Tabell 6.12: Nåverdier for LED-anlegg.

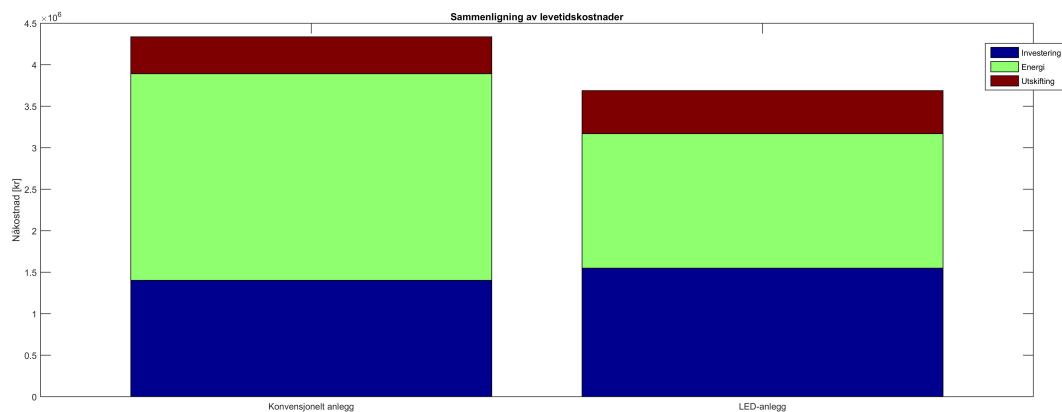
6.3.2 Levetidskostnad for konvensjonelt anlegg

Kostnad	Nåverdi
Investering	1,40 mill. kr
Total energi	2,49 mill. kr
Total utskifting	0,45 mill. kr
Totalt	4,34 mill. kr

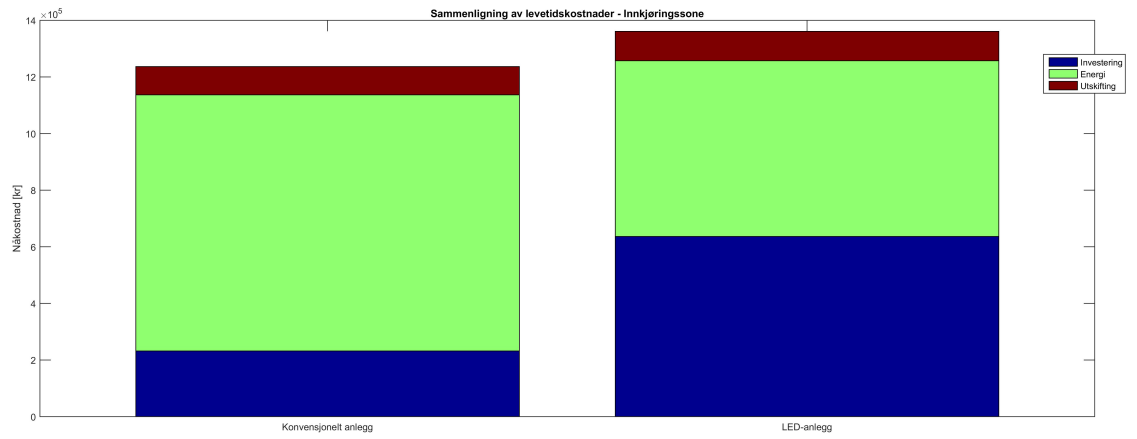
Tabell 6.13: Nåverdier for konvensjonelt anlegg.

6.3.3 Sammenligning av levetidskostnader

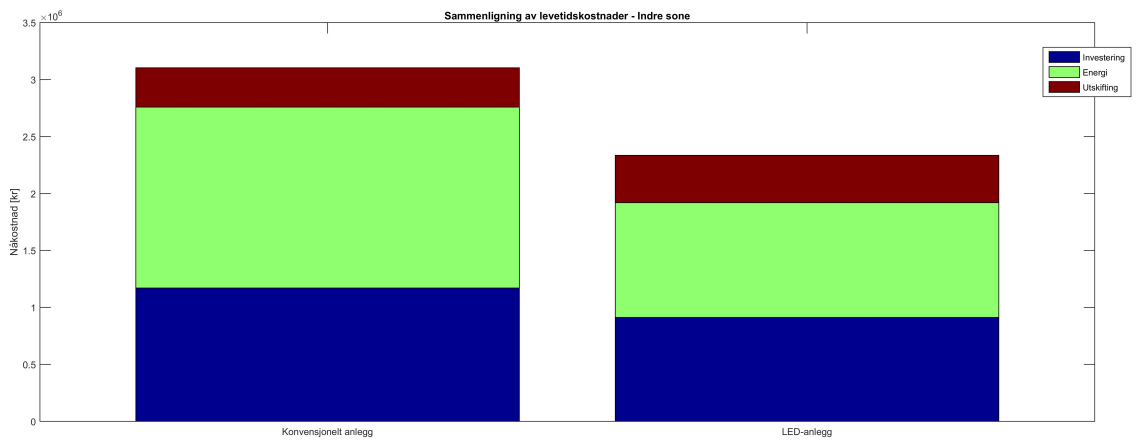
Følgende figurer viser en sammenligning av levetidskostnadene mellom de to anleggene:



Figur 6.10: Sammenligning av totale levetidskostnader.



Figur 6.11: Sammenligning av levetidskostnader for innkjøringssonen.



Figur 6.12: Sammenligning av levetidskostnader for indre sone.

Belysning	Konvensjonelt anlegg	LED-anlegg	Besparingspotensiale
Innkjøring:			
Investering	0,23 mill. kr	0,64 mill. kr	-178,26 %
Energi	0,90 mill. kr	0,62 mill. kr	31,11 %
Utskifting	0,10 mill. kr	0,10 mill. kr	0 %
Totalt	1,23 mill. kr	1,36 mill. kr	-10,57 %
Indre sone:			
Investering	1,17 mill. kr	0,91 mill. kr	22,22 %
Energi	1,59 mill. kr	1,01 mill. kr	36,48 %
Utskifting	0,35 mill. kr	0,42 mill. kr	-20,00 %
Totalt	3,11 mill. kr	2,34 mill. kr	24,78 %
Begge soner:			
Investering	1,40 mill. kr	1,55 mill. kr	-10,71 %
Energi	2,49 mill. kr	1,62 mill. kr	34,94 %
Utskifting	0,45 mill. kr	0,52 mill. kr	-15,56 %
Totalt	4,34 mill. kr	3,69 mill. kr	15,00 %

Tabell 6.14: Sammenligning av levetidskostnader.

Kapittel 7

Diskusjon

Dette kapitlet omhandler en diskusjon rundt resultatene for vurdering av de to belysningsanleggene. Kapitlet tar også for seg en diskusjon rundt overførbarheten for disse resultatene i henhold til andre tunnelanlegg, samt en diskusjon om fremtidig bruk av LED-teknologien i tunnelbelysning.

7.1 Vurdering av teoretisk utforming

Motivasjonen for den teoretiske utformingen, var å skape et LED-belysningsanlegg basert på løsningene funnet i bakgrunnsstudiet, som kunne fungere *bedre og mer effektivt* enn dagens konvensjonelle anlegg. Følgende parametere er lagt til grunn:

- Energibruk
- Trafikksikker belysning:
 - Lyskvalitet
 - Lystilpasning
- Levetidskostnad
- Førerens opplevelse

Denne diskusjonen vurderer de to anleggene mot hverandre i henhold til disse parameterne.

7.1.1 Vurdering av energibruk

Resultatene fra energiberegningene viser at det teoretiske LED-anlegget gjennom måleperioden bruker 39,2 % mindre energi enn dagens konvensjonelle anlegg. Ved å studere nærmere hvor beparingen for dette ligger, viser resultatene at innkjøringssonen så vidt har den høyeste relative besparelsen. Nærmere bestemt 40,1 % mot 39,2 % for indre sone. Ved å analysere effektkurven for innkjøringssonen for de to anleggene (figur 6.5), er det tydelig hvor besparelsen for denne sonen ligger. Den kontinuerlige L20-reguleringen av pådraget til armaturene i LED-anlegget, fører til at effekten til en hver tid ligger godt under det konvensjonelle anlegget. Dette er spesielt tydelig når det konvensjonelle anlegget står på maksimalt effekttrinn, mens LED-anlegget oscillerer på en vesentlig lavere effekt. LED-anlegget bruker også betraktelig mindre energi når begge anleggene ligger på topp effekt, nærmere bestemt 10,4 %. Siden antall armaturer i innkjøringssonen er det samme for begge anleggene (68 stk), kommer dette av et bedre lysutbytte for LED-armaturene.

Ved å studere effektkurvene for de to anleggenes indre soner (figur 6.6), er det tydelig at LED-anlegget er vesentlig mer energieffektivt. Tallene viser at anlegget ligger henholdvis 33,8 % lavere for effekt ved *dag* og 39,5 % lavere effekt ved *natt*. I periodene med kjøretøydeteksjon, ligger LED-anlegget 62,8 % lavere i effekt (i gjennomsnitt). Grunnen til at LED-anlegget er så energieffektivt, kommer av et vesentlig bedre lysutbytte. Mens det konvensjonelle anlegget trenger 209 armaturer (6,4 meter avstand, Tillegg B), klarer LED-anlegget seg med 117 armature (12 meter, Tillegg C) i denne sonen. Dette kommer av at LED-armaturene har et vesentlig bedre lysutbytte, og klarer fra den lyssterke kilden å produsere nok lys til å opprettholde kravene for luminans, til tross for dobbel armaturavstand sammenlignet med lysrørene. Dette bekreftes ytterligere ved å se på overgangen til *natt*. Her er armaturavstanden armaturavstanden tilnærmet lik, siden annenhvert av de konvensjonelle armaturene kobles ut ($6,4m * 2 = 12,8m$). LED-armaturet dimmes 50 %, men til tross for dette er fortsatt besparingspotensialet på hele 39,5 %. Dette indikerer tydelig at indre-armaturer med LED har et svært godt lysutbytte sammenlignet med konvensjonelle lysrør.

Energisparing ved kjøretøydeteksjon

Ved å benytte valgte løsning for kjøretøydeteksjon, viser resultatene at lysene vil være avskrudd rundt 50 % av tiden kjøretøydeteksjonen er aktivert. Dette med et besparingspotensiale på rundt 50 % i løpet av hele perioden. Tallet kan ved første øyekast virke som en vesentlig besparing. Dersom den totale energibruken sammenlignes med et anlegg uten kjøretøydeteksjon, vil spart energimengde i løpet av perioden kun være 3,8 %. Av den grunn er det svært sannsynlig valgte løsning for kjøretøydeteksjon ville blitt nedprioritert ved en reell prosjektering. Ikke bare er besparingspotensialet svært lavt, den svært komplekse og usikre implementasjonen ville også måtte blitt grundig testet. Dette ville sannsynligvis ikke vært forsvarlig med tanke på det lave potensiale besparingspotensialet.

Energisparing ved trinnvis slukking av overgangssonen

Det var ønskelig å undersøke besparingspotensialet ved å kutte overgangssonen, i forhold å dimme den etter samme pådrag som innkjøringssonen. Resultatene viser en besparing på 1,1 % i energibruk for hele perioden ved å benytte denne løsningen. Som ved kjøretøydeteksjonen, er det da lov å stille spørsmålsteget ved kompleksitet i henhold til energisparingspotensiale. I motsetning til kjøretøydeteksjonen er løsningen vesentlig enklere å implementere, siden det kun er snakk om 16 armaturer med individuell styring. Av den grunn kan løsningen faktisk ha potensiale, selv om de store energibesparelsene uteblir.

Svakheter ved beregninger

Energiberegningene gjort i samband med denne utformingen har flere svakheter. For det første er det kun sett på data over en uke i starten av mai, noe som betyr at sesongavhengige endringer av L20 ikke er en del av regnskapet. Spesielt om sommeren, kan det være mye energi å spare for LED-anlegget med tanke på at innkjøringssonen står på større deler av døgnet. Av den grunn burde beregningene ideelt sett ha basert seg på målinger av L20 tatt over en periode på for eksempel et år, for å kartlegge besparingspotensialet ved disse variasjonene. Det er også usikkerhet knyttet til armaturgrunlaget, spesielt for LED-anlegget. Dette ble estimert av kandidaten på bakgrunn av armaturene i Stavsjøfjelltunnelen. Ideelt sett burde det ha vært benyttet dataverktøy for å estimere dette, for eksempel Relux. I tillegg vil det være usikkerheter ved forutsetningene for beregningene. Sjansen for at kjøretøy kommer med konstant intervall og samme fart, er i virkeligheten tilnærmet null.

Bedre og mer effektivt anlegg med tanke på energisparing?

Generelt sett er det mulig å spare svært store mengder energi ved å benytte LED-anlegget på bekostning av det konvensjonelle anlegget. Dette kommer hovedsaklig av et vesentlig bedre lysutbytte i indre sone, og en stor fleksibilitet ved styring av armaturene i innkjøringen. Kjøretøydeteksjonen viste seg å fungere dårlig for den høytraffikerte tunnelen dersom kompleksitet vektet mot energisparingspotensiale. Kutting av overgangssonen vil gi et relativt lavt besparingspotensiale, men er enkelt å implementere. Generelt viser resultatene tydelig at det er mulig å benytte LED til å skape bedre og mer effektive anlegg med tanke på energisparing.

7.1.2 Vurdering av trafikksikker belysning

Vurdering av trafikksikker belysningskvalitet

Resultatene fra målingene og mottatte data, viser at begge anlegg i stor grad er innenfor belysningskravene til Statens vegvesen. For total og langsgående luminansjevnhet, er tallene svært jevne for begge anlegg, og godt innenfor kravene. Dette var ikke tilfellet for de første LED-armaturene på markedet, hvor luminansjevnheten var svært dårlig med mye lys rett under armaturene. Resultatene bekrefter av den grunn at utviklingen har kommet så langt at problemer med luminansjevnhet for LED er historie.

Resultatene for TI-verdiene viser at LED i forhold til den konvensjonelle belysningen, blander noe mer i innkjøringen (1,77 mot 0,59), og vesentlig mer i indre sone (5,0 mot 0,59). Denne verdien kommer på bekostning av lysutbyttet. Siden lyset sendes ut av en liten kilde og må spres langt ut til sidene grunnet den lange armaturavstanden (12 m), er belysningen mer utsatt for direkte innsyn. Det skal likevel sies at TI-verdien for LED i indre sone er godt innenfor Statens vegvesens generelle krav og spesifikke krav for LED ($TI \leq 10$ og $TI \leq 6$). Kandidaten har selv kjørt gjennom begge tunneler, og fra et rent subjektivt ståsted kan de indre armaturene i Stavsjøfjelltunnelen virke noe mer blendende enn det konvensjonelle anlegget i Marienborgtunnelen. Om dette er fordi kandidaten var klar over hva han skulle se etter, blir en annen diskusjon. Likevel oppleves anlegget på ingen som helst måte ubehagelig skarpt.

For fargetemperatur er verdiene som forventet noe kaldere for LED og lysrør (rundt 4000K), sammenlignet med høytrykks-natriumslampene (HPS) (2100K). Dette kommer tydelig frem ved å studere de ulike spektrene (figur 6.7). Lysrørene har en ganske jevn fordeling, HPS har mest gult/rødt lys, mens LED har et ganske bredt spekter med en stor andel blått lys. Den høye andelen blått lys kommer av fosforkonverteringen. Sammenlignet med de to andre lyskildene kan dette være negativt i forhold skadeeffekt på cellene i øyets netthinne [55].

Ved å studere R_a -verdiene, er disse tydelig relatert til spektrene. LED har en vesentlig høyere verdi enn HPS (70 mot 35), noe som kommer av et bredere spekter. Bortsett fra rødt og gult, gjengir LED alle farger bedre. Av den grunn kan LED være mer trafikksikkert med tanke på å oppdage hindringer i kjørebanelen. Sammenlignet med lysrørene, taper LED i fargegjengivelse da disse har $R_a = 78$. Differansen er likevel liten om fordelingen studeres nærmere (figur 6.8). Her kommer det tydelig frem at lysrørene gjengir rød farge svært dårlig sammenlignet med LED. Dette kan potensielt være mindre trafikksikkert, dersom et helt rødt objekt skulle befinne seg i kjørebanelen.

For kromasitet kommer det frem av resultatene at lysrørene og LED-armaturene har omtrent samme SDCM-verdi (5,5). HPS ligger derimot langt over (34,7). En høyere SDCM-verdi kan potensielt være mindre trafikksikker, da det vil være vanskeligere å skille objekter med lik farge i kjørebanelen fra hverandre.

Vurdering av trafikksikker belysningstilpasning

Når det kommer til trafikksikker belysningstilpasning i de ulike sonene, har ikke det teoretiske utformede LED-anlegget noen store fordeler kontra det konvensjonelle. Når det kommer til ledelys og oppbrytning av monotoni, er det derimot åpenbart at et LED-anlegg har større potensiale. Belysningstilpasningen for ledelysene under nødforhold, er i henhold til forskning bevist mer trafikksikkert [36]. Den dynamiske belysningen i rundkjøringen kan også være mer trafikksikker enn dagens løsning. Dette fordi føreren gjøres oppmerksom på en kommende endring i kjøremønsteret.

Svakheter ved målinger

Et stort usikkerhetsmoment ved resultatene, er at parameterene for TI og luminansjevnhet ikke er utført av kandidaten selv. Relux-beregningene brukt for sammenligning har også litt forskjellige parametere for innkjøringen, noe som kan gjøre at resultatene ikke er 100 % sammenlignbare. Kandidaten har heller ikke utført forsøk for å kartlegge om oppbrytning av monotoni og dynamiske ledelys vil være mer trafikksikkert.

Bedre og mer effektivt anlegg med tanke på trafikksikker belysning?

Resultatene for trafikksikker belysningskvalitet er klare: LED er fullt på nivå med konvensjonelle armaturer når det kommer til kvalitet i indre sone, og potensielt bedre til bruk i innkjøringssonen. Likevel er det enkelte usikkerhetselementer knyttet til andel blått lys. Når det kommer til trafikksikker belysningstilpasning, er LED-teknologien i en egen klasse.

Generelt sett viser resultatene at det er mulig å benytte LED til å skape bedre og mer effektive anlegg med tanke på trafikksikker belysning.

7.1.3 Vurdering av levetidskostnad

Resultatene fra beregningene viser en differanse på 15,00 % i levetidskostnad mellom de to anleggene. Innkjøringssonen har en levetidskostnad 10,57 % høyere enn det konvensjonelle anlegget, mens indre sone har en levetidskostnad hele 24,78 % lavere.

Vurdering av investerings- og utskiftnings-nåkostnad

Hovedgrunnen til at innkjøringssonen har en høyere levetidskostnad, er den høyere investeringskostnaden. I forhold til det konvensjonelle anlegget, er investeringskostnaden 178,26 % høyere. Dette tallet kan virke svært høyt, men viser en klar tendens dersom det sammenlignes med erfaringer for LED-belysning gjort av Statens vegvesen i 2010 [20] (Håndbok V124). Her konkluderer Vegvesenet med at investeringskostnaden for høyeffekts-LED-armaturer, er 3-4 ganger høyere enn HPS. Sammenlignet med 178,26 % (1,8 ganger høyere), indikerer dette at LED faller mye i pris. I følge tidligere nevnte LCC-rapport fra Rambøll, vil investeringskostnaden for LED falle 20-30 % i året [43]. Dette gir et tydelig bilde på at LED har et enormt potensiale i fremtiden.

Ved å studere resultatene for indre sone, er investeringskostnaden faktisk 22,22 % lavere for LED-anlegget. Dette kommer hovedsaklig av det lave armaturantallet for LED som trengs i indre sone sammenlignet med lysrør.

For nåkostnader knyttet til utskiftning, er anleggene helt jevne for innkjøringssonen. Dette til tross for en vesentlig høyere investeringskostnad, noe som kommer av den lange levetiden for LED. I indre sone er utskiftningskostnadene 20 % høyere enn det konvensjonelle anlegget. Dette kommer av at disse armaturene står på hele tiden, og må derfor skiftes dobbelt så ofte som

armaturene i innkjøringen. Denne kostnaden kan med stor sannsynlighet forventes enda lavere i fremtiden, i takt med at investeringskostnadene også faller.

Vurdering av energi-nåkostnad

Den totale energi-nåkostnaden for LED-anlegget, er i henhold til resultatene 34,94 % lavere enn for det konvensjonelle anlegget. For innkjøringssonen og indre sone, viser tallene henholdsvis 31,11 % og 36,48 % besparing. Dette er forventede tall, med tanke på resultatene for energibruken mellom de to anleggene. Et interessant aspekt ved denne kostnaden er hvor store andeler som er knyttet til henholdsvis effekt og energi, med tankene på prisene fra kraftselskapet. Resultatene fra energibruken viser at toppeffektdifferansen mellom anleggene er ca. 10 kW. Dette vil tilsvare en årlig kostnadsdifferanse på $10kW * 500kr/kW/år = 5000kr/år$. Sammenlignet med kostnadsdifferansen for energibruk, som enkelt beregnet er ca. $52 * (4868,7 - 2959,9)kWh * 0,51kr/kWh/år = 50600kr/år$, er det tydelig at energibruken har mest å si. Med tanke på LED-armaturenes rasende utvikling for lysutbytte, vil det være naturlig å forvente vesentlige besparinger for energikostnader sammenlignet med konvensjonell belysning i fremtiden.

Svakheter ved beregning

Siden beregningene for levetidskostnadene i stor grad baserer seg på energiberegningene, deler de også de samme svakhetene ved disse beregningene. Egne svakheter for kostnadsberegningene, er at det ikke er inkludert eventuelle driftkostnader knyttet til styresystemet for LED-armaturene. Her snakker vi for eksempel om utskiftning av lampekontrollere og sensorer. Sensorer og kontrollere er som nevnt i teorien, svakere komponenter enn armaturene. Ved utfall kan derfor disse senke levetiden til systemet, og øke levetidskostnaden. Det er også vesentlige usikkerhetsmomenter knyttet til parameterene for rente, inflasjon og ikke minst strømpris. Haakon Nergaard i Statens vegvesen har også informert om at tunneler på størrelse med Marienborgtunnelen, ofte betaler en fastpris på energi. Dette på grunn av det høye forbruket til ventilasjonsanlegget [27]. Av den grunn kan det hende at energikostnadene ved en virkelig installasjon ville vært lavere for begge anlegg.

Bedre og mer effektivt anlegg med tanke på levetidskostnad?

Resultatene viser at levetidskostnaden ved å benytte LED vil være noe høyere for innkjøringssonen, men vesentlig lavere for indre sone sammenlignet med det konvensjonelle anlegget. Den lave kostnaden for indre sone, gjør at den totale levetidskostnaden vil bli lavere. Ved å studere kostnadene nærmere, kommer det tydelig frem at LED-anlegget har et stort potensiale i fremtiden. Ikke bare vil investerings- og vedlikeholdskostnadene minke, men siden armaturene vil bli mer energieffektive vil også energikostnadene minke. Generelt sett vil det være mulig å få like gode eller bedre anlegg ved bruk av LED, til lavere en levetidskostnad sammenlignet med et konvensjonelt anlegg.

7.1.4 Vurdering av førerens opplevelse

Bilføreren vil trolig ikke merke stor forskjell mellom et LED-anlegg og et konvensjonelt anlegg når det gjelder belysningen i de ulike sonene. Så lenge det er nok lys i kjørebanelen, er sjansen stor for at det kun er spesielt interesserte som vil registrere fordelene ved lystilpasning og lyskvalitet som følge av en LED-installasjon. Når det kommer til belysningen for oppbrytning av monotoni, kan derimot opplevelsen for den generelle fører være bedre ved installasjon av LED.

Ved å kjøre gjennom rundkjøringen hvor belsningsfargen endres gjennom året, kan dette gi en mer spennende opplevelse for føreren. Kanskje kan det også virke beroligende for førere med tunnelangst. Diskusjonen rundt dette blir i stor grad basert på antagelser, da det som indikert tidligere ikke finnes mye forskning rundt dette. Likevel er det åpenbart at kjøreopplevelsen i tunnelen ville vært mer spennende dersom rundkjøringen lyste rødt, hvitt og blått etter at Norge har tatt stafettgull under ski-VM i Trondheim i 2023. Spennende belsning burde likevel vike for trafikksikker belsning i alle tilfeller, noe som kan diskuteres ved eventuell implementasjon av denne løsningen.

Ved nødtilfeller kan den generelle føreren få en bedre opplevelse med bruk av LED. De dynamiske rømningslysene med LED er i følge Gunnar D. Jennsen ved SINTEF, den desidert mest effektive måten å evakuere en tunnel [28] på. Dette kommer av at evakueringen er lett å forstå, noe som også bekreftes ved forskning [36]. Sammenlignet med nødsilt og sikkerhetsbelsning, vil løsningen med stor sikkerhet gi en bedre opplevelse for føreren.

Svakheter ved vurdering

Vurderingen av førerens opplevelse baserer seg i ingen grad på forsøk gjort av kandidaten selv. For å slå fast konkrete virkninger av belsningen på førerens opplevelse, måtte en spørreundersøkelse eller lignende ha blitt utført.

Bedre og mer effektivt anlegg med tanke på førerens opplevelse?

Generelt sett åpner bruken av LED-teknologien for en stor fleksibilitet i anlegget. Om tiltak valgt for denne utformingen ikke skulle virke positivt på førerens opplevelse, kan hele anlegget tilpasses uten store problemer. Ergo er det mulig å få et bedre og mer effektivt anlegg med tanke på førerens opplevelse.

7.1.5 Svakheter ved vurderingsparametere

Parametere for vurderingen ble valgt i et tidlig stadiet av oppgaven, og sett i ettertid kunne en parameter gjerne ha vært *påvirkning på elektriske anlegg*. Store innkoblingsstrømmer har vist seg å være problematisk ved LED-anlegg [27]. Selv ved automatsikringer med C-karakrestikk, kan høye startstrømmer koble ut belsningsanlegg. Av den grunn beskriver Statens vegvesen i dag spesifikke krav for effektbrytere på nye LED-anlegg. Ved bruk av LED i IT-nett med krav om jordfeilbryter, har også store lekkstrømmer skapt problemer [27]. LED produserer en større andel tredjeharmoniske, samt en stor økning i $\cos\phi$ ved lav dimming [20]. Det har også vist seg at elektronikken i LED kan være svært sårbar for lyn [56].

7.2 Overførbarhet til andre anlegg

Resultatene og diskusjonen fra den teoretiske utformingen viser at ved å benytte LED-anlegget fremfor det konvensjonelle, kan følgende forventes:

- Energibruk - Vesentlig lavere
- Trafikksikker belsning:
 - Lyskvalitet - Like god eller bedre
 - Lystilpasning - Bedre

- Levetidskostnad - Lavere. Stort potensiale.
- Førerens opplevelse - Mest sannsynlig bedre

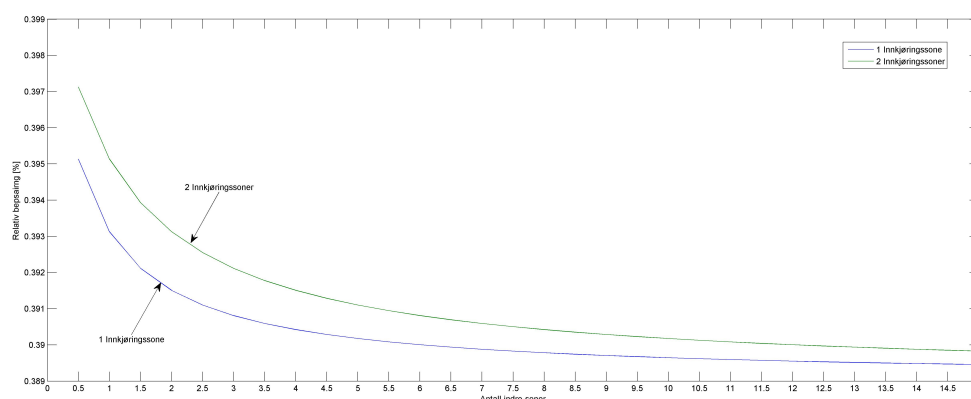
Ut i fra dette, er det tydelig at den teoretiske utformingen basert på LED fullstendig ville utkonkurrert dagens konvensjonelle anlegg. Sett i et større perspektiv var dette likevel bare et spesialtilfelle av en tunnel med to tilfeldige armaturprodusenter. Det interessante, overliggende spørsmålet vil være:

Vil et belysningsanlegg basert på LED-teknologien være like overlegent uansett hvilken tunnel som skal belyses?

Svaret på dette spørsmålet vil ligge i hvilken grad resultatene kan overføres til andre anlegg. Dersom andre leverandører hadde blitt valgt, er det åpenbart at både energibruk, levetidskostnad og belysningskvalitet kunne ha variert. Det samme gjelder ved valget av tunnel. En høytrafikkert tunnel med en innkjøringssone, er ikke den vanligste tunneltypen i Norge. Det ligger altså en vesentlig usikkerhet rundt begge disse valgene, og resultatenes relasjonen til overliggende spørsmål. Denne diskusjonen vil forsøke å trekke linjer fra de relative resultatene mot andre tunneler, samt vurdere armaturgrunlaget for å danne bilde av om resultatene er overførbare.

7.2.1 Overførbarhet av resultatene til lengre tunneler

Ved å studere forholdet i energibruken mellom sonene, kommer det tydelig frem at indre sone bruker rundt dobbelt så mye energi som innkjøringssonen. Dette er ikke særlig overraskende, med tanke på at denne sonen er 10 ganger så lang. Likevel viser resultatet et svært viktig konsept: jo lenger tunnelen blir, desto større prosentandel av energien vil gå til indre sone. For å vise dette tydeligere, er figur 7.1 laget av resultatene for utregnet energi for de ulike sonene i Tabell 6.9. . Figuren viser relativt energisparingspotensiale mellom anleggene, dersom flere soner blir lagt sammen for å danne en lengre tunnel (NB. figuren er ikke korrigert for eventuell større besparing ved kjøretøysdeteksjon i en lengre tunnel):



Figur 7.1: Relativ energibesparing for summerte soner.

Etter hvert som tunnelen blir lengre, viser figuren at total relativ energibesparing vil gå mot besparingspotensialet for indre sone (38,9 %). Av den grunn vil det totale besparingspotensialet for en lang høytrafikkert tunnel, med stor sannsynlig ligge rundt denne verdien. For

en lavtrafikkert tunnel, vil besparingspotensialet kunne være enda større med tanke på at det i disse tunnelene vil være mulig å implementere en svært energieffektiv kjøretøysdeteksjon [41]. Her er det selvfølgelig usikkerhet knyttet til forholdet mellom armaturene ved lavere luminanskrav, men det store lysutbyttet for LED i indre sone tilsier at teknologien vil være overlegen de konvensjonelle kildene.

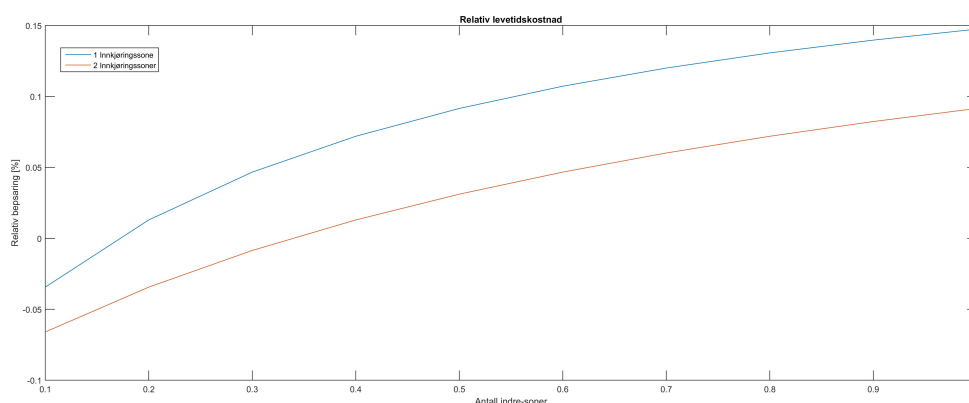
For overførbart av resultatene for levetidskostnad, gjelder det samme argumentet for indre sone i henhold til energibruken. Jo lengre tunnelen blir, desto mer vil levetidskostnaden være påvirket av indre sone. Ved å benytte LED i lange tunneler, vil med andre ord levetidskostnaden kunne forventes å tilsvare besparingspotensialet for armaturene i indre sone (24,78 %). Dette indikerer tydelig at lange tunneler kan få enda mer ut av teknologien sammenlignet med Marienborgtunnelen. Dersom tunnelen i tillegg har kjøretøysdeteksjon, kan levetidskostnaden forventes enda lavere grunnet lavere energi-nåkostnad.

For trafiksikker belyningskvalitet og førerens opplevelse, vil med stor sannsynlighet LED-teknologiens egenskaper ha større potensial i lengre tunneler. Sammenlignet med utformet tunnel, er det i disse tunnelene det virkelig er behov for belysning til oppbrytning av monotoni. Bruk av lede/rednings-lys er også mer aktuelt i slike tunneler fremfor en sentrumsnær, relativt kort og moderne tunnel. Dette gjelder spesielt i lange, eldre tunneler hvor evakuering til riktige steder kan bety forskjellen mellom liv og død.

7.2.2 Overførbart av resultatene til kortere tunneler

Dersom tunnelen blir kortere enn Marienborgtunnelen, viser figur 7.1 at besparingspotensialet vil være mer avhengig av innkjøringssonen. Siden den relative besparingen for denne sonen er noe høyere enn ved indre sone, kommer det frem av figuren at den totale relative besparingen vil være høyere for en tunnel med to innkjøringssoner. En høytrafikkert tunnel med samme lengde eller kortere enn Marienborgtunnelen, vil med andre ord kunne forvente et større energibesparingspotensiale. For en lavtrafikkert tunnel vil situasjonen være den samme, og muligens enda bedre dersom tunnelen kan benytte kjøretøysdeteksjon.

For levetidskostnader i kortere tunneler, gjelder fortsatt argumentet at overgangssonen vil ha sterkere innvirkning. Følgende figur er laget på samme måte som figur 7.1, men med levetidskostnader:



Figur 7.2: Relativ levetidskostnad for summerte soner (ikke korrigert for kjøretøysdeteksjon).

Fra figuren er det tydelig at den relative besparingen for levetidskostnad, vil være vesentlig lavere i en kortere tunnel sammenlignet med Marienborgtunnelen. Dersom tunnelen blir kort

nok, viser figuren at et konvensjonelt anlegg kan ha en lavere levetidskostnad sammenlignet med et LED-anlegg. Ved en høyere dimensjonerende adaptasjonsluminans og fartsgrense, vil denne differansen med stor sannsynlighet kunne forventes enda mer i favør det konvensjonelle anlegget. Dette fordi kostnadene knyttet til investering, vil være relativt høyere for LED ved flere høyeffektsarmaturer. For lavtrafikkerte tunneler, vil den relative kostnaden mest sannsynlig være mer i favør LED-anlegget. Dette fordi innkjøringssonen vil være kortere, og større andel av anlegget utgjør indre sone. I tillegg kan det brukes kjøretøysdeteksjon, noe som kan minke energikostnadene betraktelig, selv om tunnelen er kort [41].

I henhold til trafikksikker belysning, vil det i høytrafikkerte korte tunneler være en høyere andel av tunnelens belysning som utgjøres av innkjøringssonen. Lyset her er som diskutert av en mer trafikksikker kvalitet for LED, sammenlignet med de konvensjonelle armaturene.

7.2.3 Vurdering av armaturgrunnlag

Store deler av resultatene i denne oppgaven, baserer seg på at armaturgrunnlagene er representative for de to teknologiene. Ved valget av ulike anlegg, ble det lagt vekt på at armaturgrunnlaget skulle være blant de beste på markedet og fra seriøse aktører. Begge aktører har levert mange anlegg til Statens vegvesen [27], og fornyet tillitt tyder på seriøsitet. Ved å studere datagrunnlaget i Tillegg A, er det også tydelig at de seriøse aktørene leverer svært like armaturer (nesten helt identisk konvensjonell løsning).

I løpet av oppgaven har kandidaten blitt tilsendt et armaturgrunnlag fra en ukjent produsent. Denne produsenten har kunnet garantere toppeffekt 33 % lavere enn dagens belysning i Stavsjøfjelltunnelen. Dette indikerer to ting: 1) LED-teknologien er i stor utvikling. 2) Mange aktører ønsker å komme inn på markedet. Mulig besparingspotensiale kunne vært høyere ved å benytte armaturene til denne produsenten, men ved å velge en kjent aktør i bransjen, er resultatet garantert en god pekepinn på hva Vegvesenet kunne ha valgt. Sammenlignet med armaturgrunnlaget benyttet i lignende publikasjoner [41] [43], er det også tydelig at armaturgrunnlagene i denne oppgaven skal være representativt. Velges med andre ord seriøse aktører, kan resultatene for belysningskvalitet, energibruk og levetidskostnader forventes som estimert i denne oppgaven.

7.2.4 Oppsummering

Fra diskusjonen, er det tydelig at både resultatene og armaturgrunnlag fra den teoretiske utformingen kan relateres til installasjoner med LED i andre tunneler. Ved å velge seriøse aktører og tilpasse LED-teknologiens muligheter for tunnelen som skal belyses, vil det med en svært høy sannsynlighet være mulig å få anlegg som er overlegent en konvensjonell løsning.

7.3 Generell oppsummering og fremtidig bruk av LED-teknologien i tunnelbelysning

Resultatene og diskusjonen for den teoretiske utformingen, viser tydelig at det i dag er mulig å skape et belysningsanlegg basert på LED-teknologiens muligheter som er fullstendig overlegent et konvensjonelle anlegg i henhold til oppgavens gjennomgående parametere. Videre diskusjon, viser at dette resultatet også vil kunne være overførbart til andre tunneler i lik eller større grad. LED-teknologiens egenskaper åpner for en svært stor fleksibilitet i utformingen av belysningsanlegg. Ved å velge de riktige løsningene teknologien kan tilby, og individuelt tilpasse belysningsanlegget til tunnelens parametere, vil anlegget med all sannsynlighet være bedre og mer effektivt sammenlignet med en konvensjonell løsning. Oppgaven har vist at LED allerede i

dag har en sammenlignbar belysningskvalitet og levetidskostnad med konvensjonelle armaturer, i tillegg til et vesentlig bedre lysutbytte. I fremtiden kan det stor sannsynlighet forventes LED som har enda bedre lysutbytte og lyskvalitet til en enda lavere kostnad og lengre levetid. Dersom disse egenskapene kombineres med fleksibiliteten til teknologien for å skape tilpassende belysningsløsninger, er det åpenbart at LED i fremtiden vil ta over markedet for tunnelbelysning. Fremtiden vil med stor sannsynlighet også gi mer presise og stabile sensorer. Dette kan brukes til å utnytte potensialet til LED-teknologien i enda større grad enn i dag. Kanskje vil det i 2030 være standardisert med kjøretøydeteksjon, lukke-sløyfe-løsning og Li-Fi i alle tunneler?

Kapittel 8

Konklusjon

Denne oppgavens formål har vært å undersøke LED-teknologiens muligheter til å skape belysningsløsninger i tunneler, som kan møte kravene på en bedre måte enn de konvensjonelle belysnings- og styringsløsningene.

Oppgaven har vist at ved å anvende LED-teknologiens muligheter til å individuelt tilpasse belysningen for en tunnel og velge armaturer fra seriøse aktører, vil med all sannsynlighet:

- Energibruk være vesentlig lavere.
 - Trafikksikker belysningskvalitet være like god i indre sone, og bedre i innkjøringssonen.
 - Levetidskostnad være lavere. Vesentlig lavere for indre sone, men høyere for innkjøringssonen.
 - Løsninger for ledelys/redningslys, belysning for oppbrytning av monotoni og generell belysningstilpasning være vesentlig mer fleksibelt. Dette kan gjøre tunnelen mer brukervennlig, trafikksikker og gi føreren en bedre opplevelse.
- Sammenlignet med en konvensjonell belysnings- og styringsløsning.

LED har allerede i dag gått forbi de konvensjonelle kildene når det kommer til lysutbytte, levetid og lyskvalitet. I fremtiden vil reduserte kostnader, bedre lysutbytte og lengre levetid i kombinasjon med teknologiens fleksible styring gjøre at teknologien vil bli ledende for tunnelbelysning.

Oppgavens hovedkonklusjon er:

Utviklingen har i dag kommet så langt at dersom LED-teknologien brukes på riktig måte, vil den med all sannsynlighet utkonkurrere en konvensjonell løsning for belysning av tunneler.

Kapittel 9

Videre arbeid

Etter å ha utført denne oppgaven, har følgende ideer kommet opp underveis som problemstillinger i en masteroppgave:

- Gjøre en lignende teoretisk utforming for andre typer tunneler (lengde, ÅDT). Benytte armaturgrunnlag fra flere produsenter, for å kartlegge eventuelle forskjeller.
- Implementasjon av en eller flere av belysningsløsningene ved hjelp av lampekontrollerne til Luxsave [26]. Teste at løsninger fungerer like godt i praksis som i teori.
- Nærmere studie av lukket-sløyfe-løsning for vedlikeholdsfaktor. Hvordan kan dette implementeres på best mulig måte? Hvordan få løsningen til å fungere over tid? Per dags dato ønsker Vegvesenet en slik løsning i Soknedalstunnelen, men de vet ikke hvordan den skal fungere enda [27].
- Lage en optimeringsalgoritme for dynamisk kjøretøydeteksjon (forslag til parametere: trafikk tetthet, lengde, tid lyset er på)
- Se på problemer knyttet til elektriske anlegg ved bruk av LED i tunneler/gatelys. Hvilken spesielle krav må settes til vern og øvrig dimensjonering med tanke på problemene med høy innkoblingsstrøm, lekkstrømmer og tredjeharmoniske?
- DC-microgrid for forsyning av tunnelbelysning. Kan fornybare energikilder som leverer DC (solceller, brenselceller) brukes alene til å skape et frittstående nett i en tunnel med LED? Her er det potensielt mulig å spare mye energi med tanke på at likeretting ikke lengre vil være nødvendig i armaturdrivere. I tillegg kan en bruke fordelene til DC (ingen harmoniske, ingen reaktiv effekt) til å skape en stabil forsyning av tunnelen som ikke er avhengig av nettet.

Bibliografi

- [1] Liisa Halonen, Eino Tetri Pramod Bhusal. *Guidebook on energy efficient electric lighting for buildings*, Aalto University, Department of Electronics, Lighting Unit, 2010.
- [2] E. Fred Schubert. *Light-Emitting Diodes*, Cambridge University Press, 2003.
- [3] Dansk Center for Lys for Elsparefonden i Danmark. *Lysdioder til belysning 2010 - Status for fremtidens lyskilde (norsk versjon)*. 2009 Lyskultur. Oversatt og bearbeidet av Petter Kristiansen og Karen B Kråkevik i 2010.
- [4] Daniel Gundersen Skåre, Edvin Eimstad Riisem, Halvor Lund, Olessia Viktorovna Salomatova, Rune Nilsen. *Solar cells*, <http://org.ntnu.no/solarcells/index.php>, NTNU, 2008. Read: 29.01.2016.
- [5] Svein Fossum, Gjermund Sjøsåsen, Morten Sepajarvi, Øystein Dobbe. *Informasjon om LED-belysning*, Elektroforeningen (EFO), 2009.
- [6] Knut Marius Fosse, Tore Krok Nielsen. *Faktaark FO2, LED og nødvendig dokumentasjon*, Lyskultur, Oktober 2013.
- [7] Glamox Luxo lighting. *LED-fremtidens kilde*, Glamox Luxo lighting, 2013.
- [8] Fagerhults belysning AB. *LED-belysningens fremtid*, Fagerhults belysning AB, 2012.
- [9] Hans-Henrik Bjørset, Eilif Hugo Hansen. *Lysteknikk*, Classica forlag AS, 2006.
- [10] Liason Group. *A guide to LED Lighting Products 2012* Liason Group, oktober 2012.
- [11] Ljuskultur. *Vart att veta om belysning med LED*, Ljuskultur, mai 2011.
- [12] U.S. Department Of Energy. *Energy Efficiency of LEDs*, U.S. Department Of Energy, Building Technology Program Mars 2013.
- [13] U.S. Department Of Energy. *LED Color Characteristics*, U.S. Department Of Energy, Building Technology Program, Januar 2012.
- [14] U.S. Department Of Energy. *Using LED To Their Best Advantage*, U.S. Department Of Energy, Building Technology Program, Januar 2012.
- [15] U.S. Department Of Energy. *LED Color stability*, U.S. Department Of Energy, Building Technology Program, Mars 2014.
- [16] Alice Liao. *LEDs: Understanding Optical Performance A-L (Architectural lighting)*, Oktober 2014.
- [17] Erik Pedersen. *Intelligent styring av LED veibelysning* Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for elkraftteknikk, Juni 2015.

- [18] Renblad. *Utendørsbelysning - Styling av utendørslys* Rasjonell Elektrisk Virksomhet (REN), 07.2014
- [19] Per Ole Wanvik. *Oversikt over tunneler med LED belysning* Statens Vegvesen, oppdatert: 16.03.2015.
- [20] Vegdirektoratet. *Teknisk planlegging av veg- og tunnelbelysning - Veiledning V124* Statens Vegvesen, 2014.
- [21] Vegdirektoratet. *Vegtunneler - Veiledning V500* Statens Vegvesen, 2014.
- [22] Harald Buvik, Finn Harald Amundsen, Henning Fransplass (Vegdirektoratet). *Etatsprogrammet Moderne vegtunneler 2008-2011* Statens Vegvesen, 2012
- [23] Statens Vegvesen. *Oppgradering av Nestunnelen, E16*, <http://www.vegvesen.no/fag/Fokusomrader/Universellutforming/Eksempler/Tunnel/Nestunnelen> Statens Vegvesen, Lest: 30.03.2016.
- [24] Statens Vegvesen. *Fv. 78 Toventunnelen*, <http://www.vegvesen.no/Fylkesveg/fv78toventunnelen> Statens Vegvesen, lest: 30.03.2016.
- [25] Arne Jørgensen. *Grunnkurs i veg- og tunnelbelysning* Statens Vegvesen, Vegdirektoratet, 19.02.2016.
- [26] Jarl Karlsen og Anton Stolbunov. *Møte og mailkorrespondanser i perioden 07.04.2016-10.05.2016* Luxsave.
- [27] Håkon Nergaard. *Møte og mailkorrespondanser i perioden 15.02.2016-29.05.2016* Statens vegvesen, region midt.
- [28] Dr. Gunnar D. Pedersen. *Møte og mailkorrespondanser i perioden 10.02.2016-22.03.2016* SINTEF Teknologi og Samfunn.
- [29] Asbjørn Ulvan. *Mailkorrespondanser i perioden 17.03.2016-29.03.2016* Statens Vegvesen, region midt.
- [30] John Christian Haavin. *Mailkorrespondanser i perioden 17.03.2016-29.03.2016* Statens Vegvesen, region nord.
- [31] Pål Johannes Larsen. *Mailkorrespondanser i perioden 17.03.2016-30.05.2016* Norconsult.
- [32] Svein Eriksen og Magne Bjørklund. *Mailkorrespondanser i perioden 17.03.2016-20.06.2016* DEFA lighting.
- [33] Atle Olav Hugstmyr og Knut Ove Stenhagen. *Mailkorrespondanser i perioden 17.03.2016-29.03.2016* Scanmatic Elektro.
- [34] Geir Pettersen. *Mailkorrespondanser i perioden 14.04.2016-20.04.2016* Smartec AS.
- [35] Hans Øien. *Telefonsamtaler, møter og mailkorrespondanser i perioden 11.04.2016-15.06.2016* Thorn Lighting AS.
- [36] D Swarovski. *Experiences with LED-based visual guidance systems in tunnels* Tunnelling and underground Space Technology vol. 21 2006.

- [37] Dale Kane, Philips Lumileds. *LEDs chart a new path for tunnel lighting* LEDs Magazine, February 13, 2014, Lest: 14.03.2016.
- [38] Darc Awards. *Dolmen Light, Netherlands*, <http://www.darcawards.com/dolmen-light-netherlands/> Darc Awards, Lest: 29.03.2016.
- [39] Philips. *Hondsrug Tunnel*, <http://www.colorkinetics.com/showcase/installs/Hondsrug-Tunnel/> Philips Color Kinetics- LED lighting Systems, Lest: 29.03.2016.
- [40] Harald Wium Lie. *Mailkorrespondanser i perioden 14.04.2016-20.04.2016* Nexia AS.
- [41] Magnus Guntvedt Brevik. *Energisparing med bedre styringskriterier for LED-belysning i veitunneler* Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for elkraftteknikk, Februar 2015.
- [42] Hong Zeng, Jian Qiu, Xingfa Shen, Guojun Dai, Peng Liu, Shuping Le. *Fuzzy Control of LED Tunnel Lighting and Energy Conservation* IEEE, Tsinghua Science and Technology, ISSN 111007-02141103, Volume 16, Number 6, December 2011
- [43] Gideon Mørk Engen. *E39 Harangtunnelen, LCC beregninger, Tunnellys* Rambøll, 30.03.2012.
- [44] Christina Mercer. <http://www.techworld.com/big-data/what-is-li-fi-everything-you-need-know-3632764/> Techworld, 31. mars, 2016, lest: 05.05.2016
- [45] Anthony Cuthbertson. <http://www.ibtimes.co.uk/lifi-internet-first-real-world-usage-boasts-speed-100-times-faster-wifi-1530021> International Business Times, november 2015. Lest: 05.05.2016
- [46] Svein Bjørberg, Anders Larsen, Håkon Øiseth. *Livssyklus kostnader for bygninger* RIF – Organisasjonen for rådgivere, Norges Bygg- og Eiendomsforening. 3. utg. mars 2007
- [47] Vegdirektoratet. *Vegbygging - Håndbok N200* Statens Vegvesen, 2014.
- [48] Cláudio R. B. S. Rodrigues, Pedro S. Almeida, Guilherme M. Soares, João M. Jorge, Danilo P. Pinto, Henrique A. C. Braga. *An Experimental Comparison Between Different Technologies Arising for Public Lighting: LED Luminaires Replacing High Pressure Sodium Lamps* Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on, 141-146
- [49] Sanchez, Sydney, and Sweeny, Scott. *LED vs. T5 Technology: the Advantages and Disadvantages* Lumiversal, 2010
- [50] Eran Aronson. *Research project: lighting Haggvik tunnel, Sollentuna*. Kungliga Tekniska Hogskolan (KTH), 2012.
- [51] Statens Vegvesen. *Innsatskort og endelig beredskapsplan for Marienborgtunnelen* Statens Vegvesen, region midt, avdeling Sør-Trøndelag, mai 2010.
- [52] Petter Kvernberg. *Mailkorrespondanser i perioden 01.05.2016-20.05.2016* Controltec AS
- [53] Trønderenergi. *Nettpriser 2016: https://tronderenerginett.no/nettleie/bedrift/priser-fra-1.-jan-2016* Trønderenergi nett, 01. januar 2016. Lest: 25.05.2016.
- [54] Ivar Often. *Telefonsamtale 26.05.2016* Daglig leder i Nord Østerdal Kraftlag.

- [55] Statens Strålevern <http://www.nrpa.no/temaartikler/90954/synlig-lys-og-infraroed-straaling> Statens Strålevern, 22.01.2014, lest: 26.05.16.
- [56] Teknisk Ukeblad <http://www.tu.no/artikler/lyn-og-torden-tar-knekken-pa-led-belysning/222267> Teknisk Ukeblad, 27.04.2015, lest: 18.05.16.

Tillegg A

**Teoretisk besparing for LED i indre
sone**

count	company	name	tot. load [W]	lamp(s)	sum
236	THORN	GTLED CB 120L70	263	1xLED 263 W	62068
4	THORN	GTLED CB 96L70	212	1xLED 212 W	848
4	THORN	GTLED CB 72L70	162	1xLED 162 W	648
12	THORN	GTLED CB 48L70	105	1xLED 105 W	1260
144	THORN	GTLED RS 96L45 RWET	133	1xLED 133 W	19152
		Totaleffekt [kW]			83,976

count	company	name	tot. load [W]	lamp(s)	sum
150	THORN	7827N CB HST400W	440	1xNAV-T 400 400 W	66000
14	THORN	7827N CB HST250W	285	1xNAV-T 250 250 W	3990
48	THORN	7827N CB HST150W	165	1xNAV-T 150 150 W	7920
288	THORN	7830N 2X58W TW	120	2xT26 58W	34560
		Totaleffekt [kW]			112,47

Besparelse LED innkjøring vs konvensjonell (ca. 12t/døgn) **17 %**

Besparelse LED nattlys vs konvensjonell (24t/døgn) **45 %**

Tillegg B

Armaturer Marienborgtunnelen

INNGANGSSONE			
1	2x550W N 1135.8	2	400W S 1140.2
3	400W D1 1141.5	4	400W D2 1142.8
5	400W S 1144.1	6	400W D1 1145.4
7	400W D2 1146.7	8	400W S 1148.0
9	400W D1 1149.3	10	400W D2 1150.6
11	2x550W N-ND Natt1 1151.8	12	400W S 1153.0
13	400W D1 1154.3	14	400W D2 1156.6
15	400W S 1158.9	16	400W D1 1159.5
17	400W D2 1159.5		

12.8m

INNGANGSSONE			
18	400W S 1160.8	19	400W D2 1162.1
21	2x550W N Natt1 1164.6	22	400W S 1165.6
24	400W D2 1168.0	25	400W D1 1171.1
26	400W S 1173.4	27	400W D2 1175.9
28	2x550W N Natt1 1177.4	29	400W S 1181.2
31	400W D2 1184.1	32	400W S 1187.2
33	400W D1 1190.2		

OVERGANGSSONE			
35	400W D2 1197.3	36	2x550W S 1202.0
37	250W D1 1199.8	38	2x550W N-ND Natt1 1205.0
40	250W S 1208.3	41	250W D1 1215.6
42	2x550W N Natt1 1215.9	43	250W S 1218.3
44	250W D1 1223.6	45	2x550W N Natt1 1228.6
46	250W S 1229.6	47	250W D1 1236.0
48	2x550W N Natt1 1241.4	49	250W S 1252.4

OVERGANGSSONE			
50	250W D1 1247.6	51	250W S 1253.2
52	2x550W N-ND Natt1 1254.2	53	250W D1 1256.6
54	250W S 1265.6	55	2x550W N Natt1 1267.0
56	250W D1 1271.6	57	250W S 1277.6
59	250W D1 1283.6	60	2x550W N Natt1 1279.8
61	250W D1 1283.6	62	250W S 1289.6
63	2x550W N Natt1 1292.6	64	100W S 1298.6
65	2x550W N-ND Natt1 1306.4	66	100W S 1307.6

OVERGANGSSONE			
67	100W S 1316.6	68	2x550W N Natt1 1318.2
70	2x550W N Natt1 1321.0	71	100W S 1325.6
72	2x550W N Natt1 1343.8	73	100W S 1345.1
74	100W S 1351.1	75	2x550W N-ND Natt1 1358.6
76	100W S 1365.1	77	2x550W N Natt1 1368.4
79	2x550W N Natt1 1382.2	80	2x550W N Natt1 1385.0

INDRE SONE			
81	2x550W N Natt1 1401.4	82	2x550W S 1407.8
83	2x550W S 1414.2	84	2x550W N Natt1 1420.8
85	2x550W S 1427.0	86	2x550W N Natt1 1435.4
87	2x550W S 1439.8	88	2x550W N Natt1 1446.2
89	2x550W S 1452.6	90	2x550W S 1458.6
91	2x550W S 1465.4	92	2x550W S 1471.8

INDRE SONE			
93	2x550W S 1478.2	94	2x550W N Natt1 1484.6
95	2x550W S 1491.0	96	2x550W N Natt1 1497.4
97	2x550W S 1503.8	98	2x550W N Natt1 1510.2
99	2x550W S 1516.6	100	2x550W N Natt1 1523.0
101	2x550W S 1529.4	102	2x550W N Natt1 1535.8
103	2x550W S 1542.2	104	2x550W N Natt1 1548.6

INDRE SONE											
2458W S SK2 1955.0	2458W N-ND Nnet1 1951.4	2458W S SK2 1957.8	2458W N Nnet1 1974.2	2458W S SK2 1956.6	2458W N Nnet1 1957.0	2458W S SK2 1953.4	2458W N Nnet1 1959.8	2458W S SK2 1906.2	2458W N-ND Nnet1 1812.6	2458W S SK2 1819.0	2458W N Nnet1 1826.4
2458W S SK2 1931.8	2458W N Nnet1 1938.2	2458W S SK2 1943.6	2458W N Nnet1 1951.0	2458W S SK3 1957.4	2458W N-ND Nnet2 1953.8	2458W S SK3 1970.2	2458W N Nnet2 1978.6	2458W S SK3 1953.0	2458W N Nnet2 1958.4	2458W S SK3 1956.8	2458W N Nnet2 1702.2
INDRE SONE											
2458W S SK3 1709.6	2458W N-ND Nnet2 1715.0	2458W S SK3 1721.4	2458W N Nnet2 1727.8	2458W S SK3 1734.2	2458W N Nnet2 1740.6	2458W S SK3 1747.0	2458W N Nnet2 1753.4	2458W S SK3 1759.8	2458W N-ND Nnet2 1766.2	2458W S SK3 1772.6	2458W N Nnet2 1779.0
2458W S SK3 1726.4	2458W N Nnet2 1733.8	2458W S SK3 1738.2	2458W N Nnet2 1746.6	2458W S SK3 1811.0	2458W N-ND Nnet2 1817.4	2458W S SK3 1823.8	2458W N Nnet2 1830.2	2458W S SK3 1836.6	2458W N Nnet2 1843.0	2458W S SK3 1849.4	2458W N Nnet2 1856.8
INDRE SONE											
2458W S SK3 1862.2	2458W N-ND Nnet2 1868.6	2458W S SK3 1875.0	2458W N Nnet2 1881.4	2458W S SK3 1887.8	2458W N Nnet2 1894.2	2458W S SK3 1900.6	2458W N Nnet2 1907.0	2458W S SK3 1913.4	2458W N-ND Nnet2 1919.8	2458W S SK3 1926.2	2458W N Nnet2 1932.6
2458W S SK3 1930.0	2458W N Nnet2 1945.4	2458W S SK3 1951.8	2458W N Nnet2 1958.2	2458W S SK3 1964.6	2458W N-ND Nnet2 1971.0	2458W S SK3 1977.4	2458W N Nnet2 1983.8	2458W S SK3 1990.2	2458W N Nnet2 1996.6	2458W S SK3 2003.0	2458W N Nnet2 2009.4
INDRE SONE											
2458W S SK3 2015.8	2458W N-ND Nnet2 2022.2	2458W S SK3 2028.6	2458W N Nnet2 2035.0	2458W S SK3 2041.4	2458W N Nnet2 2047.8	2458W S SK3 2054.2	2458W N Nnet2 2060.6	2458W S SK3 2067.0	2458W N-ND Nnet2 2073.4	2458W S SK3 2079.8	2458W N Nnet2 2086.2
2458W S SK3 2092.6	2458W N Nnet2 2099.0	2458W S SK3 2105.4	2458W N Nnet2 2111.8	2458W S SK3 2118.2	2458W N-ND Nnet2 2124.6	2458W S SK3 2131.0	2458W N Nnet2 2137.4	2458W S SK3 2143.8	2458W N Nnet2 2150.2	2458W S SK4 2156.6	2458W N Nnet3 2163.0
INDRE SONE											
2458W S SK4 2169.4	2458W N-ND Nnet3 2175.8	2458W S SK4 2182.2	2458W N Nnet3 2188.6	2458W S SK4 2195.0	2458W N Nnet3 2201.4	2458W S SK4 2207.8	2458W N Nnet3 2214.2	2458W S SK4 2220.6	2458W N-ND Nnet3 2227.0	2458W S SK4 2233.4	2458W N Nnet3 2239.8
2458W S SK4 2246.2	2458W N Nnet3 2252.6	2458W S SK4 2259.0	2458W N Nnet3 2265.4	2458W S SK4 2271.8	2458W N-ND Nnet3 2278.2	2458W S SK4 2284.6	2458W N Nnet3 2291.0	2458W S SK4 2297.4	2458W N Nnet3 2303.8	2458W S SK4 2310.2	2458W N Nnet3 2316.6

INDRE SONE																			
2658W SK.4	S 2323,0	2658W SK.4	N-ND 2325,4	2658W SK.4	S 2335,8	2658W N 2342,2	2658W SK.4	S 2348,6	2658W SK.4	S 2355,0	2658W N 2361,4	2658W SK.4	S 2367,8	2658W SK.4	S 2374,2	2658W N-ND 2380,6	2658W SK.4	S 2387,0	2658W N 2393,4
2658W SK.4	S 2393,8	2658W SK.4	N 2402	2658W SK.4	S 2412,6	2658W N 2418,0	2658W SK.4	S 2425,4	2658W SK.4	S 2431,8	2658W N 2438,2	2658W SK.4	S 2444,6	2658W SK.4	S 2451,0	2658W N 2457,4	2658W SK.4	S 2463,8	2658W N 2470,2
2658W SK.4	S 2476,6	2658W SK.4	N-ND 2483,0	2658W SK.4	S 2488,4	2658W N 2494,8	2658W SK.4	S 2502,2	2658W SK.4	S 2508,6	2658W N 2515,0	2658W SK.4	S 2521,4	2658W SK.4	S 2527,8	2658W N-ND 2534,2	2658W SK.4	S 2540,6	2658W N 2547,0
2658W SK.4	S 2551,4	2658W SK.4	N 2558	2658W SK.4	S 2562	2658W N 2572,6	2658W SK.4	S 2579,0	2658W SK.4	S 2585,4	2658W N 2591,8	2658W SK.4	S 2598,2	P2600 Rundkjøring					

Eventuelle ekstra armaturer i overgangen til rundkjøring må sjekkes lokalt og besvares i tillegg.

ARMA TURS KJEMA MARIEBORG TUNNELN P 1135-2600	
Dato: 7/10-2009	Tegnet av: SE
Side: 3/3	

Tillegg C

Armaturer Stavjøfjelltunnelen

Tillegg D

Relux-beregning for Stavsjøfjelltunnelen

Object : Stavsjøfjelltunnelen 1730m LED vs. konvensjonell
Installation : GTLED / Gotthard
Project number :
Date : 19.06.2016

THORN
LIGHTING PEOPLE

Object : Stavsjøfjelltunnelen 1730m LED vs. konvensjonell
Installation : GTLED / Gotthard
Project number :
Date : 19.06.2016

THORN
LIGHTING PEOPLE

Table of contents

First Page	1
Table of contents	2
1 LED	
1.1 Description, LED	
1.1.1 Project data	4
1.1.2 Luminaire list	7
1.1.3 3D view, View 1	18
1.2 Calculation results, LED	
1.2.1 Result overview, D2: 100%	19
1.2.2 Result overview, D1: 66.7%	21
1.2.3 Result overview, SK: 33.3%	23
1.2.4 Result overview, N2	25
1.2.5 Result overview, N1	26
1.2.6 Evolution, Adaptasjon (L), D2: 100%, Obs. 1	27
1.2.7 Evolution, Adaptasjon (L), D1: 66.7%, Obs. 1	28
1.2.8 Evolution, Adaptasjon (L), SK: 33.3%, Obs. 1	29
1.2.9 Evolution, Adaptasjon (L), N2, Obs. 1	30
1.2.10 Evolution, Adaptasjon (L), N1, Obs. 1	31
1.3 Calculation results, LED	
1.3.1 Pseudo colours, Innkjøring (L), D2: 100%, Obs. 1	32
1.3.2 Pseudo colours, Innkjøring (L), D1: 66.7%, Obs. 1	33
1.3.3 Pseudo colours, Innkjøring (L), SK: 33.3%, Obs. 1	34
1.4 Calculation results, LED	
1.4.1 Pseudo colours, Innvendig (L), N2, Obs. 1	35
1.4.2 Pseudo colours, Innvendig (L), N1, Obs. 1	36
2 Konvensjonell	
2.1 Description, Konvensjonell	
2.1.1 Project data	37
2.1.2 Luminaire list	40
2.1.3 3D view, View 1	53
2.2 Calculation results, Konvensjonell	
2.2.1 Result overview, D2: 100%	54
2.2.2 Result overview, D1: 66.7%	56
2.2.3 Result overview, SK: 33.3%	58
2.2.4 Result overview, N2	60
2.2.5 Result overview, N1	61
2.2.6 Evolution, Adaptasjon (L), D2: 100%, Obs. 1	62
2.2.7 Evolution, Adaptasjon (L), D1: 66.7%, Obs. 1	63
2.2.8 Evolution, Adaptasjon (L), SK: 33.3%, Obs. 1	64
2.2.9 Evolution, Adaptasjon (L), N2, Obs. 1	65
2.2.10 Evolution, Adaptasjon (L), N1, Obs. 1	66
2.3 Calculation results, Konvensjonell	
2.3.1 Pseudo colours, Innkjøring (L), D2: 100%, Obs. 1	67
2.3.2 Pseudo colours, Innkjøring (L), D1: 66.7%, Obs. 1	68
2.3.3 Pseudo colours, Innkjøring (L), SK: 33.3%, Obs. 1	69
2.4 Calculation results, Konvensjonell	
2.4.1 Pseudo colours, Innvendig (L), N2, Obs. 1	70
2.4.2 Pseudo colours, Innvendig (L), N1, Obs. 1	71

Table of contents

First Page	1
Table of contents	2
1 LED	
1.1 Description, LED	
1.1.1 Project data	4
1.1.2 Luminaire list	7
1.1.3 3D view, View 1	18
1.2 Calculation results, LED	
1.2.1 Result overview, D2: 100%	19
1.2.2 Result overview, D1: 66.7%	21
1.2.3 Result overview, SK: 33.3%	23
1.2.4 Result overview, N2	25
1.2.5 Result overview, N1	26
1.2.6 Evolution, Adaptasjon (L), D2: 100%, Obs. 1	27
1.2.7 Evolution, Adaptasjon (L), D1: 66.7%, Obs. 1	28
1.2.8 Evolution, Adaptasjon (L), SK: 33.3%, Obs. 1	29
1.2.9 Evolution, Adaptasjon (L), N2, Obs. 1	30
1.2.10 Evolution, Adaptasjon (L), N1, Obs. 1	31
1.3 Calculation results, LED	
1.3.1 Pseudo colours, Innkjøring (L), D2: 100%, Obs. 1	32
1.3.2 Pseudo colours, Innkjøring (L), D1: 66.7%, Obs. 1	33
1.3.3 Pseudo colours, Innkjøring (L), SK: 33.3%, Obs. 1	34
1.4 Calculation results, LED	
1.4.1 Pseudo colours, Innvendig (L), N2, Obs. 1	35
1.4.2 Pseudo colours, Innvendig (L), N1, Obs. 1	36
2 Konvensjonell	
2.1 Description, Konvensjonell	
2.1.1 Project data	37
2.1.2 Luminaire list	40
2.1.3 3D view, View 1	53
2.2 Calculation results, Konvensjonell	
2.2.1 Result overview, D2: 100%	54
2.2.2 Result overview, D1: 66.7%	56
2.2.3 Result overview, SK: 33.3%	58
2.2.4 Result overview, N2	60
2.2.5 Result overview, N1	61
2.2.6 Evolution, Adaptasjon (L), D2: 100%, Obs. 1	62
2.2.7 Evolution, Adaptasjon (L), D1: 66.7%, Obs. 1	63
2.2.8 Evolution, Adaptasjon (L), SK: 33.3%, Obs. 1	64
2.2.9 Evolution, Adaptasjon (L), N2, Obs. 1	65
2.2.10 Evolution, Adaptasjon (L), N1, Obs. 1	66
2.3 Calculation results, Konvensjonell	
2.3.1 Pseudo colours, Innkjøring (L), D2: 100%, Obs. 1	67
2.3.2 Pseudo colours, Innkjøring (L), D1: 66.7%, Obs. 1	68
2.3.3 Pseudo colours, Innkjøring (L), SK: 33.3%, Obs. 1	69
2.4 Calculation results, Konvensjonell	
2.4.1 Pseudo colours, Innvendig (L), N2, Obs. 1	70
2.4.2 Pseudo colours, Innvendig (L), N1, Obs. 1	71

Object : Stavsjøfjelltunnelen 1730m LED vs. konvensjonell
Installation : GTLED / Gotthard
Project number :
Date : 19.06.2016

THORN
LIGHTING PEOPLE

Object : Stavsjøfjelltunnelen 1730m LED vs. konvensjonell
Installation : GTLED / Gotthard
Project number :
Date : 19.06.2016

THORN
LIGHTING PEOPLE

1 LED

1.1 Description, LED

1.1.1 Project data



Geometry tunnel

Length of the tunnel : 1730 m
Length of the tunnel (calculation model) : 1730 m
Height of the tunnel : 6 m

Width of the carriageway

Number of lanes : 2
Covering / material : CIE C2, q0 = 0.07
Marginal strip right : 1.25 m
Marginal strip left : 1.25 m

Height of the wall (right)

Height of the wall (right) : 1 m
Covering / material : diffus 20%

Height of the wall (left)

Height of the wall (left) : 1 m
Covering / material : diffus 20%

Calculation specifications

Speed : 80 km/h
Length of the threshold zone : 100 m
Luminance threshold zone : 175 cd/m²
Luminance interior zone : 4 cd/m²

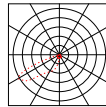
1 LED

1.1 Description, LED

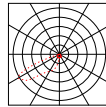
1.1.1 Project data

LDC in use

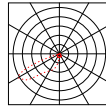
1 **THORN**
Order No. : 96221395
Luminaire name : GTLED CB 120L70
Equipment : 1 x LED 263 W / 24222 lm
Maintenance factor: 0.75



2 Order No. : 96221396
Luminaire name : GTLED CB 96L70
Equipment : 1 x LED 212 W / 19004 lm
Maintenance factor: 0.75



3 Order No. : 96221397
Luminaire name : GTLED CB 72L70
Equipment : 1 x LED 162 W / 14423 lm
Maintenance factor: 0.75



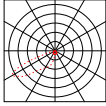
Object : Stavsjøfjelltunnelen 1730m LED vs. konvensjonell
 Installation : GTLED / Gotthard
 Project number :
 Date : 19.06.2016

1 LED

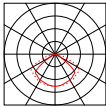
1.1 Description, LED

1.1.1 Project data

4 Order No. : 96221398
 Luminaire name : GTLED CB 48L70
 Equipment : 1 x LED 105 W / 9495 lm
 Maintenance factor: 0.75



7 **Thorn Lighting Nordic AB**
 Order No. : I111758
 Luminaire name : GTLED RS 96L45 RWET
 Equipment : 1 x LED 133 W / 14100 lm
 Maintenance factor: 0.75



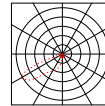
Object : Stavsjøfjelltunnelen 1730m LED vs. konvensjonell
 Installation : GTLED / Gotthard
 Project number :
 Date : 19.06.2016

1.1 Description, LED

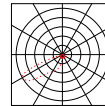
1.1.2 Luminaire list

**Adaptasjon
 LDC in use**

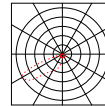
1 **THORN**
 Order No. : 96221395
 Luminaire name : GTLED CB 120L70
 Equipment : 1 x LED 263 W / 24222 lm
 Maintenance factor: 0.75



2 4 Order No. : 96221396
 Luminaire name : GTLED CB 96L70
 Equipment : 1 x LED 212 W / 19004 lm
 Maintenance factor: 0.75



3 4 Order No. : 96221397
 Luminaire name : GTLED CB 72L70
 Equipment : 1 x LED 162 W / 14423 lm
 Maintenance factor: 0.75



Object : Stavsjøfjelltunnelen 1730m LED vs. konvensjonell
 Installation : GTLED / Gotthard
 Project number :
 Date : 19.06.2016

1 LED

1.2 Calculation results, LED

1.2.1 Result overview, D2: 100%

Innvendig, Interior zone

Measuring range: 703.00 m - 715.00 m Points: nx = 7, ny = 6, nz = 3
 Observer (starting point coordinate) : x = 643.00 m; z = 1.50 m dx = 60.86 m (fix)
 y = 1.75 m y = 5.25 m

Roadway (CIE C2, q0 = 0.07)
 Lav : 4.04 cd/m²
 Uo Lmin/Lavg : 0.72 0.72
 Uo Lmin/Llmax: 0.90 0.90
 TI max. Max. : 5.22 % 5.22 %

Wall left (diffus 20%)
 Lav : 3.08 cd/m² 3.08 cd/m²
 Uo Lmin/Lavg : 0.82 0.82

Wall right (diffus 20%)
 Lav : 3.08 cd/m² 3.08 cd/m²
 Uo Lmin/Lavg : 0.82 0.82

Adaptasjon, Threshold and transition zone

Measuring range: 0.59 m - 400.59 m Points: nx = 804, ny = 6, nz = 3
 Observer (starting point coordinate) : x = -85.09 m; z = 1.50 m dx = 85.93 m (moving)
 y = 1.75 m y = 5.25 m

Roadway (CIE C2, q0 = 0.07)

Wall left (diffus 20%)

Wall right (diffus 20%)

qc: The backward reflection of the road was calculated.

Object : Stavsjøfjelltunnelen 1730m LED vs. konvensjonell
 Installation : GTLED / Gotthard
 Project number :
 Date : 19.06.2016

1.2 Calculation results, LED

1.2.2 Result overview, D1: 66.7%

Regulating step: D1: 66.7%

Adaptation
 1: 0%
 2: 100%
 3: 100%
 Interior
 4: 100%

Innkjøring, Threshold zone (constant)

Measuring range: 17.77 m - 32.80 m Points: nx = 7, ny = 6, nz = 3
 Observer (starting point coordinate) : x = -42.23 m; z = 1.50 m dx = 61.07 m (fix)
 y = 1.75 m y = 5.25 m

Roadway (CIE C2, q0 = 0.07)
 Lav : 119.29 cd/m² 119.18 cd/m²
 Uo Lmin/Lavg : 0.58 0.59
 Uo Lmin/Llmax: 0.95 0.95
 qc(av) : 0.69 cd/m²/lx 0.69 cd/m²/lx
 TI max. Max. : 1.77 % 1.60 %

Wall left (diffus 20%)
 Lav : 49.36 cd/m² 49.36 cd/m²
 Uo Lmin/Lavg : 0.87 0.87

Wall right (diffus 20%)
 Lav : 48.13 cd/m² 48.13 cd/m²
 Uo Lmin/Lavg : 0.87 0.87

Tillegg E

**Relux-beregning for konvensjonelt
anlegg**

Eksempel 2 Tunnel E18 400m

Installasjon : NaH innkjøring - Lysrør 2x58W indre Portal sør

Prosjektnummer :
Kunde : PMO
Utført av : MBJ
Dato : 20.06.2016

Prosjektbeskrivelse:
Forutsetninger for lysberegning:

Tunnelprofil T9
ADT 8500 kjd.
Lengde 400m
2 kjørefelt à 3,5 m
Lph. 5,2m
Montasjehøyde 5,4m
Toveis trafikk
Adaptasjonsluminans 2750 cd/m² (150cd/m² i første halvdel av innkjøring)
Gjennomgående 4cd/m². Cc lysrør 6,4m
Fartsgrense 70 km/h

Faktor for luminansen i overgangssone/indre sone er i forholdet 2:1 iht CIE 88-2004

Følgende verdier er beregnet basert på laboratoriemålinger av armaturer og referanselyskilder. I praksis kan avvik forekomme.

Garantikrav for armatordata er ekskludert.

Relux og armaturprodusentene tar intet ansvar for følgeskader og skader påført brukeren eller tredjepart.

m.bjorklund@defa.com
Magne Bjørklund

Eksempel E18 Serfandsporten 115m Lysrør Portal sør.rtf

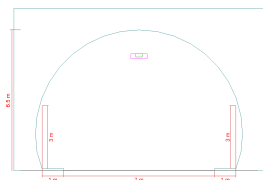
Side 1/21

Objekt : Eksempel 2 Tunnel E18 400m
Installasjon : NaH innkjøring - Lysrør 2x58W indre Portal sør
Prosjektnummer :
Dato : 20.06.2016

1 Tunnel

1.1 Beskrivelse, Tunnel

1.1.1 Prosjektdata



Tunnelgeometri
Tunnellengde : 400 m
Tunnellengde (beregningsmodell) : 382 m
Tunnelhøyde : 6.5 m

Bredde på kjørefelt : 7 m
Antall kjørefelt : 2
Overflate/materiale : CIE C2, q0 = 0.07
Høyre kantstripe : 1 m
Venstre kantstripe : 1 m

Høyde på høyre vegg : 3 m
Overflate/materiale : diffus 0%
Høyde på venstre vegg : 3 m
Overflate/materiale : diffus 0%

Spesifikasjoner for beregning
Hastighet : 70 km/h
Innkjøringssonens lengde : 80 m
Luminans i innkjøringssone : 150 cd/m²
Luminans i indre sone : 4 cd/m²

m.bjorklund@defa.com
Magne Bjørklund

Eksempel E18 Serfandsporten 115m Lysrør Portal sør.rtf

Side 3/21

Objekt : Eksempel 2 Tunnel E18 400m
Installasjon : NaH innkjøring - Lysrør 2x58W indre Portal sør
Prosjektnummer :
Dato : 20.06.2016

Innhold

Forside	1
Innhold	2
1 Tunnel	
1.1 Beskrivelse, Tunnel	
1.1.1 Prosjektdata	3
1.2 Beregningsresultat, Tunnel	
1.2.1 Resultatoversikt, Dag2: 100%	6
1.2.2 Resultatoversikt, Dag1: 66.7%	9
1.2.3 Resultatoversikt, Skumring: 33.3%	12
1.2.4 Resultatoversikt, Lysrør dag	15
1.2.5 Resultatoversikt, Lysrør natt	16
1.2.6 Forløp, Adaptation (L), Dag2: 100%, Obs. 1	17
1.2.7 Forløp, Adaptation (L), Dag1: 66.7%, Obs. 1	18
1.2.8 Forløp, Adaptation (L), Skumring: 33.3%, Obs. 1	19
1.3 Beregningsresultat, Tunnel	
1.3.1 Tabell, Entrance (L), Dag2: 100%, Obs. 1	20
1.4 Beregningsresultat, Tunnel	
1.4.1 Tabell, Interior (L), Lysrør dag, Obs. 1	21

m.bjorklund@defa.com
Magne Bjørklund

Eksempel E18 Serfandsporten 115m Lysrør Portal sør.rtf

Side 2/21

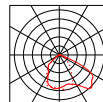
Objekt : Eksempel 2 Tunnel E18 400m
Installasjon : NaH innkjøring - Lysrør 2x58W indre Portal sør
Prosjektnummer :
Dato : 20.06.2016

1 Tunnel

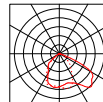
1.1 Beskrivelse, Tunnel

1.1.1 Prosjektdata

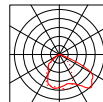
LFK i bruk
1 Bestillingsnr. : 11
Armaturnavn : DEFA Tunn 400
Bestykning : 1 x 400 400 W / 56500 lm
Vedlikeholdsfaktor : 0.75



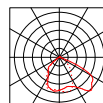
2 Bestillingsnr. : 11
Armaturnavn : DEFA Tunn 250
Bestykning : 1 x 250 250 W / 33000 lm
Vedlikeholdsfaktor : 0.75



5 Bestillingsnr. : 11
Armaturnavn : DEFA Tunn 150
Bestykning : 1 x 150 150 W / 17500 lm
Vedlikeholdsfaktor : 0.75



7 Bestillingsnr. : 11
Armaturnavn : DEFA Tunn 70
Bestykning : 1 x 70 70 W / 6500 lm
Vedlikeholdsfaktor : 0.75



m.bjorklund@defa.com
Magne Bjørklund

Eksempel E18 Serfandsporten 115m Lysrør Portal sør.rtf

Side 4/21

Objekt : Eksempel 2 Tunnel E18 400m
 Installasjon : NaH innkjøring - Lysrør 2x58W indre Portal sør
 Prosjektnummer :
 Dato : 20.06.2016

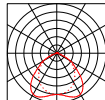


1 Tunnel

1.1 Beskrivelse, Tunnel

1.1.1 Prosjektdata

TUNN 158 PL
 3 Bestillingnr. : 11258
 Armaturnavn : DEFA Tunn 258
 Bestykning : 2 x T8 58 W / 5200 lm
 Vedlikeholdsfaktor : 0.75



m.bjorklund@defa.com
 Magne Bjørklund

Side 5/21

Eksempel E18 Serlandsporten 115m Lysrør Portal sør.rtf

Objekt : Eksempel 2 Tunnel E18 400m
 Installasjon : NaH innkjøring - Lysrør 2x58W indre Portal sør
 Prosjektnummer :
 Dato : 20.06.2016



1 Tunnel

1.2 Beregningsresultat, Tunnel

1.2.1 Resultatoversikt, Dag2: 100%

Interior, Indre sone

Måleområde: 269.76 m - 287.88 m Points: nx = 7, ny = 6, nz = 3
 Betrakter (startpunktkoordinater): x = 209.76 m; z = 1.50 m dx = 61.29 m (fix)
 y = 1.75 m y = 5.25 m

Kjørebane (CIE C2, q0 = 0.07)
 Lm : 4.01 cd/m² 4.01 cd/m²
 Uo Lmin/Lmid : 0.80 0.80
 Uj Lmin/Lima: 0.96 0.96
 qc(av) : 0.14 cd/m²/lx 0.14 cd/m²/lx
 qc(min) : 0.11 cd/m²/lx 0.11 cd/m²/lx
 Tl max. Maks. : 1.75 % 1.75 %
 Lseq Maks. : 0.08 cd/m² 0.08 cd/m²
 Bi Maks. : 0.02 0.02

Venstre vegg (diffus 0%)
 Lm : 0.00 cd/m² 0.00 cd/m²
 Uo Lmin/Lmid : --- ---
 Lvegg/Lkf : --- ---

Høyre vegg (diffus 0%)
 Lm : 0.00 cd/m² 0.00 cd/m²
 Uo Lmin/Lmid : --- ---
 Lvegg/Lkf : --- ---

Belysningsstyrke

Kjørebane
 Em : 82.39 lx
 Uo Emin/Em : 0.89
 Venstre vegg Høyre vegg
 Em : 43.55 lx Em : 43.55 lx
 Uo Emin/Em : 0.91 Uo Emin/Em : 0.91

m.bjorklund@defa.com
 Magne Bjørklund

Side 7/21

Eksempel E18 Serlandsporten 115m Lysrør Portal sør.rtf

Objekt : Eksempel 2 Tunnel E18 400m
 Installasjon : NaH innkjøring - Lysrør 2x58W indre Portal sør
 Prosjektnummer :
 Dato : 20.06.2016



1 Tunnel

1.2 Beregningsresultat, Tunnel

1.2.1 Resultatoversikt, Dag2: 100%

Innkoblingstrinn: Dag2: 100%

Adaptasjon
 1: 100%
 2: 100%
 3: 100%
 Indre
 4: 100%
 5: 100%

Entrance, Innkjøringszone (konstant)

Måleområde: 12.95 m - 28.45 m Points: nx = 7, ny = 6, nz = 3
 Betrakter (startpunktkoordinater): x = -47.05 m; z = 1.50 m dx = 61.11 m (fix)
 y = 1.75 m y = 5.25 m

Kjørebane (CIE C2, q0 = 0.07)
 Lm : 152.70 cd/m² 152.80 cd/m²
 Uo Lmin/Lmid : 0.60 0.61
 Uj Lmin/Lima: 0.99 0.99
 qc(av) : 0.27 cd/m²/lx 0.27 cd/m²/lx
 qc(min) : 0.22 cd/m²/lx 0.22 cd/m²/lx
 Tl max. Maks. : 0.59 % 0.65 %
 Lseq Maks. : 1.23 cd/m² 1.35 cd/m²
 Bi Maks. : 0.00 0.01

Venstre vegg (diffus 0%)
 Lm : 0.00 cd/m² 0.00 cd/m²
 Uo Lmin/Lmid : --- ---
 Lvegg/Lkf : --- ---

Høyre vegg (diffus 0%)
 Lm : 0.00 cd/m² 0.00 cd/m²
 Uo Lmin/Lmid : --- ---
 Lvegg/Lkf : --- ---

Belysningsstyrke

Kjørebane
 Em : 2540.82 lx
 Uo Emin/Em : 0.75
 Venstre vegg Høyre vegg
 Em : 860.49 lx Em : 892.21 lx
 Uo Emin/Em : 0.94 Uo Emin/Em : 0.95

m.bjorklund@defa.com
 Magne Bjørklund

Side 6/21

Eksempel E18 Serlandsporten 115m Lysrør Portal sør.rtf

Tillegg F

Trafikktetthet Marienborgtunnelen

MARIENBORGTUNNELEN SØR, 2015

Tidspunkt	Time	Antall kjøretøy
00-01	1	55
00-02	2	34
00-03	3	29
00-04	4	28
00-05	5	35
00-06	6	65
00-07	7	247
00-08	8	427
00-09	9	436
00-010	10	346
00-011	11	359
00-012	12	394
00-013	13	431
00-014	14	456
00-015	15	524
00-016	16	631
00-017	17	555
00-018	18	428
00-019	19	378
00-020	20	330
00-021	21	280
00-022	22	208
00-023	23	155
00-024	24	95

Tellepunkt fra Sør, ca. 500 meter inn i tunnelen.

Figur F.1: Antall kjøretøy per time i gjennomsnitt i 2015 gjennom Marienborgtunnelen [27].

Tillegg G

Matlab-skript for energiberegninger i LED-anlegg

```

1 %Armatureffekter innkjring+overgang
2
3 %innkjring 1-55
4 armatur_effekt(1:52)=263;
5 %overgang 55-74
6 armatur_effekt(53:62)=263;
7 armatur_effekt(63:64)=212;
8 armatur_effekt(65:66)=162;
9 armatur_effekt(67:68)=105;
10
11 armatur_effekt_ref=armatur_effekt; %Referanse for effekt
12
13 %Armatureffekter innkjringssone
14 armatur_effekt_indre(1:117)=133;
15
16 %Referanse for L20
17 adl_ref=3000;
18
19 %Filtrering av r data for L20
20 filename='Luminanslogg2.xlsx';
21 L=xlsread(filename, 'B:B');
22 L=L(5:length(L));
23
24 for j=1:(length(L)-100)
25     adl(j)=mean(L(j:(99+j)));
26
27     if(adl(j)>=3000)
28         adl(j)=3000;
29     end
30 end
31
32
33 tid=1:length(adl);
34 mid_lum(1:115*2)=4;
35
36
37 %Beregning av effekt som flge av L20
38 for i=1:length(adl);
39
40     dimmeprosent=(adl(i)/adl_ref);
41
42     if(dimmeprosent<=0.1) %minimalt p drag er 10%
43         dimmeprosent=0.1;
44     end
45
46     dimming(i)=dimmeprosent; %vektor for dimmeprosent
47
48 %KUTTING AV OVERGANGSSONE
49 %tar ut armaturer i henhold luminansreduksjonskurven
50
51 L1=adl(i)*0.05;
52
53 for d=1:115;
54     mid_lum(d)=L1*((1.9+(d/16.67))^-1.4); %likning for overg.s.
55     if(mid_lum(d)>=L1*0.4)
56         mid_lum(d)=L1*0.4;
57     end
58     if(mid_lum(d)<=8)
59         mid_lum(d)=4;
60     end

```

```

61     end
62
63     armatur_effekt (53:62)=263;
64     armatur_effekt (63:64)=212;
65     armatur_effekt (65:66)=162;
66     armatur_effekt (67:68)=105;
67
68     if (mid_lum(96)==4)
69         armatur_effekt (68)=0;
70     end
71
72     if (mid_lum(84)==4)
73         armatur_effekt (67)=0;
74     end
75
76     if (mid_lum(72)==4)
77         armatur_effekt (65:66)=0;
78     end
79
80     if (mid_lum(60)==4)
81         armatur_effekt (64)=0;
82     end
83
84     if (mid_lum(48)==4)
85         armatur_effekt (62:63)=0;
86     end
87
88     if (mid_lum(36)==4)
89         armatur_effekt (60:61)=0;
90     end
91
92     if (mid_lum(24)==4)
93         armatur_effekt (58:59)=0;
94     end
95
96     if (mid_lum(12)==4)
97         armatur_effekt (56:57)=0;
98     end
99
100    if (mid_lum(2)==4)
101        armatur_effekt (53:56)=0;
102    end
103
104    %Beregning av total effekt
105    if (adl(i)>200)
106        LED_tot_effekt (i)=sum((armatur_effekt (1:68))*dimmeprosent)+sum(
armatur_effekt_indre (1:117));
107        LED_tot_effekt_inn (i)=sum((armatur_effekt (1:68))*dimmeprosent);
108        LED_tot_effekt_indre (i)=sum (armatur_effekt_indre (1:117));
109        LED_tot_effekt_test (i)=sum((armatur_effekt_ref (1:68))*dimmeprosent);
110
111    elseif (adl(i)<=200 && adl(i)>100)
112        LED_tot_effekt (i)=sum((armatur_effekt (1:68))*dimmeprosent)+sum(
armatur_effekt_indre (1:117)*0.5);
113        LED_tot_effekt_inn (i)=sum (armatur_effekt (1:68))*dimmeprosent);
114        LED_tot_effekt_indre (i)=sum (armatur_effekt_indre (1:117)*0.5);
115        LED_tot_effekt_test (i)=sum((armatur_effekt_ref (1:68))*dimmeprosent);
116    else
117        LED_tot_effekt (i)=sum (armatur_effekt_indre (1:117)*0.5);
118        LED_tot_effekt_inn (i)=0;

```



```

119     LED_tot_effekt_test(i)=0;
120     LED_tot_effekt_indre(i)=LED_tot_effekt(i);
121     dimming(i)=0;
122     end
123 end
124
125 %Beregning av gjennomsnittseffekt ved kjretysdeteksjon
126 natt_start=620;
127 natt_slutt=860;
128
129 for(k=1:7)
130 LED_tot_effekt(natt_start:natt_slutt)=sum(armatur_effekt_indre(1:117)*0.5*0.528);
131 LED_tot_effekt_indre(natt_start:natt_slutt)=sum(armatur_effekt_indre(1:117)
    *0.5*0.528);
132 natt_start=natt_start+1440;
133 natt_slutt=natt_slutt+1440;
134 end
135
136 %Beregning av energi over hele perioden.
137 LED_total_energi=sum((LED_tot_effekt*60))/(10^3*3600); %kWh
138 LED_total_energi_inn=sum((LED_tot_effekt_inn*60))/(10^3*3600);
139 LED_total_energi_indre=sum((LED_tot_effekt_indre*60))/(10^3*3600);
140 total_energi_ref=sum((LED_tot_effekt_test*60))/(10^3*3600);
141
142 energi_spart_kutting=total_energi_ref-LED_total_energi_inn;
143
144 %Plots er laget ved benytte data i workspace.

```

Tillegg H

**Matlab-skript for energiberegninger
ved kjøretøydeteksjon**

```

1 tetthet=[34 29 28 35]; %Antall kj ret y per time
2 P_max=(117*133*0.5); %Effektbruk dersom alle armaturene er P
3 avtid_prosent=[0 0 0 0]; %Vektor som skal beregne prosentvis hvor mye hver sone
  er AV
4 teller=1;
5
6 for i=1:4
7
8     bilfrekvens=round(3600/tetthet(i));
9     max_energi=bilfrekvens*P_max;
10
11     %Beregninger for hvor mye armaturene er AV for hver bil som passerer hele
  tunnelen
12     marienborg_prosent=(40+24+2*36+(bilfrekvens-100)*3)/(3*bilfrekvens);
13     ila_prosent=(36+24+2*40+(bilfrekvens-100)*3)/(3*bilfrekvens);
14
15     for j=1:tetthet(i)
16         retning=round(rand); %0=bil fra Marienborg 1=bil fra Ila
17         if (retning==0)
18             energibruk(teller)=marienborg_prosent*max_energi;
19             avtid_prosent(i)=avtid_prosent(i)+(marienborg_prosent/tetthet(i));
20         else
21             energibruk(teller)=ila_prosent*max_energi;
22             avtid_prosent(i)=avtid_prosent(i)+(ila_prosent/tetthet(i));
23         end
24         energibruk_uten(teller)=max_energi;
25         teller=teller+1;
26     end
27
28 end
29
30
31 total_energi=7*(sum(energibruk)/(10^3*3600)); %kWh
32 total_energi_uten=7*(sum(energibruk_uten)/(10^3*3600));
33 total_energi_test=sum(energibruk);
34
35
36 energi_time(1)=sum(energibruk(1:34))*7/(10^3*3600);
37 energi_time(2)=sum(energibruk(35:63))*7/(10^3*3600);
38 energi_time(3)=sum(energibruk(64:91))*7/(10^3*3600);
39 energi_time(4)=sum(energibruk(92:126))*7/(10^3*3600);
40
41 energi_time_uten(1)=sum(energibruk_uten(1:34))*7/(10^3*3600);
42 energi_time_uten(2)=sum(energibruk_uten(35:63))*7/(10^3*3600);
43 energi_time_uten(3)=sum(energibruk_uten(64:91))*7/(10^3*3600);
44 energi_time_uten(4)=sum(energibruk_uten(92:126))*7/(10^3*3600);
45
46 %Plots er laget ved benytte data i workspace.

```

Tillegg I

Matlab-skript for energiberegninger i konvensjonelt anlegg

```

1 %Filtrering av r data for L20
2 filename='Luminanslogg2.xlsx';
3 L=xlsread(filename, 'B:B');
4 L=L(5:length(L));
5
6 for j=1:(length(L)-100)
7     adl(j)=mean(L(j:(99+j)));
8
9     if(adl(j)>=3000)
10         adl(j)=3000;
11     end
12 end
13
14 %Ulike effekter
15 dag2=(31*432+18*278+9*115+(21+144+44)*2*56);
16 dag1=(20*432+18*278+9*115+(21+144+44)*2*56);
17 skumring=(10*432+9*278+9*115+(21+144+44)*2*56);
18 natt=((21+(144+44)/2)*2*56);
19
20 dag2_inn=(31*432+18*278+9*115);
21 dag1_inn=(21*432+18*278+9*115);
22 skumring_inn=(10*432+9*278+9*115);
23 dag_indre=((21+144+44)*2*56);
24 natt_indre=((21+(144+44)/2)*2*56);
25
26 konv_tot_effekt(1:length(adl))=natt;
27 konv_tot_effekt_inn(1:length(adl))=0;
28 konv_tot_effekt_indre(1:length(adl))=natt_indre;
29
30 %Beregning av effekt som flge av filtrert L20
31 for i=1:length(adl)
32
33     if (adl(i)>=1500)
34         konv_tot_effekt(i)=dag2;
35         konv_tot_effekt_inn(i)=dag2_inn;
36         konv_tot_effekt_indre(i)=dag_indre;
37
38     elseif (adl(i)<1500 && adl(i)>=750)
39         konv_tot_effekt(i)=dag1;
40         konv_tot_effekt_inn(i)=dag1_inn;
41         konv_tot_effekt_indre(i)=dag_indre;
42
43     elseif (adl(i)<750 && adl(i)>=150)
44         konv_tot_effekt(i)=skumring;
45         konv_tot_effekt_inn(i)=skumring_inn;
46         konv_tot_effekt_indre(i)=dag_indre;
47     end
48
49 end
50
51 %Beregning av energi
52 konv_tot_energi=(sum(konv_tot_effekt*60))/(3600*10^3);
53 konv_tot_energi_inn=(sum(konv_tot_effekt_inn*60))/(3600*10^3);
54 konv_tot_energi_indre=(sum(konv_tot_effekt_indre*60))/(3600*10^3);
55
56 %Plots er laget ved benytte data i workspace.

```

Tillegg J

Matlab-skript for LCC-beregninger

```

1 %Paramtere for beregning
2 n=25; %antall
3 r=0.04; %kalkulasjonsrente
4
5 %Investeringskostnad
6 %-----
7 %Armaturodata fra DEFA. Armaturokostnader konfidensielt
8 lampeskift_K_inn=27840;
9 lampeskift_K_indre=96140;
10 lampeskift_K=lampeskift_K_inn+lampeskift_K_indre;
11
12 K_innv_inn=232000;
13 K_innv_indre=1170400;
14 K_innv=K_innv_inn+K_innv_indre;
15
16 %Armaturodata fra Thorn. Armaturokostnader konfidensielt
17 lampeskift_LED_inn=532000;
18 lampeskift_LED_indre=819000;
19 lampeskift_LED=lampeskift_LED_inn+lampeskift_LED_indre;
20
21 LED_innv_inn=586400 + 50000 ; %tilleggekostnad som indikert i oppgave
22 LED_innv_indre=873400;
23 LED_innv=LED_innv_inn+LED_innv_indre;
24 %-----
25 %Energibruk per i kWh.
26 K_energi_indre=3225.2*52;
27 K_energi_inn=1652.1*52;
28 K_energi=4868.7*52;
29
30 LED_energi_indre=1970.4*52;
31 LED_energi_inn=989.5*52;
32 LED_energi=2959.9*52;
33
34 %Max effekt i kW
35 K_effekt_indre=23.4;
36 K_effekt_inn=19.4;
37 K_effekt=42.8;
38
39 LED_effekt_indre=15.6;
40 LED_effekt_inn=18.2;
41 LED_effekt=32.8;
42
43 %Kostnad for energibruk per
44 kwh_kostnad=0.16+0.05+0.30;
45
46 aar_kostnad_K=K_energi*kwh_kostnad+500*K_effekt+8800;
47 aar_kostnad_K_inn=K_energi_inn*kwh_kostnad+500*K_effekt_inn+4400;
48 aar_kostnad_K_indre=K_energi_indre*kwh_kostnad+500*K_effekt_indre+4400;
49
50 aar_kostnad_LED=LED_energi*kwh_kostnad+500*LED_effekt+8800;
51 aar_kostnad_LED_inn=LED_energi_inn*kwh_kostnad+500*LED_effekt_inn+4400;
52 aar_kostnad_LED_indre=LED_energi_indre*kwh_kostnad+500*LED_effekt_indre+4400;
53
54 %Beregning av n verdi for energi
55 %-----
56 %Diskonteringsfaktor, lig kostnad
57 d=0;
58 for i=1:25
59     d=d+(1/((1+r)^(i)));
60 end

```

```

61
62 naaverdi_energi_K=(aar_kostnad_K)*d;
63 naaverdi_energi_K_inn=(aar_kostnad_K_inn)*d;
64 naaverdi_energi_K_indre=(aar_kostnad_K_indre)*d;
65
66 naaverdi_energi_LED=(aar_kostnad_LED)*d;
67 naaverdi_energi_LED_inn=(aar_kostnad_LED_inn)*d;
68 naaverdi_energi_LED_indre=(aar_kostnad_LED_indre)*d;
69 %-----
70 %Beregning av n verdi for utskiftinger
71
72 d_K=0;
73 d_LED_inn=0;
74
75 %Diskonteringsfaktor , lig kostnad
76
77 for i=4:4:24 %Kostnad p lper fra 4 med frekvens hvert 4 .
78     d_K=d_K+(1/((1+r)^(i)));
79 end
80
81 d_LED_indre=0;
82 for j=12:12:24 %Kostnad p lper fra 12 med frekvens hvert 12 .
83     d_LED_indre=d_LED_indre+(1/((1+r)^(j)));
84 end
85
86
87 d_LED_inn=(1/((1+r)^(24))); %Kostnad p lper fra 24
88
89 naaverdi_skiift_K=lampeskiift_K*d_K;
90 naaverdi_skiift_K_inn=lampeskiift_K_inn*d_K;
91 naaverdi_skiift_K_indre=lampeskiift_K_indre*d_K;
92
93 naaverdi_skiift_LED_inn=(lampeskiift_LED_inn/2)*d_LED_inn;
94 naaverdi_skiift_LED_indre=(lampeskiift_LED_indre/2)*d_LED_indre;
95 naaverdi_skiift_LED=naaverdi_skiift_LED_inn+naaverdi_skiift_LED_indre;
96 %-----
97 %Beregning av totale n verdikostnader
98 naaverdi_K=K_innv+naaverdi_energi_K+naaverdi_skiift_K
99 naaverdi_K_inn=K_innv_inn+naaverdi_energi_K_inn+naaverdi_skiift_K_inn
100 naaverdi_K_indre=K_innv_indre+naaverdi_energi_K_indre+naaverdi_skiift_K_indre
101
102 naaverdi_LED=LED_innv+naaverdi_energi_LED+naaverdi_skiift_LED
103 naaverdi_LED_inn=LED_innv_inn+naaverdi_energi_LED_inn+naaverdi_skiift_LED_inn
104 naaverdi_LED_indre=LED_innv_indre+naaverdi_energi_LED_indre+
    naaverdi_skiift_LED_indre
105
106 K=[K_innv naaverdi_energi_K naaverdi_skiift_K];
107 K_inn=[K_innv_inn naaverdi_energi_K_inn naaverdi_skiift_K_inn];
108 K_indre=[K_innv_indre naaverdi_energi_K_indre naaverdi_skiift_K_indre];
109
110 LED=[LED_innv naaverdi_energi_LED naaverdi_skiift_LED];
111 LED_inn=[LED_innv_inn naaverdi_energi_LED_inn naaverdi_skiift_LED_inn];
112 LED_indre=[LED_innv_indre naaverdi_energi_LED_indre naaverdi_skiift_LED_indre];
113 %-----
114 %Vektorer benyttet til lage plot
115 plot_total=[K; LED];
116 plot_inn=[K_inn; LED_inn];
117 plot_indre=[K_indre; LED_indre];
118
119 %Plots er laget ved benytte data i workspace.

```