

**Forfatter: Projekt Direktør, Jørgen Holst, PIARC TC 4.4**



## **Planlægning og projektering af fremtidssikrede moderne vejtunneler**

*I Danmark undersøges, planlægges og projekteres flere og flere vejtunneler i såvel statslig som kommunalt regi, og udviklingen forventes bestemt ikke at aftage i årene fremover. Hyppigt ses det, at bygherre og rådgivere står usikre over for, hvilke spilleregler der egentligt er gældende under danske forhold. Resultatet bliver ofte et mangelfuldt og utidssvarende projekt med alvorlige følger for trafikanter og bygherrens økonomi. Årsagen skyldes, at vi ikke har en tunnelnorm eller vejregler, der kan tages i anvendelse tilsvarende vores nærmeste naboer som Sverige, Norge, Tyskland og Storbritannien. Artiklen opsummerer seneste nyt fra PIARC herunder internationale tendenser og anbefalinger til planlægning og projektering af fremtidssikrede vejtunneler.*

### **1. Baggrund**

Gennem de sidste 20 år er der i Danmark kommet mere og mere fokus på investeringer i vejtunneler, når bygherrer og myndigheder skal forsøge at finde brugbare løsninger på de mange afledte effekter af en stigende trafikmængde på vores veje i relation til bl.a. miljø, støj og trafiksikkerhed. En holdbar, bæredygtig og langsigtet løsning kan være at lægge trafikken i tunnel under jorden (eller vandet), men det kræver blandt andet en grundig planlægning og projektering med de rette værktøjer.

Nærværende artikel supplerer forfatterens tidligere artikel (16), der redegør for de mest almindelige gældende spilleregler inden for vejtunnel området omfattende en systematisk gennemgang af de styrende trafikantsikkerhedsaspekter, metoder og tekniske mindste krav, der kan tages i anvendelse ved planlægning og projektering af nye moderne vejtunneler, indtil en dansk tunnelnorm ser dagens lys.

Udviklingen i Danmark de sidste 10 – 15 år synes at gå i den forkerte retning ved planlægning af nye vejtunneler. Der ses oftere "uhensigtsmæssigheder" indbygget i grundlaget for planlægning og projektering fra både bygherre og rådgiver, der systematisk overføres til anlægsfasen med tekniske og økonomiske følger for den fremtidige drift og vedligeholdelse. Uden en dansk tunnelnorm anbefales det, at frit anvende og hente inspiration fra Normer, Standarder og Vejledninger fra vores nabolande, jf. (8) – (11), herunder de mange internationale publikationer fra PIARC (World Road Association), bl.a. (1) – (7), der udgør relevante og sidste nye udgivelser.

Alle større vejtunneler i Europa (længde >500m), også uden for TERN vejnettet, planlægges og projekteres i dag, så de overholder minimumssikkerhedskravene til vejtunneler bestemt i EU Direktivet fra 2004 (12). Direktivets krav var allerede ved dets fremkomst i 2004 på et lavere sikkerhedsmæssigt niveau end de krav, vi i Danmark normalt ville stille til nye moderne vejtunneler.

I dag er Direktivet forældet og benyttes bedst som en tjekliste/huskeliste under planlægning, projektering, udførelse og drift og ikke som fejlagtigt set flere gange i Danmark, som en egentlig norm. Direktivet forventes revideret i nærmeste fremtid.



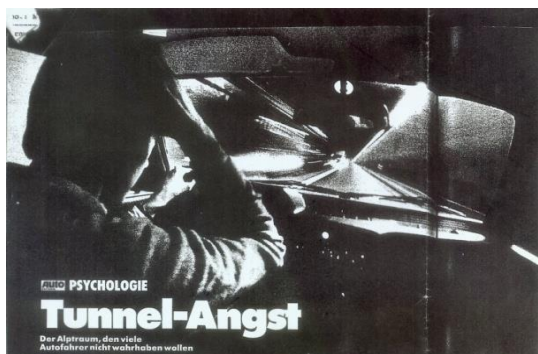
Figur 1 og 2: Lyse, venlige og sikre moderne vejttunneler i Stockholm. Kilde: Trafikverket, Sverige.

Med igangsat planlægning af bl.a. en ny Havnetunnel i København (Østlig Ringvej) med ca. 10 km tunnel, en mulig Marselis Boulevard Tunnel i Århus på ca. 2 km, en forlængelse af Nordhavnsvej tunnelen på 1.4 km og byggeriet af Femern Tunnellen på 18 km, er der lagt op til massive investeringer i vejttunneler både i statsligt som kommunalt regi i årene fremover. Alt dette kalder på tilvejebringelse af en dansk tunnel norm, der angiver retningslinjerne nu og i fremtidige byggerier til brug og støtte for alle parter i processen.

## 2. Introduktion

Vi ser verden over daglige alvorlige uheld og ofte brande i vejttunneler. Vi ved i dag fra erfaringer, at vejttunneler skal planlægges, projekteres og udføres med størst mulig fokus på trafikanters sikkerhed i driftsfasen. Det er ikke et spørgsmål om uheldet sker, men hvornår det sker.

Grundlaget for al planlægning og projektering af vejttunneler kan relateres til trafikantsikkerhed og det at skabe en god oplevelse ved passage gennem det lukkede rum. Vi ved fra utallige undersøgelser, at ca. 25 % af trafikanter er utrygge og har angst, når de opholder sig og kører gennem vejttunneler. Ved at indrette tunnelerne lyse og venlige og med god plads imødekommes de fleste af disse psykologiske aspekter. Andre undersøgelser viser, at 10 – 15 % af de potentielle brugere finder alternative ruter. Dette kan udgøre et økonomisk problem for betalingstunneler.



Figur 3 og 4: Ca. 25 % af trafikanter føler angst og utryghed ved ophold og kørsel i tunnel.

Planlægning af moderne vej-tunneler er generelt en kombination af følgende hovedemner:

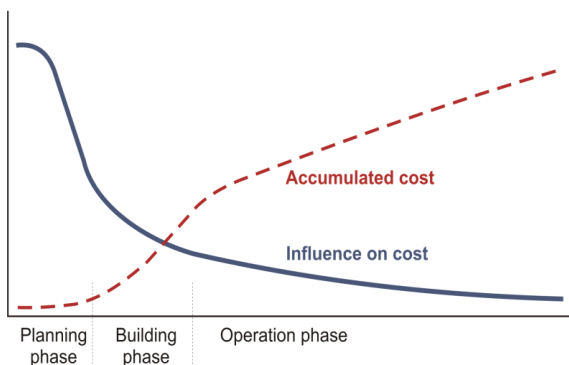
- Sikkerhed (aspekter for trafikanter/brugere/driftsfolk)
- Teknik (konstruktioner, brand, geologi, mekaniske og elektriske installationer, ITS mv.)
- Miljø (emissioner, omgivende natur, marine forhold, dyreliv, støj og larm mv.)
- Æstetik (harmonisk med omgivelser, påvirkning af tunnelsikkerhed, farvevalg, belysning mv.)
- Økonomi (totaløkonomiske betragtninger, anlægs-, drifts og vedligeholdelses økonomi i hele levetiden inkluderet mindre og større reparationer og udskiftninger mv.)
- Drifts – og vedligeholdelsesforhold

Dernæst er det et kompliceret sammenspil mellem flere forskellige mennesker repræsenteret af:

- Bygherrer (ejere, koncessionerede)
- Myndigheder (politikere og andre beslutningstagere)
- Beredskabsenheder (Politi, Brandvæsen, Redningstjeneste, Falck, Sygehusvæsen mv.)
- Tunnelplanlæggere (folk med mange års planlægnings, projekterings – og driftserfaring)
- Driftspersonale fra eksisterende vej-tunneler i fuld drift
- Rådgivere, specialister med ingeniørmæssig tilgang til konstruktioner og installationer (M&E), arkitekter
- Entreprenører og leverandører med erfaring fra eksisterende vej-tunneler

Det færdige anlæg skal planlægges og projekteres, at det kan bygges af entreprenørerne, godkendes af samtlige myndigheder og beredskabsenheder, opfylde de vedtagne politiske krav til sikkerhed for trafikanter i drifts – og vedligeholdelsesfasen samt udgøre en robust bæredygtig totaløkonomi for ejerne og samfundet som helhed. Desuden skal vej-tunneler planlægges for fremtidens behov trafikalt og teknologisk. Vej-tunneler projekteres typisk med levetid på 100 – 120 år.

Illustration of accumulated cost and corresponding level of influence on cost



Figur 5: Sammenhæng mellem akkumuleret levetidsomkostninger fordelt på faser i en tunnels levetid og indflydelsen på omkostningerne. Kilde: (2).

Som figur 5 indikerer, tages der beslutning om 60 – 70 % af fremtidige totale levetidsomkostninger i planlægningsfasen. En fase, der som oftest strækker sig over flere år. En forkert beslutning, en mangelfuld undersøgelse eller fejl i selve planlægnings – og projekteringsgrundlaget kan efterfølgende få katastrofale konsekvenser for trafikantsikkerheden samt alvorlige økonomiske udfordringer for byherren under anlæg og den efterfølgende driftsfase.

### 3. Sikkerhedsfilosofi og Sikkerhedskoncept

Statistikker og erfaringer internationalt har gennem årene vist, at der ved korrekt planlægning, anlæg og drift af vej-tunneler sker færre ulykker i tunneler end på åbne vejstrækninger. Risikoen for alvorlige uheld og hændelser er dermed normalt mindre i vej-tunneler sammenlignet med tilsvarende veje med samme trafik. Når der sker katastrofer som brand, alvorlige uheld eller hændelser, kan konsekvenserne i midlertidigt være væsentlige større i en tunnel end på en åben vejstrækning. Det kan blandt andet skyldes følgende forhold:

- Reduceret muligheder for trafikanter for at komme væk og ud af tunnelen samt for redningsmandskabet at komme til uheldsstedet for indsats (påvirkning af responstiden).
- Uheld der fører til brand med/uden kemikalieudslip kan skabe betydelige konsekvenser for trafikanter og materiel. For trafikanter er den afgørende fare i forbindelse med brand udviklingen af røggasser, der kan forhindre eller besværliggøre evakuering af personer og i værste tilfælde føre til forgiftning eller kvælning på grund af iltmangel/frisk luft.

Det er på den baggrund vigtigt tidligt i en planlægningsfase at få defineret og udarbejdet et sikkerhedskoncept baseret på en sikkerhedsfilosofi, der knytter sig til moderne vejforhold i tiden. Typisk for danske og europæiske moderne vej-tunneler baseres en sikkerhedsfilosofi på følgende:

- Etablering af grundlæggende regler til sikring af et ensartet højt sikkerhedsniveau for trafikanter, når der køres i vej-tunneler nationalt
- Etablering af mindst det samme sikkerhedsniveau i tunneler som på åbne vejstrækninger

Sikkerhedsfilosofien udmønter sig i en fastlæggelse af et overordnet mål for vej-tunnelen udtrykt gennem et sikkerhedskoncept baseret på, at tunnelen konstrueres, overvåges og reguleres således, at ulykker i tunnelområdet undgås. I tilfælde af, at der alligevel skulle ske ulykker eller opstå katastrofelignende situationer, er der i Danmark tradition for at følge det af Vejdirektoratet og trafikpolitisk godkendte sikkerhedskoncept baseret på følgende hovedpunkter:

- Evakuering af personer skal sikres
- Adgang for brand- og redningskorps skal sikres
- Skader på personer skal begrænses mest muligt
- Skader på konstruktioner og installationer skal begrænses således, at trafikafviklingen kan genoprettes hurtigst muligt

- Gennem sektionering af installationer og systemer til overvågning skal det sikres, at en katastrofesituation kun medfører partielle nedbrud af belysningsanlæg, nødtelefonanlæg, ventilationsanlæg, strømforsyning, trafikreguleringssystemer og brandslukningsanlæg

I Sikkerhedskonceptet redegøres bl.a. detaljeret for som minimum:

- Organisatoriske forhold som bemanning, kompetencer, ansvarsforhold og roller i planlægnings-, anlægs- og driftsfasen, jfr. (12)
- Myndighedsforhold herunder bl.a. fastsættelse af 1) Administrativ Myndighed, 2) Tunnelens Driftsledelse, 3) Sikkerhedsansvarlige og 4) Inspektionsenheder
- Beredskabsplaner, procedurer og instrukser for alle redningstjenester, politi og myndigheder herunder fastlæggelse af responstiden ved indsats
- Plan for udførelse af periodiske beredskabsøvelser, jfr. (12)
- Risiko – og sikkerhedsanalyser og nødvendig dokumentation i øvrigt, jfr. (12)
- Særlige tekniske krav fra bygherre/myndigheder relateret til sikkerhedsmæssige aspekter under planlægning, anlæg og drift

Sikkerheden for trafikanter skal være mindst det samme i tunnelen som uden for tunnelen. Derfor etableres sikkerhedsforanstaltninger i tunneler således, at personer, der er impliceret i uheld, er i stand til at redde sig selv, at gøre det muligt for trafikanter at yde en øjeblikkelig indsats for at forebygge mere omfattende konsekvenser, at sikre en effektiv indsats fra redningstjenesten og at beskytte miljøet samt begrænse den materielle skade. Særlige sikkerhedsforanstaltninger for handicappede brugere skal indbygges i hele tunnelområdet i tilfælde af opståede nødsituationer, jfr. EU Direktivet (12) og PIARC (7).

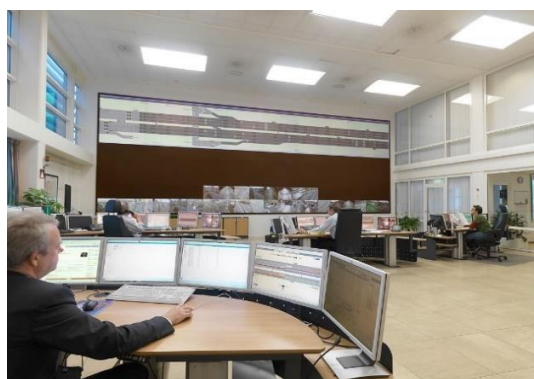
#### **4. Planlægning, projektering, anlæg og drift af vej tunneler**

I Danmark har vi ingen tunnelnorm, vejregel eller faste retningslinjer for planlægning, projektering, anlæg og drift af vej tunneler. Det har i mange år været praksis at udarbejde såvel sikkerhedskoncept, projekteringsgrundlag som kravspecifikationer for det enkelte projekt baseret på:

- National lovgivning, relevante normer, standarder og vejledninger herunder Eurocodes
- Vores egne erfaringer fra eksisterende tunneler i drift
- Internationale anbefalinger og retningslinjer fra bl.a. World Road Association (PIARC) og International Tunnelling and Underground Space Association (ITA)
- Relevante Tunnelnormer og Standarder fra vores nabolande som Norge (8), Sverige (9), Tyskland (10) med en skelen til Storbritanien (11).
- EU Direktivet af 29.april 2004 (12) omhandlende minimumssikkerhedskrav for vej tunneler større end 500 m beliggende i det transeuropæiske vejnet (TERN). Direktivet skal anvendes på alle danske eksisterende som nye vej tunneler (benyttes i dag bedst som tjekliste).

Sikkerhedskonceptet danner grundlaget for udarbejdelse af endelig projektering og kravspecifikationer til bl.a. anlægskonstruktioner, tekniske installationer, trafikledelses – og trafikinformationssystemer for en tunnelloøsning. Desuden defineres samtlige præventive forhold til imødegåelse af katastrofale hændelser i tunnelen bl.a. brand. Konceptet og dets konsekvenser eftervises ved risiko – og sikkerhedsanalyser for udvalgte scenarier.

Tunneler er ultimative følsomme for bevidste hændelser relateret til terror. Siden katastrofen 11. september 2001 (New York) stilles strenge krav fra myndigheder lovgivningsmæssigt verden over til imødegåelse af sådanne hændelser. I Danmark skal vores tunneler sikres tilsvarende. Der stilles bl.a. krav til dynamisk eksplosionslast ved projektering samt en begrænsning af adgangsforhold til tunnel og tilknyttede bygværker i driftsfasen.



Figur 6 og 7: Sikkerhedskonceptet definerer forhold så katastrofale brande undgås herunder krav til kontrol og overvågning. Kilde: Statens Vegvesen, Norge.

## 5. Brandbekæmpelse og ventilation

Hvis det værste tænkelige uheld skulle indtræffe, brand i tunnel, er moderne vej tunneler i dag forberedte og forsynede med et vidt omfang af installationer og udstyr og alle konstruktioner er effektivt brandbeskyttede. Der installeres udstyr i tunnelen til brug for bl.a. trafikanters selvredning samt en større mængde installationer til brug for brand – og redningstjeneste. Her henvises til PIARC (3) – (6) samt (16) for mere uddybende information.

I tunneler etableres altid ventilationsanlæg, der tjener flere formål. Under normale driftsforhold skal anlægget sikre en acceptabel luftkvalitet for trafikanter i tunnelen samt driftspersonalet ved udførelse af service – og vedligeholdelsesarbejder. Ved en eventuel brand i tunnelen skal anlægget effektivt kunne bortlede røggasser og varm luft, så sluknings – og redningsindsatsen kan gennemføres og trafikanter kan komme i sikkerhed. Sidst bidrager anlægget til at holde temperaturen nede på konstruktionerne, så skadesomfanget begrænses i videst muligt omfang.

Sænkettunneler og undersøiske vej tunneler planlægges og projekteres i dag altid for en brand på minimum 200 MW (krav til ventilation). Øvrige tunnel typer projekteres normalt tilsvarende. Til fremtidige vej tunneler kan forventes skærpede krav til branddimensionering fra myndighederne. Nye love og normer vil kræve at benytte en dimensionsgivende brand på 250 – 350 MW. For blot få



år siden (op til ca. 2005) var de stillede krav fra myndighederne ofte 30 – 100 MW. Se mere information i de senest nye PIARC-publikationer (3), (5) og (6).

Det skal anføres, at diskussioner om, hvorvidt brand vil optræde i vejttunneler, er uden sund fornuft og mening. Der er enkelte eksempler på, at vejttunneler forsøges planlagt og gennemført uden at tage hensyn til en eller flere brande i tunnelens levetid, vel vidne, at der lovgivningsmæssigt er strenge krav til netop branddimensionering og beskyttelse af personer, udstyr og konstruktioner. Myndighedernes sikkerhedsgodkendelse af brandforhold kræver omfattende dokumentation og sikkerhedsanalyser, der ikke kan gradbøjes eller fraviges.

Vehicle Type	Peak Fire Heat Release Rate [MW]
Passenger car	5 – 10
Light duty vehicle	15
Coach, bus	20
Lorry, heavy-goods vehicle up to 25 tonnes	30 – 50
Heavy-goods vehicle, typically 25-50 tonnes	70 – 150
Petrol tanker	200 – 300

Figur 8: Typiske effekter af brand for forskellige køretøjstyper. Kilde (3).

Typisk anvendes i dag langsgående ventilation med moderne jefans placeret i grupper per ca. 80 - 100 m. Denne type ventilation kan erfaringsmæssigt anvendes op til ca. 6 – 8 km afhængig af bl.a. tværsnit, trafikmængde, tilladelse til transport af farligt gods og særtransporter samt krav til emissioner og friskluftforsyning ved daglig drift. Ved tunnellængde over typisk 3 – 4 km med moderat/høj trafikmængde (>10 - 15.000 i ÅDT) stilles normalt krav om separat røggasventilation i form af punktudsugningsanlæg for kvælende røggasser, ref. (10). Denne løsning forøger tværsnittet og dermed anlægsomkostningerne. Se PIARC (3) og (6) for mere information.

Aktive brandbeskyttelsessystemer (FFFS, Fixed Fire Fighting Systems) som sprinklers, vandtåge og kaskade systemer anvendes normalt ikke i danske, skandinaviske og europæiske vejttunneler. I enkelte tunneler (ca. 25 ud af mere end 10.000) i Europa ses sprinkleranlæg installeret. PIARC sidste nye publikation (4) anbefaler ikke installering af FFFS, men henviser til at få udført omfattende dokumentation som sikkerheds – og konsekvensanalyser og en eftervisning, hvorvidt systemerne er teknisk – økonomisk fordelagtige før en eventuel installering finder sted. Systemerne er forbundet med en del vanskeligheder i D&V fasen. Forventet levetid er ca. 20 år. En mulig effekt skønnes for brande i størrelsen 5 – 10 MW, hvilket svarer til brand i personbil. FFFS forbedres løbende i dag og udviklingen er værd at følge for bygherren. Mere information findes i (3) og (4).

Konstruktioner (vægge og loft) brandbeskyttes ofte med passive systemer som påsprøjtning af specialmørtel, fastgørelse af hårde brandisoleringsplader eller specialbygget elementer til vægge i kombination med æstetiske forhold. Kabler til installationer fremføres i brandsikre føringsveje. Brandlast er typisk en røggastemperatur på 1350 °C i 2 timer efter hollandske normer (RWS-kurve).

Tendensen internationalt og i de lande vi skal sammenligne os med i dag er, at kravene fra myndigheder til tilladelige emissioner i vejttunneler skærpes hurtigere end teknologien kan følge med til. På længere sigt vil overgangen til flere el/hybride køretøjer mindske emissionerne, men nye sikkerhedsmæssige forhold som eksplosionsfare og brand ved brug af disse køretøjer kan ændre på hele konceptet for ventilation. Der foregår for nuværende flere tiltag internationalt i forbindelse med at klarlægge konsekvenserne i vejttunneler ved overgang til flere el/hybride køretøjer. Herudover stilles nu hyppigt krav til partikelrensning af tunnelloft. Alt sammen forhold der giver bygherrer, planlæggere og projekterende store udfordringer.



Figur 9 og 10: Langsgående ventilation ved brug af jetfans placeret i nicher og tunnelloft.

## 6. Tværsnitsgeometri for moderne vejttunneler

Der er i (16) angivet grundlaget og anvist metoder til fastlæggelse af tværsnittets delelementer herunder krav til installationer og sikkerhedsudstyr ved bl.a. brug af tunnel klassifikation. Her skal kort nævnes de seneste års tendenser og udvikling relevant for danske forhold, som vinder frem i nye opdaterede normer og anbefalinger internationalt, se også (1), (8) – (11), (13), (15) og (18).

Moderne vejttunneler planlægges internationalt i dag stort set altid som to - rørs tunneler med ensrettet trafik. I yderst sjældne tilfælde ved lav trafik (<10.000 i ÅDT) kan anvendes et rør med tovejs trafik. De danske vejttunneler har fulgt dette koncept siden opførelse af Limfjordstunnelen i 60'erne (indviet 1969).

Kørebanebredde i tunnel er større end for åben vej begrundet i trafikantsikkerhed. Tidligere anvendtes i Europa 3,50 til 3,75 m afhængig af tilladelig hastighed, jf. (1). I dag anvendes typisk 3,80 – 4,00 m plus 0,20 – 0,30 m til afstribning med dobbelte varslingslinjer. Kantbanen fastsættes til 0,50 m. Langs tunnelvægge anvendes ofte 0,40 m betonautoværn med New Jersey profil.

Fortov etableres langs alle tunnelvægge for flugtvej ved uheld/havari og som sikkerhed ved åbning og brug af alarmskabe (SOS) typisk indbygget i vægge. Absolut minimums bredde er 1,00 m. Tendensen er i dag, at der etableres bred yderrabat på minimum 1,50 – 1,75 m uden anvendelse af fortovskantsten. PIARC anbefaler minimum 1,75 m (1). Der ses nu oftere etablering af nødspor i vejttunneler, specielt tunneler med høje trafikmængder, megen tung transport og særlige lange tunneler. Nødspor med bredde på 2,50 – 3,25 m forøger sikkerheden for trafikanter væsentligt.



For tunneler > 1000 m uden nødspor og bred yderrabat anbefales at etablere vigepladser per ca. 500 m til brug ved havari, uheld og drift – og vedligeholdelsesarbejder, jf. (1) og (8).

I Danmark har frihøjden været projekteret til minimum 4,80 m plus 0,20 m som ekstra (skjult) sikkerhed. I dag sættes internationalt frihøjder i moderne vej-tunneler til minimum 5,00 – 5,50 m. Fremtidssikring og pladskrav til ventilationssystemer, ophæng, kamera, vejskilte, vognbanesignaler og dynamiske informationstavler mv. bevirker, at der afsættes yderligere plads på 1,00 – 1.50 m. Den indvendige højde er således ikke unormalt fastsat til minimum 6,50 m i moderne vej-tunneler.

Årsagen skyldes i sin enkelthed at køretøjer bliver stadig større og omfanget af særlige transportere og farlige godstransportere forøges til stadighed på vejnettet. Hertil kommer en forøget standard brug af tekniske installationer og ITS-systemer. En forøget frihøjde i tunnelen sikrer bedre mod katastrofale påkørsler og heraf tabt gods i tunnelen fra høje (ulovlige) transportere, som udgør et stigende problem for vejmyndighederne, jf. (14), (16) og (18).

De nuværende danske Vejregler, specielt Bronormen, kan ikke benyttes ved fastsættelse af tværsnitsgeometri for moderne vej-tunneler, som det u hensigtsmæssigt er konstateret i flere tilfælde de sidste år. En vej-tunnel med ”klemte tværsnit” har store mangler i form af nedsat trafikant – og fremtidssikkerhed i relation til tunnelens levetid på 100 – 120 år. En mulig anvendelse af vigepladser i nyere tunneler ses også forsømt generelt under danske forhold.

## **7. Tunnel tracé og hastighed**

Her skal kort nævnes enkelte vigtige planlægningskrav til vej-tunnelens tracé, der har stor indflydelse på den samlede trafikantsikkerhed.

Horisontal og vertikalt kurveforløb bestemmes ud fra bl.a. en overholdelse af sigtelængder og en dimensioneret hastighed langt større end den tilladelige hastighed for tunnelen. Normalt fastsættes tilladelig hastighed som 85 – 90 % af dimensioneringshastigheden. Maksimal hastighed i vej-tunneler er normalt 90 km/t på motorveje og for bynære tunneler normalt 60 – 80 km/t. I enkelte lange nye tunneler med nødspor ses hastigheden forsøgsvis sat til 100 km/t. Politiet har det overordnede ansvar for trafikafviklingen og fastsætter dermed den endelige tilladelige hastighed efter forholdene og i samråd med bygherren. Hastighedens indflydelse på risikoen for antal alvorlige hændelser og uheld med mulige dræbte i tunnelen påvirker med en faktor i 4 potens i sikkerhedsanalyser. Dvs. at antallet af alvorlige uheld stiger med ca. 225 % ved at ændre hastigheden fra 90 km/t til 110 km/t. Femern tunnelen forventes at benytte 110 km/t.

I forbindelse med planlægning og projektering udføres altid slæbekurveanalyser. Hermed tilsikres en tracé, der tillader passage af særlige transportere (ekstra høje, bredde og lange).

Stigningsgradienter i tunneler er fastsat til absolut maksimalt 5 %. Normalt er den øvre grænse fastsat til 3 %, men det tillades dog i særlige tilfælde at gå ud over denne grænse, hvis trafikanternes sikkerhed kan opretholdes eftervist gennem bl.a. sikkerhedsanalyser, jf. (12). Internationale erfaringer påpeger vigtigheden af at overholde kravene til 3 % med baggrund i en stærkt forøget risiko for specielt bagendekollisioner og havari af tunge transportere i tunnelen.

## 8. Installationer og sikkerhedsudstyr

Moderne vejttunneler etableres i dag med en omfattende mængde af tekniske installationer (mekaniske og elektriske, M&E) og moderne ITS-systemer (Intelligent Transportation Systems) til varettagelse af sikkerheden for trafikanter gennem monitoring og kontrol samt til brug for den daglige drift af tunnelen. Internationale anbefalinger, tunnelnormer og vejledninger anfører en lang liste af installationer og sikkerhedsudstyr som i dag er standard i moderne vejttunneler, jf. (8) – (12), (14), (16) og (18). Sidste nye tiltag til en dansk tunnel (Limfjordstunnelen) er brug af solceller til levering af supplerende miljørigtig strøm til drift af tunnelens elektriske installationer. Solcelleanlæg har været brugt i mange år. Erfaringerne er gode, det virker og er pålideligt.



Figur 11: M&E og ITS i moderne vejttunnel.

Figur 12: Solceller som supplerende strømforsyning.

## 9. Krav i forbindelse med drift og vedligeholdelse

Det overordnede mål for drift og vedligehold af en tunnel er en opretholdelse af det valgte sikkerhedsniveau, sikre trafikens fremkommelighed, at standard og økonomi optimeres samtidigt med en hensyntagen til miljøpåvirkningen. Det er derfor vigtigt at tænke drift – og vedligehold ind på et meget tidligt tidspunkt i planlægningsfasen.

Moderne vejttunneler skal planlægges for fremtidige drifts-, vedligeholds- og reparationsforhold. Erfaringsmæssig ved vi, at mindre reparationsarbejder forekommer i kortvarige perioder de første 5 – 15 år, hvor tunnelen er drift. Herefter kan forventes større reparationer og udskiftninger af dele eller hele tunnelkomponenter i bygværkets resterende levetid.

Tunnelen skal således planlægges og indrettes for fremtidige tunnellukninger og spærringer af vognbaner/et tunnelrør, når større reparationsarbejder og udskiftninger bliver nødvendige. Hertil kommer lukning og spærring ved hændelser som tabt gods, påkørsler og standsede køretøjer i tunnelen samt ved alvorlige trafikuheld og brand.

Moderne vejttunneler indrettes typisk med automatiske trafikledelses – og reguleringssystemer (ITS), hvor overledning mellem tunnelrør finder sted uden for tunnel og vognbanespærringer kan foretages sikkert i dagligdagen. Ved planlægning skal gennemtænkes trafikafviklingsplaner for

tunnel og den vejstrækning tunnelen har indflydelse på herunder fremrykning for redningstjenester ved alvorlige ulykker og uheld. Mere information om D&V, se (2), (13), (15), (16) og (18).

## **10. Risiko – og Sikkerhedsanalyser**

I forbindelse med planlægning, projektering og senere drift udføres i dag mange risiko – og sikkerhedsanalyser, til verificering og dokumentation af, at konstruktioner, tekniske installationer og øvrigt sikkerhedsudstyr i tunnelen til enhver tid opfylder de krav og intensjoner, der er indarbejdet i sikkerhedskonceptet. En samlet sikkerhedsmæssig vurdering skal munde ud i, at tunnelanlægget har et sikkerhedsniveau, der er i orden, dvs. at risikoen er nedbragt til et acceptabelt niveau svarende til, hvad der kræves af et sådant tidssvarende og moderne anlæg.

Et vigtigt krav og scenarie, der ofte glemmes under danske forhold, er planlægning af sikre flugtveje og udgange til det fri i forbindelse med uheld og brand. Hertil foretages evakueringsanalyser. Et scenarie med 70 buspassagerer, der skal bringes i sikkerhed inden for 5 minutter, hvor enkelte kan være handicappede, benyttes typisk og angiver flugtveje per max. 80 – 90 m. Længere afstande mellem flugtveje og nøddøre til det fri vil typisk kompromittere trafikantsikkerheden.

Tiden fra en alarm tilgår redningstjeneste/beredskabsvæsen til indsats på stedet er påbegyndt benævnes responstid. Responstid under danske forhold er normalt fastsat i sikkerhedskonceptet eller de overordnede kravsspecifikationer efter aftale mellem bygherre og de involverede myndigheder, typisk max. 10 minutter eller mindre i danske vej tunneler. Overholdelse af responstiden stiller strenge krav til beredskabets formåen, fremrykningsveje og maksimale afstande fra beredskabet til tunnel. Under danske forhold har det til tider været kompliceret at opfylde responstiden, hvorved trafikantsikkerheden kompromitteres.

## **11. Særlige lange vej tunneler**

I de sidste 15 – 20 år har der været en stigende tendens til at bygge særlige lange vej tunneler internationalt. Projekterne er yderst komplicerede med ekstrem risiko og udfordrer de involverede parter fra starten af til det yderste. I planlægningsfasen med bl.a. godkendelser, ved projektering en overholdelse af mulige tekniske grænseværdier, i anlægsfasen brug af bl.a. ekstremt udstyr under risikofyldte forhold efterladende en bygherre/ejer med komplicerede drifts – og vedligeholdelses udfordringer, jf. (17) og (18).

Eksempler fra Norden: I Danmark er vi gået i gang med anlæg af Femern Tunnellen på ca. 18 km, der skal forbinde Danmark med Tyskland. En kombineret vej og jernbaneforbindelse udført som sænketunnel (undersøisk tunnel). På Færøerne er i december 2020 åbnet en 11 km lang undersøisk vej tunnel i en dybde på 189 m under havoverfladen med en rundkørsel i en dybde på 73 m. I Norge er man påbegyndt anlæg af verdens længste undersøiske vej tunnel på ca. 27 km, Rogfast nord for Stavanger, der kommer ned i en dybde på 392 m under havoverfladen og med 4 km frakørsel/tilkørsel til øen Kvitsøy ca. midtvejs. Det imponerende anlæg konstrueres som en to – rørs tunnel med ensrettet trafik, tværtunneler, mange vendenicher og vigepladser. For tunnelerne i Norge og på Færøerne gælder, at der kun forventes lav trafik (< 5.000 i ÅDT).



Figur 13: Færøerne. 11 km undersøisk tunnel med verdens første underjordiske rundkørsel.

Vi ved fra års erfaring verden over, med de i dag stillede strenge krav lovgivningsmæssigt og fra myndighederne til trafikantsikkerhed, at vej-tunneler har en teknisk øvre grænse ved en længde på ca. 6 – 8 km for moderat/høj trafik, og lavtrafiktunneler kan etableres op til ca. 20 – 23 km (bjergtunneler). Alt andet lige vil der være store sikkerhedsmæssige udfordringer relateret til bl.a. brand, ventilation, terrorsikring, nærforhold for beredskabet, responstid ved redningsindsats, evakuering af trafikanter samt ændret trafikantadfærd ved monoton kørsel i tunnel. Det ses desværre ofte for særlige lange vej-tunneler, at trafikantsikkerheden kompromitteres med mulige katastrofale konsekvenser for trafikanter, når de værst tænkelige scenarier sker under driftsfasen.



Figur 14 og 15: Redningsstation indbygget i Mont Blanc tunnelen (F/I) med specialbygget redningskøretøj.

En mulig løsning til forbedring af trafikantsikkerheden for de særlige lange tunneler er en etablering af permanent redningsstation tæt ved tunnelportaler eller indbygget i tunnel. Et godt eksempel på dette er fra Mont Blanc Tunnelen (11,6 km, F/I) med indbygget redningsstation midtvejs og udstyret med specialbygget redningskøretøj. Se figur 14 og 15. Et andet godt eksempel er Elb Tunnelerne i Hamborg (Tyskland), hvor redningsstationen er placeret ved tunnelportalerne.

## 12. Anlægs – og driftsøkonomi

Vi ved fra mere end 50 års erfaring med vej-tunneler under danske, skandinaviske og europæiske forhold, at de er dyre i såvel anlæg som drift specielt ved sammenligning med broer. Specielt er

undersøiske vej-tunneler og sænketunneler de dyreste at opføre og senere at drive. Tunneler koster normalt 3 – 5 gange mere at drive end broer under samme forhold, jf. (2) og (18).

Der findes mange publikationer, der beskriver levetidsomkostninger fordelt på faser i en tunnels levetid, jf. figur 5, fra PIARC (2), der er "State of the Art" indenfor D&V. Figuren viser, at de samlede levetidsomkostninger i driftsfasen (100/120 år) er tilsvarende de totale anlægsudgifter ved opførslen inklusiv udgifter til planlægning regnet i nutidsværdier (NPV). Dvs. at en tunnel opført til 60 mia. kr. kan forventes at koste bygherren til drift og vedligehold inklusiv udskiftning og reparation tilsvarende 60 mia. kr. i dagens penge fordelt over levetiden på 100 år. Vi har under danske og skandinaviske forhold tilsvarende dokumenterede erfaringer.

Grunden til store udgifter i D&V fasen kan henføres til specielt korte levetider for mekaniske og elektriske installationer, typisk 10 – 20 år, jf. (2) og (11). M&E skal hyppigt udskiftes pga. ælde og slitage fra aggressivt miljø i og omkring tunnelen herunder en kontinuerlig fremkomst af ny og forbedret teknologi. Tilsvarende gør sig gældende for ITS-udstyr. På hovedkonstruktioner ved vi fra erfaringer, at der kan forventes istandsættelses - og reparationsarbejder efter ca. 20 – 30 år og større hovedreparationer efter typisk 40 – 50 år.

Årlige D&V udgifter udgør erfaringsmæssigt 0,8 – 1,0 % af anlægsomkostninger i de første ca. 15 – 20 år stigende til 1,2 – 1,5 % for den resterende levetid målt i nutidsværdi (NPV). Hertil skal lægges omkostninger til udskiftninger og reparationer. Mere information kan findes i bl.a. (2), (11) og (18).

I planlægnings – og projekteringsfasen samt ved større D&V og reparationsarbejder udføres i dag altid Life Cycle Cost Analysis (LCC) på udvalgte strategier før endelig beslutning om optimal teknisk - økonomisk løsning tages. I de sidste år har økonomiske analyser og overslag for danske nyanlæg og D&V udgifter været stærkt bekymrende. Det anbefales, at bygherren altid vælger tredjeparts granskning af erfarne og professionelle rådgivere til minimering af u hensigtsmæssige resultater.

### **13. Konklusion**

Udviklingen til løsning af de omfattende trafikale problemer verden over går med stigende fart i retning af at lægge trafikken i tunneler. Denne udvikling ser vi også i Danmark med planlægning, projektering og anlæg af flere og flere vej-tunnelprojekter.

Det ses desværre gentagne gange, at såvel bygherre som rådgivende ingeniører står meget usikre over for, hvilke spilleregler, der egentlig gælder ved planlægning og projektering af moderne vej-tunneler under danske forhold. Resultatet er ofte et tvivlsomt overslag på anlægs – og driftsøkonomi, en gradbøjning af de gældende regler, en manglende overholdelse af de lovgivningsmæssige krav, et utidssvarende projekt med u hensigtsmæssige løsninger og åbenlyse mangler, der ikke opfylder kravene til trafikantsikkerhed, beredskabsforhold og den fremtidige drift og vedligeholdelse. Efterfølgende har myndigheder problemer med en godkendelse og bygherren et alvorligt økonomisk problem.



Der er derfor i dag et stort åbenlyst og akut behov for udvikling og tilvejebringelse af en dansk tunnelnorm eller vejregel med tilhørende vejledning. Et sådant arbejde og dermed ansvar vil være naturligt at Vejdirektoratet varetager i Vejregelregi.

#### Referencer:

- (1) PIARC, Cross Section Geometry in Unidirectional Road Tunnels, Paris 2001
- (2) PIARC, Good Practice for the Operation and Maintenance of Road Tunnels, Paris 2005
- (3) PIARC, Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels, Paris 2007
- (4) PIARC, Fixed Fire Fighting Systems in Road Tunnels: Current Practices and Recommendations, Paris 2016
- (5) PIARC, Design Fire Characteristics for Road Tunnels, Paris 2017
- (6) PIARC, Vehicle Emissions and Air demand for Ventilation in Road Tunnels, Paris 2019
- (7) PIARC, General Principles to improve accessibility for persons with reduced mobility in Road Tunnels, Paris 2019
- (8) Statens Vegvesen, Vegtunneler, Normal, Håndbok N500, Norge, januar 2020
- (9) Trafikverket, TDOK 2016: 0231 og 0232, Krav Tunnelbyggande, Sverige, oktober 2016
- (10) RABT 2006 og FGSV 339/1: EABT – 80/100, Tyskland, 2019
- (11) Standard CD 352, Design of Road Tunnels, Highways England (UK), March 2020
- (12) EU Direktiv 2004/54/EF: Minimumssikkerhedskrav for vej-tunneler på TERN veje
- (13) Jørgen Holst & Henrik Bak: Sikkerhed i danske vej-tunneler, Dansk Vejtidskrift, januar 2002
- (14) Jørgen Holst: Automatisk hændelsesdetektering i Limfjordstunnelen, Dansk Vejtidskrift, september 2005
- (15) Jørgen Holst: Tunnelsikkerhed ved VVM-undersøgelse af Marselis Boulevard i Århus, Dansk Vejtidskrift, februar 2008
- (16) Jørgen Holst: Planlægning af fremtidssikrede moderne vej-tunneler, Trafik & Veje, februar 2013
- (17) Jørgen Holst: Challenges when breaking new records within Immersed and Subsea Road Tunnels, PIARC World Road Congress Seoul – South Korea, Invited Speaker, November 2015
- (18) Jørgen Holst: Planning & Design of Modern Road Tunnels for the Future, Best International Design Standard and Technology, PIARC Congress Cape Town – South Africa, Invited Speaker, October 2017