

- IRIS Energi
- IRIS Samfunnsforskning
- IRIS Biomiljø
- ULLRIGG Bore- og brønnsenter



# Hvordan tilnærme seg sannsynlighetsangivelse for branner i tunge kjøretøyer i vegtunneler?

Ove Njå

ARBEIDSNOTAT – 2017/297



IRIS Samfunnsforskning





Universitetet  
i Stavanger

Senter for risikostyring og samfunnssikkerhet



International Research Institute of Stavanger

[www.iris.no](http://www.iris.no)

Prosjektnummer: 7351049  
Prosjektets tittel: Kartlegging av branner i vegtunneler  
Oppdragsgiver(e): Statens vegvesen, Vegdirektoratet  
ISBN: 978-82-490-0900-8  
Gradering: Åpen  
Kvalitetssikrer: Geir Sverre Braut  
Revidert: 10.01.2018

Stavanger 10.01.2018

---

Ove Njå  
Prosjektleder

---

Einar Leknes  
Direktør  
IRIS Samfunnsforskning



## Forord

Dette arbeidsnotatet er en forstudie av hvordan Statens vegvesen kan tilnærme seg angivelse av sannsynligheter for brann i tunge kjøretøy i norske vegtunneler. I Norge har vi enda ikke hatt scenarier som vi opplevde i Europa rundt årtusenskiftet (Tauern, St. Gotthard og Mont Blanc tunnelene) hvor mange omkom i branner som inkluderte tyvetalls tunge og lette kjøretøy. Vi har hatt branner i tunge kjøretøy, noen som har eksponert trafikanter for store røykmengder og andre med høy intensitet men heldigvis uten at mennesker var i nærheten. Vi har dermed ikke den voldsomme erfaringen enda, men den kan komme. Parallelt med denne studien jobber vi med en artikkel om toleransekrav og akseptkriterier for risiko, hvor vi ser på utfordringene som myndighetene møter når de skal vurdere risiko for svært sjeldne hendelser. Rapporten handler om hvordan Statens vegvesen kan jobbe for å få frem gode analyser i fremtiden. En stor takk til Harald Buvik og Finn Harald Amundsen, Statens vegvesen, Vegdirektoratet, som har latt meg få jobbe med denne problemstillingen, kommentert et tidligere utkast og stilt sine datamaterialer til rådighet. Også stor takk til Audun Borg som har lest og kommentert tidligere versjoner.

Stavanger, 11. januar 2018



Ove Njå, prosjektleder

## Innhold

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | INNLEDNING .....   | 6  |
| 2   | BEGREPER OG TEORETISKE FUNDAMENT FOR RISIKOINFORMERT STYRING .....   | 8  |
| 2.1 | Statens vegvesen sine rammebetingelser for risikoinformert styring .....   | 9  |
| 2.2 | Vesentlige begreper i arbeidet med risikoinformert tunnelsikkerhetsstyring, og den underliggende tenkningen.....     | 10 |
| 3   | KVANTITATIV TILNÆRMING TIL SANNSYNLIGHETSBEGREPET.....   | 13 |
| 3.1 | Det nasjonale perspektivet .....   | 16 |
| 3.2 | Det lokale perspektivet – tunnel for tunnel .....  | 17 |
| 4   | KVALITATIV TILNÆRMING TIL SANNSYNLIGHETSBEGREPET.....  | 19 |
| 5   | ANBEFALING TIL AKTIVITETER FOR Å HÅNDTERE MODELLERING AV RISIKO FOR BRANN I TUNGE KJØRETØY.....                      | 20 |
| 5.1 | Anbefalinger fra studie om risikovurderinger i Statens vegvesen (Njå et al., 2013).....                              | 20 |
| 5.2 | Anbefalinger angående sannsynlighetsangivelser av brann i tunge kjøretøy til bruk i risikoanalyser av tunneler ..... | 26 |
| 6   | KONKLUSJON.....  | 28 |
| 7   | REFERANSER.....  | 29 |
|     | VEDLEGG .....  | 31 |
| A   | Vesentlige prinsipper i utformingen av tunneler.....   | 31 |
| B   | Brannodynamikk og brannteori.....  | 35 |
| C   | Eksplisjonsteori .....   | 44 |
| D   | Termiske, toksiske og mekaniske belastninger og menneskers tåleevne.....   | 46 |



# 1 Innledning

Transportøkonomisk institutt har gjennomført en kartlegging av branner i vegtunneler fra 2008 – 2015 (Nævestad, Ranestad, Elvebakk, & Meyer, 2016). Dette er et materiale som Statens vegvesen, Vegdirektoratet, blant annet skal bruke til å videreutvikle sitt modellverktøy for risikoanalyser. Vegdirektoratet ønsker en faglig vurdering av årsakssammenhenger for branner i personbiler og branner i tunge kjøretøy. Det virker som om personbilbranner ofte skyldes en kollisjon med annet kjøretøy eller tunnelveggen, mens branner i tunge kjøretøy oftere har sammenheng med tekniske forhold knyttet til tunnelenes utforming og da særlig stigningsgrad.

Vegdirektoratet har bedt IRIS om å vurdere mulige angrepsmåter for å kunne komme videre med problemstillinger knyttet særlig opp mot tungbilbranner. Det handler om hvordan Statens vegvesen bør jobbe med modellering av sannsynlighet for tungbilbrann i vegtunneler, og hvordan sannsynligheter kan uttrykkes, fortolkes og måles. Frem til nå har Vegdirektoratet vært spesielt oppmerksom på stigningsgrader i tunneler, i første rekke de undersjøiske. Vi har i våre tidligere studier av bransjen funnet flere kunnskapshull i tunnelsikkerhetsarbeidet, både på forebyggende og skadebegrensende side (Njå & Kuran, 2015):

- Det er begrenset kunnskap om kjøretøyene som bruker tunnelene; omfang, variasjon, tilstand, last og kjøreatferd knyttet til tyngre kjøretøy.
- Branner og tilløp til branner har i liten grad blitt studert i forhold til antennelse og brannutvikling i tunge kjøretøy. Dette gjelder blant annet antennelse, brannvekst, maksimal branneffekt/varmeavgivelsesrate og branntid/-varighet i ulike typer tunneldesign (ventilasjon, tverrsnitt, stigning, med mer).
- Til nå er det veldig lite kunnskap om røykgasser, konsentrasjoner og spredning av giftige gasser gitt ulike typer tunneldesign (ventilasjon, tverrsnitt, stigning, med mer). Enkle empiriske modeller finnes basert på forsøk som i noen grad er fullskala (Ingason, Li, & Lönnemark, 2014).
- Fra medisinsk side blir det hevdet at grenseverdier for varme- og røykgasseksponering har liten verdi. Det er individuelle forskjeller i morbiditet som er avgjørende for utfallet. Vi mangler bedre kunnskap om menneskets tåleevne, som kan være egnet til bruk i dimensjonering av sikkerhetstiltakene.
- Det er få, om noen som har studert sammenhengen mellom kravet til selvevredning og nødetatenes krisehåndtering, gitt en funksjonsbasert tilnærming til utformingen av tunnelen.
- Det er svært viktig å finne sammenhengen mellom teknologiske løsninger og selvevredning, og hvordan trafikanter vil kunne påvirkes til å gjøre riktige valg.
- Modeller, beregninger og betingelser for å analysere risiko og sikkerhet er mangelfulle, og usikkerheten øker når tunnelen er spesiell, for eksempel lengde, stigning, design, osv.

Dette arbeidsnotatet ser spesielt på forhold omkring det siste kulepunktet. På grunn av at det er mangel på kunnskap og usikkerhet knyttet til disse punktene medfører det at



modellering av brannforløp i tunneler også er et området med mangel på kunnskap og erfaring.

Statens vegvesen har alltid fremmet sterk, objektiv kunnskap i sine analyser og vurderinger knyttet til sikkerhet og beredskap. Når det gjelder angivelse av sannsynligheter som del av risikoanalyser har Vegdirektoratet siden tidlig på 1980-tallet fremhevet observasjoner og registrering av hendelser som viktig for dette arbeidet. TUSI ble nettopp utviklet med denne bakgrunnen og allerede da fant utviklerne av programmet at hendelsesraten varierte systematisk med tunnelsonene. Type tunneler spiller også en viktig rolle og noen tunneler synes å ha en høyere hyppighet av branner enn andre. Grunnlaget for anbefalinger til valg av design-branner for sikkerhetsutrustning i tunneler på midten av 1990-tallet var rent deterministisk basert, uten noen form for begrunnelse i risikoinformert tenkning (Ingason, 1995). Det var først på 2000-tallet at risiko som begrep og styringsparameter ble vektlagt i vegsektoren. Vi har siden midten av 2000-tallet påpekt behovet for bedre kunnskap om ulike typer sammenhenger, hvor vi for Rogfast-planleggerne beskrev følgende (Njå, 2006):

- Hva er sammenhengen mellom linjeføring og ulykkesforekomst/utfall?
- Hva er sammenhengen mellom tunnellengde og ulykkesforekomst/utfall?
- Hva er sammenhengen mellom stigning og ulykkesforekomst/utfall?
- Hva er sammenhengen mellom ÅDT/tungtrafikkfordeling og ulykkesforekomst/utfall?
- Hvordan påvirker trafikanters frykt for lukkede rom ulykkesforekomst/utfall?
- Hvordan påvirker ÅDT/tungtrafikkfordeling hastighetsvariasjon og farlige forhold?
- Hvorfor skjer de fleste ulykkene i innkjørings- og utkjøringssonene?
- Hvor følsom er tunnelkonseptene for ulike brannscenarier (hva kan trekkes ut fra erfaringsdata) med hensyn til skadegrader?
- Hvilket potensial for storulykker bør legges til grunn for designet av Rogfast?

Store utbyggingsprosjekter planlagt etter 2006 inkluderer mange og komplekse tunneler, for eksempel Oslopakke 3, Opprustningsprogrammet av eksisterende tunneler og Ferjefri E39. De mange og store prosjektene sammen med relativt hyppige forekomster av branner siden 2011 har medført at Statens vegvesen har blitt utfordret på sikkerhetsnivået i norske vegtunneler. Statens havarikommisjon for transport er gjerne den største eksponenten for kritikk mot SVVs risikostyring.

TØIs kartlegginger av branner og studie av brannutsatte tunneler (Nævestad, 2013) er deler av kunnskapsgenereringen i Statens vegvesen. Nævestad fant at risikoen for kjøretøybranner i vegtunneler påvirkes mest av antall meter med stigning på over 7 %, etterfulgt av tungbil-ÅDT. Oslofjord-, Byfjord-, Bømlafjord-, Eiksund- og Hitratunnelen er de mest brannutsatte tunnelene og de har ifølge Nævestad fire ganger flere branner enn ikke-brannutsatte undersjøiske vegtunneler.

Risikoanalyser er beslutningsstøtteverktøy som både sier noe om sikkerhetsnivå og hvilke tiltak som kan redusere risikonivået. Svært ofte blir resultatene oppfattet som uttrykk for tunnelens egenskaper og tilstand, og derigjennom et underlag for å dokumentere at akseptabel risiko er oppnådd. Det er en del av fortolkningen av risikoanalyse, men det er også viktig å få frem analysens funksjon som et diskusjonsgrunnlag hvor kunnskapen og modellene som ligger til grunn drøftes. Først da blir risikoanalysen et verktøy i et sikkerhetsarbeid som stadig reiser spørsmål ved farlige forhold i tunnelen og den relaterte reguleringen. Sannsynlighetene er da et uttrykk for usikkerhet om hva som kan skje i fremtiden, nærmere bestemt hvor trolig det er at en brann i tungbil vil inntreffe.

Problemstillingene for dette notatet er dermed å gi anbefalinger til:

- Hvordan tilnærme seg sannsynlighet for brann i tunge kjøretøy i norske vegtunneler?
- Hva uttrykker sannsynlighet for brann i tungbil i en gitt tunnel?
- Hvordan bør Statens vegvesen presentere sannsynligheter for brann i tungbil i en gitt tunnel?
- Hvilke underliggende modeller bør utredes nærmere for å gi et best mulig kunnskapsnivå for å sette sannsynligheter for brann i tungbil i en gitt tunnel?

Vi har dermed avgrenset oss til sannsynligheter som verktøy i tunnelsikkerhetsarbeidet.

## 2 Begreper og teoretiske fundament for risikoinformert styring

Etter å ha jobbet med risiko og sikkerhet i mer enn 20 år, og en vesentlig del av disse opp mot transportsektoren, er det etter vårt syn et gjennomgående trekk at ansatte i transportsektoren som jobber med sikkerhet og beredskap har stor skepsis til akademikere på dette feltet. Spesielt gjelder dette komplekse risikovurderinger i tunnelsikkerhetsarbeidet. Den teoretiske «verden» er ikke i stand til å kommunisere med den praktiske og vice versa. Denne utfordringen mener vi står sterkt, og dermed blir det viktig å finne ut hvordan begrepene, metodene og modellene kan brukes på en bedre måte i sektoren. Hvor kritiske er disse for omfanget av bruken av analysene? Står vi ved et markant skille nå med innføring av ny veileder for risikovurderinger i Statens vegvesen?

Geir Sverre Braut peker på interessante trekk i det «utvidete risikobegrepet», som har fått fotfeste innenfor flere områder i det norske samfunnet (petroleum, samfunnssikkerhet), hvor risiko handler om usikkerhet om fremtiden. Han skriver (Braut 2016, s. 107): «Når det handlar om risiko i form av framtidige utfall, er det ut frå eit utvida risikoomgrep lite rimeleg å leggja til grunn ei vurdering av resultatet av ei avgjerd som det vesentlege kriteriet for om avgjerda var god eller dårleg. I lys av eit utvida risikoperspektiv, er det kor vidt ein har skaffa seg og brukt tilgjengeleg informasjon på ein forsvarleg måte som

er det interessante. Altså om ein har svart på ein tilfredsstillande måte på Althaus'1 spørsmål:

- What is the nature of the uncertainty faced?
- What knowledge is brought to bear on this uncertainty?"

Slaget står nå om usikkerhetsbegrepet. John Adams (1995) skrev i boken «Risk» at verden bare har sett begynnelsen av kampen om begrepene og forståelsen av sikkerhetsstyring. Kampen om risiko og sikkerhet, og nå usikkerhet er «big business» og det tiltrekkes mange som både skal overgå hverandre i produkter, i analysemetodikker, i forståelser av hva som er farlig og ikke, osv. Flere av begrepene er kontroversielle i forskningslitteraturen. Relaterte tenkninger (teorier) om risikoinformert styring er også i endring<sup>2</sup>.

## 2.1 Statens vegvesen sine rammebetingelser for risikoinformert styring

Tunnelforskriftens § 10 pålegger Statens vegvesen å gjennomføre en risikoanalyse ”etter en detaljert og godt definert metode som er i samsvar med den beste praksis som foreligger”. §10 sier ingenting om formålet med en slik analyse. Men ved å legge til grunn § 1 som sier at; ”Formålet med forskriften er å sikre lavest tillatte sikkerhetsnivå for trafikanter i tunneler ved krav til å forebygge hendelser som kan sette menneskeliv, miljøet og tunnelanlegg i fare og til å sørge for vern i tilfelle ulykker”, vil rammene for risikoanalysen være gitt. Det blir da opp til Vegdirektoratet å påse at beste praksis metode blir anvendt til formål og problemstillinger som vil koples til forskriftens overordnede mål. Likevel er det uklart hva som menes og det må gi grobunn for usikkerhet om innholdet av analysene og om hva som aksepteres av EFTAs overvåkningsorgan. En tolkning er at risikoanalysen skal bidra til å identifisere laveste (tillatte) sikkerhetsnivå for trafikanter i tunneler (§1), og forebygge hendelser og alvorlige konsekvenser, men mer konkrete problemstillinger er vanskelige å trekke ut av forskriften.

Selv om håndboken i Sikkerhetsstyring ikke har blitt implementert i Vegvesenets styringssystem, sier den noe om Statens vegvesen, Vegdirektoratet (SVV) sin tenkning omkring risikoinformert styring. SVV ønsker seg metodiske verktøy for å løse sikkerhetsutfordringene. SVV skriver: ”Vegmiljøet skal være logisk og lettlest og lede til sikker adferd. Det innebærer at den faktiske sikkerheten ikke bare må vurderes i lys av krav i normaler og håndbøker, men at vi må spørre om trafikantene mottar tilstrekkelig og riktig informasjon om vegens videre forløp, hva de kan forvente seg, hvilket fartsnivå de bør velge osv. De som analyserer vegsystemet må forestille seg hvordan en ukjent trafikanter vil oppfatte vegstrekningen.” (SVV, 2013). Hva betyr dette for hendelsen; brann i tungt kjøretøy i vegtunnel? Risiko og risikovurderinger settes som verktøyet for å

---

1 Althaus, Catherine E. (2005). A Disciplinary Perspective on the Epistemological Status of Risk. *Risk Analysis*, 25(3), 567-588.

2 Dette faktum er viktig også i forståelsen av sannsynligheter som begrep og verktøy, men vi avgrensner vår fremstilling til det vi oppfatter er rådende tenkning om risikostyring i Statens vegvesen.

beskrive og fortolke sikkerhetsnivå og beskyttende barrierer også i forhold til denne hendelsen.

Risiko blir beskrevet slik: *”Når vi snakker om risiko dreier det seg alltid om hva som kan skje i framtida. Det er et fenomen vi har begrenset kunnskap om og som derfor er forbundet med usikkerhet. Et utvidet risikobegrep inneholder flere komponenter enn sannsynlighet og konsekvens, nemlig usikkerhet om bakgrunnskunnskap og tilfeldige variasjoner (epistemisk og aleatorisk usikkerhet). Disse komponentene er viktige å ha med når risikoen ved en aktivitet eller et prosjekt skal presenteres.”* (SVV, 2013). En slik definisjon av risiko er vanskelig å benytte i egne analyser og ikke minst i kommunikasjon med andre. SVV definerer sin forståelse av risikovurderinger på følgende måte:

*”Risikovurderinger gjennomføres for å skaffe seg oversikt over risiko knyttet til mulige prosjekter, tiltak eller aktiviteter på en systematisk måte. En risikovurdering viser ikke bare hva de sikkerhetsmessige konsekvensene blir i form av ulykkeskostnader eller antall drepte og skadde, men også hva som er de største bidragsyterne til risiko (sikkerhetsproblemene). Det gir et grunnlag for å finne eventuelle risikoreduserende tiltak.”*

Hensikten med risikovurderinger er å hjelpe beslutningstakere til å ta et bevisst valg av risiko ved at de sikkerhetsmessige konsekvensene avveies mot andre konsekvenser som kostnader, framkommelighet og miljøhensyn.

*”En risikovurdering består av en risikoanalyse og risikoevaluering. Risikoanalysen skal si noe om sannsynligheten for uønskede hendelser og mulige utfall av disse. I presentasjonen av resultatene skal det alltid stå hvilken kunnskap vurderingene bygger på. Risikoen kan presenteres kvantitativt basert på modeller og statistikk, beskrives verbalt basert på kvalitativ kunnskap eller kategoriseres etter forhåndsdefinerte intervaller for sannsynlighet og konsekvens. Risikoanalyseresultatene skal alltid drøftes med hensyn til usikkerhet og sensitivitet for endringer i forutsetningene.”* (SVV, 2013). Håndboken avsluttes med en beskrivelse av anvendelsesområder for blant annet risikovurderinger som innebærer; Kommunedelplan, reguleringsplan, tunnelplan, anleggsarbeid, drift og vedlikehold av veg, fravik, faseplan for trafikkomlegging, eksisterende tunneler, regelendringer, trafikkregulerende tiltak, og trafikant- og kjøretøytiltak.

## **2.2 Vesentlige begreper i arbeidet med risikoinformert tunnelsikkerhetsstyring, og den underliggende tenkningen**

Vi starter denne fremstillingen fra den tiden hvor det offentlige så behovet for risiko- og sårbarhetsanalyser som del av reguleringsregimet, dvs. starten av 1990-tallet. Allerede da konstaterte Stephen R. Watson at «The essential purpose of a Probabilistic Safety Analysis is to express uncertainty about possible future damaging events in terms of probabilities» (Watson, 1994, p. 261). Perspektivet hans var komplekse, men avgrensede systemer, så som oljeinstallasjoner i Nordsjøen, kjernekraftverk, kjemiske fabrikker, lagring av nukleært avfall osv. Vi vil hevde at transportsektoren og mange av tunnelene er komplekse systemer. Kompleksiteten krever en årvåkenhet og systemforståelse hos

ansvarlige for trafikksikkerheten i tunnelen, som kun kan møtes med tilpassede verktøy. Risikoinformert styring er en av flere mulige tilnærminger til dette. Nedenfor diskuterer vi begrepene risiko og sannsynlighet, som ligger til grunn for gjeldende styrende dokumenter.

### 2.2.1 Risiko

Tunngbilbranner i tunnel inkluderer flere myndighetsaktører enn Statens vegvesen. Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB) har en betydelig rolle fordi de regulerer dimensjoneringen av den norske brann og redningstjenesten. Arbeidstilsynet sine forvaltningsoppgaver i forbindelse med arbeidsmiljøloven og HMS-forskriften er vesentlige for hvordan transportørene tilpasser seg sikker tunnelkjøring.

Risikobegrepet er således svært viktig i tunnelsikkerhetsarbeidet. Det er målet på grad av sikkerhet i tunnelen og metodikken for risikovurdering er måleverktøyet. Dette verktøyet er ikke perfekt og har mange svakheter, det vil si at det er ikke mulig å si hvor nøyaktig verktøyet måler og det eksisterer et utall av begrepsforståelser. Vi kan si at den «ingeniørmessige» tilnærmingen til risiko definerer risiko som kombinasjon av sannsynlighet og konsekvens, mens den mer konstruktivistiske tilnærmingen er knyttet til personers og gruppers vurdering, og definerer risiko som hendelser, utfall og usikkerhet forbundet med hva disse vil bli. I begge forståelsene spiller sannsynlighetsteori en stor rolle, mens den sistnevnte er fokusert på å trekke inn alle aspekter av usikkerhet. Den ingeniørmessige tilnærmingen er også forbundet med usikkerhet, men her neglisjeres ofte usikkerhetsvurderinger i estimatene. Aven (2007) er avvisende til den ingeniørmessige tilnærmingen til risikobegrepet. Likevel er Aven kommet til at risiko er en ontologisk<sup>3</sup> størrelse (Aven, 2014). Aven møter store vitenskapelige utfordringer når han skal tilordne noe av risikobegrepet sannheter i verden, mens andre deler av begrepet er rene konstruksjoner.

Solberg og Njå (2012) har analysert ontologien av risikobegrepet og funnet at uansett kunnskapsforståelser har ikke risiko noen ontologi, det vil si at risiko eksisterer ikke. Derfor er all presentasjon av risiko kunnskapsbasert. Analytikeren har selv definert risikobegrepet.

### 2.2.2 Sannsynlighet

Sannsynlighetsdimensjonen er vanskelig, og har vært det i lang tid i forbindelse med risikoanalyser. Norsk olje og gassindustri og andre høyrisiko-industrier innførte risikobasert regulering rundt 1990, og da i kjølvannet av Piper Alpha katastrofen. Selv om industrien allerede hadde 10 års erfaring med omfattende risikoanalyser, såkalte totalrisikoanalyser, ble risikoanalysen på 90-tallet tatt inn på mange andre områder også.

Stephen R. Watson (1994) analyserte sannsynlighetsbegrepet i forbindelse med risikoanalyser. Målet til Watson var å validere en «realist»-tilnærming til sannsynligheter i kvantitative risikoanalyser, såkalte PSAs (Probabilistic Safety Analysis). Realisttilnærmingen til sannsynligheter ser sannsynlighetsbegrepet som en egenskap ved verden, som en hvilken som helst annen fysisk størrelse (vekt, styrke, lengde). Watson sin analyse

---

3 Ontologi – læren om det som er eller finnes

er relevant for Statens vegvesen sitt fokus på alvorlige tunnelbranner i dag. Watson analyserte alle definisjonene av sannsynligheter som i 1994 var kjent blant forskere, ut fra sin vitenskapsteoretiske plattform:

### **2.2.2.1 Klassisk fortolkning av sannsynlighet**

*Klassisk fortolkning av sannsynlighet* – et sett av like sannsynligheter for utfall, for eksempel i spill (lotto, kortspill, terning). For systemene Watson så på, og i alle systemer i den virkelige verden, så som tunneler, er det ikke mulig å forutse alle utfall, og derigjennom like sannsynligheter for disse.

### **2.2.2.2 Relative frekvenser**

Relative frekvenser – grenseverdien av antall frekvenser av hendelsen fordelt på totalt antall forsøk når antall forsøk går mot uendelig. Det vil si at vi må tenke oss vår tunnel i et uendelig antall år og se hvor mange ganger, for eksempel brann i tungt kjøretøy inntreffer. Denne fortolkningen må også avvises fordi det er ikke mulig å utføre et uendelig antall forsøk, og det er bare mulig å etablere sannsynlighetsutsagn om utfall av eksperimenter som er repeterbare. Å definere et repeterbart eksperiment, for eksempel når vi beskuer en tunnel, er ekstremt vanskelig. Hvordan fortolke et farlig gods scenario i dette perspektivet? Problemet er input sannsynlighetene, hvordan kan vi si at en tungbilførers atferd knyttes til relativ frekvens for en hendelse som inntreffer en gang pr 1000 år. Vi har ingen mulighet til å beskue de neste tusen årene. Watson måtte avvise denne fortolkningen.

### **2.2.2.3 Apriori teoriene – «reasonable degree of belief»**

Apriori teoriene – «reasonable degree of belief». Denne fortolkningen var oppløftende når den kom ut ca. 1920. Sannsynligheten for en hendelse gitt relevante data er et mål på graden dataene logisk representerer hendelsen, for eksempel en brann i tunge kjøretøy i tunnel. Det er objektivt i det at det er ikke avhengig av den enkeltes vurdering. Så lenge analysen er riktig vil alle få likt svar. Problemet med denne fortolkningen var at Watson ikke fant praktiske anvendelser. Det var ikke mulig å beregne disse sannsynlighetene.

### **2.2.2.4 Subjektive sannsynligheter**

Subjektive sannsynligheter – er et mål på individets grad av tro. I denne fortolkningen forutsettes det at sannsynligheter ikke eksisterer, det er den enkeltes grad av tro som uttrykkes ved et tall mellom 0 og 1. Sannsynlighetene oppdateres når ny informasjon kommer inn i henhold til Bayes teorem. Likevel, en slik tilnærming kan aldri støttes av realist-tilnærmingen, hvor forutsetningen er at det finnes sanne underliggende sannsynligheter.

### **2.2.2.5 Upersonlige sannsynligheter**

Upersonlige sannsynligheter – relativt nær beslektet med apriori-teoriene, men hvor det etableres to begreper; *ideell* og *perfekt* informasjon. Ideell informasjon handler om å samle all mulig informasjon så langt at det kun er ikke-reduserbar usikkerhet tilbake. Da er ideen at det vil fremkomme et eksakt tall forskjellig fra 0 og 1 knyttet til spesifikke hendelser. Perfekt informasjon ville ha løst alle usikkerhetene. Watson klarte heller ikke her å finne grunnlag for denne teorien, hvor skillet mellom perfekt og ideell informasjon

ble vanskelig, og dersom gitt ideell informasjon stod han igjen med spørsmålet om hvordan den informasjonen skulle analyseres. Men, gjennom denne tilnærmingen satte Watson fokus på kvaliteten av datamaterialet som var del av risikoanalysene.

### 2.2.3 Watsons konklusjon

Etter å ha analysert noen flere definisjoner i en realist-tilnærming gav Watson opp forsøket. Han konkluderte at sannsynligheter kunne ikke fortolkes i et realist-perspektiv. Det måtte en helt annen fortolkning til. Watson hevdet at risikoanalysen var ikke noe annet enn uttrykk for argumenter. Det er her styrken til risikoanalysen er, det er et verktøy for å presentere komplekse argumenter, basert på omfattende datamaterialer og (ekspert-) vurderinger.

Ved at Watson avviste realist-tilnærmingen var det ikke lenger mulig å etablere valide modeller, men heller fornuftige og troverdige modeller. I så måte kopler Watson sin teori til kvalitetsparametere i kvalitativ forskningsmetodikk (Lincoln & Guba, 1985). Datamateriale og modeller i risikoanalysene må være sporbare, modellene må kunne underlegges vurdering, scenarioene må være troverdige, dvs. bygge på logiske sammenhenger osv. Watson ser for seg at for kritiske beslutninger, for eksempel etablering av høyrisikoindustri, utbygging av samferdselssystemer, byutvikling, behandlingsregimer i helsevesenet osv. må beslutningene støttes av grundige risikoanalyser. Analysene vil kunne representere enkelte interessenter, og Watson mener at i slike tilfeller må det komme tilsvarende analyser fra andre involverte interessenter. Det finnes flere eksempler på kontroversielle beslutninger som har vært gjenstand for flere analyser. I Rogaland har utbyggingen av Risavika havn og flyttingen av NOKAS tellesentral til Frøystad like etter ranet på Domkirkeplassen vært eksempler på slike beslutninger. Problemet har vært at disse analysene har i svært liten grad blitt diskutert for å finne beste løsning. Beslutningsprosessene har vært lukket. Et tilsvarende beslutningsproblem var flyttingen av Luftfartstilsynet fra Oslo til Bodø midt på 2000-tallet (Njå & Solberg, 2010). Heller ikke her har analysene blitt grundig diskutert, selv om det var langt større åpenhet.

I forhold til Watsons tilnærming til sannsynligheter vil Statens vegvesen sin oppgave være å få frem alle argumenter som kan gi det beste grunnlaget for beslutninger og handlingsvalg, i tråd med idealene i kommunikativ planlegging. Watsons ideer kan danne grunnlaget for SVVs tilnærming ved at: «PSA should be interpreted as reasonable argument, rather than an objective representation of truth. With this interpretation, validation and expert choice become more tractable problems, and the use of PSA as a tool in a dialectical debate over safety becomes an attractive possibility.» (Watson, 1994, p. 269)

## 3 Kvantitativ tilnærming til sannsynlighetsbegrepet

Tunneler er utsatt for brannrisiko, men hvordan skal vi tilnærme oss hyppighet, variasjon i antall og omfang av branner? Hvilke sannsynlighetsangivelser er relevante for ulike formål med presentasjoner av risiko? Hvilke modeller er riktige å bruke og til hvilken

tid? Det er mange spørsmål knyttet til angivelse av risiko, hvor de kvantitative modellene har sterke tradisjoner og stor definisjonskraft.

“Though the primary goal of stochastic modelling is to provide insights and not numbers, numerical answers are often indispensable for gaining system knowledge” (Tijms, 1994, p. ix). Denne refleksjonen er dekkende for hva vi kan få ut av kvantitative analyser. Tolkningen av tall er verdiløs uten at vi kjenner modellene og datamaterialet bak. Nævestad et al. (2016) sine data viser at det inntreffer i gjennomsnitt 24 branner per år i norske tunneler (fra 2008-2015, gjennom 1134 km tunnel). Her kategoriseres alle tunneler likt. Gjennom de åtte registrerte årene varierer antallet fra 17 til 30 branner per år. Av disse brannene var det veldig få branner i tyngre kjøretøy (>3,5 t). Disse fordelte seg slik:

*Region øst* – 17 branner på 8 år, hvorav 5 i Operatunnelen, 5 i Oslofjordtunnelen og 2 i Tåsuntunnelen, mens de 5 siste var forskjellige tunneler.

*Region sør* – 4 branner på 8 år fordelt på forskjellige tunneler.

*Region vest* – 24 branner på 8 år, hvorav 3 i Mastrafjordtunnelen, 2 i Bømlafjordtunnelen, 2 i Gudvangatunnelen, mens de siste 17 var i forskjellige tunneler.

*Region midt* – 11 branner på 8 år, hvorav 4 i Hitratunnelen, 2 i Stavsjøfjelltunnelen og 2 i Eiksundtunnelen, mens de 3 siste var i forskjellige tunneler.

*Region nord* – 7 branner på 8 år fordelt på forskjellige tunneler.

Høye brannintensiteter er registrert i de to brannene i Gudvangatunnelen, Brattlitunnelen, Follotunnelen, Skatestraumtunnelen og i to branner i Oslofjordtunnelen. I Follotunnelen døde fører av vogntog. I de øvrige omkom det ikke noen personer, mens det totalt har omkommet 5 (7) personer hvor det også har vært brann. Følgende er hentet fra listen beskrevet i Nævestad et. al (2016), og senere sjekket opp mot annen dokumentasjon:

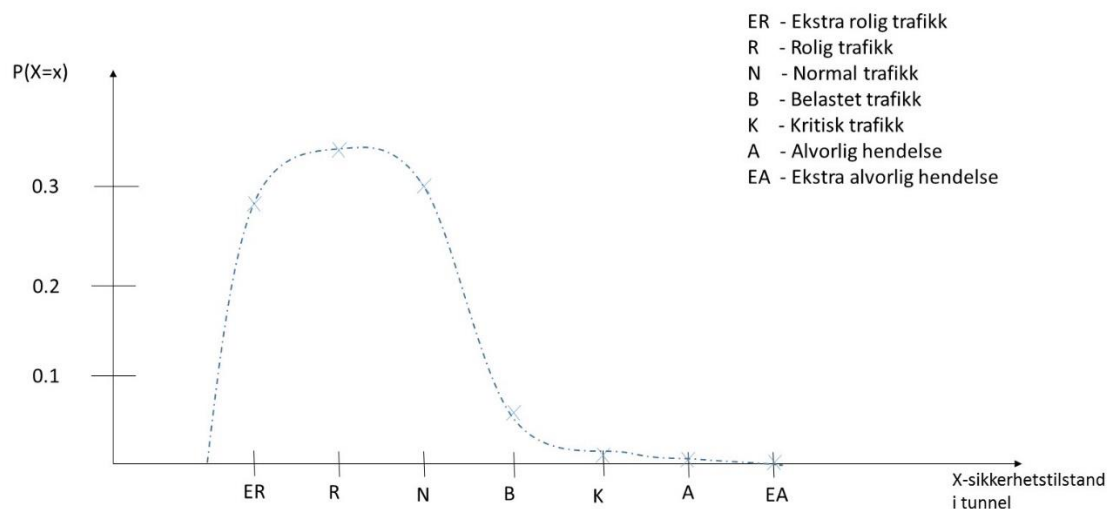
- I 2009 omkom en person i kollisjon mellom personbil og lastebil i Stavsjøfjelltunnelen (natt til lørdag - personbil over i lastebilens kjørebane – fører i 20-årene omkom). Brann i personbil som ble raskt slukket.
- I 2010 omkom en person i en møteulykke mellom vogntog og personbil i Hordeviktunnelen. Føreren av personbilen omkom. Begge kjøretøyene ble antent, men brannen ble raskt slukket.
- I 2010 omkom en litauisk fører av vogntog som kjørte i tunnelportalen i Follotunnelen. Føreren ble funnet mellom tunnelveggen og kjøretøyet, og han døde av røykskader og skader fra kollisjonen.
- I 2011 inntraff en brann i et vogntog i Oslofjordtunnelen som medførte store røykskader for trafikanter. SSB-dataene viser lettere skader på personer, men det er feil.
- I 2011 omkom to personer i en møteulykke mellom buss og personbil. Hendelsen skjedde på utsiden av Vassendatunnelen. Det var røykutvikling i personbilen, men ingen brann i noen av kjøretøyene. Hvorvidt denne hendelsen bør inngå i statistikken kan diskuteres.



- I 2012 tok det fyr i bakhjulene på en lastebiltilhenger i Mastrafjordtunnelen. To personer fikk lettere røykskader (Haugesund avis), mens det er angitt alvorlig personskade i uhellsdataene (SSB).
- I 2013 omkom en person i møteulykke mellom personbil og vogntog i Storesandtunnelen. Vogntoget ble antent. Føreren av personbilen omkom.
- I 2013 omkom en motorsyklist etter kollisjon med lastebil i Naustdaltunnelen. Det skal ha oppstått mindre brann som ble raskt slukket.
- I 2013 intraff brannen i Gudvangatunnelen, som ga mange røykskadde. Flere ble karakterisert som alvorlig skadde.
- I 2015 fikk vi den andre brannen i Gudvangatunnelen med fem røykskadde personer.

Nævestad har analysert hendelser i tunneler med høy tetthet av branner, hvor han beskriver Oslofjord-, Byfjord-, Bømlafjord-, Eiksund- og Hitratunnelen som de mest brannutsatte tunnelene. Når det gjelder utviklede branner er bildet litt mer nyansert og Byfjordtunnelen, for eksempel, har ikke hatt noen branner i den beskrevne perioden 2008 - 2015. Nævestad et al (2016) ser samlet på tilløp til branner og branner, hvor kriteriet for observasjonene er at tunnelen har vært stengt. Tilløp til branner er i utgangspunkt røykutvikling, men behøver ikke å være annet enn at VTS-operatører har hatt mistanke om røyk. Videre er det heller ikke gjort forsøk på å analysere koplinger mellom tilløp til branner og fullt utviklede branner, og om tilløp til branner er en god indikator for vurderinger av sannsynlighet for brann i tyngre kjøretøy. Dette vil være viktige avklaringer Statens vegvesen bør vurdere i tiden fremover. Dataenes pålitelighet og validitet er i så måte et viktig tema i Statens vegvesens arbeid for å skape bedre kunnskap.

La oss tenke oss at vi observerer en av de mest brannutsatte tunnelene hver time i et år for å kartlegge sikkerhetstilstanden, for eksempel Oslofjordtunnelen. Da vil vi sitte med 8760 observasjoner og dersom vi var ti personer fordelt i tunnelens lengde ville vi hatt 87600 observasjoner. Da kunne vi tenke oss at vi fikk ut følgende fordeling:



Figur 1. Illustrasjon som viser tenkt sannsynlighetsfordeling for sikkerhetstilstand i tunnel

For å holde oss til eksempelet tenker vi at vi går fra ekstremt rolig; nesten ikke trafikk og de få kjøretøyene som oppholder seg i tunnelen kjører veldig fint (nattestid); til rushtrafikk (belastet) og med kritiske trafikksituasjoner (K), så som nestenulykker, stans av kjøretøy i tunnelen og branntilløp. De alvorlige hendelsene (A) er ulykker med lettere personskader og store materielle skader for eksempel fra branner, mens de ekstra alvorlige (EA) forbindes med alvorlig skadde i trafikkulykker, dødsulykker, og branner i tunge kjøretøy som også kan eskalere til storulykker som vi har sett i europeiske tunneler (Mont Blanc, Tauern, St. Gotthard).

Fordelingen er vist i figur 1, og dersom vi også hadde gjort det samme neste år ville venstresiden sett veldig lik ut (store talls sterke lov – forutsatt at vi har samme forståelse av x-ene). Det er halen på høyresiden som vil variere veldig, og som gjør det svært vanskelig å tilordne en frekventistisk fortolkning. Når vi skal jobbe med risiko og sannsynligheter må vi endre fullstendig forståelsen, og basere oss på kunnskap. Det er kunnskapsgrunnlaget som vil være bestemmende for kvaliteten av modellen og presentasjonen av resultatene vi fremmer i analysene. En slik fortolkning splitter ikke lenger usikkerhet i aleatorisk usikkerhet og epistemisk usikkerhet, men ser på modellering av sannsynlighet eller sannsynlighetsfordelinger for branner i tunge kjøretøy i tunnel som presentasjon av usikkerhet om fremtidige utfall, gitt vår kunnskap.

### 3.1 Det nasjonale perspektivet

Vi kan tenke oss at for det nasjonale perspektivet er det et aggregert risikobilde som er interessant. Formålet med dette risikobildet kan være bidrag til nasjonalt risikobilde, det kan være utvikling av krav i forskrifter og veiledninger, eller et underlag for å diskutere risikonivå og vurderinger med regioner og konkrete tunneler.

Hver enkelt tunnel gir sine bidrag og vi får et bilde som beskrevet innledningsvis med ca. 24 branner i året (snittet). Dette kan vi så normalisere på tunnelens lengde og antall kjøretøy som går gjennom tunnelen. Vi legger til grunn Poisson-fordelingen. Lambda,  $\lambda$ , er parameteren i fordelingen som er en konstant som beskriver antall hendelser per tidsenhet, for eksempel antall branner per år, og da ser vi gjerne på historiske data. Vi får dermed uttrykt gjennom  $\lambda$  et aspekt av fordelingen, og ved å variere parameteren utspennes en familie av sannsynlighetsfordelinger (for hver  $\lambda$ -verdi har vi en fordeling).

Poisson-fordelingen:

$$P(X = x|K) = \frac{(\lambda t)^x}{x!} e^{-\lambda t}, \quad E(X) = \lambda t, \quad \text{Var}(X) = \lambda t,$$

Variabelen X er antall branner. Det vanlige er å beskrive tiden over det neste året.

Parameteren  $\lambda$  volder utfordringer, dersom vi ønsker en finere tilpasning til virkeligheten.  $\lambda$  kan variere med årstider, tid i uken og i døgnet, hvor vi befinner oss i tunnelen og brannintensiteter, altså må fordelingen av tunnelbranner forstås som inhomogen Poisson-prosess. Kunnskapen K som vi legger inn i analysen må alltid synliggjøres, og det forventes at dersom kunnskapen er avgrenset til historiske data vil en vurdering av materialet og begrunnelse av det valget alltid måtte gjøres. Det samme gjelder valg av annen type kunnskap som benyttes i vurderingen. Det er her analytikerne viser hva som

inngår i kunnskapen,  $K$ , og Poisson-modellen representerer analytikerens fortolkning av sannsynlighet for brann i tunge kjøretøy i norske tunneler.

Nelisse og Vrouwenvelder (2016) har med bakgrunn i en hollandsk modell for å angi sannsynligheter, forsøkt å evaluere inputsannsynligheten for brann i tunnel, satt til  $2,2 \cdot 10^{-9}$  per kjøretøykm. Ut fra observerte data har forfatterne etablert et uttrykk for raten av branner beskrevet med størrelse over spesifikke terskler i megawatt (MW). Basert på en rimelighetsfunksjon (likelihood) og apriori sannsynlighetsfordeling over gjennomsnittet av brannintensitet ( $b$ ) og sannsynligheten for brann i kjøretøy ( $p$ ), har forfatterne gjennomført Bayes oppdatering og funnet at for nederlandske tunneler viser det seg at reell input sannsynlighet er over 10 ganger lavere enn det som er benyttet i den opprinnelige hollandske modellen. Forskerne fra TNO mener at de også har vært konservative i sine analyser, og at det er god grunn til å operere med input sannsynlighet for brannstørrelser  $> 25$  MW, i det hollandske programmet «QRA-tunnels» ned mot  $1,5 \cdot 10^{-10}$ , som de også mener vil være aktuelt for andre europeiske land.

Det er mange forutsetninger og antakelser i denne typen beregninger. Resultatet kan kanskje være en god pekepinn på antall hendelser i året med anslått trafikkarbeid i hollandske tunneler. Det har jeg ikke sjekket, men forfatterne av artikkelen har ikke vist begrunnelser for sine forutsetninger og valg av størrelser. Sammenlignet med norsk tenkning om skadegradstetthet, vil det være nær sammenheng til Nelisse og Vrouwenvelder sitt arbeid ved at det også der kombineres et generelt og spesifikt bidrag til samlet resultat. Fokuset er imidlertid da ensidig på resultatene og har som mål å overbevise om at man er over eller under terskler. Det er i seg selv i sterk kontrast til idealene i norsk nullvisjon og forutsetningen om sterk fenomenkunnskap om hva modellene representerer.

### 3.2 Det lokale perspektivet – tunnel for tunnel

Selve kravet til risikoanalyser er knyttet til tunneler lengre enn 500 m. Det vil si at det er disse tunnelene som skal analyseres for risiko. Det er etter hvert kommet mye empiri på hvordan disse analysene er gjennomført, hvor mange av dem er utført med kvantitative analyser i form av TUSI-beregninger, hendelsestre og bayesianske nettverk<sup>4</sup>. Analysene tar i noen grad med brann i tunge kjøretøy, men da skjer det vanligvis i semikvantitative analyser, og presenteres i risikomatriser. Noen hendelsestre-analyser finnes, og brann i tyngre kjøretøy er basert på frekvensvurderinger av initierende hendelser, som kan være brann i tungt kjøretøy angitt med en intensitet fra 20 MW til størrelser over 100 MW.

Presentasjonen i innledningen, og spesielt figur 1, viser at det er stort behov for undersøkelse og modellering av brannhendelser for å øke kunnskapen om hvorfor branner inntreffer i den konkrete tunnelen og hvordan slike hendelser kan utvikle seg. En sterkere kopling til de lokale betingelsene og lokal trafikk, en systematisk innsamling av data og bruk av eksperter med teoretisk og praktisk innsikt i trafikanter og kjøretøy er påkrevd. Dette er generelle anbefalinger i lærebøker om risikoanalyse, og vi går ikke nærmere inn på det her. Vi er overbevist om at sannsynligheter for brannhendelser i tunge kjøretøy må

---

<sup>4</sup> Statens vegvesen har erfaringer på alle disse områdene

utvikles fra modeller av hendelser og risikofaktorer på lavere nivå, hvor modelleringsarbeidet må skje for den spesifikke tunnelen som analyseres.

Det betyr at vi ikke anser en komparativ løsning, som den spanske metodikken (idom, 2017) bygger på, som særlig relevant. Komparasjon mot et ideal er en praksis som den norske byggebransjen har benyttet siden innføringen av funksjonsbasert regelverk i 1997, og praksisen der har gitt tilpasninger som ikke kan vurderes som risikovurderinger. Det er suboptimaliseringer som har til hensikt å godkjenne avvik/fravik fra preaksepterte løsninger (Bjelland, 2013).

Vår tilnærming er å sikre så god kunnskap som mulig. Vi vet at forhold knyttet til tunnelens geometri i kombinasjon med trafikale betingelser og driftsmessige utfordringer påvirker hverandre i forhold til ulykkesforekomst. Utfordringen er dermed hvordan Statens vegvesen skal optimalisere designet av kunnskapsgenereringen. Dagens kunnskapsnivå bør forbedres betraktelig, men hva slags indikatorer man skal kartlegge og studere er fortsatt ikke entydig. Vi ser åpenbart behov for:

- *Tilstand tunge kjøretøy* (dette kunne vært løst ved å gå systematisk til verks på kontrollsteder, for eksempel Krossmoen eller Sokn i Rogaland, hvor representative utvalg av kjøretøy kan kontrolleres).
- *Energimengder i gods/kjøretøy*, inklusiv farlig gods kan sjekkes samtidig med punktet over.
- *Trafikkflyt og stans* – betydning for eskaleringspotensial
- *Trafikkmengder og fordelinger* av tunge og lette kjøretøy
- *Spesielle trafikkforhold*, for eksempel rush og opphopninger
- *Unaturlige avvik* i tunnelen

Listen er ikke uttømmende og her bør Statens vegvesen se på muligheter. De bør vurdere en prosess hvor risiko drøftes i samspillsonen mellom universitet, vegvesenet, brann- og redningstjenesten, og tungbilnæringen.

For tunneler under planlegging bør modellering av sannsynligheter ses opp mot tilsvarende nylig åpnete tunneler. Vi mener at det er eksplorative tilnærminger som må få vekt, hvor data skal spille viktig rolle, men kun i forhold til andre studier og ekspertvurderinger av høy kvalitet. For eksempel er forskning på brannutvikling i tunge kjøretøy et fagområde som bør vies spesiell oppmerksomhet<sup>5</sup>.

Hvorvidt det etterstrebes komplekse bayesianske nettverk eller enkle feiltrær for å få frem sannsynligheter for brann i tunge kjøretøyer vil bero på formålet med analysen hvor disse sannsynlighetene inngår. TUSI kan også videreutvikles til å indikere sannsynligheter for branner og da også branner i tunge kjøretøy. Et forhold som vi så med å jobbe med TRANSIT-modellen (Schubert, Høj, & Faber, 2011) er at risikoforhold må være etablert i modellen, ellers så faller de ut av hele analyseprosessen. Det er en stor utfordring å

---

5 RISE arrangerer egen forskerkonferanse på dette temaet, se <https://www.ri.se/nyheter/five-fire-vehicles-03102018-04102018>

benytte etablerte kvantitative risikomodeller for nye/eksisterende tunneler som er langt utenfor gyldighetsområdet til modellene.

Vi vil anbefale en langsiktig løsning med bayesianske nettverk, men da vil kravet til observasjoner, registreringer av data og eventuelt maskinlæring være forutsetninger som må medtas. Samtidig må også det bayesianske nettverket bygges for hver analyse for å sikre at kunnskapen blir værende i målgruppen og at analytikernes kunnskap er reflektert i sannsynlighetsangivelsene. Dette er et viktig punkt for bayesianske modeller, betingelser/sammenhenger som finnes i tunnelen fanges ikke opp i analysen dersom de ikke er inkludert i modellen. Et eksempel vi (Borg og Bjelland) kom over var at en tunnel hadde mange flere ulykker enn TRANSIT- modellen beskrev. Dette oppsto pga at det var innkjøring til p-hus og busstopp i tunnelen, som ikke var inkludert i analyse-modellen og ble derfor kun fanget opp fra erfaringsdata for tunnelen (Borg, 2017).

Farlig gods er et spesielt område av sterk bekymring med hensyn til tunnelbrann, kfr. hendelsen i Skatestraumtunnelen. Vi vil trekke en analogi til DSBs krav til risikovurderinger for anlegg brukt til lagring og produksjon av farlige stoffer (Kristiansen, Pappas, & Henriksen, 2017). DSB inviterte konsulentselskaper for å utvikle retningslinjene, som medførte at det sammen med samtykkesøknader skal legges ved omfattende risikovurderinger. Risikovurderingene inneholder fareidentifikasjon (hazard-analyse), etablering av topphendelser (lekkasjer, brannfarlige situasjoner), modellering av lekkasjefrekvenser, spredningsanalyser, modell av tennsannsynligheter og analyse av brann-/eksplosjonshendelser og etablering av risikokonturer. Desto flere scenarier som blir simulert desto mindre usikkerhet involvert, hevder forfatterne bak retningslinjene. Deretter etableres konturer for frekvenser av  $10^{-5}$  -  $10^{-7}$  og enda lavere, koplet mot antatte tålegrenser for mennesker (gitt at det er personer uten klær som blir eksponert). Gjennom denne analysen skal DSB og foretaket som eier anlegget bli enig om hensynssoner i arealplanleggingen og beredskapshensyn. Retningslinjene inneholder mange anbefalinger til predefinerte modeller som raskt kan fjerne seg fra det konkrete systemet som skal studeres, og det anvendes data som ingen har noe forhold til. Det blir en utfordring å kommunisere fornuften bak risikokonturene, som vil være resultatene fra analysen.

Dersom det skal etableres en kvantitativ modell for sannsynligheter for brann i tunge kjøretøy, bør det baseres på underliggende modeller og inngangsvariabler fra en kopling mellom observerte data og ekspertvurderinger. Metode for ekspertvurderinger må inkludere mulige hevrisker og systematiske avvik (bias) som påvirker eksperten uten at vedkommende er klar over det (Njå, Aven, & Rettedal, 1998).

## 4 Kvalitativ tilnærming til sannsynlighetsbegrepet

Denne tilnærmingen står sterkt i Statens vegvesen og alle som bruker/har brukt håndboken for risikovurderinger. Inntrykket er at disse risikovurderingene er sterkere i inngrep med beslutningsprosessene enn de kvantitative analysene (Njå, Vastveit, Abrahamsen, & Eriksson, 2013). Det er selve analyseprosessene som vektlegges og interaksjonene mellom analytikere og beslutningstaker med hensyn til utforming av løsninger. Analyseprosessene inkluderer ofte hazard-samlinger, hvor sikkerhetsproblemer

blir drøftet mellom identifiserte eksperter. Dersom sannsynligheter angis presenteres de ofte i matriser, men mange ganger utelates sannsynlighetsangivelser til fordel for prosatekst og konkrete anbefalinger.

Selv om respondentene i studien fra 2013 uttrykte mange positive erfaringer med disse prosessene, mangler kritiske vurderinger omkring funnene fra analysene. Faren er at prosessedere blir sekretærer og at hazid-møtene blir analysen. Det finnes da i liten grad kvalitetskriterier for analyseprosessen, og i en slik praksis kan det bli innført systematiske svakheter. Det positive med den kvalitative tilnærmingen er at vurderinger kan holdes grove, analytikerne tvinges ikke til å etablere sammenhenger mellom hendelser/variabler de ikke har forutsetninger for å beskrive og de trenger ikke å være presise i sannsynlighetsangivelsene. De vil etablere beskrivelser av scenarier og risikofaktorer som utformere av sikkerhetstiltak eller tunnelrommet i seg selv kan ta inn i grunnlaget uten å trekke inn kvantitative størrelser.

Likevel må de kvalitative vurderingene i like stor grad som de kvantitative bygge på kunnskap, kritisk refleksjon over relevansen av kunnskapen og deres erfaringer som gjør vurderingene relevante. Statens vegvesen må derfor opprettholde kritiske evalueringer av kvalitative tilnærminger til sannsynlighetsangivelser av brann i tunge kjøretøy. Kvalitetskriterier kan gjerne koples mot anbefalinger i Lincoln og Guba (1985), som inkluderer sporbarhet, troverdighet og overføringsverdi. På noe lengre sikt bør det vurderes å etablere en analysemodell som kombinerer kunnskap fra kvantitative studier med kunnskap fra kvalitative analyser, deri inkludert resultater fra ulykkesundersøkelser. De metodiske utfordringene ved å etablere en slik helhetlig modell ligger utenfor rammene for denne rapporten.

## **5      Anbefaling til aktiviteter for å håndtere           modellering av risiko for brann i tunge kjøretøy**

I dette kapitlet presenterer vi våre anbefalinger til Statens vegvesen. Først trekker vi frem våre anbefalinger gitt i et prosjekt om bruken av risikovurderinger vi gjorde i 2013, som baserte seg delvis på eksempler fra tunnelprosjekter. I kap 5.2 spisser vi våre anbefalinger til å dekke punktene vi dro opp innledningsvis, som våre problemstillinger:

- Hvordan tilnærme seg sannsynlighet for brann i tunge kjøretøy i norske vegtunneler?
- Hva uttrykker sannsynlighet for brann i tungbil i en gitt tunnel?
- Hvordan bør Statens vegvesen presentere sannsynligheter for brann i tungbil i en gitt tunnel?
- Hvilke underliggende modeller bør utredes nærmere for å gi et best mulig kunnskapsnivå for å sette sannsynligheter for brann i tungbil i en gitt tunnel?

### **5.1    Anbefalinger fra studie om risikovurderinger i Statens           vegvesen (Njå et al., 2013)**

Vi gjorde en studie av alle Statens vegvesen sine risikovurderinger i 2013 og mener at rapporten er veldig relevant for denne studien også. Mange av de undersøkte casene

handlet om risikovurderinger av tunnelprosjekter, som både er sterkt kvantitativt orientert og andre som er kvalitative analyseprosesser. I kapittel 5.2 gir vi vårt samlede forslag til anbefalinger til Statens vegvesens tilnærminger til sannsynlighet for brann i tunge kjøretøy i tunneler. Nedenfor gis et ekstrakt av våre anbefalinger fra studien fra 2013, og vi refererer til det prosjektet for mer inngående informasjon (Njå et al., 2013).

### **5.1.1 Metodikken bør være tilpasset bestillingen**

Vår anbefaling er at; *fremtidige risikovurderingsprosesser må begrunne sin metodikk i problemstillinger (ofte beskrevet som formål), slik at metodikken er tilpasset bestillingen og problemstillingene utviklet fra den. I dag virker det som at det er metodikken som er fast og forutsettes å være egnet til å løse alle trafikksikkerhetsvurderinger.*

### **5.1.2 Metodenysgjerrighet**

Vi anbefaler at: *SVV initierer et følgeforskningsopplegg ( gjerne med egne ansatte som forskere) som sammenligner to tunnelplanleggingsprosjekter som benytter en kvantitativ tilnærming (den europeiske ånden) og en som bruker en mer kvalitativ tilnærming (for eksempel rv. 23 caset). Det bør alltid være noen som søker forbedringer.*

### **5.1.3 Sikre et robust prosesslederkorps**

*Region sør sin organisering med en håndfull prosessledere (ca. 5 stk) bør etableres i andre regioner for å motta forespørsler og designe risikovurderingsprosesser, samt gjennomføre dem. Vår erfaring er at det kunne vært mye tettere samarbeid på tvers av regioner med hensyn til erfaringsdeling og samordning med hensyn til risikovurderinger. Dagens praksis er veldig individuelt orientert og her behøves nytenkning.*

### **5.1.4 Bestillerkompetanse er viktig**

Vi anbefaler SVV: *å stille krav til kompetanse hos prosjektledere (bestillere av risikovurderinger) med hensyn til sikkerhetsstyring og bruk av risikovurderinger.*

### **5.1.5 Risikovurderinger utfordrer vegnormaler/håndbøker**

Vår anbefaling er at; *det lages et demonstrasjonsprosjekt som viser hvordan risikovurderinger og håndbøker kan tilpasse seg hverandre.*

### **5.1.6 Hva er god trafikksikkerhetskunnskap?**

Basert på våre case ser vi at i Region sør er det etablert grupper av eksperter som går igjen i analyseprosessene. Analyser utført på denne måten skaper en rekke påstander om sikkerhet. Det er vel og bra, men det stiller krav til at påstandene blir fulgt opp slik at det kun får sette seg kunnskap som er kvalifisert. Det er vanskelig i ettertid å avlære ”myter” uten at det er gode kilder som kan anvendes. Faren da er at det utvikles en gruppe som bruker de samme erfaringene, dersom ekspertene ikke selv kvalifiserer sin kunnskapsbase. Her er det to muligheter: 1) *Personer definerte som eksperter må sørge for å oppdatere sin ekspertise, og 2) Vegsystemer basert på risikovurderinger må overvåkes for å avklare om risikovurderingene har gitt ønsket utfall. Det vil si analysenes bidrag til gode beslutninger og at prediksjonsevnen er god.*

### 5.1.7 Erfaringer versus andre kunnskapskilder

Svært få risikovurderinger viser verken kildekritikk eller trekker inn statistikk, granskninger eller vitenskapelige studier som kunnskapsgrunnlag. Generalisert og dokumentert kunnskap ses i liten grad i risikovurderinger. Balansen mellom systematisk tilegnet kunnskap (forskning, studier, datasett, komparative studier med mer) og analyseobjekt-spesifikk kunnskap synes å variere med hvem som er prosessledere.

Vår anbefaling er at; *SVV i sterkere grad trekker inn andre kunnskapskilder i risikovurderingsprosesser. Dette kan være del av planleggingen av hazid-møter, men også i etterarbeidsfasen.* Det fins mye vitenskapelig litteratur om bruk av ekspertvurderinger som kan være verdt et videre studium.

### 5.1.8 God planlegging er kritisk for kvaliteten av risikovurderingen

*Vår anbefaling er at: SVV forbereder innspill til revisjonen av veileder for risikovurdering som kopler problemstilling, planlegging, gjennomføring og beslutninger sterkere sammen.* Prosesslederrollen vil fortsatt være sentral i fremtidig planlegging av risikovurderingene.

### 5.1.9 Risikovurdering som kvalitetssikring eller kreativ kunnskapsgenerator?

Hvordan finner analytikerne frem til risikofaktorer (sikkerhets-problemer) og hva er den underliggende modellen? Virker sikkerhetsfaktorer sammen eller ser de etter enkle kausaliteter? Så langt synes dette å bære preg av sunn fornuft. Enkel kausalitet er ofte valgt og vi ser følgende tendenser;

- Ofte kjente løsninger;
- Vet hvilke hendelser som kommer opp – prosessleder og prosjektleder;
- Kreativitet – ofte de som kommer utenfra prosjektet;
- Egne erfaringer brukes til å finne frem til hendelser;
- Tidligere hendelser i vegsystemet;
- Sjekklistor;
- Erfaring fra tidligere risikoanalyser - ofte de samme som deltar;
- Forbereder seg ved å tenke over mulige hendelser.

*Vår anbefaling er at; SVV reflekterer over den ene strategien (kvalitetssikring) versus den andre (kreativ kunnskapsgenerator) for å se hvordan metodikken best kan tilpasses et ideal.*

### 5.1.10 Vurderingskriterier er ikke operasjonalisert

Vegens utforming skal lede til sikker atferd; og Vegens utforming skal beskytte mot alvorlige konsekvenser av feilhandlinger, er funksjonelle krav som er tilforlatelige. Disse er etablert og omforent, men i liten grad problematisert. Det er dermed implisitt at hazid-deltakerne bes om å ”operasjonalisere” vurderingskriteriene (funksjonskravene) i forhold til spesifikt system og egen erfaring. Vi anbefaler at: *SVV vurderer hvordan vurderingskriteriene skal operasjonaliseres og anvendes i risikovurderinger.*



### **5.1.11 Sannsynlighetsangivelser og validering av risikonivå**

Vår anbefaling er at: *Sannsynlighetsangivelser må relateres til hendelsen som er definert i risikovurderingen og glem validering mot et generelt datasett uten å ha konkret kunnskap om datasettet.*

### **5.1.12 Konsekvensangivelser er vanskelige – bør vi definere ulykker som alvorlige?**

På samme måte som for sannsynlighetsangivelser, er også konsekvensangivelser ofte knyttet til datasett. Elvik og Mysen (1999) har studert politiregistrerte ulykker opp mot sykehusdata og funnet nedslående resultater. Vi anbefaler SVV å *vurdere konsekvensangivelser i risikovurderinger.*

### **5.1.13 Abstrahering av trafikantatferd og vurdering av feilmekanismer**

En viktig del av risikovurderingsprosessen, enten det er via hazid-møter eller i forbindelse andre typer analyser er kravet om å predikere trafikantatferd viktig. Vi råder SVV til å: *sikre bedre kontakt mellom UAG og fagspesialister som brukes i risikovurderinger og at fagspesialister får rendyrke sitt spesialfelt med hensyn til farefulle omgivelser kombinert med trafikantatferd.*

### **5.1.14 Sjeldne hendelser versus kjente situasjoner**

Uønskede hendelser som identifiseres i risikoanalyser varierer lite om et begrenset antall (STRAKS har mange kategorier), og det er ikke noen av våre case som har identifisert såkalte ”sorte svaner”, dvs. sikkerhetsutfordringer vi ikke vet at vi ikke vet noe om. Nærmest kommer vel store branner i tunneler (200-300 MW), men det gjøres lite ift å studere disse. Hvorvidt SVV bør tenke på veldig sjeldne hendelser, og ikke minst relatert til risikovurderinger kan diskuteres. *Vi utfordrer SVV, spesielt med tanke på terroraksjonen 22. juli 2011, men også ift rassituasjoner, broer som plutselig er forsvunnet og helt absurd trafikantatferd om det i vegsystemet bør være noen som utfordrer ”unknown unknowns”. Vi er ikke sikre på om det er fornuftig, men kanskje slike prosesser øker Vegvesenets kunnskap på TS-området.*

### **5.1.15 Risikoreducerende tiltak og løsnings godhet**

Vi ønsker ikke å begrense kreativiteten i analyse- og designprosessen, men vi anbefaler at: *SVV hele tiden søker å definere generalisert kunnskap om løsnings effektivitet i forhold til trafikksikkerhet.* TØIs kataloger er vesentlige kilder, men vi ser gjerne SVV som en lærende organisasjon som utfordrer eksisterende kunnskap.

### **5.1.16 Mangler SVV en kultur for diskusjon om risiko?**

Bruk av risikoresultater som en diskusjon om trafikksikkerhet ses ikke. *Vår anbefaling er at SVV bør oppfordre til diskusjoner om risikovurderinger.* På den måten blir kunnskap utfordret og beslutninger fattet på en konstruktiv måte.

### **5.1.17 Risikovurderinger er makt**

*Vi anbefaler SVV å rendyrke kvalitetskriterier for risikovurderingsprosesser, hvor hensikten er at ensidig maktbruk unngås.*

### 5.1.18 Eksterne konsulenter versus interne risikovurderingsgrupper

Mange av våre informanter mente at det er i bestillingen av konsulenter de store feilene gjøres, hvor tilbudene ikke kvalitetssikres på en god måte. *Eksterne konsulenter kan tilføre SVV nyttig kunnskap og spille på lag i trafikk sikkerhetsarbeidet, men vi ser ikke at det er etablert en god praksis enda. Vi har ingen løsning på dette spørsmålet, men mener at problemstillingen er viktig i det videre arbeidet med risikovurderinger.*

### 5.1.19 Hazid-analyser er dårlig dokumentert

Vi anbefaler at: *SVV forbedrer dokumenteringen av hazid-samlingene.* En aktiv referent i møtene er fremhevet som viktig av mange. Dette støtter vi og mener at hazid-møtereferatet både må sendes på kommentarrunde og være del av rapporteringen av risikovurderingen.

### 5.1.20 Risikovurderingens egnethet som tidligfaseverktøy er undervurdert

Et prosjekt i tidlig fase bør knyttes sterkere til risikovurderingsprosesser. Flere av de mest erfarne informantene, våre egne erfaringer i analyseprosesser og innsikt i ulykkesgranskninger mener vi støtter at risikovurderinger er spesielt egnet for å avklare løsninger i tidlige prosjektfaser. Vi anbefaler at *SVV vektlegger risikovurderingens egnethet for prosjekter i ide- og faser knyttet til overordnet planlegging hvor man skal velge mellom flere løsningsforslag.*

### 5.1.21 Begreper innen risikovurdering brukes pragmatisk

Håndbok 271 og flere av de sentrale ressurspersonene i SVV som jobber med risikovurderinger vektlegger at det er forskjell på risikoanalyse og risikovurderinger. Mye tyder på at begrepet risikovurderinger er i ferd med å sette seg som den offisielle metoden i Statens vegvesen. I praksis ser vi likevel at begrepene risikovurdering, risikoanalyse og trafikk sikkerhetsvurdering brukes om hverandre. Det samme gjelder begrepet risiko. Ofte ser vi at analytikere mener kombinasjonen sannsynlighet og konsekvens, mens for eksempel Matrixs Tromsøtunnelanalyse bruker forventningsverdier (sannsynlighet x konsekvens summert over alle begrepspar). Usikkerhet er sjelden eller aldri drøftet. Det er sjelden diskusjon om vesentlige målebegreper, så som risiko. Den pragmatiske tilnærmingen viser at risikovurderingen er instrumentell og koplet til valg av løsninger. For eksempel indikatoren ÅDT har sjelden noe å si for risikoangivelser. Den indikatoren synes å være en indikasjon på hva slags veg som er beskrevet og hvilken trafikk som forventes. Trafikkbilder undersøkes også i noen grad, men også her er det vanskelig å spore betydningen det har for risikoangivelser. *Vi anbefaler at SVVs sentrale gruppe for trafikk sikkerhet overvåker begrepsbruk, modeller og vurderingskriterier for å sikre konsistens og best mulig kunnskap brukt i analysene. Vi anbefaler også at gruppen fortsetter å ha et sterkt fokus på bruken og det å sikre at de risikoinformerte beslutningene blir best mulig.* Det teoretiske fundamentet for risikovurderinger må ikke overvurderes.

### 5.1.22 Rapportene tar uhorvelig lang tid å skrive

*Vår anbefaling er at rapporter må komme så raskt som mulig, både for å sikre best mulig dialog og diskusjon om risikovurderingen. Høringsrunde bør være påkrevd. En slik praksis øker også læringsutbyttet.* Vi oppfatter at dagens praksis er at rapportering oppfattes som et ork, og at det blir nedprioritert. Vi tror at det er ødeleggende for risikovurdering som metode på sikt.

### **5.1.23 Løsninger funnet i enkelte risikovurderinger må ikke få skape presedens**

Den ideelle situasjonen er at håndbokkrav skal bygge på generalisert kunnskap, mens risikovurderinger kan reflektere lokale variasjoner og optimaliseringer. *Vår anbefaling er at SVV setter rammer for validiteten av risikovurderinger.*

### **5.1.24 Sikre konsistens i SVVs styrende dokumentasjon**

Det er et stort savn at det ikke finnes en godkjent håndbok i sikkerhetsstyring i Statens vegvesen. En slik håndbok vil sette grensene mellom preskriptivt regime (vegnormaler) og funksjonsbasert regime (risikovurderinger). Håndboken vil gi nullvisjonens vurderingskriterier, beskrive når og hvordan risikovurderinger skal brukes, og gi informasjon om hva som er god praksis for å ivareta trafiksikkerhet i vegtrafikken. *Vi anbefaler at det tas skritt for å få etablert håndboken raskt, at det gjennom den håndboken iverksettes arbeid for å oppdatere relaterte håndbøker (blant annet 017, 021, 051, 111, 140, 151, 222 og 271) til å ivareta grenseoppgangen mellom vegnormal og funksjonsbasert tilnærming.* Det er gjerne en for stor ambisjon å samordne regelverket, men det bør likevel være et ideal.

### **5.1.25 Grunnlaget for toleransekrav, akseptkriterier for risiko og andre krav er ikke dokumentert**

Toleransekrav og akseptkriterier for risiko må gjerne ses i sammen med vurderingskriterier, men disse kravene er absolutte, eventuelt knyttet til kost/nytte (ALARP). Flere steder i matrisene i risikovurderingsrapportene angis grønne, gule og røde soner uten at det er noen form for begrunnelse for dem. Toleransekriteriene ser ut til å spille en viktig rolle i analyseprosessene, spesielt når det gjelder interne analyser. De gir valgene av sikkerhetsproblemene som studeres i forhold til alternative løsningsforslag. Det kan synes som at 4-7 hendelser i en sone hvor risikoreduserende tiltak skal vurderes gir et ok utgangspunkt for risikovurderingsprosessen. Vi anbefaler at: *SVV gir klare retningslinjer for hvordan slike vurderingskriterier skal forstås og hvem som sitter med ansvaret for å sikre at kriterier og krav blir fulgt opp.*

### **5.1.26 Beslutningssituasjoner, usikkerhet og rammer for risikovurderingsprosessen**

Hb 271 legger opp til at usikkerhet spiller en vesentlig rolle i risikovurdering. Det er i tråd med teori innenfor risikoanalyse. Imidlertid vil en sterk fokusering på dette begrepet forvirre og dra vekk oppmerksomheten fra vegtrafikken og samspillet mellom trafikanter, veg, kjøretøy og øvrige rammer. Vi anbefaler SVV å *utrede usikkerhet, med tanke på innspill i planleggingen av risikovurderingene og gjerne utvikle et verktøy.* Et slikt verktøy kan bidra til å skreddersy formål og rammer for risikovurderingene som skal gjennomføres. Vi anbefaler ikke at usikkerhet skal angis sammen med resultatene fra risikovurderingene.

### **5.1.27 Ledelsesgjennomgang og beslutningssituasjoner**

Vi anbefaler at SVV legger til rette for at risikovurderingene blir reflektert over av personer med beslutningsmyndighet. Vi vil derimot ikke anbefale at beslutningssituasjoner skal designes eller dokumenteres ytterligere enn det som gjøres i dag pga. hensynet til risikovurderingene. Vårt fokus er mer en ideell praksis.

## 5.2 Anbefalinger angående sannsynlighetsangivelser av brann i tunge kjøretøy til bruk i risikoanalyser av tunneler

I kapitlet foran har vi presentert et bredt spekter av tiltak som vi mener vil styrke risikoanalyseprosessen i Statens vegvesen. I dette delkapitlet snevrer vi inn til forhold som påvirker sannsynlighetsangivelser av brann i tunge kjøretøy som forventes brukt i risikoanalyser av vegtunneler. Det er seks aspekter vi da mener er viktige; Analyseprosessen – valg av tilnærming; Kunnskapsgrunnlaget; Kvalitetskriterier; Usikkerhet; Sannsynlighetsangivelser; og Brannmodell.

### 5.2.1 Analyseprosessen – valg av tilnærming

Vår forutsetning er at data former teorier. Med et omfattende datamateriale kan det skape teorier om hvorfor branner i tunge kjøretøy oppstår. Der er vi ikke i dag og det kommer til å mangle i uoverskuelig framtid. Teorier er viktige når data mangler, men da vil også ustrukturerte data i form av erfaringer/ekspertvurderinger spille viktig rolle. Her vil vi jobbe med dagens tunnelsystemer.

Selv om SVV har forlatt TRANSIT-modellen (Schubert et al., 2011), er utvikling av bayesianske nettverk fortsatt en interessant tilnærming, også når det gjelder brann i tunge kjøretøy i tunnel. Forutsetningen da er å unngå analysemodeller som blir oppfattet som «svarte bokser», men utnytte kvalitative og kvantitative egenskaper i verktøyet. Det betyr at vi må kombinere typiske kvalitative teknikker, såsom hazid-analyser med en videreføring til et bayesiansk nettverk. I det bayesianske nettverket vil så avhengigheter og betingelser kunne settes, som vil øke kunnskapsnivået i enhver analyseprosess. Dette vil også øke kunnskapen til analysedeltakerne om utfordringer og styrker i å sette betingede sannsynligheter (selv om det ikke alltid skal settes sannsynligheter). Med dagens sterke bakgrunn i kvalitative analyser vil vi anbefale at SVV ser på mulighetene til å utvikle kombinerte prosesser mellom kvalitative og kvantitative analyser. Det kan i så måte tenkes at kvantitative analyser underbygger deler av den kvalitative analysen, dersom en kvalitativ analyse er et bedre design i forhold til formålet.

### 5.2.2 Kunnskapsgrunnlaget

For oss er det åpenbart at kunnskapsgrunnlaget må heves og TØI sin kartlegging av branner er første skritt i så måte. Vi har indikert i kapittel 1 en rekke kunnskapshull, men her mener vi at det er behov for et prosjekt som bør se på tilgang til informasjon som eksisterer (for eksempel gjennom VTS) og hva som bør iverksettes av eksplisitt datainnsamling (vi har indikert en større bruk av trafikkontrollstasjoner langs hovedvegnettet). Det er både behov for å velge/utvikle og rapportere på tilbakeskuende (lagging) indikatorer (branner, tilløp, hastighetsvariasjon ++) og mer fremoverrettede (leading) indikatorer (planlagt vedlikehold, trafikkregulering, kommunikasjon med trafikanter, ++). Kravet til disse er at de forventes å påvirke risiko for brann i tunge kjøretøy.

Koplingen mellom tilløp til branner og fullt utviklede branner er i liten grad kjent, og om tilløp til branner er en god indikator på vurderinger av sannsynlighet for brann i tyngre kjøretøy. Dette er viktige avklaringer Statens vegvesen bør vurdere i tiden fremover.

Dataenes pålitelighet og validitet er i så måte et viktig tema i Statens vegvesens arbeid for å skape bedre kunnskap.

Hvorvidt analysene da retter seg mot et nasjonalt nivå eller de ser på konkrete tunneler vil da reflekteres i datamaterialene som finnes. Det bør iverksettes aktivitet for å forsterke kunnskapsgrunnlaget.

### **5.2.3 Kvalitetskriterier**

Risikoanalyser og risikovurderinger blir i liten grad vurdert med hensyn til kvalitet. Det er en stor svakhet, som bør rettes opp så fort som mulig. DSB velger i sine ROS-analyser (DSB, 2014) å indikere usikkerhet i sannsynligheter og konsekvenser med en gradert skala, basert på egne vurderinger av usikkerhet. Vi mener at dette er et blindspor og ser ikke noen spesielle behov for kvalitetskriterier utover det som finnes tilgjengelig i metodelitteraturen.

Vi anbefaler at SVV setter i gang et prosjekt som har til hensikt å beskrive kvalitetskriteriene som skal brukes når risikoanalyse og derigjennom sannsynlighetsangivelse av brann i tunge kjøretøy skal angis. Vi tenker først og fremst på Lincoln og Guba (1985) sine kriterier som går på sporbarhet, troverdighet, generaliserbarhet, men også ulike størrelser hentet fra kvantitative studier, så som pålitelighet, validitet med mer. Kvalitetskriteriene koples mot kunnskapsgrunnlaget beskrevet i kapitlet over.

### **5.2.4 Usikkerhet**

Usikkerhet handler om analytikerens syn på fremtiden og hvorvidt det vil inntreffe brann i tunge kjøretøy eller ikke basert på forutsetningene som gjelder for tunnelen. Dette belyses med risikofaktorer, hendelser, og effekter på verdier som er viktige i analysen, så som trafikantenes helse. Den tilhørende usikkerhetsvurderingen kan være kvalitativ (rundt formulert) eller kvantitativt presist med sannsynligheter eller sannsynlighetsfordelinger. Det kan også være en kombinasjon av kvalitative og kvantitative uttrykk.

Vi anbefaler at Statens vegvesen utreder hvordan de ønsker at usikkerhet skal formuleres i sine tunnelrisikoanalyser, og spesielt når vi snakker om sjeldne hendelser som brann i tunge kjøretøy.

### **5.2.5 Sannsynlighetsangivelser**

Det er mulig å uttrykke sannsynligheter for brann i tunge kjøretøy direkte, for eksempel som inhomogen Poisson prosess, og det er mulig å kontinuerlig oppdatere etter hvert som det foreligger ny informasjon. En tilnærming til disse sannsynlighetene normalisert på antall branner per mill kjøretøykm er i beste fall et sammenligningsgrunnlag med andre størrelser i trafikk sikkerhetsarbeidet, men fortolkningen er etter vårt syn mangelfull i et trafikk sikkerhetsperspektiv.

Forventningsverdier er mangelfulle når vi snakker om risiko for brann i tunge kjøretøy, og vi ønsker at sannsynlighetene skal basere seg på langt tyngre kunnskap enn registrerte branner. Hvorvidt sannsynlighetene gis ift risikofaktorer eller hendelser på et lavere nivå enn selve brannhendelsen eller ikke, bør gjerne utredes. Graver er betenkt over

sannsynlighetsteoriens bruk til bevisbedømmelser og ønsker seg koherens, dvs. logiske koplinger, som tilnærming (Graver, 2009). Det kan gjerne brukes i risikovurderinger også, og da kan sannsynlighet for brannhendelsen gis direkte, basert på den underliggende modellen. Det som da behøves er både statistisk materiale og ekspertvurderinger. Vår anbefaling er at dette underlegges en grundigere studie.

Kvalitative sannsynlighetsangivelser blir fort presentert med grove intervaller, som tilpasses matriser. Her bør også Statens vegvesen se nærmere på om det kan være andre former for presentasjon av sannsynligheter som kan komme til anvendelse.

### 5.2.6 Brannmodell

Utvikling av designbranner for de alvorlige hendelsene i tunneler kan vi forstå ut fra analyse av risiko. Det har ikke vært en del av dette arbeidet å se på forskningslitteraturen som omfatter brannodynamikk i tunneler og hvordan dimensjonerende hendelser bør beskrives. Borg, Njå og Torero (2015) har skissert løsninger til hvordan identifisering av designbranner kan gjøres, som enkelt kan overføres til tunneler. Vi har tidligere oppsummert en rekke empiriske modeller for brannodynamikk og menneskelig tåleevne (Njå & Nilsen, 2004), som sammen med øvrig faglitteratur bør utforskes med hensyn til analyse og vurdering av risiko for branner i tunge kjøretøy i norske tunneler. Vårt forslag har vært å utfordre tradisjonell risikotekning, med sterkere fokus på scenarioer som testes mot kriterier for koherens (Bjelland, Njå, Heskestad, & Braut, 2014). I stedet for å søke etter sannsynligheter anbefaler vi en bedre forståelse av de fysiske fenomenene, noe som ble anerkjent av tidsskriftet *Fire Technology*<sup>6</sup>. Det gir ikke en brannmodell direkte, men er rammeverk for å etablere design branner basert på risiko og andre egenskaper ved tunnelen i hvert enkelt tilfelle. Dette er helt i tråd med funksjonsbasert regelverk.

## 6 Konklusjon

Vår konklusjon er at Statens vegvesen bør etablere en sterk kunnskapsbase som vil sikre best mulig kunnskap om tunnelsikkerhet og hvor branner i tunge kjøretøy utgjør en viktig del. En slik kunnskapsbase, kall det gjerne et senter, vil også måtte ta ansvar for å ulike metodeverktøy for risikovurdering, hvor vi vil fremheve løsninger hvor kvantitative og kvalitative teknikker kombineres i analyseprosessen. Da vil vi også ha en enhet som gjennom oppdaterte risikoforestillinger kan utfordre teorier om for eksempel risiko for brann i tunge kjøretøy. Brannforskning generelt og branner i tunneler spesielt må gis oppmerksomhet, selv om det er kostbare studier. Vi anser et slikt senter nødvendig for å komme et vesentlig skritt videre i arbeidet med tunnelsikkerhet, hvor samvirke mellom vegvesen og andre aktører (redningstjeneste og tungbilnæring) er helt avgjørende.

---

<sup>6</sup> Artikkelen fikk prisen «Harry C. Bigglestone Award 2016», som beste artikkel i *Fire Technology*.

## 7 Referanser

- Adams, J. (1995). *Risk*. London: UCL Press.
- Aven, T. (2007). *Risikostyring: grunnleggende prinsipper og ideer*. Oslo: Universitetsforl.
- Aven, T. (2014). *Risk, surprises and black swans : fundamental ideas and concepts in risk assessment and risk management*. Abingdon: Routledge.
- Babrauskas, V. (1983). "Estimating large pool fire burning rates". *Fire Technology*, vol. 19, 251-261.
- Bergqvist, A., Frantzich, H., Hasselrot, K. og Ingason, H. (2002). "Räddningsinsatser vid tunnelbränder: Probleminventering och miljöbeskrivning vid brand i spårtunnel". *FOU-rapport*. Karlstad, Sverige, Räddningsverket
- Bjelland, H. (2013). *Engineering Safety. With applications to fire safety design of buildings and road tunnels*. (PhD), University of Stavanger, Stavanger, Norway.
- Bjelland, H., Njå, O., Heskestad, A. W., & Braut, G. S. (2014). The Concepts of Safety Level and Safety Margin: Framework for Fire Safety Design of Novel Buildings. *Fire Technology*, 1-33. doi:10.1007/s10694-014-0400-y
- Bjerkestvedt, D., Bakke, J.R. og van Wingerden, K. (1992). "Gas Explosion Handbook", *CMR-93-A25034, version 1.2*, Christian Michelsen Research, Bergen.
- Borg, A., Njå, O., & Torero, J. L. (2015). A Framework for Selecting Design Fires in Performance Based Fire Safety Engineering. *Fire Technology*, 1-23. doi:10.1007/s10694-014-0454-x
- Borg, A. (2017). [Vurdering av TRANSIT-modellen].
- Braut, G. S. (2016). Risikoforståing som utfordring for forvaltninga. Risikovurderingar i offentlig forvaltning og tenesteyting - Eit uklårt felt mellom fag og forvaltning. In R. Førde, M. Kjelland, & U. Stridbeck (Eds.), *Cand.mag., cand.med., cand.jur, cand.alt. Festskrift til Aslak Syse - 70 år*. Oslo: Gyldendal Norsk Forlag.
- BSI (1997) "Fire safety engineering in buildings. Guide to the application of fire safety engineering principles". *DD 240-1*. England.
- Drysdale, D. (1999). *An introduction to fire dynamics* (2nd ed. ed.). Chichester: Wiley.
- DSB. (2014). *Veileder for helhetlig risiko- og sårbarhetsanalyse i kommunen [Guideline for overall risk and vulnerability analysis for use in local government]*. Retrieved from Tønsberg, Norway:
- Eckhoff, R.K. (1992): "Instrumentering i eksplosjonsfarlige områder", *CMR-92-A90005*, Christian Michelsen Research, Bergen.
- FIRETUN (1995). "Fire in Transport Tunnels, Report on Full Scale Tests". *EUREKA – Projekt EU 499: FIRETUN*. Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V, D-40213 Dusseldorf
- Graver, H. P. (2009). Bevisbedømmelse – vitenskapelig magesfølelse eller rasjonell helhetsvurdering? *Tidsskrift for Rettsvitenskap*, 122 E(02).
- Hagen, E. (1987). *Der natürliche Brand, Brandversuche in Grossen Brandlabschnitten*. Technische Universität Braunschweig, Tyskland.
- Harzell, G.E. (1989). "Understanding of Hazard to Humans". *Advances in Combustion Toxicology*, Vol. 1: s. 19-37.
- idom. (2017). *General overview of the Spanish risk analysis methodology for road tunnels*. Retrieved from
- Ingason, H. (1995, March 15-16). *Design fires in tunnels*. Paper presented at the Asiaflam '95 Conference, Hong Kong.
- Ingason, H. (2002): "An Overview of Vehicle Fires in Tunnels", SP. Borås, Sverige.
- Ingason, H., Li, Y. Z., & Lönnemark, A. (2014). *Tunnel Fire Dynamics*. New York: Springer New York.
- Karlsson, B. og Quintiere, J. (1999). *Enclosure fire dynamics*. CRS Press.
- Keski-Rahkonen, O. (1993). "Design fire construction for individual assessment", W14 Workshop on Modelling, Delft, 25.-26. januar, 1993.
- Kristiansen, A., Pappas, J., & Henriksen, H. (2017). *Retningslinjer for kvantitative risikovurderinger for anlegg som håndterer farlig stoff*. Oslo: Lloyd's Register Consulting - Energy AS.
- Leveson, N. (2011). *Engineering a safer world: systems thinking applied to safety*. Cambridge, Mass.: The MIT Press.
- Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic inquiry*. Beverly Hills, Calif.: Sage.
- Mostue, B.A., Stensås, J.P. og Wighus, R. (2003). "Forventet effekt av faste, aktive slokkeanlegg, boligsprinkler og vanntåke". *NBL A03105*. SINTEF, Trondheim.

- Nelisse, M., & Vrouwenvelder, T. (2016). *Probability of a large fire in a road tunnel. A Bayesian approach*. Paper presented at the 7th International Symposium on Tunnel Safety and Security, Montreal, Canada.
- NFPA (2002). *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Massachusetts, National Fire Protection Association, Inc.
- Njå, O. (2006). *Analyse av innspill og kommentarer som fremkom i møte om ROS-analyse av Rogfast 10. august. Funksjonelle krav, hypoteser og problemstillinger* Stavanger.
- Njå, O. (2016). *Utfordringer og kunnskapsstatus i tunnelsikkerhet. Designprinsipper og funksjonelle krav og problemstillinger som innspill til Statens vegvesens arbeid med å etablere etatsprogram om tunnelsikkerhet*. Stavanger.
- Njå, O., Aven, T., & Rettedal, W. K. (1998). *Subjective probability assignment in QRAs for offshore construction and cessation projects*. Stavanger: Sørco.
- Njå, O., & Kuran, C. (2015). *Erfaringer fra redningsarbeidet og selvredningen ved brannen i Oslofjordtunnelen 23. juni 2011 [Experiences from the rescue work and the self rescue in the Oslofjord tunnel fire 23 June 2011]*. Stavanger: International Research Institute of Stavanger.
- Njå, O., & Nilsen, A. R. (2004). *Bruk av risikoanalyser i planlegging og drift av vegtunneler*. Retrieved from Stavanger:
- Njå, O., & Solberg, Ø. (2010). Safety Considerations in Political Decisions: A Case Study of Changes to the Norwegian Aviation System. *Review of Policy Research*, 27(5), 595-619.
- Njå, O., Vastveit, K. R., Abrahamsen, E. B., & Eriksson, K. (2013). *Evaluering av risikovurderinger i Statens vegvesen. Beslutningsstøtte og læringsverktøy. [Evaluation of risk assessments in the Norwegian Public Roads Authority: Decision support and learning tool]*. Stavanger: International Research Institute of Stavanger.
- Nævestad, T.-O. (2013). *Brannutsatte undersjøiske vegtunneler*. Retrieved from Oslo:
- Nævestad, T.-O., Ranestad, K., Elvebakk, B., & Meyer, S. F. (2016). *Kartlegging av kjøretøybranner i norske vegtunneler 2008-2015 [Vehicle fires in Norwegian road tunnels 2008-2015]* TØI rapport Vol. 1542/2016.
- PIARC (1999). *Fire and Smoke Control in Road Tunnels*. Piarc – World Road Association, Frankrike.
- Purser, David A. (2002). "Toxicity Assessment of Combustion Products". I *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Third Edition*, DiNenno, P.J. (red.). Massachusetts, National Fire Protection Association, Inc.
- Riess, I., Bettelini, M. og Brandt, R. (2001). "Smoke Extraction in Tunnels With Considerable Slope". *4th International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels*. Madrid 2001, 503 – 512.
- Schubert, H. M., Høj, N. P., & Faber, M., H. (2011). *Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels*. Brunnen, Switzerland.
- SHT. (2013). *Rapport om brann i vogntog på Rv 23, Oslofjordtunnelen, 23. juni 2011* Rapport vei (online),
- Solberg, Ø., & Njå, O. (2012). Reflections on the ontological status of risk. *Journal of Risk Research*, 15(9), 1201-1215.
- Store Norske Leksikon. (2016). Universell utforming. Retrieved from [https://snl.no/universell\\_utforming](https://snl.no/universell_utforming)
- SVV. (2013). *Sikkerhetsstyring i vegtrafikken (under utarbeidelse)*. Oslo: Statens vegvesen.
- Tijms, H. C. (1994). *Stochastic models : an algorithmic approach*. Chichester: Wiley.
- Twearson, A. (2002). "Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires", i: *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering Third Edition*, DiNenno, P.J. (red.). Massachusetts, National Fire Protection Association, Inc.
- Watson, S. R. (1994). The meaning of probability in probabilistic safety analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 45, 261-269.



## Vedlegg

Vi har presentert fire vedlegg under som alle er hentet fra tidligere rapporter. Hensikten med vedleggene er å belyse designprinsipper og viktige begreper i brannfaget av betydning for tunneler. Empiriske modeller bør uttestes i fremtidige studier.

### A Vesentlige prinsipper i utformingen av tunneler

Dette vedlegget bygger på et notat som ble utviklet for Statens vegvesen høsten 2016 (Njå, 2016). Begrepet prinsipp kommer av det latinske principium og betyr begynnelse eller utgangspunkt; altså noe som legges til grunn som førende forutsetninger og retninger for det videre arbeidet. I forbindelse med tunneler kan vi tenke oss at tunnelene skal utformes i kraft av visse overordnede, gjerne mer allmenne prinsipper. Det er spesielt fire prinsipper som kommer til anvendelse for tunnelene i Norge; *Selvreguleringsprinsippet*, *selvredningsprinsippet*, *samvirkeprinsippet* og prinsippet om *universell utforming*.

### Selvregulering og internkontroll

Mye av Statens vegvesen sin virksomhet er hjemlet i vegloven og vegtrafikkloven under Samferdselsdepartementet, men også brann- og eksplosjonsvernloven, og plan- og bygningsloven gir viktige føringer for vegvesenet. Statens vegvesen har utviklet sin styrende dokumentasjon som beskriver forventningene til hvordan trafikksikkerhet skal ivaretas, i det vesentligste med utgangspunkt i NTP og det som har blitt ansett av vegvesenet og politiske myndigheter som god forvaltningspraksis.

Vilkårene for risikobasert trafikksikkerhetsstyring av tunneler er formet av Tunnelsikkerhetsforskriften, basert på EUs direktiv 2004/54/EF, og håndboken N500 Vegtunneler, som både angir spesifikke krav til løsninger og som beskriver hvordan risikovurderinger kan brukes for å forsterke sikkerheten. Prinsippet om lovfestet selvregulering og internkontroll betyr at eier av tunnelene, dvs Statens vegvesen ved sine regioner (riksveger), fylkeskommunene (fylkesveger) og kommunene (kommunale veger), er ansvarlige for å utforme et sikkert vegsystem/tunnel, basert på beste kunnskap.

I dette perspektivet blir N500 realiseringen av den nasjonale og internasjonale praksisen utviklet fra prinsippet om lovfestet selvregulering. Dette gir grunnlag for funksjonelle krav til sikkerhet, dvs krav som beskriver hva tunneleier vil oppnå, i stedet for spesifikasjoner knyttet direkte til hvilke løsninger som skal velges. På denne måten kan beslutningstakere, enten de representerer Statens vegvesen eller politikere på ulike forvaltningsnivå, gjøre seg opp egne meninger om hvordan sikkerheten blir ivaretatt av de ulike løsningsforslagene. Innenfor rammene som de funksjonelle kravene gir, kan planleggerne fritt velge løsninger og optimalisere i forhold til identifiserte behov. Dette er en pådriver til å være kreativ og å utvikle effektive løsninger. Mulighetene for å tilpasse løsninger til den konkrete tunnelen er dermed tilstede. Tunneleier må avveie bruken av standardiserte løsninger og mer skreddersydde tiltak i sin vurdering av helhetlig tunnelsikkerhet. Trafikantene bør kjenne løsningene i tunnelene når de møter dem!

## Selvredningsprinsippet

Selvredningsprinsippet er det grunnleggende prinsippet for evakuering av vegtunneler ved brann. Tunnelsikkerhetsforskriften legger opp til at rømningsveger og nødutganger skal tilpasses trafikantene både til fots og med eget kjøretøy. Det forventes imidlertid at brannvesenet yter innsats når det er faglig forsvarlig ut fra et sikkerhetsaspekt og ut fra omforent beredskapsopplegg tilpasset den enkelte tunnel. Selvredningsprinsippet er ikke spesielt for vegtunneler, det gjelder generelt i forbindelse med evakuering fra objekt i brann.

I 2010-utgaven av Statens vegvesens Håndbok 021 (Vegtunneler) beskrives det at evakuering av tunneler gjennomføres etter selvredningsprinsippet (fra kapittel 5.1):

*Prinsippet for evakuering baserer seg på selvredningsprinsippet, det vil si at trafikantene skal ta seg ut enten til fots eller ved hjelp av eget kjøretøy.*

I Statens vegvesens rapport 161 «Etatsprogrammet Moderne vegtunneler 2008 – 2011: strategi trafikantsikkerhet og brann sikkerhet i vegtunneler» heter det i kapittel 3.2 - Selvredningsprinsippet:

*Selvbergingsprinsippet er generelt akseptert i samfunnet og det gjelder i prinsippet for alle typer byggverk.*

...

*Selvbergning gjelder som hovedprinsipp i alle norske vegtunneler. Eksterne redningsmannskaper kan bare i unntakstilfeller komme til unnsetning ved en hendelse inne i en tunnel. Dette må også trafikantene kjenne til og det påhviler eier et ekstra ansvar at denne forutsetningen er kjent.*

En annen fortolkning av selvredningsprinsippet er at «folk skal overleve brannen til den ikke lenger er en trussel...». Storbritannia bruker begrepet «Protect in place», som kan sammenlignes med nødrom (jamfør oppfølgingen etter brannen i Oslofjordtunnelen 2011; Njå & Kuran, 2015; SHT, 2013). «Protect in place» oppfatter vi som selvredning. Selvredning med basis i trafikanters egenskaper og tålegrenser må utfordres og utforskes.

Hvorvidt Evakueringsrom aksepteres eller ikke i norske tunneler er en sentral utfordring som vi ikke berører mer i dette vedlegget. Historiske data viser at selvredningsprinsippet ikke fungerer når trafikanter er innhyllet i røyk, og da må det eventuelt finnes bedre løsninger, for eksempel evakueringsrom. En viktig forutsetning vil være at trafikanter skal komme seg inn i rommet på egenhånd, men deretter forventes det at brannvesenet er i stand til å slokke brannen og foreta redning med en bestemt ytelse.

## Samvirkeprinsippet

Samvirke defineres som samhandling og koordinering av ressurser for å sikre best mulig total oversikt og styring i arbeidet med forebygging, beredskap og krisehåndtering. Dette betyr at samvirkeaktørene i forbindelse med tunnelutforming og -drift er alt fra brukere

(privat, kommersiell gods- og persontrafikk med mer), myndigheter, tunneleiere, tunneldrift og -vedlikehold, bergingsselskaper til nødetatene.

I henhold til samvirkeprinsippet forventes det at aktørene kjenner sitt ansvar og er i stand til å bidra i sikkerhetsstyringen av tunnelene. Dette medfører aktiv innsats fra aktørene i planleggingsprosessene, forebyggende tunnelsikkerhetsarbeid så vel som i krisesituasjoner. Samvirkeprinsippet er drivende, ikke bare på utøvende aktiviteter, men også for aktiviteter på strategisk beslutnings- og planleggingsnivå.

Det å forstå det helhetlige tunnelsystemet er en krevende oppgave. VTS-operatørens så vel som trafikantenes evner til å oppfatte og respondere på branner og røykutvikling må med i analysen for å forstå ytelse av beredskapsløsningene. Samvirkeprinsippet er sterkt koplet til systemteori (Leveson, 2011).

## Prinsippet om universell utforming

Fra Store Norske Leksikon finnes følgende (2016): Universell utforming vil si å planlegge omgivelser, produkter, institusjoner og tjenester slik at de kan brukes av så mange mennesker som mulig. Hensikten er å oppnå like muligheter til samfunnsdeltakelse og motvirke diskriminering på grunnlag av nedsatt funksjonsevne. Universell utforming har to offisielle definisjoner i Norge. I Diskriminerings- og tilgjengelighetsloven (DTL), som trådte i kraft i 2009 og ble revidert i 2013 er universell utforming definert slik:

*«Med universell utforming menes utforming eller tilrettelegging av hovedløsningen i de fysiske forholdene, herunder informasjons- og kommunikasjonsteknologi (IKT), slik at virksomhetens alminnelige funksjon kan benyttes av flest mulig.»*

Denne definisjonen, som Norge er alene om, er formulert i DTL, § 13. Den internasjonale definisjonen på universell utforming er beskrevet i FN-konvensjon om rettighetene til personer med nedsatt funksjonsevne, som ble ratifisert av Norge i 2013:

*«Med 'universell utforming' menes utforming av produkter, omgivelser, programmer og tjenester på en slik måte at de kan brukes av alle mennesker, i så stor utstrekning som mulig, uten behov for tilpassing og en spesiell utforming.»*

Hva som omfattes av «produkter, omgivelser, programmer og tjenester» vil avklares etterhvert som konvensjonen tas i bruk. Forskjellen på de to utdypningene av universell utforming er at den norske skal være egnet for et eksplisitt juridisk formål, mens FN-konvensjonens definisjon er egnet for et politisk og faglig arbeid med universell utforming. FN-konvensjonen ble signert av Norge mars 2007, og myndighetene påla seg da å ikke handle i strid med konvensjonen. Den juridiske definisjonen i DTL ble i denne forbindelsen vurdert å være i samsvar med FN-konvensjonen.

Tunneler over en viss lengde er komplekse konstruksjoner, som byr på utfordringer for brukere med spesielle behov, og da spesielt i situasjoner hvor selvredning og evakuering

blir nødvendig. Disse trafikantene må kunne være inkludert som del av de dimensjonerende hendelsene som skal legges til grunn for bruken av tekniske sikkerhetssystemer i tunnelberedskapen. Et typisk funksjonskrav kunne være: «For at tunnelen skal være sikker for alle, må de svakeste trafikantgruppene forutsetninger legges til grunn for løsningene». Dette vil bety mye for utformingen av sikkerhetstiltakene. Samtidig vil et slikt krav medføre at tunneleier analyserer hvilke trafikantgrupper som ikke vil håndtere en evakuerings situasjon, og dermed skape oppmerksomhet omkring begrensningene også når det gjelder hvordan sikker kjøring i og evakuering fra tunneler skal foregå.

## B Brannodynamikk og brannteori<sup>7</sup>

Dette vedlegget beskriver de viktigste størrelsene for å bestemme brannutvikling i tunneler. Målet er ikke å gi en inngående beskrivelse av generell brannteori, men å gi leseren en formening om vesentlige faktorer som kan påvirkes i en planleggings- og utbygningssfasen av en tunnel. Formålet med å simulere branner er å bestemme hvilke energimengder som utløses og av det studerte brann- og røykbelastninger på mennesker og andre sårbare enheter.

Kapitlet bygger på Drysdale (1998) og til en viss grad Ingason (1995). For en inngående studie av brannodynamikk i forbindelse med vegtunneler vises det også til NFPA (2002), samt forskningsprosjekter i Europa, så som Fire In Tunnels (FIT)<sup>8</sup>, Durable and Reliable tunnel Structures (DARTS)<sup>9</sup>, Safe Tunnel, Sirtaki<sup>10</sup>, Virtual Fires<sup>11</sup>, Upgrading existing Tunnels (UPTUN)<sup>12</sup> og Safety in Tunnels.

Brann i en tunnel er som regel en uønsket hendelse. Den kan defineres som; *En ukontrollert forbrenningsprosess hvor brennbare stoffer reagerer med oksygen i en eksoterm (som avgir energi) oksidasjonsprosess*. Energien som produseres,  $\dot{Q}_c$ , i en brann er gitt ved:

$$\dot{Q}_c = \chi \cdot \dot{m}'' \cdot A_f \cdot \Delta H_c \quad [\text{kW}] \quad (\text{B.1})$$

hvor:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_c &= \text{energiproduksjon} && [\text{kW}] \\ \chi &= \text{forbrenningseffektivitet} \\ \dot{m}'' &= \text{massefluks/fordampningsrate} && [\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}] \\ A_f &= \text{areal av brenseloverflate} && [\text{m}^2] \\ \Delta H_c &= \text{brenselets forbrenningsvarme} && [\text{kJ}\cdot\text{g}^{-1}] \end{aligned}$$

Forbrenningseffektiviteten,  $\chi$ , varierer med brenseltype og spenner fra 0 (ikke brennbar) til 1 (fullstendig forbrenning). Verdiene er empirisk bestemte og finnes som tabellverdier. Når forbrenningen skjer inne i en tunnel vil det dannes røykklag som varmer opp

---

7 Vedleggene her er klippet fra rapporten (Njå & Nilsen, 2004), og vi har ikke gjort noe mer med teksten. Den er kun tatt inn for å illustrere brannteori, eksplosjonsteori og menneskelig tåleevne, som bidrag til Vegvesenets kommentar om brannmodell.

8 [www.etnfit.net](http://www.etnfit.net)

9 [www.dartsproject.net](http://www.dartsproject.net)

10 [www.sirtakiproject.com](http://www.sirtakiproject.com)

11 [www.virtualfires.org](http://www.virtualfires.org)

12 [www.uptun.net](http://www.uptun.net)

overflatene. Røyklaget og de oppvarmede overflatene vil stråle mot brenseloverflaten og gi økt fordampningsrate. Fordampningsraten (også kalt forbrenningsraten) er gitt ved:

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}_F'' + \dot{Q}_E'' - \dot{Q}_L''}{L_v} \quad [\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (\text{B.2})$$

hvor:

$$\begin{aligned} \dot{m}'' &= \text{massefluks/fordampningsrate} && [\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}] \\ \dot{Q}_F'' &= \text{energifluks fra flammen til} && [\text{kWm}^{-2}] \\ &\quad \text{brenseloverflaten} \\ \dot{Q}_E'' &= \text{energifluks fra ekstern kilde til} && [\text{kWm}^{-2}] \\ &\quad \text{brenseloverflaten} \\ \dot{Q}_L'' &= \text{energifluks tapt fra overflaten} && [\text{kWm}^{-2}] \\ L_v &= \text{fordampningsvarme} && [\text{kJg}^{-1}] \end{aligned}$$

Dersom forbrenningen skjer i det fri vil ekstern energifluks,  $\dot{Q}_E''$ , være tilnærmet lik null. I en tunnel vil ekstern energifluks spille en viktig rolle for forbrenningsraten. Fordampningsvarmen,  $L_v$ , er den varmen som kreves for å produsere damp, som for en væske er den latente fordampningsvarmen.

Ved væskebrann med diameter over 0,2 meter kan forbrenningsraten bestemmes ved:

$$\dot{m}'' = \dot{m}_\infty'' (1 - e^{-k\beta D}) \quad [\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (\text{B.3})$$

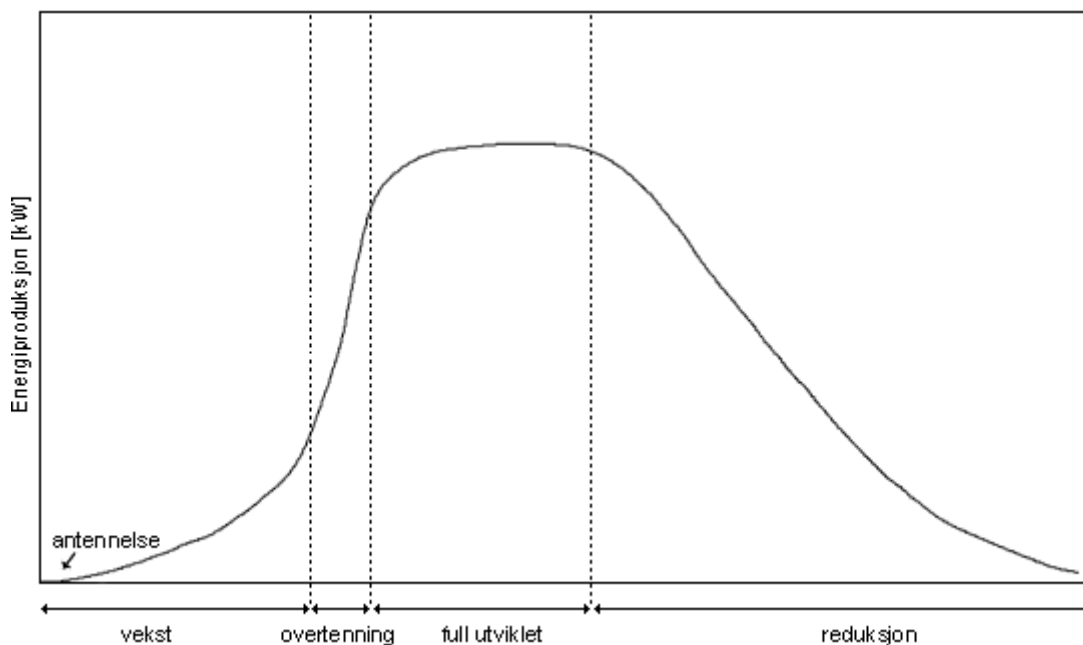
hvor:

$$\begin{aligned} \dot{m}_\infty'' &= \text{begrensende forbrenningsrate (tabellverdi)} && [\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}] \\ k\beta &= \text{slokkingskoeffisient (k) og korrigert} && [\text{m}^{-1}] \\ &\quad \text{gjennomsnittlig strålelengde (\beta) (tabellverdi)} \\ D &= \text{diameter på brenseloverflate} && [\text{m}] \end{aligned}$$

Verdiene til  $\dot{m}_\infty''$  og  $k\beta$  er begge empirisk bestemte og finnes fra tabeller. Babrauskas (1983) har estimert/bestemt eksperimentelt disse verdiene for større væskebranner. Inne i tunnel vil størrelsene påvirkes av termisk stråling fra det varme røyklaget.

## Faser i en tunnelbrann

Brannutviklingen i en tunnel kan deles inn i følgende faser: *antennering*, *vekst*, *overtenning*, *fullt-utviklet* og *reduksjon*. Antennering er en eksoterm prosess med en kraftig temperaturøkning utover initial-temperaturen, og prosessen vil normalt starte i form av ”pilotantennelse” (f.eks. ved en kollisjon). Forbrenningen går videre over i en vekstfase, hvor brannutviklingen avhenger av faktorer både relatert til brenselet og selve tunnelen. Faktorer relatert til brenselet kan være type, overflateareal, mengde og plassering av brenselet. Faktorer relatert til tunnelen kan være geometri, tverrsnittareal og ventilasjon, og eventuelt materialer på overflatene (vegger, himling, gulv) i tunnelen. I vekstfasen er tilgangen på oksygen god, og brannen vil være brensel kontrollert, det vil si at det er brenselet som i vesentlig grad bestemmer brannutviklingen. Overgangen fra vekstfasen til fullt utviklet brann kalles overtenning, og inntreffer ved at alle brennbare materialer deltar i brannen. Overtenning i en tunnel må betraktes som ”lokal overtenning”, det vil si at alt brennbart materiale på brannstedet vil brenne. Det er vanligere å snakke om overtenning i for eksempel kjøretøyene som er involvert i brannen, og ikke overtenning i selve tunnelen. I fasen hvor brannen er fullt utviklet er energiproduksjonen er på sitt høyeste. Brannen vil da i vesentlig grad styres av tilgangen på oksygen. I en tunnel vil som regel tilgangen på oksygen være god, blant annet som følge av ventilasjon. Etter hvert som brenselet brukes opp går brannen over i en reduksjonsfase, hvor energiproduksjonen avtar. Figur B.1 viser hvordan energiproduksjonen endrer seg gjennom de ulike fasene.



Figur B.1: Energiproduksjon gjennom fasene i en tunnelbrann

## Brannscenarier til bruk i design av tunneler

Brannutviklingen i et hypotetisk eller historisk brannscenario i en tunnel må simuleres. Målet er å gi et mest mulig realistisk bilde av energiproduksjonen i det valgte scenariet. Valg av scenario gjøres for eksempel gjennom risikoanalysen eller i forhold til predefinerte standardiserte scenarier. Beskrivelsen av brannscenarioet må inneholde typer, mengder og betingelser rundt brenselet, samt øvrige situasjonsbestemte forhold i tunnelen.

### Brannscenarier i tre faser

Keski-Rahkonen (1993) og Hagen (1987) foreslo å dele brannscenarioet til bruk i utforming av vegtunneler inn i tre faser: *vekst*, *fullt utviklet* og *reduksjon*, langs en tidsakse. Energiproduksjonen i vekstfasen vil normalt være akselererende, og kan derfor beskrives med en parabel ( $t^2$ ) kombinert med en vekstfaktor ( $\alpha$ ). Energiproduksjonen er gitt ved:

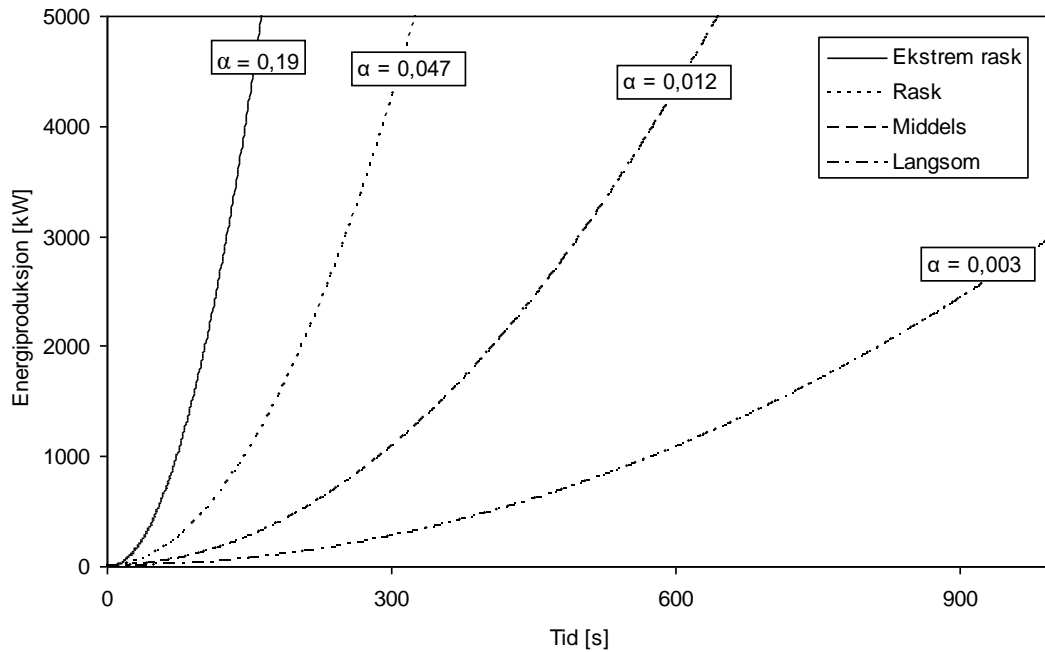
$$\dot{Q}(t) = \alpha \cdot t^2 \quad \forall \quad t_0 \leq t \leq t_{fo} \quad [\text{kW}] \quad (\text{B.4})$$

hvor:

$$\begin{aligned} \dot{Q}(t) &= \text{energiproduksjon som funksjon av tiden} && [\text{kW}] \\ \alpha &= \text{vekstfaktor} && [\text{kWs}^{-2}] \\ t &= \text{tid fra etablert antennelse (t}_0\text{)} && [\text{s}] \end{aligned}$$

Vi sier at vi har en *etablert antennelse* når brannen kan fortsette uten tilførsel av ytterligere eksternt energi. Tidspunktet for etablert antennelse,  $t_0$ , avhenger av brensel og antennelsesmåte. Vekstfaktoren bestemmer hvor raskt brannen utvikler seg. Det er vanlig å kategorisere veksten som *ekstremt rask*, *rask*, *middels* eller *langsom*. Figur B.2 viser energiproduksjonen som funksjon av tiden i energiproduksjon ved de nevnte definisjonene:





Figur B.2: Energiproduksjon ved ulike vekstfaktorer (Karlsson og Quintiere 1999).

På et visst tidspunkt,  $t_{fo}$ , inntreffer overtenning og brannen går over til å være fullt utviklet. Energiproduksjonen vil i denne fasen være på sitt høyeste, og nokså konstant. Maksimal energiproduksjon vil da ved å ta utgangspunkt i ligning (B.4) være:

$$\dot{Q}(t) = \alpha \cdot t_{fo}^2 = \dot{Q}_{\max} \quad \forall \quad t_{fo} < t < t_d \quad [\text{kW}] \quad (\text{B.5})$$

hvor:

$$t_{fo} \quad = \text{tid til overtenning} \quad [\text{s}]$$

$$\dot{Q}_{\max} \quad = \text{maksimal energiproduksjon} \quad [\text{kW}]$$

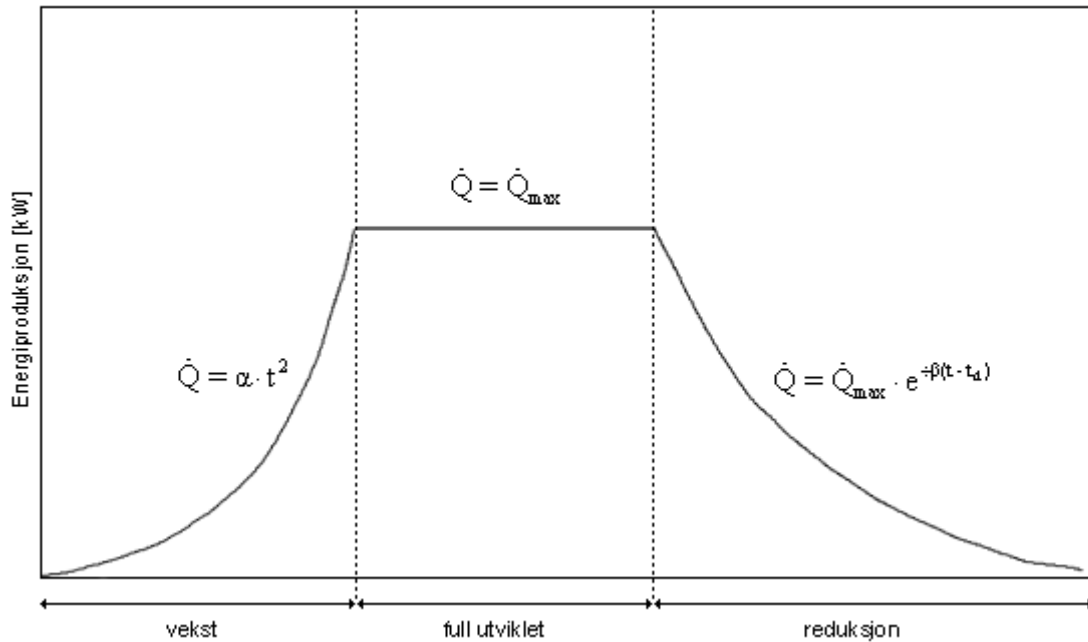
Energiproduksjonen vil etter hvert avta, og brannen går over i en reduksjonsfase. Tiden til denne fasen inntreffer er gitt ved  $t_d$ . Energiproduksjonen er i denne fasen gitt ved:

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_{\max} \cdot e^{-\beta(t-t_d)} \quad \forall \quad t \geq t_d \quad [\text{kW}] \quad (\text{B.6})$$

hvor:

$$\beta \quad = \text{avkjølingsfaktor} \quad [\text{s}^{-1}]$$

$$t_d \quad = \text{tid til reduksjonsfasen inntreffer} \quad [\text{s}]$$



Figur B.3: Energiproduksjonen for brannscenario i tunnel (Ingason 1995)

Parametrene; maksimal energiproduksjon ( $\dot{Q}_{\max}$ ), vekstfaktoren ( $\alpha$ ) og avkjølingsfaktoren ( $\beta$ ) er sentrale for å beskrive brannscenarioet. Verdien av disse er basert på eksperimentelle data, og kan hentes ut fra tabeller. Tabell B.1, viser retningsgivende verdier for brannscenarier i tunnel.

Tabell B.1: Anbefalte designparametere for beregning av brann i tunnel (Ingason 1995)

| Kjøretøy              | $\dot{Q}_{\max}$ [MW] | $\alpha$ [kws <sup>-2</sup> ] | $\beta$ [s <sup>-1</sup> ] |
|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Bil                   | 4                     | 0.01                          | 0.001                      |
| Buss                  | 30                    | 0.1                           | 0.0007                     |
| Lastebil <sup>a</sup> | 15-130                | -                             | -                          |

<sup>a</sup> Brannbelastning for lastebiler varierer og gjør det vanskelig å etablere designparametere.

Vekstraten for ulike brensel vil avhenge sterkt av evnen brannen har til å vokse raskt. Ved bruk av disse parametrene vil kun tid til overtenning og tid til reduksjonsfase være de eneste ukjente faktorene i ligningene (B.4) og (B.6). Tid til overtenning kan beregnes ved å ta utgangspunkt i ligning (B.5):

$$t_{fo} = \sqrt{\frac{\dot{Q}_{max}}{\alpha}} \quad [s] \quad (B.7)$$

Tid til reduksjonsfasen inntreffer kan beregnes ved å utnytte total teoretisk varmegivende verdi ( $E_{tot}$ ) ved fullstendig forbrenning av kjøretøyet. Beregning av  $E_{tot}$  forutsetter at de materielle spesifikasjonene til kjøretøyet er kjent. Keski-Rahkonen (1993) har utledet følgende formel for tiden til reduksjonsfasen:

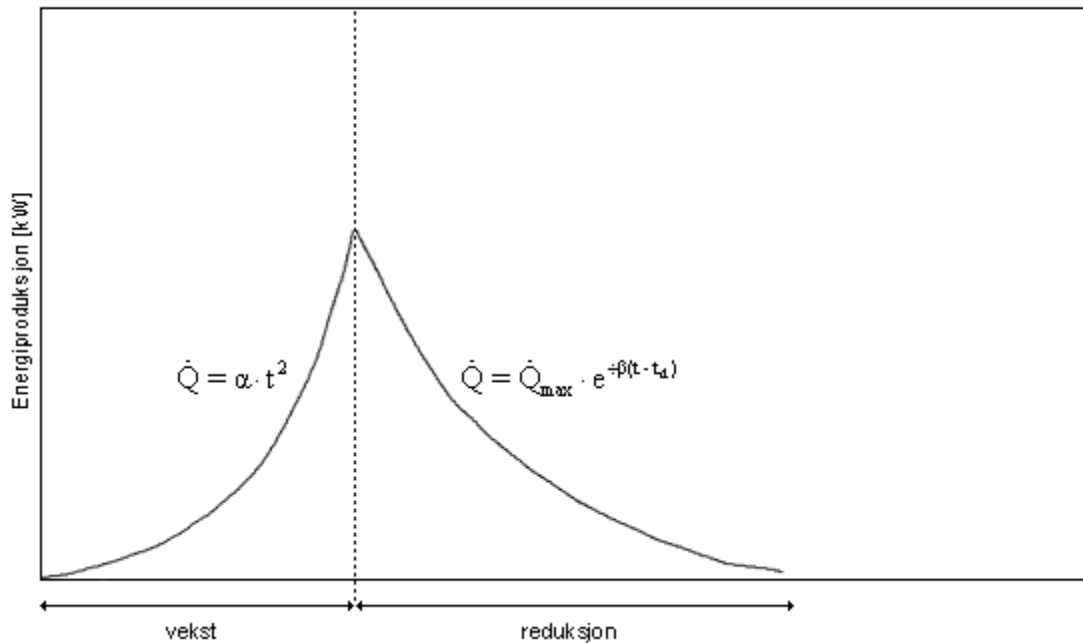
$$t_d = \frac{\chi \cdot E_{tot}}{\dot{Q}_{max}} + \frac{2}{3}t_{fo} - \frac{1}{\beta} \quad [s] \quad (B.8)$$

hvor:

$E_{tot}$  = total teoretisk varmegivende verdi ved fullstendig forbrenning [kJ]

$\chi$  = forbrenningseffektivitet

Dersom  $t_{fo} > t_d$  vil brannen ikke komme i en fase hvor den er fullt utviklet og energiproduksjonen er konstant. Energiproduksjonen vil da ta følgende form:



Figur B.4: Energiproduksjonen for designbrannen når  $t_{fo} > t_d$

Når  $t_{fo} > t_d$  kan maksimal energiproduksjon,  $\dot{Q}_{max}$ , beregnes ved:

$$\dot{Q}_{max} = \chi \cdot \beta \cdot E_{tot} \left( 1 - \frac{\beta^{3/2}}{6} \sqrt{\frac{\chi \cdot E_{tot}}{\alpha}} \right)^2 \quad [\text{kW}] \quad (\text{B.9})$$

Ny tid til reduksjon kan nå finnes ved å kombinere ligning (B.9) og ligning (B.7):

$$t_d = \sqrt{\frac{\beta \cdot E_{tot} \cdot \chi \left( 1 - \frac{1}{6} \beta^{3/2} \sqrt{\frac{E_{tot} \cdot \chi}{\alpha}} \right)^2}{\alpha}} \quad [\text{s}] \quad (\text{B.10})$$

Ingason (1995) har foreslått at maksimal energiproduksjon av branner i tunneler,  $\dot{Q}$ , kan beregnes ut i fra mengden luft som tilføres brannstedet. Hvis lufthastigheten er kjent vil mengden luft inn mot brennstedet være kjent og energiproduksjonen kunne beregnes ved:

$$\dot{Q} = 14.4 \rho_a u A_T \left( \frac{X_{0,O_2} - X_{O_2}}{1 - X_{O_2}} \right) \quad [\text{kW}] \quad (\text{B.11})$$

hvor:

|             |  |                      |
|-------------|--|----------------------|
| $\rho_a$    | = tettheten av luften (ved inntak)                             | [kgm <sup>-3</sup> ] |
| $u$         | = gjennomsnittlig langsgående ventilasjonshastighet i tunnelen | [ms <sup>-1</sup> ]  |
| $A_T$       | = tverrsnittsarealet i tunnelen                                | [m <sup>2</sup> ]    |
| $X_{0,O_2}$ | = volumfraksjon oksygen i innluft                              | -                    |
| $X_{O_2}$   | = volumfraksjon oksygen i utluft                               | -                    |

Det antas generelt at 13.1 MJkg<sup>-1</sup> avgis pr kg O<sub>2</sub> konsumert av brannen, relativ luftfuktighet 50 %, romtemperatur T<sub>0</sub> = 15°C, CO<sub>2</sub> i tilluften er 330 ppm.,  $\rho_a$  tetthet til uteluft er 1 kgm<sup>-3</sup>. Hvis brannen ikke klarer å forbruke alt oksygenet i luften, pga. høy lufthastighet og kort forbrenningssone, vil ligning B.11 overestimere energiproduksjonen. Hvis brannen er stor nok (for eksempel flere biler og lastebiler ved siden av hverandre og på rekke) vil alt oksygenet kunne forbrukes og  $X_{O_2}$  vil da gå mot null.

Det er også utviklet andre anbefalte verdier for energiproduksjon i tunnelbranner. Følgende er foreslått (FIRETUN 1995, PIARC 1999):

- Privatbiler 3-9 MW
- Små lastebiler 20 - 50 MW
- Store lastebiler 120 – 300 MW
- Busser 20 – 120 MW
- Vogntog 100 – 300 MW
- Farlig gods (gass/olje/  
kjemikalier/  
sprengstoff mm) 100 – 1000 MW

Studier om branner i enkle kjøretøy i vegtunneler gjennomført av Ingason (2002), viste at maksimal energiproduksjon kunne bli 150 til 350 MW avhengig av lufttilgang og lengden på det som brant. Storulykkene innbefatter ofte flere kjøretøy som skaper den sammensatte brannen.

## C Eksplosjonsteori

Dette kapitlet introduserer noen av de viktigste størrelsene for at eksplosjoner inntreffer og størrelser som påvirker omfanget av eksplosjoner i vegtunneler. Kapitlet bygger på (Bjerkestvedt, Bakke og van Wingerden 1993; NFPA 2002).

Eksplosjoner kan komme fra situasjoner med sprengstoff eller forekomme som detonasjoner etter antennelse av brennbare gass/luft blandinger. Eksplosjoner kan defineres som rask trykkoppbygning forårsaket av forbrenning. For å få en gasseksplosjon må gassblandingen være innenfor området LEL og UEL. LEL står for "Lower Explosion Limit" og er et uttrykk for den nedre brennbarhetsgrensen for den aktuelle gassblandingen. En gass-sky som har en konsentrasjon tilsvarende 100% LEL vil være tennbar. "Upper Explosion Limit" (UEL) er et uttrykk for den rikeste gassblandingen som er tennbar. Høyere konsentrasjon av hydrokarboner enn dette blandingsforholdet kan ikke antenne. Metangass, for eksempel, er ved standard betingelser (atmosfærisk trykk og 20 °C) tennbar ved konsentrasjoner som er mellom 5 % vol og 15 %. Dersom vi har en umiddelbar antenning, dvs. før gassen får blande seg med luft, vil det oppstå brann, som er den vanligste situasjonen ved antennelse i vegtunneler.

Det er vanlig å dele gasseksplosjoner inn i to typer; eksplosjonsartet brann (deflagrasjon) og detonasjon. Den eksplosjonsartede flammespredningen går med subsonisk fart (fra 1 til 1000 m/s) i forhold til gassen som ikke er antent. Eksplosjonstrykket kan komme opp i flere barg. I visse tilfeller kan en deflagrasjonsbølge akselereres til en detonasjonsbølge. En detonasjonsbølge er en supersonisk forbrenningsbølge, dvs at detonasjonsfronten beveger seg inn i ikke-forbrent gass med en fart høyere enn lydhastigheten. I gass/luftblandinger ved atmosfærisk trykk ligger detonasjons-hastigheten på 1500 – 2000 m/s og spisstrykket er 15-20 bar.

Ved forbrenning av en gassky vil graden av innestenging være viktig. Jo mer innestengt en forbrenning er jo raskere vil trykket bygges opp og mindre "lekker" ut. Skader på mennesker og materiell er avhengig av eksplosjonstrykket, trykkbølger og draglaster (krefter som må til for å holde et legeme fast når det blir utsatt for en forbrenningsbølge - vinddraget). I nyere tid har det ikke vært eksplosjonshendelser i norske vegtunneler i normal drift. Under byggingen av Bragernestunnelen i Drammen (29. juni 1999) inntraff en eksplosjon i en container med eksplosiver og tennere, som drepte tre personer, derav to brannmenn. Mennesker har en høy overlevingssevne når de blir utsatt for eksplosjonsbølger. Det finnes lungeskadedata på at 1% vil overleve et spisstrykk på 3,5 barg og 99% overlever 2 barg. Trommehinner vil bli ødelagt ved ca. 0,25 barg. Det er de indirekte effektene som dreper mennesker utsatt for eksplosjon. Mennesker blir drept eller hardt skadet som følge av brannskader, fragmenter som treffer personene, bygningskonstruksjoner og strukturer som faller sammen, eller personer som blir tatt av trykket og slått inn mot tunge objekter.

En eksplosjon i en tunnel vil være delvis innestengt. Omfanget (størrelsen på spisstrykk, trykkbølger og draglaster) av en eksplosjon i en tunnel er avhengig av flere størrelser:

*Avgrensningen, størrelse og ventilasjonsareal.* Her inngår tunnelens geometri og lengde som gir størrelsen på ventilasjonsåpninger. Det kan også tenkes at for eksempel dører eller forbindelser til nabetunneler blir konstruert med tanke på å ta av eksplosjonstrykk.

*Omfang av obstruksjoner i tunnelen.* Biler og andre kjøretøy, sammen med utforming av tunnelutrustning vil skape turbulente forhold som øker hastigheten av trykkbølgen (Eckhoff 1992).

*Antennespunkt og type antenne.* Antennespunkt lengst borte fra ventilasjonsåpning gir størst spissttrykk. En ytterligere forverring vil skje dersom antennen er høy-energi, for eksempel at vi har en to-trinns eksplosjon.

*Gasskonsentrasjon, gassvolum og type gassblanding.*

Ventilasjonsystemer vil kunne være med på å spre og antenne gass i tunneler med mindre utstyret er Ex sikret (designet for å unngå eksplosjonsfarlige forhold). Ellers vil spredningen og innblanding av luft til brennbar blanding være avhengig av:

- Mengdeforhold (utslippsrater, avdampningsrater med mer)
- Type stoff
- Temperatur i tunnelen/på veibane
- Underlag og drenering
- Luftbevegelse i tunnelen og hastigheten på denne
- Helling

Om det vil kunne skapes antennebare blandinger vil avhenge av utslippshastigheter og avdampning fra det stoffet som lekker. Det er stoffer som bensin, propan og naturgass (metan), som ofte fraktes på veg, enten i større tanker eller på flasker. Ved en situasjon, for eksempel kollisjon, vil det kunne oppstå lekkasje som vil kunne gi eksplosive gassblandinger. Ved mindre lekkasjer fra tanker, eller utstyr i forbindelse med tanker som antennes, kan situasjoner oppstå der tanken varmes opp. Av dette kan det oppstå en BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion). En slik situasjon vil få svært dramatiske effekter for mennesker som befinner seg i tunnelen. Flash branner vil kunne oppstå lokalt nær lekkasjestedet der mindre lommer har fått en brennbar gass/luft blanding.

## D Termiske, toksiske og mekaniske belastninger og menneskers tåleevne

I risikoanalyser er beregninger (anslag) av utfallene eller konsekvensene av de uønskede hendelsene av vesentlig betydning. Uønskede hendelser i tunneler gir i første rekke mekaniske belastninger på mennesker og konstruksjoner, men også termiske og toksiske (giftige) belastninger er vesentlige. Dette vedlegget gir noen betraktninger om disse belastningene og hvilken tåleevne mennesker har over tid når de blir utsatt for slike belastninger. Relevansen av en dypere forståelse av de fysiske fenomenene i tunnelulykker og menneskers fysiologiske egenskaper er stor, fordi risikomodeller, forutsetninger, vurderinger av datamateriale osv. avspeiler denne kunnskapen.

Vedlegget er inspirert av Purser (2002), Twearson (2002) og Bergqvist m.fl. (2002). Menneskers tåleevne defineres som menneskets motstandsevne i forhold til ytre belastninger hvor skadene er reversible (dvs. at skadene vil leges etter behandling). Menneskers toleranseevne defineres som den ytre belastning et menneske kan motstå uten å bli drept (men varige skader kan ha inntruffet). I fremstillingen nedenfor ser vi på hver enkelt belastning for seg. I ulykker vil belastningene ofte være kombinerte, slik at konsekvensanalysene må avspeile det.

### Mekaniske påkjenninger i tunnelulykker

De aller fleste trafikkulykkene i norske vegtunneler innebærer en eller annen form for ukontrollert utløsning av mekaniske krefter som virker på kjøretøyet, som igjen gir mekaniske påkjenninger (støt) på menneskekroppen. Svært få av disse hendelsene medfører antennelse og påfølgende branner. I de ulykkene som har medført branner, er det ofte de mekaniske påkjenningene som har ført til tap av liv (enten direkte eller ved at mennesker blir sittende fastklemt i kjøretøyet), og ikke brannene i seg selv. Hvilke krefter er det da som oppstår i tunnelulykker, og hva tåler menneskekroppen av slike belastninger?

Statens vegvesen baserer seg på følgende forhold i forbindelse med mekaniske påkjenninger:

- Fotgjengere har god mulighet for å overleve kollisjoner med motorkjøretøy med lavere hastighet enn 30 km/t
- Ved sidevegskollisjoner gir hastigheter lavere en 50 km/t god mulighet for at kjøretøyet kan absorbere kreftene og at mennesker ikke blir hardt skadd eller drept.
- Ved møteulykker (frontkollisjoner) er det god mulighet for at kjøretøyene kan ta opp energien gitt av hastigheter lavere enn 70 km/t uten at mennesker blir hardt skadd eller drept.



## Termisk belastning

Varme overføres til nærliggende overflater hovedsaklig i form av *konveksjon* og *stråling*. Dersom det skal studeres virkning på mennesker eller utstyr som befinner seg bak vegger eller i et rom utenfor brannstedet (for eksempel i en lukket bil eller i et tilfluktsrom) vil også evnen materialer har til å lede varme være av vesentlig betydning. Konveksjon er varme som overføres når et varmt fluid er i kontakt med et objekt eller et annet fluid som er kaldt. Varmestråling (elektromagnetisk stråling) er knyttet til overflatenes egenskaper. Evne til å avgi stråling uttrykkes gjennom emissivitet og er avhengig av overflatens farge. Størrelsen avhenger av temperaturen i fjerde potens.

Temperaturutviklingen i en tunnelbrann kan beregnes på bakgrunn av energiproduksjon over tid. Gitt en tunnel uten helling er temperaturen på brannstedet (i selve brannen) som funksjon av tid gitt ved:

$$T_{g,0}(t) = T_0 + \frac{0.7\dot{Q}(t)}{\rho_a u A_T C_p} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{D.1})$$

hvor:

|              |   |   |
|--------------|---|---|
| $T_0$        | = initial temperatur                    | [ $^{\circ}\text{C}$ ]                                |
| $\dot{Q}(t)$ | = energiproduksjon (fra brannscenariet) | [kW]  |
| $\rho_a$     | = tetthet til luft                      | [ $\text{kgm}^{-3}$ ]                                 |
| $A_T$        | = areal av tunnelåpning                 | [ $\text{m}^2$ ]                                      |
| $u$          | = ventilasjons-/vindhastighet i tunnel  | [ $\text{ms}^{-1}$ ]                                  |
| $C_p$        | = spesifikk varmekapasitet av luft      | [ $\text{kJkg}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ] |

Denne modellen er også benyttet i forskning på tunneler med helling (Riess, Bettelini og Brandt 2001).

Temperaturen i de varme røykgassene vil reduseres når avstanden til brannstedet øker ( $x > 0$ ). Temperaturen som funksjon av avstand ( $x$ ) og tid ( $t$ ) er gitt ved:

$$T_g(x, t) = T_0 + [T_{g,0}(\tau) - T_0] e^{-\frac{hPx}{\rho_a u A_T C_p}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{D.2})$$

hvor:

$$\tau = t - \frac{x}{u} \quad [\text{s}] \quad (\text{D.3})$$

og:

|                 |   |                                       |
|-----------------|---|---------------------------------------|
| $T_{g,0}(\tau)$ | = temperatur ved tidspunkt $\tau$       | [kW]                                  |
| $h$             | = varmeovergangskoeffisient             | [kWm <sup>-2</sup> °C <sup>-1</sup> ] |
| $P$             | = perimeter (f. eks. 2-bredde + 2høyde) | [m]                                   |
| $x$             | = avstand nedstrøms fra brannstedet     | [m]                                   |

Tau ( $\tau$ ) er en tidsforskyvingskoeffisient som beskriver røykgassenes transporttid frem til en avstand  $x$ , etter tidspunktet  $t$  ( $\tau$  er den tiden det tar å transportere en forandring som skjer på brannstedet til et definert sted nedstrøms brannen i tunnelen). Perimeter finnes ved å addere to ganger tunnelbredde med to ganger tunnelhøyde, og representerer omkretsen av tunnelverrsnittet.

Varmeovergangskoeffisienten,  $h$ , ants som 0.03 kWm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>. Modellen er basert på at den termiske drivkraften ikke påvirker røykbevegelsen, men at røyken spres av mekanisk eller naturlig ventilasjon.

Varmen som produseres av en brann påvirker overflater og volum i nærheten av arnestedet gjennom temperaturen som skapes i det varme røyklaget. Termisk påvirkning på et menneske gir temperaturøkning i kroppen. Temperaturøkningen skyldes at kroppen ikke klarer å kvitte seg med overskuddsvarmen, ettersom temperaturen er høyere i omgivelsene. Forhold som vil bidra til økt/reduert kroppstemperatur er type bekledning og luftfuktighet. Enkelte bekledninger kan være isolerende og økt luftfuktighet gjør det vanskeligere å kvitte seg med overskuddsvarme. Menneskets tåleevne med hensyn til termisk påvirkning vil variere individuelt, alt etter alder, kroppsvolum, fysisk kondisjon osv. Enkelte vil føle ubehag ved 50 °C, og noen vil få heteslag ved 60 °C. Tabell D.1 viser en gjennomsnittlig effekt på mennesker ved ulike temperaturer.

Tabell D.1: Menneskets respons på temperatur (Mostue, Stensås og Wighus 2002).

| Temperatur [°C] | Effekt                                   |
|-----------------|--|
| 50              | Ubehag                                   |
| 60              | Heteslag                                 |
| 70              | Annen grads forbrenning etter ett minutt |
| 80              | Tåleevne i underkant av en time          |
| 100             | Veldig hurtig brannskade i fuktig luft   |
| 115             | Tåleevne rundt 20 minutt                 |
| 125             | Pustevansker gjennom nese                |
| 150             | Pustevansker gjennom munn                |

|     |  |
|-----|--|
| 160 | Rask, ulidelig smerte mot tørr hud         |
| 180 | Irreversibel skade etter 30 sekunder       |
| 205 | Toleransetid på under 4 minutt ved våt hud |

Mennesker som utsettes for høye temperaturer over tid vil få økt kroppstemperatur, som igjen vil påvirke vitale kroppsfunksjoner og kunne føre til brannskader. Tåleevne for personer som eksponeres for temperaturer utover normal kroppstemperatur kan finnes ved å se på termisk dose,  $F_{temp}$ , som er gitt ved følgende empiriske formel:

$$F_{temp} = \frac{1}{e^{5.18-0.0273T}} t \quad \forall T > 37^{\circ}\text{C} \quad [-] \quad (\text{D.4})$$

hvor:

$T$  = temperatur [°C]

$t$  = tid [min]

Termisk dose beregnes akkumulert for temperaturer over normal kroppstemperatur (37°C), og kritisk dose (eventuelt tålegrense) finnes når  $F_{temp} > 1,0$ . Hvorvidt kritisk dose representerer bevisstløshet eller død må sees i sammenheng effektene gitt i tabell D.1 og hvilke temperaturnivå kritisk dose beregnes ut fra. For eksempel dersom en person eksponeres for temperaturer rundt 50-60 °C over lengre tid, er det rimelig at kritisk dose over 1,0 representerer bevisstløshet, og ikke død. Ligning (D.4) for beregning av termisk dose er basert på gjennomsnittlig luftfuktighet og bekledding, og lavere luftfuktig og bedre isolerte klær vil derfor øke overlevningsevnen.

Foruten eksponering for økt temperatur vil også stråling fra brannkilde og/eller røyklag bidra til termisk påkjenning. Toleransetid for stråling vil variere individuelt (alder, helse, m.v.) og med hensyn til personens bekledding. Ofte settes tåleevnen for stråling over tid lik 2,5 kWm<sup>-2</sup> (Purser 2002). Toleransetid for en gitt mengde stråling er gitt ved følgende empiriske ligning:

$$t_{I_{rad}} = \frac{133}{\dot{q}''^{1.33}} \quad [-] \quad (\text{D.5})$$

hvor:

$t_{I_{rad}}$  = toleransetid for stråling [min]

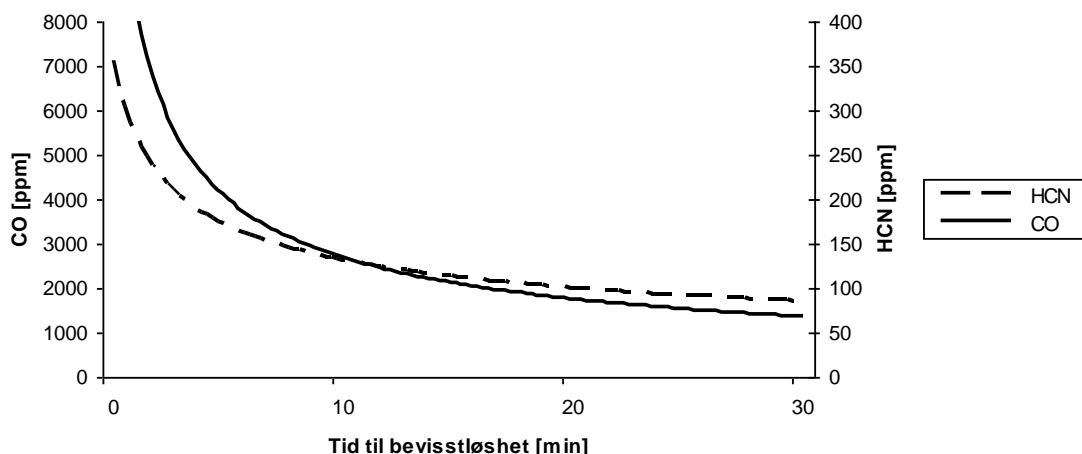
$\dot{q}''$  = strålefluks [kWm<sup>-2</sup>]

## Røykgasser og annen toksisk (giftig) påvirkning

En brann vil produsere giftige røykgasser (røyk, CO, HCN, m.v.), samtidig som oksygen forbrukes. Mangel på oksygen medfører kveling. Produksjonen av kjemiske komponenter og forbruket av oksygen kan deles i to faser: *reduksjonsfase* og *oksidasjonsfase*. I reduksjonsfasen forgasses og dekomponeres materialer, og det dannes giftige gasser som reagerer til røyk, CO, NO<sub>x</sub>, m.v. I oksidasjonsfasen reagerer komponentene fra reduksjonsfasen med oksygenet i luften, og det produseres kjemisk varme og avgasser som CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>O som følge av fullstendig forbrenning. Effektiviteten på reaksjonene mellom komponentene fra reduksjonsfasen og oksygenet varierer, og avhenger blant annet av temperatur og forholdet mellom komponenter og luft. Andel produkter fra reduksjonsfasen som slippes ut av brannen øker når effektiviteten reduseres.

De viktigste toksiske gassene som dannes under en brann er karbonmonoksid (CO), blåsyre (HCN) og karbondioksid (CO<sub>2</sub>). Menneskets tålegrense ovenfor disse gassene vil variere individuelt. Foruten belastningen i form av konsentrasjonen av gassene og eksponeringstiden, vil tåleevnen (styrken) være avhengig av kroppens størrelse og helsetilstanden til individet.

*Karbonmonoksid (CO)* er branngassen som utgjør størst trussel for mennesker. CO dannes ofte i store mengder under en brann, spesielt dersom brannen er underventilert (mangel på oksygen). Gassen lagres i kroppen, den binder seg til de røde blodlegemene og hemmer oksygentransporten. Tålegrensen med hensyn til CO varierer individuelt. Retningsgivende verdier for andel kulloksidhemoglobin (COHb) i blodet er at 30% COHb medfører bevisstløshet og 50% COHb medfører død. Figur D.1 angir tid til bevisstløshet ved ulik eksponering av CO og HCN:



Figur D.1: Tid til bevisstløshet ved eksponering av CO og HCN (NFPA 2002).

Tabell D.2 viser den gjennomsnittlig effekt effekten på mennesker etter eksponering av noen CO konsentrasjoner over tid.

Tabell D.2: Forventet effekt på mennesker ved eksponering av CO (Harzell 1989)

| CO [ppm] | Effekt  |
|----------|---|
| 200      | Hodepine i løpet av 2-3 timer.  |
| 800      | Hodepine, svimmelhet og kvalme i løpet av ¾ time, og kollaps og mulig bevisstløshet i løpet av 2 timer. |
| 3 200    | Hodepine, svimmelhet i løpet av 5-10 minutter, og bevisstløshet og mulig død i løpet av 30 minutter.    |
| 6 400    | Hodepine, svimmelhet i løpet av 1-2 minutter, og bevisstløshet og mulig død i løpet av 10-15 minutter.  |
| 12 800   | Umiddelbar effekt, bevisstløshet og død i løpet av 1-3 minutter.  |

*Hydrogencyanid* [HCN] eller blåsyre er omtrent 20 ganger giftigere enn CO, og effekten i menneskekroppen skjer raskere som følge av HCN. Når cyanidet i blåsyren tas opp i blodet fører det til ukontrollerte muskelbevegelser (ataksi) etterfulgt av koma, krampe og død. Dødelig cyanidnivå i blodet er over 3  $\mu\text{gml}^{-1}$ , mens normalt nivå er under 2  $\mu\text{gml}^{-1}$ . Figur D.1 viser tid til bevisstløshet ved eksponering av HCN.

*Karbondioksid* [CO<sub>2</sub>] er giftig ved konsentrasjoner større enn 6 vol%, men slike konsentrasjoner er ikke vanlige. Allikevel har CO<sub>2</sub> stor betydning ved at den øker innåndingsfrekvensen, som blant annet medfører økt opptak av CO. For eksempel vil omtrent 3 vol% CO<sub>2</sub> føre til en fordobling av innåndingsfrekvensen.

I forhold til **branner** vil *produksjon av toksiske gasser* noe forenklet kunne sies å være proporsjonal med forbrenningsraten:

$$\dot{G}_j'' = y_j \cdot \dot{m}'' \quad [\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (\text{D.5})$$

hvor:

$$\dot{G}_j'' = \text{masse produsert av komponent } j \quad [\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

$$y_j = \text{ytelse av komponent } j \quad [\text{gg}^{-1}]$$

$$\dot{m}'' = \text{forbrenningsraten til brensel/brannforløp} \quad [\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

Konsentrasjonen av de toksiske gassene som funksjon av tid fra brannen starter og avstand fra brannstedet, kan bestemmes ved å anta at de blandes fullstendig ved

arnestedet. Da er konsentrasjon av henholdsvis karbonmonoksid (CO) og karbondioksid (CO<sub>2</sub>) gitt ved:

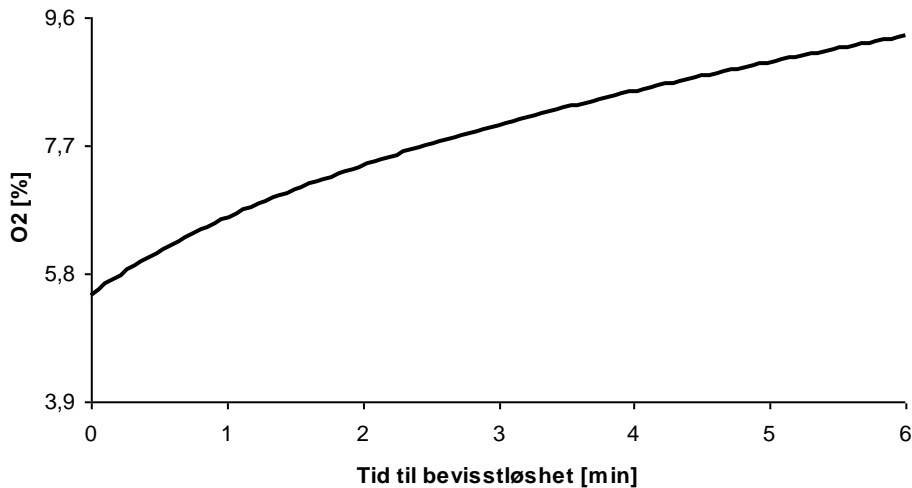
$$X_{\text{CO}}(t, x) = \left[ Y_{\text{CO}} - \frac{M_a}{M_{\text{CO}}} \frac{Q(\tau)}{\Delta H \rho_a u A_T} \right] \cdot 10^6 \quad [\text{ppm CO}] \quad (\text{D.6})$$

$$X_{\text{CO}_2}(t, x) = \left[ \frac{Q(\tau)(1+r_0)}{\Delta H \rho_a u A_T} \right] \cdot 100 \quad [\text{vol\% CO}_2] \quad (\text{D.7})$$

hvor:

|                 |  |                       |
|-----------------|--|-----------------------|
| $Q(\tau)$       | = energiproduksjon ved tiden $\tau$    | [kW]                  |
| $\Delta H$      | = effektiv forbrenningsverdi           | [kJkg <sup>-1</sup> ] |
| $M_a$           | = molvekt av luft                      | [gmol <sup>-1</sup> ] |
| $M_{\text{CO}}$ | = molvekt av karbonmonoksid            | [gmol <sup>-1</sup> ] |
| $r_0$           | = støkiometrisk forbrenningsverdi      | [-]                   |
| $\rho_a$        | = tetthet til luft                     | [kgm <sup>-3</sup> ]  |
| $A_T$           | = areal av tunnelåpning                | [m <sup>2</sup> ]     |
| $u$             | = ventilasjons-/vindhastighet i tunnel | [ms <sup>-1</sup> ]   |
| $Y_{\text{CO}}$ | = ytelse av CO                         | [-]                   |

Tidsforskyvningskoeffisienten ( $\tau$ ) er gitt ved ligning (D.3) ovenfor. *Oksygen* [O<sub>2</sub>] utgjør en andel på omtrent 21 vol% i normal luft. Ved brann vil oksygenkonsentrasjonen avta, og kritisk konsentrasjon for at mennesker skal kunne overleve er rundt 9 vol%. Denne konsentrasjonen fører til pusteproblemer og fare for bevisstløshet. Et stort fall i oksygenkonsentrasjonen krever at brannen er kraftig underventilert, noen som ikke er vanlig ved tunnelbrann. Figur D.2 viser gjennomsnittlig tid til bevisstløshet ved fallende oksygenkonsentrasjon.



Figur D.2: Tid til bevisstløshet ved eksponering av lave oksygenkonsentrasjoner (NFPA 2002)

I forhold til **branner** vil *forbruket av oksygen* noe forenklet kunne sies å være proporsjonal med forbrenningsraten:

$$\dot{C}_O'' = c_O \cdot \dot{m}'' \quad [\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (\text{D.8})$$

hvor:

$$\dot{C}_O'' = \text{forbruksraten av oksygen} \quad [\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

$$c_O = \text{ytelse av komponent o} \quad [\text{gg}^{-1}]$$

$$\dot{m}'' = \text{forbrenningsrate} \quad [\text{gm}^{-2}\text{s}^{-1}]$$

Konsentrasjon av oksygen ( $\text{O}_2$ ) som en funksjon av tid fra brannstart og avstand fra brannstedet er gitt ved:

$$X_{\text{O}_2}(t, x) = \left[ X_\infty - \frac{Q(\tau) M_a}{\Delta H M_{\text{O}_2}} \left( \frac{X_\infty M_a}{M_{\text{O}_2}} + r_0 \right) \right] \quad [\text{vol\% O}_2] \quad (\text{D.9})$$

hvor:

$$X_\infty = \text{andel oksygen i luft} \quad [-]$$

$$Q(\tau) = \text{energiproduksjon ved tiden } \tau \quad [\text{kW}]$$

|            |  |                      |
|------------|--|----------------------|
| $\Delta H$ | = effektiv forbrenningsverdi           | $[\text{kJkg}^{-1}]$ |
| $M_a$      | = molvekt av luft                      | $[\text{gmol}^{-1}]$ |
| $M_{O_2}$  | = molvekt av oksygen                   | $[\text{gmol}^{-1}]$ |
| $r_0$      | = støkiometrisk forbrenningsverdi      | $[-]$                |
| $\rho_a$   | = tetthet til luft                     | $[\text{kgm}^{-3}]$  |
| $A_T$      | = areal av tunnelåpning                | $[\text{m}^2]$       |
| $u$        | = ventilasjons-/vindhastighet i tunnel | $[\text{ms}^{-1}]$   |

Tidsforskyvningskoeffisienten ( $\tau$ ) er gitt ved ligning (D.3) ovenfor. Den toksiske påvirkningen på mennesker varierer, da tålegrensene vil variere blant annet som følge av alder og helsetilstand. Likevel finnes det typiske verdier for når konsentrasjonene antas å bli kritiske. Noen av disse vises i tabell D.3 når eksponeringen kun gjelder en gass omgangen.

Tabell D.3: Typiske verdier for tålegrense (BSI 1997).

| Produkt         | Maksimal konsentrasjon [%] | Akkumulert dose [%min]<br>(hhv. 5 og 30 minutt) |           |
|-----------------|----------------------------|---|-----------|
|                 |                            | 5 minutt  | 30 minutt |
| CO              | > 1                        | 1,5   | 1,5       |
| CO <sub>2</sub> | > 6                        | 25  | 150       |
| O <sub>2</sub>  | < 9                        | 45  | 360       |
| HCN             | > 0,01                     | 0,05  | 0,225     |

Tid til kritisk nivå inntreffer kan bestemmes ved å beregne fraksjonsdose for de forskjellige produktene. Bevisstløshet eller død inntreffer når fraksjonsdosen overstiger 1,0. Ligningene (D.6, D.7 og D.9) utgjør basis i ligningene for fraksjonsdose som er gitt ved:



$$F_{i,CO} = \frac{K \cdot ppmCO^{1.036}}{D} \cdot t \quad [-] \quad (D.10)$$

$$F_{i,HCN} = \frac{1}{e^{5.396 - 0.023 \cdot ppmHCN}} \cdot t \quad [-] \quad (D.11)$$

$$F_{i,CO_2} = \frac{1}{e^{6.1623 - 0.5189 \cdot vol\%CO_2}} \cdot t \quad [-] \quad (D.12)$$

$$F_{i,O_2} = \frac{1}{e^{8.13 - 0.54(20.9 - vol\%O_2)}} \cdot t \quad [-] \quad (D.13)$$

hvor:

- $i$  = ID for fraksjonsdose til bevisstløshet (*fractional incapacitation dose*).  
 = LD for fraksjonsdose til død (*fractional lethal dose*).

og:

- ppmCO = ppm karbonmonoksid i luften [ppm]  
 ppmHCN = ppm hydrogencyanid i luften [ppm]  
 vol%CO<sub>2</sub> = andel karbondioksid i luften [vol%]  
 vol%O<sub>2</sub> = andel oksygen i luften [vol%]  
 K = konstant som avhenger av individets pustefrekvens [RMV] [-]  
 D = kulloksidhemoglobin [COHb] i blodet [%]  
 t = eksponeringstid [min]

Konstanten K settes lik  $8,292510^{-4}$  ved lett aktivitet og  $1,9910^{-4}$  ved hvile. Kulloksidhemoglobin i blodet settes lik 30% og 50% ved henholdsvis bevisstløshet og død.

Da kritiske verdier vil oppnås som et resultat av samvirke mellom de ulike gassene må total fraksjonsdose beregnes akkumulert ved å summere effekten av CO, HCN og O<sub>2</sub> i eksponeringstiden, med korrigerer for økt pustefrekvens som følge av CO<sub>2</sub>. Total fraksjonsdose til henholdsvis bevisstløshet og død kan da uttrykkes ved:

$$F_{ID} = (F_{ID,CO} + F_{ID,HCN}) \cdot V_{CO_2} + F_{ID,O_2} \quad [-] \quad (D.14)$$

$$F_{LD} = (F_{LD,CO} + F_{LD,HCN}) \cdot V_{CO_2} + F_{LD,O_2} \quad [-] \quad (D.15)$$

Oppsummert inntreffer bevisstløshet (i=IN) eller død (i=LD) når akkumulert dose  $F_i > 1,0$  eller  $F_{i,CO_2} > 1,0$ .



International Research Institute of Stavanger

**Hovedkontor**

Postboks 8046  
4068 Stavanger  
Tlf: 51 87 50 00  
Fax: 51 87 52 00

Besøksadresse: Prof. Olav Hanssensvei 15

E-post: [firmapost@iris.no](mailto:firmapost@iris.no)

Org. nummer: 988 944 459 MVA

**Bergen**

Thormøhlensgate 55  
5506 Bergen

**Mekjarvik**

Mekjarvik 12  
4072 Randaberg