



RF – Rogalandsforskning. <http://www.rf.no>

Ove Njå og Alf Reidar Nilsen
Bruk av risikoanalyser
i
planlegging og drift av vegtunneler

Rapport RF – 2004/103

Prosjektnummer: 720 1956
Prosjektets tittel:
Kvalitetssikrer: Terje Aven

Oppdragsgiver(e): Statens vegvesen, Vegdirektoratet
Forskningsprogram:

ISBN: 82-490-0315-2
Gradering: Åpen

Forord

”Gjennomgående sikkerhetstenkning i tråd med nullvisjonen skal være et bærende prinsipp i ledelse, planlegging og gjennomføring av veg- og vegtrafikktiltak”. Dette slås fast i Nasjonal transportplan 2006-2015. Statens vegvesen ønsker en risikobasert tilnærming til planlegging og drift av vegtunneler for å forebygge ulykker med alvorlige konsekvenser. Håndboken beskriver hvordan risikoanalyser kan brukes når beslutninger knyttet til tunneler skal fattes.

Hensikten med risikoanalyser er å gi et underlag for beslutninger som påvirker sikkerheten i tunneler. Statens vegvesen begrenser ikke risikoanalyser til en enkelt metode, men anbefaler stor fleksibilitet i valg av metoder, tilpasset ulike problemstillinger og formål. Risikoanalysen gjenspeiler den kunnskap analysegruppen har om tunnelsystemet, anvendt i et fremtidsperspektiv. Da er det ikke tilstrekkelig å beskrive risiko kun gjennom målinger og historiske data.

Statens vegvesen legger stor vekt på at ulike aktører gis anledning til å komme med innspill i arbeidet med risikoanalysen. Å sørge for tilstrekkelig sikkerhet er en kontinuerlig prosess gjennom hele tunnelens levetid, fra utredningsfasen til drift og vedlikehold og eventuelt stengning. Et hovedprinsipp er å utnytte all tilgjengelig kompetanse og informasjon gjennom involvering av kompetente personer som ivaretar faglige synspunkter og andre aspekter (interesseorganisasjoner, utrykningsetater, osv). Det søkes etter tverrfaglig kompetanse.

Håndboken er utviklet av Alf Reidar Nilsen og Ove Njå, SEROS (Høgskolen i Stavanger og RF-Rogalandsforskning). Vi håper at den vil hjelpe og stimulere til økt bruk av risikoanalyser som en del av beslutningsgrunnlaget.

Stavanger, 07. oktober 2004

Ove Njå, prosjektleder

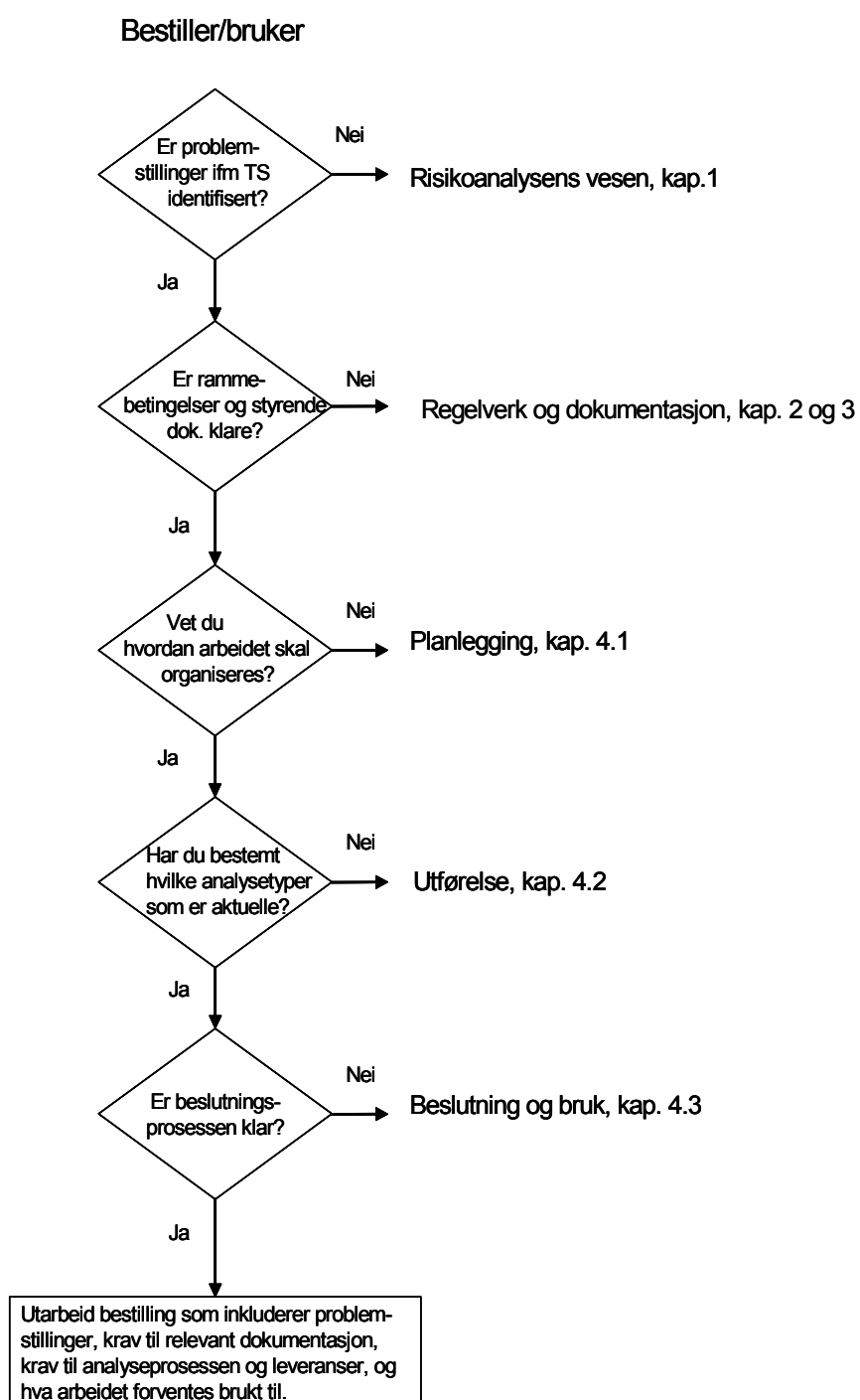
Innhold

Leseveiledning	5
Forkortelser	8
Definisjoner	8
1 HVORFOR UTFØRE RISIKOANALYSER AV VEGTUNNELER?	11
2 RISIKOBASERT REGELVERK OG DOKUMENTASJON	14
2.1 Relevant lov- og regelverk	14
2.2 Funksjonskrav til utforming og drift av vegtunneler	15
3 BRUK AV RISIKOANALYSER I PLANLEGGING OG DRIFT AV VEGTUNNELER	16
3.1 Oversiktsplaner	19
3.2 Reguleringsplaner	20
3.3 Byggeplaner	21
3.4 Utbygging	21
3.5 Drift- og vedlikehold	21
4 METODE FOR Å PLANLEGGE, GJENNOMFØRE OG BRUKE EN RISIKOANALYSE	22
4.1 Fase I: Planlegging av prosess og organisering av arbeidet	22
4.2 Fase II: Hvordan utføre risikoanalysen?	27
4.3 Fase III: Beslutning og bruk av risikoanalyser	47
5 LITTERATUR	49
5.1 Referanser	49
5.2 Annen relevant litteratur	53
VEDLEGG	55
A Data fra tunnelulykker	55
B Brannodynamikk og brannteori	60
C Eksplosjonsteori	69
D Termiske, toksiske og mekaniske belastninger og menneskers tåleevne	71
E Risikoanalyseteknikker	82
F Oversikt over simuleringsverktøy for brann og eksplosjon i tunnel	86
G Funksjonelle krav til sikkerhet	92

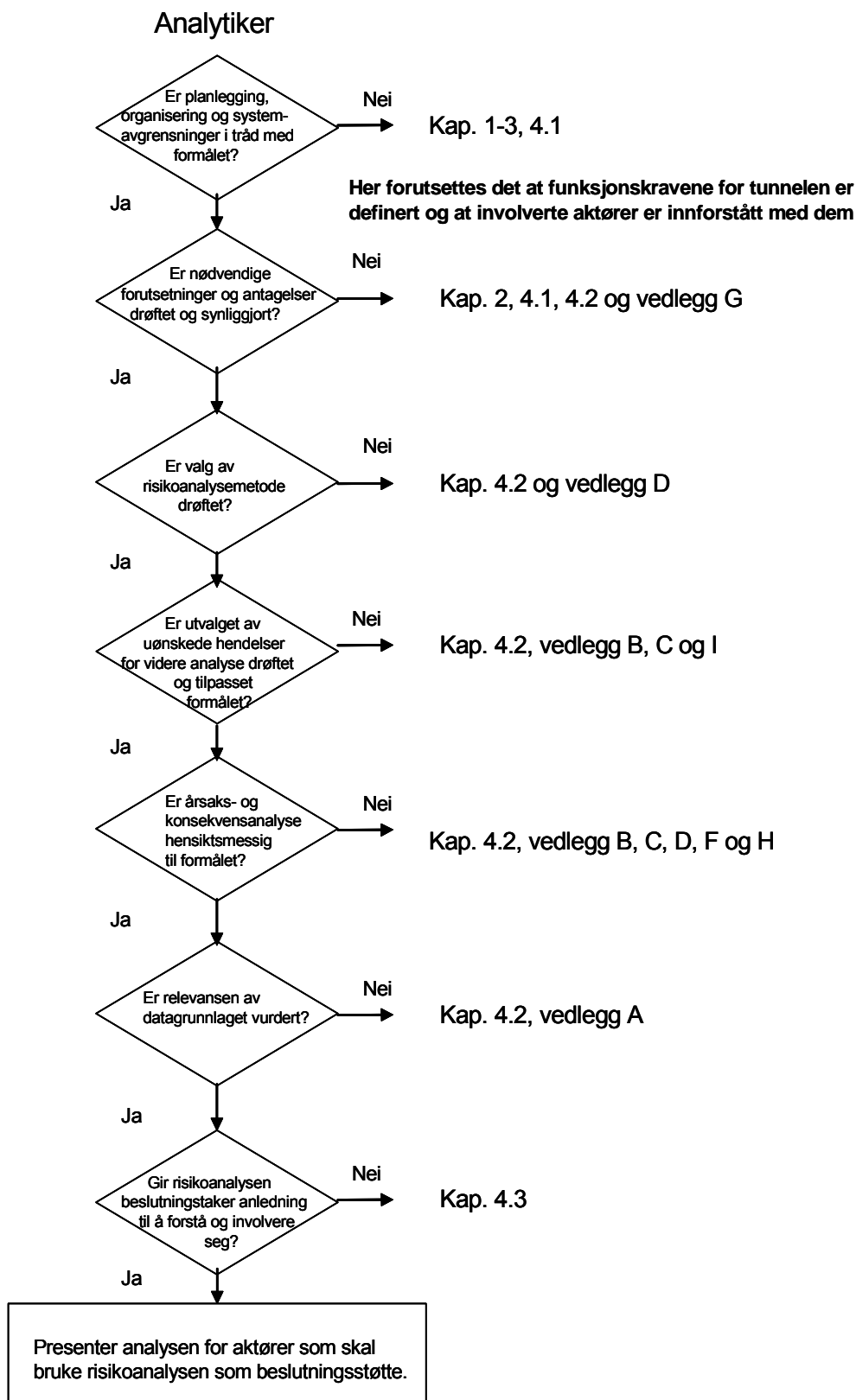
H	Menneskelige reaksjoner – rømming	93
I	Klasser med hensyn til farlig gods (ADR)	99

Leseveiledning

Denne håndboken henvender seg til personer som planlegger, bygger eller drifter vegtunneler. Målet er å ivareta sikkerhet på linje med andre verdier som for eksempel fremkommelighet, miljø, økonomi og estetikk. I den grad personer ikke vurderer å ha kompetanse til å planlegge og utføre risikoanalyser selv, skal den gi tilstrekkelig bakgrunn til å skreddersy en bestilling av risikoanalyse i tråd med det spesifikke behovet. Bruken av risikoanalysen er da spesielt fokusert.



Håndboken henvender seg også til risikoanalytikere i den forstand at den gir føringer for hvordan analyser forventes utført, hvordan involvering og medvirkning ivaretas, hvilke viktige størrelser som skal analyseres og hvordan risikoresultatene skal forstås og brukes. Risikoanalytikeren kan på denne måten både bli evaluert på analyseprosessen og analysens innhold.



For at risikoanalysen skal være god, må metode, modeller og data være sporbare og åpne for innsyn. Analysen bør gi anbefalinger til løsninger og tiltak som kan bidra til at risiko blir redusert. Andre aktører, for eksempel kommuner og transportører av farlig gods, må kunne bruke analysen som underlag for sine plan- og beslutningsprosesser.

Forkortelser

ADR	ADR-avtalen er ”Den europeiske avtale om internasjonal vegtransport av farlig gods”, som Norge sluttet seg til i 1976.
FAR	Fatal Accident Rate. Det statistisk forventede tap av liv pr. 100 millioner (10 ⁸) eksponerte timer
FOBTOT	Forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn
HAZOP	Hazard and operability analysis – systematisk gjennomgang av systemer og prosedyrer
QRAM	Quantified Risk Assessment Method – programverktøy for beregning av risiko fra farlig gods transport i tunneler utviklet av OECD
PLL	Potential Loss of Life. Det statistisk forventede antall drepte i løpet av et år.
ROS	Risiko- og sårbarhetsanalyse
SJA	Sikker jobb analyse
Svv	Statens vegvesen
TEK	Tekniske forskrifter til plan og bygningsloven
TS	Trafikksikkerhet
TUSI	TUNnelSIkkerhet – programverktøy for beregning av brann- og trafikkulykkesfrekvenser i tunneler, utviklet av TØI og VD
TØI	Transportøkonomisk institutt
VD	Vegdirektoratet
ÅDT	Årsdøgntrafikk – gjennomsnittlig antall kjøretøy per døgn

Definisjoner

Akseptkriterier for risiko	Kriterier basert på forskrifter, standarder, erfaring og/eller teoretisk kunnskap som legges til grunn for beslutninger om akseptabel risiko. Akseptkriterier for risiko kan uttrykkes med ord eller tall.
Analyseobjekt	Vegsystemet bestående av tekniske, organisatoriske, miljømessige og menneskelige systemer/forhold som omfattes av risikoanalysen.
Barrierer	Tiltak og funksjoner som er planlagt for å bryte et spesifisert uønsket hendelsesforløp.

Beredskap	Omfatter alle tekniske, operasjonelle og organisatoriske tiltak som hindrer at en inntrådt faresituasjon utvikler seg til en ulykkessituasjon, eller som hindrer eller reduserer skadevirkningene av inntrådte ulykkessituasjoner.
Beslutningskriterier	Kriterier som har innvirkning på beslutninger som skal tas, for eksempel akseptkriterier for risiko, økonomiske kriterier, tilgjengelig tid og hva som er politisk akseptabelt.
Eksplosjon	En eksoterm kjemisk prosess som, når den forløper ved konstant volum, vil forårsake en meget hurtig og betydelig trykkøkning.
Konsekvens	Følge av en uønsket hendelse. Konsekvenser kan uttrykkes kvalitativt som skadegrad eller kvantitativt som antall ulykker eller skader på mennesker, miljø eller materielle verdier.
Konsekvensanalyse	Systematisk fremgangsmåte for å beskrive og/eller beregne mulig skadeomfang på mennesker, miljø og materielle verdier som følge av uønskede hendelser.
Overtenning	Rask overgang under brann til en tilstand der alle overflater i et rom deltar i brannen.
Risiko	Uttrykk for den fare som uønskede hendelser representerer for mennesker, miljø og økonomiske verdier. Risikoen uttrykkes ved sannsynligheten for og konsekvensene av de uønskede hendelsene. Denne håndboken omhandler først og fremst risiko for alvorlige personskader og tap av liv.
Risikoanalyse	Systematisk fremgangsmåte for å beskrive og/eller beregne risiko. Risikoanalysen gjennomføres ved kartlegging av uønskede hendelser, og årsaker til og konsekvenser av disse.
Risikobasert sikkerhetsstyring	Proaktiv styring av sikkerhet ved hjelp av analyser og vurderinger av risiko og effektivitet av sikkerhetstiltak (barrierer/beredskap).
Risikobilde	Samlet presentasjon av risikoresultater.
Risikoreduserende tiltak	Tiltak med sikte på å redusere sannsynlighet for og/eller konsekvens av uønskede hendelser.
Sikkerhetsstrategi	Overordnet plan for hvordan oppsatte mål for sikkerhet skal oppnås (kan bestå av flere delstrategier, for eksempel strategi for å hindre at brann oppstår).

Sikkerhetsfunksjon	En avgrenset del av sikkerhetsoppgavene som har til hensikt å hindre eskalering av ulykkeshendelsen. Sikkerhetsfunksjon kan for eksempel relateres til rømming fra tunnel.
Sikkerhetsstyring	Systematiske tiltak en organisasjon iverksetter for å oppnå, opprettholde og videreutvikle et sikkerhetsnivå i overensstemmelse med definerte mål.
Trafikksikkerhetstiltak	Alle tiltak som har til hensikt å begrense ulykker og skader i vegtrafikken.
Uønsket hendelse	Hendelse eller tilstand som kan medføre skader på mennesker, miljø eller materielle verdier.

1 Hvorfor utføre risikoanalyser av vegtunneler?

Tunnelulykker

Det forekommer trafikkulykker og det brenner i norske veitunneler flere ganger i året. En utførlig presentasjon er gitt i Amundsen og Raner (1997) og Amundsen, Raner og Engebretsen (2001). De fleste ulykkene inntreffer like utenfor tunnelåpning eller like etter innkjøring i tunnel. Ulykkesfrekvensen er historisk sett 3 ganger høyere ved åpning i forhold til midt inne i tunnelen.

67 tunnelbranner er innrapportert i Norge over en 10-årsperiode (data fra 1997 mangler). Årsakene til brann i biler har ofte vært knyttet til elektriske systemer, drivstoff, eksterne tennkilder, kollisjon eller varmgang.

I 29 av brannene er det oppgitt hvordan de er slokket. Brannvesenet har slokket 18 branner, mens det er brukt brannslukkere fra tunnelen i 11 tilfeller. Det er stort sett branner i tyngre kjøretøy samt brann etter kollisjon som er slokket av brannvesenet. Mange brannforløp er stoppet tidlig fordi trafikantene selv har ordnet opp. Ved flere tilfeller har trafikantene brukt håndsløkkerne plassert i tunnelene. Andre ganger har medtrafikanter hjulpet personer bort fra brannområdet.

Det har vært få dødsfall som følge av tunnelbranner i Norge. Det antas at de få som har blitt drept, har stort sett omkommet på grunn av kollisjonskreftene og i liten grad av den påfølgende brannen. Det er da også ved ulykkesstedet liv har gått tapt. Lengre borte fra brannstedet har mennesker kunnet tatt seg uskadd ut av tunnelene med egen hjelp og ofte i eget kjøretøy. I tunnelbranner i Europa har flere mennesker omkommet lengre borte fra brannstedet. Giftig røyk har vært årsaken. Dette kan skyldes at evakuering har kommet sent i gang.

Hittil er brannen i Seljestadtunnelen den største i Norge, se vedlegg A for nærmere presentasjon av hendelser. Bussbrannen i Ekebergtunnelen kunne fått større følger. Erfaringer fra branner i utenlandske tunneler kan ikke uten videre brukes på norske tunneler, fordi trafikkmønster, ventilasjonssystemer og materialbruk ofte er forskjellig. Men informasjonen er ikke uinteressant, for eksempel er kunnskap om menneskelige reaksjoner i slike hendelser interessant.

Dramatiske hendelser i vegtunneler har involvert brann i kjøretøy for godstransport eller kollisjoner der flere kjøretøy var involvert i startbrannen. Brannen har så spredd seg videre til andre kjøretøy. Erfaringene fra disse hendelsene er beskrevet i prosjektet NEDIES, Lessons Learnt From Tunnel Accidents 2001 (Colombo 2001). NEDIES konkluderer med blant annet viktigheten av at førere av tungtransport, busser med mer læres opp til å ta ledelse ved ulykkeshendelser og at de sammen med andre tunnelbrukere er informert om hva som er korrekt opptreden ved ulykkeshendelser. Det konkluderes også med at sikkerhet må bygges inn i tunnelen som mindre stigning, røykevakuering, sikre områder med mer.

Risiko og risikoanalyse

For å kunne si noe om risiko i vegtunneler, må det utvikles modeller av den spesielle tunnelen som beskriver hvordan aktiviteten i tunnelen kan føre til uønskede hendelser eller feil i ulike deler av tunnelsystemet. Ved så å bruke kunnskap om delsystemer og komponenter kan en ved hjelp av modellene si noe om hvordan hele systemet vil fungere. Modellene gjør det mulig å identifisere hva som er viktige bidragsyttere til risiko og hva som er effekten av ulike tiltak. Det er viktig å være klar over at risikoanalysen er et beslutningsgrunnlag. Den gir ikke sannheten om fremtiden.

Modell

En modell er en forenklet presentasjon av virkeligheten. I en risikoanalyse kan modellen være presentert som ren tekst eller som fysiske og/eller matematiske formler og regler.

I risikoanalysen forsøker vi å “måle” risiko for å gi beslutningsstøtte i forhold til valg av løsninger og tiltak. Risiko gjelder tap og skader som kan oppstå i fremtiden. Vi kan ikke forutsi med sikkerhet hva som vil skje; tekniske komponenter kan plutselig svikte og mennesker kan gjøre ulike typer “feil”. Det er her risikoanalysene kommer inn. Det er redskapet vi bruker for å kunne si noe om usikre fremtidige størrelser. Våre beslutninger i dag vil påvirke hva som vil skje i fremtiden. Gjennom analysene ønsker vi å få et bedre underlag for å treffe gode beslutninger i dag slik at ulykker, skader og tap kan unngås i framtiden. Analysene vil være til hjelp for å kunne prioritere tilgjengelige ressurser på best mulig måte.

Sentrale målsettinger med risikoanalysene er at de skal:

- Være et hjelpemiddel til å systematisere kartleggingen av uønskede hendelser.
- Legges til grunn som forutsetninger i planlegging av vegtunneler.
- Avklare hvilke hendelser og laster som skal legges til grunn for dimensjonering av sikkerheten i vegtunnelen.
- Bidra til å synliggjøre konsekvenser av uønskede hendelser.
- Bidra til å bedre kvaliteten og effektiviteten av trafikkavviklingen i vegtunnelene.
- Bidra til mer kostnadseffektive vegtraseer gjennom bruk av tunnel.
- Bidra til en balansert opplevelse av risiko for trafikanter.
- Bidra til å etablere god beredskap.
- Bidra til effektive ulykkes- og skadeforebyggende tiltak.
- Bidra til gode og tilpassede skadereduserende tiltak.

Problemstillinger som belyses i risikoanalysen

- Hvilke uønskede hendelser kan inntreffe i tunnelen?
- Hvor mange uønskede hendelser av bestemt kategori kan inntreffe i tunnelen?
- Hvorfor kan de uønskede hendelsene inntreffe?
- Hva blir konsekvensen av de uønskede hendelsene?
- Hvilken usikkerhet er forbundet med hvorvidt den uønskede hendelsen eller utfallet vil inntreffe?
- Hvilken usikkerhetsfordeling er forbundet med antall hendelser eller utfall av en bestemt type kategori?
- Hva kan gjøres for å redusere hyppighet og konsekvenser av uønskede hendelser i tunnelen?
- Hvilken ytelse (effekt) har spesifikke tiltak eller barrierer?

Det er viktig at risikoanalysene ses i sammenheng med tilsvarende analyser fra andre offentlige myndigheter og virksomheter, for eksempel kommunene, helsemyndighetene og brannvesen.

Kriterier for å utføre risikoanalyser

Alle tunneler skal ikke analyseres med hensyn til risiko for ulykker. Risikoanalyse skal kun utføres når det er behov for å forbedre beslutningsgrunnlaget. Tunneler som har en standard utforming, trafikkmengde, osv., skal vurderes opp mot forhåndsdefinerte ulykkes- og brannscenarier. Disse er standardiserte ut fra generelle risikoanalyser¹.

EU har innskjerpet kravene til sikkerhet i vegtunneler (Amundsen 2004) på TERN veger². EU-direktivet (Directive 2004/54/EC of the European parliament and of the council on minimum safety standards for tunnels in the Trans-European Road Network) krever at risikoanalyser skal være utført av en virksomhet som er funksjonelt uavhengig av tunneleier og at beste praksis benyttes. EU kommisjonen har et overordnet mål om å utvikle en felles harmonisert risikoanalysemetodikk. Vedlegg 1 til direktivet gir bestemmelser om i hvilke tilfeller det kan eller skal gjennomføres risikoanalyser.

- A. Generelt gjelder at dersom en tunnel har en spesiell utforming, spesiell trafikkfordeling osv., skal det gjennomføres en risikoanalyse. Risikoanalysen skal da brukes for å bestemme om det er behov for å gjennomføre ekstra sikkerhetstiltak for å opprettholde risikonivået til en ”normal” tunnel. Modellen skal ta hensyn til sikkerheten til brukerne og mulige konsekvenser av slike ulykker.
- B. Det er tillatt å gjøre mindre avvik fra bestemmelsene i direktivet. Forutsetningen er at avviket beskrives, argumenter fremføres og at en risikoanalyse viser at samme sikkerhet kan opprettholdes med alternative tiltak.
- C. Risiko skal vurderes der andelen tunge kjøretøy (over 3,5 tonn) overstiger 15 % og der årstidsvariasjoner gir meget høy trafikk.
- D. Det skal gjennomføres risikoanalyse dersom bredden av et av kjørefeltene er mindre enn 3,5 m.
- E. Når en skal avgjøre om transport av farlig gods i tunneler skal tillates, skal det gjennomføres en risikoanalyse.
- F. Det skal gjennomføres en risikoanalyse for å vurdere om tunge kjøretøy kan tillates å foreta forbikjøring.

Risikoanalyser gjennomføres for å kunne utforme, bygge og drifte tunneler med så høy sikkerhet som mulig. Det er byggherrens ansvar å vurdere analysen og gjennomføre de tiltak som er nødvendige for sikkerheten.

¹ Vegdirektoratet skal definere disse standardscenariene.

² TERN veger i Norge er E6, E16, E18, E39 og rv23 og noen mellomriksveger.

2 Risikobasert regelverk og dokumentasjon

Risikobasert styring er grunnlaget for gjennomgående proaktiv sikkerhetstenkning. Proaktiv sikkerhetsstyring betyr at vi vurderer risiko før ulykker eller uønskede hendelser har inntruffet. Nullvisjonen og regelverket som gjelder for vegtunneler tilsier denne formen for styring. Det er en endring i forhold til måten vegsektoren tidligere har styrt sikkerhet på, som i hovedsak har vært detaljerte krav til løsninger og tiltak der ulykker allerede har skjedd. Innføring av risikobasert styring innebærer ikke at ”gammelt” regelverk må settes til siden, men at nytt regelverk blir tilpasset det eksisterende. På denne måten må gjeldende vegnormaler og håndbøker som stiller krav til konkrete løsninger forstås som minimumskrav i forhold til de funksjonene som søkes oppnådd med vegtunnelen. Risikoanalysen kan gi gode argumenter for å redusere på kravene i for eksempel vegnormalene, og saken behandles da som en fravikssak i Statens vegvesen.

2.1 Relevant lov- og regelverk

Nasjonal transportplan og andre relevante departementale styrende dokumenter (St.meld., St.prp. Ot.prp., utredninger og rapporter)

Statens vegvesen har gjennom NTP 2006-2015 fått et utvidet ansvar for trafikksikkerhet. ”Oppfølging av nullvisjonen tilsier større oppmerksomhet knyttet til vegsystemets sikkerhetsnivå og myndighetenes ansvar. Systemet bør i større grad enn i dag lede trafikanten til ønsket atferd, og beskytte mot konsekvensene av feilhandlinger. Gjennomgående sikkerhetstenking i tråd med nullvisjonen skal være et bærende prinsipp i ledelse, planlegging og gjennomføring av veg- og vegtrafikktiltak. Mer bruk av risikoanalyser og systematiske revisjoner i hele vegtrafikksystemet” (sitater fra kap 6.1.4).

”Det er et mål at enkeltstående branner og eksplosjoner med mange omkomne, eller ulykker forbundet med transport av farlig gods, ikke skal forekomme”³.

Plan- og bygningsloven med forskrifter og veiledninger og retningslinjer

Plan- og bygningsloven stiller krav til planprosessene, hvor samfunnssikkerhet, risikovurderinger og ulykkeshåndtering er en integrert del. Konsekvensutredninger skal ivareta sikkerhetshensyn. Veiledninger angir detaljerte løsninger som må forstås som løsningsalternativer som bidrar til at funksjonskrav ivaretas. Funksjonskrav til byggverk, inkludert tunneler, finnes i tekniske forskrifter (TEK) til plan og bygningsloven (KRD 2001).

Brannvernloven med forskrifter og veiledninger (brann i tunnel), ADR

Sitat fra St.meld. nr. 41 (2000-2001) ”Brann og eksplosjonsvern” definert som nasjonalt mål for perioden 2001-2005.

Under Brann- og eksplosjonsvernloven ligger to forskrifter og flere veiledninger som angir krav til tunneler. De to forskriftene er Forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn (FOBTOT, forebyggendeforskriften) og Forskrift om dimensjonering av brannvesenet. FOBTOT er funksjonsbasert og angir mye de samme funksjonsbaserte kravene for eksisterende byggverk som TEK gir for nybygg.

EU-direktiver og internasjonale føringer

EU skjerper kravene til tunnelsikkerhet, se kap. 1. Det innføres større grad av funksjonskrav til tunneler. Vedleggene til direktivene inneholder detaljkrav basert på ÅDT og lengde. Det stilles krav til gjennomføring av risikoanalyser, dokumentasjon av sikkerhet, tilsyn, brannvernleder, samt krav til blant annet hendelsesdetektering, stigning, skilting, rømming, to løp og øvelser.

Statens vegvesen sine håndbøker og vegnormaler

HB-021 Vegtunneler (Statens vegvesen 2002)

Utforming og detaljkrav til tunneler, inklusiv utrustning, estetikk, byggeteknikk m.m. Krav til sikkerhet med blant annet behovsanalyse av trafikkstyring og risikoanalyse, brannsikring og beredskapsplan.

Andre håndbøker av betydning for risiko og sikkerhetstiltak

Av de øvrige håndbøkene gir HB 017, 018, 049, 050, 054, 111, 149, 152, 161, 163, 231, 235 føringer for planlegging og utforming av veglegemet og utrustning i forbindelse med tunneler.

Øvrige nasjonale regler:

Retningslinjer for saksbehandling ved brannsikring av tunneler (SD og KRD 2000)

Krever risikovurderinger som underlag for beslutninger.

NS 5814 med veiledning, NS 3901 med veiledninger (NBR 2000)

Anbefalte retningslinjer for planlegging, gjennomføring og bruk av risikoanalyser. I forhold til denne håndboken må NS 5814 og NS 3901 anses som et supplement. Håndboken avviker fra standardene i forhold til bruk av akseptkriterier for risiko og i måten risiko og usikkerhet blir uttrykt og fortolket (se også Aven m.fl. 2003; 2004).

2.2 Funksjonskrav til utforming og drift av vegtunneler

Hensikten med tunnelen er at den skal være funksjonell i forhold til trafikkflyt og sikkerhet. Tunnelen skal invitere til ønsket fart og være logisk og lettlest for alle typer trafikanter. Utformingen må være tilpasset kjøretøy og trafikkmengder. Med hensyn til

sikkerhet og beredskap mot ulykker er følgende krav utledet⁴ som også kan forstås som sikkerhetsfunksjoner:

1. *Menneskets forutsetninger* skal ligge til grunn for utforming av tunneler; menneskets mestringsevne i trafikken og tåleevne i en kollisjon eller annen uønsket hendelse.

Nedbrutt til faser umiddelbart etter at en uønsket hendelse er inntruffet, er følgende funksjoner utledet:

2. *Varsling av omgivelser*, som for eksempel til- og frakjørende trafikanter, skal foretas slik at mennesker utenfor skadestedet unngår å bli involvert i ulykkeshendelsen.
3. *Varsling* skal foretas på en slik måte at en sikrer en fullt ut effektiv mobilisering av alle relevante beredskapsressurser.
4. *Bekjempelsestiltak* skal iverksettes for å hindre at en faresituasjon utvikler seg til en ulykke, og at konsekvensene av en inntrådt ulykkessituasjon reduseres, slik at redning og evakuering kan foregå på en sikker og organisert måte, forurensingsskader unngås og økonomiske tap begrenses.
5. *Redningstiltak* skal sikre at savnede personer blir funnet, og skadde personer gis nødvendig førstehjelp og bringes til sikkert område for å behandles av helsetjenesten.
6. *Evakuering* av tunnelen (rømming) skal gjennomføres sikkert og organisert slik at alle bringes til et sikkert område.
7. *Normalisering* skal sikre at skadde behandles, miljøet føres tilbake til normal tilstand, og at skader på tunnelen repareres.

3 Bruk av risikoanalyser i planlegging og drift av vegtunneler

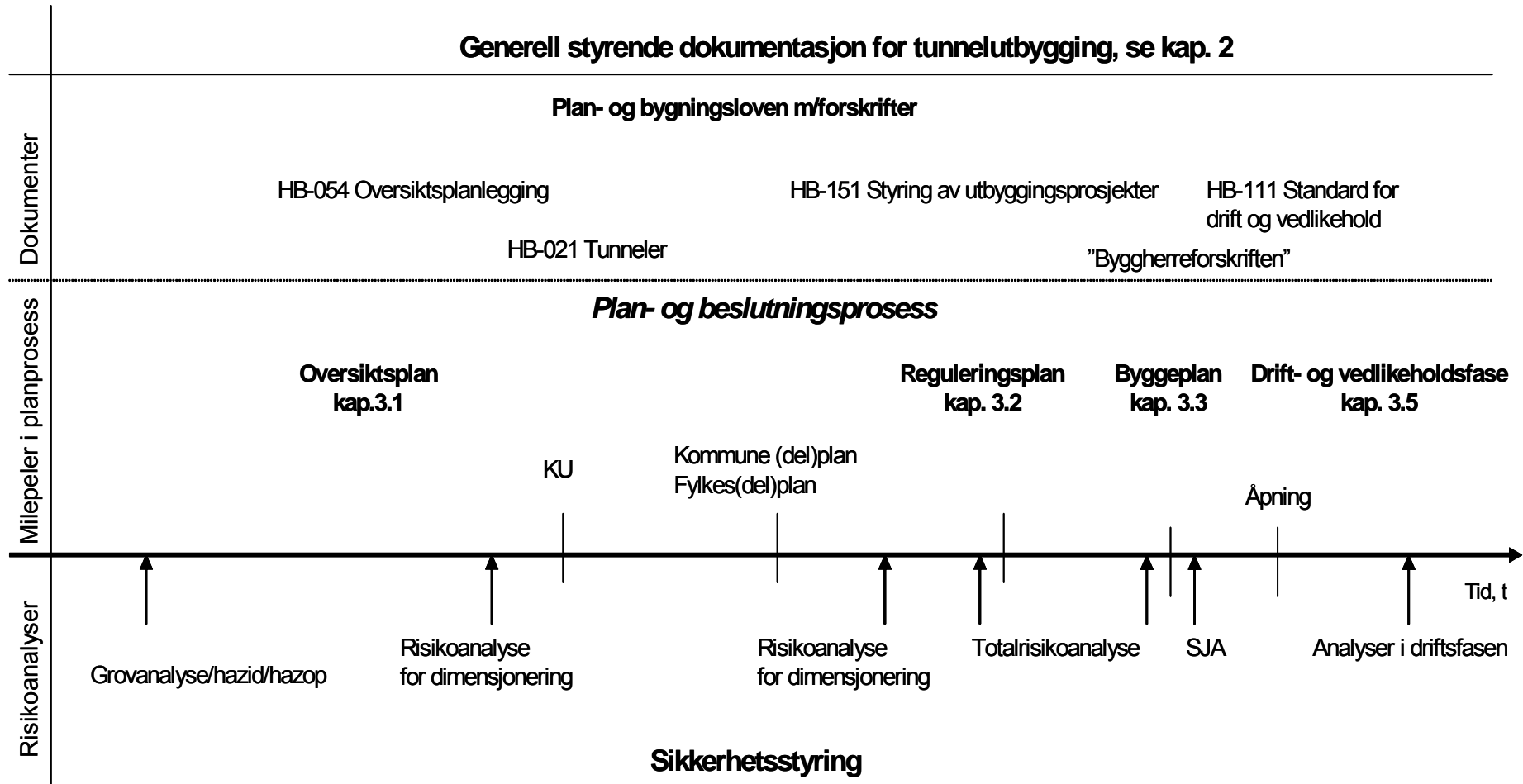
Håndbok 021 er sentral i utformingen av vegtunneler. Håndboken gir krav til løsninger og prosesser i alle fasene av et tunnelprosjekt. Ved å fokusere på sikkerhet kan risikoanalyser være en integrert del av plan-, utbygging- og driftprosessene. Figur 3.1 illustrerer hvor i prosessene risikoanalyser kan utføres, og ved hjelp av hvilke kategorier analyser. Tidsaksen angir planprosessen med sine viktigste milepæler. Sektorspesifikke styrende dokumenter er skissert på oppsiden, mens sikkerhetsstyringsprosessen er illustrert på undersiden. Det er avgrenset til typiske risikoanalyser. Foruten

⁴ I vedlegg G fins en oversikt over utdypende funksjonskrav til sikker tunnel

risikoanalyser er det også flere andre aktiviteter som er av betydning for sikkerheten, for eksempel uformelle møter, statistiske analyser, trafikksikkerhetsrevisjoner og dialogmøter med brukere/beboere. Det vises til håndbok for sikkerhetsstyring⁵.

Risikoanalyser er ikke noe man ”hefter på” i siste liten i et planarbeid. Arbeidet må starte på et tidspunkt som gjør det mulig å få innarbeidet funn fra analysen slik at det får konsekvenser for valg av løsninger. Risikoanalysene skal bidra til et kvalitativt bedre beslutningsgrunnlag for de vedtak som skal fattes i forbindelse med tunnelens utforming. Derfor må prosjekteier være forberedt på å kanskje måtte gjøre om på eller finne fram til andre løsningsalternativ enn det som i utgangspunktet var tenkt. Ved å integrere risikoanalysen i planarbeidet oppnår man en forankring i det politiske eller administrative miljø. Da blir analysen en delutredning som gjøres til gjenstand for diskusjon og den fungerer som grunnlag for beslutninger.

⁵ Det skal utvikles en håndbok i sikkerhetsstyring i løpet av høsten 2004.



Figur 3.1. Sikkerhetsstyring i planlegging, utbygging, drift og vedlikehold av tunneler

Figur 3.1 viser sikkerhetsstyring i plan- og beslutningsprosesser i Statens vegvesen, og den bygger på figur 2 i håndbok 151 (Statens vegvesen 2001). De ulike kategorier risikoanalyser skissert i figur 3.1 blir presentert i kap. 3.1-3.5. Presentasjonen er et forslag til tidspunkt for risikoanalyse, og hva som kjennetegner risikoanalysene på gitte tidspunkt. For korte beskrivelser av de ulike risikoanalysemetodene vises det til vedlegg E.

3.1 Oversiktsplaner

Risikoanalyser i tidlig planfase vil være grove og bør ha som mål å legge grunnlag for sikkerhetsstrategien som skal gjelde for tunnelen. Oversiktsplanlegging (utredningsfasen) omhandler planleggingsprosessen frem mot kommunedelplaner, hvor flere løsningsalternativer vurderes. Konsekvensutredninger (KU) utføres i relativt tidlig fase av et tunnelprosjekt. Formålet med konsekvensutredninger er å få frem virkninger av ulike tiltak som kan ha konsekvenser for liv, helse miljø, naturressurser eller samfunnet for øvrig. Risikoanalyser kan være en del av utredningen som skal gjennomføres som en integrert del av KU- og planprosessene.

Oversiktsanalyse i tidlig planfase (grovanalyse).

Hensikten med analysen er å vurdere ulike alternativ med det formål å konkludere om:

- Alternativet er (eventuelt med mindre modifikasjoner) akseptabelt.
- Alternativene må modifieres betydelig for å oppnå ønsket sikkerhet. Her inngår også identifikasjon av mulige risikoreducerende tiltak.
- Forskjeller mellom alternativer. Rangere alternativene.

Hensikten med analysen er blant annet å gi underlag for å kunne vurdere økonomien i prosjektet, hva det vil koste å gjøre det sikkerhetsmessig akseptabelt. Med det utgangspunkt at alle alternativene kan gjøres sikkerhetsmessige forsvarlige, legges det vekt på å identifisere de sikkerhetsmessige forholdene som har størst effekt på økonomien.

Analysen bør spesielt kartlegge i hvilken grad sannsynlighetsreducerende tiltak og konsekvensreducerende tiltak er prioritert, samt vurdere potensialet for ytterligere risikoreducerende tiltak. En bør også vurdere hvilke krav som kan stilles til aktive beredskapstiltak, som for eksempel innsats fra brannvesenet.

Analysen kan ha en av følgende vinklinger;

- Identifikasjon av likheter/ulikheter i forhold til en gitt referanse. Risiko uttrykkes ved +/- i forhold til referansesystemet.
- Kategorisering av risiko i forhold til drepte og skadde mennesker, miljø og økonomiske verdier, basert på “ekspertvurderinger” og grovinndeling av sannsynligheter (frekvenser) for ulykkeshendelser med gitte konsekvenser for mennesker og andre verdier.

- Grov risikoanalyse, med grovinndeling av frekvenser av ulykkeshendelser som ødelegger gitte sikkerhetsfunksjoner. Et eksempel på en sikkerhetsfunksjon er: “Rømming fra tunnelbrann”.

Det fokuseres på ulykkeshendelser som kan føre til hardt skadde og drepte. Risikoresultater vurderes i forhold til referansenivået eller til sannsynligheter (frekvenser) for gitte ulykkeshendelser. Rangeringen av alternativene baseres på overordnede, verdimeslige betraktninger.

Beredskapens ytelse beskrives på et overordnet nivå ved pålitelighet, effektivitet og sårbarhet når det gjelder for eksempel evakueringstiltak, brannbekjempelse, ventilasjon eller redningstiltak. Visse situasjoner, f.eks. nærhet til sterkt befolkede områder, kan kreve spesielle tiltak for å begrense konsekvensene i forbindelse med en ulykkeshendelse. Det spesifiseres da krav til ytelsen⁶ av disse tiltakene. Ytelleskrav vil også formuleres med utgangspunkt i forutsetninger og antagelser som gjøres i analysen. Ofte finnes minimumskrav til sikkerhetstiltak i Statens vegvesens vegnormaler, for eksempel håndbok 021.

Dersom detaljeringsgraden av planutkastene er høy vil en totalrisikoanalyse kunne anvendes.

3.2 Reguleringsplaner

Reguleringsplaner er kjennetegnet ved at trasevalg, tunnelutforming, forutsetninger osv. har så høy detaljgrad at tiltaket kan få sin endelige politiske behandling. Reguleringsplanene skal gjennom to politiske behandlinger, som skal sikre at alle berørte parter gis anledning til å kommentere og komme med eventuelle innsigelser til foreslåtte reguleringsbestemmelser.

Risikoanalyse for dimensjonering og totalrisikoanalyse

Denne kategorien risikoanalyse skal resultere i en spesifisering av dimensjonerende ulykkeslaster. Denne spesifiseringen er relatert til vurderinger om akseptabel risiko og fremkommer som de ulykkeslastene systemet (eller relevante deler av dette) skal kunne motstå, uten at konsekvensene av dem setter sikkerhetsfunksjonene i fare. Frekvenser eller sannsynligheter av ulykkeshendelser som ødelegger sikkerhetsfunksjonene må komme frem gjennom analysearbeidet.

Hovedelementene i analysen er identifikasjon av faresituasjoner, årsaksanalyse (for eksempel feiltreanalyse), konsekvensanalyse (for eksempel hendelsestreanalyse) og etablering av risikobildet. Risiko kan beskrives ved sannsynligheter (frekvenser) for

⁶ Det er vanlig i Statens vegvesen å oppgi effekt av tiltak, jfr. TØI sin Effektkatalog (Elvik og Rydningen 2002) og Trafikksikkerhetshåndbok (Elvik, Mysen og Vaa 1997) som reduksjon i antall drepte og skadde, med et usikkerhetsbånd. Det målet er enkelt å bruke i risikoanalyse, og det kan anses som et mål på ytelse til trafikksikkerhetstiltak.

ulykkeshendelser som ødelegger gitte sikkerhetsfunksjoner, eller ved sannsynligheter for skader og tap. Hvis risikoanalysen er basert på grovanalyse (se vedlegg E), brukes en risikomatrix som viser kategorier for sannsynlighet og konsekvens. Dersom risikoanalysen har høy detaljeringsgrad, beskrives risiko ved sannsynligheter for (frekvenser av) ulykkeshendelser som fører til gitte konsekvenser for mennesker, miljø og økonomiske verdier, samt statistiske forventninger, f.eks. FAR-verdier, PLL, forventet antall drepte pr. kjøretøykm., forventet skadegradtethet.

Beredskapsytelse kan uttrykkes spesifikt med pålitelighet, effektivitet (kapasitet og tid) og sårbarhet i forhold til sikkerhetssystemer som for eksempel deteksjonssystemer, kommunikasjonssystemer, signalsystemer, redningstiltak, evakueringstiltak, normaliseringstiltak, osv. Analysen kan resultere i en rekke ytelseskrav i forhold til disse systemene, utover de som allerede er etablert i tidlig planleggingsfase og de som er gitt gjennom forskrifter og annen styrende dokumentasjon.

I risikoanalysen skal det fremskaffes et bilde av risiko og sårbarhet for tunnelsystemet. I figur 3.1 er det angitt ulike tidspunkt for denne typen risikoanalyse. Det er behovet for beslutningsstøtte i den enkelte plan- og beslutningsprosess som avgjør når analysen skal utføres.

3.3 Byggeplaner

Utvikling av byggeplaner er ytterligere detaljering av reguleringsplanene. Forutsetninger og anbefalinger fra totalrisikoanalysen, se kapitlet ovenfor, vil kunne bidra til at byggeplanene er i tråd med tunnelalternativets sikkerhetsmessige utfordringer.

3.4 Utbygging

Risikoanalyse i forbindelse med byggefasen

Hensikten med denne type analyser er å kartlegge risiko i forbindelse med kritiske operasjoner, f.eks. unike transportoperasjoner gjennom tunnel, eller farlige byggeoperasjoner. Analysene kan benyttes til å etablere en mest mulig sikker prosedyre for en operasjon. Ulike analysemetoder kan være aktuelle, som for eksempel: Sikker jobb analyse, grovanalyse, hazop, feiltreanalyse, eller hendelsestreanalyse.

I analysene beskrives risiko gjennom en kartlegging av faresituasjoner, mulige årsaker og konsekvenser.

3.5 Drift- og vedlikehold

I en driftsfase hvor tunneleier ønsker å evaluere tunnelen med hensyn til sikkerhet kan det være aktuelt å gjennomføre en totalrisikoanalyse, for eksempel som en følge av endringer som er gjennomført eller planlegges gjennomført. Det vises for øvrig til omtalen ovenfor for reguleringsfasen.

4 Metode for å planlegge, gjennomføre og bruke en risikoanalyse

Arbeidet anbefales organisert som et prosjekt med en prosjektbeskrivelse som avklarer problemstillinger og beslutningsprosess.

4.1 Fase I: Planlegging av prosess og organisering av arbeidet

Risikoanalysen skal være en integrert del av prosjektet. Hvilken kompetanse som må være med i analysen avgjøres ut fra tunnelalternativet, men det er absolutt en fordel å få med noen som er opptatt av forebyggende arbeid, risiko og sårbarhet i sin daglige jobb.

Planlegging av prosess, organisering og avgrensning av arbeidet med risikoanalysen bør fremgå av prosjektbeskrivelsen. For å sikre kvaliteten på analysen bør det være personer med bred fagkunnskap og erfaring som deltar i analysearbeidet. Særlig viktig er det å inkludere erfaringer fra drift og vedlikehold. Kunnskap om risiko og analysemetoder er også viktig. Kompetanse utenfra bør hentes inn dersom analysen tar for seg et tema Statens vegvesen selv har lite erfaring med. Tilstrekkelig bred deltakelse fra egen organisasjon er viktig fordi dette er personer med lokalkunnskap.

Ved å integrere risikoanalysen allerede fra starten av planarbeidet, vil Statens vegvesen lettere kunne oppnå medvirkning fra brukere/trafikanter, grunneiere, kommuner m.m. Medvirkningen må være reell og deltakerne i prosessen må få bekreftelse på at innspillene blir tatt seriøst.

Vi illustrerer planlegging, gjennomføring og bruk av risikoanalyse ved hjelp av to eksempler, analysert ved hjelp av feiltre- og hendelsestre. Valg av analysemetode er opp til prosjektets behov for beslutningsstøtte. I mange tilfeller vil det være tilstrekkelig å gjennomføre grovanalyse som er en mindre ressurskrevende teknikk, se vedlegg E.

Eksempel 1: Rogfast-tunnelen

Dette eksemplet omhandler stamvegen E39 nordover fra Stavanger over Boknafjorden. Prosjektet er en del av planutredningen for å gjøre E39 ferjefri. Det er utarbeidet en konsekvensanalyse og det foreligger en sikkerhetsanalyse. Det videre arbeidet skal være en del av beslutningsgrunnlaget på overordnet nivå, fylkesdelplanen, som skal revideres og inngå i Nasjonal Transportplan 2006 – 2015. Kommunene; Randaberg, Kvitsøy og Bokn var med i konsekvensutredningen.

Kompetanse og informasjon kan hentes fra:

- Rapporter fra TS-revisjoner
- Dybdeanalyser
- Ulykkes- og skadestatistikker, event. rapporterte nestenulykker/risikoindikatorer
- Eksisterende avvikshåndterings- og beredskapsplaner
- Dokumentasjon av anlegg
- Driftsdata
- Forsknings- og evalueringsrapporter
- Lokalkunnskap
- Politi/lensmann
- Kommunelegen/medisinsk faglig rådgiver
- Ambulanse/akuttmedisinsk personell
- Brannvesenet/brannfaglig ekspertise
- Ekspertise i vegsektoren innenfor tunnelutbygging, drift og vedlikehold
- Sosiologer, psykologer/psykiatere
- Brukere/trafikanter

Ideen om ferjefri forbindelse over Boknafjorden er omtalt som prosjekt i Nasjonal Transportplan 2002 - 2011. Eksemplet i forbindelse med håndboken er reelt i den forstand at prosjektet er i startfasen. Alle vurderinger og antakelser gjort i denne håndboken er tenkt og ikke diskutert med prosjektledelsen. Tunneltraseen er vist i figur 4.1.

Risikoanalysen som vi tenker oss har følgende målsettinger:

- Anbefalt trase skal vurderes i forhold til sikkerhet og ulykkesberedskap.
- Uønskede hendelser som kan gi storulykker skal identifiseres.
- Fare- og ulykkeshendelser, og derigjennom ulykkeslaster, som skal legges til grunn for dimensjonering av tunnelen skal simuleres og konsekvensvurderes.
- Ulike krav til barrierer og beredskapstiltak skal etableres.
- Sikkerhetsmessige konsekvenser av de ulike alternativene skal avklares.

Hensikten er å analysere risiko, velge fare- og ulykkesituasjonene som tunnelen skal dimensjoneres for og vurdere i hvilken grad sikkerhetsfunksjonene tilfredsstilles. Tiltakene og løsningsalternativene skal tilpasses analyseresultatene.

Analysen tenkes gjennomført ved hjelp av en analysegruppe, med kompetanse innenfor risikoanalyse, tunnelbygging, drift og vedlikehold, samt en person med erfaring fra dybdeanalyse eller trafikksikkerhetsrevisjoner. Øvrig ekspertise vil bli trukket inn ved behov. Analysen har også en referansegruppe som består av personer fra gjeldende kommuner, redningsetatene, fylkets trafikksikkerhetsutvalg og brukergrupper (farlig gods og transportører av mange mennesker). Referansegruppen skal kommentere og komme med innspill til arbeidet som utføres av analysegruppen.

Eksempel 2: Tunnelen Sinsen – Ulvensplitten i Oslo

Det nye tunnelanlegget fra Sinsenkrysset til Økern er en del av nordkorridoren ut/inn av Oslo. Konsekvensutredning har vært gjennomført for tunnelen og den er nå i detaljprosjektering. I dette eksemplet tenker vi oss en totalrisikoanalyse som bygger på tidligere analyser.

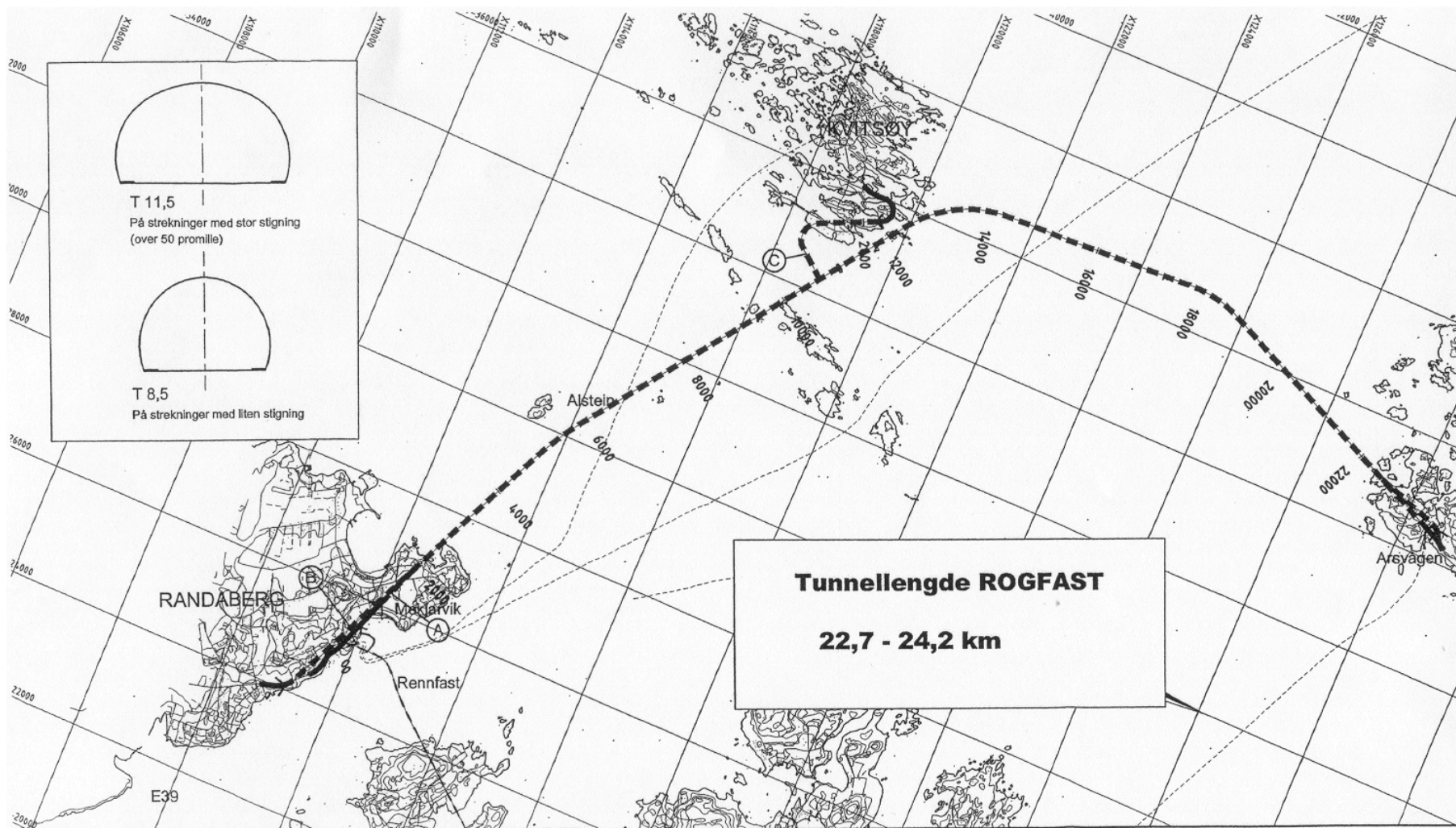
Totalrisikoanalysen skal fremskaffe et bilde av risiko og sårbarhet for systemet. Analysen skal være i aktiv inngripen med prosjekteringen ved å gi underlag for valg mellom løsninger og tiltak. Tunneltraseen er vist i figur 4.2.

Målsettingen med denne analysen er å beskrive risikobildet, etablere krav til utstyr og sikkerhetstiltak i tunnelen, og gi innspill til beredskapsplanen for tunnelen.

Forskjellen mellom Rogfast og Sinsen er i hovedtrekk:

- Rogfast er i tidlig planfase, mens Sinsen er i detaljfasen.
- Sinsen har ca. 10 ganger mer trafikk enn Rogfast
- Rogfast er en lang undersjøisk ettløps tunnel med toveistrafikk.
- Sinsen er en kort bytunnel (1 km) med to løp som har enveistrafikk.

Dette eksemplet blir benyttet til å illustrere forskjeller fra analysen som utføres for Rogfast.



Figur 4.1: Skisse av Rogfast-traseesn



Figur 4.2: Skisse over Sinsen-Ulvensplitten - traseen

4.2 Fase II: Hvordan utføre risikoanalysen?

Analysefasen handler om å lage et så godt og realistisk bilde som mulig av det man antar kan oppstå av uønskede hendelser i framtiden. Det handler ikke om å spå, men at man med utgangspunkt i dagens situasjon og kjente forhold sier noe om hva som kan komme til å skje under visse gitte forutsetninger. Analysen består av 6 aktiviteter:

1. Systemdefinisjon – beskrivelse, avgrensning, forutsetninger og antakelser
2. Kartlegge uønskede hendelser
3. Årsaker
4. Konsekvenser
5. Usikkerhetsvurderinger – angi sannsynligheter
6. Systematisering, risikobeskrivelse og anbefalinger

4.2.1 Systemdefinisjon

Grunnlaget for en risikoanalyse er en beskrivelse av det systemet som skal analyseres. Vegtunnelen (systemet) må få en tydelig avgrensning med hensyn til hva som skal inngå i analysen, men likevel slik at relevante påvirkninger utenfra kommer godt frem. Tegninger og kart, kommunale og regionale planer, prosedyrebeskrivelser, trafikkregulering og prioriteringer av kjøretøy, er gode hjelpemidler til å vise systemet.

Analysen er orientert om fremtiden. Derfor er det nødvendig å begrense tiden eller perioden som blir studert. Er det en enkel tidsbegrenset situasjon som analyseres, eller gjelder analysen tiltak som skal fungere over flere tiår?

Eksempel 1: Rogfast-tunnelen

For Rogfast vil systemdefinisjonen være å beskrive tunnelen med de tegninger vi nå har. Forslaget for Rogfast er at tunnelen går ned ved Harestad på Randaberg og kommer opp ved Arsvågen på Bokn, med en avstikker til Kvitsøy. Tunnelen blir 24.2 km lang. Tunnelen er foreslått med alternativene ett eller to løp.

Det er to alternativer dersom tunnelen vil få ett løp: 2/3 felt med forbikjøringsfelt i de bratte stigningene, eller 4 felt med midtdelere. Tunnelen ved Harestad vil få et fall på 7,9 % i ca. 1000 m og videre med 4 % helling i ca. 4400m for så å stige med en helling på 0,8 % i 6600 m til et avstikk til Kvitsøy på 10 %. Før dette avstikket går tunnelen videre mot Arsvågen med et fall på 3,8 % i 4000 m så et fall på 0,5 % i 2500 m for så å stige med 5 % i 4500 m og et siste strekk med stigning på 7,5 % i ca. 1700 m. Tunnelen har en rett strekning fra Harestad til rett etter Kvitsøy der den har to ca. 20° svinger mot

Bokn. Tunnelen vil være T 8,5⁷ normalt men går over til T 11,5 i stigningene. Avstikket til Kvitsøy vil ha en T 11,5 profil. Tunnelen er på det dypeste ca. 370 muh.

Forut for konsekvensanalysen av Rogfast ble det utført en reisevaneundersøkelse og en vurdering av trafikkbildet over tid, se tabell 3.1.

Tabell 3.1: Prognoser for ÅDT

<i>KJT</i>	<i>2008</i>	<i>2023</i>	<i>2033</i>
<i>Prognoseanslag A</i>	<i>2900</i>	<i>4600</i>	<i>5100</i>
<i>Prognoseanslag B</i>	<i>3300</i>	<i>6500</i>	<i>7900</i>

Andel tungtrafikk er anslått til rundt 10 %. Med bakgrunn i disse tallene, og nasjonale tall for økning i trafikk, skapes et bilde av hvordan analysegruppen ser for seg at det fremtidige trafikkbildet vil utvikle seg. Prognosene er beheftet med usikkerhet, uten at den er angitt med fordeling. Øvrige vurderinger som blir gjort kan være:

- Type og mengde farlig gods som forventes transportert gjennom tunnelen
- Variasjon i ÅDT over årstider, og variasjon av antall kjøretøy over døgnet
- Trafikkmønster, hastighetsfordelinger, kjøreatferd, kjøretøystandard, m.m
- Naturlige trekkforhold i tunnelen, og eventuell fast vifteretning
- Beredskapsressurser og innsatsstrategier.

I eksemplet avgrenses risikoanalysen til å se på forhold inne i tunnelen og bare trafikale hendelser der brann er konsekvens. Terrorisme, krig og naturkatastrofer er ikke en del av betraktningene i dette eksemplet. Avgrensninger mot beredskapsenhetene bør diskuteres slik at det er enighet om hvilken innsats som kan forventes i tunnelen og hvem som skal prioritere innsats i tunnelen. I dette eksemplet blir det ikke sett på farlig gods eller eksplosjoner.

Sikkerhetsfunksjonene beskrevet i kapittel 2 og vedlegg G vurderes og legges til grunn for analysearbeidet.

Eksempel 2: Tunnelen Sinsen – Ulvensplitten i Oslo

Tunnelen består av en toløpstunnel mellom Sinsenkrysset i øst og Teisen i vest, 1050m/1130m. Det forutsettes enveistrafikk i hvert løp. Fra denne legges en

⁷ HB 021 krever T 9,5 for tunneler i stamvegnettet når lengde er over 5 km og ÅDT er større enn 5000. Tunneler lengre enn 12,5 km skal vurderes spesielt. Vegdirektoratet har gitt sterke signaler om at det må etableres rømningstunnel/dobbelt løp for Rogfast.

avkjøringsrampe til Grorud i løpet Sinsen-Teisen, og en påkjøringsrampe i løpet Teisen-Sinsen. Mellom løpene vil det være tverrslag som kan benyttes til rømming. En tunnel vil også bygges fra Grorud mot Sentrum. Denne vil være relativ kort og ikke ha noen av eller påkjøringsramper. Tunnelen Sinsen-Teisen vil ha 3 felt frem til rampe (T12.5 profil) og 2 felt etter (T9.5 profil). Tunnelen Teisen-Sinsen vil ha tre løp etter påkjøringsrampen. Rampene har ett løp. Tunnelen vil ha et lavbrekk på + 72 moh 750 inn fra Sinsen og stigningen vil være på 6 % opp og ned. Avkjøringene vil ha ett løp T7 profil.

4.2.2 Kartlegge uønskede hendelser

Med utgangspunkt i beskrivelsen av systemets normale, forventede funksjon, går man systematisk gjennom beskrivelsen for å kartlegge hvilke uønskede hendelser som kan inntreffe. Med uønskede hendelser forstår vi hendelser som kan representere en fare for liv og helse, eventuelt også miljø og andre materielle og immaterielle verdier. Vekten legges på skadegradene drepte og hardt skadde. For vegtunneler er dette i hovedsak begrenset til ressurstap forårsaket av følgende hendelser:

- Møteulykker
- Påkjørsler bakfra
- Kryssulykker
- Kollisjon med tunnelkonstruksjoner
- Svikt i kjøretøy som gir utslipp av farlig gods
- Brann i kjøretøy (varmgang i bremses, elektriske feil, m.m)
- Brann i tunnelutrustning
- Svikt i tunnelutrustning (bortfall av strøm, svikt i styring, brekkasje av utstyr, nedfall, utstyrsvikt)
- Vanninntrengning
- Ondsinnete vilde hendelser (sabotasje, terror)

Viktige størrelser som inngår i analysen:

Antall ulykker (for eksempel pr kilometer vei pr år)
 Type kollisjon eller ulykkeshendelse
 Temperatur
 Trykk
 Energi
 Antall mennesker og kjøretøy involvert
 Skadegrader
 Trafikkmengde
 Fart
 Sikt
 Føreforhold
 Stigningsgrad og sammenhengende lengde av stigning
 Ventilasjon
 Materialer

Det er mange måter å identifisere uønskede hendelser på, fra strukturerte idédugnader med mange involverte, til litteratursøk i tidligere analyser, rapporter og vitenskaplig dokumentasjon.

Eksempel 1: Rogfast-tunnelen

For Rogfast-tunnelen ble hendelsene identifisert ut fra en tidligere gjennomført grovanalyse, og en idédugnad der analysegruppen og referansegruppen kom sammen.

Det fremkom ikke andre typer hendelser enn de ovennevnte, men type farlig gods, betingelser for antennelse og brannutvikling, samt eksplosjonsfare ble grundig diskutert.

4.2.3 Årsaker

Når uønskede hendelser som kan inntreffe er kartlagt, kan man for hver enkelt hendelse beskrive hva som er årsak til at hendelsen inntreffer og deretter vurdere sannsynlighet for at dette skal skje. Årsaksanalysen legger grunnlaget for ulykkesforebyggende og skadereduserende tiltak.

Som et hjelpemiddel for å utrede årsaker til uønskede hendelser kan tapsårsaksmodellen benyttes, figur 4.3. Den bygger på teori om barrierer, se for eksempel Haddon (1980), Reason (1997), Parker og Dimmer (2003) og Bird og Germain (1986).

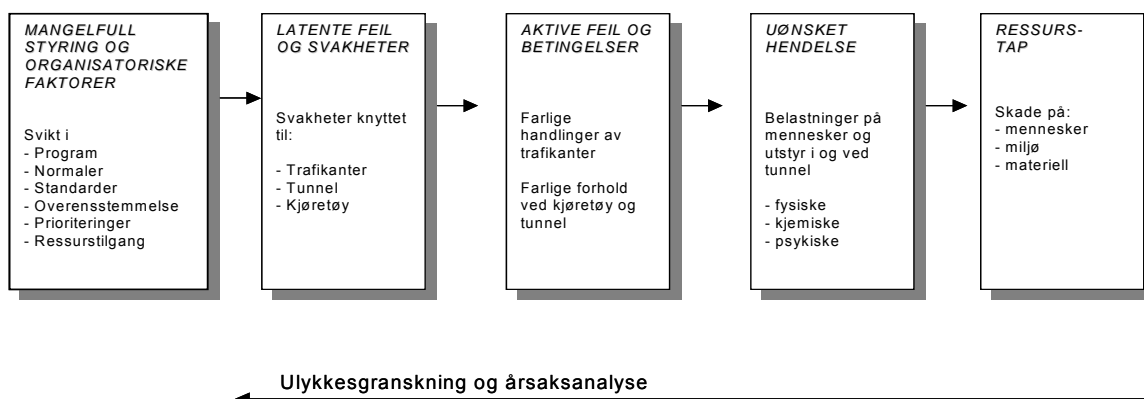


Fig 4.3: Modell for å kartlegge mulige årsaker til uønskede hendelser

Modellen er systemorientert og den tar utgangspunkt i *uønsket hendelse*. Deretter arbeider man seg bakover i kjeden for å finne ut hva som bidrar til at den uønskede hendelsen kan finne sted. Det er viktig å få frem om svikten kan tilskrives samspillet mellom ulike deler i systemet eller om den bare har én årsak/forklaring. Ofte skyldes en uønsket hendelse mer enn ett forhold, for eksempel både *aktive trafikanthendelse*, *latente feil ved tunnelen* og *mangelfull styring hos systemeier*. Statens vegvesen har et ansvar for sikkerheten og det er dermed nødvendig å identifisere betingelser i den bakenforliggende strukturen som bidrar til ulykkesproduksjon. Dybdeanalyser og andre ulykkesgranskninger er gode hjelpemidler for å skaffe kunnskap om mulige bakenforliggende årsaker/forklaringer.

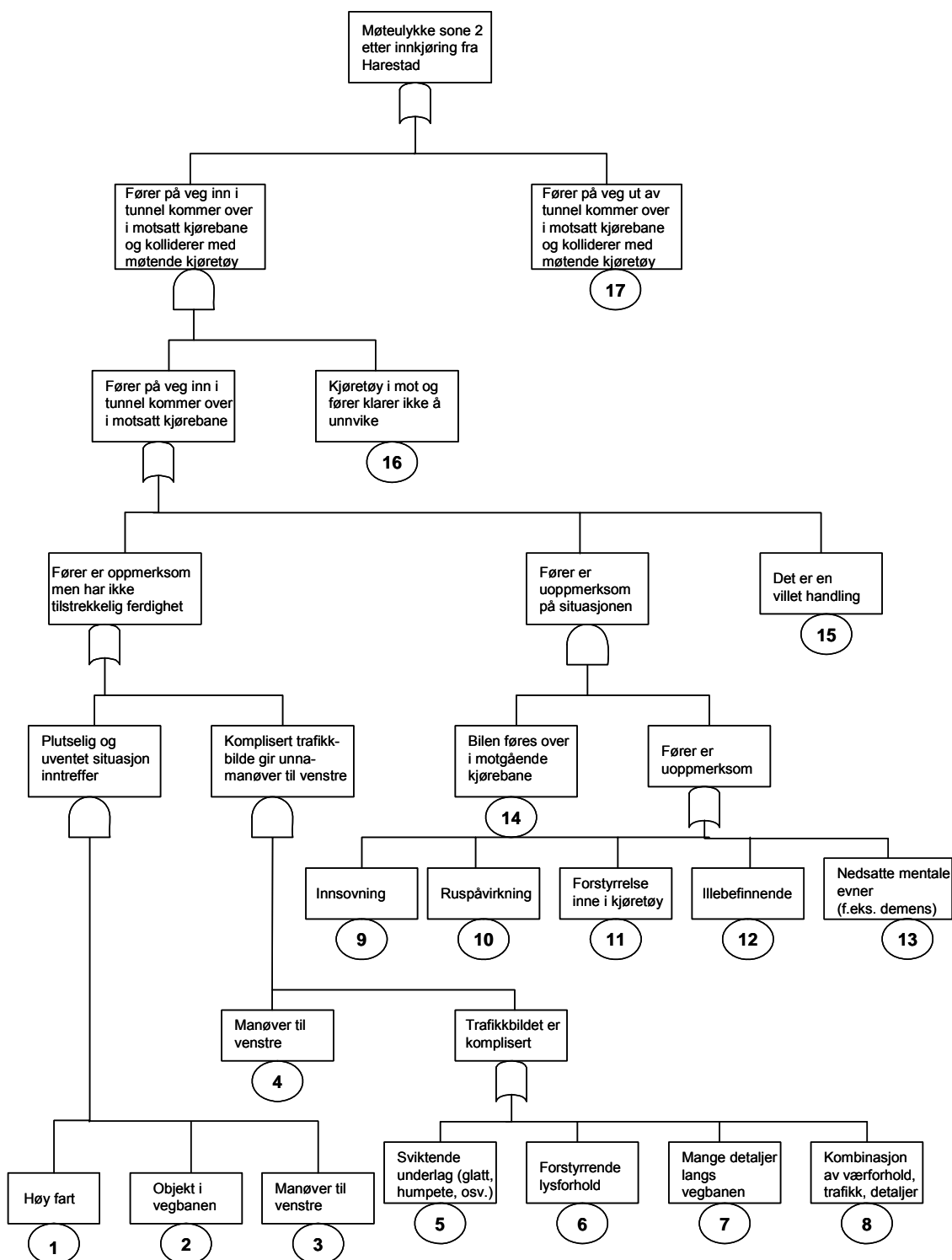
Eksempler på ulykkesforebyggende tiltak:

- Forsvarlig lokalisering av tunnelanlegg med inn- og utkjøringsramper
- Aktivt vedlikehold
- Verneinnretninger
- Overvåkning
- Alarmer og detektorutstyr
- Skilting og merking
- Informasjonstiltak

Hvor dypt man skal søke for å finne årsakene må avgjøres ut fra hva som er meningsfullt i forhold til behovet for beslutningsstøtte, den uønskede hendelsen man kartlegger, ressurstilgang, tidshorisont og tilgjengelig kompetanse.

Eksempel 1: Rogfast-tunnelen

For Rogfast-tunnelen har vi valgt å studere mulige årsaker til uønskede hendelser ved hjelp av feiltreanalyse (se Aven 1998 og vedlegg E). Figur 4.4 viser et feiltre som har topphendelsen ”Møteulykke like etter innkjøring fra Harestad”. Topphendelsen beskrives med ”hva, hvor og når” og det er innforstått at hendelsen inntreffer under normal drift. Feiltreet gir hendelser på lavere nivå som kan benyttes til å forklare hvorfor en møteulykke vil inntreffe. Usikkerheten knyttet til hvorvidt basishendelsene (nummererte bokser) vil inntreffe eller ikke, kvantifiseres ved hjelp av sannsynligheter. Feiltreanalysen gjør det mulig å identifisere faktorer eller betingelser ved tunnelsystemet som bidrar til at basishendelsene vil inntreffe, blant annet ved hjelp av taps-årsaksmodellen.



Figur 4.4, Feiltre ”Møteulykke i sone 2 etter innkjøring ved Harestad”

4.2.4 Konsekvenser

Når skadeomfanget av en hendelse skal beskrives, må det fremgå av analysen hvilke forutsetninger som er lagt til grunn. Skadeomfanget kan variere avhengig av når på døgnet eller året hendelsen inntreffer. I forbindelse med beskrivelsen av skadeomfanget må det tas i betraktning at en enkelt hendelse kan utløse et sett av konsekvenser.

Spesielle teknikker, slik som hendelsestreanalyse, kan brukes for å systematisere arbeidet med å fastsette konsekvenser.

Konsekvensanalysen kan oppfattes som en sårbarhetsanalyse. Gitt at den uønskede hendelsen har inntruffet, hvordan vil tunnelsystemet fungere? Vil barrierene kunne utføre sin funksjon? Gitt en brann, hva blir konsekvensene? I hvilken grad kan ventilasjonssystemet opprettholde ønskede funksjoner?

I konsekvensanalysen må analytikeren vurdere hvilke tiltak som settes inn for å møte de uønskede hendelser, det vil si hvilke beredskapssystemer som finnes. Hvor gode er disse systemene eller tiltakene, eller sagt på en annen måte, hvilken ytelse har de? Virker de som tiltenkt, hva er effektiviteten og i hvilken grad er de påvirket av selve hendelsen (altså hvor sårbare er de)?

Hva blir konsekvensene hvis det oppstår brann i en tunnel? Jo, liv kan gå tapt, en kan få fysiske og psykiske skader på mennesker, materielle skader og mulig nedetid for tunnelen. Sikkerhets- og beredskapssystemer finnes i forhold til varsling, slukking, osv. Disse systemene kan hindre utviklingen av brannen og begrense skadene, men vi har her å gjøre med et sårbart system – det vil kunne ta lang tid å få trafikantene ut av tunnelen. For å vurdere konsekvensen av en brann må analytikerne vurdere hvordan brannen utvikler seg, hvordan sikkerhets- og beredskapssystemene fungerer (deres ytelse) og hvordan evakueringen fra tunnelen gjennomføres.

For ettløpstunneler med toveistrafikk vil møteulykker være en situasjon der mange kjøretøy kan involveres. Faren for at personer sitter fastklemt ved brann etter en møteulykke kan være stor. I ettløpstunneler med toveistrafikk vil små branner f.eks. brann i en personbil kunne føre til store problemer i tunnelen. Røyklaget vil raskt fylle hele tunnelverrsnittet og skape problemer for all trafikk nedstrøms brannen. Problemet vil påvirke de som av ulike årsaker kommer inn i røykfylte deler av tunnelen. Innholdet og mengde av ulikt brennbart materiale i kjøretøyet, sammen med ventilasjon og tunnelverrsnitt, vil avgjøre giftighet og temperatur. I lange tunneler med stigning vil det å rømme tunnelen kunne bli et betydelig problem. Røykspredningen vil i stor grad være avhengig av ventilasjonsforhold.

Giftige gasser som lekker ut kan også gi alvorlige konsekvenser. Transport av farlig gods i tunnel må kartlegges med mengder og type stoff som transporteres.

Brennbare gasser som naturgass/propan eller lignende vil ved lekkasjer kunne føre til fare for eksplosjon i tunnelen. Denne typen ulykker kan få konsekvenser for tunnelstrukturen og vil være svært farlig for mennesker som befinner seg i tunnelen.

Kø i tunnelen kan være et sikkerhetsproblem. Ved kø kan en brann spre seg fra kjøretøy til kjøretøy med alvorlige konsekvenser. Toløpstunneler er ofte forbundet med høy ÅDT slik at mange kjøretøy og mange mennesker kan bli eksponert for hendelsen. Mange kjøretøy og personer nær brannstedet vil kunne føre til at de raskt påvirkes av situasjonen.

Konsekvensmodellering og konsekvensanalyse

I mange tilfeller er det viktig å benytte ulike typer simuleringsverktøy for å anslå konsekvenser av ulykker i tunneler. Slike verktøy er gjerne knyttet opp til branner og har da til hensikt å beskrive brannforløp og røykutvikling, eller de er knyttet opp mot større utslipp av giftige stoffer og har da til hensikt å beskrive spredning av gasser og eller flytende stoffer. Typer beregningsmodeller for fysiske parametere som temperatur, røyk/gass spredning deles ofte i tre typer; håndberegninger, Zonemodeller og CFD- (computational fluid dynamics) modeller. De to førstnevnte er grove, men ofte gode nok, og raske, mens CFD modeller er tidkrevende. Se vedlegg F for en oversikt over ulike modeller og verktøy.

Det fins modeller for beregning av evakuering som kan kombineres med brannscenarier. Modeller for gassspredning og eksplosjoner fins også. Viktige størrelser i forbindelse med konsekvensberegninger er:

Brann – simulering av varmestråling, røyktemperatur, mengde, sikt og sammensetning av røyk, mengde og spredning av giftige gasser, mengde oksygen i luften

Eksplosjon – trykk (puls), temperatur, prosjektiler

Utslipp av farlig gods – type stoff, utbredelse og spredning

Vann-inntrengning- mengde og rate

Respons - menneskelig tåleevne, menneskelig atferd (rømming, redning), konstruksjoners styrke, ytelse (effektivitet) av andre tiltak (ventilasjon, innsatsmannskaper)

Se vedleggene for nærmere beskrivelse av relevant teori.

Eksempel 1: Rogfast-tunnelen

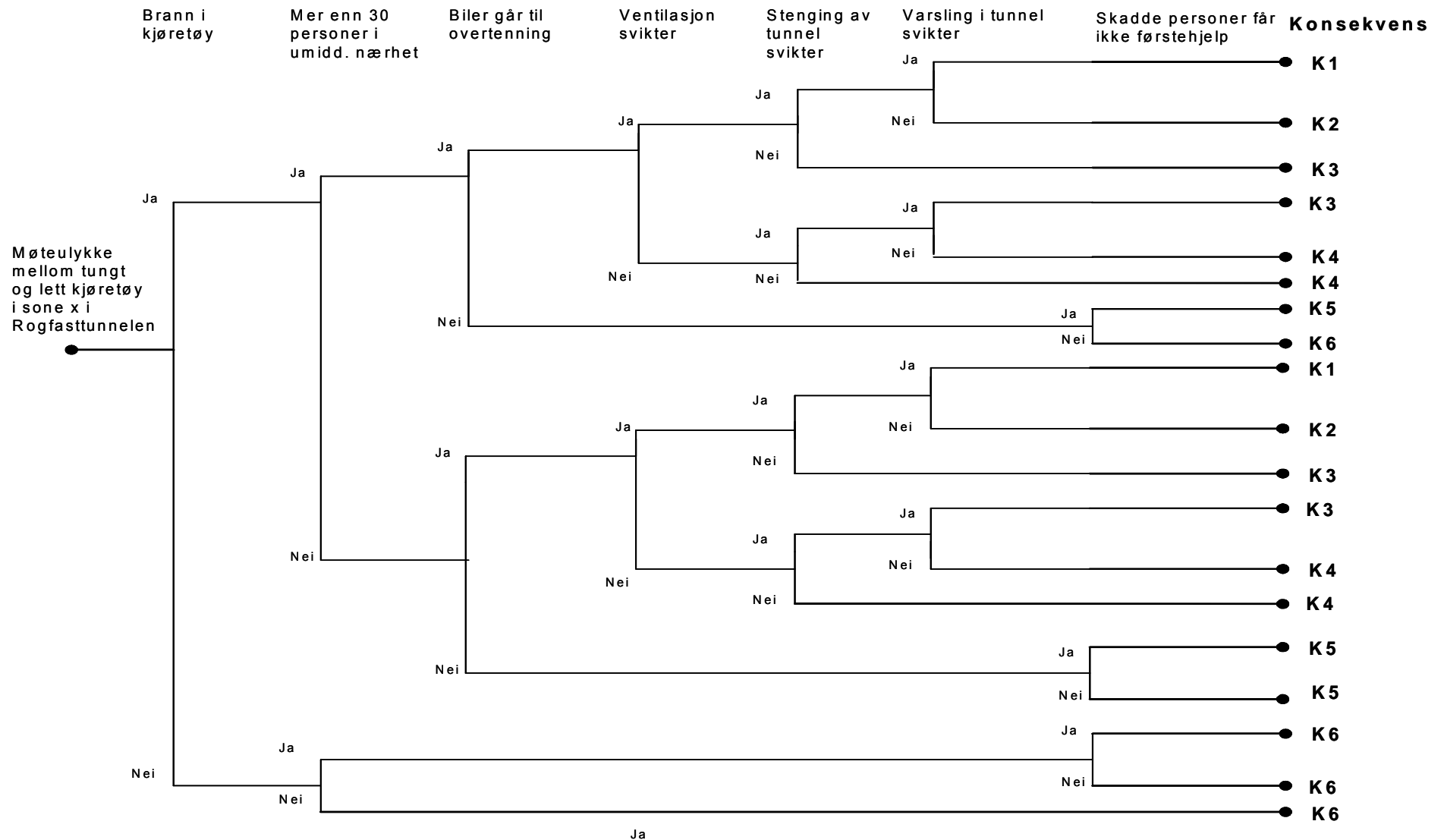
I eksempelet for Rogfast analyseres konsekvensene av de identifiserte uønskede hendelsene. Her ser vi på hendelsen ”Møteulykke mellom tungt kjøretøy og personbil”. Konsekvensene av denne hendelsen er analysert ved hjelp av hendelsestreanalyse. Hendelsen er lagt til bunn av tunnelen 6300 m inn fra Bokn.

Hensikten med hendelsestreet i figur 4.5 er ikke å vise en modell som er den korrekte (den finnes ikke). Målet er å illustrere hvordan et slikt tre kan se ut, og hvordan det kan brukes. Den initierende hendelsen som skal konsekvensvurderes er en møteulykke i bunnen av Rogfast tunnelen. Da er det et spørsmål om det utvikler seg brann, hvor mange som er eksponert, hvordan brannen utvikler seg, og hvordan beredskapen fungerer (ventilasjon, stengning, varsling og førstehjelp).

Hendelsestreet viser ulike scenarier som gir ulike utfall, illustrert ved konsekvensene K1 – K6:

- K1 > 51 drepte og hardt skadde
- K2 31 - 50 drepte og hardt skadde
- K3 15 – 30 drepte og hardt skadde
- K4 8 – 14 drepte og hardt skadde
- K5 4 – 7 drepte og hardt skadde
- K6 0 - 3 drepte og hardt skadde

Konsekvenskategorien ”drepte eller hardt skadde” er tilpasset nullvisjonen, og vi har ikke gjort noe for å skille på skadegradene ”drepte” og ”hardt skadde”, fordi vi ønsker å gi lik prioritet til begge.

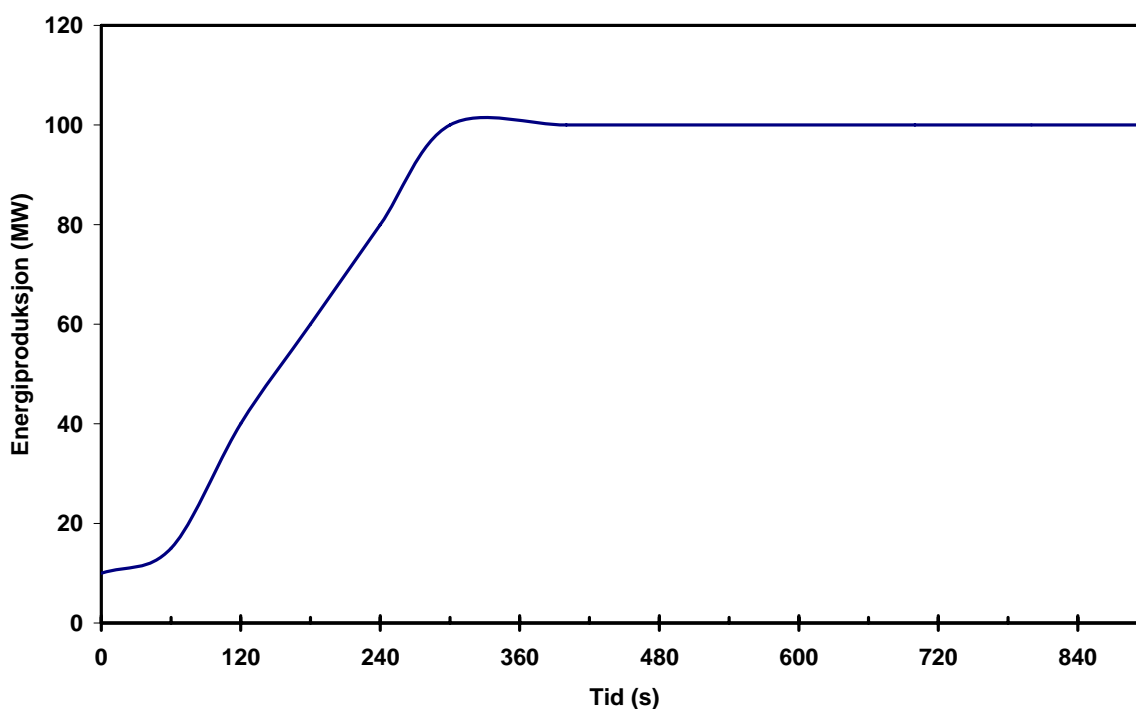


Figur 4.5, Møteulykke mellom tungt og lett kjøretøy i Rogfast-tunnelen.

Etter å ha etablert modellen behøver vi kunnskap om for eksempel hvorvidt biler går til overtenning eller ikke, og vi må vite i hvilken grad eksponerte mennesker har mulighet til å rømme. Dette er usikkert. Som en første tilnærming har vi behov for å se på hendelsen både med hensyn til temperaturutvikling og røykutvikling. Vi behøver mer kunnskap om brannscenariet og simulerer derfor brannen.

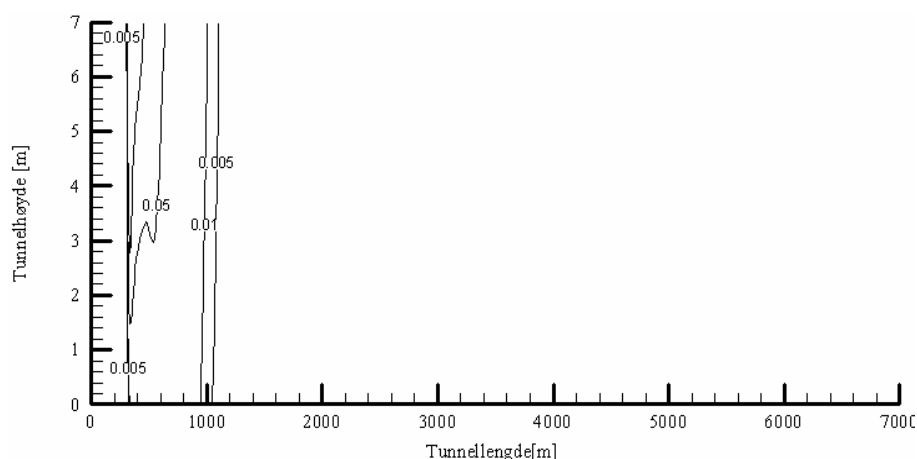
Brannen ble beskrevet i modellen SOLVENT (2002), se vedlegg F. Energiproduksjon legges inn som avdampningsrate for et bestemt brensel. Ventilasjonen ble satt til 3 meter pr sekund med retning Bøkn. Det er antatt at brannforløpet foregår i en T 11,5 profil i stigningene fra bunn og opp mot Arsvågen. Tunneltverrsnittet vil påvirke både brannens temperatur og røykspredning. Mindre profiler vil kunne gi større energiproduksjon og høyere temperatur rundt brannstedet.

Vi antar at brannen for hendelsesforløpet har en utvikling som vist i figur 4.6 der maks energiproduksjon er 100 MW. En bil kolliderer med en tungtransport som har en henger lastet med brennbart materiale. Disse tar fyr og en brann får etablert seg. Den blir ikke sløkket og kjøretøyene overtennes.



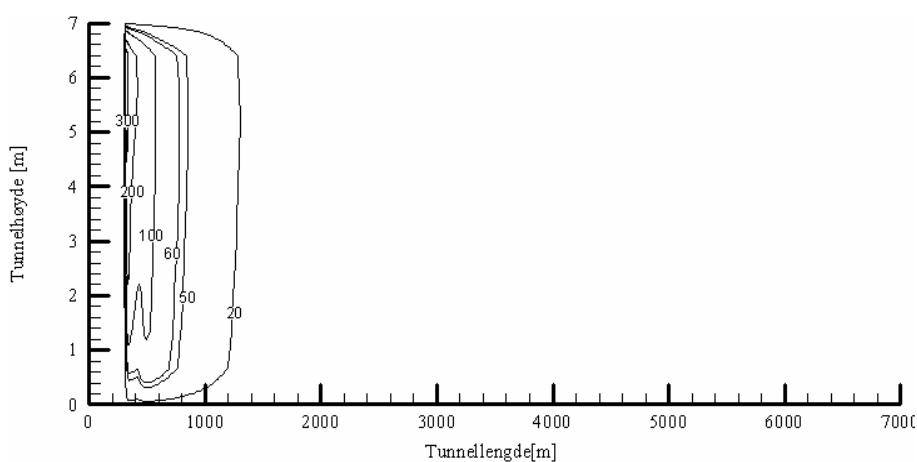
Figur 4.6. Antatt energiproduksjon i brannen simulert for Rogfast-tunnelen.

Basert på forutsetningene over og at det er et brensel (flytende veske) ($\text{CH}_{1.764}$) \cdot 11 som brenner gir det følgende fordeling av røykgasser (figur 4.7) og temperaturer (figur 4.8) etter fire minutter nedstrøms skadestedet. (Brenselet kunne vært noe annet men ble benyttet fordi det er det samme som ble benyttet i verifiseringsforsøk av modellen). Type brensel som benyttes vil påvirke røyktetthet og mengde giftige komponenter i røyken.



Figur 4.7. Simulering av røykspredning i Rogfast 240 s (4 min.) etter brannstart. 100 MW brann. Brannen starter på bunn av tunnelen 6300 meter inn fra Bokn. 0.005 kgrøyk/kgluft = 10 m sikt. 0.05 kgrøyk/kgluft = 1 m sikt.

Figur 4.7 viser at det vil være en kraftig røykutvikling og sikt mindre enn 10 meter så langt som en kilometer fra skadestedet.



Figur 4.8. Simulering av Temperatur (T °C) i Rogfast 240 s etter brannstart. 100 MW brann. Brannen starter på bunn av tunnelen 6300 meter inn fra Bokn.

Figur 4.8 angir temperaturfordelingen etter fire minutter som viser at det 400 meter fra skadestedet er 50°C i ansiktshøyde (1,70 m) men at den temperaturen avtar ned mot bakkenivå. Vi kan ved hjelp av disse resultatene konkludere med at røykgassene er farlige for mennesker som ikke direkte er involvert i hendelsen, og at mennesker på skadestedet raskt utsettes for varmpåkjenning.

Basert på enkle regneverktøy har vi sett på konsentrasjon av karbonmonoksid (CO) i røykgassene koplet opp mot siktforholdene, se tabell 4.1.

Tabell 4.1: Forholdet mellom røykfraksjon, sikt og CO

Konsentrasjon av røyk	Sikt	Gass innhold
Røykfraksjon på 0.005 kg røyk/kg luft	10 meter sikt	CO = 250 ppm
Røykfraksjon på 0.01 kg røyk/kg luft	5 meter sikt	CO = 500 ppm
Røykfraksjon på 0.05 kg røyk/kg luft	1 meter sikt	CO = 2500 ppm
Røykfraksjon på 0.1 kg røyk/kg luft	>1 meter sikt	CO = 5000 ppm

Nå har vi en viss formening over ett brannscenario. Ved å alternere inngående størrelser kan vi se på sensitiviteter, og vi kan flytte lokaliseringen av ulykkespunktene. Samlet gir det oss kunnskap om fysiske forhold rundt mulige brannscenarier som vil påvirke konsekvensene av den initierende hendelsen ”Møteulykke mellom tungt og lett kjøretøy inne i Rogfast-tunnelen”. Gitt brann, simuleringene, reisevaneundersøkelser, erfaringsdata med mer, er vi nå bedre rustet til å anslå sannsynlighet for at brannen skal eskalere og at involverte biler skal gå til overtenning. Videre vil vi ha økt kunnskap om rømningsforholdene i dette scenariet, og dermed ha mulighet for å anslå antall drepte og hardt skadde. Vi har et bedre underlag for å vurdere mulige svikt i sikkerhetsfunksjonene. Det er viktig å synliggjøre alle antagelser og forutsetninger som er gjort, for eksempel om trafikken. Det kan være hvor mange kjøretøy som vil kunne kjøre inn i tunnelen pr minutt, hvor mange mennesker som befinner seg i kjøretøyene, andel tungtransport med mer.

En gjennomgang av scenariets innhold og utvikling over tid kan være nyttig for å konkretisere betingelser og vise til detaljer. Dette kan være uformelle tankeprosesser, tverrfaglige diskusjoner og bruk av erfaringsdata fra lignende hendelser. Tabell 4.2 viser en slik tankerekke i forhold til brannscenarioet i bunnen av Rogfast-tunnelen.

Tabell 4.2: Vurdering av situasjonen i og ved ulykkesstedet pr tidsintervall. dt = 60 s

Tid (s)	Brannforløp, hva skjer	Hva gjør ulike kjøretøy	Situasjon i tunnelen, temperatur, sikt, brannutvikling	Kommentar/Diskusjon	#Involverte #Evakuerte	Døde/ hardt skadde
0	Brannen starter. 10 MW Brannutvikling foregår mellom kjøretøyene som står tett inntil hverandre, og mellom førerhus og lasterom.	Vanlig jevn trafikk. De brennende kjøretøyene står i ro og stenger kjørebane. Andre kjøretøy stopper, trafikanter ut for å se/hjelpe	Brannen vokser og lar seg ikke slukke. VTS er alarmert vha. slukkere og telefon.	Betydelig røykavgivelse vil inntreffe raskt. Brannvesenet varsles. Personer kan sitte fastklemt Usikkerhet og rådvillhet brer seg blant involverte mennesker	8 kjt. og 16 personer Ingen	0-3
60	20 MW Brannen har spredd seg til hele lasterommet gjennom presenningen som dekket lasten.	Biler fortsatt på veg inn fra begge sider. Biler på veg ut nedstrøms. Noen biler er i ferd med å snu. Tung transportene kan få problem med å stoppe og snu. Oppstrøms brannen er det ikke røyk og bilene står i ro. Noen snur sine kjøretøy og kjører ut.	Røykfronten har beveget seg 200 meter fra brannstedet. Sikten er ≈ 10 m 3 meter over bakken. Temperatur i hodehøyde ca. 50 °C	Stor mulighet for at trailere ikke klarer å snu. Røyklaget hindrer sikt og skaper stress. Kan være personell som prøver å ta seg ut til fots nedstrøms. Redning av fastklemt må oppgis.	15 kjt. og 30 personer 10 personer	0-3

Kort drøfting av eksemplet

Vi ønsker å kvantifisere risiko ved hjelp av feiltreet og hendelsestreet. Til det behøver vi kunnskap, som vi henter fra erfaringsdata (dybdeanalyser, statistikk m.m), ekspertvurderinger, vitenskapelig litteratur og simuleringer. Simuleringene er viktige for å anslå sannsynligheter for nodene i hendelsestreet. Gjennom å øke vår kunnskap ved hjelp av simuleringstøytøyene og andre kilder, kan vi anslå hvorvidt ventilasjonssystemet vil svikte eller ikke. På denne måten gir simuleringene viktig bidrag til hendelsestreet, samtidig som de gir grunnlag for å velge dimensjonerende hendelser, se kap. 4.2.7.

Ofta er det slik at modellene blir vurdert som korrekte eller sanne. Det er de ikke. De er analysegruppens forståelse av tunnelsystemet, og modeller er alltid forenklinger av "verden". Vi har bevisst valgt et hendelsestre som kan kritiseres. Her mangler vesentlige faktorer for å bestemme hvilke utfall scenariet vil gi. For eksempel sier ikke modellen noe om menneskelige reaksjoner i forhold til rømming, heller ikke om effektivitet av redningsmannskaper. Forgreiningene i hendelsestreet kan diskuteres, og dersom vi hadde påført sannsynligheter ville også de kunne diskuteres. Da er vi i kjernen av risikoanalysen. Den gir et grunnlag for vurdering og diskusjon om sikkerhet. Nettopp det kommer vi tilbake til når vi tar opp beslutninger og bruk av risikoanalyser, se kap. 4.2.7 og 4.3.

Eksempel 2: Tunnelen Sinsen – Ulvensplitten i Oslo

I eksempelet for tunnelen Sinsen – Ulvensplitten er behovet for konsekvensanalyser like stort som for Rogfast. Hendelsene har litt andre karakteristika siden tunnelen er en toløpstunnel og trafikken er ensrettet i hvert løp. Trafikkmengden og kjøreatferden er helt annerledes. For denne tunnelen er det viktig å studere temperaturer og røyklag nær brannstedet, mens det i lange ettløpstunneler som Rogfast, er viktig å studere trafikkbildet opp mot røykbevegelsene i hele tunnelen.

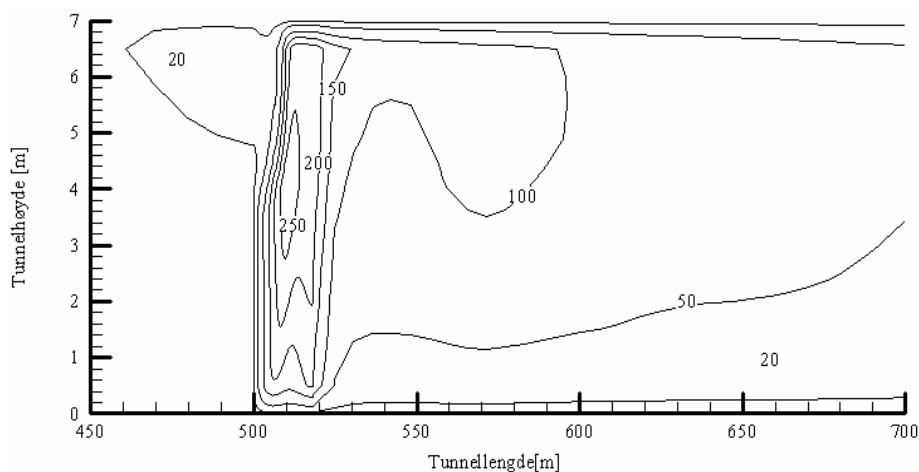
Antall personer som eksponeres for ulykker i Sinsentunnelen kan være tre-fire ganger flere. Potensialet for antall drepte kan derfor bli større, selv om denne typen tunneler har gode rømningsmuligheter. En hendelse vil kunne gi opphopning av kjøretøy oppstrøms og ved kø vil det også være opphopning nedstrøms.

Ved simuleringer av branner i Rogfast/Sinsen vil selve brannforløpet og røykspredningen avhenge av tunnelgeometri (tverrsnittsareal/helling), brannstørrelse, brannmedium og lufthastighet. Type ulykkeshendelser, hvordan evakuering og varsling foregår, og antall involverte mennesker vil variere fra tunnel til tunnel.

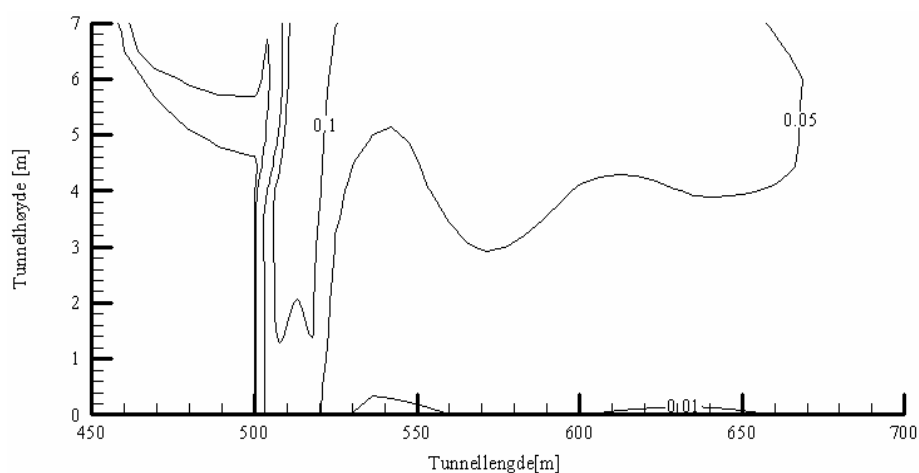
Det viktigste ved en simulering er å definere kritiske størrelser for hvert tidsintervall og sammenlikne disse med hvor mennesker til enhver tid befinner seg. Tabell 4.3 viser forholdene 50 m nedstrøms brannen med 60 sekunders mellomrom. Resultatene viser (fig 4.8 og 4.9) at røykspredningen og temperatur i Sinsen tunnelen vil komme opp i høye kritiske verdier etter ganske kort tid.

For å kunne vurdere barrierene i hendelsestreet og å avgjøre konsekvenser, er simuleringer av ulike brannscenarier viktige. Hvorvidt ventilasjonen virker eller ikke vil medføre store forskjeller i røykspredning. I Rogfast-tunnelen vil røyken kunne spre seg oppover (nedstrøms brannen) selv om viftene/ventilasjonen ikke fungerer. Termiske krefter, meteorologiske effekter eller stempel effekter, vil være med å avgjøre røykspredning hvis denne ikke styres av mekanisk ventilasjon. Brannen i Sinsentunnelen vil føre til at brannen sprer seg motsatt i forhold til kjøreretning hvis den mekaniske ventilasjonen ikke fungerer. Spredningen vil gå saktere i begge tilfeller men røyken vil være giftigere og varmere fordi mindre kald luft blandes inn.

Antall simuleringer som utføres vil være avhengig av valg av kritiske størrelser som for eksempel ventilasjonsforhold, endringer i geometri og brannstørrelse.



Figur 4.8. Simulering av Temperatur (°C) i Sinsentunnelen 120 s etter brannstart. 100 MW brann. Brannen starter 500 m inn fra Sinsenkrysset.



Figur 4.9. Simulering av røykspredning i Sinsen 120 s etter brannstart. 100 MW brann. Brannen starter 500 m inn fra Sinsenkrysset. 0,005 kg røyk/kg luft = 10 m sikt. 0,05 kg røyk/kg luft = 1 m sikt.

Tabell 4.3: Vurdering av situasjon 500 – 550 m nedstrøms skadestedet

60s	120s	180s	240s	300s	360
<p>T = 50 °C under taket</p> <p>CO = 250 ppm. (0.005) nede ved bakken ,</p> <p>CO > 500 ppm. (0.01) 2 m over bakken.</p>	<p>T = 100 °C under taket 50 °C 1 m over bakken</p> <p>CO > 500 ppm. (0.01)</p>	<p>T = 150 °C under taket 100 °C 2 m over bakken 50 °C 0,5 m over bakken</p> <p>CO < 2500 ppm. (0.05), 2 meter over bakken.</p>	<p>T = 200 - 300 °C under taket, 150 2 m over bakken, 100 °C 1 m over bakken 50 °C helt ned til bakken</p> <p>CO < 2500 ppm. (0.05) til 1.5 m over bakken.</p> <p>CO < 5000 ppm. til 4 meter over bakken.</p>	<p>T = 100 °C 1 m over bakken. Tålegrense i 12 m</p> <p>CO < 2500 ppm. (0.05) til 1 m over bakken.</p> <p>CO < 5000 ppm. til 4 meter over bakken.</p>	<p>Situasjonen vil vedvare inntil brannen sprer seg og vokser eller andre forhold endres.</p>

Disse dataene kan sammenholdes med personers bevegelse nedstrøms brannen for å vurdere når og om disse vil være kapable til å ta seg ut ved egen hjelp eller om situasjonen med hensyn til temperatur og røyk blir fatal. Denne typen vurdering gjøres som vist for Rogfast, tabell 4.2.

4.2.5 Usikkerhetsvurderinger – angi sannsynligheter

Etter å ha kartlagt hva som kan forårsake en uønsket hendelse og hvilke konsekvenser det kan gi, gjenstår det å knytte usikkerhetsvurderinger til hendelsene. Dette er en utfordrende oppgave, fordi vi må ”oversette” vår usikkerhet om hvorvidt hendelser og fenomener vil inntreffe til sannsynligheter. Dette er likevel selve kjernen i risikovurderingen.

Datagrunnlag

Data er så mangt, også innen risikoanalyse. Ofte må vi sette vår lit til "ekspertvurderinger", bygge på kjennskap til lokale forhold, erfaringer, statistikk, lignende risikoanalyser og annen relevant informasjon. Deltakelse fra berørte personer og instanser i arbeidet med risikovurderinger er viktig. Slik deltakelse vil bidra til legitimiteten av analysen.

NB!

Selv om noe aldri har skjedd, så er det ikke usannsynlig at det vil skje.

En brukbar teknikk er å skaffe seg oversikt over lignende hendelser (referanser) med tilhørende oversikt over sannsynlighet. Disse kan benyttes til sammenligning og gi grunnlag for overslag som er relevante for den aktuelle hendelsen.

Legg merke til at det er analysegruppens vurdering av usikkerhet knyttet til om hendelsen vil inntreffe eller ikke som blir uttrykt med sannsynligheten. Sannsynlighet er ikke en objektiv størrelse, og det kan ikke gis eksakte svar eller garantier for hvor ofte en uønsket hendelse kan inntreffe. Kunnskapsinnhenting og -vurdering av uønskede hendelser som man ønsker å belyse er en vesentlig del av arbeidet med å komme fram til en fornuftig sannsynlighetsberegning.

Presentasjon av usikkerhet ved hjelp av sannsynligheter

Sannsynligheten for ulike hendelser kan rangeres etter forventet frekvens (hyppighet). Det kan være til hjelp å se hva andre vegkontor har gjort i sine risikoanalyser. En måte å beskrive usikkerhet er som intervaller, enten som frekvenser eller som sannsynlighet:

Frekvens (prediktert antall hendelser)

Lite sannsynlig	Mindre enn en gang i løpet av 50 år
Mindre sannsynlig	Mellom en gang i løpet av 10 år og en gang i løpet av 50 år
Sannsynlig	Mellom en gang i løpet av ett år og en gang i løpet av 10 år
Meget sannsynlig	Mer enn en gang i løpet av ett år.

En alternativ rangering med basis i sannsynlighet for et gitt år er:

Sannsynlighet for å inntreffe i det aktuelle tidsrom (et år)

Lite sannsynlig	Mindre enn 2%
Mindre sannsynlig	Mellom 10% og 2%
Sannsynlig	Mellom 10% og 50%
Meget sannsynlig	Mer enn 50%.

Ovennevnte rangeringer er brukbare i grovanalyser og kan tilpasses behovet i risikoanalysen. Vi behøver en mer presis angivelse når hendelser i feiltre- eller hendelsestreanalyser skal vurderes. Vi bruker da sannsynlighetsverdier, dvs. tall mellom 0 og 1.

Hvordan skal vi anslå en sannsynlighet? Her kan Statens vegvesen sine databaser og andre databaser være nyttige hjelpemidler. For eksempel ser en ofte at frekvenser for møteulykker i tunnel er beregnet ut fra historiske data, for eksempel ved hjelp av TUSI, se vedlegg E. Slike kilder må brukes med forsiktighet. Det kan være svakheter i registreringene, relevansen av dataene i forhold til det spesifikke tunnelsystemet kan være liten, og dataenes format kan være vanskelig å bruke. Erfaringsdata er viktige som bakgrunnskunnskap, men den type data må suppleres med andre kunnskapskilder, som lokal kunnskap, ekspertvurderinger, osv.

Sannsynlighetene må normaliseres med hensyn til valgte størrelser, for eksempel pr. tidsenhet; pr. km veg; pr. antall mennesker; eller pr. kjøretøykm., alt etter hva analysegruppen finner som gode mål på risiko. Betydningen av denne normaliseringen må imidlertid vurderes, slik at risikoresultatene som fremkommer kan settes i en bred sammenheng.

Eksempel 1: Rogfast-tunnelen

For eksemplet med Rogfast-tunnelen ble alle sannsynlighetene som skulle brukes i feiltrærne og hendelsestrærne presentert i en samlet oversikt. Eksempel på slik oversikt er tabell 4.4.

Tabell 4.4: Eksempel på oversikt over datagrunnlaget i analysen

Modell	# IH	Hendelsesbeskrivelse	Sanns. pr. år	Bakgrunn for vurdering
Feiltre nr. xx se fig. 4.4	6	Forstyrrende lysforhold	0,032	Ut fra foreslått lokalisering av tunnelåpningen anslås med basis i værstatistikk at det er ekstrem sol i 30 dager i året, og at den varer 8 timer i døgnet inklusiv rushperiodene. I av 10 000 trafikanter blir så kraftig blendet at de velger å foreta en ukontrollert korleksjon i eget kjøretøy.

Modell	# Node	Hendelsesbeskrivelse	Sanns.	Bakgrunn for vurdering
Hendelsestre nr. xx, se fig. 4.5	N1	Brann i kjøretøy	0,8	Basert på statistiske data av møteulykker mellom tungt og lett kjøretøy har det oppstått brann 8 av 10 ganger.

Kort drøfting

I tabell 4.4 er bakgrunnen for angivelsene av sannsynlighetene viktig. Det er der kunnskapen ligger om hva som blir gitt betydning for anslaget av sannsynlighet. Her kan det fremkomme informasjon om latente svakheter, se kap. 4.2.3, som for eksempel sviktende vedlikehold, tunnelportalens utforming, tunnelveggenes utforming og vedlikehold, lysforhold i tunnelen, kjøreatferd i tunnel som er påvirket av myndighetenes kontrollrutiner osv. Erfaringer fra for eksempel dybdeanalyser og ansatte i Statens vegvesen kan spille en viktig rolle.

4.2.6 Systematisering, risikobeskrivelse og anbefalinger

Analyseresultatene må presenteres på en måte som er tilpasset målgruppen (beslutningstakerne). Det vil si at både mennesker med og uten kunnskap om risikoanalyse må kunne forstå resultatene. Sannsynlighet og konsekvens av ulike hendelser gir til sammen uttrykk for risiko. For at man skal kunne vurdere løsningene, må det settes opp oversikter over hvilken risiko man har vurdert de ulike hendelsene til å ha.

Risikomatriser, se vedlegg E, egner seg godt til en slik oversikt, og er satt sammen av sannsynlighet for og konsekvenser av ulike hendelser. Ved hjelp av risikomatriser vil beslutningstakere kunne sammenligne risikonivået ved aktuelle hendelser og løsninger.

Analysereport

Risikoanalysen samles i en rapport som inneholder alle relevante opplysninger.

Analytikerne må vektlegge presentasjon og formidling av risikoanalysen på en slik måte at brukerne (målgruppen) føler at de er tilstrekkelig informert om de funn som er gjort.

Eksempel på innhold i analyserapport:

Problemstilling og analysens formål
 Systembeskrivelse
 Metode, forutsetninger for analysen, avgrensninger
 Fareidentifikasjon
 Resultater, risikobilde, bidragsyttere til risiko
 Risikovurdering
 Forslag til prioritering av tiltak med vurdering av ytelse (effekt)
 Vedlegg:
 Detaljer om modeller og datamateriale
 Ytelsesanalyser av barrierer, tiltak

Når det gjelder Rogfasteksemplet er det i realiteten tre målgrupper; Statens vegvesen, kommuner og fylkeskommune, og befolkningen som blir berørt av tunnelanlegget. La oss ta utgangspunkt i den siste gruppen. Denne gruppen kan ikke forventes å ha innsikt i risikoanalyser og det er derfor en spesiell utfordring knyttet til kommunikasjon av resultatene. Det er nødvendig å gi resultatene en form som er lett å forstå for lekfolk, samtidig må de få en form og et innhold som sikrer tilliten til resultatene. Følgende prinsipper bør legges til grunn for presentasjonen:

- Fokus på virkelige, observerbare størrelser, dvs. hva slags hendelser som er analysert. Sannsynligheter og statistiske forventningsverdier begrenses.
- Synliggjøring av hva som vil bli gjort for å hindre at de uønskede hendelser oppstår og for at skadeomfanget begrenses.

- Nøkternhet.
- Sammenligninger med kjente aktiviteter.
- Hvordan den enkelte kan forholde seg til faren for tunnelulykker.

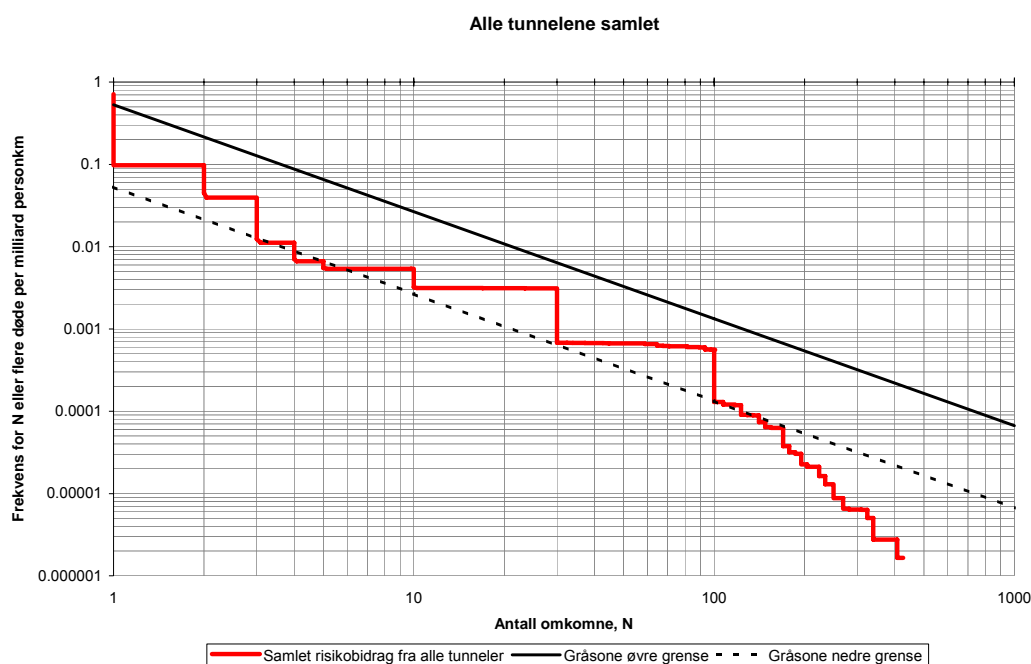
I tillegg kommer råd knyttet til hvordan en bør forholde seg dersom en tunnelulykke skulle inntreffe.

Denne form for presentasjon og kommunikasjon vil også kunne være egnet i forhold til Statens vegvesen, kommuner og fylkeskommunen. Men, i forhold til disse gruppene må analysegruppen også kunne trekke inn mer spesifikk risikoterminologi, også sannsynlighetsbegrepet.

Denne presentasjonen kan bestå av:

- Forventet antall drepte og hardt skadde pr. år som følge av ulykker i tunnelen
- Forventet antall drepte og hardt skadde pr. milliard personkm.
- Sannsynlighetsfordeling over ulike kategorier ulykker
- Sannsynlighetsfordeling over antall hardt skadde og drepte
- Effekter av ulike tiltak på risiko
- Ytelsesbeskrivelser av sikkerhetstiltak

Risikonivået for tunnelen kan også presenteres i form av FN-kurve som angir frekvens (F) av antall drepte eller hardt skadde (N). I figur 4.10 er FN-kurven fra analysen av Bjørvikatunnelen fra Filipstad til Ryen i Oslo illustrert.



Figur 4.10. FN-kurve for Bjørvikatunnelen (DnV 2000)

Valg av fare- og ulykkessituasjoner, og forslag til tiltak

Gjennom risikoanalysen er det viktig å anbefale hvilke fare- og ulykkessituasjoner som skal legges til grunn for dimensjonering av tunnelens utforming og utrustning. Hendelsesforløpene som er analysert vurderes opp mot sikkerhetsfunksjonene (jfr. kap. 2.2 og vedlegg G). Når de dimensjonerende hendelsene er valgt, skal sikkerhetsfunksjonene med høy sannsynlighet ivaretas under belastningene av fare- og ulykkessituasjonen.

Risikoanalysen angir sannsynlighet for ulike uønskede hendelser, og ut fra en samlet vurdering kan for eksempel møteulykke mellom tungt og lett kjøretøy i Rogfasttunnelen med påfølgende brann i hydrokarboner bli valgt som dimensjonerende hendelse. Mengder og mulig eskalering av brannen til andre kjøretøy kan være en del av den dimensjonerende hendelsen som vil gi nivå på varmestråling, temperaturer, røykutvikling osv. som må legges til grunn for valg av trafikkstyring, hastighetsnivåer, rømmingssystemer, deteksjon og varsling, brannslukking med mer.

Håndbok 021 gir for eksempel minstekrav til dimensjonerende hendelser på henholdsvis 5 MW for ÅDT mindre enn 10000, og 20 MW for ÅDT større enn 10000. Branner i mindre eller større lastebiler har vist seg å gi energiproduksjon lik 20-30 MW. Noen myndigheter har derfor valgt dette som dimensjonerende brann eller designbrann. Alle større ulykker der flere har blitt drept, involverte flere kjøretøy. Det vil si at mengden brennbart materiale som var involvert i de brannene var store og energiproduksjonen økte som funksjon av tid.

Som en oppfølging av risikoanalysen bør man synliggjøre risikoreduserende tiltak. Risikoreduserende tiltak kan være:

Tekniske tiltak - for eksempel reguleringsendringer, endring i utforming og plassering av tunnelen, konstruksjonsforbedringer, investeringer i økt reparasjons- eller reserveutstyr, utplassering av beredskapsutstyr.

Operasjonelle tiltak - for eksempel overvåkningssystemer, prosedyrer, preventivt vedlikehold, trafikkregulering, kvalitetssikringstiltak.

Organisatoriske tiltak - for eksempel kompetanseheving, bedre planleggingsprosesser, øvelser, klargjøre ansvarsforhold, samordning av drift/vedlikeholdsoppgaver, ulike samarbeidsordninger med hensyn til ulykkesberedskap, endring av varslings- og informasjonsrutiner, dybdestudier, forskning.

Forslag til tiltak bør følges opp med en nyttekostnadsvurdering.

4.3 Fase III: Beslutning og bruk av risikoanalyser

Fase III er en like viktig fase i arbeidet som de to foregående, men kanskje den som ofte blir ”glemte”. Det er nå analysefunnene skal være presentert på en måte som gjør det mulig for politikere og ledere å fatte beslutninger. Denne fasen er også kritisk i forhold til å oppnå en god oppfølging av de vedtak som blir gjort.

4.3.1 Beslutning (politisk eller administrativt nivå)

Hva er sikkert nok? Det er et av flere spørsmål som beslutningstakere må vurdere når de skal velge tunnelløsninger. På bakgrunn av analyserapporten tar man stilling til oppfølging av de risikoforhold som er avdekket. Aksepterer man situasjonen som den er eller skal tiltak iverksettes? Hvilke tiltak skal iverksettes? Hvordan skal man vektlegge forebyggende tiltak i forhold til skadebegrensende tiltak? Hva slags risikonivå er akseptabelt?

Presentere risikoanalysen slik at viktige og strategiske problemstillinger blir synliggjort og skaper debatt.

Ofte er dette vurderinger som beslutningstakere må drøfte og ta stilling til på bakgrunn av anbefalinger fra administrasjon og fagfolk. Det har vært vanlig å etablere akseptkriterier for risiko som del av analysearbeidet. Denne håndboken anbefaler derimot følgende beslutningsprosess:

1. Generer ulike løsningsforslag og tiltak som gir endringer i (reduisert) risiko.
2. Kartlegg hva disse medfører av goder og ulemper mht risiko og kostnader
3. Vurder dette underlaget og ta et valg.

Valgene gjøres ut fra en totalvurdering av kostnader, effekter på sikkerhet, estetikk, fremkommelighet, trygghetsfølelse, beredskapsytelse med mer.

4.3.2 Oppfølging

Risikoanalysen er en del av planleggingsprosessen. Kunnskapen som fremkommer gjennom analysen kan brukes i andre aktiviteter:

Varsling, drift og vedlikehold

Risikoanalyser kan legges til grunn for drift og vedlikeholdsplanene for vegtunnelene, og analysen kan være et grunnlag for varslingsrutiner.

Beredskapsplaner

Beredskapsplaner bør utvikles på bakgrunn av risikoanalysen og inkludere hvordan Statens vegvesens egne ansatte skal håndtere en ulykkessituasjon. Beredskapen dimensjoneres og vedlikeholdes ut fra et sett med fare- og ulykkessituasjoner, som blant annet kan relateres til risikoanalysen.

Avklare samarbeids- og koordineringsmuligheter

Risikoanalysen må diskuteres med andre interessenter. Det kan bidra til å avklare ansvarsforholdet mellom for eksempel Statens vegvesen og andre offentlige instanser. Andre offentlige instanser kan være Fylkesmann, kommuner, politi/lensmann, fylkeskommuner, Sivilforsvar, statlige fagetater mv. Beredskapsplanene er tverrsektorielle og de bør øves og koordineres med brannvesen, politi og ambulansetjeneste.

Øvelser

Risikoanalysen er et godt grunnlag for øvelser i krisehåndtering. En krise har store potensielle ringvirkninger. Det er derfor viktig å øve på scenarier, der evalueringen knyttes opp mot kriseplanen.

FOBTOT beskriver minimum antall øvelser som årlig skal holdes i hver tunnel og hvordan dette skal dokumenteres. EU-direktiver stiller også krav til øvelshyppighet.

Kompetanseheving

Hensikten med risikoanalyser er å integrere kunnskap om sikkerhet i planlegging og drift av vegtunneler. Analysen er i seg selv et virkemiddel for kompetanseheving og erfaringsoverføring internt i Statens vegvesen.

Planleggingsgrunnlag for andre

Risikoanalysen kan danne planleggingsgrunnlag for andre. Den kan også gi Statens vegvesen bedre grunnlag for å kreve risiko og sårbarhet grundigere utredet i forhold til aktiviteter igangsatt av andre virksomheter, for eksempel private utbyggere.

5 Litteratur

Litteraturlistene under er delt inn i referanser, kap. 5.1, som er benyttet i håndboken og anbefalt litteratur, kap. 5.2, som kan gi utfyllende informasjon om risiko knyttet til vegtunneler.

5.1 Referanser

AIChE. (1992). *Guidelines for Hazard Evaluation Procedures*, American Institute of Chemical Engineers, New York, NY, USA.

Amundsen F.H., Ranæs, G. (1997). "Vegtrafikkulykker i vegtunneler 1990 – 1996", *TTS-9-1997*, Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Oslo.

Amundsen, F.H., Ranæs, G. og Engebretsen, A. (2001). "Bilbranner, alvorlige trafikkulykker og andre hendelser i norske vegtunneler 1997-2001", *TTS-07-2001*, Statens vegvesen, Vegdirektoratet, Oslo.

Aven, T. (1998). *Pålitelighets- og risikoanalyse*. Universitetsforlaget.

Aven, T., Boyesen, M., Heinzerling, G. og Njå, O., (2003). "Risikoakseptkriterier og akseptabel risiko i transportsektoren. En kunnskapsoversikt". *RF-2003/072*, RF-Rogalandforskning, Stavanger.

Aven, T., Boyesen, M., Njå, O., Olsen, K.H. og Sandve, K. (2004). *Samfunnssikkerhet*. Universitetsforlaget, Oslo

- Babrauskas, V. (1983). "Estimating large pool fire burning rates". *Fire Technology*, vol. 19, 251-261.
- Bandura, A. (1997). *Self-efficacy: The exercise of control*. New York, USA, W.H. Freeman.
- Bergqvist, A., Frantzich, H., Hasselrot, K. og Ingason, H. (2002). "Räddningsinsatser vid tunnelbränder: Probleminventering och miljöbeskriving vid brand i spårtunnel". *FOU-rapport*. Karlstad, Sverige, Räddningsverket
- Bernstein, D.A., Clarke-Stewart, A., Roy, E.J. og Wickens, C.D. (1997). *Psychology*. New York, USA, Houghton Mifflin Company.
- Bettelini, M., Neuenchwander, H., Henke, A., Gagliardi, M. og Steiner, W. (2003). "The Fire in the Gotthard Tunnel of October 24, 2001". *102.2-R-150*, Minusio, Lombardi Engineering Limited.
- Bjerkestvedt, D., Bakke, J.R. og van Wingerden, K. (1992). "Gas Exposition Handbook", *CMR-93-A25034, version 1.2*, Christian Michelsen Research, Bergen.
- BSI (1997) "Fire safety engineering in buildings. Guide to the application of fire safety engineering principles". *DD 240-1*. England.
- Canter, D.V., Donald, I. og Chalk, J.R. (1992). "Pedestrian Behaviour during Emergencies Underground: The Psychology of Crowd Control under Life Threatening Circumstances". *1st International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels*, Basel, Switzerland, Nov 1992.
- Carvel R.O., Beard A.N. og Jowitt P.W. (2002). "CERBERUS: A new model to estimate size and spread for fires in tunnels with longitudinal ventilation". In *Proc. Int. Conf. on Tunnel Safety and Ventilation - New Developments in Tunnel Safety*, Graz, Austria, 8-10th April 2002, pp.69-76
- Colombo, A.G. (2001). "Lessons learnt from tunnel accidents" Nedies project. EUR report 2001. <http://nedies.jcr.it/>
- Daas, H. R. (2002). *Rapport fra et seminar om brann- og røyktester i Benelux tunnelen*. Oslo, Statens vegvesen.
- DBE (2000). "Granskningsrapport om brann i kjøretøyer i Seljestadtunnelen på E134 i Odda kommune, 14. juli 2000". *DBEs granskningsrapport av 15. august 2000*. www.dbe.no
- DnV (2000). "Risikoanalyse for Bjørvikatunnelen, Planfase 3, revisjon 04". *DNV-rapport nr. 2000-3305*, Dr. Ing. A. Aas-Jakobsen/Statens vegvesen, Oslo.
- Drysdale, D. (1998). *An Introduction to Fire Dynamics*. John Wiley & Sons, Chichester, England.

DSB (1994). "Veileder for kommunale risiko- og sårbarhetsanalyser". Direktoratet for sivilt beredskap, Oslo.

DSB (2002). *Forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn (FOBTOT)*. Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap
www.dsb.no

Duffé, P. og Marec, M. (1999). "Task Force for Technical Investigation of the 24 March 1999 Fire in the Mont Blanc Vehicular Tunnel". Minister of the Interior - Ministry of Equipment, Transportation and Housing - 30 June 1999.
http://home.c2i.net/ergonomi/ergo/dokumenter/Mont_Blanc_fire.htm

Dyregrov, A. (1999). *Katastrofepsykologi*. Bergen, Fagbokforlaget.

Eckhoff, R.K. (1992): "Instrumentering i eksplosjonsfarlige områder", *CMR-92-A90005*, Christian Michelsen Research, Bergen.

Elvik, R., Mysen, A.B. og Vaa, T. (1997). *Trafikksikkerhetshåndbok. Oversikt over virkninger, kostnader og offentlige ansvarsforhold for 124 trafikksikkerhetstiltak*. Transportøkonomisk Institutt, Oslo.

Elvik, R., og Rydningen, U. (2002). "Effektkatalog for trafikksikkerhetstiltak", *TØI rapport 572/2002*. Transportøkonomisk Institutt, Oslo.

Ertesvåg, I.S. (2000). *Turbulent strømming og forbrenning*. TAPIR

FIRETUN (1995). "Fire in Transport Tunnels, Report on Full Scale Tests". *EUREKA – Prosjekt EU 499: FIRETUN*. Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V, D-40213 Dusseldorf

Grimstvedt, K. (2004). "Menneskets overlevningsmuligheter ved tunnelbrann, basert på brannen i Seljestadtunnelen 14. juli 2000", hovedoppgave, Høgskolen i Stavanger.

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.

Ingason, H. (2002): "An Overview of Vehicle Fires in Tunnels", SP. Borås, Sverige.

Ingason, H. (1995). "Design Fires in Tunnels". In Proceedings ASIAFLAM 95, Hong Kong, mai 1995, Interscience Communication Limited. 77-85.

Kamelon FirEx II manual 2002, ComputIT, Trondheim

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.

Klepp kommune (2002). "DagROS". Veileder utgitt i et samarbeid mellom Klepp kommune, Sosial- og helsedirektoratet og Direktoratet for sivilt beredskap.

KRD (2001): *Tekniske forskrifter til plan- og bygningsloven (TEK)*. Kommunal og regionaldepartementet, bolig og bygningsavdelingen. Norsk byggtjenestes forlag.

Midtgaard, A.K. (2003) "Enkel metode for risikovurderinger i vegtrafikken – med eksempel". *Notat 16.10.2003*, Statens vegvesen.

Mostue, B.A., Stensås, J.P. og Wighus, R. (2003). "Forventet effekt av faste, aktive sløkkeanlegg, boligsprinkler og vanntåke". *NBL A03105*. SINTEF, Trondheim.

NFPA (2002). *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. Massachusetts, National Fire Protection Association, Inc.

NBR (2000). "Veiledning til NS3901 – Risikoanalyser av brann i vegtunneler". Norges Byggstandardiseringsråd, Oslo

Norsk Brannvern Forening (1998). *Brannvern i Norge ved årtusenskifte*. Norsk Brannvern Forening.

Parker, D. og Dimmer, A. (2003). "The Feasibility of a Systems Approach to Road Traffic Accident Investigation". Rapport, FIA Foundation, Manchester.

PIARC (1995). *Road Safety in Tunnels*. Piarc – World Road Association, Frankrike.

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.

Retterstøl, N. og Weisæth, L. (1985) *Katastrofer og kriser*. Kristiansand, Norge, Universitetsforlaget.

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.

SD (2004). *St.meld. nr. 24, 2003-2004: Nasjonal transportplan 2006 – 2015*. Samferdselsdepartementet, Oslo

SD og KRD (2000). *Retningslinjer for brannsikring av vegtunneler*. Fastsatt av Samferdselsdepartementet og Kommunal- og regionaldepartementet.
www.dsb.no

Selye, H. (1978). *The Stress of Life*. New York, USA, McGraw-Hill Book Co.

SOLVENT (2002). "SOLVENT Manual 2001", Tunnel Ventilation Division
Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas Inc., NY, USA.

Statens vegvesen (2002). "Vegtunneler". *Statens vegvesen Håndbok 021*, Oslo.

Statens vegvesen (2001). "Styring av utbyggingsprosjekter". *Statens vegvesen Håndbok 151*, Oslo.

Statens vegvesen (2000). "Oversiktsplanlegging. Veg- og transportplanlegging etter plan- og bygningsloven". *Statens vegvesen Håndbok 054*, Oslo.

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.

Ursin, H. og Zahl-Begnum, O.H. (1993). *Biologisk psykologi*. Tano A.S, Oslo.

WHO (1992). *International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems 10th Revision*. World Health Organisation.

Yalom, I.D. (1998). *Eksistensiell psykoterapi*. Reitzel Forlag.

5.2 Annen relevant litteratur

Arvidson, M. (1999). "Fixed fire suppression systems concepts for highway tunnels". *Tunnel fires and escape from tunnels, International Conference, 5-7 may '99*, p. 129 – 136.

Australasian Fire Authorities Council (2001). *Fire Safety Guidelines for Road Tunnels*. AFAC Limited Australia.

FHWA (2000). "Prevention and Control of Highway Tunnel Fires". *FHWA-RD-83-032*. US department of transportation.

Heshelden A.J.M. (1978). "Studies of Fire and Smoke Behaviour Relevant to Tunnels" *CP66/78*, Building Research Establishment, UK.

Ingason, H., Gustavsson, S. og Dahlberg, M. (1994). "Heat Release Rate Measurement in Tunnel Fires". *SP-Report 1994:08*, Swedish National Testing and Research Institute.

Ivarson, E. (1994). "Proceedings of the International Conference of Fires in Tunnels" *SP Report 1994:54*. October 10-11th 1994, Borås, Sweden.

Lindvik, P.A. (1995). *Arbeidsfysiologi for røykdykkere*. Norsk brannbefalslag.

Lindvik, P.A., Nilsen, A.R. og Log, T. (1998): "Fullskala brannforsøk Byfjordtunnelen Rennfatsambandet 25.8.98", Høgskolen Stord Haugesund.

Log, T. (1996). "Radiant heat attenuation in fine water sprays". In proceedings *Interflam '96*, 425 – 434.

Log, T. og Nilsen, A.R. (1999). "Fine water spray efficiency in low momentum deluge systems for flashover prevention". In Proceedings Interflam '99, 69 – 80.

UN/ESC (2001). "Recommendations of the Group of Experts on Safety in Road Tunnels". Final Report. Trans/AC.7/9.

Vedlegg

A Data fra tunnelulykker

Dette vedlegget gir en oversikt over alvorlige hendelser som har inntruffet i vegtunneler. Tabell A1 viser alvorlige ulykker med branner i tunneler, uten at listen er uttømmende. Mot slutten av vedlegget gis en kortfattet beskrivelse av brannene i Mont Blanc tunnelen, Tauern tunnelen, St. Gotthard tunnelen og Seljestadtunnelen.

Tabell A1. Oversikt over kjente tunnelulykker (hentet fra <http://home.no.net/lotsberg>)

År	TUNNEL Lengde	Sted Land	Kjøretøy hvor brann oppstod	Sanns. årsak til brann	Varighet av brann	Konsekvenser		
						Konsekvenser mennesker	Skade på kjøretøy	Konstruksjoner og installasjoner
1949	Holland 2 550 m	New York USA	Lastebil med 11 tonn karbondisulfid	Last falt av lastebilen eksplosjon	4 t	66 skadde røyk-forgiftning	10 lastebiler 13 biler	Alvorlig skade på over 200 m av tunnelen
1974	Mont Blanc 11 600 m	Frankrike-Italia	Lastebil	Motor	15 min.	1 skadet		
1976	Crossing BP - A6 430 m	Paris Frankrike	Lastebil med trumler av 16 tonn polyesterfilm	Høy fart	1 t	12 lettere skadet (røyk)	1 lastebil	Alvorlig skade over 150 m
1978	Velsen 770 m	Velsen Nederland	4 lastebiler 2 biler	Front-bakfra- kollisjon	80 min.	5 døde 5 skadde	4 lastebiler 2 biler	Alvorlig skade på over 30 m
1979	Nihonzaka 2 045 m	Shitzuoka Japan	4 lastebiler 2 biler	Front-bakfra- kollisjon	159 t	7 døde 1 skadd	127 lastebiler 46 biler	Alvorlig skade på over 1 100 m
1980	Kajiwara 740 m	Japan	1 lastebil med 3600 liter maling i 200 kanner	Kollisjon med tunnelveggen og trillet rundt		1 død	1 lastebil	Alvorlig skade på over 280 m
1982	Caldecott 1 028 m	Oakland USA	1 bil, 1 buss 1 lastebil med 33000 l bensin	Front-bakfra- kollisjon	160 min.	7 døde 2 skadde	3 lastebiler 1 buss 4 biler	Alvorlig skade på over 580 m
1982 3. Nov.	Salang 2 700 m	Mazar-e-Sharif - Kabul Afghanistan	Sovjetisk militær-kolonne. Minst en bensintankvogn.	Ukjent. Sanns. mine som eksploderte		> 200 dead		
1983	Pecorila Galleria 662 m	Gênes Savone Italia	Lastebil med fisk	Front-bakfra- kollisjon		9døde 22 skadde	10 biler	Liten skade
1986	L'Arme 1 105 m	Nice Frankrike	Vogntog	Nedbremsing etter høy fart		3 døde 5 skadde	1 lastebil 4 biler	Noe utstyr ødelagt
1987	Gumefens 343 m	Bern Sveits	1 lastebil	Front-bakfra- kollisjon	2 t	2 døde	2 lastebiler 1 varebil	Små skader
1990	Røldal 4 656 m	Røldal Norge	Varevogn med henger		50 min	1 skadd		Liten skade
1990	Mont Blanc 11 600 m	Frankrike-Italia	Lastebil med 20 tonn bomull	Motor		2 skadde	1 lastebil	Noe utstyr ødelagt
1993	Serra Ripoli 442 m	Bologna-Firence Italia	1 bil + lastebil med papirruller	Kollisjon	150 min.	4 døde 4 skadde	5 lastebiler 11 biler	Liten skade
1993	Hovden 1 290m	Høyanger Norge	Motorsykkle 2 biler	Front-bakfra- kollisjon	1t	5 skadde i kollisjonen.	1 motorsykkle 2 biler	111 m isolasjonsmateriale ødelagt
1994	Huguenot 3 914 m	Sør-Afrika	Buss med 45 passasjerer	Elektrisk feil	1t	1 død 28 skadde	1 buss	Alvorlig skade
1995	Pfander	Østerrike	Vogntog	Kollisjon	1t	3 døde	1 vogntog	Alvorlig skade

10. april	6 719 m					4 skadde	1 varevogn 1 bil	
1996 18. mars	Isola delle Femmine 148 m	Palermo Italia	1 tankvogn med LNG + 1 liten buss	Front-bakfra- kollisjon		5 døde 20 skadde	1 tankvogn 1 buss 18 biler	Alvorlig skade på tunnel
1999 24. mars	Mont Blanc 11 600 m	Frankrike - Italia	Lastebil med me og margarin	Oljelekkasje Motor		39 døde	23 lastebiler 10 biler 1 mc 2 brannbiler	Alvorlig skade Tunnel stengt i ett år og 9 mnd.
1999 29. mai	Tauern 6 401 m	A10 Salzburg-Spittal Østerrike	Lastebil med maling	Front-bakfra- kollisjon 4 biler og 2 lastebiler		12 døde 49 skadde	14 lastebiler 26 biler	Alvorlig skade
2000 14. juli	Seljestad 1 272 m	E 134 Drammen - Haugesund Norge	Dieselbrann i motorrom på trekkvogn startet før kollisjon	Front-bakfra- kollisjon Trekkvogn skubbet fire biler som var stoppet opp.	45 min	6 skadde	1 lastebil 6 biler 1 MC	Alvorlig skade
2001 28. mai	Prapontin 4 409 m	A 32 Torino - Bardonecchia Italia	Lastebil med for	Mekanisk problem		19 røykskadde		Stengt 1,5 uke
2001 6. aug.	Gleinalm 8 320 m	A 9 near Graz Østerrike	Bil	Møteulykke lastebil - bil		5 døde 4 skadde		
2001 24. oct.	St. Gotthard 16 918 m	A 2 Sveits	Lastebil	Møteulykke to lastebiler	2 dager	11 døde	13 lastebiler 4 varevogner 6 biler	Alvorlig skade. Stengt 2 mnd.

Mont Blanc tunnelen

Informasjonen er hentet fra granskningsrapporten (Duffé og Marec 1999). Det henvises til denne for utdypende informasjon. Brannen i Mont Blanc tunnelen, mellom Frankrike og Italia, den 24. mars 1999 startet med røykutvikling i en lastebil. Lastebilen stoppet opp inne i tunnelen, og det utviklet seg etter hvert brann i førerhuset. Brannen utviklet seg raskt, og det ble produsert store mengder giftig røyk. Røyken ble ventilert mot den franske siden av tunnelen, noe som gjorde at samtlige personer som befant seg mellom brannstedet og den franske siden omkom på grunn av røykforgiftning. Totalt omkom 37 personer av forgiftning i selve tunnelen, hvorav 29 personer ble funnet i biler. 40% av personbilene hadde prøvd å snu, uten å komme seg vekk. Ytterligere to personer omkom i denne brannen. Disse to søkte tilflukt i et evakueringsrom som ikke klarte å motstå brannen. Personene som befant seg på den franske siden av tunnelen valgte fire typer atferd; bli sittende rolig i bilen; prøve å snu bilen; flykte i veibanen; og søke tilflukt i evakueringsrom.

Tauern tunnelen

Informasjonen rundt denne brannen er hentet fra Colombo (2001). Brannen i Tauern tunnelen i Østerrike den 29. mai 1999 førte til at 12 personer omkom og 60 personer ble røykskadet. Brannen startet ved at en lastebil kjørte inn i en stillestående kø bestående av flere kjøretøy, deriblant en lastebil med maling. Det dannet seg raskt et røyklag oppunder himlingen i tunnelen. Ved bakken var det en røykfri-sone i rundt 10-15 minutter, som gjorde at omlag 80 personer kom seg ut av tunnelen, enten til fots eller i kjøretøy. To personer ble også reddet ut av redningsmannskap. Åtte personer omkom i selve kollisjonen, mens de siste fire døde av den påfølgende brannen. Tre av disse ble funnet sittende i sine biler, til tross for at de hadde mulighet til å redde seg selv ut i tide. En av disse tre hadde returnert til bilen for å hente noen dokumenter. Den siste ble funnet 800 meter fra brannstedet. Det ble også registrert at flere biler ignorerte rødt lys, og kjørte inn i tunnelen etter at brannen hadde startet. Når det gjelder de fire personene som omkom på grunn av brannen, så tyder mye på at flere av disse ikke har oppfattet alvoret i situasjonen.

St. Gotthard tunnelen

Informasjonen om denne brannen er hentet fra (Bettelini m.fl. 2003). Brannen i St. Gotthard tunnelen den 24. oktober 2001 ble forårsaket av kollisjon mellom to lastebiler, hvor den ene var lastet med bildekk. Brannen utviklet seg ekstremt raskt, og det ble produsert mye røyk og giftige gasser, som førte til at 11 mennesker omkom i brannen. Alle omkom av CO-forgiftning, og ble funnet nedstrøms brannstedet. Av de omkomne ble fem funnet i sine biler, mens seks ble funnet flyktende fra brannstedet i ventilasjonsretningen. Mye tyder på at de fem personene i bilene ikke har oppfattet alvoret i situasjonen til tross for at de må ha sett andre personer flykte utenfor bilene. Når det gjelder de seks andre personene, så ble fem funnet liggende i vegbanen innhentet av røyken, mens den siste ble funnet like utenfor et tilfluktsrom.

Brannen i Seljestadtunnelen

Informasjonen om denne brannen er hentet fra (DBE 2000; Grimstvedt 2004). Brannen i Seljestadtunnelen 14. juli 2000, ble forårsaket av en kollisjon mellom en trekkvogn og en personbil. Kollisjonen fant sted 300 meter fra Odda åpningen. Ulykken skjedde når en lastebil på vei mot Odda stanset for gi plass til en møtende tankbil. Bak lastebilen var en bobil og fem personbiler, som alle stod stille til tankbilen hadde passert. Før de fikk kjørt videre kom en trekkvogn bakfra som ikke klarte å stoppe i tide. Trekkvognen kjørte inn i den bakerste personbilen, som ble skjøvet inn i personbilene foran, og forårsaket en kjedekollisjon. Brannen startet umiddelbart i trekkvognen, og spredde seg raskt til personbilene. Lastebilen, tankbilen og bobilen var ikke direkte involvert i ulykken og kom seg ut fra tunnelen. Ytterligere to kjøretøy, en motorsykkel og en personbil, ankom ulykkesstedet etter at brannen startet. Disse kjørte i retning Odda, og kom bak trekkvognen. Personbilen med to voksne og to barn prøvde å snu tilbake i retning Røldal, men på grunn av den tette brannrøyken ble de sittende fast i tunnelen. Røykdykkere fant de fire personene levende etter å ha befunnet seg i over en time nedstrøms i tunnelen mens det brant. Resten av personene, som var involvert direkte eller indirekte i ulykken, kom seg ut oppstrøms brannen, før den fikk utviklet seg skikkelig. Ingen personer omkom i denne hendelsen.

B Brannodynamikk og brannteori

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 utbyggningsfase av en tunnel. Formålet med å simulere branner er å bestemme hvilke energimengder som utløses og av det studere 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)⁸, Durable and Reliable tunnel Structures (DARTS)⁹, Safe Tunnel, Sirtaki¹⁰, Virtual Fires¹¹, Upgrading existing Tunnels (UPTUN)¹² 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:

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

Forbrenningseffektiviteten, χ , varierer med brenseltype og spenner fra 0 (ikke brennbar) til 1 (fullstendig forbrenning). Verdiene er empirisk bestemte og finnes som

8 www.etnfit.net

9 www.dartsproject.net

10 www.sirtakiproject.com

11 www.virtualfires.org

12 www.uptun.net

tabellverdier. Når forbrenningen skjer inne i en tunnel vil det dannes røyklag som varmer opp 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:

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

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:

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

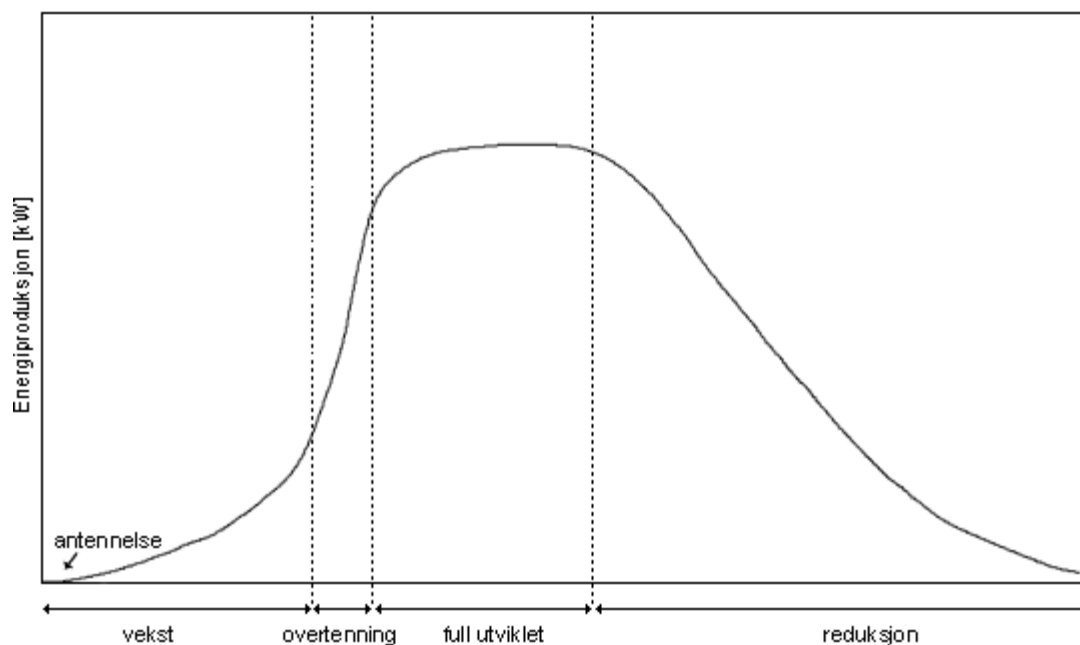
hvor:

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

Verdiene til \dot{m}_∞'' 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: *antennning*, *vekst*, *overtenning*, *fullt-utviklet* og *reduksjon*. Antennning 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

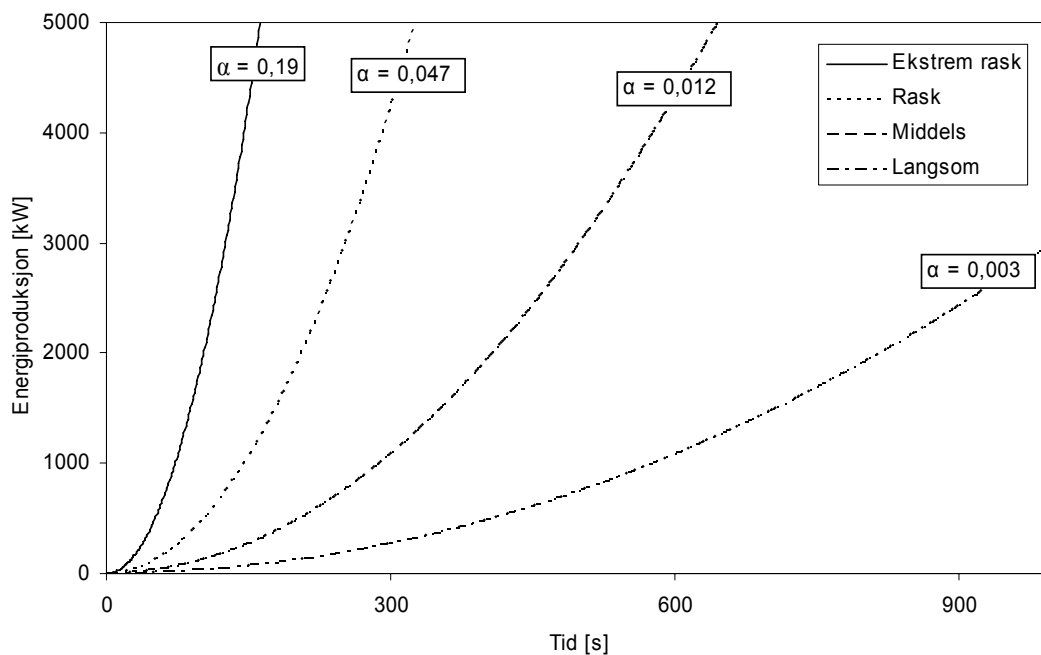
Keski-Rahkonen (1993) og Hagen (1987) foreslo å dele brannscenarioet til bruk i utforming av vegtunneler inn i tre faser: *vekst*, *fullt utviklet* og *reduksjon*, langs en tidsakse. Energiproduksjonen i vekstfasen vil normalt være akselererende, og kan derfor beskrives med en parabel (t^2) kombinert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

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

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

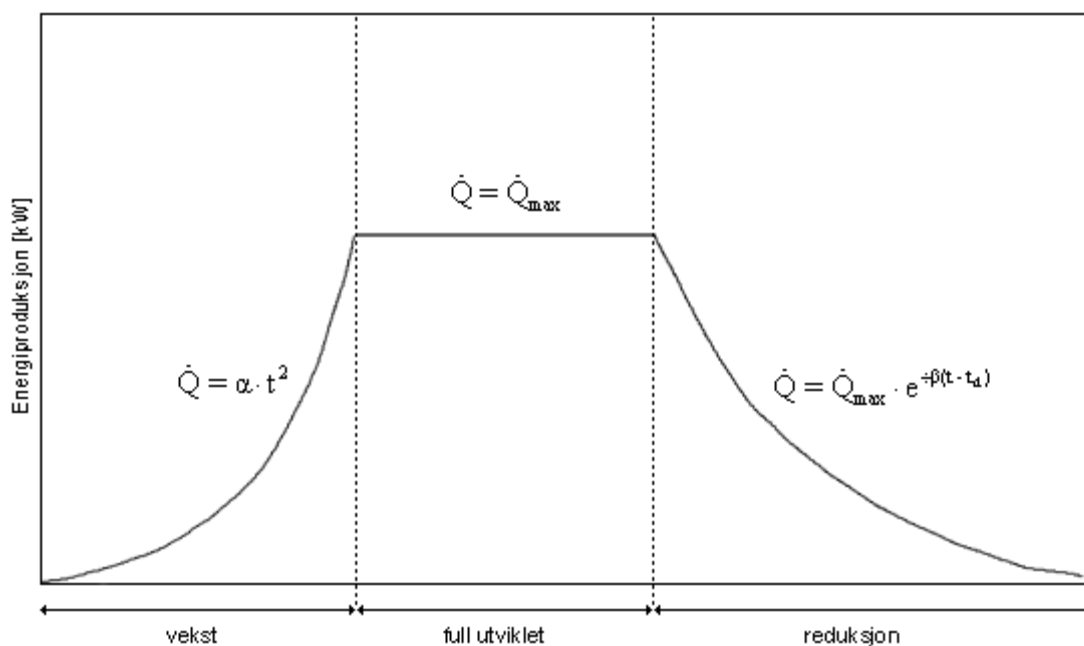
Energiproduksjonen vil etter hvert avta, og brannen går over i en reduksjonsfase. Tiden til denne fasen inntreffer er gitt ved t_d . Energiproduksjonen er i denne fasen gitt ved:

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

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 (α) og avkjølingsfaktoren (β) 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]	α [kws ⁻²]	β [s ⁻¹]
Bil	4	0.01	0.001
Buss	30	0.1	0.0007
Lastebil ^a	15-130	-	-

^a 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):

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

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:

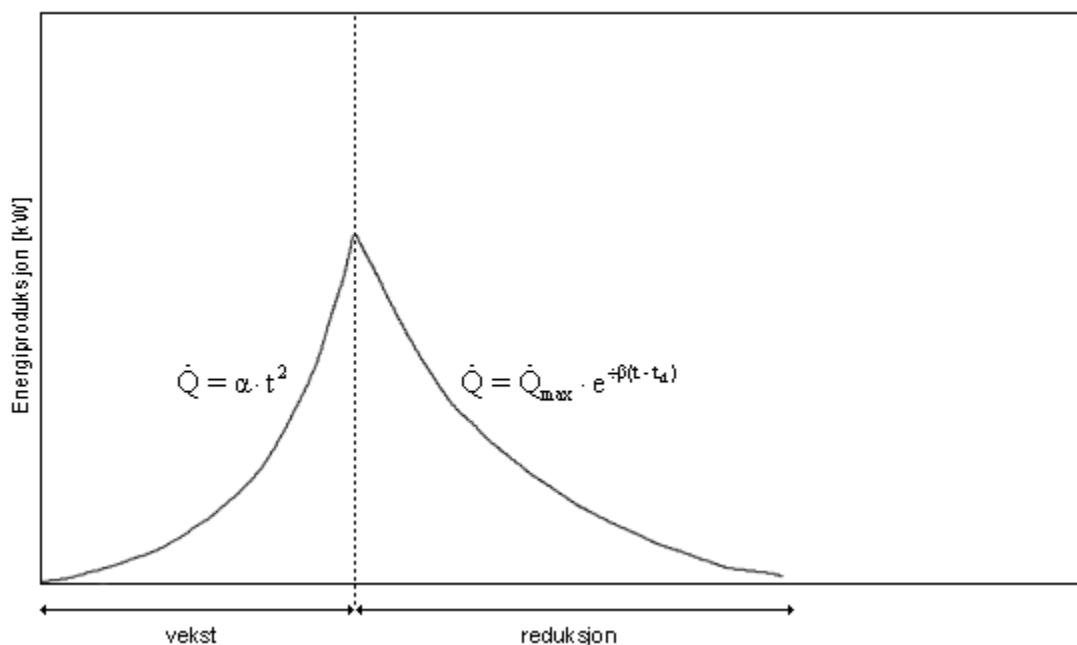
$$t_d = \frac{\chi \cdot E_{\text{tot}}}{\dot{Q}_{\max}} + \frac{2}{3}t_{fo} - \frac{1}{\beta} \quad [\text{s}] \quad (\text{B.8})$$

hvor:

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

χ = 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:

ρ_a	= tettheten av luften (ved inntak)	[kgm ⁻³]
u	= gjennomsnittlig langsgående ventilasjonshastighet i tunnelen	[ms ⁻¹]
A_T	= tverrsnittsarealet i tunnelen	[m ²]
X_{0,O_2}	= volumfraksjon oksygen i innluft	-
X_{O_2}	= volumfraksjon oksygen i utluft	-

Det antas generelt at 13.1 MJkg⁻¹ avgis pr kg O₂ konsumert av brannen, relativ luftfuktighet 50 %, romtemperatur $T_0 = 15^\circ\text{C}$, CO₂ i tilluften er 330 ppm., ρ_a tetthet til uteluft er 1 kgm⁻³. Hvis brannen ikke klarer å forbruke alt oksygenet i luften, pga. høy lufthastighet og kort forbrenningszone, 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 veggutunneler 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 antenning 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 lyd hastigheten. I gass/luft-blandinger ved atmosfærisk trykk ligger detonasjons-hastigheten på 1500 – 2000 m/s og spissttrykket 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 Bragerne tunnelen 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 spissttrykk 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 spissttrykk, 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 antenning. Antennespunkt lengst borte fra ventilasjonsåpning gir størst spisstrykk. En ytterligere forverring vil skje dersom antenningen 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 (utslipprater, 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]
ρ_a	= tetthet til luft	[kgm^{-3}]
A_T	= areal av tunnelåpning	[m^2]
u	= ventilasjons-/vindhastighet i tunnel	[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 τ	[kW]
h	= varmeovergangskoeffisient	[kWm ⁻² °C ⁻¹]
P	= perimeter (f. eks. 2· bredde + 2· høyde)	[m]
x	= avstand nedstrøms fra brannstedet	[m]

Tau (τ) er en tidsforskyvingskoeffisient som beskriver røykgassenes transporttid frem til en avstand x , etter tidspunktet t (τ 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 , antas som 0.03 kWm⁻²K⁻¹. 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/ redusert 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 bekledning, 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 bekledning. Ofte settes tåleevnen for stråling over tid lik 2,5 kWm⁻² (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]

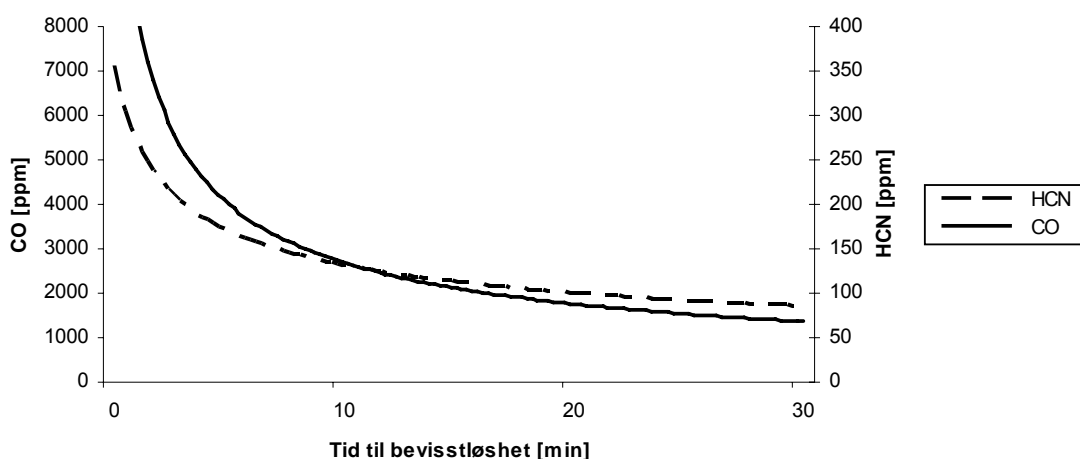
\dot{q}'' = strålefluks [kWm⁻²]

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_x, m.v. I oksidasjonsfasen reagerer komponentene fra reduksjonsfasen med oksygenet i luften, og det produseres kjemisk varme og avgasser som CO₂ og H₂O 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 (CO₂). 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 $\frac{3}{4}$ 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 [CO₂] er giftig ved konsentrasjoner større enn 6 vol%, men slike konsentrasjoner er ikke vanlige. Allikevel har CO₂ stor betydning ved at den øker innåndingsfrekvensen, som blant annet medfører økt opptak av CO. For eksempel vil omtrent 3 vol% CO₂ 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 (CO₂) gitt ved:

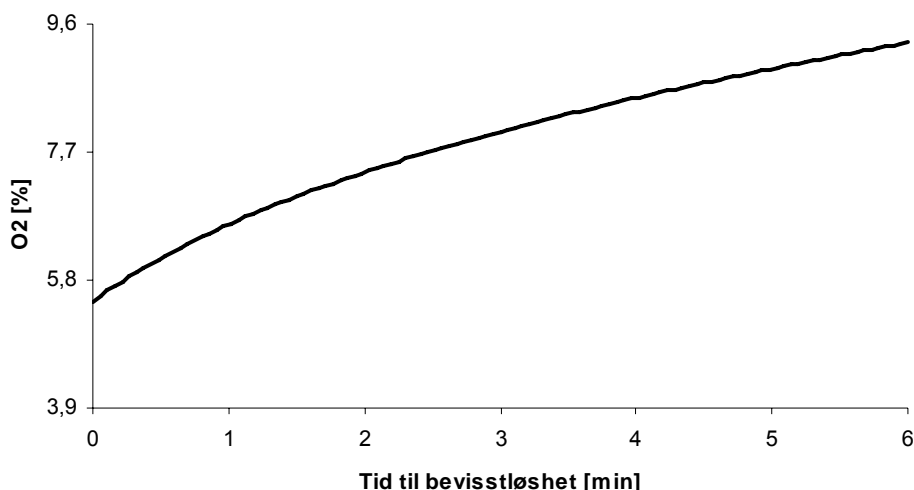
$$X_{\text{CO}}(t, x) = \left[Y_{\text{CO}} - \frac{M_a}{M_{\text{CO}}} \frac{Q(\tau)}{\Delta H \rho_a u A_T} \right] \cdot 10^6 \quad [\text{ppm CO}] \quad (\text{D.6})$$

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

hvor:

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

Tidsforskyvningskoeffisienten (τ) er gitt ved ligning (D.3) ovenfor. *Oksygen* [O₂] 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 (O₂) som en funksjon av tid fra brannstart og avstand fra brannstedet er gitt ved:

$$X_{O_2}(t, x) = \left[X_\infty - \frac{Q(\tau) M_a}{\Delta H M_{O_2}} \left(\frac{X_\infty M_a}{M_{O_2}} + r_0 \right) \right] \quad [\text{vol}\% \text{ O}_2] \quad (\text{D.9})$$

hvor:

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

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

ΔH	= 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	$[-]$
ρ_a	= tetthet til luft	$[\text{kgm}^{-3}]$
A_T	= areal av tunnelåpning	$[\text{m}^2]$
u	= ventilasjons-/vindhastighet i tunnel	$[\text{ms}^{-1}]$

Tidsforskyvningskoeffisienten (τ) 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] (hhv. 5 og 30 minutt)	
CO	> 1	1,5	1,5
CO ₂	> 6	25	150
O ₂	< 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%CO₂ = andel karbondioksid i luften [vol%]
 vol%O₂ = 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 $8,2925 \cdot 10^{-4}$ ved lett aktivitet og $1,99 \cdot 10^{-4}$ 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 O₂ i eksponeringstiden, med korrigeringsfaktor for økt pustefrekvens som følge av CO₂. 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 $F_{i,CO_2} > 1,0$.

E Risikoanalyseteknikker

Nedenfor listes flere vanlige teknikker for risikoanalyse.

Sikker jobb analyse (SJA), DagROS

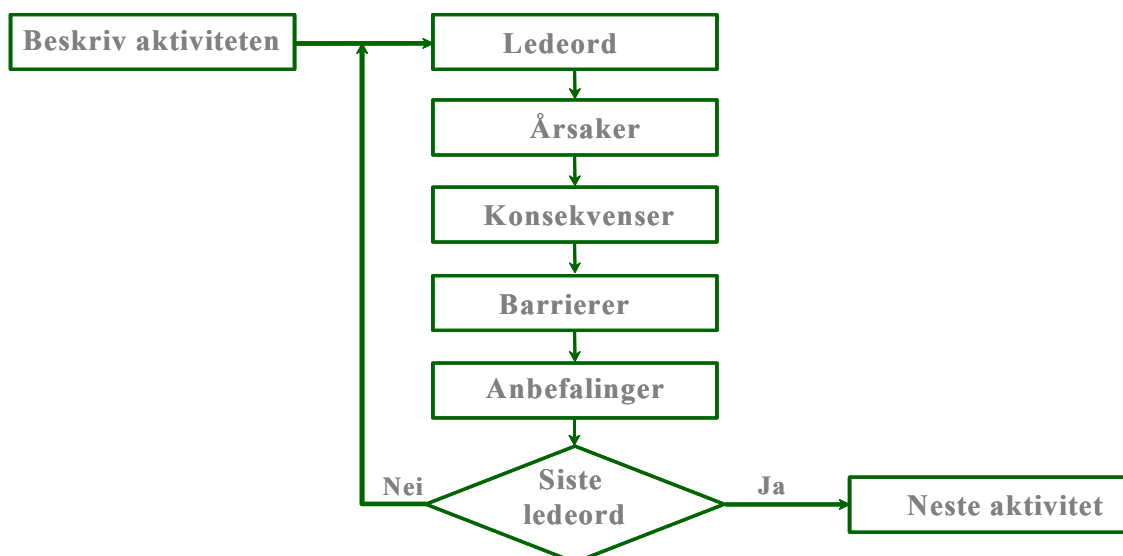
Disse metodene (Sunde og Hagen 1994; Klepp kommune 2002; OLF 2003) kan knapt kalles risikoanalyse, men de er en listing av farlige forhold knyttet til en aktivitet. Det gjøres vanligvis ingen forsøk på å angi sannsynligheter eller konsekvenser eksplisitt, men en samlet vurdering av det farlige forholdet skal avgjøre om tiltak er påkrevd eller ikke. Denne formen for analyse kan være nyttig i mange sammenhenger, spesielt for aktiviteter av kortere varighet og som er midlertidige (overgangsfaser – for eksempel en byggeoperasjon).

Bruksområde: Analysen egner seg for aktiviteter av kort varighet, vurdering av operasjonelle rutiner, prosedyrer og lignende. I forbindelse med tunneler er det først og fremst i utbyggingsfasen at metoden er relevant. Metoden sine fordeler er at den involverer personell som er eksponert for farer, og den er rask og enkel å bruke. Svakheten med denne metoden er at den kan bli for enkel, overflatisk og unøyaktig. Viktig å motivere for metoden, slik at personellet ser nytten av arbeidet.

Hazop-teknikk

Hazop-teknikken er egnet til å ta uheldige løsninger på et tidlig tidspunkt og å inkludere tverrfaglig ekspertise i planprosessen. Konseptet bygger på såkalt "Hazard and operability analysis (Hazop)"-teknikk, som er nærmere beskrevet i for eksempel AIChe "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures" (1992). Hazop-teknikken fokuserer på sikkerhet og funksjonalitet – det siste relatert til blant annet bedre økonomi, trivsel, gjennomførbarhet, fremkommelighet.

Hazop-teknikken bygger på en identifisering av avvik fra ønsket eller planlagt hensikt og en vurdering av avvikene for å bygge inn robusthet i planleggingsprosessen. Teknikken har et bredt anvendelsesområde og kan gjennomføres i alle faser av en planleggings- og driftsprosess. Det finnes ulike varianter av Hazop-teknikken, alt etter detaljnivå analysegrunnlaget har. Hazid (Hazard identification) er en lignende men enklere form for strukturert sikkerhetsmøte, som ikke krever et like detaljert underlagsmateriale for analysen. Teknikken gjennomføres som et strukturert møte, hvor en hazop-leder og -sekretær styrer diskusjonen. Metoden har høy anvendelse innenfor høy-risiko industri, som for eksempel oljeindustri og petrokjemisk industri. Analysen kan utføres for enkeltsystemer, for eksempel ventilasjonssystemet i en tunnel, den kan anvendes på hele tunnelsystemet, eller den kan anvendes i forhold til prosedyrer, for eksempel trafikkstyring av tunnel. Hazop-teknikken har i utgangspunktet følgende form:



Figur E1: Skisse av Hazop-teknikken

Ved hjelp av et sett med ledeord og parametere styres et møte av personell med ulik fagbakgrunn gjennom hele eller deler av et forslag til tunnelsystem (inndelt i aktiviteter eller systemer) eller en eksisterende tunnel. Prosessen har som formål å avdekke svakheter i løsningene, og finne frem til gode barrierer og bedre løsninger (sikrere og billigere) som kan tas implementeres.

Bruksområde: Metoden egner seg på alle nivåer, og kan være en første tilnærming til konseptrisiko- eller totalrisikoanalyse. Den er lett forståelig og gir anledning til tverrfaglighet. Gjennom analysen gis det anledning til at kompetanse kan uttrykkes på tvers av faggrenser som ofte gir kreative diskusjoner og forslag til løsninger. Metoden er avhengig av god forberedelse med hensyn til parametere og ledeord, og den krever effektiv møteledelse. Kvaliteten av analysen er svært individavhengig og av at møtedeltakerne får uttrykke sin kompetanse.

Feilmodi og -effekt analyse

Denne teknikken er beskrevet i Aven (1998) og benyttes blant annet i bilproduksjon for å implementere sikkerhetsmessige aspekter. Det grunnleggende i denne teknikken er at systemet (vegtrafikken) må kunne brytes ned i delsystemer, enheter og komponenter. Feil og avvik på komponentnivå studeres i forhold til effekter på delsystem- og systemnivå. Det er også vanlig å kartlegge/gradere kritikalitet av de ulike feilmodi.

Bruksområde: Metoden er best egnet til å analysere tekniske systemer, men den kan også benyttes i forhold til menneske/maskin-systemer. Da må menneskene anses som komponenter med typiske feilmodi som identifiseres. Teknikken er meget grundig noe som både har positive og negative sider. På den positive siden vil en FMEA gi grundig kunnskap om vegsystemet som studeres. Metodikken kan bli meget arbeidskrevende, med mye dokumentasjon.

Grovanalyse

Grovanalyse er den vanligste risikoanalyseteknikken som blir benyttet i landbasert virksomhet i Norge. Teknikken er beskrevet i DSB (1994) og Aven m.fl. (2003).

Midtgaard (2003) har tilpasset teknikken til vegutbyggingsprosjekter. Analyseteknikken er grov. Med det menes at nedbrytning av systemer, årsaksanalyse og konsekvensanalyse ikke behøver å være detaljert og heller ikke med stor grad av presisjon. Sannsynligheter og konsekvenser angis ofte med kategorier (intervaller), og grunnlaget er ofte direkte anslag – ekspertvurderinger. De analyserte hendelsene legges inn i en risikomatrix, se matrisen under. De uønskede hendelsene (Uh1-4) kan da vurderes opp mot hverandre og tiltak vurderes for å ”presse” hendelsene nedover og til venstre i matrisen.

Konsekvens Sannsynlighet	Lettere skadd	Hardt skadd	Drept	Flere drepte
Ofte				
Relativt sjelden		Uh 1		
Sjelden		Uh 2	Uh 3	
Svært sjelden			Uh 4	

Bruksområder: Analyseteknikken er meget anvendelig i tidlig planfase, hvor det er viktig å identifisere fare- og ulykkeshendelser på et grovt nivå. Analysen fungerer da som en første tilnærming til risikoanalyse. Grovanalysen benyttes også som totalrisikoanalyse. Analysen blir ofte brukt som grunnlag for dimensjonering og valg mellom løsningsalternativer.

Faren med denne type analyser er at de kan bli grove og overflatiske, slik at analysen i liten grad tilfører ny kunnskap. Anslagene av sannsynligheter kan i liten grad være underbygget og forslagene til tiltak kan oppfattes å være tilfeldig eller basert på analytikernes forutbestemte meninger.

Analysemetoden er enkel, og den behøver ikke å være tid- og ressurskrevende.

Feiltre- og hendelsestreanalyse

Feiltre- og hendelsestreanalyse (Aven 1998), er teknikkene som krever at de logiske sammenhengene mellom risikofaktorer (indikatorer) må gjennomtenkes og illustreres. Det gir muligheter for å detaljere analysen på en helt annen måte enn de direkte vurderingene som ofte blir gjort i de ovennevnte teknikkene. Feiltre- og hendelsestreanalyse er også redskapene som ligger til grunn for større kvantitative risikoanalyser. Statens vegvesen har en sterk kultur for å registrere og analysere data, som kan gi gode effekter i feiltre- og hendelsestreanalyser. Pålitelighetsmodeller kan avledes fra feiltre- og hendelsestreanalyser.

Feiltreanalysen er bygget opp av ”logiske porter” dvs. at hendelser er koplet sammen på ulike nivå for å forklare hvorfor ”topphendelsen” vil kunne inntreffe. Målet med å bryte topphendelsen ned er mange. For det første gir modellen kunnskap om mulige årsaksforklaringer. For det andre vil det være lettere å illustrere effekten av mulige

risikoreducerende tiltak. For det tredje vil det ofte være lettere å finne data, eller å knytte sannsynligheter til hendelser på lavere nivå. For det fjerde vil utviklingen av treet tvinge analytikeren til en grundig gjennomgang av den uønskede hendelsen og synliggjøre de viktigste bidragene til at hendelsen vil kunne inntreffe. Treet vil være godt egnet som diskusjonsgrunnlag, både med hensyn til risikovurdering, risikokommunikasjon og implementering av tiltak.

De logiske sammenhengene er:



Hendelsestreanalyse er en såkalt konsekvensanalyse, og den har som mål å illustrere ulike konsekvenser gitt ulike hendelsesforløp/betingelser i ulykkeshendelsen.

Som feiltreet er også hendelsestreet ment å illustrere kunnskap om hendelsesforløp for å etablere et diskusjonsgrunnlag om sikkerhet, mulige tiltak og barrierer i systemet.

Bruksområder: Feiltre- og hendelsestreanalyser egner seg som konsept- og totalrisikoanalyser. Teknikkene er grundige og de tvinger analytikerne til å forstå systemene til bunns. Teknikkene gir modeller som blant annet kan ta hensyn til rekkefølgen av hendelser som fører til topphendelse eller skade/tap. Metodene kan være tid- og ressurskrevende.

TUSI

TUSI 2.0 er utviklet av Transportøkonomisk Institutt (TØI) og Vegdirektoratet (VD). Modellen er basert på en ulykkesundersøkelse gjennomført av VD, samt data om hendelser i vegtunneler innhentet fra Vegtrafikksentralen (VTS). I tillegg er det benyttet data om hendelser i tunneler innhentet via VDs kontakter i PIARC.

Basert på trafikk tall og geometriske data for tunnelen beregner modellen frekvenser for kjøretøystopp, personskadeulykker og branntilløp. Modellen beregner kun frekvenser uten å angi noe om konsekvensene knyttet til de ulike hendelsene.

TUSI har sine begrensninger på utforming av tunnelen, blant annet kan den ikke analysere en tunnel med av- og påkjøringsramper, eller løp med forskjellig ÅDT samtidig. Dette er løst rent modellteknisk med å dele opp tunnelene i segmenter for hver del med forskjellig ÅDT. TUSI skal brukes i alle vegtunneler lengre enn 500 m. Det skal vurderes om modellen bør brukes i høytrafikk tunneler (dvs ÅDT over 10 000) selv om de er kortere enn 500m.

GRAM

GRAM (Quantitative Risk Assessment Model) beregner risiko forbundet med transport av farlig gods gjennom vegtunneler, og er et resultat av et samarbeid mellom OECD og PIARC. Modellen beregner sannsynlighet og konsekvens ved i alt tretten ulike scenarier med uhell i kjøretøy som frakter farlig gods eller er særlig brennbare.

I Norge er det en viss skepsis til programmet og det vil bli gjort tester før programmet eventuelt vil bli tatt i bruk.

F Oversikt over simuleringsverktøy for brann og eksplosjon i tunnel

Det er utviklet ulike simuleringsverktøy for å få oversikt over konsekvenser som følge av uønskede hendelser i en vegg-tunnel. Dette vedlegget gir en oversikt og vurdering av ulike simuleringsverktøy som fins på markedet. Grunnlaget er ulike beregningsmodeller for å simulere hendelsesforløp, brannforløp, ventilasjon, eksplosjon og evakuering. Nedenfor gis en kort introduksjon til ulike modelltyper. FIT databasene: www.fit.com gir mer utdypende informasjon om ulike modeller.

Håndberegningmodeller

Håndberegningmodeller for beregning av branner i tunnel har eksistert men i liten grad vært benyttet. Redningsverket i Sverige har nylig publisert en håndbok (Redningsverket 2002) der beregningsverktøy fra USA (NFPA 2002) er satt sammen for å gjøre fullstendige konsekvensberegninger. Verktøyet kan enkelt settes opp i regneark. Fordeler med metoden er at det kan spares tid, flere kan få tilgang til beregningsprosessen, flere kan bruke verktøyet og det vil være kostbesparende. Denne typen beregninger vil gi gode kunnskaper om tunnelen og de hendelser og hendelsesforløp som vil kunne forekomme. Forutsetningen er hele tiden at brannen som analyseres er entydig definert. Maks energiproduksjon inngår som vurderingsparameter.

Bruksområder:

Modellen vil kunne brukes på eksisterende og nye tunneler. Metodens begrensning ligger i helling eller beregning av lufthastighet. Metoden vil kunne gi god kunnskap om utvalgte branners forløp i tunnelen. Modellen tar ikke høyde for eventuelle vannspray-systemer, men dette kan innarbeides i brannscenariet.

Der kan ikke beregnes spredning av gass-skyer eller trykkbølger/BLEVE. Men det finnes andre fluiddynamiske modeller der spredning i rør kan beregnes. I litteraturen finnes også håndmodeller for beregning av eksplosjonstrykk, skadegrad på personer med mer. For beregninger av nødvendig ventilasjonstrykk benyttes enkle Bernoulli ligninger.

Zone modeller/sannsynlighetsmodeller

Sone modeller baseres på at et rom (tunnel) deles i et øvre varmt røyklag som beveger seg bort fra brannen og et nedre kaldt luftlag som beveger seg inn mot brannen. I en tunnel kan flere varianter av dette oppstå hvis problemet studeres med og uten ventilasjon. Uten ventilasjon og helning vil røyken fra en brann eller gassen fra en gasslekkasje spre seg likt i begge retninger med et varmt øvre røyklag og kaldt nedre luftlag hvis det brenner mens gass spredning vil avhenge av om det er tung eller lett gass (propan eller metan). Med ventilasjon vil alt skyves bort fra brannen i en retning. Da skapes et røyksjikt nær brannen som holder seg oppe under taket inntil det oppstår turbulens eller at røyken spres over hele tunnelverrsnittet på grunn av viftens skyveprofil.

CFD Modeller

Modellene er egnet til å studere brannutvikling og røykspredning i tunneler. Tunnelen deles inn i små celler (grid), hvor ligninger fra fluid og termodynamikken løses ved hjelp av ”finite element” eller ”finite volume” metoden. Resultater fås for hver celle. Dette er modeller som gir rimelig gode resultater og som er sammenlignbare med forsøk som er utført. Fordelene er at brannutvikling kan studeres nær brannstedet og at tunnelen kan modelleres med nøyaktighet.

Sammenstilling og evaluering av beregningsverktøy

I tabell F.2 er det angitt noen modeller som kan benyttes for branntekniske beregninger i tunneler. Modellene har sine styrker å svakheter. Oversikter over slike modeller kan også finnes på www.etfit.net. En enkel rangering av de ulike vurderingspunktene er presentert i tabell F.1.

Tabell F.1. Evalueringsstørrelser benyttet for å vurdere simuleringsprogram

Dimensjon	Gradering	Beskrivelse
Presisjon	<i>Lav</i>	Empirisk håndmodell, modellering av ”verden” vanskelig, må gjøre grove tilpasninger
	<i>Middels</i>	Empiriske modeller og erfaringsdata ligger til grunn for beregninger, ”verden” kan til en viss grad modelleres, men må gjøre grove tilpasninger. Typisk 2 -sone modeller
	<i>Høy</i>	CFD modeller, der ”verden” kan beskrives med nøyaktighet
Bruk		Beskrivelse av hva programmet kan brukes til
Brukergrensesnitt	<i>Lav</i>	Enkelt å legge inn verdier og lett å få ut data. Lite forkunnskap trengs.
	<i>Høy</i>	Vanskelig modellering. Store forkunnskaper behøves.
Etterbehandling	<i>Enkel</i>	Enkle data som kan plottes
	<i>Avansert</i>	Data kan visualiseres i 3D/2D og kurver kan plottes
Tidsbruk/kostnad	<i>Lav</i>	Det tar få minutter å legge inn data og beregningene er ferdige på sekunder
	<i>Middels</i>	Opp til et døgn
	<i>Høy</i>	Flere døgn
Verifisering	<i>Lav</i>	Lite brukt i forskning, få eksempler, lite brukt i industrien, nyutviklet
	<i>Middels</i>	Har gjennomgått forskningsbasert testing og eksempler på bruk finnes
	<i>Høy</i>	Anerkjent og benyttet i forskningsmiljøer, flere vitenskaplige publikasjoner og verktøyet brukes av industrien.

Tabell F2: Tabellen viser en oversikt over ulike beregnings modeller som kan nyttes ved tunnelbrann.

Simulerings- verktøy	Størrelser som blir analysert	VURDERING					
		Presisjon	Bruk	Bruker- grensesnitt	Etterbehandling	Tidsbruk /Kostnad	Verifisering
CERBERUS Herriott Watt University Edinburgh, Scotland	Modellen angir endringer i energiproduksjon pga. lufthastighet, tunnelverrsnitt. En fysisk modell som angir usikkerhet for spredning basert på biltetthet og energiproduksjon.	Lav	Justering av energi- produksjon før input i analyse- verktøy.	Lav	Energiproduksjon presenteres som energi/tid kurve.	Lav	Lav
CRISP Building Research Establishment, UK	Brann- og røykspredning, toksi - kologi, evakuering, deteksjon og slokking. Håndterer helling.	Middels	Konsekvens- beregninger i tunnel	Høy	Data-analysator og visualiserings- verktøy under utvikling.	Kun til internt bruk	Høy
New Vendis INERIS - Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Frankrike	Brann- og røykspredning, ventilasjon og luftbevegelse, toksikologi. Termisk respons i strukturer	Lav	Modellen er spesielt utviklet for å studere tunneler. Er en del av UPTUN prosjektet	Lav	Visualiserings- verktøy i programmet	Lav til høy	Høy

EXODUS Prof Ed Galea FSEG University of Greenwich , UK	Evakuering, toksikologiske virkninger, gruppereaksjoner. Empiriske ligninger og erfaringsdata.	Høy	Brukes til å studere evakuering fra store komplekse konstruksjoner. Kommuniserer med Smartfire, og C-fast	Lav	Avansert	Middels/Lav	Høy
VETI Pedro Soria ITSEMAP Madrid Spania	Toksikologisk påvirkning, evakuering/rømming. Baseres på tid/temperaturkurver fra CFX-5 CFD modell	Lav	Spesielt utviklet for tunnelbranner og rømming.	Høy	Enkel	Lav	Høy
FASIT University of Leeds and ARUP (UK)	Brann- og røykspredning, ventilasjon og luftbevegelse, toksikologi. Termisk respons i strukturer.	Middels	Spesielt utviklet for tunnelbrann	NA	NA	Lav	Høy
Camatt Cetu / SETEC TPI JF Burkhart, Cetu, Frankrike	Røykspredning, ventilasjon og luftbevegelse, toksikologi.	Lav	Benyttet til å studere ventilasjons strategi ved brann i tunneler	Lav	Enkel	Lav/Lav	-
JASMINE Building Research Establishment, UK	Brann- og røykspredning, ventilasjon og luftbevegelse, toksikologi.	Høy	Beregne brannforløp	Høyt	Avansert Grafikkpakke følger med.	Høy	Høy

VESTA A. Lemaire TNO Building and Construction Research, Delft, Nederland	Brann- og røykspredning, ventilasjon og luftbevegelse.	Høy	Under utvikling	Under utvikling	Under utvikling	Under utvikling	Under utvikling
Smartfire Prof Ed Galea FSEG University of Greenwich , UK	Brann- og røykspredning, ventilasjon og luftbevegelse. Slokking og deteksjon.	Høy	Beregne brannforløp	Høy	Avansert Data kan viderebehandles, og eksporteres til Exodus for evakuerings- beregninger.	Høy/Lav	Høy
Fire Dynamics Simulator – FDS Kevin McGrattan, NIST, USA	Brann- og røykspredning, ventilasjon og luftbevegelse, temperatur og røyktetthet. Slokking og deteksjon.	Høy	Beregner brannforløp	Middels	Avansert Visualiseres i smoke view.	Høy/Gratis http://fire.nist.gov/fds/	Høy
SOLVENT Kailash Karki Massachusets Higway Departement	Brann- og røykspredning, ventilasjon og luftbevegelse. Temperatur og røyktetthet. Ventilasjonsberegninger både langsgående og tverrlufting. Hastighet og trykk.	Middels	Beregne brannforløp. Beregne ventilasjons- systemer	Middels	Avansert Bruker visualiserings- pakken Tecplot.	Middels/Lav	Høy

Kamelon FirEx II Comput IT Trondheim	Brann- og røykspredning, ventilasjon og luftbevegelse. Temperatur og røyktetthet. Ventilasjonsberegninger både langsgående og tverrlufting. Hastighet og trykk. Eksplosjoner, trykk, hastighet.	Høy	Kan brukes til all form for strømming og forbrenning. Godt egnet for tunneler. Fast stoff forbrenningsmodell er under utvikling.	Høyt	Avansert Egen visualiseringspakke.	Høy/Høy Skal kommersialiseres	Høy
Flax CMR, Bergen	Eksplosjonstrykk, forbrenningshastighet i gasskyer, temperaturer med mer.	Høy	Eksplosjoner	Høy	Avansert	Høy/Høy	Høy

G Funksjonelle krav til sikkerhet

Nedenfor er det listet et foreløpig utkast til funksjonelle krav til sikkerhet i tunnelsystemet, se også kapittel 3.1. Ansvarlig eier av tunnelprosjektet må ta stilling til hvilke funksjonelle krav som skal ivaretas gjennom planlegging, utbygging og drift av tunnelen.

*Krav til en sikker tunnel*¹³:

- **Menneskets forutsetninger** skal ligge til grunn for utforming av tunneler; vår mestringssevne i trafikken og tåleevne i en kollisjon
- Tunnelens utforming skal lede til sikker atferd gjennom å være logisk og lettlest.
- Tunnelen skal invitere til riktig fart og stimulere til årvåkenhet.
- For at tunnelen skal være sikker for alle, må de svakeste trafikantgruppens forutsetninger legges til grunn for løsningene.
- Utforming av tunnelsystemet må skape korrekte forventninger hos bilførerne ved hjelp av geometrisk utforming, oppmerking og skilting
- Tunnelens sikkerhetsnivå og fartsgrense skal være tilpasset hverandre.
- Myke og harde trafikanter skal separeres og ikke komme i konflikt.
- På steder med utilstrekkelig separasjon mellom myke og harde trafikanter, skal kjøretøyenes fart vurderes spesielt.
- På steder hvor kjøretøy kan sidekollidere skal farten ikke være høyere enn 50 km/t.
- I tunneler med stor fare for møteulykker skal farten ikke være høyere enn 70 km/t (ÅDT > 4000)
- Ta “høyde for” vanlige trafikantfeil: *Overse, misforstå, feilvurdere*
- Legge opp til riktig “aktiveringsnivå” (lav mental belastning kan gi *trøtthet*, høy mental belastning kan gi ”stress”):
 - Mental belastning påvirker aktiveringsnivået
 - Best prestasjon ved midlere aktiveringsnivå
 - For lavt eller høyt nivå fører til økt risiko for feilhandlinger
 - For krevende tunnelmiljø
 - For monotont tunnelmiljø

¹³ Begrepet ”tunnel” omfatter også tunnelens vegger, tak, skilting, oppmerking osv.

H Menneskelige reaksjoner – rømming

Tunnelbrann er en hendelse som rammer uforutsigbart og uventet, og mennesker som involveres i hendelsen opplever ofte en dramatisk endring av omgivelsene, som oppfattes å true eksistensen. En tunnelbrann kan defineres som en krise eller en katastrofe, avhengig av omfang, varighet og sosiale og materielle konsekvenser som følger hendelsen. Krise er definert av Retterstøl og Weisæth (1985) som en «*kort periode av psykologisk ulikevekt hos en person som blir konfrontert med vanskelige forhold. Disse er for vedkommende et viktig problem, men han er på det aktuelle tidspunkt verken i stand til å løse dem ved hjelp av sine vanlige problemløsende krefter eller til å flykte fra dem*». Dyregrov (1999) definerer katastrofe som «*en større ulykke som inntreffer plutselig og uventet, og som ligger utenfor vår kontroll, og som leder til store menneskelige lidelser og materielle skader*». Disse to begrepene ligger nært opp mot hverandre. Felles for mennesker som eksponeres for kriser og katastrofer er at de utsettes for betydelige personlige psykiske og fysiske belastninger.

De fysiske belastningene ved tunnelbranner vil ofte være mer fremtredende sammenlignet med de psykiske belastningene; mye på grunn av at de er observerbare og lettere å kartlegge. De psykiske reaksjonene vil være mer diffuse og vanskeligere å få oversikt over, samtidig som de i mange tilfeller ikke er umiddelbart tilgjengelige ved at mange vil reagere på hendelsen i lang tid etter den inntraff. Alvorlighetsgraden og varigheten av de psykiske reaksjonene er individuelle, men grovt kan reaksjonene deles inn i tre kategorier (WHO 1992): *umiddelbare psykiske reaksjoner* som akutt belastningslidelse, *forbigående psykiske reaksjoner* som tilpasningsforstyrrelser og *vedvarende og mer alvorlige psykiske ettervirkninger* på den traumatiske hendelsen, for eksempel i form av post-traumatisk stressreaksjoner. Denne generelle inndelingen er i tråd med det diagnostiske klassifikasjonssystemet, *International Classification of Diseases*, ICD-10 for psykiske lidelser.

Psykiske reaksjoner

De fysiske påkjenningene ved en tunnelbrann, i form av varme og røykgasser, oppleves skremmende for de involverte, samtidig som at pusteproblemer og dårlig sikt forsterker følelsen av manglende kontroll og oversikt i situasjonen. Menneskets atferd i slike hendelser vil i stor grad avhenge av de individuelle psykiske reaksjonene. Innenfor psykologien forklares reaksjonene ut fra *kognitive, biologiske* og *emosjonelle* faktorer.

Kognitive faktorer

Mennesket bearbeider til enhver tid informasjon fra omgivelsene, også i krise- og katastrofesituasjoner. Mye tyder på at kvaliteten i informasjonsbearbeidningen endres under slike hendelser (Dyregrov 1999). Disse kognitive endringene kan både ha positive og negative konsekvenser. Positive konsekvenser er at endringene kan ha funksjonell (adaptiv) verdi eller overlevelsesverdi. Dette illustreres blant annet gjennom ved at informasjonsbearbeidingskapasiteten øker kraftig i krise- og katastrofesituasjoner, som ofte forklares med endret tidsopplevelse for hendelsen. Det vil si at en tidssekvens på få

sekunder kan oppleves som flere minutter, og i ekstreme tilfeller som en evighet. Mennesker som har vært utsatt for nær-døden opplevelser beskriver ofte sekundene før hendelsen som at "livet passerte i revy" (Yalom 1998). Dette understreker hjernens evne til å bearbeide store mengder informasjon i løpet av kort tid, slik at tidsopplevelsen blir "lurt". Negative følger er at mennesker i krise opplever angst og sterke følelser enda sterkere. For eksempel ble redningsmannskaper, som rykket ut til brannstedet i forbindelse med diskotekbrannen i Göteborg i 1999 (63 omkomne), fysisk og verbalt angrepet av mennesker på stedet. Årsaken var at menneskene syntes mannskapene tok altfor lang tid før de kom frem. Tidsopplevelsen kan også virke motsatt, ved at en føler at tiden renner bort. Slik tidsopplevelse er spesielt vanlig blant ledere som må ta viktige avgjørelser under tidspress (Dyregrov 1999). Endring i informasjonsbearbeidingen kan også føre til at mennesket utvikler en underreaksjon på hendelsen, ved at alvoret ikke oppfattes og at det utvikles en avstand/uvirkelighetsfølelse i forhold til situasjonen. På den andre siden forekommer også overreaksjon ved at mennesket opplever sterke følelser og blir ekstremt handlingsrettet.

En annen kognitiv faktor er skjerpet/innsnevret sansing og fokusert oppmerksomhet. Fenomenet kalles "tunnelsyn" og vil si at oppmerksomheten rettes mot noe spesielt i situasjonen. Tunnelsyn kan i mange tilfeller være hensiktsmessig, forutsatt at fokuset rettes mot relevant informasjon samtidig som unyttig og overflødig informasjon ekskluderes. Det negative er følgelig i tilfeller hvor tunnelsynet medfører fokus på irrelevante elementer og hvor individet stivner og er ute av stand til å reagere etter hvert som situasjonen endrer seg. I ekstreme tilfeller kan sansingen blokkeres helt. Slike situasjoner kjennetegnes ved at individet er sterkt truet og overveldet av faren i en følelse av hjelpeløshet. Skjerpet sansing kan også lede til såkalt "superhukommelse", der deler av situasjonen og inntrykkene huskes i lang tid etter hendelsen. Minnene er ofte meget detaljerte og livaktige. Mange uttaler at de husker hendelsen "som om den var i går". Slike minner kan ha overføringsverdi i den forstand at hjernen har tilgang til informasjon (erfaring) som kan være hensiktsmessig om lignende farer skulle opptre.

Biologiske faktorer

Biologiske faktorer representerer fysiologiske reaksjoner som utløses av det autonome nervesystemet. Denne delen av nervesystemet har stor betydning for hvordan mennesker reagerer i krise- og katastrofesituasjoner. Mennesker som opplever fare vil ofte bli stimulert til å handle, blant annet gjennom økt omsetning av glukose i leveren og økt utskillelse av nevrontransmittere i hjernen. De vil ofte også oppleve en umiddelbar mobilisering av energi (*fight-or-flight*). Andre biologiske reaksjoner kan være pulsøkning, svette, skjelving, frysninger, hjertebank, økt hjertefrekvens og økt fysisk styrke. Økt handlingsevne er innprentet i mennesket ved fare, ofte med referanse til Darwins teori om "*survival of the fittest*". Det vises for øvrig til (Bernstein m.fl. 1997; Ursin og Zahl-Begnum 1993).

Emosjonelle faktorer

Menneskets følelser påvirkes i krise- og katastrofesituasjoner, i form av frykt, angst, redsel, sjokk og panikk på den ene siden, og apati, lammelser, hjelpeløshet og håpløshet på den andre siden (Dyregrov 1999). Hvilke følelsesmessige reaksjoner som aktiveres vil avhenge av personlighet, individets subjektive mestringsforventning - tro på egen mestringssevne (Bandura 1997), kvaliteten på individets psykiske forsvarsmekanismer (Bernstein m.fl. 1997), samt kunnskap og erfaring fra lignende situasjoner. Mennesker søker ubevisst positive følelser og prøver å unngå negative følelser. Dette kan føre til at mennesket undervurderer fare.

Sjokk vil for mange være en viktig umiddelbar reaksjon for mennesker som opplever en tunnelbrann, fordi hendelsen inntreffer uten forvarsel. Individet utsettes for voldsomme påkjenninger uten å ha fått mulighet til å mobilisere sitt psykologiske forsvar. Sjokkreaksjonen er en hensiktsmessig og viktig reaksjon som hjelper individet å møte fare (Dyregrov 1999). Denne reaksjonen kan også sees på som en alarmreaksjon på potensielle farer og trusler (Selye 1978). Sjokk fører ofte til mobilisering av mentale ressurser for å håndtere den ytre trusselen. En variant av sjokkreaksjoner kalles *uunngåelig sjokk (inescapable shock)*, som inntreffer når det forligger få handlingsalternativ for å unngå faren som har oppstått. Denne type sjokk leder ofte til reaksjoner i form av apati og hjelpeløshet (Bernstein m.fl. 1997). Personer i sjokk vil sjelden bære synlige preg av økt aktivitet eller uro, og i ettertid uttale de ofte at de "ikke følte noe". Dette forklares ved at menneskets psykiske forsvarsmekanismer aktiveres. Det psykiske forsvaret er mekanismene som beskytter individet mot ubehaglig, skremmende og uønsket informasjon. Et robust og rigid psykisk forsvar vil i mange krise- eller katastrofesituasjoner være lite hensiktsmessig, fordi det stenger ute fryktfølelser. Alvoret i situasjonen kan da bli neglisjert eller ikke oppfattet i tilstrekkelig grad.

Atferd

Brann som oppstår i et kjøretøy under fart oppdages ikke lett av personer i kjøretøyet. Brannen får derfor ofte tid til å utvikle seg til en farlig størrelse før den blir oppdaget. Erfaringene hittil viser likevel at trafikantene oftest forsøker å slukke umiddelbart, når de oppdager et branntilløp. Dersom ikke dette lykkes, varsler de brannen. Nødtelefoner og håndsløkkere i tunneler er derfor viktige hjelpemiddel for å redusere sannsynlighet for at en brann skal utvikle seg. Vegdirektoratet (Amundsen, Raner og Engebretsen 1997/2001) har dokumentert at 11 av 29 registrerte branner ble slukket med håndsløkkere av trafikanter, og det er grunn til å tro at raten er høyere, fordi slike hendelser ikke blir rapportert i like stor grad som hendelser som har fått utviklet seg. Beredskapstrening hos førere, spesielt yrkessjåfører, kan være et vesentlig tiltak for å redusere sannsynlighet for brann i tunge kjøretøy.

I kriser og katastrofer vil mennesket oppleve en situasjon preget av tidsnød og begrenset informasjon samtidig som det oppstår et fravær av kontroll, mening og trygghet. Dette gjør at menneskets evner og egenskaper aktiveres for å søke informasjon som kan gi ny mening og trygghet i situasjonen. Mennesket blir stimulert til å iverksette en atferd som i stor grad påvirkes av de psykiske reaksjonene. Reaksjonsmønsteret vil variere

individuet. Atferden kan følgelig innta mange ulike former når en slik hendelse inntreffer.

Det er mye som tyder på at mennesket hele tiden vil tolke omgivelsene aktivt og prøve å finne sammenhenger. Det gjelder også i kriser og katastrofer. Tolkningene eller vurderingene danner grunnlaget for menneskets vurdering av risiko i situasjonen. Misoppfattelse av situasjonene vil kunne føre til under- eller overreaksjoner. Tolkningene har avgjørende betydning på atferden, og i mange tilfeller vil den være svært målrettet. Dette henger sammen med at mennesket har et formål med å befinne seg på det aktuelle stedet, og det styrer atferden (Canter, Donald og Clark 1992). Atferden karakteriseres ofte som *respons perseverasjon*, som betyr at mennesket fortsetter å utføre opprinnelig valgte handling uavhengig om nye handlingsalternativ fremstår som gunstigere etter hvert som situasjonen endrer seg (Retterstøl og Weisæth 1985). Dette kan for eksempel komme til uttrykk ved at et menneske kjører videre i en tunnel etter å ha møtt/observert uvanlige mengder røyk inne i tunnelen.

Begrenset informasjon vil forsterke atferd av typen respons perseverasjon, fordi mennesker gir egne fortolkninger av årsak og virkning til farer, hvor emosjonelle og kognitive faktorer påvirker vurderingene. Sosiale faktorer har også stor betydning for atferd i krise- og katastrofesituasjoner. Mennesket ser på andres atferd som viktig informasjonskilde, og handler ofte i tråd med andres atferd. Spesielt tillegges atferden til personer med opplevd autoritet som retningsgivende. Autoritet kan baseres på personens rolle forut for selve hendelsen (f.eks. bussjåfør), myndighet, antrekk (f.eks. uniform) eller oppførsel (f.eks. en med erfaring). Mennesker med tilhørighet til hverandre (familie, venner, m.v.) vil holde sammen, og derfor også handle ut fra hverandres atferd (Dyregrov 1999). Mennesker som blir skilt fra sine nærmeste vil lettere utvise irrasjonell atferd, ofte med stor fare for sitt og andres liv, for å gjenforenes. Eksempel på dette er foreldre som går inn i brennende hus for å redde barna. Når det gjelder barns atferd vil den i stor grad bestemmes av hvordan voksne reagerer og ivaretar barnas behov. Atferd i kriser og katastrofer kan grovt inndeles i tre handlingsmønstre: *bekjempe faren*, *flykte fra faren* og *apati*.

De to førstnevnte handlingsmønstrene forutsetter at individet er bevisst sine valg, men at de nødvendigvis ikke blir hensiktsmessig utført. Bakgrunnen for det ligger i individets erfaring og kompetanse, i tillegg til individets psykologiske forsvar. Apati innebærer at individets atferd preges av liten bevegelse og formålsløshet. Ellers kjennetegnes slike situasjoner av håpløshet, og at individet føler seg hjelpeløs. Panikk er det motsatte og kjennetegnes ved ukontrollert flukt fra faren, uten at selve flukten har noe mål eller fornuft. Det er ikke uvanlig at individ som opplever panikk løper mot selve faren, eller utfører andre handlinger som er irrasjonelle og farlige for seg selv eller andre. Individ som har opplevd panikk beskriver ofte i ettertid at de husker svært lite av hendelsen ("alt ble svart"). Panikk er en sjelden reaksjonsmåte, og inntreffer sjeldnere blant personer med erfaring og trening fra lignende hendelser (Retterstøl og Weisæth 1985).

Rømming

Det er gjennomført noen forsøk og undersøkelser på hvordan mennesker oppfører seg i tunnelbrann. Det er gjennomført fullskalaforsøk i Nederland, i Benelux tunnelen (Daas 2002) før tunnelen ble åpnet for trafikk. Personene som var med i forsøkene var utelukkende menn over 20 år. Her ble det blant annet funnet ut at omtrent 25 % evakuerte tunnelen via kjørebanelene, mens resten brukte nødutgangene som tunnelen var utstyrt med. Når personene fikk beskjed å evakuere via nødutgangene brukte kun 5 % kjørebanelen som evakueringsmåte. Det kan tyde på at informasjon i evakuerings-situasjoner er meget effektivt, og i mange tilfeller nødvendig for å sikre ønsket atferd. Enkelte av forsøkene viste også at det tok lang tid før evakueringen startet, men når et fåtall av personene startet evakuering fulgte flertallet etter. Det ble også gjennomført forsøk hvor effekten av lyd ble testet. Det ble montert lydsignaler ved nødutgangene, der første gruppe fikk beskjed om lydsignalene kunne være til hjelp for å orientere seg, mens andre gruppe fikk beskjed om at det var montert lydsignal ved nødutgangene. Det ble ikke merket noe effekt på første gruppe, men på andre var effekten meget god. Dette tyder på at presis informasjon er effektivt i slike situasjoner.

Statens vegvesen (2002) har gjort en undersøkelse på hvordan mennesker vil reagere dersom de fikk rødt lys når de kjørte inn i en tunnel. De fant ut at 80 % ville snu og kjøre ut samme vei som de kom inn. Mellom 4-14 % ville stanset og ventet. Forsøkene fra Nederland (Daas 2002) viste også tendens til at flere ventet med å evakuere helt til røyken var tett opptil bilen. For erfaringsdata knyttet til konkrete hendelser, kfr. Vedlegg A.

Når en brann har startet, vil personsikkerheten i de aller fleste tilfeller måtte bygge på at trafikanter med egen hjelp evakuerer til fots eller med bil. Den korte tiden som er til disposisjon før forholdene for mennesker blir kritiske, gjør at en ekstern innsatsstyrke bare vil kunne bidra til rømming i tunneler som ligger slik til at forspenningstiden er svært kort. En innsatsstyrke vil derimot kunne være viktig for å redde skadde personer som er brakt ut av tunnelen eller inn i en sidetunnel. Erfaringer fra store branner i enløpstunneler viser at innsatsstyrker har møtt så alvorlige vansker med å ta seg frem til brannen at mulighetene for effektiv slokking var beskjeden. I toløpstunneler med kort avstand mellom forbindelsene, kan innsatsstyrken spille en betydelig rolle for å slokke brannen og på den måten begrense skadene på tunnelen.

Noen av de viktigste størrelsene knyttet til dimensjonering av tunnelen sikkerhetssystemer basert på menneskers reaksjoner er (se også funksjonskravene i kap. 2.2 og vedlegg G):

Tidspunkt for oppdagelse av brann (deteksjon).

Tiden som medgår til varsling og varslingsmetode.

Mobilisering og menneskelige reaksjoner.

Tid til evakuering, herunder ganghastigheter og faktorer som påvirker rømming. Veiledning til byggeforskriftene snakker om tilgjengelig rømningstid og nødvendig rømningstid. Målet er da at den tilgjengelige rømningstiden skal være større enn

nødvendig rømningstid, som er tiden fra brannen starter til menneskets tålegrenser er nådd.

For alle størrelsene beskrevet ovenfor finnes ulike internasjonale veiledninger, håndbøker, erfaringsdata, tabeller m.m som kan benyttes til å anslå eller beregne størrelsene. Valg av modeller og anslag representerer analytikerens vurdering av størrelser, og disse er beheftet med usikkerhet. Usikkerhet beskrives med sannsynligheter, og dersom usikkerhet neglisjeres bør det gis en kort begrunnelse.

I Klasser med hensyn til farlig gods (ADR)

Dette vedlegget oppsummerer klasseinndelingen som er nedfelt i regelverket for transport av farlig gods. Videre blir hver klasse kommentert i forhold til faregrupper og innhold.

Farlig gods er en fellesbetegnelse på kjemikalier, stoffer, stoffblandinger, produkter, artikler og gjenstander, som har slike egenskaper at de representerer en fare for mennesker, materielle verdier og miljøet ved et akutt uhell. Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap har ansvaret for forskrift om landtransport av farlig gods på veg og jernbane. Forskriften definerer hvilke kjemikalier som er å regne som farlige og integrerer ADR/RID 2003 (DSB 2002) som en del av forskriften. ADR-avtalen (Den europeiske avtale om internasjonal vegtransport av farlig gods) ble opprettet 30. september 1957. Norge tiltrådte avtalen i 1976. Avtalen danner det folkerettslige grunnlaget for felles bestemmelser om vegtransport av farlig gods, og selve bestemmelsene foreligger som vedlegg til avtalen. Bestemmelsene i ADR er i det vesentlige sammenfallende med det internasjonale reglement for transport av farlig gods med jernbane (RID). FNs ekspertkomité har utarbeidet kriterier som ligger til grunn for klassifiseringen og delt kjemikaliene inn i 13 forskjellige fareklasser. Hver klasse har sin fareseddel som skal synliggjøre farene ved kjemikaliet.

Tabell I1: Oversikt over fareklasser og tilhørende underkategorier

Klasse	Beskrivelse	Underkategorier eller faregrupper
Klasse 1	Eksplosive stoffer og gjenstander	Fare for masseeksplisjon; Fare for utkast; Brannrisiko med betydelig strålingsvarme, og mindre sprengningsfare/fare for utkast; Ubetydelig eksplosjonsrisiko-lokal virkning; Ufølsomme stoffer som kan medføre masseeksplisjon; Ekstremt ufølsomme stoffer uten fare for massedetonasjon.
Klasse 2	Gasser	Kvelende; Oksiderende; Brennbare; Giftige; Giftige, brennbare; Giftige, etsende; Giftige oksiderende; Giftige, brennbare, etsende, Giftige, oksiderende, etsende.
Klasse 3	Brannfarlige væsker	Brannfarlige væsker uten tilleggsrisiko; Brannfarlige væsker, giftige; Brannfarlige væsker, etsende; Flytende, desensiterte eksplosiver.
Klasse 4.1	Brannfarlige faste stoffer	Brannfarlige stoffer, uten tilleggsrisiko; Brannfarlige faste stoffer, oksiderende; Brannfarlige faste stoffer, giftige; Brannfarlige faste stoffer, etsende; Desensiterte eksplosiver;
Klasse 4.2	Selvantennende stoffer	Selvantennende stoffer, uten tilleggsrisiko; Selvantennende stoffer som avgir brennbare gasser i kontakt med vann; Selvantennende stoffer, oksiderende; Selvantennende stoffer, giftige; Selvantennende stoffer, etsende.

Klasse 4.3	Stoffer som avgir brennbare gasser ved kontakt med vann	Stoffer som reagerer med vann slik at det utvikles brennbare gasser, uten tilleggsrisiko, samt gjenstander som inneholder slike; Væsker som reagerer med vann slik at det utvikles brennbare gasser, brennbare; Faste stoffer som reagerer med vann slik at det utvikles brennbare gasser, brennbare; Stoffer som reagerer med vann slik at det utvikles brennbare gasser, selvopphetende; Faste stoffer som reagerer med vann slik at det utvikles brennbare gasser, oksiderende; Stoffer som reagerer med vann slik at det utvikles brennbare gasser, giftige; stoffer som reagerer med vann slik at det utvikles brennbare gasser; etsende; Stoffer som reagerer med vann slik at det utvikles brennbare gasser, brannfarlige, etsende.
Klasse 5.1	Oksiderende stoffer	Oksiderende stoffer uten tilleggsrisiko eller gjenstander som inneholder slike stoffer; Oksiderende faste stoffer, brannfarlige; Oksiderende faste stoffer, selvantennelige; Oksiderende faste stoffer som utvikler brennbare gasser i kontakt med vann; Oksiderende stoffer, giftige; Oksiderende stoffer, etsende; Oksiderende stoffer, giftige, etsende.
Klasse 5.2	Organiske peroksider	Organiske peroksider som ikke krever temperaturkontroll; Organiske peroksider under temperaturkontroll.
Klasse 6.1	Giftige stoffer	Giftige stoffer uten tilleggsrisiko; Giftige stoffer, brannfarlige; Giftige stoffer, selvantennende, i fast form; Giftige stoffer som utvikler brennbare gasser i kontakt med vann; Giftige stoffer, oksiderende; Giftige stoffer, etsende; Giftige stoffer, brannfarlige, etsende.
Klasse 6.2	Infeksjonsfremmende stoffer	Infeksjonsfremmende stoffer som kan smitte mennesker; Infeksjonsfremmende stoffer som bare kan smitte dyr; Klinisk avfall; Diagnoseprøver.
Klasse 7	Radioaktivt materiale	
Klasse 8	Etsende stoffer	Etsende stoffer uten tilleggsrisiko; Gjenstander; Etsende stoffer, brannfarlige; Etsende stoffer, selvantennende; Etsende stoffer som utvikler brennbare gasser i kontakt med vann; Etsende stoffer, oksiderende; Etsende stoffer, giftige; Etsende stoffer, brannfarlige, flytende, giftige; Etsende stoffer, oksiderende, giftige.
Klasse 9	Forskjellige farlige stoffer og gjenstander	Stoffer som er helseskadelige ved innånding i støvform; Stoffer og apparater som i tilfelle brann kan danne dioksiner; stoffer som avgir brennbar damp; Litiumbatterier; Livredningsmateriell; Miljøskadelige stoffer; Oppvarmede stoffer; Andre stoffer som innebærer fare under transport og som ikke svarer til definisjonene for en annen klasse.

Eksplorative stoffer er faste eller flytende stoffer (eller stoffblandinger) som ved kjemiske reaksjoner kan utvikle gasser av slik temperatur og trykk, og så hurtig at de vil skade omgivelsene.

Pyrotekniske stoffer er stoffer eller stoffblandinger hvor hensikten er å frembringe en effekt i form av varme, lys, lyd, gass eller røk, eller en kombinasjon av disse som følge av ikke-detonerende, selvunderholdende eksoterme kjemiske reaksjoner.

En gass er et stoff som ved 50 °C har damptrykk over 300 kPa (3 bar), eller som er fullstendig i gassform ved 20 °C og standard trykk på 101,3 kPa. Klasse 2 (se tabell I1) omfatter rene gasser, gassblandinger, blandinger av en eller flere gasser med ett eller flere andre stoffer samt gjenstander som inneholder slike stoffer.

Brannfarlige væsker er væsker som har smeltepunkt eller begynnende smeltepunkt ved 20 °C eller lavere ved et trykk på 101,3 kPa, som har damptrykk ved 50 °C på høyst 300 kPa (3 bar), og som har flammepunkt på høyst 61 °C.

Brannfarlig fast stoff er stoff som har smeltepunkt eller begynnende smeltepunkt høyere enn 20 °C ved et trykk på 101,3 kPa. Det kan være lett antennelige faste stoffer og gjenstander, selvreaktive faste stoffer eller væsker, eksplosiver i fast form som er gjort ufølsomme, eller stoffer beslektet med selvreaktive stoffer.

Selvantennende stoffer er stoffer inklusive blandinger og løsninger (faste eller flytende) som selv i små mengder tar fyr innen fem minutter når de er i kontakt med luft.

Selvopphetende stoffer og gjenstander, inklusive blandinger og løsninger, kan få temperaturstigning i kontakt med luft uten tilførsel av energi. Dette er stoffer som bare tar fyr når de finnes i større mengder (kilogram) og i løpet av lang tid (timer eller dager).

Stoffer som utvikler brennbare gasser ved kontakt med vann, kan medføre at gassen sammen med luft danner eksplosive blandinger samt gjenstander som inneholder slike stoffer.

Oksiderende stoffer omfatter stoffer, som, selv om de ikke nødvendigvis er brennbare selv, er i stand til å forårsake eller bidra til forbrenning av andre materialer og gjenstander som inneholder brennbare stoffer, hovedsakelig ved å avgi oksygen.

Organiske peroksider er organiske stoffer som inneholder den bivalente -O-O-strukturen og kan betraktes som derivater av hydrogenperoksid hvor ett eller begge hydrogenatomer er erstattet av organiske radikaler. Organiske peroksider har evne til eksoterm dekomponering ved normal eller forhøyet temperatur. Dekomponeringen kan utløses av varme, kontakt med forurensninger (f.eks. syrer, tungmetallforbindelser, aminer) friksjon eller støt. Dekomponeringshastigheten øker med stigende temperatur og er avhengig av sammensetningen av det organiske peroksidet. Dekomponering kan føre til at det avgis helseskadelige, eller brennbare gasser eller damper.

Giftige stoffer omfatter stoffer som i relativt små mengder vil kunne skade menneskers helse eller medføre død. Eksponering av stoffet er definert ved at et menneske blir tilført stoffet en enkelt gang eller ved kort tids påvirkning gjennom innånding, absorpsjon gjennom huden eller svelging.

Infeksjonsfremmende stoffer er stoffer hvor det er kjent, eller hvor det er rimelig å tro, at stoffet inneholder patogener. Patogener er definert som mikroorganismer (inkludert bakterier, virus, rikkisetter, parasitter, sopp) eller rekombinante mikroorganismer (hybrid eller mutant) hvor det er kjent eller rimelig å tro at de kan forårsake smittsom sykdom hos dyr eller mennesker.

Radioaktivt materiale er alt materiale som inneholder radionuklider hvor både konsentrasjonen av aktivitet og den samlede aktivitet i forsendelsen overstiger bestemte tabellverdier, målt i forhold til A_1 , A_2 . A_1 er verdien for aktivitet i radioaktivt materiale av spesiell form som benyttes for bestemmelse av aktivitetsgrenser ved anvendelse av ADR-bestemmelsene. A_2 er verdien for aktivitet i annet radioaktivt materiale enn radioaktivt materiale av spesiell form, som benyttes for bestemmelse av aktivitetsgrenser ved anvendelse av ADR-bestemmelsene.

Etsende stoffer omfatter stoffer og gjenstander som ved kjemisk virkning angriper epitelvev - på hud eller slimhinner det kommer i kontakt med - samt stoffer som ved lekkasje kan forårsake skade på eller ødeleggelse av annet gods eller transportmidler.

Forskjellige farlige stoffer og gjenstander omfatter stoffer og gjenstander som under transport innebærer fare på en måte som ikke er dekket av andre klasser.

Hovedaktørene med et definert ansvar i ADR/RID-forskriften er *avsender*, *transportør* og *mottaker*. Disse har et spesielt ansvar om å etterfølge detaljkravene i forskriften i forhold til det farlige godset som skal emballeres og transporteres. Forskriften krever at det skal være godkjente sikkerhetsrådgivere i virksomhetene som skal ivareta hensyn til sikkerhet i forbindelse med alle forhold knyttet til kjøretøy, last og at føreren tilfredsstiller kravene i forbindelse med transporten av farlig gods på norske veier.

Statens vegvesen utfører sammen med politiet kontroller av godstransporten langs vegnettet. I forbindelse med risikoanalyser for tunneler er registreringer både mhp avvik fra transportbestemmelsene og eventuelle registreringer av type stoffer og mengder som transporteres av viktig betydning. Gjennom identifisering av faresituasjoner med farlige stoffer i tunneler er det først og fremst hendelser som innebærer at eksterne krefter vil medføre ukontrollert frigjøring av farlig gods som er av interesse. Det farlige godset kan reagere i tunnelmiljøet på en måte som skader mennesker og miljø. Gjennom risikoanalysen blir det viktig å kartlegge mulige hendelser som kan legges til grunn for dimensjoneringen av tunnelen og tunnelutrustningen.