

HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Brann i toløpstunnel med tett rushtrafikk



Bacheloroppgaven er utført ved

Høgskolen Stord/Haugesund – Studie for ingeniørfag

Brannteknikk

Av: Frida Garrod
Kristi Kråkenes Dale

Kandidatnummer: 16
Kandidatnummer: 19

Haugesund våren 2016



BACHELORPROSJEKT

Studentenes navn: Frida Garrod og Kristi Kråkenes Dale

Linje & studieretning Sikkerhet, Brannteknikk

Oppgavens tittel: *Brann i toløpstunnel med tett rushtrafikk*

Oppgavetekst:

Hver dag er det mange tusen biler som passerer gjennom Operatunnelen i Oslo. Daglig medfører den store trafikkmengden perioder med nærmest stillestående trafikk. Dersom det skulle oppstått brann i en av disse periodene, vil utfordringene være større enn hvis trafikken flyter som normalt.

I denne oppgaven skal det fokuseres på hvilke utfordringer som vil være reelle dersom det oppstår en alvorlig, men realistisk, brann i en toløpstunnel med saktegående rushtrafikk. Oppgaven vil også ta for seg hvordan en kan forsøke å håndtere disse utfordringene.

Endelig oppgave gitt: Tirsdag 1. mars 2016

Innleveringsfrist: Onsdag 4.mai 2016 kl. 12.00

Intern veileder: Stefan Owe Andersson (HSH)

Ekstern veileder: Arild Lokna (Oslo brann- og redningsetat)

Adresse ekstern veileder: Arne Garborgs plass 1
Pb 1573 Vika
0118 Oslo

Godkjent av studieansvarlig:

J. C. Lundeen

Dato:

15/4-16



Høgskolen Stord/Haugesund
Studie for ingeniørfag
Bjørnsonsgate 45
5528 HAUGESUND
Tlf. nr. 527 02 600
Faks nr. 527 02 601

Oppgavens tittel: Brann i toløpstunnel med tett rushtrafikk		Innlevert dato: 04.05.2016	Rapportnummer:
Navn: Frida Garrod og Kristi Kråkenes Dale			
Linje: Sikkerhet, Brannteknikk		Studieretning: Studie for ingeniørfag	
Gradering: Åpen	Intern veileder: Stefan Owe Andersson, HSH	Ekstern veileder: Arild Lokna, Oslo brann- og redningsetat	



Forord

Dette hovedprosjektet er utarbeidet som en avsluttende del ved vårt bachelorstudium i Brannsikkerhet ved Høgskolen Stord/Haugesund. Oppgaven dekker 20 studiepoeng, og er utført i løpet av våren 2016.

Det er per i dag gjort lite arbeid rundt tema med brann i tunnel med rushtrafikk. Derfor ønsket Oslo brann- og redningsetat at noen studenter ved HSH skulle se på utfordringer knyttet til dette. Etter å ha blitt oppmerksomme på ønsket, tok vi kontakt med etaten for videre informasjon om oppgaven. Ekstern veileder gav uttrykk for at tidligere risikoanalyser ikke dekker denne problematikken godt nok. Vi bestemte oss dermed for å utarbeide en enkel risikoanalyse hvor hovedfokuset var personsikkerhet ved brann i toløpstunnel med rushtrafikk.

For å få et bedre innblikk rundt denne utfordringen, har vi kontaktet ulike personer med relevant erfaring fra tunneler og bilbrann.

Vi ønsker å utrette et stort takk til våre veiledere til hovedprosjektet:

Arild Lokna – Ekstern veileder, Oslo brann- og redningsetat. Har bidratt med sine erfaringer og kontakter via sitt nettverk. Vi vil også takke for et innholdsrikt møte i Oslo, og særlig for turen gjennom Operatunnelen.

Stefan Owe Andersson – Intern veileder, Høgskolen Stord/Haugesund. Har hatt et stort engasjement rundt oppgaven, og kommet med gode innspill og idéer gjennom hele prosessen.

Haugesund 04.05.2016


Kristi Kråkenes Dale


Frida Garrod

Sammendrag

Målet med denne oppgaven er å se på hvilke utfordringer som vil være reelle dersom det oppstår en alvorlig, men realistisk, brann i en toløpstunnel med saktegående rushtrafikk. Oppgaven vil også ta for seg hvordan en kan forsøke å håndtere disse utfordringene. Hvor lett håndterlig utfordringene er, vil gjenspeile sikkerheten i tunnelen.

Det er hovedsakelig blitt utført et litteraturstudie for å identifisere aktuelle utfordringer. Litteraturstudiet har basert seg på innhenting av kunnskap og informasjon fra ulike tunnelbranner, ettersom det ikke har blitt gjort mye arbeid rundt brann i tunnel med rushtrafikk tidligere. Det er også gjennomført samtaler med relevante fagpersoner for å få en dypere forståelse rundt temaet.

Oslo brann- og redningsetat gav uttrykk for at tidligere risikoanalyser av Operatunnelen ikke er tilstrekkelige, ettersom det ikke er tatt hensyn til rush-problematikken som Oslo daglig opplever. Det var dermed viktig å få utarbeidet en realistisk risikoanalyse med dette som hovedfokus.

Risikoanalysen som er utarbeidet er en enkel analyse. Det konkluderes likevel med at den er realistisk, og at den gir et godt bilde av risikoen i Operatunnelen. For å få frem fokuset på rushtrafikk er det gjort noen forenklinger i analysen, disse er vurdert til å få liten betydning for resultatet. Analysen sier at sannsynligheten for at en storbrann oppstår i tunnelen er svært liten. Skulle det likevel skje, vil det kunne medføre store konsekvenser for personer.

Røyk og fremkommelighet vil være de største utfordringene dersom det oppstår brann i Operatunnelen under rushtrafikk. Mye røyk vil skape krevende rømningsforhold for trafikantene, samtidig som det vil skape vanskelige arbeidsforhold for innsatsstyrkene. Tett trafikk i tunnelen vil også skape problemer for innsatsstyrkene, både før og under slokkearbeidet.

Operatunnelen er utstyrt med alle sikkerhetstiltak som er standard i Norge, dermed konkluderes det med at sikkerhetsnivået er høyt. Tiltakene er med på å fremme varsling av trafikanter og gir gode muligheter for tidlig og effektiv evakuering. Operatunnelen er i tillegg utformet på en måte som gir brannvesenet gode innsatsmuligheter til tross for tett trafikk. Alt dette er med på å heve sikkerheten til et akseptabelt nivå.

Videre anbefales det likevel å vurdere ytterligere tiltak for å redusere risikoen. De best egnede tiltakene er sprinkler og varslingstavler.



Innhold

Forord	iii
Sammendrag	iv
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn og formål	1
1.2 Problemstilling	1
1.3 Avgrensninger	1
2 Tunneler	2
2.1 Generelt	3
2.1.1 Hvorfor bygge i tunnel	3
2.1.2 Tunnelens utvikling	3
2.2 Oppbygging og varianter	4
2.2.1 Tunnelklasser	4
2.2.2 Ettløpstunnel	5
2.2.3 Toløpstunnel	5
2.3 Sikkerhetstiltak	5
2.3.1 Vanlige tiltak i Norge	5
2.3.2 Tiltak benyttet i andre land	7
3 Brann i tunnel	8
3.1 Ventilering	9
3.1.1 Enveis ventilasjon	9
3.1.2 Toveis ventilasjon	11
3.1.3 Forhåndsbestemt ventilasjonsstrategi	11
3.2 Brannforløp	12
3.2.1 Rombrann	12
3.2.2 Tunnelbrann	13
3.2.3 Brannspredning i tunnel	15
3.3 Risikofaktorer	16
3.3.1 Statistikk i Norge	17
3.4 Rømningsforhold	18
3.4.1 Røyk	18
3.4.2 Rømningstid	19
3.5 Slokking i tunnel	20
3.5.1 Manuell slokking	20



3.5.2	Automatisk slokking	22
4	Tidligere tunnelbranner	23
4.1	Eksempel på storbranner	24
4.1.1	Mont Blanc	25
4.1.2	Tauern.....	26
4.1.3	St. Gotthard	26
4.1.4	Fréjus	28
4.1.5	Gudvanga	29
4.2	Oppsummering	30
4.2.1	Brannobjekt	30
4.2.2	Last	30
4.2.3	Ventilasjon	31
4.2.4	Innsats.....	31
5	Risikoanalyse	32
5.1	Risikoanalyse.....	33
5.1.1	Beskrivelse av analyseprosessen	33
5.2	Resultat av risikoanalysen	36
5.2.1	Presentasjon av risikoen	38
5.2.2	Risikobildet	40
6	Anbefalinger	41
6.1	Anbefalte tiltak	42
6.1.1	Sprinkler	42
6.1.2	Rampestyring	42
6.1.3	Varslingstavle.....	43
6.1.4	Toveis ventilasjon	43
7	Diskusjon	45
7.1	Risikoanalysen.....	46
7.1.1	Scenarier.....	46
7.1.2	Brannobjekt	46
7.1.3	Last	46
7.1.4	Ventilasjon	46
7.1.5	Innsats.....	47
7.2	Ventilasjon og rømning	47
7.3	Fremkommelighet og innsats.....	49



8	Konklusjon.....	51
	Referanser.....	I
	Vedlegg	IX

Tabelliste

Tabell 1: Ordforklaringer	ix
Tabell 2: En forenklet oversikt over tunnelklasser med krav tilknyttet de ulike klassene [26].	4
Tabell 3: Krav til ventilasjonshastighet for tunnelklasse F, basert på tunnellengde og brannbelastning [42].....	10
Tabell 4: Gjennomsnittlig varmeproduksjon for ulike kjøretøy [50].	15
Tabell 5: Fordeling av brannstørrelse for ulike kjøretøy [11].	15
Tabell 6: Kort oppsummering av ulike måter en brann kan spre seg på inne i en tunnel [32].	15
Tabell 7: Brannspredning er en hel prosess. Her er de ulike fasene i prosessen beskrevet [32].	16
Tabell 8: Oversikt over hvilke faktorer som vanligvis forårsaker brann i tunnel [52] [39].	17
Tabell 9: Oversikt over noen tidligere storbranner [50].	24
Tabell 10: Oversikt over hvordan vurdering av konsekvens utføres [2].	34
Tabell 11: Oversikt over inndeling av sannsynlighet [2].	34
Tabell 12: Teknisk informasjon om Operatunnelen [11].	36
Tabell 13: Identifiserte uønskede hendelser i Operatunnelen.	37
Tabell 14: Estimert omfang av hendelsen: Vogntog kolliderer med personbil ved feltskifte..	38
Tabell 15: Estimert omfang av hendelsen: Brann i vogntog som følge av varmgang i brems eller feil i motor.	39
Tabell 16: Estimert omfang av hendelsen: Brann i buss som følge av feil i motor.	39
Tabell 17: Estimert omfang av hendelsen: Kjedekollisjon mellom vogntog og personbiler. ...	39

Figurliste

Figur 1: Kart over Operatunnelen. Tunnelen er markert med rødt, og strekker seg her fra Filipstad til Ryen [96].	3
Figur 2: Viser hvor skillet mellom tunnelklasse D og E går, med hensyn til trafikkmengde og tunnellengde [26].	4
Figur 3: Eksempel på skilting av nødutganger i tunnel [87].	5
Figur 4: Eksempel på skilting av brannslukkere i tunnel [89].	5
Figur 5: Eksempel på merking av nødtelefon i tunnel [89].	6
Figur 6: Eksempel på skilting av radio i tunnel, med gjeldene radiofrekvens [90].	6
Figur 7: Demonstrasjon av prinsippet bak horisontal ventilasjon [41].	9
Figur 8: Demonstrasjon av prinsippet bak vertikal ventilasjon. De lyse pilene symboliserer frisk luft, mens de mørke pilene symboliserer forurenset luft [41].	11
Figur 9: Frisk luft inn gjennom tunnelåpning, og forurenset luft ut sjakt. De lyse pilene symboliserer frisk luft, mens de mørke pilene symboliserer forurenset luft [41].	11

Figur 10: Frisk luft inn i tunnel gjennom sjakt, og forurenset luft gjennom tunnelåpning. De lyse pilene symboliserer frisk luft, mens de mørke pilene symboliserer forurenset luft [41].	11
Figur 11: Standard fremstilling av en t^2 -brann. Dette er en typisk fremstilling som forklarer hvordan en rombrann vil utvikle seg [46].	13
Figur 12: En svært forenklet fremstilling av hvordan en kan forvente at et brannforløp i en tunnel vil være. Det er mange ulike faktorer som vil spille inn ved et slikt brannforløp, derfor vil ikke denne grafen stemme i alle tilfeller [32].	14
Figur 13: Demonstrering av hvordan brannspredning typisk vil foregå under en tunnelbrann. Hver sone kan bestå av flere kjøretøy, selv om figuren bare viser ett i hver sone [32].	16
Figur 14: Demonstrasjon av hvordan røyken vil fylle tunneltversnittet ettersom den blir avkjølt mot tunnelens tak, og det ikke er ventilasjon i tunnelen [32].	18
Figur 15: Demonstrasjon av hvordan røyken vil fylle tverrsnittet hvis det er ventilasjon i tunnelen [32].	18
Figur 16: Prinsippfigur for rømningstid. Figuren viser de ulike fasene personer opplever under rømning [56].	19
Figur 17: De grønne pilene viser angrepsveiene til innsatsstyrkene i en ettløpstunnel.	21
Figur 18: De grønne pilene viser angrepsveiene til innsatsstyrkene i en toløpstunnel.	21
Figur 19: Rester av et vogntog etter brannen i Mont Blanc i 1999 [94].	25
Figur 20: Bilde fra hvordan Tauerntunnelen så ut etter at sløkkearbeidet i 1999 var avsluttet [95].	26
Figur 21: Bilde tatt under brannen i St. Gotthard-tunnelen i 2001 [88].	27
Figur 22: Bildet er tatt fra samme sted som Figur 21. Her er samme vogntog helt utbrent [88].	27
Figur 23: Vogntoget som tok fyr i Fréjustunnelen i 2005 [87].	28
Figur 24: Det polske vogntoget var helt utbrent da brannen i Gudvangatunnelen i 2013 ble slokket [86].	29
Figur 25: Bussen som brant i Gudvangatunnelen i 2015 var også helt utbrent da brannen ble slokket [90].	30
Figur 26: Typisk utforming av en risikomatrise [2].	35

Tabell 1: Ordforklaringer

Ordforklaringer	
AID	Automatisk registrering av hendelser [1]
Akseptkriterier	Kriterier som legges til grunn for å bestemme om en risiko er akseptabel. Oftest basert på forskrifter, standarder, erfaringer og/eller teoretisk kunnskap [2]
ALARP	«As low as reasonably practicable.» Dette vil si å redusere risikoen utover de krav som er gjeldende, så lenge det er praktisk gjennomførbart [3]
Angrepsvei	Adkomstmuligheter som innsatsstyrker kan benytte for å komme frem til brannstedet [4]
Avkjøringsrampe	Forbindelse mellom veier, trafikken kommer ut fra tunnelen og kan kjøre inn på kryssende veier [5]
Beslutningstid	Tiden fra et varsel er oppfattet til det er gjort en beslutning om handling [6]
Delugeanlegg	Sprinkleranlegg der et større antall sprinklerhoder/spraydyser utløses samtidig [7]
DSB	Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap
Ettløpstunnel	En tunnel hvor begge kjøretretninger går i samme tunnellopp [8]
Forflytningstid	Tiden det tar for alle personer som oppholder seg i eller på et byggverk å komme seg til sikkert sted [9]
Fortolkningstid	Tiden en person bruker på å oppfatte hva et varsel innebærer [10]
Høytrafikk tunnel	Tunnel med trafikk over 25 000 kjøretøy per døgn [11]
Induktive sløyfer	Sensorer i veibanen som detekterer uønskede hendelser [12]

Infrarøde sensorer	Lysdetektor som er følsom for infrarøde stråler, og dermed for varme [13]
Innsatstid	Fra innsatsstyrker blir varslet, til de er klare for å starte innsats på brannstedet [14]
Påkjøringsrampe	Forbindelse mellom veier, trafikken kommer inn i tunnelen fra kryssende veier [5]
Reaksjonstid	Samlet tid for fortolkning og beslutning [15]
Risiko	Uttrykk for konsekvens og sannsynlighet for en uønsket hendelse som kan skje i fremtiden [16]
SHT	Statens havarikommisjon for transport [17]
Sikkerhetstiltak	Praktiske ting for å skape sikkerhet mot uønskede hendelser som brann. Formålet er å hindre/begrense hendelsene [18]
Sikkert sted	Et sted hvor det ikke vil oppstå kritiske og truende forhold under en situasjon [19]
Sprinkleranlegg	Automatisk, fastmontert anlegg som har til hensikt å begrense og/eller slokke en brann [20]
Toløpstunnel	Tunnel hvor kjøreretningene går i hvert sitt separate tunnellopp [8]
Tunnel	Underjordisk transportvei med ulike formål [21]. I denne oppgaven omtales veitunnel som tunnel
VTS	Vegtrafikksentralen
ÅDT	Årsdøgntrafikk, total trafikkmengde per år dividert med 365, og er summen av trafikk i begge retninger i en tunnel [22]



1 Innledning

1.1 Bakgrunn og formål

Hver dag er det mange tusen biler som passerer gjennom Operatunnelen i Oslo. Daglig medfører den store trafikkmengden perioder med nærmest stillestående trafikk. Dersom det skulle oppstått brann i en av disse periodene, vil utfordringene være større enn hvis trafikken flyter som normalt. På grunn av dette ønsket Oslo brann- og redningsetat at det en slik situasjon skulle bli sett nærmere på.

Etter et felles møte med ekstern og intern veileder ble det besluttet at en risikoanalyse ville gi best og mest realistisk bilde av en slik situasjon. Det er gjort lite arbeid rundt brann i tunnel med rushtrafikk, og det er dermed viktig å få utarbeidet en realistisk risikoanalyse med dette som hovedfokus.

Formålet med oppgaven er å identifisere ulike utfordringer knyttet til brann i toløpstunneler, som Operatunnelen. Hvor lett håndterlig disse utfordringene er, vil gjenspeile sikkerheten i tunnelen.

1.2 Problemstilling

I denne oppgaven skal det fokuseres på hvilke utfordringer som vil være reelle dersom det oppstår en alvorlig, men realistisk, brann i en toløpstunnel med saktegående rushtrafikk. Oppgaven vil også ta for seg hvordan en kan forsøke å håndtere disse utfordringene.

For å løse problemstillingen er det hovedsakelig utført et litteraturstudie. Litteraturstudiet har basert seg på innhenting av kunnskap og informasjon fra ulike hendelser med brann i tunnel. Denne metoden er benyttet ettersom en slik problemstilling er forsket lite på. Det er også blitt gjennomført samtaler med relevante fagpersoner for å få en dypere forståelse rundt temaet.

1.3 Avgrensninger

For å få frem hovedpunktene i oppgaven er det nødvendig å sette noen avgrensninger:

- Det er ikke lagt fokus på brannvesenets sløkkearbeid, med tanke på tilgjengelige ressurser i tunnel. En forutsetning for oppgaven er at kapasiteten på vannforsyningen i Operatunnelen er tilstrekkelig.
- I oppgaven vil det bli anbefalt ulike tiltak for å forbedre sikkerheten i Operatunnelen. Det er valgt å se bort ifra kostnad, da dette kan variere etter leverandør og omfang av tiltaket.
- I risikoanalysen vil fokuset ligge på personsikkerhet, da dette anses som den mest kritiske delen. Konsekvenser knyttet til miljø og materielle verdier er sett bort ifra. Det er vurdert at problemstillingen med rushtrafikk ikke har spesiell innvirkning på disse kategoriene.

2 Tunneler

Det er per dags dato i overkant av 1 100 veitunneler i Norge fordelt på riks- og fylkesveiene. Samtidig bygges det rundt 70 km ny vei i tunnel hvert år [21]. Rundt 20 av disse tunnelene befinner seg i Oslo kommune, og disse utgjør mesteparten av høytrafikk tunnelene i landet [27].

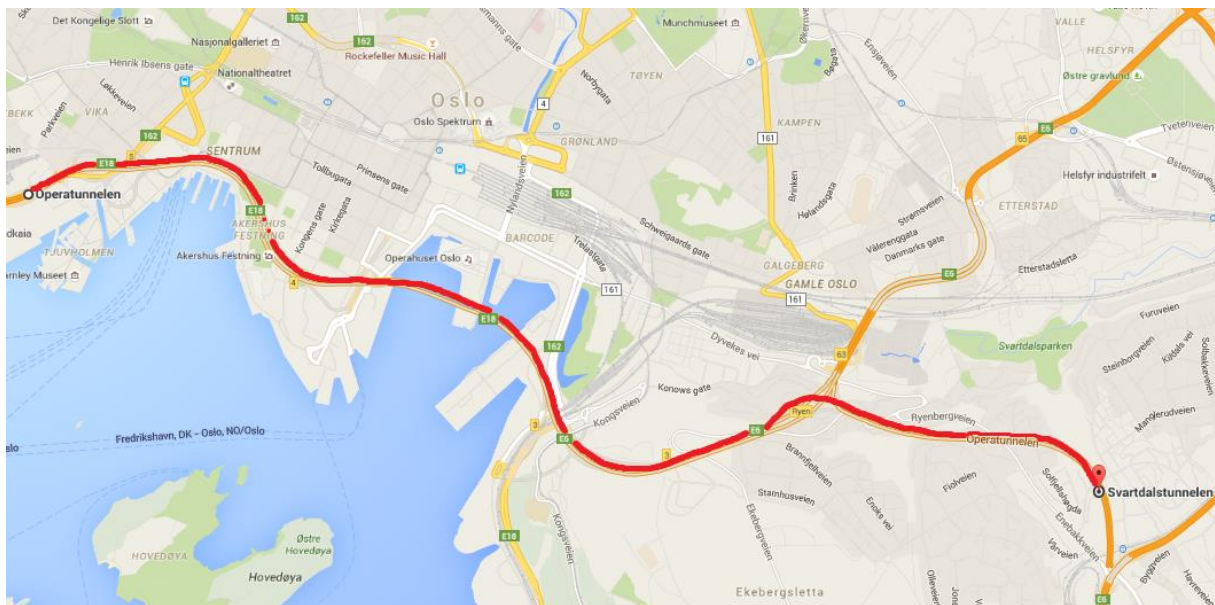
Tunnelene som bygges i Norge blir stadig lengre og større, noe som krever at sikkerheten må utvikles. Norge har en «standardpakke» med sikkerhetsutstyr for tunnel, men på grunn av utviklingen kan det bli aktuelt å se på tiltak som er tatt i bruk i andre land.

2.1 Generelt

2.1.1 Hvorfor bygge i tunnel

Helt i starten av utbyggingen av veinettet i Norge, ble tunneler brukt for å redusere bratte stigninger, hindre store omkjøringer og skape rettere veier. I dag er tunneler i større grad med på å skape muligheter for å skjule veitraseer, og hindre sjenanse i for eksempel tettbygde strøk og verne om attraktive naturområder. Tunneler er per i dag et godt alternativ for å avløse fergesamband, og samtidig gjøre kjøringen mer effektiv [21].

I store byer som i Oslo er det faktorer som at kjøringen blir mer effektiv som er dominerende, sammen med at veitraseene ikke tar stor plass i tettbygde områder, og ødelegger naturområder. Tunnelene som er en del av veinettet i Oslo i dag, strekker seg fra rundt 120 m og opp til 2 000 m [23]. Det som anses som den lengste tunnelen er Operatunnelen. Den strekker seg i hovedsak fra Filipstad i vest til Ryen i øst, men har mange stikkveier og av- og påkjøringsramper. Den er sammensatt av flere tunneler fordelt på flere løp, og har en antatt lengde på 6,6 km. Operatunnelen er en fellesbetegnelse på Festningstunnelen, Ekebergstunnelen, Svartdals-tunnelen og Bjørvikatunnelen. Motivet for å bygge disse tunnelene er å avlaste trafikken gjennom sentrumskjernen, og samtidig effektivisere trafikken på en måte som ikke er til sjenanse for sentrumslivet [24].



Figur 1: Kart over Operatunnelen. Tunnelen er markert med rødt, og strekker seg her fra Filipstad til Ryen [96].

2.1.2 Tunnelens utvikling

Det finnes utallige typer tunneler med ulike bruksformål. Tidligere har det vært tunneler i forbindelse med kraftverk som har vært dominerende i antall, men med dagens utvikling vil det i fremtiden være veitunnelene som dominerer [21]. Etter hvert som antall tunneler øker, øker også kunnskapsnivået og fokuset rundt sikkerheten i tunnelene. I 2015 startet Statens Vegvesen med tunnelutbedring, hvor gammelt utstyr blir byttet ut og ny sikkerhet bygges inn i alle tunneler som er over 500 m [25]. Tunnelene vil bli både større og lengre i fremtiden, og krever på grunn av dette at også sikkerhetsnivået øker.

2.2 Oppbygging og varianter

2.2.1 Tunnelklasser

Alle tunneler er ulike, og vil variere i både lengde, tverrsnitt og trafikkmengde. Basert på trafikkmengde og tunnellengde, inndeles tunnelene i tunnelklasser (A-F). Klassene er bestemmende for geometri og utrustning. For å kunne bestemme tunnelprofil, antall tunnellop, behov for havarinisjer, snunisjer, gangbare tverrforbindelser, nødutganger samt sikkerhetsutrustning, må en vite hvilken klasse gjeldende tunnel befinner seg i [26].

Tunnelklasse velges ut fra forventet trafikkmengden de første 20 årene tunnelen er åpen for trafikk. Det kan derfor være nødvendig å velge tunnelklasse ut fra en spesiell vurdering. En slik vurdering skal være basert på en risikoanalyse. Dette skal bli gjort hvis det forventes ujevn trafikkmengde gjennom døgnet eller året [26]. På grunn av slike faktorer kan det være stor usikkerhet rundt valg av tunnelklasse. Det er likevel gjort et forsøk på å summere opp hovedkriteriene for at en tunnel plasseres i en bestemt klasse, oversikten er presentert i Tabell 2 under.

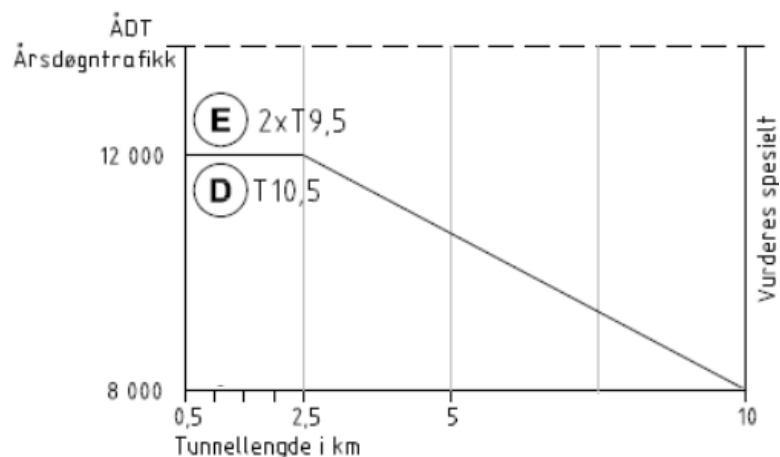
Tabell 2: En forenklet oversikt over tunnelklasser med krav tilknyttet de ulike klassene [26].

Tunnelklasse	A	B	C	D	E	F
Antall løp i tunnelen	1	1	1	1	2	2
Antall kjørefelt i hver retning	1*	1	1	2	2	3
Anbefalt kjørebredde (m)	3,5	3,25	4,0	4,0	3,5	3,5
Trafikkmengde per kjørefelt	≤ 300	≤ 2 000	≤ 4 000	≤ 3 000	≤ 12 500	> 8 000
Trafikkmengde totalt	≤ 300	≤ 4 000	≤ 8 000	≤ 12 000	≤ 50 000	> 48 000
Lengde (km)	0,5-10,0	0,5-10,0	0,5-10,0	0,5-2,5**	0,5-10,0	0,5-10,0

*Antall kjørefelt totalt i tunnelen

**Dersom lengden på tunnelen overgår 2,5 km vil den med trafikkmengde på 3 000 havne i tunnelklasse E.

Se Figur 2.



Figur 2: Viser hvor skillet mellom tunnelklasse D og E går, med hensyn til trafikkmengde og tunnellengde [26].

Eksempel på bruk av Tabell 2:

En tunnel på 7 km som har en estimert ÅDT på 6 000 per kjørefelt, havner i tunnelklasse E. Tunnelen skal derfor ha to løp og to kjørefelt i hvert løp.

En tunnel på 4 km som har estimert ÅDT på totalt 50 000, passer inn i tunnelklasse E og F. Det må derfor ligge en vurdering til grunn for valget. Tunnelen kan enten være en toløpstunnel med to kjørefelt i hvert løp, eller en toløpstunnel med tre kjørefelt.

2.2.2 Ettløpstunnel

Ettløpstunneler kan defineres som en tunnel hvor begge kjøreretningene går i samme tunnellop [8]. I ettløpstunneler varieres det fra ingen, til store betongblokker som et skille mellom kjøreretningene. I slike tunneler er risikoen for møteulykker større enn i toløpstunneler. På grunn av denne risikoen er det satt en begrensning på hvor stor trafikkmengde slike tunneler kan ha (se Tabell 2). I Norge finnes denne tunneltypen hovedsakelig på Vestlandet, på fjelloverganger og i nordligere deler av landet [27].

2.2.3 Toløpstunnel

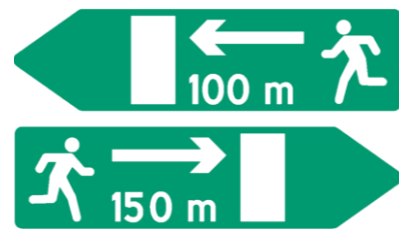
Dersom trafikkmengden i en tunnel blir stor nok, kreves det at tunnelen føres opp som en toløpstunnel. Dette er noe som hovedsakelig gjelder for tunneler med lengde over 5 km. Det som kjennetegner en toløpstunnel, er at kjøreretningene går i hvert sitt separate tunnellop [8]. Hovedformålet med en slik utforming er å minske sannsynligheten for kollisjoner med motgående trafikk, og samtidig øke personsikkerheten ved en eventuell brann. [28]. Slike tunneler er typisk for storbyer med mye trafikk, og spesielt i Oslo. Her er de fleste tunneler oppført med to løp [27].

2.3 Sikkerhetstiltak

2.3.1 Vanlige tiltak i Norge

Nødutganger

Det skal være nødutganger i tunnel for å sikre evakueringsmuligheter ved brann. Som hovedregel skal alle tunneler være utstyrt med nødutganger, men for tunneler kortere enn 10 km og ÅDT under 8 000 kan det gjøres unntak. Nødutgangene skal være plassert med jevne mellomrom i tunnelen. I toløpstunneler kan de ved behov også benyttes av innsatsstyrker under innsats [29].



Figur 3: Eksempel på skilting av nødutganger i tunnel [87].



Figur 4: Eksempel på skilting av brannslukkere i tunnel [89].

Brannslukkere

Brannslukkere i tunnel skal være et sikkerhetstiltak i tilfelle det oppstår brann. Dette gir trafikantene i tunnelen en mulighet til å prøve å bekjempe brannen på et tidlig tidspunkt. Om en brannslukker fjernes i tunnelen, skal VTS eller annen bemannet sentral, få et signal og videre tilkalle hjelp. Dette er for å sikre tidlig varsling og sørge for at innsatsstyrkene får informasjon om hvor brannen har oppstått.

Brannslukkere finnes på alle nødstasjoner. Nødstasjoner er et krav i tunnelklasse A-F [26].

Nødtelefon

Nødtelefon brukes til å varsle VTS hvis det har oppstått en uønsket hendelse. Det kan være alt fra nødstopp til bilulykke. Ved bruk av nødtelefonen vil en alarm utløses og operatøren i VTS vil kunne vite hvor meldereren befinner seg, fordi nødtelefonen aktiveres.

I følge Vegvesenet har det flere ganger blitt sendt hjelp til feil tunnel, fordi innringeren har benyttet mobiltelefon og ikke visst i hvilken tunnel man har vært. Bruk av nødtelefon i tunnel vil sørge for at VTS får korrekte opplysninger, og kan vurdere situasjonen i en tidlig fase. VTS er de eneste som kan stenge trafikken inn i tunnelen, noe som kan være nødvendig i tilfeller med brann [30].



Figur 5: Eksempel på merking av nødtelefon i tunnel [89].

Nødtelefon finnes på alle nødstasjoner. Nødstasjoner er et krav i tunnelklasse A-F [26].

Ledelys

Ledelys, eller evakueringslys, brukes for å lede trafikanter mot utgangene i en nødsituasjon. Dette gjør at det er mulig for personer å rømme ut av tunnelen til fots. Om VTS varsler en nødsituasjon, eller om en brannsløkker blir fjernet, skal ledelysene tennes automatisk [31].

Evakueringslys er et krav i tunnelklasse A-F [26].

AID

AID skal ved hjelp av videoovervåkning kunne registrere hendelser som blant annet brann og trafikkulykker i tunnel. Videoovervåkningen vil kunne vise innsatsstyrkene hvordan de best kan angripe situasjonen. Registreringen kan være basert på induktive sløyfer, bildetolkningssystemer eller infrarøde detektorer.

I tunnelklasse C, D, E og F, hvor tunnelene har en lengde på over 3 km, er videoovervåkning med AID et krav [26].



Figur 6: Eksempel på skilting av radio i tunnel, med gjeldene radiofrekvens [90].

Radio

Radiodekning i tunneler gir Statens vegvesen mulighet til å varsle trafikanter om ulike hendelser, ved å avbryte radiosendinger med egne meldinger. Dette forutsetter at trafikantene benytter seg av radioen i kjøretøyene. I tunneler hvor dette er aktuelt er det satt opp skilt som viser radiofrekvens [29].

Ventilasjon

Ventilasjonsanlegg var i utgangspunktet ikke installert i tunneler som et sikkerhetssystem. Den opprinnelige og primære funksjonen av ventilasjonsanlegg var ikke røykkontroll i tilfelle brann, men snarere et anlegg som skulle hindre forurensning og fremme miljøstyring i daglig bruk. I dag er ventilasjonsanlegg det vanligste sikkerhetssystemet som finnes i tunneler [32].

Formålet med ventilasjonsanlegg i tunnel hvor det er oppstått brann, er å styre røyken på en slik måte at personsikkerheten opprettholdes. Personer skal kunne evakuere tunnelen på en effektiv måte, uten å bli utsatt for en dødelig mengde av røyk [32].

Det finnes to ulike typer ventilasjon: horisontal og vertikal ventilasjon. Disse blir forklart i kapittel 3.1.1 på side 9.

2.3.2 Tiltak benyttet i andre land

Sprinkler

Selv om sprinkler ikke er et velkjent sikkerhetstiltak i norske tunneler, har det vært i bruk i mange år. Japan var det første landet som tok det i bruk allerede i 1963 [33]. Siden den gang har sikkerhetstiltaket blitt forsket mye på og videre utviklet. Senest i november 2015 tok Sverige dette i bruk i et av Nord-Europas største veitunnelprosjekt, Norra Länken [34].

Et sprinklersystem i tunnel baserer seg helst på delugeanlegg. Formålet med anlegget er å hindre spredning av brann, samtidig som temperaturene holdes nede. På denne måten vil brannen få redusert omfang og personsikkerheten vil øke [35].

Rampestyring

Målet med rampestyring er å forhindre kødannelse i tunneler. Dette gjøres ved å benytte ulike typer sensorer, som induktive sløyfer og infrarøde sensorer. For å hindre at trafikken stanser opp i tunnelen, er det plassert trafikklys ved påkjøringsrampene. Trafikklyset vil lyse rødt, dersom trafikk tettheten blir for høy. Hva som regnes som for høy trafikk tetthet, må vurderes for hver enkelt tunnel [36].

Studier har vist at et slikt styringssystem kan redusere ulykker med opptil 25 % [37].

Infrarødt kamera

Etter en storbrann i Mont Blanc-tunnelen i 1999, ble det innført nye sikkerhetstiltak med spesielt fokus på tyngre kjøretøy. For å entre tunnelen må alle kjøretøy passere en stasjon utstyrt med infrarøde kamera som måler temperatur i både motor og bremses. Dersom temperaturen blir registrert for høy i et kjøretøy, får det ikke entre tunnelen før temperaturen har sunket til et gitt nivå [38]. På grunn av dette tiltaket reduseres sannsynligheten for brann inne i tunnelen, ettersom varmgang i motor eller bremses er en kjent brannårsak [39].

Det kan leses mer om brannen i Mont Blanc i kapittel 4.1.1 på side 25.

Varslingstavle

Per dags dato er varslings tavler å se flere steder langs norske veier. Bruken av slike tavler er ikke utbredt i forbindelse med tunnel, men ved å plassere de med jevne mellomrom inne i en tunnel vil det være lett for trafikantene å få med seg viktige meldinger. I tillegg til å varsle, kan VTS komme med oppfordringer til trafikantene. Et eksempel kan være at dersom det har oppstått brann, får de beskjed om å forlate kjøretøyene sine. Tidligere har Danmark tatt i bruk slike tavler, men da helst for å varsle trafikantene om kø og veiarbeid i tunnelene [40].

3 Brann i tunnel

I følge statistikk presentert av Vegvesenet er det rundt 20 tunnelbranner i Norge hvert år. Det er enda ikke registrert noen sikre dødsfall som følge av tunnelbranner her i landet. Vegvesenet konkluderer med at «det er minst like trygt å kjøre i tunnel som på resten av vegnettet» [53]. Likevel vil en brann i tunnel har større farepotensiale enn en bilbrann i det fri. Dette kommer blant annet av at røyken som vanligvis oppstår ved brann, er lukket inne i tunnelen.

Dette kapittelet tar for seg hvordan ventilasjon vil påvirke brann i tunnel, og hvordan en slik brann vil kunne utvikle seg. utfordringer knyttet til rømning og redning vil også bli beskrevet.

3.1 Ventilering

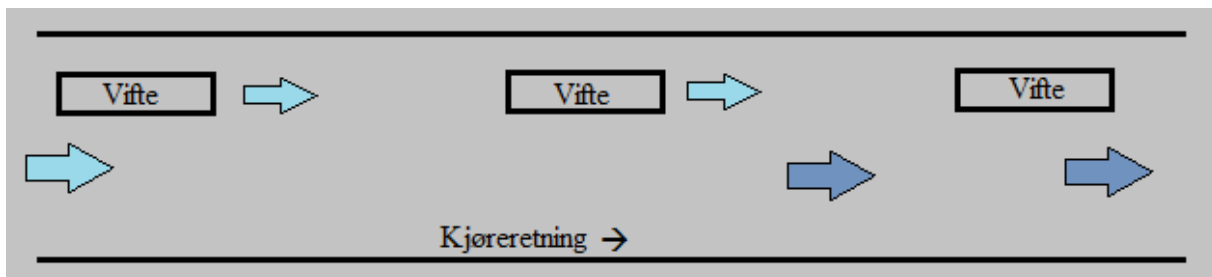
Tunneler skaper et lukket rom rundt kjøretøy. Utslipp fra kjøretøy kan dermed bygges opp til et uakseptabelt nivå, om det ikke er konstruert et ventilasjonsanlegg i tunnelen som skaper naturlige luftstrømmer. Det grunnleggende prinsippet til tunnelventilasjon er å fortynne utslippet forårsaket av kjøretøy. Dette blir gjort ved å tilføre frisk luft og deretter fjerne den forurensede luften [41]. Den forurensede luften kan fjernes via tunnelåpningene, via et ventilasjonsutløp eller ved hjelp av begge.

Det skal monteres ventilasjonsanlegg i tunneler med lengde over 1 000 m, når ÅDT er over 1 000 kjøretøy/døgn, ifølge Vegvesenet. Dette fordi lengre tunneler vil slite med å opprettholde en tilstrekkelig balansert luftkvalitet. Konsentrasjon av karbonmonoksid og nitrogendioksid, sammen med synlighet, er kriterier som vurderes. For tunneler opp til rundt 500 m vil det oppstå naturlige luftstrømmer som følge av bevegelsen til kjøretøy. Det er dermed ikke krav til ventilasjonsanlegg [41].

3.1.1 Enveis ventilasjon

Horisontal ventilasjon

Horisontal ventilasjon er den enkleste ventilasjonsformen å få til i tunnel. Helt enkelt er prinsippet her at frisk luft blir trukket gjennom tunnelen, slik at forurenset luft blir presset ut i det fri. I korte tunneler vil dette skje av seg selv dersom det legges inn en liten stigningsgrad, mens i lengre tunneler kreves det vifter for å oppnå ønsket gjennomstrøm. Denne ventilasjonsmetoden er oftest brukt i tunneler med bare en kjøreretning, og er forsøkt forklart med Figur 7. Kjøretøyene vil også hjelpe til med naturlig strøm av luft, i kjøreretningen [41].



Figur 7: Demonstrasjon av prinsippet bak horisontal ventilasjon [41].

Problemet med å dimensjonere denne typen ventilasjon i lengre tunneler, er knyttet til det å finne rett kraft og størrelse på viftene. Effekten er hovedsakelig dimensjonert ut i fra forventet forurensning, men viftene må også være sterke nok til at all røyk fra en brann vil bli ført i ønsket retning. Dette blir omtalt som kritisk ventilasjonshastighet, og er det viktigste dimensjoneringskriteriet [32].

Den kritiske ventilasjonshastigheten vil variere med utforming av tunnelen og størrelsen på brannen som oppstår, til et visst nivå. En brann på 25 MW vil for eksempel kreve lavere ventilasjonshastighet enn en brann på 50 MW, men om en ser på en brann på 50 MW og en på 100 MW, vil det i begge tilfeller som oftest være tilstrekkelig med en strøm på 3 m/s. Dette kommer av at røykproduksjonen ikke øker betraktelig i forhold til energiproduksjonen, når brannen når et visst nivå. Likevel er ikke dimensjonering av ventilasjonsanlegget så enkelt. For

brannen på 100 MW vil viftene måtte ha større effekt for å faktisk klare å produsere en luftstrøm som er på 3 m/s [32].

Operatunnelen befinner seg i tunnelklasse F. For denne tunnelklassen gjelder tall i Tabell 3 ved dimensjonering av ventilasjonshastighet. Siden Operatunnelen er over 2,0 km og har en stigning på over 2 %, må nødvendig ventilasjonshastighet beregnes [42]. I beredskapsplanen for tunnelen er det beskrevet at ventilasjonshastigheten ved brann skal være 3,5 m/s eller høyere.¹

Tabell 3: Krav til ventilasjonshastighet for tunnelklasse F, basert på tunnellengde og brannbelastning [42].

Tunnelklasse	Tunnellengde [km]	Brannbelastning [MW]	Nødvendig hastighet v/stigning < 2 % [m/s]	Nødvendig hastighet v/stigning > 2% [m/s]
F	0,5 – 1,0	20	3,5	Beregnes
F	1,0 – 2,0	50	3,5	Beregnes
F	Over 2,0	100	4,5	Beregnes

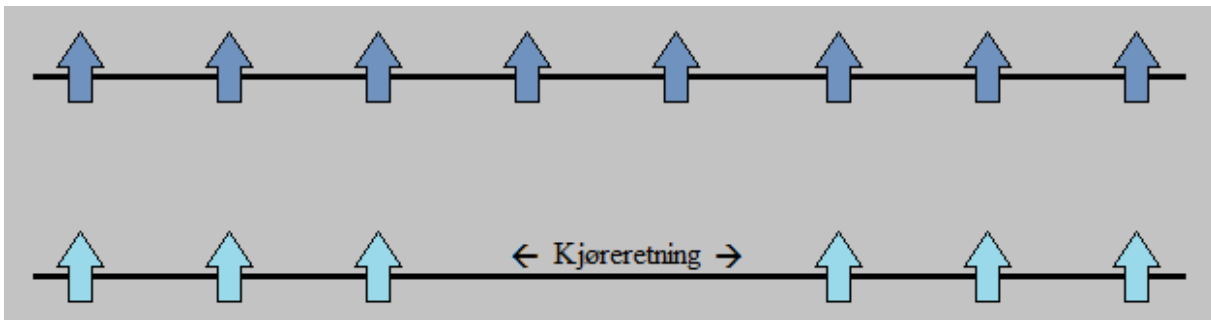
En annen ting som skaper problem for dimensjonering av horisontal ventilasjon, er at ventilasjonshastigheten virker inn på brannveksten. Etter en rekke forsøk og undersøkelser er det kommet frem til at 3 m/s er den beste ventilasjonshastigheten i de fleste tunneler. Minuset er at denne hastigheten kan forkorte startfasen av brannen i stor grad, og dermed føre til raskere brannvekst [32] (brannforløp i tunnel kan leses mer om i kapittel 3.2.2 på side 13). På grunn av dette kan det i mange tilfeller tenkes at vertikal ventilasjon er en bedre løsning, men denne løsningen har også sine begrensninger.

Vertikal ventilasjon

Vertikal ventilasjon fungerer etter samme prinsipp som horisontal ventilasjon, ved å fortynne og fjerne utslipp fra kjøretøy. Ved vertikal ventilering skjer tilførsel av frisk luft og fjerning av forurenset luft på tvers av tunnelen, via et utløp. Dette systemet krever to kanaler langs tunnelen. En kanal for tilførsel av frisk luft og en for fjerning av forurenset luft. Plasseringen av kanalene kan enten være å ha begge høyt, begge lavt eller en høyt og en lavt [43]. Det siste alternativet er vist i Figur 8. Vanligvis har kanalen med frisk luft, ventiler som blåser luften ut i tunnelen hver 12. m. Eksos og røyk blir derimot fjernet gjennom eksosdempere hver 100 m [43]. Eksosdemperne er tilkoblet kanalen som tar seg av fjerning av forurenset luft.

I en ettløpstunnel, hvor begge kjøreretningene går i samme tunnellopp, er vertikal ventilasjon effektivt. Trafikkforholdene sørger for at forurensningsnivået er mer jevnt fordelt langs tunnellengden. I slike tilfeller vil det ikke lønne seg å ta i bruk horisontal ventilasjon. Et horisontalt ventilasjonsanlegg ville ikke klart å regulere forurensningsnivået i tunnelen på samme måte, med tanke på at et slikt ventilasjonsanlegg blåser i en bestemt retning [41].

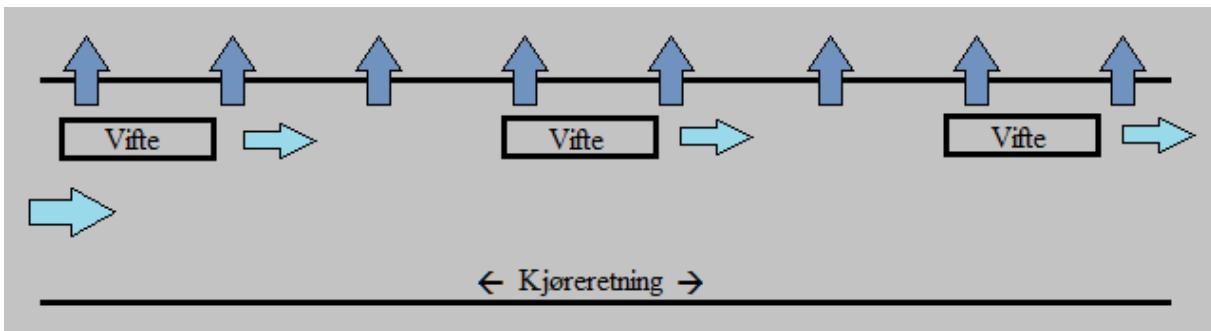
¹ Denne informasjonen er hentet fra et utsnitt av beredskapsplanen til Operatunnelen, tilsendt av Christian Fredrik S. Prydz i Statens Vegvesen.



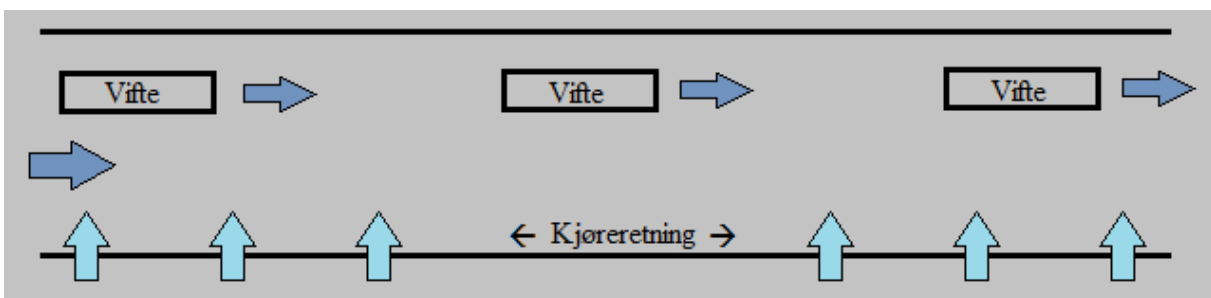
Figur 8: Demonstrasjon av prinsippet bak vertikal ventilasjon. De lyse pilene symboliserer frisk luft, mens de mørke pilene symboliserer forurenset luft [41].

3.1.2 Toveis ventilasjon

Toveis ventilasjon er en kombinasjon av både horisontal og vertikal ventilasjon. Kombinasjonen kan utføres på to ulike måter. Frisk luft kan tilføres gjennom åpningen av tunnelen, mens forurenset luft kan fjernes via en kanal langs tunnelen. Alternativt kan frisk luft bli tilført kontinuerlig langs tunnelen via en kanal, mens forurenset luft kan fjernes gjennom åpningene i tunnelen [41]. De to mekanismene er vist i Figur 9 og Figur 10.



Figur 9: Frisk luft inn gjennom tunnelåpning, og forurenset luft ut sjakt. De lyse pilene symboliserer frisk luft, mens de mørke pilene symboliserer forurenset luft [41].



Figur 10: Frisk luft inn i tunnel gjennom sjakt, og forurenset luft gjennom tunnelåpning. De lyse pilene symboliserer frisk luft, mens de mørke pilene symboliserer forurenset luft [41].

3.1.3 Forhåndsbestemt ventilasjonsstrategi

Som nevnt i kapittel 3.1.1 og 3.1.2 finnes det ulike former for ventilasjon i tunneler. Uansett hvilken form som benyttes, må det bestemmes hvilken retning luftstrømmen skal ha inne i tunnelen. For vertikal ventilasjon blir dette bestemt under prosjektering, og kan ikke endres på grunn av at kanalene bygges samtidig som tunnelen [41]. For horisontal og toveis ventilasjon må det ofte legges en vurdering til grunn for valg av strømningsretning.

En slik vurdering baserer seg oftest på innsatsstyrkenes fremkommelighet. Det brannvesenet som har kortest utrykningstid, eller størst kapasitet, er ofte styrende for ventilasjonsretningen. Ved varsling om brann er det viktig for innsatsstyrker å vite sikkert at de kan ta seg inn i tunnelen på en trygg måte, uten å bli truet av røyk. På grunn av dette er ventilasjonen i hovedsak styrt vekk fra angrepsveien til det nærmeste brannvesenet. Det er ikke nødvendig å tilkalle hjelp fra begge sider av tunnelen, ettersom det alltid vil være røykfri adkomst fra den ene, forhåndsbestemte siden [44].

En slik strategi kan også ha negative konsekvenser ved brann. Når det blir bestemt at ventilasjonsretningen skal være forhåndsbestemt, blir det i all hovedsak fokusert på brannvesenets arbeid og ikke på selve brannscenariene som kan oppstå i en tunnel [44]. Det har vært flere tilfeller hvor brann har oppstått nær åpningen av tunnelen som ligger mot det ansvarlige brannvesenet. Dette har ført til at røyk fra brannen blir ført unødvendig langt gjennom tunnelen før den når ut i det fri. En videre konsekvens av dette kan være at flere trafikanter blir fanget i røyken, og i verste tilfeller kan dette medføre dødsfall som burde vært forhindret. Brannene i Gudvangatunnelen i 2013 og 2015 er gode eksempler på dette. Disse brannene kan det leses nærmere om i kapittel 4.1.5 på side 29.

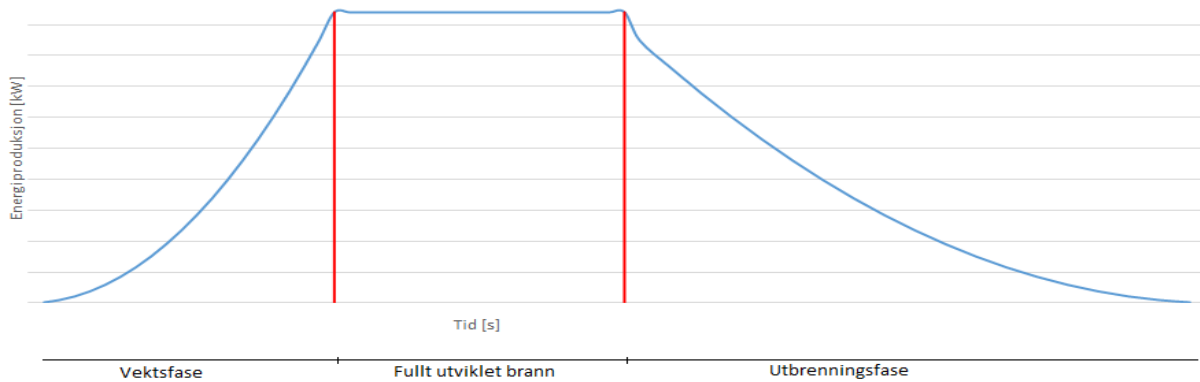
Når brannvesenet ankommer brannstedet har brannvesenets øverste leder, i de fleste tilfeller mulighet til å endre ventilasjonsretningen [45]. Dette blir gjort ved å manuelt snu retningen som viftene blåser i. En manuell endring av ventilasjonsretning kan hindre nettopp det at røyk blir ført gjennom store deler av tunnelen. Problemet med denne løsningen er at det tar tid for brannvesenet å ankomme brannstedet og få fullstendig oversikt. På denne tiden vil røyken kunne ha spredd seg langt inne i tunnelen.

3.2 Brannforløp

3.2.1 Rombrann

Dette teorikapitlet er hentet fra en tidligere rapport med tittel «CFD Modelling – Estimating ASET». Aktuelt kapittel i rapporten er utarbeidet av Kristi Kråkenes Dale i faget «Brannteknisk Simulering» i løpet av høsten 2015. Teorien er tidligere hentet fra boken *Grunnleggende Brannteknikk* av Bjarne Christian Hagen [46].

I de aller fleste tilfeller vil det være vanskelig å forutse hvordan et brannforløp vil utvikle seg. Basert på tidligere forskning og forsøk er den mest brukte forklaringen på et brannforløp en t^2 -brann. En slik brann består helt enkelt av tre hovedfaser; vekstfase, fullt utviklet brann og utbrenningsfase. Figur 11 viser en standard t^2 -brannkurve.



Figur 11: Standard fremstilling av en t^2 -brann. Dette er en typisk fremstilling som forklarer hvordan en rombrann vil utvikle seg [46].

Grunnen til at et slikt brannforløp blir kalt en t^2 -brann er at vekstfasen tar utgangspunkt i følgende formel:

$$Q = \alpha t^2 \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

Det vil si at energiproduksjonen i den første fasen vil øke kvadratisk med tiden. Tilleggsfaktoren α tar hensyn til hva som brenner, og dermed utviklingshastigheten. Veksthastighet og mengde brensel som er tilgjengelig, er det som vil definere brannen.

Etter t sekunder vil brannen ha oppnådd maksimal energiproduksjon, og denne vil holde seg stabil i x sekunder, alt etter hva som brenner. Det er i hovedsak to situasjoner som gjør at vekstfasen tar slutt. Den ene årsaken er at det ikke er mer brensel som gjør at brannen kan vokse, en brenselkontrollert brann. Den andre er at det ikke er mer oksygen i rommet til at brannen kan spre seg mer, en ventilasjonskontrollert brann.

Utbrenningsfasen vil normalt være den lengste fasen. Denne fasen er svært vanskelig å beregne varigheten på. Det må gjøres mange antagelser og forenklinger for å komme frem til lengden av denne fasen. Den kan variere fra noen minutter til flere timer avhengig av brenselet.

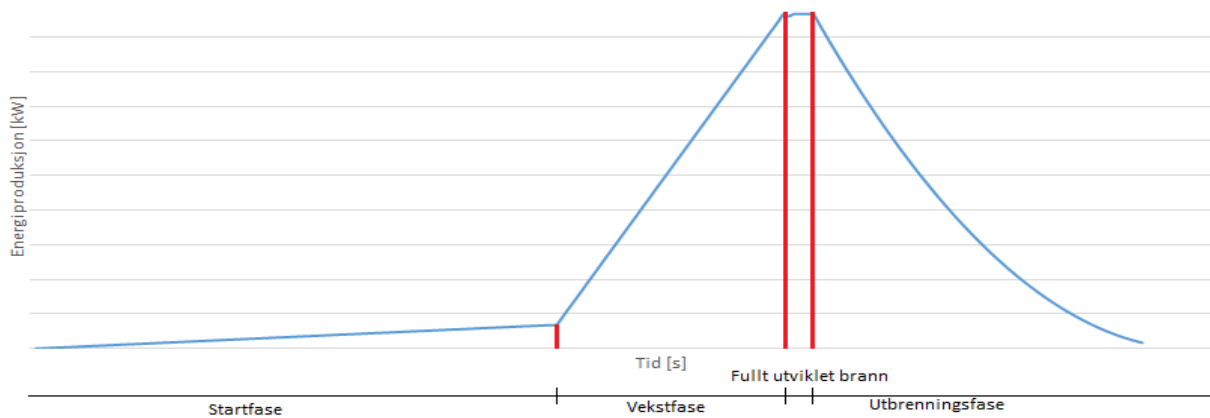
3.2.2 Tunnelbrann

En t^2 -brann gjør seg mest gjeldende i rombranner. I en tunnelbrann vil det være langt flere ukjente faktorer som er med på å påvirke utviklingen. Faktorer som tunnelvolum, trafikkmengde, temperatur på overflater, ventilasjon og selve brenselet vil være svært avgjørende, sammen med andre faktorer som en vet mindre om [32].

I 2003 ble det avholdt et storskala brannforsøk i Runehamartunnelen på Åndalsnes. Målet her var nettopp det å tilegne seg kunnskap om brannforløp i tunnel. Dette forsøket viste at utviklingen var både raskere og mer intens enn det en først antok, og at ventilasjonshastigheten spiller inn på brannutviklingen [47]. Etter dette forsøket, og en rekke andre, er det gjort et forsøk på å lage en tilnærming som forklarer brann i tunnel. Denne tilnærmingen er ikke 100 %, og det er fortsatt en lang vei igjen for å kunne forklare utviklingen på en god måte.

I korte trekk kan brannutviklingen forklares med de samme fasene som en standard rombrann. Den største forskjellen mellom rombrann og tunnelbrann vil i teorien være varigheten av de

ulike fasene. I tillegg til de tre hovedfasene må det legges til en startfase når en tunnelbrann skal beskrives. Figur 12 er en forenklet fremstilling av hvordan et brannforløp i tunnel kan være.



Figur 12: En svært forenklet fremstilling av hvordan en kan forvente at et brannforløp i en tunnel vil være. Det er mange ulike faktorer som vil spille inn ved et slikt brannforløp, derfor vil ikke denne grafen stemme i alle tilfeller [32].

Startfasen kan ha lang varighet, noe som de fleste fullskala forsøk i tunnel har vist, men det finnes også eksempler hvor denne fasen er svært kortvarig. Ventilasjonshastigheten vil spille en rolle i denne fasen, og kan være avgjørende for varigheten. På dette stadiet vil brannen være liten, og produsere lite varme [32].

Etter hvert som brannen utvikler seg, vil den gå over til å ha en raskere utvikling med større varmeproduksjon. Denne prosessen kan omtales som vekstfasen. Her vil brannen oppnå sin maksimale størrelse, og slutten av fasen vil være når brannen ikke kan utvikle seg mer. Slik som for en rombrann, vil en tunnelbrann enten bli brenselkontrollert eller ventilasjonkontrollert. Denne fasen vil normalt bare vare i noen få minutter, og vil også være påvirket av ventilasjonshastigheten [32].

I de aller fleste forsøkene som er utført i forbindelse med tunnelbrann, er fasen med fullt utviklet brann begrenset til under 10 minutter, og aldri over 20 minutter. Den siste fasen er også her en utbrenningsfase. Denne fasen varer sjelden lenger enn vekstfasen, noe som er tydelig forskjellig fra en rombrann [32].

Selv om det er mulig å lage en slik fremstilling av en tunnelbrann, er det ikke sagt at alle branner vil følge en slik utvikling. Den faktoren som er vanskeligst å forutsi, er brenselet. Både personbiler og vogntog kan inneholde veldig variert last, og i noen tilfeller last som en ikke klarer å tenke seg at skal ha betydning for en brann. For eksempel oppsto det i 2007 en brann i Brattlitunnelen i Tysfjord, Norge, hvor et vogntog var lastet med 27 tonn brunost. Det tok i overkant av fire døgn før lasten var oppbrent [48]. Brannfaren rundt en slik last var ikke vurdert i forkant.

For å gi et innblikk i hvor stor variasjon som kan oppleves i forbindelse med brann i tunnel, er det presentert en oversikt over gjennomsnittlig varmeproduksjon i ulike kjøretøy i Tabell 4. I tillegg til ulik varmeproduksjon, vil også brannveksten variere med kjøretøy. For eksempel vil en bussbrann ofte vokse raskere enn en brann i vogntog, det vil si tiden til overtenning vil være kortere [49]. Basert på ekspertvurdering er det laget en oversikt over fordeling av brannstørrelser i tunnel. Denne oversikten er vist i Tabell 5.

Tabell 4: Gjennomsnittlig varmeproduksjon for ulike kjøretøy [50].

Kjøretøy	Gjennomsnittlig varmeproduksjon [MW]
Personbil	1,5 – 8,5
To personbiler	5,6 – 10
Buss	29 – 30
Vogntog	13 – 202

Tabell 5: Fordeling av brannstørrelse for ulike kjøretøy [11].

Brannstørrelse	Lette kjøretøy	Tyngre kjøretøy
1 MW	70 %	20 %
5 MW	25 %	31 %
25 MW	5 %	25 %
50 MW		16 %
100 MW		6 %
200 MW		2 %
	100 %	100 %

3.2.3 Brannspredning i tunnel

Omfanget av brann i en tunnel vil være avhengig av hvor mange biler som brenner. En bil alene vil i de fleste tilfeller ikke produsere nok varme og energi til at brannen får et katastrofalt utfall [49]. Det er heller ikke sikkert at to personbiler som kolliderer vil kunne skape den helt store faren, dersom det oppstår brann i etterkant av ulykken. Det er først når et vogntog, eller en lengre rekke med biler er involvert, at størrelsen på brannen kan bli kritisk [32]. Brannspredning i tunnel kan i hovedsak foregå på fem ulike måter, disse er presentert i Tabell 6.

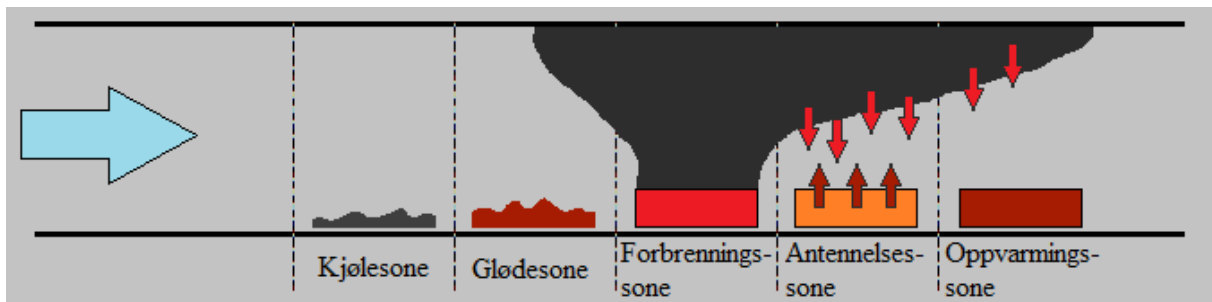
Tabell 6: Kort oppsummering av ulike måter en brann kan spre seg på inne i en tunnel [32].

Mekanisme	Forklaring
Flame impingement	Flammene treffer taket i tunnelen og blir reflektert ned mot veibanen. Dette skjer på grunn av den lave temperaturen taket i tunnelen har. Ventilasjon i tunnelen vil forårsake at flammene beveger seg vekk fra brannstedet, i samme retning som ventilasjonen blåser.
Overflatespredning	Flammene sprer seg ved at det første objektet som begynner å brenne, er fysisk i kontakt med, eller svært nær, andre objekt som lar seg antenne.
Spontanantennelse	Temperaturene i en tunnel hvor det har oppstått brann, kan bli så høye at overflatematerialer hos andre kjøretøy antennes. Dette kan skje selv om kjøretøyene har stor avstand.
Lekkasje av drivstoff	Drivstoff i kjøretøy er brennbare væsker. Ved en brann kan det oppstå lekkasje, og væsken vil fordele seg med helningen i tunnelen. Flammene vil følge etter væsken.
Ekspløsjon	Ved lekkasje av drivstoff vil noe av de brennbare væskene bli til gass. Gassen vil spre seg i tunnelen, og motorer fra andre biler kan antenne denne. Dersom gassen er mellom øvre og nedre brennbarhetsgrense for gjeldende gass, vil det oppstå eksplosjon.

I tunneler hvor det er stillestående rushtrafikk vil faren for brannspredning være reell. Det er kjent at biler vil ha liten avstand til hverandre, på grunn av den lave hastigheten gjennom tunnelen. Dersom en bil begynner å brenne under slike forhold, vil det være vanskelig å forhindre brannspredning. De dominerende mekanismene for spredningen vil her være flame impingement og overflatespredning. Brannspredningen kan deles inn i ulike soner som viser hvordan brannen kommer til å utvikle seg [32]. De ulike sonene er forklart i Tabell 7, og vist i Figur 13.

Tabell 7: Brannspredning er en hel prosess. Her er de ulike fasene i prosessen beskrevet [32].

Sone	Forklaring
Kjølesone	Kjøretøy som er fullstendig utbrent og i stor grad avkjølt.
Glødesone	Kjøretøy som er i utbrenningsfasen og som fortsatt holder høye temperaturer.
Forbrenningszone	Kjøretøy som er i brann, hvor flammene er synlige og temperaturen er svært høy (typisk mellom 900 og 1 350 °C).
Antennelsessone	Kjøretøy med økende temperatur, hvor flammene fra forbrenningssonen enkelt kan antenne kjøretøyene.
Oppvarmingszone	Kjøretøy som står innenfor en varm sone i tunnelen, slik at temperaturen i overflatematerialene stadig er økende.



Figur 13: Demonstrering av hvordan brannspredning typisk vil foregå under en tunnelbrann. Hver sone kan bestå av flere kjøretøy, selv om figuren bare viser ett i hver sone [32].

3.3 Risikofaktorer

Det er færre trafikkulykker per kilometer i tunnel, enn tilsvarende veistrekninger i friluft. Likevel er alvorlighetsgraden knyttet til ulykker i tunnel, høyere enn ulykker på veier i friluft. Den høye alvorlighetsgraden kommer blant annet av at røyken som vanligvis oppstår ved brann, har et begrenset område å spre seg på. Røyken er i stor grad lukket inne i tunnelen [51].

De vanligste årsakene til brann i tunnel er oppgitt i Tabell 8, og viser sannsynlighetsgraden av de ulike hendelsene.

Tabell 8: Oversikt over hvilke faktorer som vanligvis forårsaker brann i tunnel [52] [39].

Faktor	Vanligste årsak	Involverte kjøretøy	Sannsynlighet
Varmgang i motor	Overopphetet varme-, ventilasjons- og klimaanlegg	Personbil og vogntog	Høy/middels
Varmgang i bremseser	Langvarig bremsing, sammenhengende lengde av helning	Oftest vogntog	Høy
Elektrisk feil i bil	Brudd på ledning, eldre elektrisk utstyr	Oftest personbil	Høy
Kollisjoner	Trafikkmengde, tetthet, hastighet	Personbil og vogntog	Middels
Tekniske feil i tunnel	Dårlig vedlikehold	-	Middels/lav
Vedlikeholdsarbeid	-	-	Middels/lav
Andre feil ved kjøretøy	-	Personbil og vogntog	Høy

Antall kjøretøy sett i sammenheng med tunnellengde og helningsgrad, har stor betydning for hyppigheten av branner i tunnel. Helningsgrad og sammenhengende lengde av helning, er den vanligste årsaken til varmgang i bremseser. Andre risikofaktorer som er oppgitt i Tabell 8, er ikke like forutsigbare. De har ikke like mye å si i forhold til en tunnels geometriske utforming.

Kjøretøy utvikler seg teknisk hele tiden. Dermed blir det mer elektronikk og mer bruk av brennbare materialer. Dette kan øke frekvensen av brann i kjøretøy og øke brannbelastningen. Selv om det kan tenkes at frekvensen av brann i kjøretøy vil øke, betyr det ikke at frekvensen av brann i tunnel vil øke.

Mange anser nok kollisjoner som den hyppigste årsaken til brann i tunnel. Sannsynligheten for en kollisjon er sterkt knyttet til trafikken, og kan beregnes på grunnlag av trafikkmengde. Antall lette kjøretøy og antall tyngre kjøretøy per døgn, samt stigningsgrad og lengde på strekninger med ulik stigningsgrad, spiller også en rolle. Likevel går kollisjoner under en kategori som i betydelig mindre grad fører til brann [39].

3.3.1 Statistikk i Norge

I følge statistikk presentert av Vegvesenet er det rundt 20 tunnelbranner i Norge hvert år. Det er enda ikke registrert noen sikre dødsfall som følge av tunnelbranner her i landet. Frem til 2010 er det registrert seks omkomne i tunnelulykker, der kollisjon har videreutviklet seg til brann. Det er likevel stor usikkerhet rundt om det er selve kollisjonen eller brannen som har vært dødsårsaken. På grunn av denne usikkerheten velges det å ikke oppføre disse seks på statistikken. Dette er tall som gjør at Vegvesenet konkluderer med at «det er minst like trygt å kjøre i tunnel som på resten av vegen» [53].

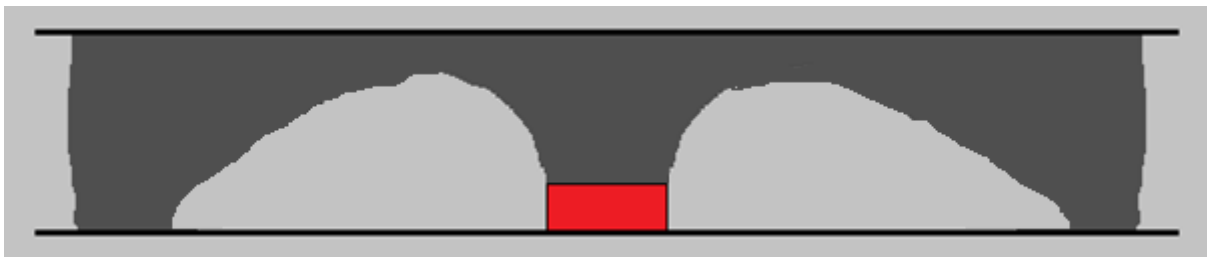
Likevel kan en brann i tunnel ha større farepotensiale enn en bilbrann i det fri. Dette kommer av svært begrensede rømningsmuligheter, rask brannvekst og høye temperaturer i nærheten av brannen.

3.4 Rømningsforhold

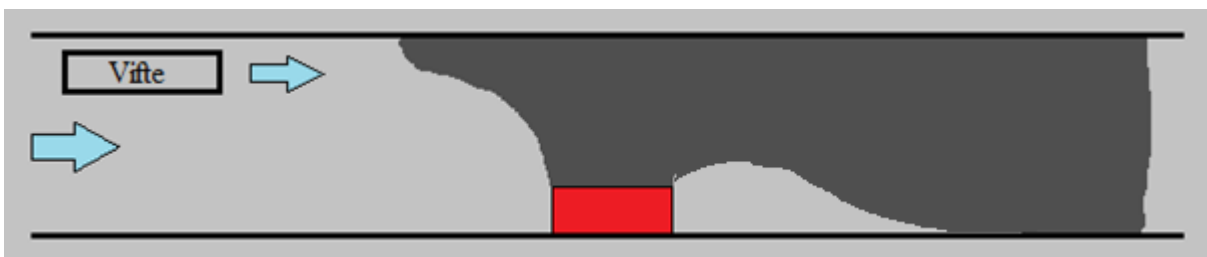
3.4.1 Røyk

Det største problemet for mennesker og innsatsstyrker når det oppstår en større brann i tunnel, er røyken. Røyk hindrer rømning og bekjempelse av brann, på grunn av dens egenskaper [39]. Når røyken blir tykk og svart, vil den kunne minske sikten hos personer som prøver å evakuere tunnelen. Dette kan igjen forårsake svie og rennende øyne. Røyk fortrenger samtidig oksygen, og inneholder giftige gasser [54]. Dette gjør det vanskelig for personer å kunne oppholde seg i tunnelen over lengre tid, når det først er oppstått røykutvikling. 24. mars 1999 omkom 39 mennesker i en tunnelbrann, hovedsakelig som følge av røykutviklingen som oppstod. Brannen fant sted i Mont Blanc-tunnelen, en biltunnel mellom Frankrike og Italia [38]. Brannen viser hvor alvorlige konsekvenser røyken kan ha.

Hydrokarboner, som f.eks. bensin og diesel, er materialer som kan gi veldig stor og rask røykutvikling ved brann i tunnel [49]. Det som skjer er at røyken raskt vil bli kjølt ned mot tunnelens tak og sider, og deretter fylle tunneltversnittet et stykke borte fra brannen. Dette fenomenet er illustrert i Figur 14, hvor det ikke er ventilasjon i tunnelen. Figur 15 viser hvordan røyken vil spre seg dersom det er horisontal ventilasjon. Tunnelens helning, trafikretning og -mengde, ventilasjonsanlegg, samt vind og temperaturforhold utenfor tunnelen, vil bestemme røykens retning og hastighet. Røykens retning og hastighet vil igjen påvirke rømningsforholdene [32].



Figur 14: Demonstrasjon av hvordan røyken vil fylle tunneltversnittet ettersom den blir avkjølt mot tunnelens tak, og det ikke er ventilasjon i tunnelen [32].

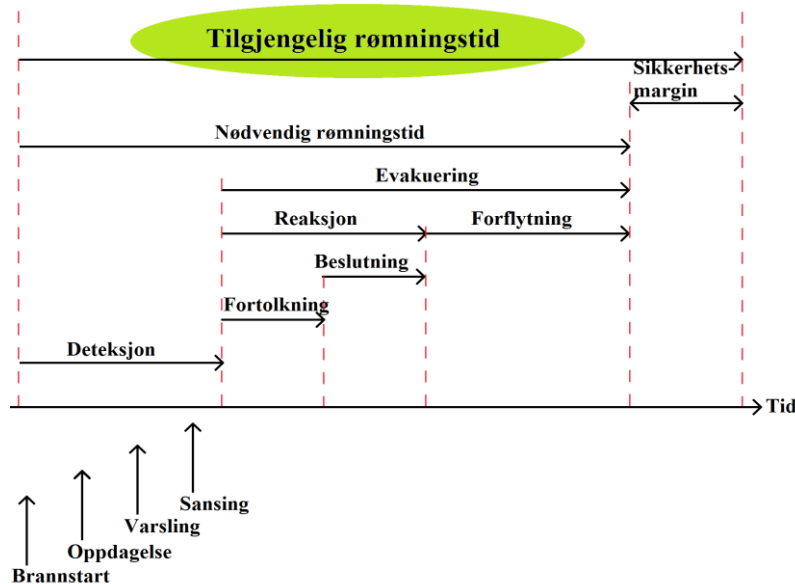


Figur 15: Demonstrasjon av hvordan røyken vil fylle tverrsnittet hvis det er ventilasjon i tunnelen [32].

Varme fra brannen vil også være en trussel, men påvirker ikke rømningsforholdene i samme grad som røyk. Varmestrålingen fra brannen vil avta betydelig jo lenger bort fra brannen en kommer [55].

3.4.2 Rømningstid

Tiltak som minimerer deteksjons-, beslutnings- og reaksjonstiden er avgjørende på grunn av røyken. Likevel er det vanskelig å forutsi hvordan personer reagerer ved brann i tunnel [55]. Figur 16 viser de ulike fasene under rømning generelt. Dette vil også gjøre seg gjeldende for rømning i tunnel, men tiden på fasene vil variere ut i fra de forholdene brannen skaper.



Figur 16: Prinsippfigur for rømningstid. Figuren viser de ulike fasene personer opplever under rømning [56].

Deteksjonstid

Deteksjonstid er tiden fra brannen oppstår til den blir oppdaget, enten manuelt eller automatisk [57]. Figur 16 viser at deteksjonsfasen videre er delt inn i fire faser; brannstart, oppdagelse, varsling og sansing.

I tunnel er det vanlig at brann oppdages av trafikanter, som videre varsler ved hjelp av nødtelefonene som er plassert i nærheten. For større og mer trafikkerte tunneler er det i tillegg vanlig med automatisk deteksjon. Dette blir gjort ved hjelp av kameraovervåking med AID. Etter at VTS har fått varsel om brann, enten om det er fra trafikanter eller fra AID-systemet, må de videre varsle andre trafikanter i tunnelen. Dette blir hovedsakelig gjort via radio [29].

Det er en utfordring for VTS å nå ut til alle trafikantene ved hjelp av radio [58]. Enkelte i tunnelen vil ikke oppdage brannen før de selv kan sanse den. På dette tidspunktet kan forholdene fort forverre seg og bli kritiske, noe som vil gjøre evakueringen utfordrende. Antakelser gitt i en rapport skrevet av SINTEF og COWI, sier at de fleste personer ikke starter å evakuere før de er fanget i røyk [55]. Dette gjør at det er viktig med tidlig varsling.

Reaksjonstid

Reaksjonstid er delt inn i fortolkningstid og beslutningstid. Fortolkningstid er den tiden en person bruker på å oppfatte varselet om brann [10]. Tiden fra varselet er oppfattet til en handling er besluttet, blir omtalt som beslutningstid [6].

For personer vil kort reaksjonstid være avgjørende for egen sikkerhet. I tunnel vil dette være ekstra viktig, da forholdene fort kan bli kritiske og det er begrenset med rømningsmuligheter. I høytrafikkerte tunneler som Operatunnelen, kan fortolkningstiden bli lengre enn ønskelig. Dette gjelder spesielt i perioder med rushtrafikk, hvor flertallet av trafikantene benytter seg av tunnelen daglig. I disse periodene kan det oppstå fullstendig stans i tunnelen, uten at det har hendt en ulykke. Dermed vil det ikke være naturlig for trafikantene å reagere i en slik situasjon, selv om det kan være et tegn på en alvorlig hendelse.² Tydelig varsling blir da viktig for å redusere fortolkningstiden.

Beslutningstiden kan også bli redusert ved hjelp av tydelig varsling. I tidligere tunnelbranner har det vist seg at trafikanter ofte søker trygghet i kjøretøyene sine, noe som vises igjen i brannen i Mont Blanc-tunnelen, Tauerntunnelen og St. Gotthard-tunnelen. Disse brannene kan det leses mer om i kapittel 4.1 på side 24 og utover.

Forflytningstid

Forflytningstid er den tiden det tar for alle trafikanter å komme seg ut av tunnelen, eller til et annet sikkert sted [6]. Ved store branner (>100 MW) tar det bare om lag 3-10 minutter før personer i nærheten av brannen blir omhyllet av røyk, og ikke klarer å evakuere på egenhånd. Etter de 3-10 minuttene vil ganghastigheten bli kraftig redusert. Maksimal ganghastighet i røyk er estimert til å være 0,2 m/s. Trafikanter må av denne grunn starte forflytningen før de er omhyllet av røyk. Evakuering i en røykfri sone vil gi en langt høyere ganghastighet enn 0,2 m/s, og dermed øke sjansene for at trafikantene kommer seg ut på egenhånd [55].

3.5 Slokking i tunnel

Det er vanskelig å forutsi størrelsen på en brann i kjøretøy, fordi det er flere faktorer som spiller inn. Denne usikkerheten gjør at det er viktig å forsøke å bekjempe brannen på et tidlig tidspunkt. Brannslukking i tunnel er tradisjonelt ment for brannvesenet [59]. Flere store tunnelbranner har vist at dette er et svært krevende arbeid, og det har dermed blitt utviklet automatiske slukkeanlegg for tunneler. Automatiske slukkeanlegg vil føre til tidlig bekjempelse av brann, men det er likevel noen begrensninger knyttet til et slikt system.

3.5.1 Manuell slukking

Med manuell slukking menes brannvesenets slukkearbeid. Det er vanskelig for trafikanter å drive med slukkearbeid i tunnel, selv om det er plassert brannslukkingsapparat med jevne mellomrom i de fleste tunneler. Dette er fordi det ofte ikke er nok slukkemiddel i et slikt apparat til å bekjempe en bilbrann [60]. Formålet med brannslukkingsapparatene blir å forsinke brannutviklingen og dermed gi brannvesenet bedre tid.

Brannvesenets slukkearbeid er som tidligere nevnt et svært krevende arbeid. Det er flere faktorer som påvirker innsatsmulighetene. Blant annet vil fremkommelighet, røyk og varme være utfordrende. Dette vil variere med tunneltype og utfordringene vil være ulike om det er ettløpstunnel eller toløpstunnel.

² Antakelser gjort i samarbeid med Oslo brann- og redningsetat, basert på erfaringer gjort av innsatspersonell her.

Ettløpstunnel

Fremkommeligheten i en ettløpstunnel vil være begrenset da det bare er to tilgjengelige angrepsveier, tunnelåpningene [33]. Dette kan være et problem om det er mye trafikk i tunnelen. Utrykningskjøretøyene er store og krever god plass når de skal ta seg frem til brannen. Begrenset fremkommelighet vil føre til lengre innsatstid og brannen får dermed vokse seg større.



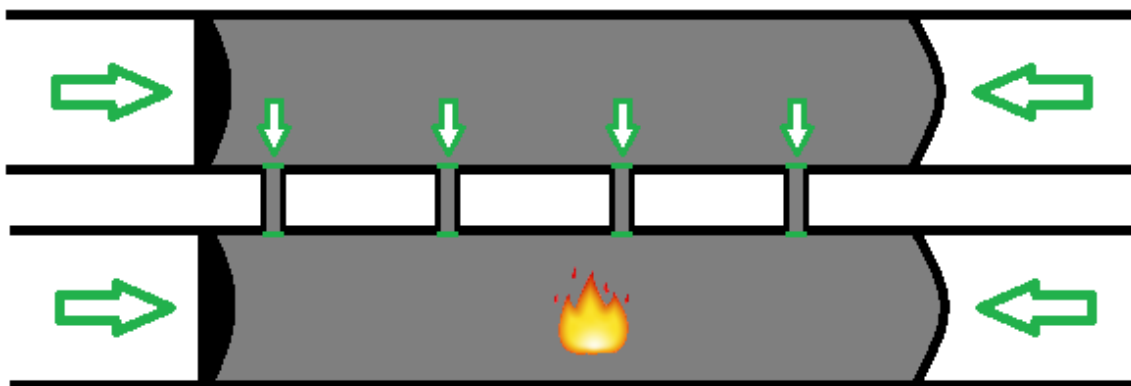
Figur 17: De grønne pilene viser angrepsveiene til innsatsstyrkene i en ettløpstunnel.

Varme og røyk kan skape problemer for innsatsstyrkene som skal utføre sløkkearbeid i tunnelen. Selv med tilpasset spesialutstyr har brannmenn menneskelige begrensninger. Varme og røyk vil derfor gi reduserte muligheter til å oppholde seg i nærheten av brannstedet, avhengig av brannstørrelse. I følge DSB er innsatsstyrkene utstyrt slik at de kan håndtere en brann på mellom 50-100 MW [61]. I tilfeller hvor brann overstiger dette, har ikke brannvesenet mye å stille opp med. Her må de fokusere på å hindre spredning, og heller la de involverte kjøretøyene brenne ut.

Ventilasjonsretningen i en slik tunnel vil være avgjørende for innsatsen. En forhåndsbestemt strategi er med på å alltid sikre en røykfri angrepsvei for innsatsstyrkene. Røykfri angrepsvei vil gjøre innsatsen mer effektiv, ettersom ganghastigheten ikke blir redusert da sikten opprettholdes [44].

Toløpstunnel

I en toløpstunnel vil det være flere angrepsveier enn i en ettløpstunnel. Her har innsatsstyrkene mulighet til å benytte tunnelåpningene i løpet hvor det brenner, men også åpningene i motsatt løp. Benytter de seg av motsatt løp, kan de angripe brannen via nødutgangene som binder løpene sammen [33]. Dette er vist i Figur 18. En annen fordel med å bruke motsatt løp, er at innsatsstyrkene kan gjøre alle forberedelser uten å bli eksponert for varme og røyk.



Figur 18: De grønne pilene viser angrepsveiene til innsatsstyrkene i en toløpstunnel.

3.5.2 Automatisk slokking

Automatiske slokkeanlegg egner seg best i større tunneler hvor det er fare for mye trafikk og kødannelse [62]. Dette er typisk tunneler hvor brannvesenet kan møte på store problemer i forbindelse med innsats. En stor fordel vil være rask aktivering av systemet, slik at bekjempelsen av brannen starter på et tidlig tidspunkt. Det er gjennom forsøk vist at et sprinklersystem vil hindre brennbart materiale i å antenne [63]. Brannen vil dermed avgrenses i et stort tidsrom, noe som minimerer utfordringene til brannvesenet.

Utfordringer knyttet til denne løsningen vil være dimensjonering, installering, drift og vedlikehold [64]. Dette kommer av at det er en forholdsvis ny løsning som stadig er under utvikling.



4 Tidligere tunnelbranner

Det er gjort et forsøk på å lage en oversikt over større branner i tunnel de siste 60 årene (fra 1949 til 2010) verden over. Det har totalt vært 56 slike branner, med varierende omfang [52]. I denne rapporten er det valgt å se nærmere på fem av disse. Målet med å vurdere tidligere tunnelbranner er å få en nærmere forståelse av brannforløp og konsekvenser.

Brannene er valgt på grunnlag av tunneltype, trafikkmengde og omfang. Ingen av tunnelene kan direkte sammenlignes med Operatunnelen, men samlet vil de kunne gi et innblikk i hva som kan forventes dersom det oppstår brann her.

4.1 Eksempel på storbranner

Tabell 9: Oversikt over noen tidligere storbranner [50].

Tunnel Land	År	Lengde	Brannårsak	Mest sannsynlige årsak til brannspredning	Involverte kjøretøy	Varighet av brann	Antatt brannstyrke	Antall skadde/døde
Mont Blanc Frankrike/Italia	1999	11,6 km	Motorfeil i vogntog	Last: margarin og mel Lekkasje av drivstoff førte til stor brannspredning	23 vogntog 10 personbiler 1 motorsykkel 2 utrykningskjøretøy	Over 2 dager	200 MW	39 døde Svært mange skadde
Tauern Østerrike	1999	6,4 km	Vogntog forårsaket kjedekollisjon	Last: spraybokser med maling Dette forårsaker hurtig brannvekst og –spredning	14 vogntog 26 personbiler	15 timer	180 MW	12 døde 49 skadde
St. Gotthard Sveits	2001	16,9 km	Frontkollisjon mellom to vogntog	Last: dekk Dette forårsaket hurtig brannvekst og mye røyk	3 vogntog 23 personbiler	Over 2 dager	200 MW	11 døde
Fréjus Frankrike/Italia	2005	12,9 km	Motorfeil i vogntog	Last: dekk Dette forårsaket hurtig brannvekst og mye røyk	4 vogntog 3 utrykningskjøretøy	6 timer	150 MW	2 døde 21 skadde
Gudvanga Norge	2013	11,5 km	Motorfeil i vogntog	Last: ingen last, tomt vogntog Ingen brannspredning	1 vogntog	1 time	30-40 MW	Ukjent antall skadde
	2015		Motorfeil i buss	Last: bagasje fra passasjerer Ingen brannspredning	1 buss	2 timer	30 MW	5 skadde

4.1.1 Mont Blanc

Mont Blanc er en tunnel som strekker seg fra Chamonix i Frankrike til Courmayeur i Italia. Stekningen er en av de store transportrutene, og er særlig viktig for Italia som er avhengig av tunnelen for transport av gods til Nord-Europa. 19. juli 1965 stod den 11,6 km lange tunnelen ferdig. Mont Blanc-tunnelen er konstruert som en ettløpstunnel med ett kjørefelt i hver retning, og har en ÅDT på omtrent 5 000 kjøretøy, hvorav 40 % er vogntog [65].

24. mars 1999 tok et belgisk vogntog fyr 6,7 km inne i tunnelen, i retning Frankrike-Italia. Det er antatt at vogntogets motor gikk varm, og tok fyr ved hjelp av den store mengden med diesel som var i drivstofftanken. Selve vogntoget, var av typen kjøle- og frysetransport, og inneholdt store mengder med margarin og mel. Samtidig bestod vogntogets tilhenger av brennbart isotermisk skum. Alle disse faktorene gjorde at brannen spredte seg raskt [65].



Figur 19: Rester av et vogntog etter brannen i Mont Blanc i 1999 [94].

En svak luftstrøm på 1-1,5 m/s i retning Italia-Frankrike, førte til at brannen spredte seg raskt til bilene som befant seg bak vogntoget. I alt 35 kjøretøy ble fanget i brannen. Luftstrømmen tvang røyken og flammene til å hovedsakelig spre seg i retning mot den franske åpningen. Ved den franske åpningen stod brannvesenet klar til innsats, men den intense varmen og den giftige røyken hindret innsatsstyrkene i å komme til. Brannen varte i to dager og nådde temperaturer opp mot 1 000 °C [38].

Det omkom til sammen 39 personer i brannen, og de fleste som døde oppholdt seg i, eller i nærheten av bilene sine. De som hadde prøvd å flykte, klarte bare å bevege seg 100-500 m bort fra brannen før de kollapset som følge av den giftige røyken. To utrykningskjøretøy, 23 vogntog, ti personbiler og en motorsykkel ble ødelagt i brannen. Disse kjøretøyene befant seg over en distanse på 1,2 km fra der brannen startet [65]. Brannstyrken antas ut i fra størrelsen på brannen og Tabell 4 til å være 200 MW.

Ventilasjonsstrategien i Mont Blanc var av typen vertikal, og var utdatert på tidspunktet da brannen oppstod. Ventilasjonsskanalene befant seg under kjørebanelen, og anlegget hadde begrenset avsugskapasitet. Dette gjorde at ventilasjonsanlegget ikke klarte å ventilere ut den store mengden med røyk som oppstod under brannforløpet [66].

Tunnelen var utført med tilfluktsrom, disse var jevnt fordelt gjennom hele tunnelen med inngang hver 600 m. De som tilfeldigvis lå i nærheten av brannen, fikk alvorlige skader. Dette på grunn av at tilfluktsrommene bare var klassifisert til å motstå brann i to timer, mens denne varte i to dager. Seks personer ble likevel reddet fra et tilfluktsrom et stykke borte [38].

Etter ulykken tok det tre år før Mont Blanc-tunnelen åpnet for trafikk igjen, ettersom det var store skader som måtte repareres etter brannen. De første to månedene etter åpningen, var det bare personbiler som fikk kjøre gjennom tunnelen [38].

4.1.2 Tauern

Tauerntunnelen er en del av Tauern Autobahn, en av de viktigste nord-sør transittuter gjennom Alpene, og forbinder industriområdene i Sør-Tyskland og Nord-Italia. 21. juni 1975 stod den 6,4 km lange tunnelen ferdig. Tauern ble opprinnelig konstruert som en ettløpstunnel med ett kjørefelt i hver retning, og hadde da en ÅDT på 14 300 kjøretøy, hvorav 20 % var vogntog. I 2010 ble den oppgradert til en toløpstunnel, med to kjørefelt i hver retning [50].



Figur 20: Bilde fra hvordan Tauerntunnelen så ut etter at slokkearbeidet i 1999 var avsluttet [95].

29. mai 1999 var det byggearbeid i tunnelen, og ett kjørefelt var stengt. Det andre kjørefeltet opererte derfor i begge retningene, og trafikklys var med på å styre trafikken inne i tunnelen. Da trafikanter stod i kø og ventet ved rødt lys i den nordlige retningen, og trafikanter som kom fra sør startet å kjøre forbi bygningsarbeidet, kolliderte et vogntog i høy hastighet inn i de ventende bilene i nord. Kollisjonen skjedde ca. 700 m inn i tunnelen fra nord. Ulykken blokkerte begge kjørebane, noe som førte til at biler i både nord og sør måtte stoppe opp. Vogntoget som var ansvarlig for ulykken var lastet med spraybokser med maling [67].

Rett etter ulykken ble det detektert en liten brann og en brannalarm gikk av. Brannvesen og politi var raskt til stede og prøvde å slokke brannen. Grunnet den raske utviklingen av brannen og de farlige materialene som tok fyr, var det ikke mye som kunne bli gjort. 60 personer klarte å snu bilene sine og kjøre ut, men tunnelen var overtent etter 30 minutter. Fem timer etter overtenningen ble det gjort et forsøk på å ta seg inn i tunnelen via åpningen i nord. Frisk luft ble blåst inn i tunnelen fra nord, mens avtrekksviftene ble kjørt på full effekt [68].

Tolv mennesker ble til sammen drept i ulykken/brannen. Det er antatt at åtte av disse personene ble drept i selve kollisjonen, mens de fire andre døde som følge av brannen og røyken. Tre av disse fire hadde ikke forlatt bilene sine, mens den siste personen ble funnet omtrent 100 m fra brannen. Det var ingen tilfluktsrom eller tunneler for rømning inne i selve tunnelen. 24 personbiler og 16 vogntog ble funnet fullstendig utbrent i etterkant av brannen [68]. Brannstyrken antas ut i fra størrelse på brannen og Tabell 4 til å være 180 MW.

Tunnelen var stengt i tre måneder etter brannen. Ventilasjonssystemet var en av tingene som ble forbedret/oppgradert i ettertid [68].

4.1.3 St. Gotthard

St. Gotthard-tunnelen ligger i Sveits, og strekker seg fra Airolo i sør til Gösschenen i nord. Tunnelen anses som en av de viktigste transittutene gjennom Alpene, og knytter den italienske grensen til både Tyskland og Frankrike. I 1980 åpnet den for trafikk for første gang, og var på dette tidspunktet verdens lengste veitunnel med sine 16,9 km. Selv om tunnelen er en viktig trasé, og er så lang som den er, er den konstruert som en ettløpstunnel med ett kjørefelt i hver retning. ÅDT for St. Gotthard ligger på 18 700 kjøretøy, hvor 20 % antas å være tyngre kjøretøy [59].



Figur 21: Bilde tatt under brannen i St. Gotthardtunnelen i 2001 [88].

24. oktober 2001 var et belgisk vogntog på vei fra sør til nord i tunnelen. Etter å ha kjørt rundt 1,1 km inn i tunnelen, kolliderte vogntoget med høyre fjellvegg. Sjåføren prøvde å rette opp kjøretøyet, noe som resulterte i at vogntoget havnet i motsatt kjørefelt. I motgående kjøreretning kom et italiensk vogntog, som ikke klarte å forhindre en frontkollisjon. Det belgiske vogntoget var lastet med filmruller til gamle fotokameraer, mens det italienske var lastet med dekk. Som et resultat av kollisjonen begynte ett av de involverte vogntogene å lekke diesel. Dieselen fordampet og fordelte seg i

tunnelen. Det antas at en gnist fra et bilbatteri var det som antente dieseldampen. Lasten i vogntogene var med på å skape en svært hurtig brannspredning, med stor røykproduksjon [69].

Totalt var det 25 kjøretøy involvert i ulykken, 23 personbiler i tillegg til de vogntogene som kolliderte. På grunn av rask spredning til mange kjøretøy, var det en utfordrende jobb for innsatsstyrkene. Brannen ulmet i opptil 24 timer, og først etter over 48 timer ble den antatt som fullstendig slokket. Det var flere enn 300 hjelpemannskaper som arbeidet med å slokke brannen og redde personer. Dette var et utfordrende arbeid på grunn av høye temperaturer og giftig, tykk røyk [59]. Brannstyrken antas ut i fra størrelse på brannen og Tabell 4 til å være 200 MW.

Som et resultat av brannen omkom elleve personer og ytterligere åtte personer ble sendt til sykehus med røykskader. Sjåførene av begge vogntogene ble drept, og var så hardt skadd av brannen, at det ikke kunne bestemmes om det var røyken eller flammene som var dødsårsaken. Flertallet av de ni andre som omkom ble funnet i bilene sine. De har trolig blitt værende i bilene sine i håp om å bli reddet, i stedet for å bruke den parallelle evakueringstunnelen. Totalt er det 64 innganger til evakueringstunnelen, noe som tilsvarer en inngang hver 250 m. Det var flere som valgte å bruke disse for å komme seg i sikkerhet, også blant de omkomne. Etter å ha kommet seg til sikkert sted, skal noen av de evakuerte ha returnert til bilene sine for å hente verdisaker, og dermed blitt eksponert for dødelig mengde røyk og temperatur [70].



Figur 22: Bildet er tatt fra samme sted som Figur 21. Her er same vogntog helt utbrent [88].

På tidspunktet for brannen var ventilasjonsstrategien i tunnelen hovedsakelig vertikal ventilasjon. I noen tilfeller kunne dette kombineres med horisontal, slik at det ble toveis ventilasjon. På grunn av utbedringsarbeid i tunnelen, var ventilasjonssystemet under rehabilitering i 2001, og hadde ikke like stor effekt som først planlagt. Den store røykutviklingen fra brannen skapte derfor problemer. Røyken spredde seg i store deler av tunnelen, før ventileringen ble skrudd opp til full styrke og fikk fjernet røyk på en effektiv måte [70].

I etterkant av brannen hastet det med å få åpnet tunnelen igjen. Allerede to måneder etter brannen var det fri ferdsel for personbiler, mens det for tyngre kjøretøy ble innført passeringstider. I én time, hver 2.-4. time kunne tyngre kjøretøy passere fritt [69].

4.1.4 Fréjus

Fréjustunnelen ligger på en av de viktigste transittrotene i Alpene. Tunnelen er omtrent 12,9 km lang, og går mellom Modane i Frankrike og Bardonecchia i Italia. Den ble åpnet i 1980, og ble oppført som en ettløpstunnel med ett kjørefelt i hver kjøreretning. Selv om tunnelen er et viktig bindeledd mellom Frankrike og Italia, er ikke trafikkmengden veldig stor. ÅDT ligger i snitt på 5 000 kjøretøy. Viktigheten av tunnelen kommer frem i det at omtrent 50 % av disse kjøretøyene er tyngre kjøretøy, som vogntog [71].



Figur 23: Vogntoget som tok fyr i Fréjustunnelen i 2005 [87].

4. juni 2005 oppstod det brann inne i tunnelen. Et vogntog som var på vei mot Italia fikk motorproblemer, noe som resulterte i at det kom flammer fra motoren. Flammene spredde seg videre til andre deler av vogntoget som var lastet med dekk. Varme og røyk spredde seg fort i tunnelen og antente flere kjøretøy, til tross for at andre trafikanter i tunnelen holdt god avstand. 100 m fra vogntoget lastet med dekk, tok et annet vogntog, som var lastet med mozarellaost, fyr. Ytterligere 100 m borte tok enda et vogntog fyr, dette var lastet med søppel. Når søppelet startet å

brenne, ble det dannet svært giftige gasser i røyken som videre spredde seg i tunnelen. Brannen fortsatte å spre seg, og 450 m bak det siste vogntoget (650 m fra det første) tok enda et vogntog fyr. Dette var lastet med giftig lim [71]. Brannstyrken antas ut i fra størrelse på brannen og Tabell 4 til å være 150 MW.

180 innsatsstyrker og 40 utrykningskjøretøy rykket ut til tunnelen, både fra Frankrike og Italia. På grunn av høye temperaturer og tett røyk, var sløkkearbeidet krevende. Innsatsen førte til at tre brannbiler gikk tapt. I det brannvesenet ble klar over lasten i det sist antente vogntoget, ble sløkkearbeidet trappet opp. Seks timer etter at brannen oppsto, klarte de å slukke den fullstendig, og det ble forhindre at det giftige limet ble berørt av flammene [71]. På grunn av dette antas det at brannen kunne hatt et verre utfall enn hva den faktisk hadde.

21 personer ble fraktet til sykehus, hovedsakelig med røykskader, hvor ti av disse var brannmenn. To personer omkom i brannen, begge ble identifisert til sjåfører av vogntoget lastet med søppel. En ble funnet i et av tilfluktsrommene i tunnelen, mens den andre ble funnet i umiddelbar nærhet, noe som tyder på at begge prøvde å søke sikkerhet i samme tilfluktsrom [71].

Ventilasjonsstrategien i tunnelen var toveis ventilasjon, men var ikke dimensjonert til å holde unna røyken fra denne brannen. Tunnelen var ellers utstyrt med flere sikkerhetstiltak i tilfelle brann, blant annet var det elleve tilfluktsrom fordelt i tunnelen. Rommene hadde dører som skulle lukkes automatisk når temperaturen i tunnelen nådde et bestemt nivå [71]. Det kan likevel

tenkes at tilfluktsrommene ikke var konstruert godt nok, ettersom den ene omkomne ble funnet i et slikt rom.

Tunnelen var fullstendig stengt i to måneder i etterkant av brannen. I august 2005 åpnet den for personbiler, mens den var enda lenger stengt for tyngre kjøretøy [71].

4.1.5 Gudvanga

Gudvangatunnelen ligger i Sogn og Fjordane, Norge. Tunnelen skaper en forbindelse mellom Gudvangen i vest og Flåm og Aurland i øst. Den er nesten 11,5 km lang og ble for første gang åpnet i 1991. Dette er en ettløpstunnel med ett kjørefelt i hver kjøretretning, og det antas at ÅDT ligger rundt 1 600-1 700 [72].

5. august 2013 oppstod det brann i et Polsk vogntog. Vogntoget var kommet 8 km inn i tunnelen, i retning Aurland, da sjåføren av vogntoget måtte stanse på grunn av lav motorkraft. I det han gikk ut av kjøretøyet oppdaget han at det kom flammer fra motoren. Han prøvde selv å slokke brannen med et seks kg brannslukningsapparat, men dette var ikke nok. Brannen spredde seg raskt, og innen kort tid var kjøretøyet overtent. Selv om vogntoget var tomt, oppstod det tykk, sort røyk som spredde seg i tunnelen [73]. Brannstyrken antas ut i fra størrelse på brannen og Tabell 4 til å være mellom 40 og 50 MW.



Figur 24: Det polske vogntoget var helt utbrent da brannen i Gudvangatunnelen i 2013 ble slokket [86].

Alarmsentralen ble raskt varslet om brannen, og varslet videre til VTS. Brannvesen fra begge sider av tunnelen rykket ut, og totalt var det 47 innsatsstyrker inne i tunnelen. Det tok ikke lang tid før brannvesenet fra Aurland kunne melde om at brannen nesten var slokket, ettersom vogntoget var tomt, og dieseltankene brant fort opp. Likevel skapte varmen og røyken fra brannen stor fare for personer inne i tunnelen. Det raste store steiner like ved brannstedet, og sikten var beskrevet til å være 0-2 m, noe som gjorde redningsarbeidet krevende [73].

Totalt 58 kjøretøy ble registrert inne i tunnelen i det brannen oppstod, og ytterligere 18 kjøretøy skal ha kommet inn i tunnelen før den ble stengt. Det er ikke loggført noe i forbindelse med trafikanter i tunnelen, men ut ifra tilbakemeldinger fra trafikantene selv, kan det gjøres rede for 67 personer. Flere av disse opplevde å bli fanget i røyk før de kom seg ut i det fri [73].

Ventilasjonen i tunnelen har en forhåndsbestemt retning mot Gudvangen, med en hastighet på 2 m/s. Dette er på grunn av at brannvesenet i Aurland har kortest utrykningstid til tunnelen. Denne forhåndsbestemte strategien resulterte i at røyken ble ledet 8,5 km gjennom tunnelen, før den nådde ut i det fri. Dermed ble omtrent hele tunnelen ble fylt med røyk, noe som førte til at 67 personer måtte evakuere. Det tok omtrent 1,5 timer før røyken begynte å velte ut tunnelåpningen ved Gudvangen [74].

Tunnelen ble totalt stengt i underkant av 3 uker etter brannen, og åpnet først for kolonnekjøring for busser og vogntog. I etterkant av brannen ble det gjort en del utbedringer. Det ble blant

annet bestemt at hele ventilasjonssystemet skulle fornyes, og at nye ventilatorer skulle monteres [75].



Figur 25: Bussen som brant i Gudvangatunnelen i 2015 var også helt utbrent da brannen ble slokket [90].

Nesten nøyaktig to år senere, 11. august 2015, oppstod det på ny en brann i Gudvangatunnelen. Flammer brøt ut i en svensk turistbuss, 500 m fra tunnelåpningen mot Aurland. Bussen ble overtent, men sjåføren og alle passasjerene kom seg i sikkerhet. Totalt var det 5 personer som fikk røykskader, hvor 4 ble kategorisert som alvorlig [60]. Brannstyrken antas ut i fra størrelse på brannen og Tabell 4 til å være 30 MW.

Selv om ventilasjonssystemet var nytt etter brannen i 2013, var den forhåndsbestemte retningen på dette tidspunktet fortsatt mot Gudvangen. På ny var røyken i ferd med å bli ledet gjennom store deler av tunnelen, før den kom ut i det fri [76]. Dersom ventilasjonen ikke hadde vært aktivert, er det grunn til å tro at røyken ville forlatt tunnelen i retning Aurland av seg selv. Dette på grunn av trykkforskjeller i og utenfor tunnelen, og den korte avstanden fra brannen og til friluft.

Det tok omtrent 30 minutter før ventilasjonsretningen ble oppdaget som et problem. På dette tidspunktet ble retningen manuelt snudd tilbake mot Aurland, slik at bilistene i tunnelen ikke lenger ble eksponert for røyk. En ventilasjonshastighet på 2 m/s i 30 minutter tilsvarer en distanse på 3,6 km. Som et resultat av dette kan det tenkes at unødvendig mange trafikanter ble fanget i røyken [60].

Etter den siste brannen ble det på nytt avgjort at ventilasjonen skulle oppgraderes, sammen med en rekke andre utbedringer. Det er også gjort en undersøkelse av SHT, hvor det vurderes om den forhåndsbestemte ventilasjonsstrategien skal avskaffes i Gudvangatunnelen [76].

4.2 Oppsummering

De seks brannene som er nevnt over, er alle branner som gir viktig lærdom. Ut ifra disse hendelsene kan det oppsummeres noen hovedpunkt som er viktige å tenke på når det kommer til tunnelbrann.

4.2.1 Brannobjekt

I forhold til statistikk har det oppstått langt flere tunnelbranner enn de fem som er nevnt over. Typisk for alvorlige tunnelbranner er at det minst er ett tyngre kjøretøy involvert i brannen. Branner hvor en eller to personbiler er eneste involverte, vil oftest ikke utvikle seg til å bli en trussel for personer. En slik brann vil fort dø ut av seg selv, og røykproduksjonen vil ikke bli like kraftig som for vogntog [50].

Tyngre kjøretøy har mer energi lagret i seg, enn hva en personbil har. Dette kommer blant annet av større drivstofftanker og motorer, samtidig som de fysisk er større og dermed har mer brennbart materiale.

4.2.2 Last

Ulike materialer brenner ulikt. På grunn av dette vil lasten til kjøretøyene påvirke brannen [49]. Likevel viser brannen i Gudvangatunnelen at brann i vogntog uten last også kan være kritisk.

Dette er på grunn av all energien som er lagret i selve kjøretøyet. Denne brannen varte i rundt én time, og selv om utfallet kunne blitt kritisk her, viser det seg at brann i vogntog med last ofte vil få et verre utfall.

Både i St. Gotthard og Fréjus var vogntogene som brant lastet med dekk. Dette forårsaket en kraftig røykproduksjon og hurtig brannvekst. På grunn av lasten kan temperaturer under en brann bli svært høye, og dermed øker sannsynligheten for brannspredning. Som i flere av brannene som er beskrevet, viser det seg at mindre selvsagt brannfarlig last også vil få store konsekvenser under en brann.

Ut i fra dette kan det konkluderes med at brann i tyngre kjøretøy kan føre til farlige situasjoner både med og uten last, men mengden last i et vogntog vil påvirke varighet og størrelse av brannen.

4.2.3 Ventilasjon

Ventilasjon påvirker i hovedsak hvordan røyk sprer seg inne i tunnelen, men vil også ha noe å si for brannspredningen [77]. Dette kom tydelig frem under brannen i Mont Blanc. Brannen spredde seg i samme retning som ventilasjonen, og forårsaker antennelse av 35 kjøretøy bak vogntoget hvor brannen startet. Brannen i Fréjus spres også som et resultat av ventilasjonen. I begge disse branntilfellene er det fenomenet flame impingement som forårsaker brannspredningen. Kjøretøyene som ble involvert i disse to brannene befant seg med store avstander fra selve brannstedet.

Gudvanga er et skrekkeeksempel på hvordan ventilasjonen kan påvirke røykspredning. Unødvendig mange kan bli fanget i røyk dersom brannen oppstår på et ugunstig sted i tunnelen, i forhold til hvordan ventilasjonen er bestemt på forhånd.

4.2.4 Innsats

Brannvesenets innsats vil være en avgjørende faktor under tunnelbrann. Hvor fort de ankommer brannstedet og får startet bekjempelse av brannen, vil påvirke omfanget [11]. For innsatsstyrkene vil ventilasjonsretning være avgjørende for hvor effektivt rednings- og slokkearbeidet deres blir. Under brannen i Mont Blanc førte ventilasjonen til fullstendig hindring av innsats, da varme og røyk gjorde det umulig å ta seg frem. Både røyk- og varmeproduksjon under en tunnelbrann vil føre til krevende forhold for innsatsstyrker, noe som kommer tydelig frem i de nevnte brannene. Ut i fra disse er det grunn til å tro at tidligere innsats kunne redusert omfanget.

5 Risikoanalyse

Risiko er en kombinasjon av sannsynligheten for og konsekvensene av en uønsket hendelse [16]. Det er i forbindelse med denne oppgaven blitt utarbeidet en risikoanalyse av Operatunnelen. Analysen er utarbeidet med hensyn til personsikkerhet.

Målet med risikoanalysen er å identifisere hvilke uønskede hendelser som kan oppstå i Operatunnelen, for så å vurdere hvilket omfang hendelsene kan få. En slik analyse vil fortelle hvor god sikkerheten i tunnelen er.

5.1 Risikoanalyse

En risikoanalyse utføres for å kartlegge og beskrive risiko, enten det er knyttet til et tiltak, en aktivitet, et system eller en situasjon. Grovt sett kan en si at en risikoanalyse skal kunne presentere et risikobilde, og gi svar på tre grunnleggende spørsmål:

- Hva kan gå galt?
- Hvilke konsekvenser kan de uønskede hendelsene medføre?
- Hva er sannsynligheten for at de uønskede hendelsene inntreffer?

Et overordnet risikobilde av en uønsket hendelse vil kunne danne et godt beslutningsgrunnlag for videre risikostyring [78].

5.1.1 Beskrivelse av analyseprosessen

Hvordan en risikoanalyse blir seende ut, vil variere litt med hva som skal analyseres. Ulike analyseobjekter vil kreve forskjellig, men i all hovedsak består arbeidet med en risikoanalyse av seks delprosesser [79]. Prosessene er presentert under.

1. *Beskrivelse av analyseobjektet*

For å danne et godt grunnlag for en risikoanalyse er det viktig med en grundig beskrivelse av analyseobjektet. Her skal alle relevante sider ved objektet være med, samt at de avgrensningene som må utføres i forbindelse med analysen skal beskrives. Det må komme frem av beskrivelsen hvorfor det er nødvendig med en risikoanalyse av det valgte objektet. Ofte vil det være en fordel å definere akseptkriterier allerede i denne fasen av risikoanalysen, slik at det tidlig avklares hva som er akseptabel risiko og ikke [2].

2. *Kartlegging av uønskede hendelser*

Denne delen av analysen innledes ved ett enkelt spørsmål: «Hva kan skje?» Beste måten å utføre denne kartleggingen er å arrangere en idédugnad blant ulike parter som vil ha noe med analyseobjektets risiko å gjøre. De uønskede hendelsene som blir identifisert i denne fasen, vil danne grunnlaget for resten av analysen. Det er derfor viktig at hendelsene omfatter tidligere hendelser og nesten-ulykker, mulige hendelser og hendelser som sannsynligvis ikke kommer til å inntreffe, men som vil ha store konsekvenser om de først skulle skje [2].

3. *Konsekvens- og sannsynlighetsvurdering*

Etter idédugnad og vurdering av statistikk og tidligere hendelser, må det utføres en prioritering blant de uønskede hendelsene. Analysen vil fort bli for omfattende om alle hendelser skal tas hensyn til. Hendelser med svært lav risiko vil ofte falle bort fra analysen. Dette er typisk hendelser med lav sannsynlighet og/eller lav konsekvens for både personer, miljø og materielle verdier [79].

Det vil være nødvendig å utføre en konsekvensvurdering av hendelsene. Da ses det på hvilket skadeomfang hver enkelt uønsket hendelse kan medføre for personer, miljø og materielle verdier. Det vil være en forskjell i prioritering av skader, hvor personskader oftest anses på som mest kritisk [79]. Kategorisering av konsekvens deles ofte inn på følgende måte som vist i Tabell 10.

Tabell 10: Oversikt over hvordan vurdering av konsekvens utføres [2].

Klasse	Konsekvens	Personer	Miljø	Materielle verdier
1.	Ubetydelig	Ubetydelige personskader	Ubetydelig miljøskade	Ubetydelige materielle skader
2.	Mindre alvorlig	Mindre personskader	Mindre miljøskader	Mindre materielle skader
3.	Betydelig	Betydelige personskader	Betydelige miljøskader	Betydelige materielle skader
4.	Alvorlig	Alvorlige personskader	Alvorlige miljøskader	Alvorlige materielle skader
5.	Svært alvorlig	Dødsfall	Svært alvorlige miljøskader	Fullstendig materiell ødeleggelse

Etter en konsekvensvurdering er det nødvendig å fastsette hvor ofte de ulike hendelsene vil inntreffe. Dette vil si å fastsette sannsynligheten til hendelsene. Metoder som blir brukt her er å se på tidligere hendelser, statistikk og bruke egne erfaringer. Her vil det være nødvendig å se på hvilke tiltak som er iverksatt for å eventuelt redusere denne sannsynligheten [79]. Typisk kan sannsynlighetskategoriene være delt inn slik som i Tabell 11:

Tabell 11: Oversikt over inndeling av sannsynlighet [2].

Klasse	Sannsynlighet	Forklaring
1.	Lite sannsynlig	Sjeldnere enn én hendelse per 100 år
2.	Mindre sannsynlig	1 gang per 100 år eller oftere
3.	Sannsynlig	1 gang per 10 år eller oftere
4.	Meget sannsynlig	1 gang per år eller oftere
5.	Svært sannsynlig	10 ganger per år eller oftere

For å få et godt bilde av både konsekvens og sannsynlighet er det viktig å også vurdere små hendelser, ettersom de kan føre til større hendelser. Dette blir årsakskjede. Det å ha gode rutiner i å vurdere årsakskjeder vil være med på å skape god forebyggende tankegang, og dermed redusere sannsynligheten for de ulike uønskede hendelsene [2].

4. Vurdering av risiko

Når både konsekvens og sannsynlighet er fastsatt, presenteres de uønskede hendelsene i en risikomatrise. En slik matrise vil være med på å skape en enkel og ryddig oversikt over de hendelsene som er valgt ut i risikoanalysen [2]. I en slik matrise blir hendelsene delt inn i tre ulike områder:

Grønt område:	Akseptabel risiko	→	ALARP-tiltak vurderes
Gult område:	Akseptabel risiko	→	Videre undersøkelser bør vurderes
Rødt område:	Ikke akseptabel risiko	→	Risikoreduserende tiltak er påkrevd

Grønt område symboliserer at risikoen er akseptabel i forhold til lover og forskrifter. For denne typen risiko vil bare helt selvsagte risikoreduserende tiltak bli vurdert. Effekten må være større enn kostnadene [2].

Gult område symboliserer middels risiko. Dette er også et område med akseptabel risiko, men det bør hele veien vurderes ulike risikoreduserende tiltak som kan senke risikoen. For uønskede hendelser som havner i dette området vil det i enkelte tilfeller være nødvendig å utføre en mer detaljert analyse, for å vurdere om det faktisk er akseptabelt eller ikke. Også her vil kostnad og effekt være avgjørende for hvilke tiltak som blir iverksatt [2].

Rødt område symboliserer høy risiko, noe som ikke er akseptabelt. For alle hendelser som havner i dette området, må det iverksettes risikoreduserende tiltak [2].

En risikomatrix vil typisk se ut som matrisen i Figur 26 under:

Konsekvens:	1. Ubetydelig	2. Mindre alvorlig	3. Betydelig	4. Alvorlig	5. Svært alvorlig
Sannsynlighet:					
5. Svært sannsynlig	6	7	8	9	10
4. Meget sannsynlig	5	6	7	8	9
3. Sannsynlig	4	5	6	7	8
2. Mindre sannsynlig	3	4	5	6	7
1. Lite sannsynlig	2	3	4	5	6

Figur 26: Typisk utforming av en risikomatrix [2].

5. Risikoreduserende tiltak

Ut i fra risikomatriksen skal risikoreduserende tiltak rangeres ut i fra hvordan de uønskede hendelsene kategoriseres. Tiltakene skal vurderes med hensyn på både personskader og skade på miljø, men også i sammenheng med kostnader. Det kan være en krevende jobb å rangere hvilke hendelser som er viktigst, spesielt å gjøre en vurdering av hva som er viktigst av konsekvens og sannsynlighet [79].

Alle tiltak som blir vurdert, må ses opp mot en kostnad. Er det en stor nok nytteverdi til at det blir økonomisk lurt å iverksette de tiltakene som er ønskelig? Kostnadene må ses i sammenheng med de ulike følgene en uønsket hendelse kan få for både personer, miljø og sikkerhet [2].

6. Presentasjon av risiko

Etter at de uønskede hendelsene er identifisert, vurdert og risikoreduserende tiltak er foreslått, vil det være nyttig å presentere resultatene i en rapport. Her skal det være en oppsummering av de fem øvrige punktene i analysen, og rapporten skal være tilgjengelig for alle som kan ha nytte av den. De hendelsene hvor det må iverksettes risikoreduserende tiltak, skal presenteres i rapporten sammen med forslag til hvilke tiltak som må iverksettes, samt forslag til ytterligere tiltak for å redusere risikoen [2].

5.2 Resultat av risikoanalysen

Oslo brann- og redningsetat har uttrykt at tidligere risikoanalyser av Operatunnelen ikke er tilstrekkelige, ettersom de ikke har tatt hensyn til rush-problematikken som Oslo daglig opplever. Det er derfor blitt utarbeidet en enkel risikoanalyse med hovedfokus på dette problemet. I analysen er det tatt hensyn til konsekvenser knyttet til personer. Konsekvenser knyttet til miljø og materielle verdier er sett bort ifra, fordi problemstillingen med russtrafikk er vurdert til å ikke ha spesiell innvirkning på disse kategoriene.

Operatunnelen er en av 18 høytrafikkerte bytunneler i Norge. Tunneler i denne kategorien har to løp og ÅDT over 25 000 [11]. I Tabell 12 er den mest relevante informasjonen om Operatunnelen oppsummert.

Tabell 12: Teknisk informasjon om Operatunnelen [11].

ÅDT	100 000 (4 000 i makstimen)
Antall løp	2
Antall kjørefelt	3 i hvert løp, hvor 1 er utilgjengelig for vogntog
Lengde	6,6 km
Bredde	12 m per løp
Videoovervåking	Ja, video med AID
Radiodekning	Ja
Nødutganger	Ja, hver 250 m
Nødstasjoner (brannslukker og telefon)	Ca. 8 per km
Ventilasjon	Dimensjonert for 100 MW
Ventilasjonsretning ved brann	Med trafikketningen
Innsatstid for brannvesenet	12-13 minutter

Ved hjelp av idédugnad og tidligere tunnelbranner er det vurdert ni ulike hendelser i analysen, hvor fem av disse blir videreført. Disse er valgt ut ved en grov analyse av sannsynlighet og konsekvens. Alle hendelsene inkluderer tyngre kjøretøy, ettersom det er denne typen kjøretøy som utgjør størst fare ved brann [49]. Hendelsene som er tatt med i risikoanalysen er vist i Tabell 13 på neste side.

Tabell 13: Identifiserte uønskede hendelser i Operatunnelen.

Uønsket hendelse	Sannsynlighet	Konsekvens	Risiko
Vogntog kolliderer med personbil ved feltskifte	Middels/lav Hendelsen oppstår under saktegående russtrafikk, føreren av vogntoget vil ha god tid til å orientere seg.	Høy/middels Kan resultere i brann, brann i vogntog kan gi katastrofale utfall.	Middels/høy
Brann i vogntog som følge av varmgang i bremseser	Middels/høy Det er et kjent problem for tyngre kjøretøy at langvarig bremsing fører til varmgang i bremseser.	Høy Høye temperaturer i områdene rundt bremsene kan føre til brann. Brann i vogntog kan gi katastrofale utfall.	Høy
Brann i vogntog som følge av feil i motor	Middels/høy Varmgang som følge av feil i motor er et kjent problem for tyngre kjøretøy.	Høy Høye temperaturer i motoren kan føre til brann. Brann i vogntog kan gi katastrofale utfall.	Høy
Brann i buss som følge av feil i motor	Middels Varmgang som følge av feil i motor er et kjent problem for buss, men det er få busser som passerer gjennom tunnelen.	Høy Høye temperaturer i motoren kan føre til brann. Brann i buss kan gi katastrofale utfall.	Høy/middels
Kjedekollisjon mellom vogntog og personbiler	Middels Hendelsen oppstår under saktegående russtrafikk, trafikantene kan bli uoppmerksomme etter lengre kjøring i saktegående trafikk.	Høy/middels Det kan oppstå brann, og med mange biler involvert kan dette få et katastrofalt utfall.	Middels/høy

Videre i analysen er det forutsatt at alle hendelsene fører til brann. Begge hendelsene med brann i vogntog viser seg å ha samme sannsynlighet, og blir dermed satt sammen til en hendelse under konsekvens- og sannsynlighetsvurderingen. Hendelsen blir kalt *Brann i vogntog som følge av varmgang i bremseser eller feil i motor*.

5.2.1 Presentasjon av risikoen

I gjennomsnitt har det vært 21 branner per år i norske tunneler de siste ti årene. Ut i fra statistikk kan det antas at rundt tre av disse brannene har oppstått i bytunneler som Operatunnelen. Dette tilsier at det er 0,166 branner per år i hver av de 18 bytunnelene, noe som tilsvarer én brann i løpet av seks år. Det anslås at ca. 55 % av disse brannene oppstår i tyngre kjøretøy [11]. Omfanget av en brann i tyngre kjøretøy vil variere med lasten, men det er valgt å se bort i fra denne faktoren i analysen. Dette kommer av at tyngre kjøretøy uten last også kan føre til store branner [73].

Evakuering og redning av personer i tunnel, baserer seg i all hovedsak på selvredningsprinsippet. Dette vil si at personer som befinner seg i tunnelen selv må komme seg til sikkert sted, uavhengig av redningspersonell [80]. For en hendelse i Operatunnelen under rushtrafikk vil dette si at personer helst må ta seg ut av tunnelen til fots, da trafikken vil være så å si stillestående.

Det er lovbestemt at innsatstiden til brannvesenet ikke skal overstige 10 minutter i tettbebyggelse [81]. I en risikoanalyse utarbeidet av DSB er innsatstiden for brannvesenet i Oslo antatt å være 4 minutter til Operatunnelen [11]. Dette anses som urealistisk. Basert på erfaringer og antakelser gjort av utrykningspersonell fra Oslo brann- og redningsetat, er innsatstiden estimert til å være 12-13 minutter.³ Dette er 2-3 minutter lenger enn hva lovgivningen sier, og det kan gi store konsekvenser for de valgte scenariene. For å hindre at innsatstiden blir enda lenger, er det lagt inn forbud for vogntog i kjørefeltet lengst til venstre, i begge tunnellopene.³ Dette fordi det er enklere for personbiler å gi plass til store utrykningskjøretøy, enn det er for vogntog. Tre vogntog på rekke vil sperre hele tunnelbredden fullstendig

I Operatunnelen vil brannvesenet ha mulighet til å angripe brannstedet via det uberørte tunnellopet. Ved å benytte seg av motsatt løp vil innsatsstyrkene ha en mer effektiv innsats. Dette kommer av at de vil ha en kort angrepsvei uansett hvor i tunnelen brann oppstår. Den korte angrepsveien fører igjen til et kortere opphold i røyk, da innsatsstyrker ikke må bevege seg langt i en røykfylt tunnel. Dette reduserer og faren for å miste utrykningskjøretøy i brannen, noe som har vært et gjentakende i branner i ettløpstunneler (se Tabell 9).

Vogntog kolliderer med personbil ved feltskifte

Ut i fra vurderingene som er gjort i analysen antas omfanget av ulykken å være som følgende:

Tabell 14: Estimert omfang av hendelsen: Vogntog kolliderer med personbil ved feltskifte

Antatt antall drepte	3-5
Antatt antall fysisk skadde	10-15
Antatt antall psykisk skadde	0-7

Hendelsen havner under kategorien «Svært alvorlig».

³ Etter samtale med Redningsleder Per-Erik Landskaug, brigade B ved Hovedbrannstasjonen i Oslo, 23. februar 2016.

Sannsynligheten for en slik hendelse er estimert til å være én gang per 220 år. Brannen antas å nå en størrelse på 120 MW. Dette utgjør ca. 5 % av alle branner i tyngre kjøretøy. Hendelsen havner i kategorien «Lite sannsynlig».

Brann i vogntog som følge av varmgang i bremses eller feil i motor

Ut i fra vurderingene som er gjort i analysen antas omfanget av ulykken å være som følgende:

Tabell 15: Estimert omfang av hendelsen: Brann i vogntog som følge av varmgang i bremses eller feil i motor.

Antatt antall drepte	0
Antatt antall fysisk skadde	5-10
Antatt antall psykisk skadde	0-2

Hendelsen havner under kategorien «Alvorlig».

Sannsynligheten for en slik hendelse er estimert til å være én gang per 90 år. Brannen antas å nå en størrelse på 100 MW. Dette utgjør ca. 6 % av alle branner i tyngre kjøretøy. Hendelsen havner i kategorien «Mindre sannsynlig».

Brann i buss som følge av feil i motor

Ut i fra vurderingene som er gjort i analysen antas omfanget av ulykken å være som følgende:

Tabell 16: Estimert omfang av hendelsen: Brann i buss som følge av feil i motor.

Antatt antall drepte	0
Antatt antall fysisk skadde	5-10
Antatt antall psykisk skadde	0-10

Hendelsen havner under kategorien «Alvorlig».

Sannsynligheten for en slik hendelse er estimert til å være én gang per 70 år. Brannen antas å nå en størrelse på 60 MW. Dette utgjør ca. 15 % av alle branner i tyngre kjøretøy. Hendelsen havner i kategorien «Mindre sannsynlig».

Kjedekollisjon mellom vogntog og personbiler

Ut i fra vurderinger gjort i analysen antas omfanget av ulykken å være som følgende:

Tabell 17: Estimert omfang av hendelsen: Kjedekollisjon mellom vogntog og personbiler.

Antatt antall drepte	6-9
Antatt antall fysisk skadde	15-20
Antatt antall psykisk skadde	5-

Hendelsen havner under kategorien «Svært alvorlig».

Sannsynligheten for en slik hendelse er estimert til å være én gang per 360 år. Brannen antas å nå en størrelse på 180 MW. Dette utgjør ca. 3 % av alle branner i tyngre kjøretøy. Hendelsen havner i kategorien «Lite sannsynlig».

5.2.2 Risikobildet

Ut i fra konsekvens- og sannsynlighetsvurderingene over, blir hendelsene plassert i risikomatriksen under. Hendelsene er nummerert på følgende måte:

- 1 Vogntog kolliderer med personbil ved feltskifte
- 2 Brann i vogntog som følge av varmgang i bremses eller feil i motor
- 3 Brann i buss som følge av feil i motor
- 4 Kjedefeksjon mellom vogntog og personbiler

Konsekvens:	1. Ubetydelig	2. Mindre alvorlig	3. Betydelig	4. Alvorlig	5. Svært alvorlig
Sannsynlighet:					
5. Svært sannsynlig	6	7	8	9	10
4. Meget sannsynlig	5	6	7	8	9
3. Sannsynlig	4	5	6	7	8
2. Mindre sannsynlig	3	4	5	6 2,3	7
1. Lite sannsynlig	2	3	4	5	6 1,4

Hendelsene havner på gult område. Dette betyr at risikoen er akseptabel, men at videre undersøkelser bør vurderes for å redusere risikoen ytterligere [2]. Sannsynligheten for at hendelsene inntreffer er svært liten, men de har potensial til å få alvorlige og svært alvorlige konsekvenser. Dette er grunnen til at tiltak bør vurderes for å minske konsekvensene etter at hendelsene har inntruffet.

I en slik vurdering er det viktig å ivareta ulike interesseområder, både økonomisk og sikkerhetsmessig. Alle tiltak som blir vurdert, må ses opp mot kostnad [79]. Er det en stor nok nytteverdi til at det blir økonomisk lurt å iverksette de tiltakene som er ønskelig? Kostnadene må ses i sammenheng med de ulike følgene en uønsket hendelse kan få for personer. Brannvesenet og Vegvesenet bør derfor sette seg et felles mål om å redusere risikoen, slik at den kommer opp mot grønt felt.

A photograph showing a large fire in a tunnel. Multiple high-pressure water jets are being sprayed from the ceiling onto the fire, which is a bright, intense yellow and orange. The tunnel walls are visible, and there are some pipes and cables running along the ceiling. The scene is dimly lit, with the primary light source being the fire and the water jets.

6 Anbefalinger

Operatunnelen er utstyrt med alle sikkerhetstiltak som er standard i Norge. Dette gjør tunnelen til en av de best sikrede i landet. Den årlige trafikkmengden i tunnelen gjør at sikkerhetstiltakene er et minimumskrav [26]. Dersom det oppstår brann, er det stor sannsynlighet for at mange trafikanter blir rammet. Konsekvenspotensialet ved en brann er dermed så stort at alle standard sikkerhetstiltak må tas i bruk for å kompensere for dette.

For å senke risikoen ytterligere, kan det være nyttig å se på løsninger som er benyttet i andre land.

6.1 Anbefalte tiltak

Risikoanalysen viser at selv med alle sikkerhetstiltakene vil risikoen ligge tett opp mot uakseptabel. For å senke risikoen ytterligere, kan det være nyttig å se på løsninger som er benyttet i andre land. Det som er viktig når slike tiltak skal vurderes, er å ikke bare ta hensyn til sikkerheten de skaper, men også hva de krever økonomisk. Hendelsene som er analysert viser seg å ha svært lav frekvens, dermed er det viktig å vurdere om nytteverdien til et tiltak er stor nok i forhold til kostnaden. Det er likevel valgt å ikke gå grundig inn på kostnad for de ulike tiltakene som blir anbefalt, dette fordi kostnaden kan variere etter leverandør og omfanget av tiltaket.

6.1.1 Sprinkler

I Operatunnelen kan et sprinklersystem egne seg godt, ettersom dette tiltaket helst er beregnet for høytrafikkerte tunneler [62]. Et slikt anlegg skal kontrollere en brann frem til innsatsstyrkene ankommer stedet. Sprinklerne skal ikke slukke brannen, men være med på å begrense omfanget. Tidligere tester av slike anlegg viser at det vil hindre brennbare materialer i å antenne, selv om avstanden til brannen er liten og flammene er i kontakt med materialene. På grunn av dette vil det være realistisk å si at et sprinklersystem kan begrense en brann til 50 MW, selv om den har potensial til å bli 100 MW [63]. De fleste brannene som er tatt med i risikoanalysen, overstiger 100 MW. En halvering i størrelsen av disse brannene, vil redusere konsekvensene betraktelig. Dette fordi brannen ikke vil spre seg i samme grad, samtidig som brannvesenet enklere kan håndtere en brann som er begrenset til 50-100 MW [61].

Det er ikke mange ulemper knyttet til selve løsningen med sprinkleranlegg i tunnel dersom anlegget er rett dimensjonert, men selve dimensjoneringsprosessen kan være vanskelig. Dersom anlegget ikke er tilstrekkelig dimensjonert, kan dette skape farlige forhold for trafikantene i tunnelen. For lav vannkonsentrasjon vil føre til at brannen produserer mer røyk, samtidig som CO-konsentrasjonen øker. Både vannet og økt røykproduksjon vil føre til redusert sikt. I et slikt tilfelle vil det ikke være hensiktsmessig med sprinkleranlegg, ettersom forholdene i tunnelen vil bli verre enn om brannen får brenne fritt [82].

En annen utfordring knyttet til dimensjonering, er aktiveringstemperaturen. Det er viktig å finne en temperatur som er tilpasset forholdene i hver enkelt tunnel. Ved for høy aktiveringstemperatur kan det oppstå tilfeller hvor anlegget blir aktivert for sent. Forsinket aktivering kan gi en økning av giftige gasser og røyk. Dette fordi brannen vil kunne vokse seg så stor at vannkonsentrasjonen blir for lav. På grunn av dette vil forsinket aktivering være like kritisk som om vannkonsentrasjon er for lav i utgangspunktet [82].

Det antas at dette er et tiltak med stor kostnad, men det vil kunne redusere omfanget og konsekvensen av en brann i stor grad.

6.1.2 Rampestyring

Rampestyring kan være et godt tiltak i tunneler hvor det er stor kjøproblematikk, og dermed også i Operatunnelen. Et slikt tiltak skal hindre stillestående kø inne i tunnelen, ved at et trafikklys stanser kjøretøy utenfor tunnelåpningen når tettheten blir for høy [36]. Dette kan sørge for at kjøretøy foran en hendelse hvor det oppstår brann, kan komme seg uhindret ut av tunnelen. Det vil også hindre nye kjøretøy i å kjøre inn mot brannen.

Det er rimelig å si at et slikt tiltak vil kunne redusere omfanget av en brann, ettersom det til enhver tid vil være færre biler i tunnelen enn hvis trafikken ikke er regulert. Dette kan igjen være med på å korte ned innsattstiden til brannvesenet, på grunn av at fremkommeligheten blir bedre.

Dette tiltaket er tidligere blitt tatt i bruk i tunnelen Södra Länken, Stockholm, men ble vurdert til å ikke fungere i Norra Länken. Grunnen til dette er at den estimerte trafikkmengden i Norra Länken er større enn i Södra Länken. ÅDT i Södra Länken er 60 000 – 90 000 [83]. Med større trafikkmengde er trafikkstyringen vurdert til å ikke være effektiv nok. Det er isteden fare for at det blir store opphopninger av kjøretøy ved påkjøringsrampene [84]. Det kan dermed tenkes at samme problem vil oppstå i Operatunnelen som har ÅDT på 100 000.

Det antas at dette er et tiltak med middels stor kostnad, og tiltaket vil kunne redusere omfanget og konsekvensen av en brann.

6.1.3 Varslingstavle

Brannvesenet og VTS har begrensede muligheter til å varsle trafikantene i tunnelen dersom det oppstår brann. Radiokommunikasjon er en god måte å nå ut til trafikantene, men det er ikke gitt at alle får med seg meldingene. Det er mulig å hevde at de som daglig kjører gjennom tunnelen ikke opplever noe unormalt ved at trafikken stanser fullstendig opp. De vil derfor ikke ha en grunn til å reagere, selv om det kan være et tydelig tegn på en ulykke. En mulig løsning på dette problemet kan være varslingstavler.

Varslingstavler i tunnelen vil øke sannsynligheten for at trafikantene får med seg nødvendig informasjon, selv om de ikke benytter seg av radioen i bilen. Dette vil være med på å gi kortere reaksjonstid, og kan bidra til en bedre vurdering av situasjonen. Det å starte evakueringen på et tidlig tidspunkt vil være helt avgjørende for konsekvensen av brannen.

For å få best mulig utbytte av tavlene, må det gjøres en vurdering på hvor mange som skal plasseres i tunnelen. Det er viktig at informasjonen rekker ut til flest mulig, enten i form av mange tavler eller ved at trafikanter varsler hverandre videre. Plasseringen av tavlene bør også være strategisk i forhold til nødutgangene.

Det antas at dette er et tiltak med lavere kostnad enn sprinkler og rampestyring, men det vil bare kunne redusere nødvendig rømningstid.

6.1.4 Toveis ventilasjon

Ventilasjonsystemet i Operatunnelen er dimensjonert for 100 MW, og ventilasjonsstrategien baserer seg på at alle foran hendelsen kan kjøre uberørt ut av tunnelen dersom det oppstår brann [11]. Risikoanalysen viser at en brann i Operatunnelen kan overstige 100 MW. Analysen viser også at grunnlaget for strategien ikke er godt nok under russtrafikk. Dersom det oppstår en storbrann under russtrafikk kan røyken få store konsekvenser for trafikantene.

Toveis ventilasjon vil kunne forbedre personsikkerheten. En slik løsning vil føre til at røyken blir fjernet i nærheten av brannstedet, og ikke bare på langs ved å bli blåst gjennom tunnellopet. På denne måten vil trafikantene foran brannen bli skjermet for store mengder med røyk, samtidig som faren for brannspredning reduseres.



Ettersom Operatunnelen har horisontal ventilasjon, vil det være en omfattende prosess å endre denne til toveis ventilasjon. Tunnelen vil trolig bli stengt over en lengre periode mens arbeidet pågår, dersom en slik endring i det hele tatt lar seg gjøre.

Det antas at dette er det mest kostbare tiltaket, men det vil kunne redusere omfanget og konsekvensen av en brann.

7 Diskusjon

I Norge er det totalt 18 tunneler som faller under kategorien høytrafikkerte bytunneler [11]. En av disse er Operatunnelen i Oslo. I denne tunnelen oppstår det daglig perioder med rushtrafikk. Dersom det oppstår brann i en av disse periodene, vil utfordringene og konsekvensene være større enn hvis trafikken flyter som normalt. Det er derfor utarbeidet en enkel risikoanalyse på dette punktet, og det er viktig å diskutere ulike forhold rundt denne.

Brann i tøløpstunnel med tett rushtrafikk er et tema som ikke er satt stort fokus på, sammenlignet med andre brannforløp i tunnel. Utfordringene som blir diskutert videre er derfor basert på tidligere tunnelbranner, generell teori rundt tunnel, risikoanalysen og samtaler med relevante fagfolk.

7.1 Risikoanalysen

Risikoanalysen som er utarbeidet er en enkel risikoanalyse. Hovedfokuset i denne er rushtrafikk i Operatunnelen, og for å få frem problemstillingen er det gjort noen forenklinger. For å se om analysen er realistisk nok er det dermed flere elementer som må vurderes og diskuteres.

7.1.1 Scenarier

I analysen er det valgt å se på fire ulike scenarier hvor det oppstår brann i Operatunnelen. Scenariene er valgt etter hva som vil være de mest vanlige brannårsakene i kjøretøy. Det antas derfor at disse er både aktuelle og realistiske. Likevel kan det stilles spørsmål ved om fire scenarier er tilstrekkelig for å danne et helhetlig risikobilde. Å begrense analysen på denne måten kan medføre at noen uønskede hendelser som kan ha høy risiko, ikke blir vurdert. Dersom dette er tilfelle i analysen, vil risikobildet bli svekket og være med på å skape en eventuell falsk trygghet.

Det ble opprinnelig vurdert ni ulike uønskede hendelser, men flere av disse ble vurdert til å ha for lav risiko til å bli videreført. Scenariene ble sortert ved hjelp av en enkel konsekvens- og sannsynlighetsvurdering. Videre i analysen er det gjort en grundigere vurdering av konsekvens og sannsynlighet for de valgte scenariene, for å få et så realistisk risikobilde som mulig.

7.1.2 Brannobjekt

De valgte scenariene baserer seg på at det er tyngre kjøretøy som brenner. Scenariene hvor det bare var personbiler involvert, ble tidlig eliminert. Dette fordi en brann i en personbil mest sannsynlig ikke vil bli like stor og kritisk som brann i et vogntog [49]. Gjentatte ganger har det vist seg at dersom brannen oppstår i et vogntog, vil brannen kunne vare lenge og gi et katastrofalt utfall.

Alle brannene som ble vurdert i forkant av analysen involverer tyngre kjøretøy. Det er grunn til å tro at utfallet av disse hendelsene hadde vært mindre omfattende dersom det ikke befant seg tyngre kjøretøy i tunnelene, og i bestefall kunne brannene vært unngått. På bakgrunn av dette, sammen med at statistikken sier at 55 % av norske tunnelbranner involverer tyngre kjøretøy, ble de valgte scenariene vurdert til å ha høyest risiko [11].

7.1.3 Last

Selv om alle scenariene involverer tyngre kjøretøy, er det valgt å se bort ifra last. Dette er fordi det er valgt å ha størst fokus på rushtrafikk, og et mindre fokus på hva som faktisk brenner. I flere av brannene som er presentert i Tabell 9, viser det seg at lasten påvirker varigheten og omfanget av brannen. Likevel er brannen i Gudvangatunnelen i 2013 et godt eksempel på at vogntog uten last også brenner lenge og med høy varmeproduksjon.

I rushtrafikken i Operatunnelen vil en brann i et tomt vogntog kunne få store konsekvenser. Når bilene står tett vil faren for brannspredning være stor, dermed kan det bli kritisk uavhengig av brannstørrelsen så lenge det er et tyngre kjøretøy involvert. En brann tilsvarende den i Gudvangatunnelen antas å kunne ha omtrent like stort konsekvenspotensiale som de andre tunnelbrannene som er vurdert.

7.1.4 Ventilasjon

Ventilasjonsstrategien i Operatunnelen er forhåndsbestemt, noe som påvirker hvordan røyken beveger seg inne i tunnelen. Det er ikke tatt hensyn til hvor i tunnelen de uønskede hendelsene

oppstår, og dermed ikke hvor langt røyken blir transportert inne i tunnelen. Dette kan påvirke hvor mange personer som blir fanget i røyk, og da også konsekvensen av brannen. Igjen er det problematikken rundt rushtrafikk som skal være hovedfokus i risikoanalysen, og siden den anses som en enkel analyse, er faktoren med plassering valgt vekk. Det er likevel tatt hensyn til hvordan ventilasjonen kan påvirke røyken og rømningsforholdene, med tanke på ventilasjonsretning og -kapasitet. Et problem med denne forenklingen er at det kan tenkes at scenariene kan få verre utfall, alt etter hvor i tunnelen de oppstår.

7.1.5 Innsats

Analysen baserer seg på at innsatsstyrkene benytter seg av motsatt løp når de ankommer brannstedet. Dette vil være med på å effektivisere innsatsen og verne innsatsstyrkene mot varme og røyk. Innsatstiden er likevel satt til 12 minutter. Dette kommer av at det ikke er fri passasje i motsatt løp, da det antas at det også er rushtrafikk i denne retningen.

Etter 12 minutter starter innsatsstyrkene arbeidet med å begrense brannspredningen. På grunn av forholdsvis kort innsatstid og godt tilrettelagte angrepsveier, vil antallet berørte kjøretøy holdes på et relativt lavt nivå sammenlignet med brannene i Tauern og Mont Blanc. Med lenger innsatstid er det ikke utenkelig at en brann i Operatunnelen kan komme opp på nivå med disse.

7.2 Ventilasjon og rømning

Ventilasjonsretningen i Operatunnelen er bestemt til å gå med kjøreretningen under normale forhold. Dette er først og fremst for å fjerne eksos og forurenset luft fra tunnelen på en effektiv måte. Ventilasjonen blir også brukt som røykkontroll under brann [41].

For at brannvesenet skal kunne drive effektiv slokkeinnsats trenger de røykfri adkomst til brannstedet [77]. En forhåndsbestemt strategi vil være med på å sikre dette, ettersom innsatsstyrkene til enhver tid vet hvilken retning røyken vil bli ført inne i tunnelen. Likevel vil det være ulemper rundt en slik løsning, alt etter hvor det oppstår brann. Innsatsstyrker kan bli tvungen til å benytte en påkjøringsrampe et stykke unna brannen, i stedet for korteste vei. Dersom nærmeste påkjøringsrampe befinner seg foran brannen, kan dette skape problemer for brannvesenet ettersom rampen kan være fylt med røyk i det de ankommer stedet. Dersom brannvesenet skal ta seg frem i tunnelen i tykk røyk, vil innsatsen bli svært begrenset [77]. Det vil da lønne seg å benytte en påkjøringsrampe som befinner seg bak brannen.

Som en løsning på problemet med lengre angrepsvei, har utrykningspersonell i Oslo brann- og redningsetat gode muligheter til å benytte seg av motsatt løp i Operatunnelen under innsats. Under brann vil bare det ene løpet bli fylt med røyk, og innsatsstyrkene kan bruke nødutgangene mellom løpene til å angripe brannen. Dersom de benytter seg av denne muligheten kan de forberede seg i røykfritt rom, samtidig som utrykningskjøretøyene ikke blir eksponert for høye temperaturer. Nødutgangene i Operatunnelen har en avstand seg imellom på maksimum 250 m, noe som gjør at lengden på angrepsveien ikke overstiger 125 m [11]. Den korte angrepsveien, samt skjermingen av utstyret, vil forlenge den tilgjengelige innsatstiden til brannvesenet.

Forhåndsbestemt ventilasjonsstrategi er i tillegg med på å sikre at alle som befinner seg bak en eventuell brann klarer å evakuere uten å bli omhyllt av røyk. Denne strategien baserer seg på at alle foran hendelsen kan kjøre ut av tunnelen uten å bli påvirket av røyken [11]. I Operatunnelen er det rimelig å si at dette ikke er realistisk i perioder med rushtrafikk. I disse periodene vil trafikken gå så sakte at personer må begynne å evakuere til fots for å ikke bli

fanget i røyken. Ved å se på tidligere tunnelbranner viser det seg at personer oppfører seg forskjellig ved varsling om brann. Noe som er gjentakende er at personer søker trygghet i bilene sine, og utsetter evakueringen til det er for sent. Andre utsetter evakueringen for å sikre verdier som ligger i bilene, eller for å hjelpe til med bekjempelse av brannen [85]. Personersikkerheten i Operatunnelen kan derimot anses som god på grunn av de mange nødutgangene som finnes. Største avstand til sikkert sted vil til enhver tid være 125 m. Dette forutsetter at trafikantene blir varslet på et tidlig tidspunkt, slik at evakueringen kan foregå i røykfri sone og mens det er god sikt.

I perioder med rushtrafikk vil kjøretøyene i tunnelen stå tett, og det er rimelig å si at det ikke er noen effektiv måte å tømme tunnelen på dersom det oppstår brann. Med grunnlag i dette kan en ventilasjonsstrategi som sier at røyken skal ledes ut gjennom tunnelåpningene kunne øke faren for brannspredning. I en slik situasjon er det grunn til å hevde at vertikal ventilasjon vil være en bedre løsning. Med tett trafikk vil det alltid være fare for overflatespredning av brann, men horisontal ventilasjonen vil i tillegg øke faren for brannspredning i form av flame impingement [32]. Siden faren for brannspredning er stor, er det viktig at trafikantene blir tydelig varslet slik at de forstår alvoret og kan igangsette evakueringen på et tidlig tidspunkt.

I hvor stor grad ventilasjonen påvirker brann- og røykspredningen, avhenger av hvor i tunnelen det brenner. Dersom det oppstår brann i starten av tunnellopet, vil røyken bli ført langt inn i tunnelen og forårsake store temperaturøkninger, samt øke faren for brannspredning. I tillegg vil røyken skape svært krevende rømningsforhold for mange trafikanter. Oppstår det brann i slutten av tunnellopet vil problemet være at ventilasjonen i motsatt løp kan trekke røyken med seg inn, siden denne blåser i motsatt retning. På en annen side er det mulig å snu ventilasjonen i begge disse situasjonene. Ved brann i starten av tunnellopet kan ventilasjonen bli snudd slik at røyken bruker korteste vei til friluft. Ved brann i slutten av tunnellopet kan ventilasjonen i motsatt løp snus, slik at ventilasjonen i begge løpene går i samme retning, og røyken forblir i friluft [11].

Dersom det bestemmes at ventilasjonsretningen skal snus, må det gjøres en grundig vurdering av situasjonen. Det som er viktigst å vurdere er hvor mye røyk det er, hvor langt den har blitt ført inn i tunnelen, samt om trafikantene har startet evakueringen. Dette er viktig for å ivareta personsikkerheten. Dersom trafikantene har forlatt bilene sine, og startet evakuering i motsatt retning av ventilasjonen, kan det få store konsekvenser om ventilasjonsretningen blir snudd. Ved å snu retningen kan det tenkes at røyken når igjen de som beveger seg til fots, og dermed gjør rømningsforholdene svært vanskelige.

Ventilasjonsystemet i Operatunnelen er dimensjonert for 100 MW [11]. På grunn av forholdene i Operatunnelen, kan det stilles spørsmål ved om langsgående ventilasjon opp til 100 MW er tilstrekkelig. Perioder med rushtrafikk, og stor andel tyngre kjøretøy gjør at en brann fort kan vokse seg større enn dette. Hovedproblemet med langsgående ventilasjon i Operatunnelen, vil være at mange trafikanter potensielt kan bli fanget i røyk. For å forhindre dette kan toveis ventilasjon være en løsning, slik at røyk fjernes aktivt både ved langsgående ventilasjon og røykavtrekk i taket.

Til syvende og sist er det rimelig å si at det er røyken som skaper de største utfordringene for personer under en brann. Ventilasjonen er i bunn og grunn ikke en utfordring i seg selv, men kan være med på å skape utfordringer i det tunnelen blir fylt med røyk.

7.3 Fremkommelighet og innsats

Det er lovbestemt at innsatstiden til brannvesenet ikke skal overstige 10 minutter i tettbebyggelse [81]. Ved innsats i tunnel må det ofte forventes lengre innsatstid, på grunn av krevende forhold med tanke på trafikk og antall angrepsveier [45]. Tett trafikk kan være en utfordring da utrykningskjøretøy er store og krever god plass for å komme seg frem.

Det er per i dag ikke gjennomført offisielle øvelser av brannvesenet hvor målet er å finne innsatstid til ulike steder i Operatunnelen under russtrafikk. Innsatstiden er i denne oppgaven estimert til å være 12-13 minutter. På den ene siden kan dette anses som lang innsatstid, ettersom det er lovbestemt at denne ikke skal overstige 10 minutter. Tiden DSB har brukt i sin risikoanalyse av Operatunnelen er estimert til å være 4 minutter, og ligger dermed innenfor lovverket [11]. På en annen side er det viktig å se realistisk på forholdene. Under russtrafikk vil ikke 12-13 minutter være lenge. I disse periodene vil det være kø i alle kjørefeltene i begge tunnellopene, noe som reduserer fremkommeligheten til utrykningskjøretøyene kraftig. Det kan også tenkes at innsatstiden kan bli lenger, nettopp på grunn av køproblematikken. For å lette dette problemet er det lagt inn forbud for vogntog i ett kjørefelt i hvert løp.³ Likevel garanterer ikke denne løsningen kort innsatstid, men den vil skape en garanti for at innsatsstyrkene kommer seg til brannstedet.

VTS har til enhver tid god oversikt over Operatunnelen gjennom kameraovervåkning [11]. Dette sikrer tidlig varsling av hendelser som brann, samtidig som det vil gi et oversiktlig bilde over hendelsen. På grunn av dette vil brannvesenet kunne motta grundig informasjon om hvor i tunnelen det brenner, og hvor mange kjøretøy som er involvert. I løpet av de 12-13 minuttene brannvesenet bruker på å ankomme tunnelen, vil VTS kunne holde de oppdatert på hvordan brannen utvikler seg. En annen fordel med kameraovervåkning er at innsatsstyrkene også har mulighet til å vurdere hvilken påkjøringsrampe de skal benytte når de ankommer tunnelen. Det er dermed grunn til å hevde at innsatsstyrkene møter godt forberedt, og allerede før ankomst kan planlegge hvordan de skal angripe brannen.

I tillegg til kameraovervåkning er tunnelen utstyrt med radiodekning.⁴ Etter at VTS har oppdaget en hendelse i tunnelen, kan de benytte radio til å informere trafikantene. Denne muligheten kan hjelpe utrykningskjøretøyene i å nå hendelsen på en effektiv måte. Trafikantene kan på et tidlig tidspunkt begynne å klarere det ene kjørefeltet. Ulempen med dette tiltaket er at trafikantene må ha radioen i bilen på og stilt inn på rett frekvens, for at de skal få inn varslingsene fra VTS.

Det er for så vidt ikke bare på vei til brannstedet innsatsstyrkene møter på utfordringer. Det er grunn til å tro at antall personer og kjøretøy i tunnelen vil kunne være til hinder under selve slokkearbeidet. For det første er det lagt opp til at innsatsstyrkene skal benytte seg av motsatt løp, og dermed samme nødutganger som personer som evakuerer. Dette kan skape problemer, da personer og innsatspersonell vil bevege seg i motsatt retning gjennom samme dør. For det andre kan det være mange personer som oppholder seg i tunnellopet hvor det brenner. Dette fører til at innsatsstyrkene må prioritere å evakuere disse foran slokking. For det tredje vil kjøretøyene som står forlatt etter evakueringen være til hinder. På grunn av disse kan innsatsstyrkene risikere å måtte ta større omveier for å få tilrettelagt slokkeutstyret på best mulig

⁴ Observert under kjøretur gjennom Operatunnelen, 23. februar 2016.



måte. På en annen side kan det likevel antas at evakueringen nærmest brannstedet er ferdig innen de 12 første minuttene etter brannstart. Dermed bør ikke personer i tunnelen være et stort problem. Det kan derfor tenkes at forlatte kjøretøy vil skape den største utfordringen i forhold til innsatsstyrkenes fremkommelighet.

Avslutningsvis kan det hevdes at fremkommeligheten er den største utfordringen for innsatsen til brannvesenet. Innsatsen i seg selv vil ikke bli hindret i stor grad av andre forhold enn trafikkmengden.

8 Konklusjon



For å kartlegge ulike utfordringer som er knyttet til brann i Operatunnelen i perioder med tett rushtrafikk, er det blitt utarbeidet en enkel risikoanalyse, gjort vurderinger av tidligere tunnelbranner og tatt i bruk statistikk.

Selv om risikoanalysen som er utarbeidet er en enkel analyse, kan det konkluderes med at den er realistisk. De fire valgte scenariene i analysen er vurdert til å være de mest aktuelle og realistiske. Flere scenarier er dermed ikke nødvendig, ettersom de valgte også omfatter de mest vanlige brannårsakene i kjøretøy. Forenklingene som er gjort i forbindelse med scenariene er videre vurdert til å få liten betydning for resultatet. Hvordan ventilasjonen kan påvirke røyken og rømningsforholdene er også blitt tilstrekkelig vurdert i analysen. Risikoanalysen danner dermed et godt bilde av risikobildet i Operatunnelen.

De største utfordringene i forbindelse med brann i Operatunnelen under rushtrafikk, er hovedsakelig knyttet til røyk og fremkommelighet. Røyken skaper krevende rømningsforhold for trafikantene, samtidig som den skaper vanskelige arbeidsforhold for innsatsstyrkene. Tett trafikk i tunnelen vil også skape problemer for innsatsstyrkene, både før og under sløkkearbeidet.

Slik Operatunnelen er i dag, konkluderes det med at den holder et høyt sikkerhetsnivå på grunn av de mange sikkerhetstiltakene som eksisterer i tunnelen. Tiltakene er med på å fremme varsling av trafikanter og gir gode muligheter for tidlig og effektiv evakuering. Operatunnelen er i tillegg utformet på en måte som gir brannvesenet gode innsatsmuligheter til tross for tett trafikk. Alt dette er med på å heve sikkerheten til et akseptabelt nivå.

Videre anbefales det likevel å vurdere ytterligere tiltak for å redusere risikoen. De best egnede tiltakene er sprinkler og varslingstavler.



Referanser

- [1] Vegdirektoratet, «AID i tunnel - Teknologisammenligning,» oktober 2013. [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/570936/binary/917873?fast_title=Automatisk+hendelsesdetektering+i+tunnel.pdf. [Funnet 25 februar 2016].
- [2] Næringslivets sikkerhetsorganisasjon, «Risikoanalyse,» oktober 2011. [Internett]. Available: <http://www.nso.no/filestore/risikoanalyse.pdf>. [Funnet 23 februar 2016].
- [3] J. E. Vinnem, «As Low As Reasonably Practicable,» Store Norske Leksikon, 20 oktober 2015. [Internett]. Available: https://snl.no/as_low_as_reasonably_practicable. [Funnet 16 februar 2016].
- [4] KBT, «Angrepsvei,» Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, 31 desember 2014. [Internett]. Available: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?ID=297>. [Funnet 22 april 2016].
- [5] Vegdirektoratet, «Veg- og gateutforming,» juni 2014. [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/61414/binary/964095?fast_title=H%C3%A5ndbok+N100+Veg-+og+gateutforming+%28+MB%29.pdf. [Funnet 27 april 2016].
- [6] KBT, «Beslutningstid,» Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, 31 desember 2014. [Internett]. Available: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?Id=3643>. [Funnet 20 april 2016].
- [7] KBT, «Delugeanlegg,» Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, 31 desember 2014. [Internett]. Available: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?ID=2403>. [Funnet 17 mars 2016].
- [8] T. Andersen og B. J. Paaske, «Safety in railway tunnels and selection of tunnel concept,» [Internett]. Available: <http://lotsberg.net/artiklar/andersen/paper.pdf>. [Funnet 1 april 2016].
- [9] KBT, «Forflytningstid,» Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, 31 desember 2014. [Internett]. Available: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?Id=3586>. [Funnet 21 april 2016].
- [10] KBT, «Fortolkningstid,» Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, 31 desember 2014. [Internett]. Available: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?Id=3642>. [Funnet 20 april 2016].
- [11] DSB, «Risikoanalyse av brann i tunnel - delrapport til Nasjonalt risikobilde 2014,» Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap, 2014.

- [12] Vegdirektoratet, «Veileder i Trafikkdata,» 1 juni 2014. [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/256135/binary/997080?fast_title=H%C3%A5ndbok+V714+Veileder+i+Trafikkdata.pdf. [Funnet 25 mars 2016].
- [13] P. B. Andersen, «Infrarød Sensor,» Store Norske Leksikon, 14 februar 2009. [Internett]. Available: https://snl.no/infrar%C3%B8d_sensor. [Funnet 29 april 2016].
- [14] KBT, «Innsatstid,» Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, 31 desember 2014. [Internett]. Available: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?Id=2681>. [Funnet 22 april 2016].
- [15] KBT, «Reaksjonstid,» Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, 31 desember 2014. [Internett]. Available: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?ID=3585>. [Funnet 22 april 2016].
- [16] KBT, «Risiko,» Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, 31 desember 2014. [Internett]. Available: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?Id=3963>. [Funnet 19 april 2016].
- [17] SHT, «Statens Havarikommisjon for Transport,» Statens Havarikommisjon for Transport, [Internett]. Available: <http://www.aibn.no/>. [Funnet 6 mars 2016].
- [18] SNL, «Sikkerhet,» Store Norske Leksikon, 30 juni 2015. [Internett]. Available: <https://snl.no/sikkerhet>. [Funnet 12 april 2016].
- [19] KBT, «Sikkert sted,» Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, 20 desember 31 2014. [Internett]. Available: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?Id=3577>. [Funnet 20 april 2016].
- [20] KBT, «Sprinkleranlegg,» Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, 31 desember 2014. [Internett]. Available: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?Id=3150>. [Funnet 2 april 2016].
- [21] R. Hugsted og R. S. Nordahl, «Tunnel,» SNL, 4 mai 2009. [Internett]. Available: <https://snl.no/tunnel>. [Funnet 1 februar 2016].
- [22] E. Sveen, «Høring - Rapport fra Statens kartverk om det offentlige kartgrunnlaget - Innhold, rutiner og ansvar,» 24 august 2012. [Internett]. Available: https://www.regjeringen.no/contentassets/216df4357faf4f418405fcfd50bde308/statens_vegvesen.pdf. [Funnet 25 april 2016].
- [23] Statens Vegvesen, «Kart og nøkkeldata om tunnelene,» [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/669313/binary/977307?fast_title=Kart+og+n%C3%B8kkeldata+om+tunnelene.pdf. [Funnet 2 februar 2016].
- [24] Statens Vegvesen, «Ny adkomst til Operatunnelen,» Statens Vegvesen, 5 juni 2012. [Internett]. Available:

- <http://www.vegvesen.no/Ferdigprosjekt/Bjorvika/Nyhetsarkiv/ny-adkomst-til-operatunnelen--345765>. [Funnet 3 april 2016].
- [25] Statens Vegvesen, «Tunneler og sikkerhet,» Statens Vegvesen, 15 juli 2015. [Internett]. Available: <http://www.vegvesen.no/om+statens+vegvesen/presse/nyheter/Nasjonalt/Tunneler-og-sikkerhet>. [Funnet 2 februar 2016].
- [26] Vegdirektoratet, «Vegtunnelen Håndbok N500,» juni 2014. [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/61913/binary/964093?fast_title=H%C3%A5ndbok+N500+Vegtunneler.pdf. [Funnet 3 februar 2016].
- [27] Statens Vegvesen, «Tunnelteknikk,» Statens Vegvesen, 17 april 2015. [Internett]. Available: <http://www.vegvesen.no/fag/Teknologi/Tunneler>. [Funnet 19 januar 2016].
- [28] Samferdselsdepartementet, «Forskrift om minimum sikkerhetskrav til visse vegtunneler (tunnelsikkerhetsforskriften),» 15 mai 2007. [Internett]. Available: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2007-05-15-517>. [Funnet 3 februar 2016].
- [29] Statens Vegvesen, «Sikkerhetstiltak i tunneler,» Statens Vegvesen, 15 juli 2015. [Internett]. Available: <http://www.vegvesen.no/trafikkinformasjon/Trafikksikkerhet/Trygg+ferdsel+i+tunnel/Sikkerhetstiltak>. [Funnet 1 april 2016].
- [30] Statens Vegvesen, «Bruk nødtelefon i tunnel,» Statens Vegvesen, 13 juni 2012. [Internett]. Available: <http://www.vegvesen.no/om+statens+vegvesen/presse/Pressemeldingsarkiv/Region+s%C3%B8r/bruk-n%C3%B8dtelefon-i-tunnel>. [Funnet 4 februar 2016].
- [31] Statens Vegvesen, «Ledelys,» Statens Vegvesen, 8 mai 2014. [Internett]. Available: <http://www.vegvesen.no/fag/Publikasjoner/Handboker/nyheter/ledelys>. [Funnet 4 februar 2016].
- [32] SFPE, «SFPE Handbook of Fire Protection Engineering,» i *Fires in Vehivle Tunnels*, Springer, 2016, pp. 3303-3322.
- [33] C. Richard og A. N. Beard, *The Handbook of Tunnel Fire Safety*, London: Thomas Telford Publishing, 2005.
- [34] Tunnel Business Magazine, «Tests of Fixed Fire Fighting System in the Northern Link Tunnel,» Tunnel Business Magazine, 15 april 2015. [Internett]. Available: <http://tunnelingonline.com/tests-fixed-fire-fighting-system-northern-link-tunnel/>. [Funnet 11 mars 2016].
- [35] H. Ingason og Y. Z. Li, «Sprinkler limitations for tunnel fire fighting,» Tunnel Talk, september 2011. [Internett]. Available: <http://www.tunneltalk.com/Fire-safety-Sep11-Safety-institute-report-on-sprinkler-systems.php>. [Funnet 10 april 2016].

- [36] Swarco, «Rampestyring,» Swarco, 2014. [Internett]. Available: <http://www.swarco.no/Hva-kan-vi-bidra-med/Smarte-veier/Tunnel-motorveisystemer/RAMPESTYRING>. [Funnet 14 april 2016].
- [37] Swarco, «Tunneler og Motorvejsystemer,» Swarco, 2014. [Internett]. Available: <http://www.swarco.dk/Hvad-kan-vi-tilbyde/Smarte-veje/TUNNELLER-OG-MOTORVEJSYSTEMER>. [Funnet 14 april 2016].
- [38] C. Bailey, «Mont Blanc Tunnel, Italy,» One Stop Shop in Structural Fire Engineering, [Internett]. Available: <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/CaseStudy/HistoricFires/InfrastructuralFires/mont.htm>. [Funnet 5 februar 2016].
- [39] O. Lyng, Risikoanalyse av brann i vegtunneler, Oslo: Norges Byggstandardiseringsråd, 2000.
- [40] H. R. Nielsen, «Tekniske installasjoner samt trafikledelse i relation til oppgradering af tunneler.,» [Internett]. Available: <http://www.nvfnorden.org/lisalib/getfile.aspx?itemid=3128>. [Funnet 20 april 2016].
- [41] Road and Maritime Services, «TP04: Road Tunnel Ventilation System,» juli 2014. [Internett]. Available: http://www.chiefscientist.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0009/54792/Road-Tunnels_TP04_Road-Tunnel-Ventilation-Systems.pdf. [Funnet 7 februar 2016].
- [42] J. E. Henning, «Ventilasjon og røykkontroll,» 22 januar 2015. [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/846951/binary/1027116?fast_title=07+Ventilasjon+og+r%C3%B8ykkontroll.pdf. [Funnet 14 mars 2016].
- [43] R. Pucher og K. Pucher, «Longitudinal- and Transverse Ventilation in Road Tunnels,» 2004. [Internett]. Available: http://creative-mathematics.ubm.ro/issues/9_13.pdf. [Funnet 8 februar 2016].
- [44] H. Ingason, Y. Z. Li og A. Lönnemark, «7.5 Effect of Ventilation Condition,» i *Tunnel Fire Dynamics*, London, Springer, 2015, pp. 193-195.
- [45] DSB, «I.1 Innsats i tunnel,» Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap, 4 juni 2009. [Internett]. Available: <http://oppslagsverket.dsb.no/content/brann-og-eksplosjonsvern/forskrifter/organisering-av-brannvesen/veiledning-kjemikaliedykking/9/1/>. [Funnet 5 april 2016].
- [46] B. C. Hagen, Grunnleggende Brannteknikk, Haugesund: Hagen Forlag, 2004.
- [47] Statens Vegvesen, «The Runehamar Test Tunnel,» [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/61892/binary/15103. [Funnet 1 februar 2016].



- [48] BBC, «Norway goat cheese fire closes tunnel,» BBC, 22 januar 2013. [Internett]. Available: <http://www.bbc.com/news/world-europe-21141244>. [Funnet 5 februar 2016].
- [49] Statens Vegvesen, «Risikoanalyse T-forbindelsen,» 24 november 2006. [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/65671/binary/22923. [Funnet 14 mars 2016].
- [50] A. Lönnermark, «On the Characteristics of Fires in Tunnels,» Lund University, Lund, 2006.
- [51] T.-O. Nævestad og S. F. Meyer, «Kartlegging av kjøretøybranner i norske vegtunneler 2008-2011,» 12 mai 2012. [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/507005/binary/819686?fast_title=Kartlegging+av+branner+i+tunneler.pdf. [Funnet 2 februar 2016].
- [52] National Cooperative Highway Research Program, Design Fires in Road Tunnels, Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2011.
- [53] Statens Vegvesen, «20 tunnelbranner i året,» 11 august 2015. [Internett]. Available: <http://www.vegvesen.no/om+statens+vegvesen/presse/nyheter/Nasjonalt/20-tunnelbranner-i-%C3%A5ret>. [Funnet 2 februar 2016].
- [54] Giftinformasjonen, «Branngasser - behandlingsanbefaling ved forgiftning,» Helsebiblioteket, 19 juli 2011. [Internett]. Available: <http://www.helsebiblioteket.no/forgiftninger/gasser-og-kjemikalier/branngasser-behandlingsanbefaling-ved-forgiftning>. [Funnet 28 februar 2016].
- [55] P. R. Hokstad, G. D. Jenssen, B. A. Mostue og T. Foss, «E-39 Rogfast. ROS Analyse, tunnel,» 3 februar 2012. [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/378584/binary/647608. [Funnet 29 februar 2016].
- [56] Norges byggforskningsinstitutt, «520.387 Tilgjengelig rømningstid ved brann,» SINTEF Byggforsk, 2006. [Internett]. Available: <https://bks.byggforsk.no/DocumentView.aspx?documentId=2955§ionId=2>. [Funnet 13 april 2016].
- [57] KBT, «Deteksjonstid,» Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, 31 desember 2014. [Internett]. Available: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?ID=3582>. [Funnet 20 april 2016].
- [58] M. Valle, «7 systemer skal gjøre tunnelen til en av de sikreste i landet,» Teknisk Ukeblad, 1 september 2015. [Internett]. Available: <http://www.tu.no/artikler/7-systemer-skal-gjore-tunnelen-til-en-av-de-sikreste-i-landet/275571>. [Funnet 19 mars 2016].

- [59] H. K. Kim, A. Lönnermark og H. Ingason, «Effective Firefighting Operations in Road Tunnels,» SP Technical Research Institute of Sweden , 2010.
- [60] SHT, «Undersøkelse av brann i buss på E16 i Gudvangatunnelen i Aurland,» Statens Havarikommissjon for Trafikk, 21 desember 2015. [Internett]. Available: <http://www.aibn.no/Veitrafikk/Undersokelser/15-608>. [Funnet 4 februar 2016].
- [61] L. Brenden, «Ikke innsats ved større branner i tunneler,» Brannmannen, 10 september 2012. [Internett]. Available: <http://www.brannmannen.no/arkiv.aspx?Action=1&NewsId=3303&PID=17>. [Funnet 7 april 2016].
- [62] H. Ingason, «Model Scale Tunnel Fire Tests,» SP Swedish National Testing and Research Institute, 2006.
- [63] H. Ingason, G. Appel og Y. Z. Li, «Large scale fire tests with fixed fire fighting system in Runehamar tunnel,» SP Technical Research Institute of Sweden , 2014.
- [64] G. Appel, H. Ingason og Y. Z. Li, «Fixed fire fighting systems impact on fire spread between vehicles in a road tunnel,» SP Technical Research Institute of Sweden, Borås.
- [65] G. Lotsberg, «Mont-Blanc-tunnelen,» Lotsberg, 19 mai 2001. [Internett]. Available: <http://www.lotsberg.net/artiklar/brann/mblanc.html>. [Funnet 2 mars 2016].
- [66] P. Duffé og M. Marec, «Task force for technical investigation of the 24 March 1999 fire in the Mont Blanc vehicular tunnel,» Miliarium, juni 1999. [Internett]. Available: http://www.miliarium.com/Monografias/Tuneles/Mont_Blanc.htm. [Funnet 17 mars 2016].
- [67] G. Lotsberg, «Lange tunneler i Austerrike,» Lotsberg, 18 juli 2000. [Internett]. Available: <http://www.lotsberg.net/artiklar/brann/tauern.html#Brannen>. [Funnet 20 mars 2016].
- [68] A. Leitner, «The Fire Catastrophe in the Tauern tunnel,» 16 mars 2001. [Internett]. Available: <http://www.igt.co.at/fileadmin/docs/publikationen/TheFireCatastropheintheTauerntunnel.pdf>. [Funnet 18 februar 2016].
- [69] TCRP & NCHRP, «Case Studies,» i *Making Transportation Tunnels Safe and Secure*, Washington, D.C., Transportation Research Board, 2006, pp. 21-22.
- [70] A. Henke og M. Gagliardi, «The 2001 Gotthard Road Tunnel Fire,» Tunnel Management International, Minusio, 2002.
- [71] Tunnelbuilder, «Fire in Frejus Tunnel kills two,» Tunnelbuilder, 11 juni 2005. [Internett]. Available: <http://tunnelbuilder.com/News/Fire-in-Frejus-Tunnel-Kills-Two.aspx>. [Funnet 16 februar 2016].

- [72] Statens Vegvesen, «Beredskapsplan for tunneler,» 5 juli 2006. [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/507004/binary/819684?fast_title=Gudvangatunnelen+beredskapsplan.p. [Funnet 12 februar 2016].
- [73] SHT, «Rapport om brann i vogntog på E16 i Gudvangatunnelen i Aurland 5. august 2013,» SHT, Lillestrøm, 2015.
- [74] DSB, «Brannen i Gudvangatunnelen,» DSB, 2014.
- [75] Statens Vegvesen, «Fakta om Gudvangatunnelen,» Statens Vegvesen, 11 august 2015. [Internett]. Available: <http://www.vegvesen.no/om+statens+vegvesen/presse/nyheter/Nasjonalt/fakta-om-gudvangatunnelen>. [Funnet 2 februar 2016].
- [76] SHT, «Varsel om sikkerhetskritisk forhold i forbindelse med undersøkelse av bussbrann i Gudvangatunnelen 11.08.2015,» SHT, Lillestrøm, 2015.
- [77] H. Ingason og A. Lönnemark, «Effects of longitudinal ventilation on fire growth and maximum heat release rate,» SP Technical Research Institute of Sweden , Borås, 2010.
- [78] I. K. Lunde, Praktisk krise- og beredskapsledelse, Universitetsforlaget, 2014.
- [79] Arbeidstilsynet, «Enkel modell for risikovurdering,» Arbeidstilsynet, [Internett]. Available: <http://www.arbeidstilsynet.no/artikkel.html?tid=207483>. [Funnet 23 februar 2016].
- [80] H. Buvik, «Kapittel 14 Vegtunneler,» 20 november 2011. [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/290266/binary/512536. [Funnet 24 mars 2016].
- [81] Justis- og beredskapsdepartementet, «Forskrift om organisering og dimensjonering av brannvesen,» Lovdata, 24 august 2015. [Internett]. Available: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2002-06-26-729/KAPITTEL_4#KAPITTEL_4. [Funnet 2 mars 2016].
- [82] Y. Z. Li, L. Vylund, H. Ingason og G. Appel, «Influence of fire suppression on combustion products in tunnel fires,» SP Technical Research Institute of Sweden , 2015.
- [83] R. Pettersson, «Nordiskt vägforum NVF,» 2014. [Internett]. Available: http://www.nvfnorden.org/library/Files/Utskott-och-tema/Tunnlar/Seminarier-2012-2016/Effektivare-tunneldrivning-april-2014/5_10%20C3%A5r%20med%20tunneltv%20C3%A4tt%20%20i%20S%20C3%B6dra%20L%20C3%A4nken.pdf. [Funnet 28 april 2016].
- [84] H. Ingason, «Automatiska sprinkler i tunnlar,» Brandforsk, 2011.
- [85] J. Fraser-Mitchell og D. Charters, «Human Behaviour in Tunnel Fire Incidents,» FRS/BRE Ltd, Garston.



- [86] *42 høyrisiko-tunneler i Norge: – Dødsfeller*, VG, 2016.
- [87] *A fuoco il tunnel del Frejus nessun ferito*, La Valsusa, 2010.
- [88] *BBC Channel Tunnel Fire*, BBC.
- [89] *Etterlysende skilt*, Robustas.
- [90] *Gudvangatunnelen delvis åpnet*, SCANPIX, 2015.
- [91] *Merking av nødstasjoner*, Catena, 2013.
- [92] *Radiorevolusjonen er noen måneder unna*, Vegnett, 2016.
- [93] *Robot Offers Hope for Fighting Tunnel Fires*, Swissinfo, 2001.
- [94] *Tunnel Fire Detection*, IFP Magazine, 2014.
- [95] *Gefahrenherd Tunnel*, Salzburger Nachrichten, 2015.
- [96] *Kart over Oslo (Operatunnelen)*, Oslo: Google Maps, 2016.



Vedlegg

Vedlegg 1 – Risikoanalyse av Operatunnelen

Vedlegg 1

Risikoanalyse av Operatunnelen

Innhold

1	Analyseobjekt	1
1.1	Presentasjon av tunnel	1
1.2	Tidligere tunnelbranner	1
1.3	Begrensninger	3
2	Fareidentifisering	4
3	Konsekvensanalyse	6
3.1	Vogntog kolliderer med personbil ved feltskifte	7
3.2	Brann i vogntog som følge av varmgang i bremses eller feil i motor	8
3.3	Brann i buss som følge av feil i motor	8
3.4	Kjedekollisjon mellom vogntog og personbiler	9
4	Årsaksanalyse og sannsynlighetsestimering	10
4.1	Vogntog kolliderer med personbil ved feltskifte	10
4.2	Brann i vogntog som følge av varmgang i bremses eller feil i motor	10
4.3	Brann i buss som følge av feil i motor	11
4.4	Kjedekollisjon mellom vogntog og personbiler	11
5	Beskrivelse av risiko	12
6	Vurdering av usikkerhet	13
	Referanser	I

Tabelliste

Tabell 1:	Ordforklaringer	ii
Tabell 2:	Teknisk informasjon om Operatunnelen [5]	1
Tabell 3:	Oversikt over valgte tunnelbranner [11]	2
Tabell 4:	Gjennomsnittlig varmeproduksjon for ulike kjøretøy [11]	2
Tabell 5:	Fordeling av brannstørrelse for ulike kjøretøy [5]	2
Tabell 6:	Identifiserte uønskede hendelser i Operatunnelen	4
Tabell 7:	Oversikt over hvordan vurderingen av konsekvens utføres	6
Tabell 8:	Estimert omfang av Hendelse 1	7
Tabell 9:	Estimert omfang av Hendelse 2	8
Tabell 10:	Estimert omfang av Hendelse 3	9
Tabell 11:	Estimert omfang av Hendelse 4	9
Tabell 12:	Oversikt over inndeling av sannsynlighet	10

Tabell 18: Ordforklaringer

Ordforklaringer	
AID	Automatisk registrering av hendelser [1]
ALARP	«As low as reasonably practicable.» Dette vil si å redusere risikoen utover de krav som er gjeldende, så lenge det er praktisk gjennomførbart [2]
Angrepsvei	Adkomstmuligheter som innsatsstyrker kan benytte for å komme frem til brannstedet [3]
DSB	Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap
Flame impingement	Flammene treffer taket i tunnelen og blir reflektert ned igjen mot veibanen. Dette skjer på grunn av den lave temperaturen taket i tunnelen har [4]
Høytrafikk tunnel	Tunnel med trafikk over 25 000 kjøretøy per døgn [5]
Innsatstid	Fra innsatsstyrker blir varslet, til de er klare for å starte innsats på brannstedet [6]
Overflatespredning	Flammene sprer seg ved at det første objektet som begynner å brenne, er fysisk i kontakt med, eller svært nær, andre objekt som lar seg antenne [4]
Risiko	Uttrykk for konsekvens og sannsynlighet for en uønsket hendelse som kan skje i fremtiden [7]
Toløpstunnel	Tunnel hvor kjøreretningene går i hvert sitt separate tunnellop
Tunnel	Underjordisk transportvei med ulike formål [8]. I denne oppgaven omtales veitunnel som tunnel
Tunnelklasse	Tunneler klassifiseres etter trafikkmengde og tunnellengde, hvor klasse A har minst krav og F har høyest krav til sikkerhets [9]
VTS	Vegtrafikksentralen

ÅDT	Årsdøgnetrafikk, total trafikkmengde per år dividert med 365, og er summen av trafikk i begge retninger i en tunnel [10]
------------	--

1 Analyseobjekt

1.1 Presentasjon av tunnel

Operatunnelen er den lengste høytrafikkunnelen i Norge med sine 6,6 km. Tunnelen er en fellesbetegnelse på Festningstunnelen, Ekebergstunnelen, Svartdalstunnelen og Bjørvikstunnelen, og ble offisielt åpnet i 2010. Daglig oppstår det perioder med rush i denne tunnelen, og på det meste er det rundt 4 000 kjøretøy som passerer gjennom i timen [5].

Generell teknisk informasjon om Operatunnelen finnes i Tabell 19. Denne informasjonen vil være med på å påvirke risikobildet ved en brann.

Tabell 19: Teknisk informasjon om Operatunnelen [5].

ÅDT	100 000 (4 000 i makstimen)
Tunnelklasse	F
Andel tyngre kjøretøy	8 %
Antall løp	2
Antall kjørefelt	3 i hvert løp, hvor 1 er utilgjengelig for vogntog
Lengde	6,6 km
Bredde	12 m per løp
Stigning	5 %
Havari/snunisjer	24 stk.
Videoovervåking	Ja, video med AID
Radiodekning	Ja
Nødutganger	Ja, hver 250 m
Nødstasjoner (brannsløkker og telefon)	Ca. 8 per km
Ventilasjon	Dimensjonert for 100 MW
Ventilasjonsretning ved brann	Med trafikketretningen
Ledelys langs tunnelveggen	Ja, punkter
Belysning	Relativt lys
Mulighet for stenging	Rødt lyst og bom
Innsatstid for brannvesenet	Varierer med trafikkmengden

Det er tidligere utført risikoanalyser med fokus på brann i tunnel. Oslo brann- og redningsetat har uttrykt at disse ikke er tilstrekkelige, ettersom de ikke har tatt hensyn til rushproblematikken som Oslo daglig opplever. Denne risikoanalysen kommer til å ha et stort fokus på denne problematikken, for å skape et mer realistisk bilde av konsekvensene en brann kan medføre. På grunn av dette antas det at hendelsene oppstår ved lav hastighet og tett trafikk.

1.2 Tidligere tunnelbranner

Som bakgrunn for analysen er det blitt studert seks tidligere tunnelbranner. Disse brannene vil sammen med teori danne grunnlaget for omfanget av de ulike scenariene, og er presentert i Tabell 20.

Tabell 20: Oversikt over valgte tunnelbranner [11].

Tunnel/Land	Brannårsak	Kjøretøy involvert	Personskade	Brannstørrelse
Mont Blanc Frankrike/Italia [12]	Motorfeil i vogntog	23 vogntog 10 personbiler 1 motorsykkel 2 utrykningskjøretøy	39 døde Svært mange skadde	200 MW
Tauern Østerrike [13]	Vogntog forårsaket kjedekollisjon	14 vogntog 26 personbiler	12 døde 49 skadde	180 MW
St. Gotthard Sveits [14]	Frontkollisjon mellom to vogntog	3 vogntog 23 personbiler	11 døde	200 MW
Fréjus Frankrike/Italia [15]	Motorfeil i vogntog	4 vogntog 3 utrykningskjøretøy	2 døde 21 skadde	150 MW
Gudvanga Norge (2013) [16]	Motorfeil i vogntog	1 vogntog	Ukjent antall skadde	30-40 MW
Gudvanga Norge (2015) [17]	Motorfeil i buss	1 buss	5 skadde	30 MW

Størrelsen på en brann er avhengig av hvilke(t) kjøretøy som brenner, noe som er vist i Tabell 21 [11]. I tillegg til ulik varmeproduksjon, vil også brannveksten variere med kjøretøy. For eksempel vil en bussbrann ofte vokse raskere enn en brann i vogntog, det vil si tiden til overtenning vil være kortere [18]. Basert på ekspertvurdering er det laget en oversikt over fordeling av brannstørrelser i tunnel. Denne oversikten er vist i Tabell 22. Dette blir lagt til grunn for videre konsekvens- og sannsynlighetsvurdering.

Tabell 21: Gjennomsnittlig varmeproduksjon for ulike kjøretøy [11].

Kjøretøy	Gjennomsnittlig varmeproduksjon [MW]
Personbil	1,5-8,5
To personbiler	5,6-10
Buss	29-30
Vogntog	13-202

Tabell 22: Fordeling av brannstørrelse for ulike kjøretøy [5].

Brannstørrelse	Lette kjøretøy	Tyngre kjøretøy
1 MW	70 %	20 %
5 MW	25 %	31 %
25 MW	5 %	25 %
50 MW		16 %
100 MW		6 %
200 MW		2 %
	100 %	100 %

1.3 Begrensninger

For å kunne gjennomføre analysen er det satt noen begrensninger. Begrensningene som er gjort, er vurdert til å ikke påvirke troverdigheten av resultatet i stor grad. Denne risikoanalysen er en enkel analyse, og derfor blir disse tillatt.

Last

For alle involverte kjøretøy er det ikke tatt hensyn til last. Dette gjelder spesielt for vogntog. Tidligere branner har vist at lasten er med på å påvirke brannveksten og varigheten, men det har også vist seg at tyngre kjøretøy uten last kan føre til store branner [16]. For å minske omfanget av analysen er det valgt å se bort ifra hvordan ulik last påvirker brannforløpene.

Tid til overtenning

Det er ikke gjennomført forsøk for å måle tid til overtenning hos ulike kjøretøy. Tiden som er satt i denne analysen er basert på tidligere analyser og teori rundt brann i kjøretøy.

Involverte kjøretøy

Antall kjøretøy som er involvert i brannen, er satt på bakgrunn av tidligere tunnelbranner og trafikkmengden i Operatunnelen. Det er forsøkt å gjøre antallet så realistisk som mulig, men ved en faktisk brann er det mulig at dette kan variere.

Kategorisering av konsekvens

I denne analysen er fokuset lagt på personsikkerhet, da dette anses som den mest kritiske delen. Konsekvenser knyttet til miljø og materielle verdier er sett bort ifra. Det er vurdert at problemstillingen med rushtrafikk ikke har spesiell innvirkning på disse kategoriene.

2 Fareidentifisering

I Tabell 23 presenteres de ulike uønskede hendelsene som er realistisk at kan oppstå i Operatunnelen. Hendelsene er identifisert ved å se på tidligere tunnelbranner og innspill fra brannvesenet. Det er helt enkelt gjort en estimering av sannsynlighet og konsekvens for hver av hendelsene slik at risikoen kan bedømmes. Videre velges hendelsene med risiko fra middels/høy til høy som de viktigste til å videreføre i analysen. Det blir gjort en grundigere vurdering av sannsynlighet og konsekvens for de utvalgte hendelsene, dette for å kunne fremstille risikobildet i en risikomatrixe.

Tabell 23: Identifiserte uønskede hendelser i Operatunnelen.

Uønsket hendelse	Sannsynlighet	Konsekvens	Risiko
Vogntog kolliderer med personbil ved feltskifte	Middels/lav	Høy/middels	Middels/høy
Brann i vogntog som følge av varmgang i bremseser	Middels/høy	Høy	Høy
Brann i vogntog som følge av feil i motor	Middels/høy	Høy	Høy
Brann i buss som følge av feil i motor	Middels	Høy	Høy/middels
Brann i personbil som følge av varmgang i motor	Lav/middels	Lav/middels	Lav/middels
Vogntog kolliderer i tunnelvegg	Lav	Middels	Middels/lav
Personbil kolliderer i tunnelvegg	Lav	Lav	Lav
To personbiler kolliderer – påkjørsel bakfra	Middels	Middels/lav	Middels
Kjedekollisjon mellom vogntog og personbiler	Middels	Høy/middels	Middels/høy

Vogntog kolliderer med personbil ved feltskifte

Denne hendelsen vil bli videreført i analysen. Sannsynligheten er vurdert til middels/lav ettersom det er forutsatt at hendelsen oppstår under saktegående rushtrafikk. Under slike omstendigheter vil føreren av vogntoget ha god tid til å orientere seg om andre trafikanter. Skulle likevel en slik kollisjon oppstå med brann som følge, vil konsekvensen være stor. Brann i vogntog har gjentatte ganger vist seg å kunne gi katastrofale utfall. Hendelsen omtales som «Hendelse 1».

Brann i vogntog som følge av varmgang i bremseser

Denne hendelsen vil bli videreført i analysen. Sannsynligheten er vurdert til middels/høy. Dette fordi det er et kjent problem for tyngre kjøretøy ved langvarig bremsing. Langvarig bremsing

vil føre til brann på grunn av høye temperaturer i områdene rundt bremsene [19]. Brann i vogntog under saktegående russtrafikk vil gi store konsekvenser.

Brann i vogntog som følge av feil i motor

Denne hendelsen vil bli videreført i analysen. Sannsynligheten og konsekvensen for denne hendelsen er lik som for hendelsen ved varmgang i bremses. Feil i motor har tidligere vist seg å være en gjentakende brannårsak [19].

Videre i analysen vil varmgang i bremses og varmgang i motor bli behandlet som én hendelse: *Brann i vogntog som følge av varmgang i bremses eller feil i motor*. Hendelsen omtales som «Hendelse 2».

Brann i buss som følge av feil i motor

Denne hendelsen vil bli videreført i analysen. Hendelsen blir vurdert som om det var et vogntog, men sannsynligheten vil være redusert ettersom kollektivtrafikk gjennom tunnelen er svært begrenset.⁵ Hendelsen omtales som «Hendelse 3».

Brann i personbil som følge av varmgang i motor

Denne hendelsen vil ikke bli videreført i analysen. Varmgang i motor er ikke et like vanlig problem for personbil, som for buss og vogntog [18]. Sannsynligheten er derfor vurdert til lav/middels. Konsekvensen vurderes også til lav/middels ettersom hendelsen bare involverer en personbil. En slik brann vil være mulig å slukke med brannslukker, før den rekker å spre seg.

Vogntog kolliderer i tunnelvegg

Denne hendelsen vil ikke bli videreført i analysen. Sannsynligheten er vurdert til lav på grunn av forutsetningene som ligger til grunn for hastighet. Konsekvensen er derimot satt til middels, fordi en mulig brann ikke kan utelukkes helt.

Personbil kolliderer i tunnelvegg

Denne hendelsen vil ikke bli videreført i analysen. Sannsynligheten er lik som for et vogntog, men konsekvensen er satt til lav ettersom en brann i personbil ikke vil være like omfattende som brann i vogntog.

To personbiler kolliderer – påkjørsel bakfra

Denne hendelsen vil ikke bli videreført i analysen. Sannsynligheten er vurdert til middels. Dette er et kjent problem når biler ligger tett, og sjåførere blir uoppmerksomme etter lengre kjøring i saktegående trafikk. Konsekvensen er satt til middels/lav ettersom et slikt sammenstøt er lite trolig stort nok til at det oppstår brann. Dette kan likevel ikke utelukkes helt.

Kjedekollisjon mellom vogntog og personbiler

Denne hendelsen vil bli videreført i analysen. Sannsynligheten er vurdert til middels, av samme grunn som for kollisjon mellom to personbiler. Konsekvensen er derimot satt til høy/middels, ettersom det vil være mange kjøretøy involvert i hendelsen. Det er ikke gitt at brann vil oppstå som følge av en slik kollisjon, men under slike omstendigheter vil en eventuell brann kunne få et katastrofalt utfall. Hendelsen omtales som «Hendelse 4».

⁵ Etter samtale med branninspektør Arild Lokna, brannforebyggende avdeling ved Oslo brann- og redningsetat, 23. februar 2016.

3 Konsekvensanalyse

Ulike hendelser vil gi ulike konsekvenser. En konsekvensanalyse skal se på de ulike hendelsene og anslå hvilke konsekvenser disse kan få dersom de inntreffer. I risikoanalyser er det vanlig å skille mellom konsekvenser for personer, miljø og materielle verdier [20]. I denne analysen er fokuset lagt på personsikkerhet, da dette anses som den mest kritiske delen.

Konsekvensen rangeres fra ubetydelig til svært alvorlig, basert på brannens omfang i forhold til personskade. Ubetydelige og mindre personskader omfatter ingen til små skader, som ikke trenger tilsyn av helsepersonell. Betydelige og alvorlige personskader omfatter skader hvor personer trenger tilsyn av helsepersonell eller opphold på sykehus. Dette kan typisk være skader som inhalering av varm røyk, brannskader på store deler av kroppen eller langvarige psykiske problem som følge av brannen. Dersom brannen medfører dødsfall vil konsekvensen bli kategorisert som svært alvorlig. Inndelingen av konsekvens er presentert i Tabell 24.

Tabell 24: Oversikt over hvordan vurderingen av konsekvens utføres.

Klasse	Konsekvens	Personer
1.	Ubetydelig	Ubetydelige personskader
2.	Mindre alvorlig	Mindre personskader
3.	Betydelig	Betydelige personskader
4.	Alvorlig	Alvorlige personskader
5.	Svært alvorlig	Dødsfall

Evakuering og redning av personer i tunnel, baserer seg i all hovedsak på selvretningsprinsippet. Dette vil si at personer som befinner seg i tunnelen selv må komme seg til sikkert sted, uavhengig av redningspersonell [21]. For en hendelse i Operatunnelen under rushtrafikk vil dette si at personer helst må ta seg ut av tunnelen til fots, da trafikken så å si vil være stillestående.

Det er lovbestemt at innsatstiden til brannvesenet ikke skal overstige 10 minutter i tettbebyggelse [22]. I en risikoanalyse utarbeidet av DSB er innsatstiden for brannvesenet i Oslo antatt å være 4 minutter til Operatunnelen [5]. Gjennom samtale med utrykningspersonell fra Oslo brann- og redningsetat kommer det frem at denne tiden ikke er realistisk dersom det er rushtrafikk. De ga uttrykk for at omstendighetene gjør at innsatstiden må opp mot firedobles. For å gjøre risikoanalysen mer realistisk settes derfor denne til 12-13 minutter.⁶

I en toløpstunnel vil brannvesenet ha mulighet til å angripe brannstedet via det uberørte tunnelloppet [23]. I Operatunnelen er det rømningsdører hver 250 meter, noe som betyr en angrepsvei på maksimalt 125 meter. Ved å benytte seg av motsatt løp vil innsatsstyrkene ha en mer effektiv innsats. Dette kommer av at de vil ha en kort angrepsvei uansett hvor i tunnelen brann oppstår. Den korte angrepsveien fører igjen til et kortere opphold i røyk, da innsatsstyrker ikke må bevege seg langt i en røykfylt tunnel [23]. Dette reduserer også faren for å miste utrykningskjøretøy i brannen.

Ventilasjonsstrategien i Operatunnelen baserer seg på horisontal ventilasjon. Dette vil si at frisk luft blir blåst gjennom tunnelen med kjøreretningen. Ventilasjonen er dimensjonert til å håndtere røykproduksjonen fra en brann opp til 100 MW [5]. Det finnes også luftkanaler i

⁶ Etter samtale med Redningsleder Per-Erik Landskaug, brigade B ved Hovedbrannstasjonen i Oslo, 23. februar 2016.

tunnelen som vil fjerne noe av røyken [24]. Røyken vil i hovedsak bli ført videre i tunnelen som følge av den horisontale ventilasjonen. Dette kan føre til problemer ved evakuering og brannspredning. Hvis det oppstår brann i starten av tunnelen, vil røyken kunne bli ført langt før den kommer ut i det fri. Det er mulig å snu ventilasjonsretningen manuelt om dette skulle skje [25].

VTS bruker mange ressurser på å overvåke Operatunnelen. De har blant annet kameraovervåkning over hele tunnelen, som er med på å gi en hurtig varsling dersom det oppstår noe uvanlig. VTS har og egen vaktbil som rykker ut og er med på å kartlegge problem i en tidlig fase [26]. Disse sikkerhetselementene, sammen med mange andre, er med på å redusere omfanget og konsekvensene av uønskede hendelser, som brann i tunnelen.

3.1 Vogntog kolliderer med personbil ved feltskifte

Det antas at det befinner seg to personer i personbilen. Vogntoget kolliderer med personbilen slik at disse to blir innestengt og ikke klarer å evakuere før vogntoget er flyttet, eller brannvesenet frigjør dem. Det oppstår brann mellom personbilen og vogntoget, og overtenning oppstår 15 minutter etter kollisjonen [5]. På grunn av overvåkingen til VTS blir brannvesenet tidlig informert om hendelsen, og er på plass 12 minutter etter kollisjonen.

Brannen vil vokse til 120 MW, noe som er mer enn hva ventilasjonen er dimensjonert for. Det antas derfor at det vil komme mye røyk i tunnelen. Brannen vil spre seg til 8-12 biler foran hendelsen, ved hjelp av overflatespredning og flame impingement, før brannvesenet får hindret videre spredning. Sjåføren av vogntoget klarer å evakuere selv, og alle trafikantene bak hendelsen kommer seg til sikkert sted.

De to personene som sitter innestengt i personbilen omkommer. Ytterligere 1-3 andre i nærliggende biler rekker ikke å evakuere før de er omhyllert av røyk. Rømningsforholdene blir så krevende at de ikke kommer seg til sikkert sted før temperaturene blir for høye. Av erfaring viser det seg at personer blir igjen i bilene sine for å søke trygghet, mens andre ønsker å få med seg personlige eiendeler eller hjelpe andre. Et godt eksempel er brannen i Tauern-tunnelen. Her omkom tilsammen tolv mennesker i ulykken/brannen. Det er antatt at åtte av disse personene ble drept i selve kollisjonen, mens de fire andre døde som følge av brannen og røyken. Tre av disse fire hadde ikke forlatt bilene sine.

Videre antas det at 10-15 personer får røykskader, med varierende omfang. Hvor minst fem får så alvorlige skader at de trenger akutt behandling på sykehus.

På grunn av utformingen av tunnelen og gode rømningsforhold, vil antallet personer med psykiske lidelser holdes til et minimum. Det antas at maksimalt syv personer vil slite med dette i ettertid.

Ut i fra dette antas omfanget av ulykken å være som presentert i Tabell 25.

Tabell 25: Estimert omfang av Hendelse 1

Antatt antall drepte	3-5
Antatt antall fysisk skadde	10-15
Antatt antall psykisk skadde	0-7

Hendelsen havner under kategorien «Svært alvorlig».

3.2 Brann i vogntog som følge av varmgang i bremses eller feil i motor

Det antas at det oppstår overtenning 15 minutter etter brannstart [5]. På grunn av overvåkingen til VTS blir brannvesenet tidlig informert om hendelsen, og er på plass 12 minutter etter kollisjonen.

Brannen vil vokse til 100 MW. Dette er den brannstørrelsen ventilasjonssystemet er dimensjonert for, og røyken vil bli ført ut av tunnelen på en effektiv måte. Brannen vil likevel spre seg til 8-12 biler foran hendelsen, ved hjelp av overflatespredning, før brannvesenet får hindret videre spredning. Sjøføren av vogntoget klarer å evakuere selv, og alle trafikantene kommer seg til sikkert sted.

Av erfaring viser det seg at personer blir igjen i bilene sine for å søke trygghet, mens andre ønsker å få med seg personlige egendeler eller hjelpe andre. Dermed antas det at 5-10 personer får lettere røykskader, og minst én får så alvorlige skader at det trengs akutt behandling på sykehus.

På grunn av utformingen av tunnelen og gode rømningsforhold, vil antallet personer med psykiske lidelser holdes til et minimum. Det antas at maksimalt to personer vil slite med dette i ettertid.

Ut i fra dette antas omfanget av ulykken å være som presentert i Tabell 26.

Tabell 26: Estimert omfang av Hendelse 2

Antatt antall drepte	0
Antatt antall fysisk skadde	5-10
Antatt antall psykisk skadde	0-2

Hendelsen havner under kategorien «Alvorlig».

3.3 Brann i buss som følge av feil i motor

Det antas at det befinner seg 16 personer i bussen, inkludert sjåfør. Det oppstår brann i bussen, og overtenning skjer 10 minutter etter kollisjonen. På grunn av overvåkingen til VTS blir brannvesenet tidlig informert om hendelsen, og er på plass 12 minutter etter kollisjonen. Selv om dette er etter overtenning av bussen, er innsatsen avgjørende for resten av brannforløpet.

Brannen vil vokse til 60 MW, noe som er under det ventilasjonssystemet er dimensjonert for. Det antas derfor at det er lite røyk som vil samle seg i tunnelen. Brannen vil likevel spre seg til 5-10 biler foran hendelsen, ved hjelp av overflatespredning, før brannvesenet får hindret videre spredning. Bussjøføren klarer å igangsette evakuering av passasjerene på et tidlig tidspunkt, og alle trafikantene kommer seg i sikkerhet.

Av erfaring viser det seg at personer blir igjen i bilene sine for å søke trygghet, mens andre ønsker å få med seg personlige egendeler eller hjelpe andre. Dermed antas det at 5-10 personer får røykskader, med varierende omfang. Hvor minst én får så alvorlige skader at de trenger akutt behandling på sykehus.

På grunn av utformingen av tunnelen og gode rømningsforhold, vil antallet personer med psykiske lidelser holdes til et minimum. Det antas likevel at opptil 10 personer vil slite med dette i ettertid, dette omfatter hovedsakelig passasjerer fra bussen.

Ut i fra dette antas omfanget av ulykken å være som presentert i Tabell 27.

Tabell 27: Estimert omfang av Hendelse 3

Antatt antall drepte	0
Antatt antall fysisk skadde	5-10
Antatt antall psykisk skadde	0-10

Hendelsen havner under kategorien «Alvorlig».

3.4 Kjedekollisjon mellom vogntog og personbiler

Som utgangspunkt for hendelsen antas det at minst 15 kjøretøy er involvert i kjedekollisjonen, hvor ett er vogntog og resten personbiler. Det antas videre at det er et gjennomsnitt på to personer i hvert kjøretøy. Personer i maksimalt tre av personbilene blir innestengt under kollisjonen, og klarer ikke å evakuere før innsatsstyrker er på plass.

Det oppstår brann mellom flere personbiler og vogntoget, og overtenning oppstår 15 minutter etter kollisjonen. På grunn av overvåkingen til VTS blir brannvesenet tidlig informert om hendelsen, og er på plass 12 minutter etter kollisjonen.

Brannen vil vokse til 180 MW på grunn av alle kjøretøyene som blir involvert. Dette er mer enn hva ventilasjonen er dimensjonert for, og det antas derfor at det vil komme mye røyk i tunnelen. Brannen vil spre seg videre til 12-17 biler foran hendelsen, ved hjelp av overflatespredning og flamme impingement, før brannvesenet får hindret videre spredning. Alle bak hendelsen kommer seg i sikkerhet.

Opptil seks personer sitter innestengt i bilene sine og omkommer før de får hjelp. Ytterligere 1-3 andre i nærliggende biler rekker ikke å evakuere før de er omhyllert av røyk. Rømningsforholdene blir så krevende at de ikke kommer seg til sikkert sted før temperaturene blir for høye.

Av erfaring viser det seg at personer blir igjen i bilene sine for å søke trygghet, mens andre ønsker å få med seg personlige egendeler eller hjelpe andre. Rømningsforholdene er krevende på grunn av omfanget av kollisjonen. Dermed antas det at 15-20 personer får røykskader, med varierende omfang. Hvor minst ti får så alvorlige skader at de trenger akutt behandling på sykehus.

Selv om tunnelen har gode rømningsforhold, vil kjedekollisjonen forverre disse forholdene. Det antas at minst fem personer vil slite psykisk i ettertid av ulykken.

Ut i fra dette antas omfanget av ulykken å være som presentert i Tabell 28.

Tabell 28: Estimert omfang av Hendelse 4

Antatt antall drepte	6-9
Antatt antall fysisk skadde	15-20
Antatt antall psykisk skadde	5-

Hendelsen havner under kategorien «Svært alvorlig».

4 Årsaksanalyse og sannsynlighetsestimering

Det kan være mange årsaker bak en hendelse. En årsaksanalyse skal kartlegge mulige hendelsesforløp som resulterer i den uønskede hendelsen. Ut ifra de årsakene som identifiseres, blir sannsynlighet og frekvens vurdert [27].

Av alle tunnelene i Norge, er det 18 stk. som faller under samme kategori som Operatunnelen. Dette vil si bytunneler med to løp og ÅDT over 25 000. I gjennomsnitt har det vært 21 branner per år i norske tunneler de siste ti årene. Ut i fra statistikk kan det antas at rundt tre av disse brannene har oppstått i bytunneler som Operatunnelen. Dette tilsier at det er 0,166 branner per år i hver av bytunnelene, noe som tilsvarer én brann i løpet av seks år. Det anslås at ca. 55 % av disse brannene oppstår i tyngre kjøretøy [5].

Sannsynligheten blir delt inn i ulike kategorier. Kategoriene som er brukt i denne analysen er presentert i Tabell 29.

Tabell 29: Oversikt over inndeling av sannsynlighet.

Klasse	Sannsynlighet	Forklaring
1.	Lite sannsynlig	Sjeldnere enn én hendelse per 100 år
2.	Mindre sannsynlig	1 gang per 100 år eller oftere
3.	Sannsynlig	1 gang per 10 år eller oftere
4.	Meget sannsynlig	1 gang per år eller oftere
5.	Svært sannsynlig	10 ganger per år eller oftere

Inndelingen av sannsynlighet er basert på statistikk over branner i norske tunneler. Det har i snitt vært 21 tunnelbranner i året de siste ti årene, hvor få av disse har vært alvorlige. For at en bestemt brann skal være meget eller svært sannsynlig må denne omfatte den største delen av tunnelbrannene som har hendt. Derfor settes disse kategoriene til minst én gang i året. De ytterligere klassene er basert på skjønn og tidligere tunnelbranner i Norge. Det er vanskelig å finne god statistikk over disse brannene, og dermed tas det forbehold om at klassene kunne vært delt inn med andre sprang for å få et mer nøyaktig resultat.

4.1 Vognvogt kolliderer med personbil ved feltskifte

Denne hendelsen baserer seg på at et vognvogt kolliderer med en personbil, fra siden. Det kan være flere årsaker til en slik ulykke. Den mest vanlige er at føreren av vognvogtet ikke er oppmerksom nok, og dermed foretar et feltskifte uten å ha orientert seg om andre trafikanter i tunnelen. En annen årsak kan være punktering. Dersom vognvogtet punkterer, kan dette forårsake et uønsket feltskifte, som igjen kan føre til kollisjon som leder til brann.

Sannsynligheten for en slik hendelse er estimert til å være 1:220. Brannen antas å nå en størrelse på 120 MW. Dette utgjør ca. 5 % av alle branner i tyngre kjøretøy.

$$0,166 \cdot 0,55 = 0,0913 \text{ branner per år}$$

$$0,0913 \cdot 0,05 = 0,004565 \text{ branner per år}$$

Dette gir én 120 MW brann i løpet av 220 år. Hendelsen havner i kategorien «Lite sannsynlig».

4.2 Brann i vognvogt som følge av varmgang i bremses eller feil i motor

Varmgang i bremses er et velkjent problem for førere av vognvogt. Hovedårsaken til et slikt brannforløp, er langvarig bremsing. I Operatunnelen er det parti med stor helningsgrad. Ved

saktegående russtrafikk vil det være nødvendig med langvarig oppbremsing. Dette kan videre føre til varmgang i bremsen.

Motorfeil i vogntog er også en brannårsak som går igjen. Det kan ligge en lang rekke med årsaker bak dette problemet. Blant annet vil dårlig vedlikehold av eldre vogntog skape stor fare [19]. Dårlig vedlikehold og service på kjøretøyene kan føre til teknisk svikt, drivstofflekkasje, oljesøl og en lang rekke andre faktorer som kan utvikle seg til brann.

Sannsynligheten for én av disse hendelse er estimert til å være 1:180. Brannen antas å nå en størrelse på 100 MW. Dette utgjør ca. 6 % av alle branner i tyngre kjøretøy.

$$0,166 \cdot 0,55 = 0,0913 \text{ branner per år}$$
$$0,0913 \cdot 0,06 = 0,005478 \text{ branner per år}$$

Siden dette er to hendelser som er sett under ett, må sannsynligheten dobles. Dette tilsier at sannsynligheten blir 1:90. Dette gir da én 100 MW brann i løpet av 90 år. Hendelsen havner i kategorien «Mindre sannsynlig».

4.3 Brann i buss som følge av feil i motor

Motorfeil i buss vil i all hovedsak kunne oppstå av samme årsaker som for vogntog. Forskjellen på disse to hendelsene kommer frem i brannstørrelse og sannsynlighet.

Sannsynligheten for en slik hendelse er estimert til å være 1:70. Brannen antas å nå en størrelse på 60 MW. Dette utgjør ca. 15 % av alle branner i tyngre kjøretøy.

$$0,166 \cdot 0,55 = 0,0913 \text{ branner per år}$$
$$0,0913 \cdot 0,15 = 0,01370 \text{ branner per år}$$

Dette gir én 60 MW brann i løpet av 70 år. Hendelsen havner i kategorien «Mindre sannsynlig».

4.4 Kjedekollisjon mellom vogntog og personbiler

Det som kjennetegner kjedekollisjon er at flere kjøretøy er involvert i en og samme kollisjon. En slik kollisjon oppstår ofte som følge av uforventet stans av et kjøretøy. Uoppmerksomme førere som kommer bak hendelsen, vil forårsake kollisjon bakfra og en kjedekollisjon vil utvikle seg. Andre årsaker til kjedekollisjon kan være bremsesvikt hos et kjøretøy. På grunn av stigningsgraden i Operatunnelen, vil et kjøretøy uten bremsen oppnå høy hastighet. Dette kan føre til at kjøretøyet uten bremsen kolliderer med kjøretøyene foran i køen under russtrafikk.

Gitt at et av de involverte kjøretøyene er et vogntog, antas brannen å nå en størrelse på 180 MW. Dette utgjør ca. 3 % av alle branner i tyngre kjøretøy. Sannsynligheten for en slik hendelse er estimert til å være 1:360.

$$0,166 \cdot 0,55 = 0,0913 \text{ branner per år}$$
$$0,0913 \cdot 0,03 = 0,002739 \text{ branner per år}$$

Dette gir én 180 MW brann i løpet av 360 år. Hendelsen havner i kategorien «Lite sannsynlig».

5 Beskrivelse av risiko

Ut i fra konsekvens- og sannsynlighetsvurderingene over, blir hendelsene plassert i risikomatriksen under. Hendelsene er nummerert på følgende måte:

- 1 Vogntog kolliderer med personbil ved feltskifte
- 2 Brann i vogntog som følge av varmgang i bremses eller feil i motor
- 3 Brann i buss som følge av feil i motor
- 4 Kjdekollisjon mellom vogntog og personbiler

Konsekvens:	1. Ubetydelig	2. Mindre alvorlig	3. Betydelig	4. Alvorlig	5. Svært alvorlig
Sannsynlighet:					
5. Svært sannsynlig	6	7	8	9	10
4. Meget sannsynlig	5	6	7	8	9
3. Sannsynlig	4	5	6	7	8
2. Mindre sannsynlig	3	4	5	6 2, 3	7
1. Lite sannsynlig	2	3	4	5	6 1, 4

Hendelsene havner på gult område. Dette betyr at risikoen er akseptabel, men at videre undersøkelser bør vurderes for å redusere risikoen ytterligere. Sannsynligheten for at hendelsene inntreffer er svært liten, men de har potensial til å få alvorlige og svært alvorlige konsekvenser. Dette er grunnen til at tiltak bør vurderes for å minske konsekvensene etter at hendelsene har inntruffet.

I en slik vurdering er det viktig å ivareta ulike interesseområder, både økonomisk og sikkerhetsmessig. Alle tiltak som blir vurdert, må ses opp mot kostnad. Er det en stor nok nytteverdi til at det blir økonomisk lurt å iverksette de tiltakene som er ønskelig? Kostnadene må ses i sammenheng med de ulike følgene en uønsket hendelse kan få for personer. Brannvesenet og Vegvesenet bør derfor sette seg et felles mål om å redusere risikoen, slik at den kommer opp mot grønt felt.

6 Vurdering av usikkerhet

Risiko handler om noe som kan skje i fremtiden. Det kan derfor være stor usikkerhet knyttet til sannsynligheten og konsekvensen av de uønskede hendelsene i risikoanalysen. Usikkerheten er først og fremst knyttet til kunnskapen som ligger til grunn i analysen. Alle hendelsene i denne risikoanalysen skjer under forutsetning at det er rushtrafikk. En slik brann har per dags dato ikke oppstått i Norge, og det er gjort få forsøk med fokus rundt dette problemet. Antakelsene gjort i sannsynlighets- og konsekvensvurderingene er derfor gjort med utgangspunkt i tidligere tunnelbranner generelt.

Klassifisering av sannsynlighet har vært en utfordring, ettersom informasjon rundt dette temaet har vært vanskelig å oppdrive. Dette er et punkt som vil skape usikkerhet rundt den totale risikoen, og plassering av hendelsene i risikomatriksen.

Ut ifra de antakelsene og begrensningene som er gjort, blir usikkerheten vurdert til middels. Risikoanalysen danner et god grunnlag for videreføring av problemet, men for å redusere usikkerheten bør det utføres fullskala forsøk for å være mer sikker på omfanget.

Referanser

- [1] Vegdirektoratet, «Veileder i Trafikkdata,» 1 juni 2014. [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/256135/binary/997080?fast_title=H%C3%A5ndbok+V714+Veileder+i+Trafikkdata.pdf. [Funnet 25 mars 2016].
- [2] J. E. Vinnem, «As Low As Reasonably Practicable,» Store Norske Leksikon, 20 oktober 2015. [Internett]. Available: https://snl.no/as_low_as_reasonably_practicable. [Funnet 16 februar 2016].
- [3] KBT, «Angrepsvei,» Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, 31 desember 2014. [Internett]. Available: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?ID=297>. [Funnet 22 april 2016].
- [4] SFPE, «SFPE Handbook of Fire Protection Engineering,» i *Fires in Vehivle Tunnels*, Springer, 2016, pp. 3303-3322.
- [5] DSB, «Risikoanalyse av brann i tunnel - delrapport til Nasjonalt risikobilde 2014,» Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap, 2014.
- [6] KBT, «Innsatstid,» Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, 31 desember 2014. [Internett]. Available: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?Id=2681>. [Funnet 22 april 2016].
- [7] KBT, «Risiko,» Kollegiet for Brannfaglig Terminologi, 31 desember 2014. [Internett]. Available: <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp?Id=3963>. [Funnet 19 april 2016].
- [8] R. Hugsted og R. S. Nordahl, «Tunnel,» SNL, 4 mai 2009. [Internett]. Available: <https://snl.no/tunnel>. [Funnet 1 februar 2016].
- [9] Vegdirektoratet, «Vegtunnelen Håndbok N500,» juni 2014. [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/61913/binary/964093?fast_title=H%C3%A5ndbok+N500+Vegtunneler.pdf. [Funnet 3 februar 2016].
- [10] E. Sveen, «Høring - Rapport fra Statens kartverk om det offentlige kartgrunnlaget - Innhold, rutiner og ansvar,» 24 august 2012. [Internett]. Available: https://www.regjeringen.no/contentassets/216df4357faf4f418405fcfd50bde308/statens_vegvesen.pdf. [Funnet 25 april 2016].
- [11] A. Lönnemark, «On the Characteristics of Fires in Tunnels,» Lund University, Lund, 2006.
- [12] C. Bailey, «Mont Blanc Tunnel, Italy,» One Stop Shop in Structural Fire Engineering, [Internett]. Available: <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/CaseStudy/HistoricFires/InfrastructuralFires/mont.htm>. [Funnet 5 februar 2016].

- [13] A. Leitner, «The Fire Catastrophe in the Tauern tunnel,» 16 mars 2001. [Internett]. Available: <http://www.igt.co.at/fileadmin/docs/publikationen/TheFireCatastropheintheTauerntunnel.pdf>. [Funnet 18 februar 2016].
- [14] A. Henke og M. Gagliardi, «The 2001 Gotthard Road Tunnel Fire,» Tunnel Management International, Minusio, 2002.
- [15] Tunnelbuilder, «Fire in Frejus Tunnel kills two,» Tunnelbuilder, 11 juni 2005. [Internett]. Available: <http://tunnelbuilder.com/News/Fire-in-Frejus-Tunnel-Kills-Two.aspx>. [Funnet 16 februar 2016].
- [16] Statens Havarikommisjon for Transport, «Rapport om brann i vogntog på E16 i Gudvangatunnelen i Aurland 5. august 2013,» SHT, Lillestrøm, 2015.
- [17] SHT, «Undersøkelse av brann i buss på E16 i Gudvangatunnelen i Aurland,» Statens Havarikommisjon for Trafikk, 21 desember 2015. [Internett]. Available: <http://www.aibn.no/Veitrafikk/Undersokelser/15-608>. [Funnet 4 februar 2016].
- [18] Statens Vegvesen, «Risikoanalyse T-forbindelsen,» 24 november 2006. [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/65671/binary/22923. [Funnet 14 mars 2016].
- [19] M. G. Garathun, «Derfor tar vogntog fyr,» Teknisk Ukeblad, 12 august 2013. [Internett]. Available: <http://www.tu.no/artikler/derfor-tar-vogntog-fyr/232850>. [Funnet 27 januar 2016].
- [20] I. K. Lunde, Praktisk krise- og beredskapsledelse, Universitetsforlaget, 2014.
- [21] H. Buvik, «Kapittel 14 Vegtunneler,» 20 november 2011. [Internett]. Available: http://www.vegvesen.no/_attachment/290266/binary/512536. [Funnet 24 mars 2016].
- [22] Justis- og beredskapsdepartementet, «Forskrift om organisering og dimensjonering av brannvesen,» Lovdata, 24 august 2015. [Internett]. Available: https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2002-06-26-729/KAPITTEL_4#KAPITTEL_4. [Funnet 2 mars 2016].
- [23] T. H. Hansen, «Tunnelberedskap veitunneler OBRE,» [Internett]. Available: <http://www.nvtf.no/ikbViewer/Content/811367/%281%29%20Trond%20H%20Hansen%20Beredskap%20i%20veitunneler.pdf>. [Funnet 5 april 2016].
- [24] D. Tønnesen, «Områderegulering Filipstad, vurdering av luftforurensning,» 15 mars 2013. [Internett]. Available: <http://filipstadutvikling.nyhjemmeside.no/wp-content/uploads/2015/07/KU-2-24-luftforurensning.pdf>. [Funnet 7 mars 2016].
- [25] G. A. Dahle, «Festningstunnelen - Bjørvikatunnelen: Styring av ventilasjon ved brann,» Norconsult, 2008.

- [26] V. F. Sjøvik, «Tekniske sikkerhetstiltak – kameraovervåking,» ndla, [Internett].
Available: <http://ndla.no/nb/node/89126>. [Funnet 29 januar 2016].
- [27] Næringslivets sikkerhetsorganisasjon, «Risikoanalyse,» oktober 2011. [Internett].
Available: <http://www.nso.no/filestore/risikoanalyse.pdf>. [Funnet 23 februar 2016].