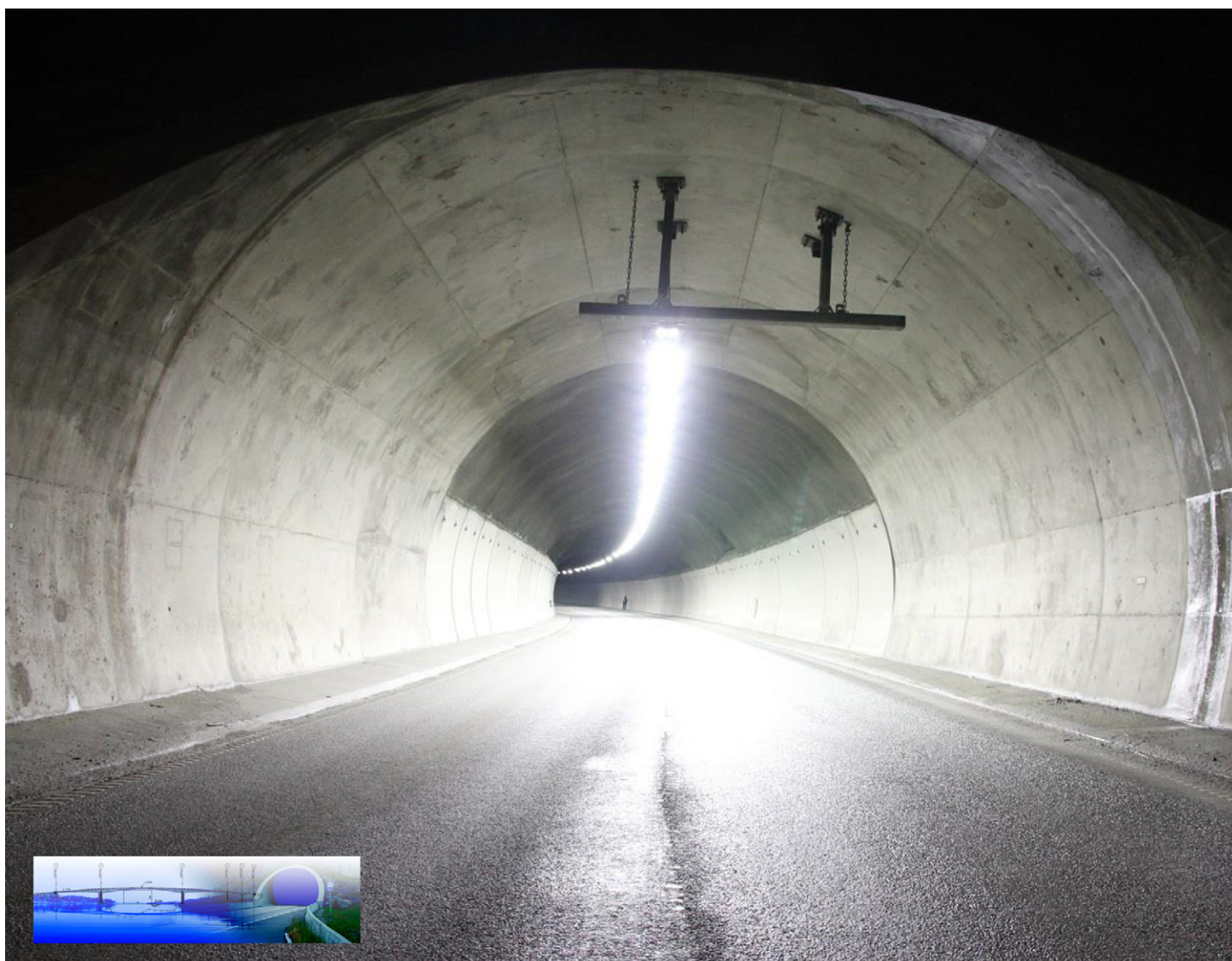


Fremtidens tunnelbelysning

Etatsprogrammet Varige konstruksjoner 2012-2015

STATENS VEGVESENS RAPPORTER

Nr. 562



Tittel

Fremtidens tunnelbelysning

Undertittel

tunneler

Forfatter

Pål J. Larsen, Norconsult

Avdeling

Trafikksikkerhet, miljø- og
teknologiavdelingen

Seksjon

Tunnel og betong

Prosjektnummer

603242

Rapportnummer

Nr. 562

Prosjektleder

Synnøve A. Myren / Harald Buvik

Godkjent av

Per Ole Wanvik

Emneord

Varige konstruksjoner, fremtidens tunneler,
tunnelbelysning, LED, lysstyring, lyse tun-
nelvegger, tunnelrenhold

Sammendrag

Denne rapporten gir en oppsummering
av arbeidet som ble gjort med å samle og
bearbeide informasjon om status og utvikling
innen temaene LED til tunnelbelysning, lyssty-
ring, lyse tunnelvegger og tunnelrenhold og
konsekvens for belysning.

Når det gjelder LED-belysning konkluderer
rapporten med at det ikke er noen teknisk
grunn til å vente med å bruke LED-belysning i
tunneler, men at totale levetidskostnader bør
vurderes. I tillegg kan opplevd blinding være
en utfordring. LED er samtidig spesielt godt
egnet for dimming, og lysstyring i kombinas-
jon med LED-teknologi kan da både være en-
ergi- og kostnadsbesparende. Ved lysstyring
bør det også installeres utstyr for deteksjon av
innkommende trafikk i en gitt avstand fra por-
talen. Med strengere krav til lyse tunnelveg-
ger blir det viktigere med gode prosedyrer
for overflatebehandling og vedlikehold, og
i tillegg anbefaler rapporten at det innføres
skjerpede krav til renhold av armaturer.

Title

Future tunnel lighting

Subtitle**Author**

Pål J. Larsen, Norconsult

Department

Traffic Safety, Environment and Technology
Department

Section

Tunnel and concrete

Project number

603242

Report number

No. 562

Project manager

Synnøve A. Myren / Harald Buvik

Approved by

Per Ole Wanvik

Key words

Durable structures, future tunnels, tunnel
lighting, LED, lighting control, bright tunnel
walls, tunnel cleaning

Summary

This report provides a summary of the work
done in collecting and processing information
on the status and development within LED for
tunnel lighting, lighting control, bright tun-
nel walls and tunnel cleaning and its conse-
quence for lighting.

When it comes to LED the report concludes
that there is no technical reason to wait using
LED in tunnels, but the total cost should be
considered. In addition, experienced blinding
can be a challenge. LED is also particularly
suitable for dimming, and lighting control in
combination with LED technology can then
be both energy and cost saving. By lighting
control, equipment for detection of incom-
ing traffic should also be installed at a given
distance from the tunnel. With stricter require-
ments for bright tunnel walls, it becomes more
important with good procedures for surface
treatment and maintenance, and in addition,
the report recommends the introduction of
more stringent requirements for cleaning of
fixtures.

Forord

Denne rapporten inngår i en serie rapporter fra **etatsprogrammet Varige konstruksjoner**. Programmet hører til under Trafikksikkerhet-, miljø- og teknologiavdelingen i Statens vegvesen, Vegdirektoratet, og foregår i perioden 2012-2015. Hensikten med programmet er å legge til rette for at riktige materialer og produkter brukes på riktig måte i Statens vegvesen sine konstruksjoner, med hovedvekt på bruer og tunneler.

Formålet med programmet er å bidra til mer forutsigbarhet i drift- og vedlikeholdsfasen for konstruksjonene. Dette vil igjen føre til lavere kostnader. Programmet vil også bidra til å øke bevisstheten og kunnskapen om materialer og løsninger, både i Statens vegvesen og i bransjen for øvrig.

For å realisere dette formålet skal programmet bidra til at aktuelle håndbøker i Statens vegvesen oppdateres med tanke på riktig bruk av materialer, sørge for økt kunnskap om miljøpåkjenninger og nedbrytningsmekanismer for bruer og tunneler, og gi konkrete forslag til valg av materialer og løsninger for bruer og tunneler.

Varige konstruksjoner består, i tillegg til et overordnet implementeringsprosjekt, av fire prosjekter:

- Prosjekt 1: Tilstandsutvikling bruer
- Prosjekt 2: Tilstandsutvikling tunneler
- Prosjekt 3: Fremtidens bruer
- Prosjekt 4: Fremtidens tunneler

Varige konstruksjoner ledes av Synnøve A. Myren. Mer informasjon om prosjektet finnes på vegvesen.no/varigekonstruksjoner

Denne rapporten tilhører **Prosjekt 4: Fremtidens tunneler** som ledes av Harald Buvik. Prosjektet skal bidra til at fremtidige tunneler bygges med materialer, utførelse og kontroll bedre tilpasset det miljøet konstruksjonene er utsatt for. Prosjektet skal bygge videre på arbeidet i Moderne Vegtunneler, samt innspill fra Prosjekt 2: Tilstandsutvikling tunneler, med hovedfokus på tunnelkonstruksjonen i et levetidsperspektiv. Prosjektet skal resultere i at installasjoner i fremtidige tunneler oppnår tiltenkt levetid med reduserte og mer forutsigbare drift- og vedlikeholdskostnader.

Rapporten er utarbeidet av *Pål J. Larsen, Norconsult* på oppdrag fra Varige konstruksjoner

Fremtidens tunnelbelysning

Nasjonale utviklingsoppgaver innen tunnelbelysning 2012–2015, for tryggere og mer energi- og kostnadseffektive tunneler.



D11	2015-12-31	For godkjenning av oppdragsgiver	PJL	TM	PJL
Rev..	Dato:	Beskrivelse	Utarbeidet	Fagkontroll	Godkjent

Dette dokumentet er utarbeidet av Norconsult AS som del av det oppdraget som dokumentet omhandler. Opphavsretten tilhører Norconsult. Dokumentet må bare benyttes til det formål som oppdragsavtalen beskriver, og må ikke kopieres eller gjøres tilgjengelig på annen måte eller i større utstrekning enn formålet tilsier.

Sammendrag

I delprosjektet «Fremtidens tunneler» under etatsprogrammet «Varige konstruksjoner» ble det opprettet et utviklingsprosjekt for tunnelbelysning i 2012. Prosjektet skulle ta for seg temaene: 1. «Forsøk med LED til tunnelbelysning», 2. «Forsøk med lysstyring» og 3. «Forsøk med lyse tunnelvegger», i tillegg ble det lagt til et fjerde tema; tunnel renhold. Prosjektet har gått over 3 år.

Prosjektet har hatt som hovedmål å samle og bearbeide informasjon om status og utvikling innenfor de fire temaene og på grunnlag av dette konkludere og gi anbefalinger for tilpasning og revidering av prosedyrer og håndbøker for Statens Vegvesen.

1. LED til tunnelbelysning. For LED til tunnelbelysning er det gjort målinger i flere tunneler og en sammenligning av kvalitet hos de to mest benyttede leverandørene er gjennomført. Konklusjonen er at det lysteknisk sett ikke er noe som skulle tilsi at man trenger å vente med introduksjon av LED i tunneler. Det er samtidig vist at opplevd blinding kan være en utfordring. Dette kan blant annet skyldes at de blindingstallene som framkommer ved lysberegningene ikke nødvendigvis samsvarer med hvordan øyet opplever blindingen. Om man skal velge LED må dette skje på bakgrunn av en prosjektspesifikk analyse av kostnader over hele levetiden, med bakgrunn i at selve innkjøpskostnaden per utgangen av 2015 fortsatt er noe høyere for LED-anlegg. For å redusere levetidskostnadene er det en forutsetning at det implementeres god styring og at de fordelene LED-teknologien har på dette området utnyttes.

Det har vært tilfeller av at installasjoner av tunnelbelysning med LED har skapt elektrisk støy på tunnelenes nødsamband. Disse konkrete tilfellene viste seg å ha opphav i tilhørende lysstyringsutstyr ikke fra selve LED-teknologien. Dette var således et produkt- og ikke et generelt teknologiproblem. Allikevel skal det tas alvorlig at nye komponenter som tas i benyttelse kan representere utfordringer vi ikke er vant med, og derav setter strengere krav til hvordan anlegg beskrives og kravene til dokumentasjon. I dette spesifikke tilfellet er det viktig at EMC direktivet oppfylles for alle komponenter men at det også tas med i betraktningen at ferdig installasjonen skal tilfredsstille alle krav (sammenlagret effekt kan overstige enkeltkomponenters virkning).

2. Lysstyring. Når det gjelder lysstyring er det viktig å finne et riktig nivå for investeringer som harmonerer med de sparte driftskostnader. Det er ingen tvil om at det er betydelig energisparepotensialer som kan oppnås ved korrekt lysstyring i norske tunneler, men ikke alle løsningene er like kostnadsbesparende. LED er spesielt godt egnet for dimming og de fleste leverandører tilbyr dette uten store tillegg. Dermed blir lønnsomheten ved dimming mer attraktiv ved bruk av LED enn ved bruk av konvensjonell teknologi.

3. Lyse tunnelvegger. I foreliggende revisjon av N500 er det foreslått et krav til innføring av krav til belysning av tunnelveggene, som heretter skal tilsvare kjørebanelens belysningsnivå. Dermed blir det stadig mer viktig hvordan tunnelveggen overflatebehandles og vedlikeholdes. En prosedyre for prosjektering og etterprøving bør komme inn i håndbok V124. Denne anbefales å basere seg på tilsvarende prosedyre i ANSI RP-22.

4. Vedlikehold/renhold. Prosjektet konkluderer med å anbefale at vask av armaturer inkluderes i alle kontrakter omfattende «halvvask» og at renhold av armaturer bør inngå som et skjerpet krav i alle fremtidige vedlikeholdskontrakter (renhold) for tunnel. Videre bør det åpnes opp for en vurdering av varierende vedlikeholdsfaktor sett i sammenheng med bruk av styring.

Abstract

In the project, "Future Tunnels" under the research program "Durable Structures", there was established a research project entitled "National Research in Tunnel Lighting" in 2012. The project was described to cover the themes: 1. "Research on LED for Tunnel Lighting", 2. "Research on lighting controls" and 3. "Research on bright walls", in addition tunnel maintenance was added during the project period. The project has spanned over 3 years. The project main target has been to gather and evaluate information on the status and ongoing development in these four subjects. And based on this conclude and make recommendations for future revisions of procedures and handbooks for the national road authority.

1. For LED used for tunnel lighting there has been done measurements in several tunnels and a comparison of achieved quality from the two most used vendors has been conducted. It is considered that related to achieved lighting levels and quality there is no reason to postpone implementation of LED in tunnels. At the same time there has been stated that experienced discomfort glare might be a challenge. This might relate to the fact that calculated disability glare done in lighting calculations not necessarily correspond to how the human eye perceive the glare in real life. If one are to decide for implementation of LED, this has to be done based on an evaluation of lifetime cost calculations, given that per end of 2015 the cost of investment still are higher for LED than the traditional installations. To reduce the lifetime cost it is important that the LED's advantage concerning control and dimmability is being exploited to it's full.

Recently it has been uncovered that LED installations might represent radio noise on the tunnel's emergency communication systems. These specific incidents originated from the associated control systems not from the LED itself. One have to assume that all CE-approved products comply to the EMC directive. Furthermore as this was a product specific problem not a technology problem, this do not give reason for scepticism towards the LED technology itself. At the same time we have to acknowledge that new technology represents new challenges. And we have to revise our expectations and demands accordingly.

2. Regarding lighting control, it is of importance to find the correct level of investments that harmonised with the archived savings. At the same time it is apparent that energy savings is achieved by implementation of control systems in all cases. This means that it is clear, with no doubt, that all tunnels not having a dimmable control system will be able to achieve energy savings, but this will not give a satisfactory "return of investment" in all cases. LED is nevertheless well suited for dimming, and most fixtures can be controlled with no or small extra investments. By this, it is given that dimming is more easily profitable for LED than traditional installations.

3. In the current revision on the way of handbook N500 there is introduced a demand for equal lighting level on walls compared to the road in Norwegian tunnels. Following this, it will be increasingly important how tunnel surfaces are coated and maintained. A procedure for planning and checking these demands should be incooperated in the future revision on handbook V124. It is recommended to base this on procedure in ANSI RP-22.

4. Maintenance. The project concludes that cleaning of luminaries should be included in all operation contracts also for defined "half-wash" and also for all future contracts. There should also be looked into the current standard for setting the maintenance factor and the possibility to link this to a control system.

Innhold

1	Innledning	7
2	Grunnleggende temaer i tunnelbelysning	8
2.1	Synsforhold	8
2.2	Aldersforskjeller	9
2.3	Luminans på vegger	9
2.4	Luminansjevnhet	10
2.5	Blending	10
2.6	Fargetemperatur	10
2.7	Fargegjengivelse	11
2.8	Vedlikeholdsfaktor	11
2.9	Ledelys og nødbelysning	11
3	Tunneler som er undersøkt	12
3.1	Presturatunnelen	12
3.2	Ljabrud diagonalen	13
3.3	Brekktunnelen	14
3.4	Rallerudtunnelen	15
3.5	Vabakken tunnel	16
3.6	Askimporten tunnel	17
3.7	Damsgårdtunnelen	18
3.8	Væretunnelen	19
3.9	Strindheimtunnelen	20
3.10	Stavsjøfjelltunnelen	21
4	LED i tunneler	22
4.1	Erfaringer og dagens kunnskap	22
4.1.1	Norske tunneler med LED per desember 2015	22
4.1.2	Erfaringer fra vegvesenets regioner	22
4.1.3	Erfaringer med elektrisk støy fra utstyr	22
4.2	Lystekniske egenskaper	23
4.3	Blending	23
4.3.1	Ubehagsblending	23
4.3.2	Synsnedsettende blending	25
4.3.3	Lysspredning i støv	26
4.3.4	Diskusjon	26
4.4	Innkjøpspris kontra levetidskostander	27
4.5	Anbefaling LED i tunnel	27

5	Lysstyring i tunneler	29
5.1	Erfaringer og kjent kunnskap	29
5.1.1	Erfaringer fra region nord 2000–2014	29
5.1.2	Erfaringer fra Sokna–Ørgenvika 2012–2014	29
5.1.3	Erfaringer fra Brekktunnelen 2012–2014	30
5.1.4	Resultater fra studentoppgave ved NTNU i 2014	30
5.2	Diskusjon	30
5.2.1	Kost/nytte ved styresystemer	30
5.2.2	Innslagspunkt for styretrinn for innkjøringssone	31
5.2.3	Prosedyre for fastsettelse av adaptasjonsluminans	31
5.2.4	Tenning av belysning ved deteksjon av tilstedeværelse	33
6	Lyse tunnelvegger	34
6.1	Erfaringer og kjent kunnskap	34
6.1.1	Overflater i tunnel	34
6.1.2	Oppmerksomhetsobjekter	35
6.2	forsøk	37
6.2.1	Damsgårdtunnelen	37
6.2.2	Askimporttunnelen	37
6.2.3	Væretunnelen	38
6.3	Diskusjon	38
7	Tunnelvedlikehold.....	40
7.1	Dagens vaskerutiner i vegvesenet	40
7.2	Forsøk	40
7.3	Diskusjon	41
8	Oppsummert lærdom fra delkapitlene.....	44
8.1	LED	44
8.2	Lysstyring	44
8.2.1	Anbefalt avstand til portal for deteksjon ved lysstyring	44
8.2.2	Anbefalt angivelse av tenning av trinn i innkjøringssoner	45
8.3	Lyse tunnelvegger	45
8.4	Tunnelvedlikehold	45
9	Vedlegg 1 – LED ledelys/evakueringslys	46
9.1	Erfaringer/kjent kunnskap	46
9.1.1	Forsøk i Rallerudtunnelen	46
10	Vedlegg 2 – Tunneler med LED-lys, 24.03.15.....	48

1 Innledning

Norge kan i europeisk sammenheng ses på som et «tunnelland». Per desember 2015 er det om lag 1100 vegtunneler med en samlet lengde på over 1100 km. I Europa er det bare Italia som overgår Norge i antall tunneler, og ser man på antall tunneler per km vei er Norge også foran Italia.

Det er krevende å holde disse tunnelene i god stand. Som en generell betraktning kan det sies at det er mye gammelt teknisk utstyr som har overskredet teknisk-økonomisk levetid i dagens tunneler. Det er også gjennomgående dårlig rutiner for lysstyring samt drift og vedlikehold av teknisk utstyr. Statens vegvesen, må blant annet oppgradere belysningen i mange av tunnelene, for å tilfredsstille tunnelsikkerhetsforskriften og elektro-forskriftene. Driftskostnadene til tunnelbelysningen er meget høye og det er viktig å vurdere hvilken nytte man kan ha av å ta i bruk ny teknologi og nye systemer for å redusere strømforbruket samtidig som man sørger for god belysning.

I etatsprogrammet «Varige konstruksjoner», som startet opp i 2012, ble det i delprosjektet «Fremtidens tunneler» opprettet et nytt utviklingsprosjekt for tunnelbelysning. Prosjektets har sett nærmere på mulighetene for å redusere energibruken og levetidskostnadene, uten at dette skal gå på bekostning av trafikksikkerheten.

Prosjektet var fra starten delt inn i tre deltemaer:

- Forsøk med LED til tunnelbelysning
- Forsøk med lysstyring
- Forsøk med lyse tunnelvegger

Underveis ble et fjerde tema tatt inn:

- Tunnel renhold

I tillegg er det også tatt inn i vedlegg en omtale og beskrivelse av test av ledelys i tunnel, samt en diskusjon.

Prosjektet gjennomførte en rekke feltmålinger for å kartlegge status samt fulgte opp flere nye installasjoner. Denne rapporten summerer de resultater og erfaringer dette arbeidet har gitt. Parallelt er det ført en målerapport med alle detaljer fra kartleggingen. Utdrag av målerapporten er tatt med i denne rapporten.

2 Grunnleggende temaer i tunnelbelysning

Dette kapitlet tar for seg hovedpremissene for tunnelbelysning, kravene til dimensjonering og prosjektering slik de er presentert i dagens håndbøker samt andre viktige premisser for trafiksikkerheten i tunneler i sammenheng med synsforhold og lyskvalitet.

Kvaliteten på lyset kan ha innvirkning på hvordan synssystemet vårt oppfatter situasjoner forskjellig ved likt luminansnivå. Både identifisering av objekter i veibanen, opplevd ubehagsblending, tretthet og tunnelangst kan påvirkes eller motvirkes med gode valg knyttet til lyskvalitet. Med nye lyskilder hvor alle disse kvalitetene kan varieres i større grad enn tidligere, er det stadig viktigere at det settes krav til disse parameterne og at leveransene følges opp.

2.1 SYNSFORHOLD

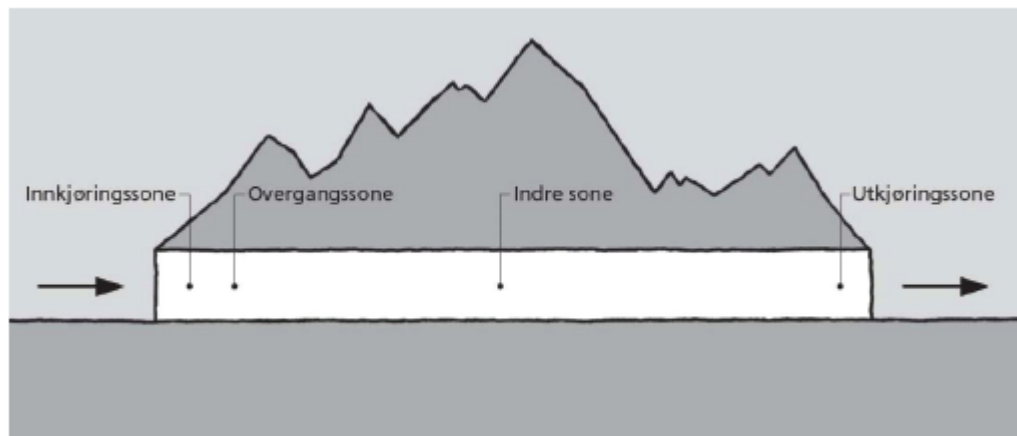
Det spesielle med belysning av tunneler i forhold til «vei i dagen» er at belysning i tunneler er vel så viktig på dagtid som nattetid. Da øyet er spesielt sårbart for store variasjoner i lysnivå og fordi det trenger noe tid for tilvenning (innen lysfaget omtalt som «øyets adaptasjon»), er det viktigste temaet rundt synbarhet hvordan man tilrettelegger for overgangen mellom en solskinnsdag ute og mørket inne i en tunnel. Belysningsanlegget i en tunnel blir dimensjonert i en innkjørings- og overgangssone (den første strekningen innenfor portal) relativt til de lysforholdene bilføreren blir eksponert for den siste tiden før passering av portal.

Mer konkret er det bestemt et kritisk punkt i forkant av tunnelen, hvor avstanden er relatert til kjørehastigheten. Her skal det kontrolleres hvor høy reflektert belysning fører av en bil kan bli utsatt for (definert som adaptasjonsluminansen). I Norge er området som skal medtas i denne analysen begrenset til en 20° sirkel sett rundt midten av portalåpningen, da dette er antatt å tilsvare bilføreres normale synsfelt. Belysningen blir så satt til en spesifisert andel av denne «adaptasjonsluminansen» i første del av innkjøringssonen, før den gradvis reduseres i henhold til gjeldende krav, slik at man hele tiden har mulighet til å oppfatte farlige situasjoner.

Adapsjonsluminansen som skal benyttes ved dimensjonering av tunnelbelysningen defineres som den midlere luminans i et synsfelt som utgjør 20 grader (2x10 grader) fra bilførerens øye, med synsretning mot et punkt 1,5 meter over kjørebanelen og i en avstand angitt i tabell 9.1.

Figur 1 Adaptasjonsluminans som definert i håndbok N500

Ser man på ulykkesstatistikk for trafikk i tunneler, ser man at det er ved innkjøring (og utkjøring) at den største andelen av ulykkene forekommer. Den store variasjonen i lysforholdene utenfor tunnelen over døgnet og året gjør det viktig å tilpasse og regulere belysningen, enten ved hjelp av trinn eller trinnløst.



Figur 2 Belysningssoner i tunnel, som definert i håndbok N500

Når det gjelder belysningsnivåer på veibanen innover i tunnelen, er dette også noe spesielt sett i forhold til veibelysning. I en tunnel har man full kontroll med omgivelsene da de er begrenset av tunnelhvelvet (evt. vegger og tak). Synsforholdene vil i en stor grad være avhengig av valgte overflater, der asfalten representerer ca 40 % (antatt 2 kjørefelt). Både synbarhet av objekter, refleksjon av belysning, blinding og psykiske faktorer som trøtthet og tunnelangst er relatert til valg av og senere behandlingen av disse flatene. Når man samtidig tenker på den tilsmussingen som forekommer inne i et slikt tunnelmiljø er det åpenbart at faktorer som vedlikehold og renhold er viktige temaer som også bør vurderes i sammenheng med belysning. Dette omtales nærmere i kapittel 7.

2.2 ALDERSFORSKJELLER

Krav til belysning dimensjoneres med basis i en 23 år gammel normalt seende person. Det er et faktum at synsevnen reduseres jevnt etter 23-årsalderen og forringes så lenge en lever. Det er høyst individuelt i hvilken grad denne degenereringen skjer, men som et gjennomsnitt kan det anslås at en 40-årig sjåfør trenger dobbelt så mye lys for å oppnå samme synsprestasjon som «den dimensjonerende 23-åringen», mens ved 60 år er det et behov for 3 ganger så mye lys. I denne sammenhengen skal det også nevnes at man med alderen blir tilsvarende mer ømfintlig for blinding, så kun økning av belysningsnivå er ikke umiddelbart en god løsning for alle situasjoner.

Det finnes ingen god statistikk for alderen på sjåførere som er høyest representert i mørketrafikken, men ifølge statistisk sentralbyrå har forventet levealder økt med ca. 5–7 år de siste 30 årene (7 for menn og 5 for kvinner). Grunnlaget for prosjektering av vegbelysning i større grad enn i dagens praksis ta konsekvensen av denne kunnskapen, uten at dette behandles i mer detalj her.

2.3 LUMINANS PÅ VEGGER

Ved bruk av lyse veggelementer, eller ved å gjennomføre systematiske tiltak for å behandle veggene med lyse materialer, sørger man i første omgang for et lysere tunnelrom, som oppleves bedre for brukeren, men også bedre refleksjon av det tilførte lyset og derav mer lys på veibanen. Også synbarheten av objekter blir bedre da det er nettopp veggene som danner bakgrunnen som objekter på vegbanen ses mot. Dagens anbefaling er å belyse tunnelveggens nedre del fra vegdekke opp til 2 m høyde med minst 60 % av nærmeste kjørefelts luminans. Ved lyse vegger oppnås dette med lavere grad av belysning enn med ubehandlet betong eller fjell og er slik sett et direkte energibesparende tiltak. Men det må også bemerkes at et slikt tiltak er særs utsatt for nedsmussing over tid, så vedlikeholdsrutinene må være tilpasset dette.

2.4 LUMINANSJEVNHET

Jevnhet for luminansen på vegdekket er oppgitt i to størrelser, den totale jevnheten mellom to lyskilder «U_o» (uniformity overall) og jevnheten langs midtlinjen i hvert kjørefelt «U_l» (uniformity longitudinal). Begge verdier utregnes ved å projisere et standard rutenett av målepunkter mellom to armaturer, for U_o deles minimumsverdien på gjennomsnittet av alle måleverdiene, for U_l deles maksimumsverdien på minimumsverdien.

Disse tallene er sentrale, både for å sikre synskomforten og trafikksikkerheten. Med tanke på synskomfort vil en sterkt, ikke uniformt belyst veg oppleves som både slitsom og trettende for bilfører. Med tanke på trafikksikkerhet er det viktig for synbarheten av objekter at områder på veien ikke er for lavt belyst, da et høyt gjennomsnitt alene vil gi et falskt inntrykk av hva man faktisk evner å oppdage i enhver situasjon. I denne sammenheng kan det også bemerkes at armaturfordeling på elektriske kurser med fordel kan optimaliseres slik at enkeltutfall av kurser ikke fører til lange strekk uten belysning ().

Et annet viktig moment i belyningsplanleggingen er å beregne avstand mellom lysningspunkter med tanke på hvilken flimmerfrekvens de skaper for fører i henhold til hvilken hastighet bilen har. Kravet er at opplevd flimmer ikke skal ligge i området 4–11 Hz. Dette for å unngå påvirkning som kan frembringe epileptiske anfall, det er satt en grense på 20 sekunders sammenhengende kjøretid for at dette skal tas hensyn til.

2.5 BLENDING

Blending er kanskje det mest krevende temaet hva gjelder krav til tunnelbelysning. Blending er i synsfysiologien delt i to forskjellige begreper, enkelt forklart som fysisk (synsnedsettende) og psykisk blending (ubehag). Utfordringen er at den fysiske blendingen som det settes krav til i norske tunneler, ikke nødvendigvis er sammenfallende med den psykiske blendingen som er den man visuelt oppfatter.

Den fysiske blendingen er representert med størrelsen «TI» (Threshold Increment), et tall som angir hvilken reduksjon i prosent installasjonens blending gir på vår oppdagelsesevne av objekter sammenlignet med om installasjonen ikke gav noe blending. Kravet er at «TI» skal være maks 6 %. Et viktig moment å være klar over er at måten «TI» regnes ut på er tilpasset tradisjonelle lysarmaturer. Fellesnevneren for disse er at de har/hadde en lyskilde som sendte ut lys indirekte via en optikk slik at «synlig lysende areal» ble forholdsvis stort. LED, som stort sett sender lyset direkte ut via lins (ikke reflektert via optikk), er små i utstrekning. Dette gjør at LED som er en meget kompakt lyskilde, vil få for lave verdier ved bruk av denne formelen. Det arbeides internasjonalt med å se på bedre måter å representere korrekt blending, men det foreligger per i dag ikke bedre metoder.

2.6 FARGETEMPERATUR

Hvor effektivt øyet oppfatter bevegelse og kontrast blir påvirket av hvilken fargetemperatur lyset har. En utfordring som oppstår når man skal behandle dette temaet er at øyet responderer forskjellig på fargetemperatur avhengig av hvor i synsfeltet synsoppgaven opptrer. I sidesynet, som er viktig for oppdagelse av bevegelse er høy fargetemperatur viktig. For sentralsynet, som er representativt når en har oppdaget hva man skal se og derav har flyttet blikket mot det er lav fargetemperatur mer avgjørende). LED-belysning kjennetegnes ved at lyskildene gjerne er mer energieffektive jo høyere fargetemperatur lyset har. Derfor vil bruk av LED kontra NaH ha konsekvenser for synsoppfattelesen i hhv side- og sentralsynet og må vurderes ved prosjektering.

Med bakgrunn i det overstående, er det for tunneler angitt et akseptabelt område 4000–6000 K i dagens håndbok V124 fordi man vektlegger godt sidesyn framfor centralsyn i tunneler.

2.7 FARGEJENGIVELSE

Betydningen av god fargegjengivelse i en tunnel er ikke umiddelbart selvforklarende og det er uenighet i fagmiljøet om hvorvidt god fargegjengivelse er noe som bør vektlegges i tunnelbelysning. Tradisjonelt utførte anlegg, som fortsatt utgjør mesteparten av norske tunneler, er som oftest utstyrt med høytrykksnatriumarmaturer i innkjøringssonen og med lysrør i indre sone. Når det gjelder høytrykksnatriumarmaturer har de en fargegjengivelse fra ca. 25 og under. Å kunne skjelve farger er ikke nødvendigvis viktig ved motorisert ferdsel i en tunnel, men både for opplevelsen av tunnelrommet og komforten vil en bedre fargegjengivelse enn hva natriumlyset gir være ønskelig. Lysrør kan komme i alle ender av skalaen, men det normale er $R_a > 70$ eller $R_a > 80$. Det er dette lyset man er vant til i indre sone, så ved overgang til LED er det ikke noen grunn til å legge kravet lavere.

Ved innføring av LED er det i håndbok V124 valgt å angi et krav om $R_a > 75$ for LED-anlegg. Dette med basis i teknologiens muligheter og at dette rett og slett ikke er vanskelig å oppnå. (Som en bemerkning kan det anføres at standardverdier går på hele ti-tall, så kravet bør jamføres til enten 70 eller 80).

2.8 VEDLIKEHOLDSFAKTOR

Belysningsanlegg blir alltid dimensjonert med et visst tillegg ved installasjonstidspunkt slik at når lyset over tid reduseres vil det ved enden av levetid tilfredsstillende minimumskravet ved normal lystilbakegang. Faktoren for vedlikeholdt lystilbakegang (MF) settes som oftest til 0,75 ved beregning av dagens tunnelanlegg (som er lik den maksimalt tillatte verdien ihht V124?).

Vedlikeholdt lystilbakegang (MF) skal ta høyde for all reduksjon i lyset fra lyskilden som når veibanen over levetiden. Dette inkluderer både lyskildens lystilbakegang, lyskildeutfall, nedsmussing av armaturen/lyskilden og nedsmussing av flater som reflekterer/interreflekterer lys ned på veibanen.

Når kravet til for lyskilder alene gjerne settes til maksimalt 20 % lystilbakegang (L80) er det innlysende at en fastsettelse av en samlet vedlikeholdsfaktor til 0,75 for en tunnel er urealistisk. Håndbok V124 gir i dag en veiledning om benyttelse av vedlikeholdsfaktor lik 0,4/0,5/0,7 ved henholdsvis lange/normale/korte vedlikeholdsintervaller, men det forutsetter da en betydelig overdimensjonering av anleggene ved nyinstallasjon/vedlikehold med tilsvarende høyt energiforbruk

2.9 LEDELYS OG NØDBELYSNING

Dagens krav angående ledelys i tunneler er relatert til nødsituasjoner. N500 krever ledelys med innbyrdes avstand ca. 62,5 m (vil senkes til 25 m i kommende revisjon av publikasjon) montert ikke høyere enn 1 meter på tunnelvegg. Det er varslet i Na-rundskriv 2014/6 at det ses på ytterligere reduksjon av dette kravet for lange/bratte tunneler.

Når det allerede finnes et slikt supplerende belysningsanlegg er det et spørsmål om dette burde ha vært tatt i bruk som en sammenhengende visuell føring som supplement til den allmenne belysningen for alle tunneler.

Ledelys kan også være et godt supplement til dårlig belyste lavtrafikkerte evt. ubelyste tunneler. Det vil bidra til lettere å orientere seg og posisjonere bilen i tunnelrommet. Om ledelys skal benytte som rømningslys, må man ta hensyn til kravene i forhold til dette også. Se kapittel vedlegg 1.

3

Tunneler som er undersøkt

I dette treårige prosjektet er det sett på mange temaer knyttet til tunnelbelysning, og det er gjort registreringer og målinger i en rekke tunneler. I dette kapittelet er det gitt en kort introduksjon til hvilke tunneler som er inkludert og kort omtale av hvilke målinger som er utført i de respektive tunneler. Målinger er utført for å fremskaffe fakta og derigjennom understøtte drøftinger i de etterfølgende kapitlene.

3.1 PRESTURATUNNELEN

Presturatunnelen er én av tre tunneler omtalt som «Tinnsjøtunnelene». Lysinstallasjonen i denne 1400 m lange tunnelen ble totalrehabilitert i 2011. Installasjonen har tradisjonell høytrykksnatrium i innkjøringssonene og 70 W LED-armaturer i indre sone. Styling av LED gjøres i to trinn, med full (2 cd/m^2) og halv (1 cd/m^2) belysning.

Lysmålinger ble gjennomført for indre sone og kjørebans luminans samt horisontal og vertikal illuminans ved full belysning. I tillegg ble vertikal illuminans på vegg registrert, med et rutenett opp til 2 m høyde mellom to armaturer. Også fargetemperatur og fargegjengivelseegenskaper ble målt. Tunnel ble valgt for å se på LED armaturer fra en leverandør som på måletidspunkt ikke hadde mange installasjoner i Norge.

Målingene ble utført en våt vinterdag og fuktigheten strakk seg langt innover i tunnelen; Til tross for at målestedet ble lagt på det mest ideelle stedet (ca. 500 m innenfor portal) var det fortsatt noe fukt på overflaten som gir noe usikkerhet i måleresultatene.



Figur 3 Presturatunnelen med LED-belysning i indre sone

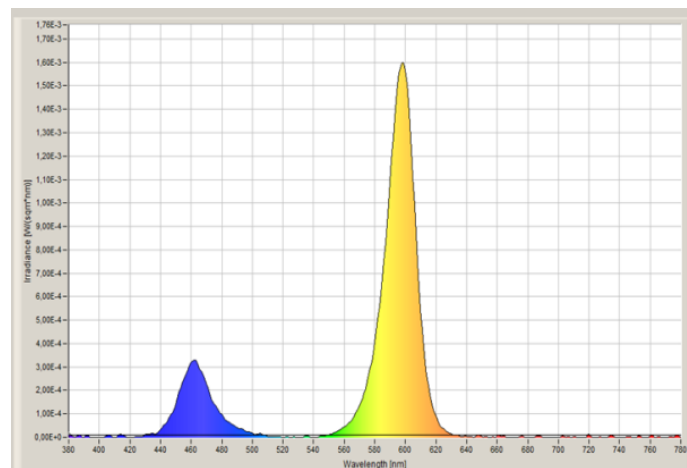
3.2 LJABRUDIAGONALEN

Ljabrudiagonalen er en kort tunnel på 110 m og er en del av FV 155 helt sørøst i Oslo kommune. Tunnelen var den første i Norge som fikk installert LED i indre sone og anlegget ble satt i drift sommeren 2004. Alder på installasjon var hovedårsak til at anlegget ble inkludert i studien. Levetid og lystilbakegang er et viktig tema, som ble forsøkt kartlagt og evaluert. Ved måletidspunkt var armaturene dimmet til 50 % (nattdrift) og antas å ha hatt en driftstid på omtrent 75 000 t.

Det ble målt gjennomsnittlig horisontal og vertikal illuminans samt luminans på veibanen. Også fargetemperatur og fargegjengivelse ble målt. Det var på måletidspunktet noe fuktig veibanen som gir en liten usikkerhet i måleresultatene.



Figur 4 Indre sone i Ljabrudiagonalen



Figur 5 Måling av fargespekter fra installerte LED

3.3 BREKKTUNNELEN

Tunnelen er en del av E39 i Skaun kommune i Sør-Trøndelag (omtrent 2 mil fra Trondheim), er 1290 m lang og ligger langs Trondheimsfjorden. Den originale installasjonen fra 2005 var en standard installasjon med trinnet høytrykksnatriumanlegg i innkjøringssonene supplert med lysrør i indre sone. Tunnelen har blitt brukt i dette prosjektet til å se på innføring av LED til bruk i tunnel og er den første hvor man har benyttet LED gjennom hele tunnelen, også i innkjøringen. Nyinstallasjon med LED ble utført rundt årsskiftet 2012/2013. Prosjektet har gjennomført en nøye kartlegging av belysningen både før og etter rehabilitering. I tillegg er tunnelen benyttet til å se på vedlikeholds-rutiner og lystilbakegang forårsaket av nedsmussing av armaturer. ÅDT var 10 300 kjøretøy i 2014.

Det er utført gjentatte målinger/registreringer i tunnelen i perioden januar 2013-desember 2014.



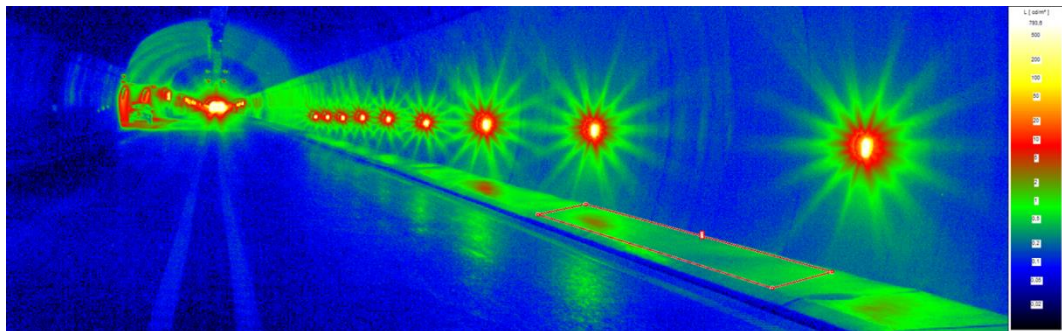
Figur 6 Gammel og ny dagsoneinstallasjon i Brekk tunnelen (bilde tatt nattetid)

3.4 RALLERUDTUNNELEN

Tunnelen ligger på en 16,3 km nyetablert trasé av RV 7 mellom Sokna og Ørgenvika. Selve tunnelen er 2,8 km lang og én av tre tunneler langs strekningen. Innkjøringssonene har standard trinnet høytrykksnatriumanlegg, mens indre sone har LED-anlegg. Styresystemet har toveiskommunikasjon med hver enkelt armatur. Anlegget er videre utstyrt med luminanskamera for hver portal som styrer både trinn for innkjøring og indre sone.

Målinger og registreringer utført omfatter indre sones horisontale illuminans og vertikal illuminans på vegger samt en subjektiv blendingsevaluering av innkjøringssonene. Tunnelens innkjøringszone er benyttet for å evaluere styretrinn for innkjøring i sammenheng med adaptasjonsluminans

Tunnelen ble også benyttet som testtunnel for midlertidig oppheng av ledelys montert på vegg med varierende avstand. Eksperimentet ble registrert med luminanskamera for visuell evaluering av lysfordeling og innbyrdes avstand. Synbarhet ble subjektivt bedømt av tre personer. Det er fast montert ledelys i tunnelen med innbyrdes avstand ca. 62,5 m, men disse var avslått under forsøket.



Figur 7 Luminansmåling av forsøk med ledelys i Rallerudtunnelen



Figur 8 Foto av forsøk med ledelys i Rallerudtunnelen

3.5 VABAKKEN TUNNEL

Tunnelen er en del av RV 36 i Porsgrunn kommune. Den er en ettløpstunnel med toveistrafikk på 566 m og med en antatt ÅDT lik 10 600 kjøretøy. Indre sone er bestykket med en tidlig generasjon LED (før det var vanlig å benytte dette i norske tunneler) og det ble utført måling på et rettstrekk i indre sone 3–4 måneder etter idriftsettelse av anlegget (måling ble gjort før dette prosjektet, (oktober 2010) men resultater er evaluert i dette prosjektet). Måling er benyttet for å se på lyskvalitet fra en tidlig LED installasjon. Det var en intensjon i prosjektet å følge opp med en måling mot slutten av prosjektperioden for å se på lystilbakegang over en lengre periode, men dette er ikke gjennomført.



Figur 9 Foto av indre sone i Vabakken tunnel

3.6 ASKIMPORTEN TUNNEL

Tunnelen ligger på E18 i Askim kommune, den er 1050 m lang, har to tofelts tunnellop og ble satt i drift i 2010 med oppgitt ÅDT 9000.

Da tunnelen ble bygget (åpnet for trafikk i 2010) ble det etablert et målefelt for utprøving av forskjellige overflatebehandlinger av betongelementene i østgående løp. Behandlingen ble påført i uke 35 i 2010.

Målefeltets utstrekning er 15 prefabrikkerte betongelementer, 2 stk. med 3,5 m bredde og 13 stk. med 5 m bredde. Målefeltene er påført overflatebehandling fra forskjellige leverandører, og i denne rapporten er det evaluert lysrefleksjonsegenskaper før og etter vask etter omtrent 2,5 års drift. Det er evaluert 9 forskjellige produkter i tillegg til referanseområder for ubehandlet overflate. For flere detaljer om overflater se VD-rapport 16 fra mai 2011.



Figur 10 Foto 1 og 2 av forsøksfelt i Askimporten tunnel

3.7 DAMSGÅRDTUNNELEN

Tunnelen er en del av RV 555 i Bergen kommune. Det er en toløpstunnel på 2300 m med en antatt ÅDT lik ca. 35 000.

Tunnelen har lavtrykksnatriumlamper fra installasjonsåret 1992 og veggene blir hvitkalket ved faste intervall. Det ble gjennomført en måling av refleksjonsfaktor fra veggene før og etter slik behandling (begge målinger samme natt) for å se på potensialet som vasking/hvitting av vegger har for tunnelens belysning.



Figur 11 Bilde før vask (t.v.) og etter vask og hvitting i Damsgårdtunnelen (t.h.).

3.8 VÆRETUNNELEN

Tunnelen er en del av E6 i Malvik kommune Sør-Trøndelag like øst for Trondheim. Det er en ettløpstunnel på 1625 m med en ÅDT lik 18 302 kjøretøy i 2014. Analyser indikerer en økning til over 20 000 i løpet av kort tid og derav behov for utvidelse til toløpstunnel (TS rapport «Trafikkutvikling E6 øst Trondheim–Stjørdal – 2012»). Tunnelen ble trafikksett i 1988.

Måleområdet ligger i indre sone som er utstyrt med standard «T8» lysrør. Målinger ble gjennomført for å se på virkning av hvitning av vegger for tunnelens lystekniske parametere.



Figur 12 Foto før vask og etter vask og hvitning av Væretunnelen

3.9 STRINDHEIMTUNNELEN

Tunnelen er en del av RV 706 i Trondheim kommune. Det er en toløpstunnel på 2502 m med en antatt ÅDT lik ca. 20 000–25 000 (nyhetssak fra vegvesenet 2014). Tunnelen ble trafikksett juni 2014.

Måleområdet ligger i indre sone som er utstyrt med standard «T8» lysrør. Målinger ble gjennomført i et parallelt prosjekt i Vegvesenets regi, for å se på effektiviteten til forskjellige vaskemetoders effekt på veggens refleksjonsegenskaper.

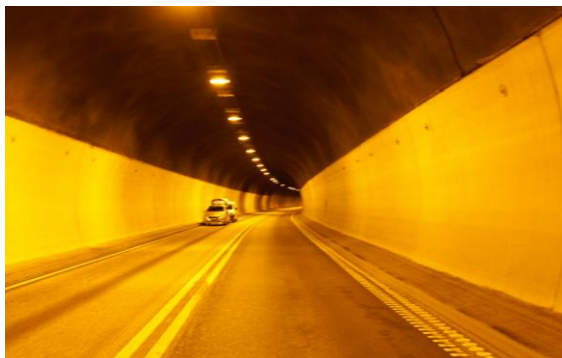


Figur 13 Foto før åpning for trafikk i Strindheimtunnelen

3.10 STAVSJØFJELLTUNNELEN

Tunnelen er en del av E6 i Malvik kommune Sør-Trøndelag like øst for Trondheim. Det er en ettløpstunnel på 1720 m med en ÅDT lik 17 793 (vegvesenets trafikkdata 2014). Tunnelen ble åpnet for trafikk i 1990.

Måleområdet ligger i indre sone som er utstyrt med standard lavtryksnariumarmaturer. Målinger ble gjennomført for å se på virkning av hvitting av vegger for tunnelens lystekniske parametere.



Figur 14 Foto av indre sone i Stavsjøfjelltunnelen

4 LED i tunneler

4.1 ERFARINGER OG DAGENS KUNNSKAP

4.1.1 Norske tunneler med LED per desember 2015

Region	LED indre sone	LED innkjøringslys	Med dimming	Kjøretøystyrt
Nord	10	9	1	3
Midt	11	6	6	4
Vest	9	1	1	7
Øst	2	1	1	0
Sør	6	1	5	1
Total	38	18	14	15

Tabell 1 Oversikt over LED-installasjoner i norske tunneler

4.1.2 Erfaringer fra vegvesenets regioner

Inntil nå har det kun vært et fåtall leverandører som har blitt benyttet i norske tunneler for LED-installasjoner. I all hovedsak er det Thorn og Multilux (AEC) som har levert, mens DEFA lighting også har levert et fåtall prosjekter (men som ikke undersøkt i dette prosjektet). Andre leverandører (blant annet Philips) har nå produkter som kan benyttes, i hvert fall for indre sone. Men disse har ennå ikke blitt installert i norske tunneler (som er satt i drift). Gjennom de årene prosjektet har pågått har utviklingen vært god for produktene på markedet, hva gjelder både kvalitative (fargetemperatur, fargegjengivelse, luminansjevnhet, blanding) og kvantitative måltall (lysmengde, lm/W-forhold, maksimal avstand mellom armaturer).

I mange tilfeller ser man at det fortsatt er blandingstallet TI som blir dimensjonerende for armaturavstand i indre sone. Det har også her vært en forbedring, men det antas en ytterligere forbedring av armaturenes optikk som kan fjerne noe av denne avhengigheten. Dermed kan armaturavstanden øke, hvilket er et økonomisk avgjørende element ved sammenligning med andre lyskilder.

Når det gjelder anvendelse av LED, både for nye tunneler og rehabilitering, ser man en stor variasjon i kravsetting til belysningsutstyr mellom regionene. En harmonisering av holdninger mellom vegvesenets regioner burde være oppnåelig på dette temaet.

4.1.3 Erfaringer med elektrisk støy fra utstyr

NKOM (norsk kommunikasjonsmyndighet) gjennomførte 7. og 22. januar 2015 teknisk kontroll av støy på nødnettet i Brekktunnelen etter meldinger om forstyrrelser på anlegget. Kontrollen avdekket at tunnelens belysningsanlegg som helhet var kilden til støyen. I etterkant er det avdekket at det var en enkeltkomponent brukt til PLC kommunikasjon til hver armatur som var kilde til forstyrrelsen på

nødnettet, noe som i ettertid er rettet opp av leverandøren. Det er derfor vist at det ikke er LED teknologien i seg selv som er årsak til disse forstyrrelsene. For videre anskaffelser er det viktig at kravene i forhold til elektrisk utstyr og EMC-direktivet (EMC Directive 2004/108) spesifiseres. Utover dette må det forutsettes at LED på lik linje med annet utstyr ikke som teknologi genererer uønsket elektrisk støy, men skal CE sertifiseres og merkes for salg på det norske markedet.

4.2 LYSTEKNISKE EGENSKAPER

I kapittel 2 er det presentert viktige temaer for kvalitet i tunnelbelysning. Det er hovedsakelig LED i indre sone som har blitt undersøkt i dette prosjektet, da det er få tunneler per desember 2015 som har LED i innkjøringssonen. Sammenligningsgrunnlaget for tradisjonelle anlegg er lysrør i indre sone.

Luminansjevnheten, både total og langsgående, er tradisjonelt meget god med lysrør, noe som blir opprettholdt med overgang til bruk av LED.

Når det gjelder lysets fargetemperatur og fargegjengivelsesindeks, er det for begge teknologier tilgjengelig både gode og dårlige produkter på markedet. Man må spesifisere hva man skal ha i ethvert tilfelle. Foreløpig angir håndbok V124 et ønske om fargetemperatur 4000–6000 K og $R_a > 75$. Å få levert LED med bedre fargegjengivelsesegenskaper er ikke noe problem, men det kan være verdt å merke seg at standard R_a ofte er 70 for tunnelprodukter, som altså ikke tilfredsstiller spesifikasjonen i håndboken som er $R_a = 75$.

Anbefaling:

Forandre kravet til fargegjengivelse til $R_a > 70$. Samtidig vil kravet til fargetemperatur kunne angis som fargetemperatur < 6000 , det vil si at man kan sløfye nedre grense da leverandørene alltid vil søke å levere høyest mulig fargetemperatur av hensyn til energibruken.

4.3 BLENDING

Blendingsevaluering av tunnelbelysning er et tema som er veldig viktig, men det er vanskelig å gjennomføre måleprosedyrer som verifiserer det som kalkuleres i lysberegningene. I utgangspunktet finnes det to forskjellige typer blending, det er synsnedsettende blending og ubehagsblending.

Det er i denne rapporten gjennomført måleprosedyre for hver av disse størrelsene, men ikke på den standardiserte måten som kreves for å gi et TI- og GR-tall, da dette er uforholdsmessig ressurskrevende og vanskelig å få gjennomført uten omfattende stenging av tunneler. Det må derfor bemerkes at de blendingstall som presenteres kun kan benyttes til sammenligning av installasjoner innbyrdes i rapportarbeidet og ikke sier noe om forholdet til de krav som stilles for denne type anlegg.

4.3.1 Ubegagsblending

For å se på ubegagsblending i dagens LED anlegg er det tatt utgangspunkt i at det er luminansene som er tilstede i synsfeltet som vil oppfattes som blendende som er viktige. Det er derfor i ulike representative posisjoner målt en bakgrunns luminans, som er beregnet å representere et 20° synsfelt for føreren. Fra dette feltet er det tatt ut en gjennomsnittlig luminans. Videre er det hentet ut den maksimale overflateluminansen i det samme synsfeltet. Forholdstallet mellom disse er hva som antas å utgjøre den opplevde ubegagsblendingen.

Lysinstallasjon	L_{max}/L_{adap}
Presturatunnelen Thorn LED 5. februar 2013	52,6
Brekktunnelen lysrør 7. januar 2013	48,5
Brekktunnelen LED 3. april 2013	59,0

Tabell 2 Evaluering av ubehagsblending, sammenligning av installasjoner i indre sone

Det kan bemerkes at måltallene i

stemmer godt overens med den subjektive oppfattelsen av ubehagsblending, men det er for lite datagrunnlag til å utlede en eventuell grenseverdi for blending. Lysørinstallasjonen er den installasjonen som oppleves som minst blendende, mens den nye LED-installasjonen i Brekk-tunnelen oppleves som mer blendende enn den tidligere lysørinstallasjonen. Det bemerkes i denne sammenheng at maks observert luminans fra LED-armaturen er avhengig av lyskildens synlige areal, slik at denne er vanskelig å gjøre noe med når armaturene er installert. Ved prosjektering må en optimalisering av jevnhet og avstand mellom armaturer vurderes opp mot blending.

Forholdstallet mot bakgrunns luminansen er en direkte faktor i denne utregningen. I tillegg til veibaneluminansen består denne i stor grad av vegger og tak. Lysere vegger og tak gir mer reflektert lys og «bedre» forholdstall for opplevd ubehagsblending oppnås. I Brekk-tunnelen vil for eksempel forholdstallet L_{max}/L_{adap} senkes fra 59 til 53,6 ved en økning av refleksjonsfaktor på veggene med 10 %.

I rapporten er det per desember 2015 kun medtatt målinger fra én tunnel med LED-belysning i innkjøringssonen. Den samme prosedyren for registrering av ubehagsblending er blitt benyttet her, ved en oppgradering fra høytrykksnatriumbelysning til LED-belysning.

Avstand fra portal [m]	NaH L_{max}/L_{adap}	LED L_{max}/L_{adap}
20	27	23
15	39	32
10	49	51
5	49	71
Ved portal	41	88

Tabell 3 Evaluering av ubehagsblending i innkjøringssonen i Brekk tunnelen

Som Tabell 3 viser er det ikke kun den subjektive oppfattelsen som er årsak til at man opplever mer blending fra LED-installasjonen enn den tidligere høytrykksnatriuminstallasjonen. Når man kommer til portalåpningen er det for LED-installasjonen et forholdstall som er dobbelt så høyt som for NaH-installasjonen. På måletidspunktet for LED-installasjonen var noe vått veidekke og derfor mørk asfalt. Dette kan ha medført en noe lavere målt bakgrunns luminans enn reelt og som har en direkte påvirkning på dette forholdstallet.

4.3.2 **Synsnedsettende blending**

Formelen for TI er bygget opp slik at for hver posisjon som ønskes evaluert, må det gjøres en måling av vertikal illuminans i plan med øyets synsretning (L_{veil}) samt en måling av vinkel mellom synsretning og den blendende lyskilden. Dette må gjennomføres for hver enkelt armatur med de resterende armaturene satt ut av drift, til man underskriver et 2 % bidrag til totalen. Videre inngår også bakgrunns luminansen $L_{adap}^{0,8}$.

Formel 1 Definisjon av TI (Threshold Increment)

$$TI = \frac{65}{L_{adap}^{0,8}} \times L_{veil}$$

Som en grov forenkling, men igjen for sammenligning, er vinkel mot blendende lyskilde satt til 30° for hele beregningen i denne rapporten. Det er kun gjort én måling av vertikal luminans for hver posisjon. Verdiene under er derav basert på formelen for TI, men med en vesentlig forenkling av prosedyre for fastsettelse av TI.

	Brekk lysrør 7.1.2013 TI [%]	Brekk LED 3.4.2013 TI [%]	Prestura LED 5.2.2013 TI [%]
Posisjon 2.1	6	7	3
Posisjon 2.2	3	8	4
Posisjon 2.3	4	9	7
Posisjon 2.4	6	10	9
Posisjon 2.5	8	12	12
Posisjon 2.6	9	14	15
Posisjon 2.7	8	13	18
Posisjon 2.8	5	11	17
Posisjon 2.9	-	7	12

Tabell 4 Evaluering av synsnedsettende blending, sammenligning av installasjoner i indre sone

4.3.3 Lysspredning i støv

Blending kan også påvirkes av partikler i luften som sprer lyset på en annen måte enn hva overflatene bidrar til. En slik spredning omtales gjerne med det engelske begrepet «scattering», den er vanskelig å kvantifisere, men kan tydelig oppleves. Det er noe av samme effekten som kan oppleves ved tåke, hvor belysningen blir fysisk spredd i luften (tåken) og danner et slør for synet. Dette både setter ned observasjonsavstanden samt bidrar til en økning av den synsnedsettende blendingen.

4.3.4 Diskusjon

Ut fra det overstående er det ikke noen tvil om at den «gamle» løsningen med lysrør i indre sone er mindre blendende. Både med tanke på ubehag og synsnedsettende blending gir bruk av lysrør de klart beste resultatene. Nå må det samtidig bemerkes at hvis LED armaturer hadde blitt installert med samme avstand som lysrør kunne de hatt mindre installert lysfluks og derav kommet bedre ut. Men en av fordelene som utnyttes med LED er muligheten for å øke avstand mellom armaturene for å kunne redusere antallet. Så noe av årsaken til forskjellen er at LED anleggene kan klare jevnhetskravet til luminans på vegdekket med vesentlig større avstand mellom armaturene enn ved tradisjonelle anlegg, dermed blir det en situasjon som gjør at TI kravet blir det dimensjonerende. Noe som da også blir et kostnadsspørsmål, jo færre armaturer jo enklere og billigere anlegg blir det både ved installasjon og drift/vedlikehold.

Når det gjelder LED og de to leverandørene kan det være interessant å merke seg at rangeringen mellom de to endrer seg for de to forskjellige evalueringsmetodene. Det anlegget som oppleves minst blendende (Presturatunnelen) har de beste resultatene når det gjelder ubehagsblending, men den har de dårligste resultatene hva gjelder synsnedsettende blending. Det er også verdt å bemerke at beregningene av synsnedsettende blending er lineært avhengig av belysningsnivået. Ved måling var belysningsnivået i Brekk-tunnelen tilnærmet det dobbelte av nivået i Presturatunnelen, noe som skulle tilsi at anlegget i Brekk-tunnelen ville, ved tilsvarende belysningsnivå, kommet enda bedre ut.

For belysningen i innkjøringssonen er det ikke like lett å gi noen klar sammenligning av blendingen. Ved valg av motlysprinsippet (lysarmaturer med asymmetrisk optikk som sender mer lys i retning mot fører enn fra, for å skape negativ kontrast for eventuelle objekter mot veibanen) er det klart at både opplevelsen av og den reelle blendingen er høyere enn for symmetrisk belysning, noe som er en prioriteringssak med tanke på synbarhet og økonomi ved lavere lysnivå. Det vil derfor være hensiktsmessig å velge motlysprinsippet i de fleste tilfeller som da også er anbefalingen i håndbok V124.

I forhold til opplevd blending er det også verdt å merke seg at jo lysere bakgrunn og omgivelser jo mindre vil den opplevde blendingen være. Så den planlagte revideringen av N500 med innføring av likt belysningsnivå på veggene som vegen, vil også være med på å dempe oppfattelsen av blending.

Når det gjelder dette temaet er det et pågående nordisk samarbeid. Målinger fra denne rapporten benyttes inn i dette samarbeidet men det vil ikke trekkes konklusjoner eller anbefalinger før resultater foreligger fra det nordiske samarbeidet.

4.4 INNKJØSPRIS KONTRA LEVETIDSKOSTANDER

Det er mange prosjektspesifikke valg som må gjøres før man kan gjøre en fullstendig kalkyle av levetidskostnader og utfallet vil derfor variere fra anlegg til anlegg. Derfor er det ikke gjort en slik kalkyle i denne rapporten, men noen betraktninger rundt sentrale problemstillinger.

Et longlife-lysrør for en standard lysrørinstallasjon kan ha en forventet levetid på 60 000–70 000 timer, mens LED-anlegg typisk leveres med en angitt levetid på 50 000–100 000 timer. I praksis har man for indre sone en driftstid lik 8760 timer per år, så det er her snakk om 6-12 år levetid for LED-anlegget. Begge typer utstyr har i dag elektronisk forkobling/driver så det er en rimelig antakelse at elektronikken i armaturene kan være en like stor begrensning på levetiden som selve lyskilden. Man ser fortsatt i markedet (desember 2015) en høyere innkjøpspris for LED, så hvis LED skal komme gunstig ut, må det være andre momenter enn innkjøpspris som evalueres. Mulighet for styring er en av de mest tungtveiende og avgjørende argumenter for at LED skal foretrekkes. Velges styring bort og man benytter kun tenning/slukking er det få argumenter, bortsett fra lyskvalitet og eventuelt energieffektivitet, som kan avgjøre en evaluering til fordel for bruk av LED i indre sone av en tunnel.

4.5 ANBEFALING LED I TUNNEL

I løpet av prosjektperioden har det vært en (betydelig?) modning av LED-produkter for tunnel. Det er en stadig forbedring i kvaliteten og det er i dag ingen begrensning på bruk av LED i indre sone. Likevel er LED fortsatt dyrere i innkjøp sammenlignet med lysrørinstallasjoner. Når teknologi skal velges, må det uansett gjøres en LCC- analyse basert på alle prosjektspesifikke faktorer. I noen tilfeller kan det være avgjørende hvor lang levetid leverandøren kan garantere for LED-installasjonen og hvilken kostnad man legger inn som stengekostnad for tunnel ved vedlikehold. Ved bruk av longlife-lysrør er det ikke en vesentlig forskjell på garantert levetid mellom teknologiene.

Opplevd blending vil være mer utfordrende ved LED enn lysrørinstallasjoner, men den beregnede andelen synsnedsettende blending kan tilfredsstilles like godt eller bedre med et LED-anlegg. Likevel kan TI-kravet være dimensjonerende for armaturavstand i indre sone og dette er en problemstilling man bør være oppmerksom ved evaluering og sammenligning av LED-installasjoner til tunnelbelysning. Inntil de internasjonale standardene tar inn en ny evalueringsmetode bedre tilpasset LED lyskilden må en forhold seg til TI slik den er i dag. Men for å øke oppmerksomheten og forståelsen rundt sammenhengene som er nevnt i diskusjons kapittelet over anbefales det å ta inn en orienterende tekst i håndbok V124.

For å minske opplevelsen av blending er lysheten på tunnelrommet viktig, jo lysere vegger og opprettholdt vedlikehold av flater jo bedre visuell komfort vil skapes. Med en gjennomsnittlig høyere indeks for ubehagsblending for LED enn tradisjonelle installasjoner er dette enda et argument for innføring av skjerpete krav til lysere vegger/belysning av vegger.

Ved anskaffelse av LED anlegg for tunnelbelysning bør det som et minimum inkludere en funksjon som sikrer «konstant lys output» slik at man unngår statisk overdimensjonering i forhold til lystilbakegang. Samtidig bør det også alltid gjøres en LCC vurdering i forhold til anskaffelse av et styresystem for belysningen.

Fordeler ved bruk av LED:

- Bedre tilpasset bruk i et anlegg med styring, umiddelbart nominelt lysutbytte ved påslag av spenning og lineært forhold mellom energiforbruk og lysutbytte (energieffektivt ved dimming).
- Lengre levetid for armatur med lyskilde enn tradisjonelle lyskilde alternativer i innkjøringszone
- Større mulighet for detaljtilpasning av installasjon
- Stadig bedre forholdstall for lumen/watt sammenlignet med tradisjonelle løsninger (nesten utelukkende for LED-teknologi det gjøres forbedringer)
- Høyere energieffektivitet for belysningsinstallasjon i de fleste tilfeller

Ulemper ved bruk av LED:

- Opplevd blending er sterkere for LED enn tradisjonelle installasjoner
- Kvalitet må spesifiseres mer nøyaktig da tilbudene kan variere mer og er mer sammensatt enn for tradisjonelle produkter benyttet til tunnelbelysning
- Fortsatt høyere innkjøpskostnad for armaturer enn for tradisjonelle anlegg

5

Lysstyring i tunneler

5.1 ERFARINGER OG KJENT KUNNSKAP

5.1.1 Erfaringer fra region nord 2000–2014

Med så mange tunneler som en har i Norge, er det en stor andel som har lav årsdøgntrafikk (ÅDT). I tillegg er det også eksempler på tunneler hvor det er meget markerte tidsperioder hvor den daglige trafikken forekommer og det er lite eller ingen trafikk store deler av døgnet (for eksempel veistrekninger som ender i ferjekai uten avganger på natten). I Statens Vegvesen region nord har man lang erfaring med å benytte radarstyring av belysning i enkelte slike tunneler. En av disse er Eiavatntunnelen på FV 613 i Nordland. Her er det nedfrest induktive sløyfer i vegen ca. 50 m før tunnelportal for deteksjon, hvorpå belysningen i tunnelen blir tent. Et slikt system er avhengig av lyskilder med tilnærmet umiddelbar tenning og kort tid før tilnærmet fullt lysutbytte. I Eiavatntunnelen er det benyttet induksjonslamper, som er en teknologi som tilfredsstiller dette. Etter gjennomføring av dette prosjektet har LED kommet på markedet og er i dag det beste alternativet for deteksjonsstyrt belysning. Energisparepotensialet for slike systemer er avhengig av mengden trafikk over døgnet og fordelingen av denne. Man må i hvert tilfelle komme frem til en riktig måte å styre lyset på, om det kun skal tennes/slukkes eller eventuelt neddimmes i perioder uten detektert trafikk. En av erfaringene fra region nord er at det viser seg generelt å være mer trafikk og mer spredning over døgnet enn antatt, slik at besparelsene ble lavere enn ventet.

5.1.2 Erfaringer fra Sokna–Ørgenvika 2012–2014

Prosjektet Sokna–Ørgenvika med tre tunneler har hatt fokus på riktige og gode belysningsinstallasjoner fra starten og gjennom hele prosessen mot idriftsettelse. Derfor har det vært interessant å trekke ut de erfaringene som er gjort i forbindelse med styring av tunnelbelysning. Det ble valgt LED-armaturer i indre sone og standard høytrykksnatrium i innkjøringssonene. Et eget styresystem for tunnelbelysning ble anskaffet igjennom egen forespørsel for «Belysningsutstyr for tunnel». Dette systemet inkluderer innlesing av målesignal fra luminanskamera for hver portal, kontaktstyring av trinn for innkjøringssonene («skumring», «dag1» og «dag2») samt mulighet for dynamisk dimming av LED-armaturene, hvor det også her er valgt å benytte tre trinn («dag», «kveld» og «natt»).

Erfaringen så langt er at idriftsettelsen var krevende med tanke på å få systemet opp til den standard og funksjonalitet som var beskrevet. Dette kan trolig skyldes at bransjen ikke har vært vant til behovsstyring av tunnelbelysning og at det slik sett har vært uvant for leverandører å forholde seg til dette. Armaturer blir ofte levert av rene armatur-leverandører, men i dette tilfellet leverte de også styresystemet (i motsetning til at styring blir levert av installatør/entreprenør). Det kan ut fra dette ses som viktig å beskrive et tydelig ansvarsforhold for armaturleverandør hva gjelder idriftsettelse av styringssystemet. Det er også behov for et tidlig avklaringsmøte hva gjelder virkemåte og funksjonsbeskrivelse, slik at disse avklaringer og eventuelt oppklaringer ikke blir utsatt til etter levering av utstyr. Dette kan ses på som nødvendig inntil slik styring for tunnelbelysning har gjennomgått en modningsfase.

Det bør benyttes luminanskamera for styring av innkjøringssonebelysning ettersom belysning i innkjøringssonene skal dimensjoneres som en direkte andel av adaptasjonsluminansen utenfor

tunnelen. I dagens krav i vegvesenets håndbøker er det kun gitt krav til luxverdier for innkobling av trinnene: «Dag2», 9000 lux; «dag1», 5000 lux; «skumring», 1500 lux. I tunnelene på Sokna ble denne innkoblingen valgt: «Dag2», 1500 cd/m²; «dag1», 150 cd/m²; «skumring», 20 cd/m². Dette synes å være et godt valg med tanke på synsforholdene ved innkjøring i tunnel. Spesielt i overgangen dag–natt og natt–dag er det viktig at tidspunktene for trinning er mest mulig korrekte da det vil ha stor innvirkning på energiforbruket og trafiksikkerheten.

For sistnevnte er det spesielt viktig å sikre at innkjøringsbelysningen ikke blir stående på i perioder hvor det ikke er nødvendig ut fra dimensjoneringskriteriene.

5.1.3 Erfaringer fra Brekktunnelen 2012–2014

Både Brekktunnelen og tunnelene på strekningen Sokna–Ørgenvika har samme leverandør av belysningsutstyr og styringssystem men også samme systemintegratør. Dette vil si at erfaringene, som er nevnt over, i stor grad også gjelder for Brekktunnelen. Nå var det langt større utfordringer for integratøren for prosjektet i Brekktunnelen, da denne var benyttet som testprosjekt.

5.1.4 Resultater fra studentoppgave ved NTNU i 2014

Magnus Guntvedt Brevik gjennomførte våren 2014 et fordypningsprosjekt ved NTNU med tittel «Lyskvalitet og energisparing i tunneler med trinnløs trafikkstyrt LED-belysning». Han benyttet grunnlagstall fra Brekktunnelen for blant annet å se på sparepotensialet ved installering av radarstyring. I Brekktunnelen er dette testet ut, riktignok er det kun installert detektering av inngående ikke utgående trafikk. Dessverre fikk studenten aldri tilgang på reelle trafikkdata fra denne tunnelen slik at kalkulasjoner av potensialer er basert på antatte trafikk mønstre. Likevel er det verdt å referere hans resultater som supplement til erfaringer referert/drøftet i kapittel 5.1.1.

Studenten har i sin oppgave konkludert med at man for Brekktunnelen kan redusere energiforbruket til belysningen med i overkant av 5 % ved å utnytte radardetekteringen. Settes dette opp mot investeringskostnadene vil det være vanskelig å forsvare merkostnad satt opp mot tilbakebetaling, men som ren energibesparelse sett utfra miljøhensyn er dette et godt resultat. Om det i tillegg også hadde vært detektert utgående trafikk, slik at man kunne skrudd av belysningen til kortere driftsperiode per bil, ville den teoretiske besparelsespotensialet økt til ca. 6,5 %.

Prosjektoppgave viser at potensialet for besparelser ved trafikkstyring i en tunnel med ÅDT>10.000 blir marginal.

5.2 DISKUSJON

5.2.1 Kost/nytte ved styresystemer

Det kan settes spørsmåltegn ved hva man oppnår med avansert styring i forhold til en ren kost/nytte betraktning ved enkle tunnelbelysningsanlegg, spesielt for anlegg som i utgangspunktet har et lavt dimensjoneringskrav for belysningsnivåer. Det er ikke tvil om at man også ved lave installerte effekter vil kunne oppnå en relativt sett høyenergibesparelse samt en mer korrekt belysning til enhver tid – spørsmålet vil være om det vil lønne seg rent økonomisk. Med bakgrunn i dette bør man være forsiktig ved utforming av retningslinjer og føringer som ikke er klart differensiert for forskjellige trafikkmengder. Det kan være naturlig å se for seg forskjellige krav for lav- og høytrafikkerte tunneler.

Uansett system og valg av styringsnivå vil funksjonen for konstant «lumen output» gjennom levetiden ved bruk av LED være riktig å inkludere. Dette er en innebygget funksjon i driveren som basert på kjennskap til lyskildens lystilbakegang over levetiden kan dimme noe ned i starten av levetiden for

så å kontrollert øke den elektriske effekten for å motvirke lyskildens tilbakegang. På denne måten kompenserer man for vedlikeholds faktorens andel av lystilbakegangen.

Anbefaling:

Det bør ikke settes krav om toveiskommuniserende belyningsanlegg for alle tunneler. Men det bør derimot gis føringer på lik linje som for veglysanlegg at styring alltid skal vurderes ved bygging/rehabilitering og dokumenteres med en LCC analyse. Ved implementering av et styresystem for tunnelbelysning bør det etterstrebtes å kunne variere statisk nivå på lysmengde ut av armatur tilpasset hvor lenge det er siden rengjøring av armatur.

5.2.2 *Innslagspunkt for styretrinn for innkjøringszone*

Et potensiale innen tunnelbelysning, som til nå ikke har vært utnyttet, er å trinnløst styre innkjøringssonens luminansnivåer relativt til adaptasjonsluminansen. Dagens nivå styres oftest i tre trinn fra lite til mye belysning: «skumring», «dag1» og «dag2». Når det kraftigste lystrinnet ofte settes inn på et relativt lavt nivå, men er dimensjonert i henhold til de verst tenkelige forholdene, vil belysningen i lange perioder ha et høyere nivå enn nødvendig. På Figur 15 ser man et eksempel på en standard beskrivelse av krav til belysning av innkjøringssoner. Av figuren kan det leses at med styring av belysningen i trinn vil man ikke kunne utnytte en god tilpasning og optimalisering av energibesparelse til enhver tid.

En antakelse som ikke er etterprøvd i dette prosjektet er at man på en bedre måte kan distribuere tenningspunktene for disse trinnene og utnytte «dag2-trinnet» som et makstrinn med «dag1» som det normale, uten at dette vil gå utover trafikksikkerheten. På denne måten kan man ved fortsatt å benytte trinnstyrt innkjøringsbelysning likevel senke energiforbruket betraktelig.

Hvor stor prosentvis energibesparelse dette vil bety, kommer mye an på tunnelens lengde (fordeling mellom energiforbruk til innkjøring og indre sone) samt nivå for adaptasjonsluminans.

Anbefaling

Det bør angis i håndbok V124 hvordan trinnene for innkjøringszone skal styres. Dimensjoneringen for høyeste trinn bør gjøres slik at trinnet fungerer som et makstrinn og ikke som et trinn som kontinuerlig står på ved skyfri himmel og sol. Detaljer for hvordan dette bør spesifiseres er ikke behandlet utover anbefaling gitt i tabell i kapittel 8.2.2

5.2.3 *Prosedyre for fastsettelse av adaptasjonsluminans*

Håndbok V124s «L₂₀»-metode for fastsettelse av adaptasjonsluminans baseres på for mange subjektive skaleringsmuligheter, slik at repeterbarheten av et resultat blir for usikker. Prosedyren bør utformes mer repeterbar, enten ved en forenkling av metoden (angivelse av tabellverdier) eller ved en ytterligere presisering av fremgangsmåte og skaleringsfaktorer slik at subjektive vurderinger får mindre utslag.

Det foreslås å utforme tabell 9.2 i håndbok V124 på nytt med en tabell hver for vinter- og sommerforhold. Videre at det suppleres med en punktliste for hvordan prosedyren skal utføres.

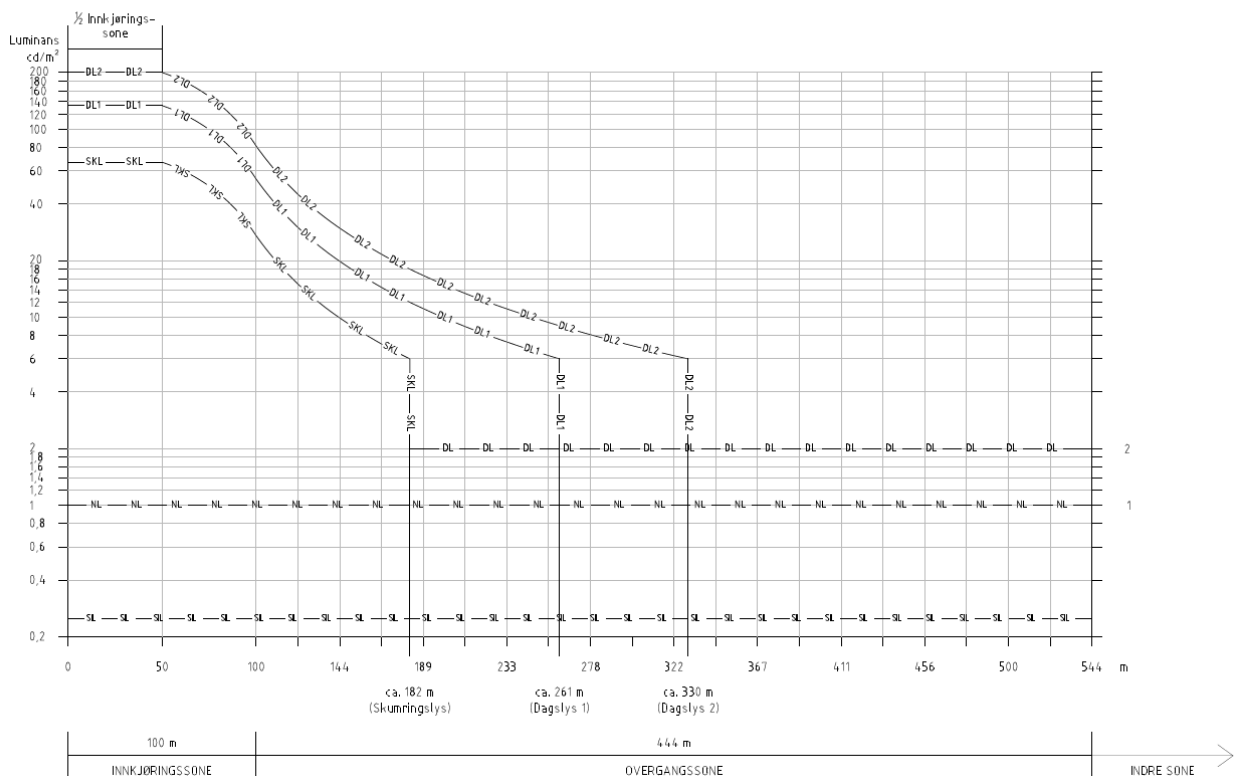
Anbefaling:

Som dokumentasjon for fastsettelse av L20 adaptasjonsluminans skal det før bygging/rehabilitering av et tunnelbelysningsanlegg alltid gjøres en faglig basert vurdering av de dimensjonerende verste forhold for den enkelte portal. Som en tidlig antakelse i prosjekteringsfase kan tabell 9.3 i håndbok V124 benyttes for antydning. Basis for denne tabellen er at det tas få dimensjonerende antakelser, så for å dekke alle situasjoner vil den i de fleste tilfeller lede til for høy dimensjonerende adaptasjonsluminans. Derfor bør man alltid så nær som mulig opp mot ferdigstilling gjøres et mer nøyaktig beregning av denne.

Denne prosedyren bør basere seg på en evaluering mest mulig lik de faktiske forhold for ferdig tunnel. Dette fordi både vegdekke, omgivelser og eventuelt portalmur osv vil ha innvirkning på den endelige adaptasjonsluminansen. Det skal gjøres en vurdering hver for «verste forhold» både sommer og vinter. Dokumentasjon for antakelser skal omfatte

- oppdeling av synsfeltets 20 graders sektor kategorisert i ulike typer flater
- omtale hver enkelt type flate for seg i forhold til antatt verste forhold sommer og vinter
- kommentere eventuelle mulige tiltak eller variasjon i løpet av driftstiden

En mulighet for angivelse av hver flatekategoris verste forhold er å benytte tabellene i håndbok V124. En mer nøyaktig angivelse oppnås ved reell luminansmåling som kan skaleres i forhold til solhøyde/horisontale-/vertikale illuminansverdier fra solen.



Figur 15 Eksempel på angivelse av krav til innkjøringszone

5.2.4 Tenning av belysning ved deteksjon av tilstedeværelse

Det er unødvendig å belyse lavtrafikkerte tunneler døgnet rundt når de i lange perioder ikke har trafikk. For eksempel finnes det tunneler i Norge på veier som ender på fergekaier som ikke har fergeavganger fra sent på kvelden til tidlig om morgenen. I denne tidsperioden vil det være minimal trafikk og en detektering av tilstedeværelse ville kunne slukket eller dempet belysningen i lange perioder, uten konsekvens for sikkerheten eller opplevelsen av trygghet.

Anbefaling:

Belysningen må tennes når avstanden mellom kjøretøy og tunnelportal tilsvarer kritisk stoppavstand for tunnel (definert av tabell 9.1 i håndbok V124). Basert på at både styresignal og forskjellige teknologiers indre oppstartsmodus (tidsforløp fra signal om å tenne før fullt lysutbytte) har en viss forsinkelse vil man måtte tilpasse styringen med tanke på dette, slik at man er sikker på at belysningen er tent når en bil passerer kritisk stoppavstand. Ved å benytte LED anbefales det å minimum kreve en distanse tilsvarende 1 sekund kjøretid i forkant av kritisk stoppavstand (tilpasses styresystemets og lyskildens responstid). Basert på dette er tabell i kapittel 8.2.1 utarbeidet.

6 Lyse tunnelvegger

Det er liten tvil om at lysere overflater i en tunnel gir mer reflektert lys på veggen, men å finne den riktige overflatebehandlingen er ikke like enkelt. Refleksjonsegenskapene skal opprettholdes best mulig over tid med nedsmussing (hefteevne for smuss og støv) samt være holdbare ved vask. De lysere overflatene kan også gi mer nytte utover bidraget til høyere veggluminans. Forandringen av bakgrunns luminansen, som objekter i en tunnel observeres mot, endrer hele oppfattelsen av en situasjon. Dette er bakgrunnen for å innføre krav til belysningsnivået og/eller luminansnivået på veggene. Et generelt lysere tunnelrom antas også å ha positive effekter for de som lider av tunnelangst.

6.1 ERFARINGER OG KJENT KUNNSKAP

6.1.1 Overflater i tunnel

Fram til nå har det *kun* vært satt krav til luminansnivå på vegdekket. I teorien har det vært såpass ensidig at det i beregninger av belysning ikke har vært tillatt å inkludere andelen av reflektert og interreflektert belysning fra veggen og ned på vegdekket. Dette har ført til at man har hatt veldig liten fokus på materialenes lystekniske egenskaper ved valg av materiale til vegger og tak.

Spesielt for å reflektere mer av lyset, men også for å øke det estetiske inntrykket av tunnelen, har man de seneste årene sett et stadig økende fokus på å gjøre tunnelrommet lysere, utover kun vegdekket.



Figur 16 Eksempel på lyse veggelementer/hvitmalte vegger i tunnel (statens vegvesen, 2011)

I tråd med anbefalingene i CENs tekniske rapport om tunnelbelysning «CEN-CR-14380 2013» har krav til vertikale belysningsstyrker i opp til 1,5–2 m høyde blitt innført i enkelte europeiske land. Også innlemmelse av reflektert og interreflektert bidrag til luminansnivået på vegbanen i de internasjonale standardene (derav også i lysberegningsprogrammene), har ført til mer fokus på temaet.

Italia har et krav om at veggene skal ha minimum 60 % av luminansen til vegdekket for å «*assure safety in a hostile environment*» og dette ble innført allerede i 2003 (UNI, 2003). Dette kravet er også planlagt innført i Norge, men da med et krav om at veggene skal ha en luminans tilsvarende 2/3 av vegbanens luminans opp til 3 meter.

Dette vil følgelig sette nye krav til hvordan optikken til lysarmaturer for tunnel skal distribuere lyset samt til hvordan vegger behandles og vedlikeholdes. Det har i denne forbindelsen blitt gjennomført eksperimenter med spesialarmaturer som primært lyser opp vegger og tak (se Figur 17), men dette prosjektet har ikke vært involvert i det arbeidet.



Figur 17 Eksempel på opplyste vegger og tak i innkjøringssonen

I den amerikanske ANSI RP 22 er det for vegger satt et krav til maksimal gjennomsnittlig forholdstall mellom vegg og vegbane luminans lik 2,5. Videre er det i tilfeller hvor man ikke kjenner veggens luminans angitt en konverteringsformel mellom belysningsnivå og luminansnivå hvor man antar ideelt diffuse overflater. En forenkling men likevel en tilnærming som muligens er lettere å innføre, enn en mer korrekt, men da, mer avansert oppbygd fremgangsmåte.

6.1.2 Oppmerksomhetsobjekter

Tunnelskrek og generell angst mot å kjøre i tunneler er et reelt problem for mange. Spesielt i lengre tunneler kan monotonien også føre til uoppmerksomhet og trøtthet. Med bakgrunn i dette har det blitt eksperimentert med å introdusere oppmerksomhetsobjekter for å bryte opp monotonien. I denne sammenhengen er det også interessant å se den bevisste bruken av blått lys for å motvirke tretthet. Forskning viser at eksponering for blått lys hemmer produksjonen av hormonet melatonin og dermed motvirker kroppens tretthetsfølelse (Bizjak & Matej, 2011).

Det finnes ekstreme varianter fra Asia som vist i Figur 18. Også i Norge har man blitt stadig mer opptatt av dette temaet. Spesielt i lengre tunneler og/eller undersjøiske tunneler er slike virkemidler allerede tatt i bruk (se eksempel i Figur 19).



Figur 18 Ekstreme eksempler på bruk av kunstlys i tunneler



Figur 19 Foto av kunstlys i Lærdalstunnelen

I et prosjekt ved svenske VTI ble det sett nærmere på sammenhengen mellom tunnelutforming og lys i forhold til førerens oppmerksomhet i trafikken (Katja Kircher, Christer Ahlstrom «The impact of tunnel design and lighting on the performance of attentive and visually distracted drivers», publisert i Accident analysis and prevention 47 (2012) s 153-161). Der blir det konkludert med at lyse vegger er viktigere enn sterk belysning for å holde førerens oppmerksomhet fremover. I denne sammenheng er det også verdt å merke seg at forskerne peker på oppmerksomhet som mer viktig for trafiksikkerheten i en tunnel enn objektoppdagelsen av fremmedlegemer som jo er basis for krav til prosjektering, men funnene gjelder vel og merke mest for lange monotone tunneler.

6.2 FORSØK

6.2.1 Damsgårdtunnelen

Det har blitt sett på hvitting av vegger i Damsgårdtunnelen i Bergen, hvor refleksjonsfaktor før og etter behandling ble målt. Registrering viste nesten en tredobling av refleksjonsfaktoren, som vist i tabellen under.

	Før vask	Etter vask og hvitting
Refleksjonsfaktor [ρ]	0,25	0,67

Tabell 5 Refleksjonsverdi før og etter vask og hvitting i Damsgårdtunnelen

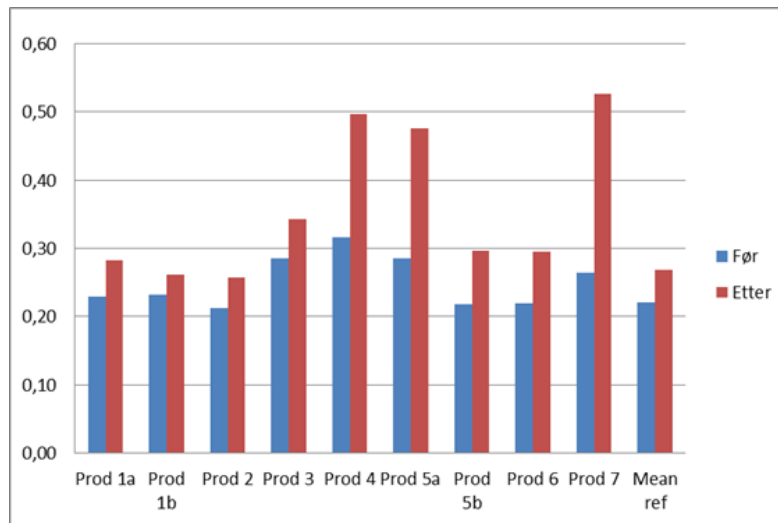
Tilsvarende forsøk er også igangsatt i Være- og Stavsjøfjelltunnelen i Trondheim, men forsøkene er ennå ikke analysert. Tunnelene skal følges opp over tid for bedre datagrunnlag.

Prosjektet har ikke gjort en tilsvarende undersøkelse av nedsmussede veggens bidrag til veibaneluminansen. Reflektert lys fra vegger vil gi et bidrag til lyset på vegbanen, men hovedpoenget vil være å bedre tunnelens optiske føring og veggens synbarhet ved en økning av kontrasten mot vegbanen. I den grad man skal oppdage fremmedelementer i tunnelen over en viss høyde, vil veggene danne bakgrunn som det fremmedelementet ses mot. Dette er grunnen til at man ønsker å innføre krav til belysning av vegger og resulterende luminans. For å oppnå dette uten å rette mer av vegbanens belysning mot veggene må man sørge for å ha vesentlig lysere vegger enn vegdekket, altså ved å overflatebehandle betong og spesielt ubehandlet fjell.

6.2.2 Askimportunnelen

Det har i prosjektperioden blitt gjennomført registreringer av refleksjonsfaktor fra veggelementer i forskjellige tunneler. I Askimporten ble det høsten 2010 opprettet et forsøksfelt for test av forskjellige typer overflatebehandling av betongelementer, med hovedfokus på betongens bestandighet over tid. Bakgrunnen for prosjektet var at det ved igangsettelse ikke fantes krav om overflatebehandling av betongelementer i tunneler (VD-rapport 16 – Askimporten tunnel – 2011).

Ved en senere evalueringsrunde i tunnelene ble også lystekniske egenskaper innlemmet, og en del av prosjektet er omtalt i denne rapporten. Målingene viste stor variasjon mellom de forskjellige produktene. Gjennomføring av målingene ble gjort før og etter vask våren 2014 og viste fortsatt en stor forbedring etter vask for de beste produktene. Det var en vesentlig mindre forskjell for ubehandlet betong. Men det er også verdt å merke seg at differansen mellom produktene før vask i dette tilfellet var mindre enn etter vask.



Figur 20 Refleksjonsfaktor før og etter vask i Askimporten tunnel



Figur 21 Bilde av forsøksfelt i Askimporten tunnel

6.2.3 Væretunnelen

Måleverdier av refleksjonsfaktor som ble gjort før og etter hvitting av vegger var mislykket (feilregistrering), men samtidig registrering av belyningsnivå i rutenett mellom 2 armaturer viser en økning fra 67 til 85 lux. Men i lux-målingen inngår både vask av tunnelrom inkludert armaturer også, så entydige verdier for tiltaket på veggene finnes ikke. Men det visuelle inntrykket kan ses på bildene vedlagt i kapittel 3.8.

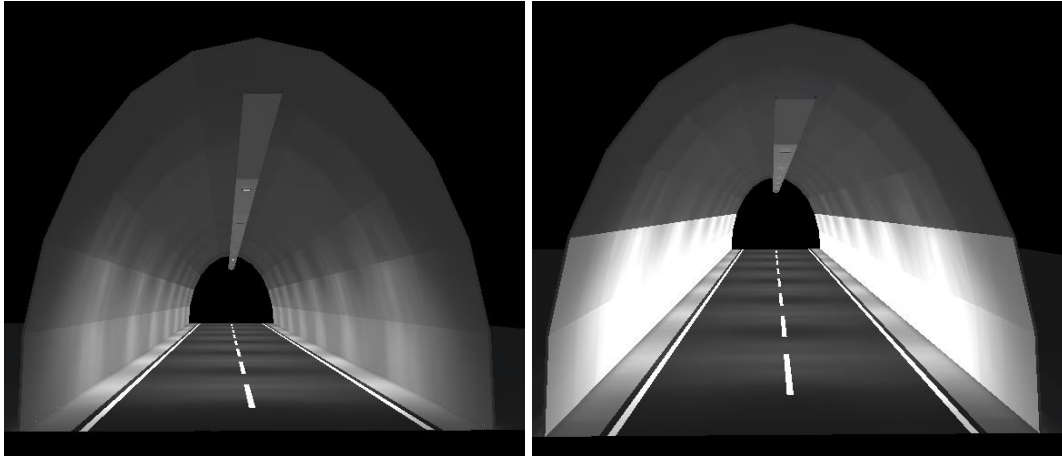
6.3 DISKUSJON

Bør det være krav om opprettholdt luminans til enhver tid på veggene eller krav til belyningsnivå?

Tilbakegangen på refleksjonsverdier er raskere for vegger enn vegbanen dvs et statisk krav for prosjektering risikerer å forandre seg mye i løpet av et år eller livstiden. Luminansnivå kan i enkelte tilfeller halveres i løpet av et år.

Hvis en benytter Askimporten som eksempel og antar lysfordelingen til en typisk LED armatur levert i norske tunneler og et krav om 1 cd/m² på vegen og likt nivå på veggene får man ved en enkel beregning at man trenger opprettholdt ca 27 % refleksjon på veggene for å klare tilsvarende luminans på veggens nederste 2 m. Ser man på dette sammen med refleksjoner målt i Askimporten i tabell under ser en at dette kravet er noe å strekke seg etter og kan ikke oppnås uten behandling av vegger.

For referanse har ubehandlet «ren» betongoverflate rundt 26-28 % refleksjon mens ved tilsmussing vil den fort gå under 25 %. For ubehandlet fjell er det mange faktorer som spiller inn men som en antakelse vil det ofte ligge under 15 % i refleksjonsfaktor.



Figur 22 Illustrasjon av hvitbehandlede vegger

Anbefaling:

Da nivå av luminans på vegger er vanskelig å entydig dokumentere bør et krav refereres til vertikalt belsningsnivå i sammenheng med type overflate mot/på vegger alternativt refleksjonsfaktor hvis det er tilgjengelig. En sammenheng med planlagt vedlikeholdsstrategi er også viktig å implementere for å vektlegge opprettholte nivåer.

Prosedyre angitt i ANSI RP 22 virker å være en fornuftig tilnærming for prosedyre. Hvis det for tilfeller hvor man ikke kjenner overflatenes refleksjonsfaktorer utarbeides for typiske overflater i norske tunneler antas dette å være en gjennomførbar prosedyre.

7 Tunnelvedlikehold

7.1 DAGENS VASKERUTINER I VEGVESENET

Krav til vaskerutiner for tunnel er gitt i håndbok 111 «Standard for drift og vedlikehold» fra 2003. Utfra definisjonene som er gjengitt i tabellene under vil vask av tunnelarmaturer utføres kun ved helvask av tunnel («helvask» omfatter hele tunnelrommet inkludert teknisk utstyr, halvvaske omfatter tunnelrommet til typisk 3 meter høyde). Det vil igjen si at uansett trafikkmengde vil kravet til vask av armaturer aldri overstige én gang per år.

ÅDT per tunnellop	Helvask inkl. vask av kjørebane/bankett	Halvvaske inkl. vask av kjørebane/bankett	Vegbane/bankett
> 20 000	1 per år	5 per år	6 per år
10 001–20 000	1 per år	3 per år	4 per år
5001–10 000	1 per år	1 per år	2 per år
1501–5000	1 per år	-	1 per år
501–1500	Hvert 5. år	-	1 per år
< 500	Hvert 10. år	-	1 per år

Tabell 6 Dagens minimumskrav til vaskerutiner, håndbok 111 – 2003

Helvask	Helvask omfatter hele tunnelprofilen inklusive tekniske innretninger, vegbane og skuldre
Halvvaske	Halvvaske omfatter tunnelveggene i en høyde av 3,5–4,0 m, vegbane, skuldre og tekniske installasjoner som naturlig inngår i arbeidsopplegget.
Bankett	Sideareal utenfor kantstripa. I tunnel kan denne være oppbygd

Tabell 7 Definisjoner av vaskerutiner, håndbok 111 – 2003

7.2 FORSØK

Det er foretatt en rekke målinger i Brekktunnelen, hvor nedsmussing av armaturer er studert. Målingene er gjentatt på samme sted ved forskjellige årstider for å se på den varierende grad av nedsmussingen relatert til årstid.

Periode	Måleperiode	Lysnedgang per måned
Høst	Oktober 2012–januar 2013	4,56 %

Vinter	Desember 2013–januar 2014	2,93 %
Vinter	Januar 2014–mars 2014	3,64 %
Vår/sommer	April 2014–juni 2014	1,01 %

Tabell 8 er utledet fra disse registreringene. Det gjøres oppmerksom på at renhold i dette tilfellet er utført manuelt for hånd og ikke med vanlig tunnelvedlikehold med spyling.

Periode	Måleperiode	Lysnedgang per måned
Høst	Oktober 2012–januar 2013	4,56 %
Vinter	Desember 2013–januar 2014	2,93 %
Vinter	Januar 2014–mars 2014	3,64 %
Vår/sommer	April 2014–juni 2014	1,01 %

Tabell 8 Gjennomsnittlig lysnedgang per måned i Brekktunnelen

Denne tunnelen har en vedlikeholdsstrategi som tilsier helvask én gang per år samt to halvvaske. Retningslinjer for halvvaske inkluderer egentlig ikke vask av armaturer, men dette blir praktisert i Brekktunnelen. Det må bemerkes at disse måleresultatene ikke kan tas som representative for alle norske tunneler, da både trafikkmengde, geografisk plassering i forhold til værforhold og brøyte-/saltestrategi vil ha stor innvirkning på disse tallene. Uansett sier registreringene mye om potensialet som ligger i bedre/hyppigere vask av tunnel.

7.3 DISKUSJON

Hvis vi benytter Brekktunnelen som utgangspunkt og antar utvikling av tilsmussingen i henhold til

Periode	Måleperiode	Lysnedgang per måned
Høst	Oktober 2012–januar 2013	4,56 %
Vinter	Desember 2013–januar 2014	2,93 %
Vinter	Januar 2014–mars 2014	3,64 %
Vår/sommer	April 2014–juni 2014	1,01 %

Tabell 8, vil ca. 30 % av lyset forsvinne i løpet av ett år, kun på grunn av nedsmussing av armaturer (dette basert på et overslag som antar 3 høstmåneder, 4 vintermåneder og 5 vår/sommer måneder)

Det vil si at man med et styresystem for LED årlig kan spare 15 % av den totale energien til belysning bare ved bruk av dimming i forhold til vedlikeholdsvask (LED beholder lysutbyttet ved dimming, i motsetning til de fleste tradisjonelle lyskilder hvor lysutbyttet avtar ved dimming). En vurdering av kost/nytte for et slikt tiltak må ses i sammenheng med vedlikeholdskostnad, energikostnad og grad av tilsmussing for hver enkelt tunnel. Dette viser likevel noe av potensialet ved bruk av et styresystem for belysningen, som regulerer etter en målt eller antatt tilsmussing av armaturene.

Bedre spesifisering av vaskerutiner er derfor viktig. Driftsentreprenøren sier på forespørsel at inkludering av vask av armatur, ved for eksempel halvvaske som utføres to ganger per år, vil medføre minimalt tilleggsarbeid for dem. I Brekktunnelen er armaturvask tatt med som en del av halvvaske rutinene, ettersom driftsoperatøren ser nytten av det økte vedlikeholdet (tunnelen ligger på en OPS-strekning). En tilleggsnytte ved hyppigere renhold av armaturene kan også være at holdbarheten øker, da mindre nedsmuss kan antas å bedre varmeavledningen og derav levetiden på lyskilden. Men det bemerkes at dette er kun en mulig effekt som ikke er verifisert i dette prosjektet, og som nevnt over at resultatene i dette prosjektet er funnet ved manuell håndvask ikke maskinell spyling.

Anbefaling:**Vaskerutiner**

Observasjoner har vist at nedsmussing av armaturer i en middels trafikkert tunnel er såpass stor at belyningsanleggets vedlikeholdsfaktor, som tar høyde for en 20 % lystilbakegang over levetiden, vil bli «oppbrukt» hvis man forholder seg til dagens minimumskrav til vaskerutiner. Et første steg ville vært å presisere en endring hvor man, som et minimumskrav, inkluderer armaturvask også ved halvvaske og poengterer at enhver økning av vaskefrekvens vil kunne gi en gevinst, både for energiforbruk og sikkerhet.

Styring av indre sone etter nedsmussing og livsløpsforløp

Å sette samlet vedlikeholdsfaktor lik 0,75 tilsier at tunneler i store tidsrom belyses mer enn kravene sier er nødvendig. Dersom man har dimmbare armaturer i indre sone, bør man utnytte muligheten til å styre armaturene med hensyn til lystilbakegangen over tid. Om dette gjøres med eller uten tilbakemelding (måling/registrering) avgjør hvor mye av potensialet som kan utnyttes, men som et minimum bør en 10-12 % energireduksjon være mulig.

Vedlikeholdsfaktor

Sett i sammenheng med lærdom i kapittel 6 og 7 bør det ses på en mulighet for å angi en mer dynamisk vedlikeholdsfaktor. Ved bruk av lyskilder som har en annen lystilbakegang over tid enn hva man tradisjonelt har vært vant med og hvis vedlikeholdsrutiner blir skjerpet, bør man kunne argumentere for en høyere vedlikeholdsfaktor for installasjonen. Uansett bør systemer for «constant light output» inkluderes i alle tunnel prosjekter hvor man benytter LED. Men det skal også gjøres oppmerksom på at grunnlaget for denne funksjonen må spesifiseres. Da drift av dioden avgjør forventet levetid må det forsikres at ikke en økning av driftstrøm for å opprettholde utsendt lysmengde går på bekostning av levetid for lyskilde. Altså at oppgitt levetid for produkt må inkludere driftstrøm over levetiden med CLO-funksjon.

8 Oppsummert lærdom fra delkapitlene

8.1 LED

LED-armaturer blir bedre og bedre i lysytelse, men er fortsatt dyre i innkjøp. Per dags dato ser det ikke ut til å være noen teknisk grunn til ikke å benytte LED-belysning i tunneler, men avgjørelsen bør i alle tilfeller baseres på en LCC-kalkyle. Samtidig bør man være bevisst på hvilke valg som gjøres ved fastsettelse av funksjonskrav og lystekniske krav. Angivelsen bør være detaljert nok til at man vet hva man får, men samtidig ikke så detaljert at man risikerer at installasjonen blir dyrere enn nødvendig.

8.2 LYSSTYRING

8.2.1 *Anbefalt avstand til portal for deteksjon ved lysstyring*

Fartsgrense [km/t]	Avstand til portal [m]
50	60
60	75
70	100
80	120
90	155
100	190
110	220

Tabell 9 Anbefalte avstander til portal for plassering av utstyr for detektering av tilstedeværelse

Hvis et tunnelbelysningsanlegg skal styres etter tilstedeværelse, bør det installeres utstyr for deteksjon av innkommende trafikk i en gitt avstand før portalen. Dette for å muliggjøre tenning av belysning tidlig nok til at sjåføren ikke oppfatter tunnelen som et mørkt hull. Denne tabellen baserer seg på en tilnærmet umiddelbar tenning av lyskildene, slik at ved eventuelle forsinkelser i tenningsprosessen, må det legges til avstand i henhold til gjeldende fartsgrense og den aktuelle forsinkelsen.

8.2.2 **Anbefalt angivelse av tenning av trinn i innkjøringssoner**

Trinnene angitt i tabell 13 viser en mulig anbefaling. En stedlig tilpasning og innjustering av anlegg for å finne de korrekte nivåer for hver tunnel vil være viktig for optimale installasjoner. Da med første fokus på trafiksikker styring, og dernest på optimalisering i forhold til energiforbruk. Det bør i størst mulig grad henvises til luminanskrav ikke belyningsnivå da øyet adapterer seg til det reflekterte og ikke det innfallende lyset.

	Dag 2	Dag 1	Skumring
Luxnivå (vertikalt mot portal)	9000 lux	5000 lux	1500 lux
Luminansnivå (L ₂₀)	1500 cd/m ²	150 cd/m ²	20 cd/m ²

Tabell 10 Anbefalt angivelse av tenning av trinn i innkjøringssoner

8.3 **LYSE TUNNELVEGGER**

Med innføring av krav til belysning av vegger opptil 2 m høyde i N500 bør det detaljeres en prosedyre i håndbok V124. Denne kan baseres på prosedyre angitt i ANSI RP-22.

8.4 **TUNNELVEDLIKEHOLD**

Krav til vaskerutiner bør innskjerpes og et første tiltak bør være et krav av om å inkludere armaturvask i rutinene for halvvaske. Ytterligere beskrivelse av vaskerutiner bør utarbeides og presiseres. Dette har teknisk/økonomiske fordeler samtidig som det hever trafiksikkerheten og sjåførens trygghetsfølelse.

Det bør åpnes for en endring av fastsettelse av vedlikeholdsfaktor ved prosjektering av tunnelbelysning. For full utnyttelse av potensialet som ligger i lysstyring og dimming, må formuleringene rundt vedlikeholdsfaktor revideres. Om mulig bør også en jamføring med vedlikehold og dimming i forhold til denne inkluderes for å hindre overbelysning av tunnel tidlig i levetiden til lyskilde og/eller en tid etter vask. Også nye systemer med innebygget konstant «lumen output» bør omtales i belyningsveilederen for tunneler.

9 Vedlegg 1 – LED ledelys/evakueringslys

9.1 ERFARINGER/KJENT KUNNSKAP

Ledelys er i prinsippet belysning montert i lav høyde ved siden av veibanen, som i stedet for å bidra til vegbaneluminansen, leder trafikanten ved å være slik montert at man oppfatter det som en visuell føring i tunnelrommet. Å benytte slik belysning, som erstatning for tradisjonell belysning i korte tunneler, hvor belysning kun er nødvendig for visuell føring, kan oppleves som et godt alternativ, men må ses på som unntak fra Vegvesenets nåværende regelverk. I forhold til orientering kan det også bidra til å lette posisjonering av bil i kjørebanelen. Bruk av ledelys kan også være et supplement i tunneler med lite trafikk, for å muliggjøre dimming til et lavt nivå av hovedbelysningen nattetid.

Bruk av ledelys har ikke vært en del av prosjektet; Det er derfor ikke gjennomført inngående analyser, men det ble i perioden gjennomført noen enkle forsøk som er summert under.

9.1.1 Forsøk i Rallerudtunnelen

I Rallerudtunnelen ble det 23. juni 2014 gjennomført et enkelt forsøk hvor ledelys var montert med dobbeltsidig tape på veggelementene i 1,5 m høyde. Det ble testet med 12,5 m og 25 m armaturavstand.

Som visuell føring i ubelyste tunneler var den subjektive opplevelsen at 25 m var tilstrekkelig for ønsket effekt. Med de benyttede armaturene ble det oppnådd en gjennomsnittlig luminans lik ca. 0,36 cd/m² og jevnhet rundt 0,1 på fortau på samme side som ledelysene. Ved armaturavstand redusert til 12,5 m økte verdiene henholdsvis til i underkant av 0,6 cd/m² og 0,4.

Det testede produktet hadde installert 60 lm med en maks lysintensitet i kjøreretning lik ca 30 cd ved drift som ledelys, med en mulighet for 110 lm og 90 cd for evakueringslysmodus. Som en referanse kan det nevnes at kravet til rømningslys setter et krav til 0,1 cd* innbyrdes armaturavstand. Altså minimum 2,5 cd ved 25 m avstand, dette er vel og merke opprettholdt nivå.

Utfordringen for slike installasjoner er vedlikehold, ettersom lystilbakegangen grunnet nedsmussing er meget høy, spesielt under vinterforhold. En faktor som i tillegg taler imot, er at nedsmussingen er størst i innkjøringene av tunneler, mens det er her den visuelle føringen vil være viktigst og ha størst effekt.

En annen observasjon i denne sammenheng, er at ledeeffekten blir mye større ved montering av ledelys på kjørebanelen med opplys mot vegg, siden man da opplyser veggelementene istedenfor fortauskanten. Etter revisjon av håndbøkene, med tanke på veggelementers luminansnivå og fokus på overflatebehandlinger, vil denne monteringen av ledelys gi en god visuell effekt. Allikevel vil utfordringene knyttet til vask av armaturer i selve veibanen være veldig store.

Prosjektet har ikke sett på å benytte LED-ledelys til bruk som rømnings- og evakueringslys, synbarhet i røyk og medfølgende nødvendig armaturavstand. Men det anbefales at dette ses nærmere på.

Anbefaling:

Dersom det blir vurdert å benytte bruk av faste ledelys i tunneler bør det samtidig utredes ikke bare minimumsnivå for utsendt lysfluks og intensitet men også maksimumskrav slik at ikke denne belysningen blir forstyrrende/blendende. Dette vil være enda mer fremtredende hvis ledelys skal benyttes i svakt eller ikke belyste tunneler.

10 Vedlegg 2 – Tunneler med LED-lys, 24.03.15

Navn	Region	Veg nr	Belysn år	Lengde	ÅDT	Lyskilde innkjør.	Lyskilde indre	Dimming / av-på	Lux eller luminans	Kjøretøy-styrt?
Jønjljotunnelen	Sør		2011	780	<2500	NaH	LED, Thorn	Dimming	Lux	Nei
Presturatunnelen	Sør		2011	1386	<2500	NaH	LED, Thorn	Dimming	Lux	Nei
Vabakken tunnel	Sør		2010	850		MH	LED, AEC	Av-på	Lux	Nei
Rallerudtunnelen	Sør	Rv 7	2014	2800		NaH	LED, AEC	Dimming	Luminans	Nei
Ørgenvika	Sør	Rv 7	2014	3700		NaH	LED, AEC	Dimming	Luminans	Nei
Geiteryggen	Sør	Rv 50	2014	3281	<2500	LED	LED	Dimming	?	Ja
Mælefjelltunnelen	Sør	E134	2017 ?	9358						
Ljabrudiaagonalen	Øst	Rv 155	2004	110	6000	LED	LED	dimming	Lux	Nei
Mosseporten	Øst	Rv 19	2012	293	20000	NaH	LED, AEC	Av-på	Lux	Nei
Evjetunnelen	Øst	Rv 164	2013?	270						
Brekktunnelen	Midt	E39	2013/14	1290	10000	LED, AEC	LED, AEC	Dimming	Luminans	Ja, radar
Harangtunnelen	Midt	E39	2014	785	4500	LED, AEC	LED, AEC	Dimming	Luminans	
Oppdølstranda	Midt		2013	7500	1700	LED, Thorn	LED, Thorn	Dimming		
Vulviktunnelen	Midt	Rv 70	2014	270	1030	LED	LED, AEC	Av-på	Lux	Nei
Kansdaltunnelen	Midt	Rv 70	2014	280	1030	LED	LED, AEC	Av-på	Lux	Nei
Vågstrandstunn.	Midt	E136	2014	3655	1790	NaH	LED, Thorn	Dimming	Luminans	Ja (natten)
Måndalstunnelen	Midt	E136	2014	2083	1790	NaH	LED, Thorn	Dimming	Luminans	Ja (natten)
Hjartåbergstunn.	Midt	Fv. 651	2014	3505	1810	NaH	LED, Thorn	Av-på	Luminans	Nei
Årsetunnelen	Midt	Fv. 651	2013	273	1750	NaH	LED, Thorn	Av-på	Luminans	Nei
Streketunn. ny del	Midt	Fv. 60	2014	1950	860	NaH	LED, Thorn	Av-på	Luminans	Nei
Fannefjordtunn.	Midt	Fv. 64	H. 2015	2740	4000	LED	LED, Thorn	Dimming	Luminans	Ja
Molvikhammeren	Nord	Fv.76	2014	2800	<500	LED, AEC	LED, AEC	Av-på	Lux	Ja
Bergsnev	Nord	Fv.78	2014	720	<2500	LED, AEC	LED, AEC	Av-på	Lux	Nei
Åsen	Nord	Fv.78	2014	220	<2500	LED, AEC	LED, AEC	Av-på	Lux	Nei
Toven	Nord	Fv.78	2014	10700	<1500	LED, Thorn	LED, Thorn	Av-på	Lux	Ja
Svartisen	Nord	Fv.17	2015	7600	<750					Ja
Kråkmo	Nord	E6	2015	518	<1500					
Ornes	Nord	E6	2017	Ca. 230	<4000					
Storlikollen	Nord	E6	2017	Ca. 280	<4000					
Leirvik	Nord	E10	2015	549	<3000					
Trældal	Nord	E10	2015	1110	<3000					
Hamnøy	Nord	E10	2013	1461	<1000	LED, AEC	LED, AEC	Av-på	Lux	Nei
Ballesvikskaret	Nord	Fv.86	2013	850	<250	NaH,	LED, AEC	Av-på	Lux	Nei
Kråknes	Nord	E6	2016	2440	<1500					
Storvika	Nord	E6	2016	1200	<1500					
Talvik	Nord	E6	2013	857	<2000	LED, Thorn	LED, Thorn	Dimming	Lux	Nei
Kåfjord	Nord	E6	2013	1200	<2000	LED, Thorn	LED, Thorn	Av-På	Lux	Nei
Tyskhaugen	Nord	E6	2013	200	<2000	LED, Thorn	LED, Thorn	Av -På	Lux	Nei
Aslakheimen	Nord	E6	2013	300	<2000	LED, Thorn	LED, Thorn	Av - På	Lux	Nei
Trifonhøgda	Nord	E105	2016	695	<2500					
Torsnes	Vest	Fv 107	2012	Ca 600		NaH	LED, Thorn	Av-på	Lux	Ja
Jondalstunnelen	Vest	Fv 107	2012	10085	350	NaH	QL	Av-på	Lux	Ja
Nordrepollen	Vest	Fv 107	2012	Ca 600		NaH	LED, Thorn	Av-på	Lux	Ja
Klettatunnelen	Vest	Rv5	2015	300	12000	NaH	LED, defa	Av-på	Lux	Nei
Bortnetunnelen	Vest	Fv 616	2013	4850	350	NaH	LED, Defa	Dimming	Lux	Ja
Isetunnelen	Vest	Fv614	2013	1730	350	NaH	LED, Defa	Av-på	Lux	Nei
Sandetunnelen	Vest	Fv 572	2012	632	600	NaH	LED, Thorn	Av-på	Lux	Nei
Høyangertunnelen	Vest	Fv55	2016	7500	500	LED	LED	Av - på	Lux	Ja
Dalsfjordtunnelen	Vest	Fv 609	2014	600	750	NaH	LED, Thorn	Av-på	Lux	Ja
Ottersteintunnelen	Vest	Fv 609	2014	2000	750	NaH	LED, Thorn	Av-på	Lux	Ja

Tabell 11 Detaljert oversikt over norske tunneler med LED-lys installert eller planlagt i nær fremdrift – oppdatert 24. mars 2015



Statens vegvesen
Vegdirektoratet
Publikasjonsekspedisjonen
Postboks 8142 Dep 0033 OSLO
Tlf: (+47 915) 02030
publvd@vegvesen.no

ISSN: 1893-1162

vegvesen.no

Trygt fram sammen