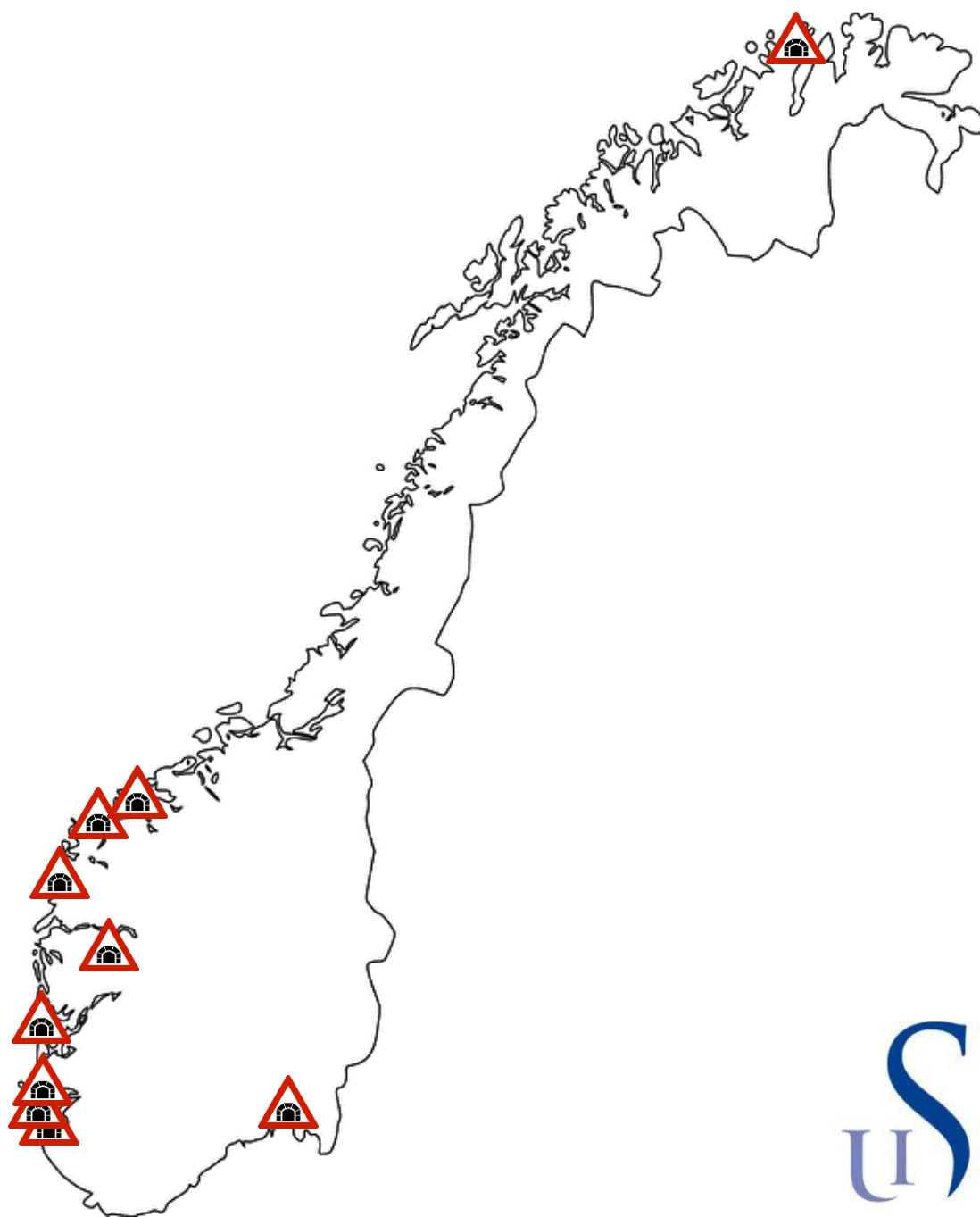


Brannventilasjon og røykkontroll

Sikkerhetsstyring med mekanisk ventilasjon ved brann i ti utvalgte ettløpstunneler i Norge



Masteroppgave i Teknisk Samfunnssikkerhet, juni 2020

Silje Marie Gusfre Angell



Universitetet
i Stavanger



Universitetet
i Stavanger

DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering: Master i Teknisk Samfunnssikkerhet	Vårsemesteret 2020 Åpen
Forfatter: Silje Marie Gusfre Angell (signatur forfatter)
Fagansvarlig/Veileder: Ove Njå	
Tittel på masteroppgaven: Brannventilasjon og røykkontroll: Sikkerhetsstyring med mekanisk ventilasjon ved brann i ti utvalgte ettløpstunneler i Norge Engelsk tittel: Fire Ventilation and Smoke Control: Safety Management with Mechanical Ventilation in Case of a Fire in Ten Selected Two-Way Traffic Tunnels in Norway	
Studiepoeng: 30	
Emneord: <i>Barrierestyling, brann, brannventilasjon, mekanisk ventilasjon, røykkontroll, sikkerhetsstyring, systemperspektiv, tunnelsikkerhet, vegtunnel, ventilasjonssystem</i>	Sidetall: 114 + vedlegg/annet: 148 Stavanger, 15. juni 2020

Forside for masteroppgave
Det teknisk-naturvitenskapelige fakultet

SAMMENDRAG

Norge er et langstrakt land med både fjord og fjell. For å ivareta trygg transportinfrastruktur med et pålitelig vegnett, er det bygd over 1100 tunneler. Tunneler anses som statistisk trygge å kjøre gjennom. Derimot kan tunnelenes geometriske avgrensninger, og gjennomstrømningen av tyngre kjøretøy eller farlig gods, gi et omfattende og svært alvorlig konsekvenspotensial, dersom en alvorlig tunnelbrann skulle oppstå. Dette har medført et behov for å forstå hvordan situasjoner utfolder seg, og hvilken sikkerhetsutrustning som kreves for å ivareta en nullvisjon om at vi ikke har noen å miste i trafikken.

I denne masteroppgaven undersøkes det hvordan røykkontroll er egnet som et konsekvensreducerende tiltak ved brann i tunnel. Mekanisk ventilasjon kan påvirke røykens strømningsretning og -hastighet, og potensielt avverge eller begrense en brann ved riktig bruk. Hovedformålet med oppgaven er å gi innsikt i forutsetninger for sikkerhetsstyringsarbeid. Problemstillingen som undersøkes er følgende:

Hvordan kan styring av mekanisk ventilasjon anvendes som en kritisk faktor i sikkerhetsstyring ved brann i tunnel?

For å løse oppgaven er det gjort et selektivt utvalg av ti ettløpstunneler i Norge. Forskningsmetodisk ble det utarbeidet en evalueringsmodell som tok utgangspunkt i å vise hvordan ventilasjonssystemet opereres, spesifikasjoner om funksjonalitet, og hvilke tilpasninger gjennomført for hver enkelt tunnel. Rapporter fra tunneleier dannet det første grunnlaget for vurderingen. Materialet fremmet teknisk informasjon om ventilasjonssystemet, tidligere hendelser, samt hvilke rutiner som normativt skal gjøres i en beredskapssituasjon. Øvrig informasjon om beslutninger, deskriptive tidligere avgjørelser og valg av dimensjonering kom ikke frem i dokumentene. Derfor er det gjennomført intervjuer og befaringer, for å få innblikk i respondentenes forståelse og bruk av tunnelventilasjon.

Resultatene i masteroppgaven viser at mekanisk ventilasjon både kan være kritisk viktig som en del av operatørens sikkerhetsstyring, men òg potensielt farlig ved feil bruk. Samtlige resultater viser at hovedmålet med mekanisk ventilasjon er å bistå trafikantene med selvredningsprinsippet, og sekundært bistå nødetater med brannsløkking. Det var derfor et overraskende funn at mekanisk ventilasjon kan øke varmeavgivelsen fra en tunnelbrann som følge av oksygentilførsel, og slik motvirke selvredningsprinsippet.

I et sikkerhetsstyringsperspektiv blir ventilasjonssystemet ansett som en nødvendig faktor knyttet til dens funksjon. Som en systemfaktor er mekanisk ventilasjon avhengig av andre informasjonsobjekter i tunnelen for å kunne anvendes i sikkerhetsarbeidet med hensikt. Tunnelforvalterne omtalte ventilasjonsrollen som en del av et helhetlig sikkerhetsarbeid, der hovedmålet er å tilrettelegge for best mulig konsekvensutfall. Funnene i oppgaven viser en tvetydighet om hvordan mekanisk ventilasjon brukes i praksis, og at det er krevende å beslutte en felles prosessmodell for alle konsekvensutfallene. Usikkerheten følger et dynamisk miljø, der tid, situasjonsforståelse og systemkunnskap er nødvendig.

Det er mye erfaring og lokal kunnskap som i dag kan brukes til å utvikle felles tunnelkompetanse i Norge. Det anbefales for aktører å gjennomgå beslutningsstrategier, og definere hvilke ressurser som kan påvirke strategien for ulike tunneler. Det kan argumenteres at det teoretiske rammeverket er forenklet sett i et systemperspektiv, og at sikkerhetsarbeid bør ta hensyn til lokale variasjoner og stedlige betingelser.

ABSTRACT

Norway is a mountainous country with a long and indented coastline of deep fjords. Over 1100 tunnels have been built to maintain a safe transport infrastructure with a reliable road network. Tunnels are regarded as statistically safer to drive through. However, the tunnels geometrical limitations and flow of heavier vehicles or dangerous goods can lead to devastating outcomes if severe tunnel fires break out. This has led to a need to understand how situations evolve, and which safety equipment that is needed to maintain a vision of zero traffic deaths.

This master's dissertation investigates how smoke control is suitable as a tool to reduce the consequences of tunnel fires. Mechanical ventilation can affect the smoke's direction and speed, and potentially avert or limit a fire through correct use. The central hypothesis of this dissertation is to provide insight into which decisions have been made. The emphasis will be on the prerequisites concerning safety management. The central hypothesis for this investigation is thus:

How can control of mechanical ventilation be applied as a critical factor to the safety management in case of tunnel fire?

Based on this, ten longer Norwegian tunnels with two-way traffic were selected for in-depth study. A model was developed as part of the methodology, which was based on looking at how the ventilation system operated with specifications about the functionality of the ventilation system for each tunnel. Reports from the tunnel operators formed the first basis for the assessment. This material contained information regarding technical information of the ventilation system, previous events, as well as which routines shall be executed normatively during an emergency. Information regarding decisions, descriptions of previous choices and the choice of dimension was not part of this material. Consequently, interviews, as well as inspections, were conducted to determine the respondents' understanding and use of tunnel ventilation.

The results of this dissertation showed that mechanical ventilation could be of critical importance as a part of the operators' safety management, but also potentially dangerous by incorrect use. All results showed that the primary goal of mechanical ventilation was to assist road-users according to the self-rescue principle, and secondarily, to help emergency services by putting out the fire. It was therefore surprising that mechanical ventilation can increase the heat output from a tunnel fire because of increased oxygen supply, and thus counteract the self-rescue principle.

In a safety management perspective, the ventilation system is judged as a necessary factor related to its function. As a system factor, mechanical ventilation relies on other information in the tunnel, to be purposefully added to the safety work. The tunnel managers spoke of the role of ventilation to a greater extent as part of a comprehensive safety work, where the main goal is to arrange for the best possible outcome. The results showed an ambiguity related to how ventilation can be used, and how it can be demanding to decide a process model for all possible consequences. The uncertainty can be found, as the tunnels are dynamical environments, with time, situational awareness and system knowledge is necessary.

Today, there exists much experience and local knowledge to develop our collective tunnel expertise further. This study recommends stakeholders to review decision strategies and define which resources may influence selected strategies in different tunnels. It can be argued that the theoretical framework is simplified unlike the systems' perspective, and that in order to define safety management, local variations and conditions should be considered. Furthermore, future consideration ought to research how several new uncertainty factors fit into the larger picture of tunnel safety.

FORORD

Dét var det!

Denne masteroppgaven markerer avslutningen av en toårig master i Teknisk Samfunnssikkerhet ved Universitetet i Stavanger. Det siste halvåret har jeg fått innsikt i et tema som jeg anser både faglig lærerikt og dagsaktuelt, og jeg håper oppgaven kan bidra med refleksjoner for å bedre tunnelsikkerheten i Norge.

Jeg ønsker å rette en stor takk til alle respondenter som har bidratt med informasjon og datagrunnlag. Takk for alle diskusjonene, materiell og erfaring som er delt. Tusen takk til Vegtrafikksentralen og Statens Vegvesen som har invitert meg til deres arbeidsdager på seminar og befaring. Videre må jeg takke alle jeg har møtt på veien frem til respondentene. Uansett hvor jeg har snudd meg, har jeg blitt hjulpet videre i en jungel av e-poster. Uten alle deres gode relasjoner på tvers av landet, samt ønske om å inkludere en forvirret student, vet jeg ikke hvordan jeg skulle kommet i mål.

Tusen takk til professor og veileder Ove Njå for å ha tro på gjennomførelsen av denne oppgaven. Jeg setter pris på alle mulighetene du har åpnet, og de konstruktive innspillene du har kommet med underveis. Din dedikasjon og kunnskap om fagfeltet har vært inspirerende.

Jeg vil benytte anledningen til å takke venner og medstudenter. Halvveis ut i semesteret oppstod det en situasjon ingen av oss var forberedt på, og rutinene våre ble brått endret. Jeg er stolt at vi har klart å opprettholde et godt klassemiljø, og til tross for hindrene som oppstod, hjulpet hverandre faglig. Takk for alle bøker jeg har fått låne! Ikke minst, takk til linjeforeningen som bistod med gratis kaffe på universitetet i vinter. Det varmer et studenthjerte.

Til slutt må jeg takke familien min for å holde ut med meg når jeg ikke klarer å snakke om annet enn masteroppgaven. Nå er det på tide å ta fatt på nye samtaleemner, og dét skal feires!

God lesning,

Silje Marie Gusfre Angell,

Stavanger // 15. juni 2020

Innholdsfortegnelse

SAMMENDRAG	I
ABSTRACT	III
FORORD	V
INNHALDSFORTEGNELSE	VI
Forkortelser	X
Figurliste	XI
Tabelliste	XI
Bideliste	XII
Begrepsdefinisjoner.....	XII
1. INNLEDNING.....	1
1.1 Bakgrunn for valg av tema.....	2
1.2 Problemstilling og forskningsspørsmål.....	3
1.3 Avgrensinger.....	4
1.4 Historiske hendelser og forskningsutvikling.....	5
1.5 Oppgavens struktur	7
2. KONTEKST	9
2.1 Systembeskrivelse av ventilasjonsanlegg.....	9
2.1.1 Hensikten med tunnelventilasjon	9
2.1.2 Ventilasjonsanleggets spesifikasjoner	9
2.1.3 Styringsprosessen	10
2.2 Dimensjonering	13
2.2.1 Dimensjonerende ventilasjonsrutiner.....	14
2.2.2 Beregningsmodeller for brannventilasjon i bratte tunneler	14
2.3 Krav om ventilasjon fra regelverk.....	16
2.3.1 Hjemmel i lovverket.....	16
2.3.2 Tunnelsikkerhetsforskriftene	17
2.3.3 Kravdokumenter	17
3. TEORI.....	19
3.1 Tunnelsikkerhetsarbeid	19
3.1.1 Tunneler som dimensjoneringsgrunnlag	19
3.1.2 Sikkerhetssystemer	20
3.1.3 Sikkerhetsfaktorer og -tiltak	20

3.1.4	<i>Ytelse av barrierer</i>	22
3.2	System sikkerhet og styring av risiko	23
3.2.1	<i>Sikkerhetsstyring</i>	23
3.2.2	<i>System sikkerhet</i>	24
3.2.3	<i>Kommunikasjon mellom systemutvikling og operasjonsprosessen</i>	26
3.3	Prosjektering og beslutning under usikkerhet	27
3.3.1	<i>Usikkerhet</i>	27
3.3.2	<i>Beslutningsstrategier</i>	28
3.4	Tunnelbrann	30
3.4.1	<i>Hvordan oksygentilførsel og tunnelens geometri påvirker brann</i>	30
3.4.2	<i>Ventilasjonens påvirkning på røyk ved tunnelbrann</i>	32
3.4.3	<i>Utbredelse av røyk i tunnel</i>	32
4.	FORSKNINGSMETODE	34
4.1	Forskningsstrategi	34
4.1.1	<i>Forskningsprosessen</i>	35
4.2	Forskningsdesign	35
4.2.1	<i>Casestudie</i>	36
4.3	Datainnsamlingsteknikker og analyse	36
4.3.1	<i>Grunnlag for datainnsamling</i>	37
4.3.2	<i>Dokumentinnsamling og -analyse</i>	38
4.3.3	<i>Intervju</i>	39
4.3.4	<i>Respondenter</i>	40
4.3.5	<i>Befaring og deltakende observasjon</i>	41
4.4	Kvalitetskriterier	42
4.4.1	<i>Validitet og reliabilitet</i>	42
4.4.2	<i>Overførbarhet</i>	43
4.4.3	<i>Metodiske styrker og svakheter</i>	43
4.5	Evalueringsmodell av tunnelutvalget	44
4.5.1	<i>Avgrensning og valg av tunneler</i>	45
4.5.2	<i>Sammensetningen av dokumenter</i>	45
4.5.3	<i>Fremgangsmåte for dokumentanalyse</i>	46
5.	TUNNELUTVALG	48
5.1	Tabelloversikt over utvalgte tunneler	49
5.2	Rennfasttunnelene	50
5.3	Bømlafjordtunnelen	53

5.4 Eiksundtunnelen.....	55
5.5 Godøy-tunnelen.....	58
5.6 Gudvangatunnelen.....	61
5.7 Karmøy-tunnelen.....	64
5.8 Nordkapptunnelen.....	67
5.9 Oslofjordtunnelen.....	69
5.10 Skatestraumtunnelen.....	73
6. ANALYSE.....	76
6.1 Hvorfor er mekanisk ventilasjon ved brann i tunnel en kritisk faktor?.....	76
6.1.1 Forebyggende versus konsekvensreducerende tiltak.....	76
6.1.2 Hva legger aktørene i tunnelsikkerhet?.....	76
6.1.3 Nullvisjonen og selvredningsprinsippet.....	77
6.1.4 Hensikt med mekanisk ventilasjon.....	78
6.1.5 Hovedfunn og oppsummering.....	79
6.2 Hvilke forutsetninger har prosjekterende aktører for dimensjonering av mekanisk ventilasjon?.....	81
6.2.1 Et funksjonsbasert regelverk.....	81
6.2.2 Tunnelenes dimensjoneringsbeslutninger.....	83
6.2.3 Bratte tunneler er lite reflektert i det teoretiske rammeverket.....	84
6.2.4 Hovedfunn og oppsummering.....	85
6.3 Hvordan driftes mekanisk ventilasjon i en branntilstand?.....	86
6.3.1 Tidslinje for en brannulykke.....	86
6.3.2 Styringsprinsipper.....	87
6.3.3 Bevissthet om funksjonell styring.....	89
6.3.4 Situasjonsbetinget drift og operatørens rolle.....	90
6.3.5 Ventilasjonsretningsdilemmaet.....	92
6.3.6 Utfordringer ved drift av bratte tunneler.....	94
6.3.7 Hovedfunn og oppsummering.....	94
6.4 Hvilke usikkerheter kan påvirke sikkerhetsstyring ved brann i tunnel?.....	95
6.4.1 Usikkerhet i forbindelse med beslutninger på bakgrunn av innhentet informasjon.....	95
6.4.2 Usikkerhet i forbindelse med kommunikasjon og samvirke.....	97
6.4.3 Usikkerhet i forbindelse med dimensjonering.....	98
6.4.4 Usikkerhet i forbindelse med hendelsesforløpet.....	99
6.4.5 Hovedfunn og oppsummering.....	100
7. DISKUSJON.....	101
7.1 Konsekvensavveining.....	101

7.1.1	<i>Tvetydighet om ventilasjonssystemets intensjon</i>	101
7.1.2	<i>Læring etter tidligere hendelser</i>	102
7.1.3	<i>Delkonklusjon</i>	103
7.2	Røykkontroll som kritisk styring	103
7.2.1	<i>Hvorfor er det så mye usikkerhet i styringsprosessen?</i>	103
7.2.2	<i>Motsetninger i ventilasjonsfilosofiernes terminologi</i>	105
7.2.3	<i>Delkonklusjon</i>	106
7.3	Brannscenarier	106
7.3.1	<i>Prediksjon og etablering av brannscenarier</i>	107
7.3.2	<i>Risikoforestilling</i>	108
7.3.3	<i>Hvordan forstå hva som er godt nok?</i>	108
7.3.4	<i>Ventilasjonssystemets ytelse i aktuelle scenarier</i>	109
7.3.5	<i>Delkonklusjon</i>	110
8.	KONKLUSJON	111
8.1	Anbefalinger	113
8.2	Videre forskning	113
8.3	Avsluttende ord	114
	REFERANSELISTE	115
	VEDLEGG	XIV
	Vedlegg A: Aktørens ansvarsområde og -fordeling	XIV
	Vedlegg B: Respondenter	XVII
	Vedlegg C: Intervjuguide	XVIII
	Vedlegg D: Samtykkeerklæring	XIX
	Vedlegg E: Oversikt over analyserte dokumenter	XX
	Vedlegg F: Detaljert prosedyre for forskningsprosessen	XXIII

FORKORTELSER

110	Brannalarmsentral
112	Politiets operasjonssentral
113	AMK
AMK	Akutt medisinsk kommunikasjonsentral
DSB	Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap
EFTA	European Free Trade Association (Det europeiske frihandelsforbund)
IKS	Interkommunalt selskap
KBT	Kollegiet for Brannfaglig Terminologi
MW¹	Megawatt
NOU	Norges Offentlige Utredninger
NSD	Norsk senter for forskningsdata
PIARC	World Road Association
Rx	Respondent fra intervju ²
SHT	Statens Havarikommisjon for Transport
SVV	Statens Vegvesen
VTS	Vegtrafikksentralen
ÅDT	Årsdøgntrafikk / gjennomsnittlig døgntrafikk

¹ MW er en måleenhet for varmeutvikling en brann gir per sekund.

² Se Vedlegg B for utfyllende informasjon.

FIGURLISTE

Figur 1 Viftekonfigurasjon av aksialvifter med og uten utløpsdiffusor.....	10
Figur 2 Prosessdiagram for røykkontroll	10
Figur 3 Prosessdiagram for evakuering.....	12
Figur 4 Styringsmodi.....	13
Figur 5 Regelverkshierarki.....	16
Figur 6 Sløyfediagram for brann i tunnel.....	21
Figur 7 Sikkerhetsstyring, barrierestyring og risikostyring	23
Figur 8 Utdrag fra vegtunneler som et sosioteknisk system, basert på Leveson	26
Figur 9 Simplisert modell for beslutningstaking.....	28
Figur 10 Brannforløp som funksjon av tid	30
Figur 11 Illustrasjon (a) av røyk i tunnel.....	32
Figur 12 Illustrasjon (b),(c),(d) av røykfordeling i tunnel ved ulik ventilasjonshastighet	33
Figur 13 Forskningsstrategi.....	34
Figur 14 Tunnelsikkerhetsinteressenter	37
Figur 15 Faktorer som påvirker tunnelsikkerheten	38
Figur 16 Aksjonskart over ventilasjon i Bømlafjordtunnelen	54
Figur 17 Kart over ventilasjon i Eiksundtunnelen	56
Figur 18 Aksjonskart over ventilasjon i Godøytunnelen	59
Figur 19 Forslag på utforming av nødstyrepånel fra planheftet i Gudvangatunnelen	62
Figur 20 Ventilasjonssystemet i T-forbindelsen fra Karmøy til rundkjøringen.....	64
Figur 21 Ventilasjonssystemet i T-forbindelsen fra rundkjøringen til Tysvær	65
Figur 22 Tunnelprofil av T-forbindelsen nord fra Haugesund til rundkjøringen.....	65
Figur 23 Horisontalkurvatur av Karmøytunnelen fra aksjonskartet.....	66
Figur 24 Aksjonskart av vifter i Nordkapptunnelen.....	68
Figur 25 Illustrasjon for ventilasjonsprinsipp i Oslofjordtunnelen	70
Figur 26 Aksjonskart av vifter i Skatestraumtunnelen.....	73
Figur 27 Simplifisert brannforløp som funksjon av tid.....	86
Figur 28 Antall kjøretøyspasseringer 06.09.2019 gjennom Nordkapptunnelen for alle typer kjøretøy.....	99

TABELLISTE

Tabell 1 Oppgavens kapitellsammensetning.....	8
Tabell 2 Utdypende spørsmål fra dokumentanalysen	46
Tabell 3 Beslutninger og prinsipper for ventilasjonssystemet i ulike faser av en brannhendelse	80

BILDELISTE

Bilde 1 Byfjordtunnelen og Mastrafjordtunnelen	50
Bilde 2 Bømlafjordtunnelen	53
Bilde 3 Eiksundtunnelen	55
Bilde 4 Godøytunnelen.....	58
Bilde 5 Gudvangatunnelen	61
Bilde 6 Karmøytunnelen	64
Bilde 7 Nordkapptunnelen	67
Bilde 8 Oslofjordtunnelen	69
Bilde 9 Vifter bestilt til Oslofjordtunnelen i rustfritt og syrefast stål	70
Bilde 10 Skatestraumtunnelen.....	73
Bilde 11 Skade på ventilatorene fra brannen i Skatestraumtunnelen.....	75

BEGREPSDEFINISJONER

Akseptkriterier	Kriterier basert på forskrifter, standarder, erfaringer og/eller teoretisk kunnskap som legges til grunn for beslutninger om akseptabel risiko. Akseptkriterier kan uttrykkes med ord eller være tallfestet (Aven, 2006)
Barriersystem	Et system som har blitt designet og implementert for å utføre en eller flere barrierefunksjoner (Sklet, 2006). Et barriersystem tilrettelegger eller bryter et uønsket hendelsesforløp.
Branntablå	Lokalt betjeningspanel på utsiden av et brannobjekt med presentasjon av pågående situasjon og mulighet for styring av aktuelle tekniske systemer (tolket fra SVV, 2018) Kalles òg for nødstyreskap i mange av SVV sine dokumenter.
Mekanisk røykventilasjon	Utlufting av røyk ved hjelp av vifter (KBT, u.å.)
Naturlig ventilasjon	Bevegelse av luftmasser som oppstår uten bruk av mekaniske vifter
Resiliens	Evnen til tilpassing når noe uforutsett skjer og etablerte rutiner og prosedyrer er mangelfulle. Resiliens kan innebære improvisasjon og bruk av ressurser på nye og kreative måter for å håndtere en uventet situasjon (Engen, Kruke, Lindøe, Olsen, Pettersen og Pettersen, 2016, s. 153-154)
Restrisiko	Risiko som gjenstår etter at sikkerhetstiltakene er gjennomført (NS 5834:2016)
Risiko	Uttrykk for den fare som uønskede hendelser representerer for mennesker, miljø eller materielle verdier. Risikoen uttrykkes ved sannsynlighet for og konsekvenser av uønskede hendelser (SVV, 2007)
Risikoanalyse	Analyse av risikoene ved en bestemt tunnel, der det tas hensyn til alle konstruksjonsfaktorer og trafikkforhold som berører sikkerheten, herunder

	særlig trafikkens særtrekk og type, tunnallengde og tunnelgeometri og prognosen for antall tunge lastebiler per døgn (Tunnelsikkerhetsforskriften, §3)
Selvredning	Prinsipp om at den nødstilte redder seg selv uavhengig av hendelse og objekt (KBT, u.å.)
Sikkerhetsstyring	Alle tiltak som iverksettes for å oppnå, opprettholde og videreutvikle et sikkerhetsnivå med definerte mål (Njå m.fl. 2020)
Sikkerhetssystem	Et system designet for å ivareta en viss standard av sikkerhetskrav eller et allerede etablert system som har integrerte sikkerhetsløsninger
Skadebegrensende tiltak	Tiltak som reduserer negative konsekvenser av en uønsket hendelse (KBT, u.å.)
Skadeforebyggende tiltak	Tiltak som reduserer sannsynligheten for en uønsket hendelse (KBT, u.å.)
Sløfediagram	Diagram som setter hendelsen i sentrum. Til venstre for hendelsen ser man på årsaker (trusler) til hendelsen, samt forebyggende barrierer/tiltak som allerede er på plass. Til høyre har man konsekvensene av hendelsen, dersom den inntreffer, samt de skadebegrensende barrierene/tiltakene (KBT, u.å.)
Usikkerhet	Usikkerhet [...] referer til mangel på definitiv kunnskap, en mangel på sikkerhet, tvil er dets nærmeste synonym. Til tider forveksles disse begrepene (oversatt fra National Academy of Engineering, 1986, s. 46)
Uønsket hendelse	En hendelse som kan medføre tap av verdier, for eksempel liv/helse, miljø, materielle verdier, funksjoner, samfunnsverdier eller omdømme (KBT, u.å.)
Varsling	Informasjon om hendelse eller tilstandsending hvor handling er påkrevd (KBT, u.å.) Varslingstid er summen av deteksjonstid og verifikasjonstid.
Ventilasjonsstyrt brann	Brann hvor tilgangen på luft er bestemmende for brannens videre utvikling (KBT, u.å.)
Ytelse	Ytelser som er angitt i forskriften er myndighetenes tolkning og konkretisering av hva som skal til for å tilfredsstille funksjonskravene. Ytelser kan angis som ytelseskrav i forskriften og som preaksepterte ytelser i veiledningen. Ytelser kan være tekniske, bruks- eller miljømessige kvaliteter, kapasiteter eller egenskaper hos byggverk, bygningsdeler, installasjoner eller utearealer. Ytelser er tallfestet (angitt kvantitativt) der dette har vært mulig, men kan også være angitt kvalitativt. (Direktoratet for Byggkvalitet, 2017)

1. INNLEDNING

– *Det er rein flaks at det har gått bra, nok ein gong.*

(Sitat fra representant i Statens Vegvesen, i Skovro & Storvik, 2015).

Tunneler er i dag en naturlig del av vegnettet i Norge, og fordelene er mange. Vegtunneler er et godt alternativ for å sikre trafikkavvikling i boligstrøk, redusere risiko ved rasfarlige områder og krysse brede fjorder. Mer enn 1100 vegtunneler strekker seg på langs og tvers av landet. Cirka 30 av disse tunnelene er undersjøiske, og det er planlagt flere (SVV, 2018a). Spesielt på Vestlandet kan tunneler være et mer pålitelig alternativ enn ferjeoverganger ved uvær, men selv om det statistisk sett er tryggere å kjøre i tunnel fremfor på åpen vei, er undersjøiske tunneler overrepresentert i lys av alvorlige branner. Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap foreslår at en forklaring kan være kombinasjonen av bratte stigningsforhold og tungtrafikk (Bakken, 2015).

Det har skjedd flere uønskede hendelser i nyere tid knyttet til tunnelbrann i kjøretøy i Norge. Ingen liv er gått tapt direkte knyttet som konsekvenser av røyk, men det er ofte snakk om flaks og tilfeldigheter (Benjaminsen, 2017; Skovro & Storvik, 2015). Statens Havarikommisjon for Transport har påvist mangler ved utrustning og driftsforhold etter brannene, noe som har resultert i avvik som må håndteres. Tidligere hendelser og nullvisjonen er noe av det som har dannet grunnlaget for endringer og innarbeidede tiltak, blant annet i «Håndbok N500 Vegtunneler» og Tunnelsikkerhetsforskriften. EUs sikkerhetskrav for tunnel har òg blitt skjerpet med årene, for å forebygge og redusere konsekvensene av alvorlige og kritiske hendelser, og legger i dag mye av grunnlaget for norske sikkerhetskrav. Samtlige tunneler har blitt teknisk oppgradert eller er planlagt for oppgraderinger, ettersom de ikke møter de nye standardene for tunnelsikkerhet. Inkludert i disse kravene er forbedringer av ventilasjonssystemet i tunnel, ofte i sammenheng med at tungtransportnæringen har endret seg og at årstdøgntrafikk har økt, noe som medfører at tunnelene må kunne håndtere branner av større størrelse og usikkerheter.

1.1 Bakgrunn for valg av tema

Ventilasjonssystemet i tunnel skal dimensjoneres for å ventilere ut forurensing og partikler i luften som følge av trafikk ved normaltilstand, men òg dimensjoneres for brann i kjøretøy eller materialer i tunnelen. De siste tiårene har tunnelventilasjonssystemer endret seg. Årsakene til dette er tilfeller av flere alvorlige tunnelbranner, økende bevissthet rundt sikkerhetsrelatert problematikk ved brann, generelt økende komplekse tunnelprosjekter samt utviklingen av brannprosjekteringsmuligheter og løsninger (Jagger & Grant, 2012). Aktører som har gjennomført risikovurderinger i tunneler fremmer et behov for å redusere omfanget og konsekvenser ved tunnelbrann, og et av tiltakene er en ny vurdering av ventilasjonsfilosofi. Som det blir gjort rede for i oppgaven, kan et branntilfelle gi svært uheldige utfall. Ventilasjonsstyring og røykkontroll kan ved disse branntilfellene påvirke hvordan brannen forløper, og forhåpentligvis slik gi et mer gunstigere utfall for selvredning, evakuering og brannslukking. Det eksisterer mye i forskningslitteratur om kontroll av røyk i ettløpstunneler og dimensjoneringsforhold, for å støtte brannvesenets innsats for slokking. Det finnes derimot betydelig mindre informasjon om hvordan ventilasjon kan bistå selvredning, og hvilke usikkerheter som må tas høyde for i utvikling og drift av ventilasjonsanlegget for bratte tunneler. Det kan derfor være vanskelig å legge til rette for en gunstig situasjon fra et teoretisk perspektiv. Denne oppgaven ønsker å gi et innblikk i hvilke ventilasjonsstrategier som er valgt av beslutningstakerne, samt rette lys mot hvilke usikkerheter og potensielle brannscenarier som bør tas høyde for.

Alle vegtunneler i Norge har til felles at de er ulike. Dette kan forklare hvordan hver tunnel må ses på som et individuelt objekt, og at hver brann kan ha variasjoner i forløpet. Samtidig er det viktig å ha synkronisert respons blant de ulike aktørene og involverte parter, og en standardisert plan for enkeltindivider som tar beslutninger, slik at operatørene kan håndtere vanskelig usikkerhet. Ventilasjonssystemet skal være et nyttig og pålitelig hjelpemiddel i sikkerhetsarbeidet ved brann i tunnel. Funksjonsspesifikasjonene for brannventilasjon har blitt mer spesifiserte og tydeligere etter hvert som tunnelsikkerhet har fått mer oppmerksomhet. Hvilke beslutninger gjør tunneldesignere ved dimensjonering av systemet, og hvor stor påvirkning kan ventilasjon ha for røyk i tunnelene? Hvilket handlingsrom gir ulike tunnelbrannscenarier for trafikanter og beslutningstakere? Denne tematikken gir grobunn for oppgaven, og det er ønskelig å få frem hvordan tunneler kan være komplekse systemer som er designet for en gitt sikkerhet, samt forståelse for hvordan mekanisk ventilasjon opptrer som en konsekvensreducerende funksjon, både i designutvikling og den operasjonelle driftsperioden.

1.2 Problemstilling og forskningsspørsmål

Prosessen for å utvikle et tema og en problemstilling tok utgangspunkt aller først i kunnskap knyttet til risikostyring, beredskap og tekniske sikkerhetssystemer. Et annet viktig bidrag var ønsket om å sette seg inn i et teknisk system og se på utvikling, sammenlikne og forstå hvordan valg er gjort i ulike faser. Tunnelsikkerhet ble et naturlig og spennende valg. Med ønske om å gjøre en komparativ casestudie, ble problemstillingen utarbeidet følgende:

**Hvordan kan styring av mekanisk ventilasjon anvendes som
en kritisk faktor i sikkerhetsstyring ved brann i tunnel?**

Formålet med denne oppgaven er å utforske og forklare hvordan mekanisk ventilasjon blir brukt for å påvirke effekten av røyk ved en tunnelbrann. Tidligere bruk av mekanisk ventilasjon, ved alvorlige ulykker, har vist at ventilasjon er et barrieretiltak som kan bistå nødetater og trafikanter. Derimot har det òg fått mye kritikk ved tidligere hendelser, blant annet ved manglende vedlikehold og styring av røyk som ikke har vært ideelt for menneskers liv og helse. Det er derfor interessant å synliggjøre hvordan mekanisk ventilasjon kan operasjonaliseres og designes for å oppnå et tilstrekkelig sikkerhetsnivå. Ventilasjonssystemets hensikt blir presentert i et sikkerhetsstyringsperspektiv, med vekt på gjennomføring av sikkerhetsarbeid i tunnel. Denne oppgaven ønsker med andre ord å løfte frem utfordringer og muligheter ved bruk av mekanisk ventilasjon. I praksis vil sikkerhetsstyring omfatte mange aktiviteter for å opprettholde et forsvarlig sikkerhetsnivå, og prinsipper for mekanisk ventilasjon har endret seg over tid. I denne oppgaven legges det fokus på nåtidens prinsipper og hvilken retning arbeidet er på vei.

For å svare på problemstillingen er det formulert fire underbyggende forskningsspørsmål. Forskningsspørsmålene har som formål å trekke frem ulike ledd ved problemstillingen, og åpne opp for en oversiktlig presentasjon av analysene og diskusjon senere. Spørsmålene er som følger:

- 1. Hvorfor er mekanisk ventilasjon ved brann i tunnel en kritisk faktor?**
- 2. Hvilke forutsetninger har prosjekterende aktører for dimensjonering av mekanisk ventilasjon?**
- 3. Hvordan driftes mekanisk ventilasjon i en branntilstand?**
- 4. Hvilke usikkerheter kan påvirke sikkerhetsstyring ved brann i tunnel?**

Forskningsspørsmålene er en operasjonalisering av problemstillingen, og vil legge et kunnskapsgrunnlag for å rettferdiggjøre konklusjonen. I det første forskningsspørsmålet er det ønskelig å se på hvor viktig mekanisk ventilasjon er for tunnelsikkerhetsmålene, og hvilke behov mekanisk ventilasjon imøtekommer. Dette kan tydeliggjøre mekanisk ventilasjon som en faktor ved tunnelbrann sett i et systemperspektiv. I det andre forskningsspørsmålet tas det utgangspunkt i å se på hvordan grunnlaget for designprosessen er gjennomført i utbyggings- og driftsfasene, og hvilken beslutningsstøtte som er til stede for valg av løsning for mekanisk ventilasjon som et verktøy. Formålet med forskningsspørsmålet er å legge til grunn for hva som anses som akseptabelt sikkerhetsnivå i de utvalgte tunnelene. Forskningsspørsmål tre ser på hvilke styringsforhold som er etablert i systemet allerede, samt hvor standardiserte eller fleksible styringsmetodene er for operatørene. Det er derfor behov for å illustrere tidsforløpet for en brann, og medfølgende potensielle utfordringer og variasjoner som kan oppstå. Forskningsspørsmål fire ønsker å identifisere hvordan usikkerhet preger kunnskap og handlingsrommet til beslutningstakerne. Usikkerheten blir sett i et Bayesiansk perspektiv, med andre ord et kunnskapsbasert perspektiv. Denne usikkerheten følger gjerne et syn på risiko som et konstruert fenomen om hvilken fare som oppleves. Sammen legger forskningsspørsmålene grunnlag for å besvare problemstillingen.

1.3 Avgrensinger

Studiens hovedfokus vil avgrenses til brannsikkerhet i norske vegtunneler. Norske vegtunneler har et ventilasjonssystem som styrer røyken langsgående i tunnelen. I andre land finnes det tilfeller der systemet styrer røyk vertikalt gjennom sjakter, eller ut av tunnelen via andre portaler. Dette kalles transvers eller semi-transvers ventilasjon, og er generelt anbefalt for lengre eller bredere tunneler. Fordelen er at røyken ikke vil være til besvær for trafikanter og nødetater i tunnelen, ettersom røyken blir ledet opp og adskilt fra trafikken i det opprinnelige tunnellopet. Denne type ventilasjon må samtidig rettferdiggjøre store kostnader knyttet til tunnelutforming og geometri i prosjekteringsfasen, og komplisert vedlikeholdsarbeid gjennom hele driftsperioden. Med over 1100 vegtunneler i Norge som går inn i høye fjell og under fjorder, er det begrenset hvor langt og i hvilken retning røyken kan styres, uten at det medfølger svært mye arbeid. På grunn av disse ulempene kan langsgående ventilasjon være et mer kostnadseffektivt alternativ, så lenge tunneleier er bevisst på begrensninger og tilpasninger som medfølger. Avgrensning av utvalgte tunneler i oppgaven er beskrevet nærmere i kapittel 4.5.

Ventilasjonssystemer har et livsløp som inkluderer design og installasjon, drift, vedlikehold, oppgraderinger og avvikling. Oppgaven avgrenses til å se på design, drift og eventuelle oppgraderinger, ettersom beslutninger for sikkerhetsstyring skjer ved drift og vedlikehold, og forutsetningene til stede for beslutningene blir spesifisert i designfasen. Problematikk rundt manglende vedlikehold eller feil på vifter, vil ikke diskuteres annet enn å løftes frem som avvik i tidligere hendelser. Dette kan reflekteres i valg av forskningsspørsmål. Det ble heller ikke vurdert hensiktsmessig å gå inn på tekniske spesifikasjoner av brannventilasjonsanlegget med materialvalg og utforming av brannsikre vifter, ettersom det ikke bidro til å svare på problemstillingen, selv om det er relatert til det andre forskningsspørsmålet.

Ved å se på ventilasjonssystemet som en barriere, og en del av en større respons, vil det være hensiktsmessig å nevne andre sikkerhetstiltak. De andre innretningene og responsaksjonene, for eksempel detektorer, kameraer, brannslukningsapparat og nødetatenes innsats vil ikke bli teknisk eller etisk utdypet, annet enn å gi bistand til å forstå ventilasjonsstyring. Det er videre gjort flere avgrensninger for å sikre innsamling av kunnskap om fagfeltet. Dette blir mer utdypet i kapittel 4 om forskningsmetode. Samtidig er det verdt å nevne at fagfeltet og all kunnskap som ble delt om tunnelsikkerhet, innsatsarbeid og politikk, åpner opp for mange nyttige diskusjoner. Studiets begrensede omfang, samt ønske om et stort læringsutbytte innenfor teknisk samfunnsikkerhet og tekniske sikkerhetssystemer, har vært årsakene til at ikke mer er inkludert.

1.4 Historiske hendelser og forskningsutvikling

De siste årene har det skjedd flere alvorlige branntilfeller knyttet til kjøretøy i tunnel i Norge, og undersjøiske ettløpstunneler er sterkt representert. Gjennomsnittlig registreres det 21 branner hvert år i Norges tunneler (DSB, 2015). I kapittel 5 vil det bli nærmere forklart enkelthendelser i de aktuelle tunnelene, for å sette utbedring av ventilasjon i kontekst.

Ikke bare i Norge kan det oppstå problemer i tunneler. Til tross for at det ikke har forekommet dødsfall som følge av eksponering av røyk i Norge ennå, er det flere internasjonale hendelser som kan påpeke alvorligheten og konsekvensomfanget av en slik ulykke. Et av de mest alvorlige brannhendelsene som tidlig satte ventilasjonsstyring og røykproblematikk på agendaen, er brannen i Mont Blanc-tunnelen mellom Italia og Frankrike i 1999, da det tok fyr i et vogntog lastet med margarin og mel. 39 menneskeliv gikk tapt som følge av brannen, mange

på grunn av inhalering av røyk. Røyken fanget trafikanter, og skapte store problemer for brannslukking. Brannmannskap som tidlig ankom tunnelen, ble òg fanget i røyken, noe som resulterte i at seks personer måtte reddes gjennom en ventilasjonskanal. Typiske problemer ble beskrevet som dårlig sikt i røykproppen og høye temperaturer. I etterkant ble antatt brannstyrke på over 200 MW i 53 timer med giftige røykgasser før den ble slokket, og tunnelen ble stengt i tre år som følge av hendelsen (Capella, 1999; Ramsdal, 2013; DSB, 2015). I etterkant er det rimelig å anta at røykventileringen skapte utfordringer for redning og brannslukning. Det fremkom som følge av dette et behov for å diskutere virkning av ventilasjon, og hvilke forhold som må ligge til rette for aktivt tunnelsikkerhetsarbeid.

Brann i tunnel i Norge er ikke uvanlig, og det eksisterer mye statistikk og forventninger knyttet til hvordan man skal håndtere ulykker. Statens Havarikommisjon for Transport gransker alvorlige transportulykker i etterkant av situasjonen, blant annet ved å intervju trafikanter som har vært til stede. Etter en ulykke i Gudvangatunnelen 5. august 2013 der det begynte å brenne alvorlig i et vogntog, står det følgende i rapporten:

Plutselig kom røyken, og sikten og orienteringsevnen ble redusert. En sier at *«røyken kom som sluppet ut av en sekk, nærmest som et snøras»*. Det oppsto nå et kaos der biler krasjet inn i hverandre, inn i tunnelveggen og folk ropte og skrek. Mange beskrev at det oppstod frykt, panikk og fullstendig kaos. Etter hvert som situasjonen med den tette røyken utviklet seg, valgte noen å bli i bilen mens andre valgte å forlate bilen og bega seg på veg tilbake mot Gudvangen der de kom fra. De som gikk ut famlet seg langs tunnelveggen med den ene hånden og et tøyestykke over munn og nese. De gikk i sikksakk på grunn av redusert eller manglende orienteringsmulighet. De slo seg i den ujevne tunnelveggen, skrapte seg opp og snublet i den ujevne veiskulderen. (SHT, 2015, s. 13).

I dette avsnittet forklares trafikantenes møte med en røykpropp som ble styrt gjennom 8,5 km av tunnelen i retning mot Gudvangen. Røyken blokkerte med andre ord evakueringsmulighetene for trafikantene. De har videre uttrykt seg følgende: *«vi manglet luft og var sterkt bekymret for at vi ikke ville overleve»* og *«[...] ble mer og mer tungpustet og var bekymret for at vi ikke skulle komme oss ut i live»* (SHT, 2015, s. 13). Hendelsen viser at sikkerhetsstyringen var dårlig tilrettelagt for trafikantenes evne til selvredning.

Problematikken har vært fremmet tidligere, blant annet etter en brann i vogntog i Oslofjordtunnelen. I sammendraget til SHT (2013, s. 4) står det følgende: *«Det foreligger ikke*

tilstrekkelig dokumentasjon for bruk av langsgående ventilasjon ved tunnelbranner og hvordan evakuering skal gjennomføres når tunnelen fylles med røyk.»

Det er med andre ord mulig å anta at det er på tide å utvikle den etablerte praksisen for ventilasjonsstyring, slik at personellet kan håndtere situasjoner med mindre usikkerhet knyttet til beslutninger for styring av røyk. Som erfart kan det samtidig oppstå alvorlige hendelser vi ikke kan predikere utfallet til, eller hendelser som utvikler seg med ulike resultat. Forskning på aktuelle løsninger for å bedre tunnelsikkerhetsarbeidet bør derfor være aktuelt, slik at felles kompetanse øker. Ventilasjonsstyring har på denne måten blitt en del av forskningsarbeid med å sikre tunneler. Blant annet har Ingason (2012) forsket på en transportabel vifte for å fjerne røyk for nødeter ved brannslukking i tunnel. Det vises likevel til at tid er en viktig faktor for brannutvikling og evakuering, noe som fremmer behovet for stasjonære ventilasjonsløsninger. Per dags dato foregår det et forskningsprosjekt kalt «Kapasitetsløft Tunnelsikkerhet» med Universitetet i Stavanger i spissen som prosjekteier, i samarbeid med Norwegian Tunnel Safety Cluster, forskningsmiljøer og næringslivet. Prosjektet danner grunnlag i behovet om å styrke kunnskap om aktuelle løsninger for å bedre tunnelsikkerhetsarbeid, samt å dele kunnskap og øke kompetansen. Prosjektet støtter implisitt opp masteroppgavens tese om at sikkerhetsstyring av ventilasjon er dagsaktuelt.

1.5 Oppgavens struktur

Denne oppgaven er sammensatt av åtte hovedkapitler: Innledning, kontekst, teori, forskningsmetode, presentasjon av tunnelutvalget, analyser, diskusjon og konklusjon. Hvert kapittel redegjøres for i tabellen på neste side:

Tabell 1 Oppgavens kapitelsammensetning

Kapittel 1: Innledning	Kapittelet introduserer bakgrunn for oppgaven. Allerede har oppgaven presentert problemstilling, forskningsspørsmål og formål, samt avgrensning og struktur.
Kapittel 2: Kontekst	Her tas det for seg en kontekst for oppgaven. Dette inkluderer en systembeskrivelse av ventilasjonsanlegget, grunnleggende forhold for valg av dimensjonering, og relevante regelverk knyttet til tunnelsikkerhetsarbeidet. Kapittel to har som hensikt å gå i dybden på mekanisk brannventilasjon som et system.
Kapittel 3: Teori	I kapittel 3 gjengis det et teoretisk rammeverk for tunnelsikkerhet med fokus på sikkerhetsstyring og systemsikkerhet. Denne tilnærmingen legger mer vekt på kompleksitet ved et system, samt avhengigheter ved et skiftende miljø og grunnlag for beslutninger for risiko. I lys av dette, blir ventilasjonens funksjonalitet og røykkontroll, med andre ord påvirkning på røykens utbredelse i tunnelen, utdypet.
Kapittel 4: Forskningsmetode	Her forklares det om forskningsmetode: Hvilke valg og tilnærminger som er gjort i oppgaveprosessen, hvilke datamateriale som er brukt, og hvordan innhentet materiale har blitt analysert og evaluert videre.
Kapittel 5: Utvalg av tunneler	Her presenteres en kort oversikt over de sentrale tunnelene som er analysert. Følgende tunneler er Byfjord-, Bømlafjord-, Eiksund-, Godøy-, Gudvang-, Karmøy-, Mastrafjord-, Nordkapp-, Oslofjord- og Skatestraumtunnelene.
Kapittel 6: Analyse	Analysekapittelet vil ta utgangspunkt i forskningsspørsmålene, og sammenfatte funn som er gjort i aspekt av dokumenter, intervjuer, observasjoner, og innhenting av teori og kontekst.
Kapittel 7: Diskusjon	Dette kapittelet vil fortsette fra analysedelen, men i større grad sette søkelys på dilemmaer og redegjøre for ulike synspunkt og usikkerheter som bør bemerkes, før problemstillingen kan konkluderes i konklusjonskapittelet. Diskusjonskapittelet er inndelt i temaene <i>konsekvensavveininger, røykkontroll som kritisk styring og brannscenarioer</i> .
Kapittel 8: Konklusjon	I siste kapittel vil problemstillingen redegjøres for og besvares. Avslutningsvis vil det bli foreslått anbefalinger og potensielle oppfølginger for videre forskning i forbindelse med brannventilasjon og tunnelsikkerhet.

2. KONTEKST

Dette kapittelet er viet til design og praksis av ventilasjonsanlegget, for å skape forståelse for den illustrative tematikken som blir diskutert senere. Kapittelet inneholder en systembeskrivelse av ventilasjonssystemet, oversikt over styringsprosessene og intensjonen med ventilasjon, dimensjoneringsgrunnlag, samt relevante krav for design og regulering.

2.1 Systembeskrivelse av ventilasjonsanlegg

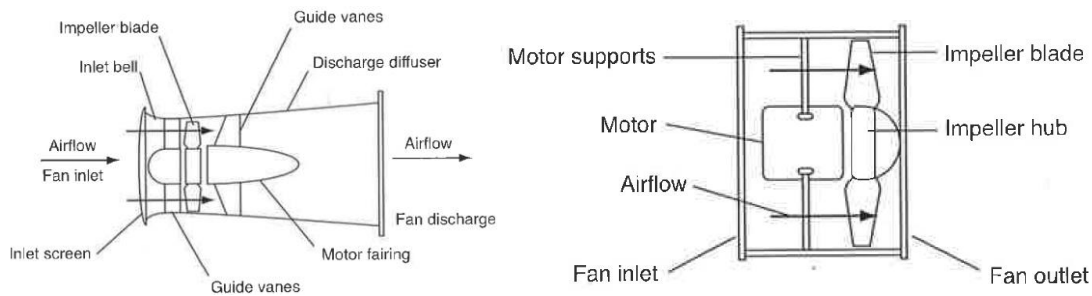
Ventilasjon kan kort beskrives som luftstrømninger eller transport av luft i tunnel. Dette forekommer av tre ulike årsaker: naturlig ventilasjon som følge av meteorologiske krefter som temperatur, vind og trykkforskjell, ventilasjon som konsekvens av stempeleffekt fra kjøretøy ved høy trafikk, og mekanisk ventilasjon iverksatt av ventilasjonsanlegg. Mekanisk ventilasjon oppnår en kapasitet slik at lufthastigheten økes eller retning endres, både ved normaltilstand, og ved branntilstand når ventilasjonen kan påvirke brannforløpet og røykens drift.

2.1.1 Hensikten med tunnelventilasjon

PIARC har utviklet overordnede mål ved tunnelbrann for å kartlegge hvordan sikkerhetssystemene kan prioritere ulike verdier. Det første målet omhandler å redde liv, ved å tilrettelegge for trafikanter og innsatspersonellens trygghet, blant annet gjennom evakuering. Det andre er å tilrettelegge for redning og brannslukking. Det tredje er for å unngå eksplosjoner, og til slutt prøve å begrense skader på tunnelstruktur og utstyr (Jagger & Grant, 2012; Technical Committee 5 Road Tunnels, 2007; PIARC, u.å.). Med andre ord omhandler mekanisk ventilasjon røykkontroll ved å sikre områder frie for røyk for selvredning og evakuering av trafikanter og nødeters tilkomst, og forhindre eksplosjoner og høye temperaturer slik at økonomiske verdier blir ivarettatt.

2.1.2 Ventilasjonsanleggets spesifikasjoner

Mekanisk ventilasjon i tunneler består av en klynge aksialvifter for å sirkulere luften en bestemt retning. I Norge blir ventilasjonen styrt langs tunnelens lengderetning. Viftene klassifiseres med ulike begreper basert på deres konstruksjonssammensetning, men ved langsgående ventilasjon er det vanlig å ha impulsvifter, også kalt impulsventilatorer, der selve ventilatoren består av monterte blad og en motor i en lengre sylinder eller diffusor. Impulsventilatorene henger i øverste sjiktet fra taket i tunnelen. Ventilatorene er alle koblet parallelt opp mot et sentralpanel som vist i figur 2 på side 10. Sentralpanelet styrer blant annet ventilasjonsretning og hastighet.

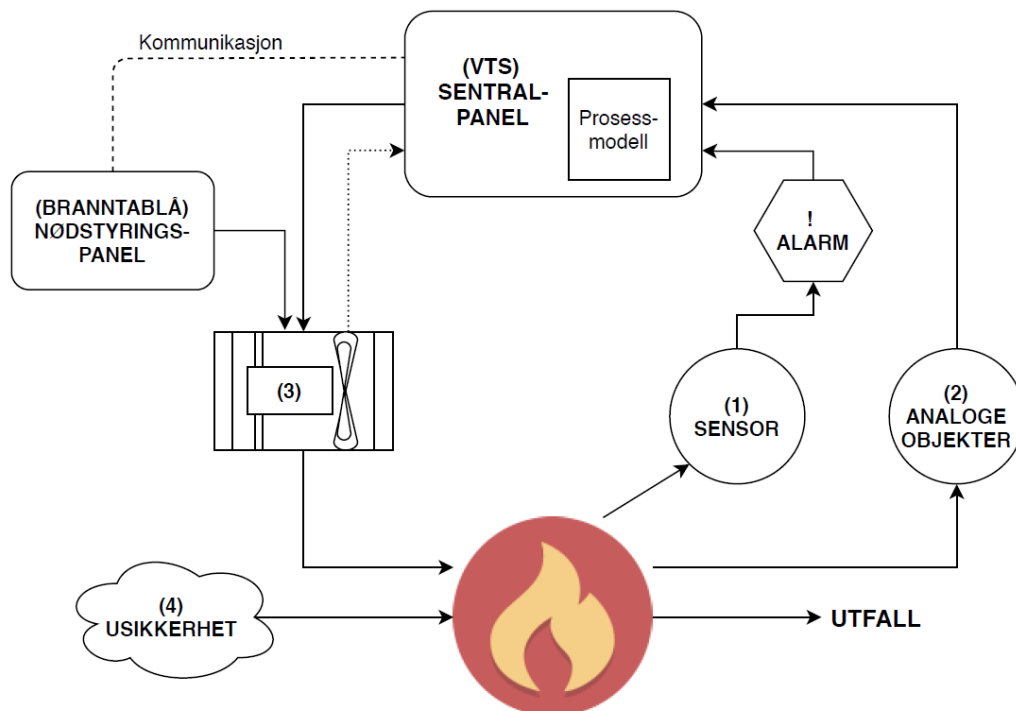


Figur 1 Viftekonfigurasjon av aksialvifter med og uten utløpsdiffusor (Bendelius, 2005, s. 135)

Ventilasjonsanlegget er et teknisk og innebygd brannsikringstiltak. Ventilatorene er ofte plassert to i bredden i tunneler, for å sikre ventilasjon gjennom hele tverrsnittet. Ifølge «Håndbok N500 Vegtunneler» skal avstanden mellom ventilatorene være minst 60 meter for å oppnå en laminær og stabil luftstrøm (SVV, 2020, s. 60). Ventilatorene kan være reversible, med andre ord symmetriske. Dette betyr at røyken skal kunne styres begge retninger mot ønsket tunnelportal, og bladene må kunne rotere motsatt vei uten å miste effekt. Dersom viftene har mer skyvkraft én retning kalles de for asymmetriske vifter.

2.1.3 Styringsprosessen

For at ventilasjonsanlegget skal kunne utrette sin funksjon ved tunnelbrann, må det forstås hvordan styringsprosessen foregår. Videre blir styringsprosessen utdypet med hensyn på ventilasjon og kontroll av røyk i prosessdiagrammet.



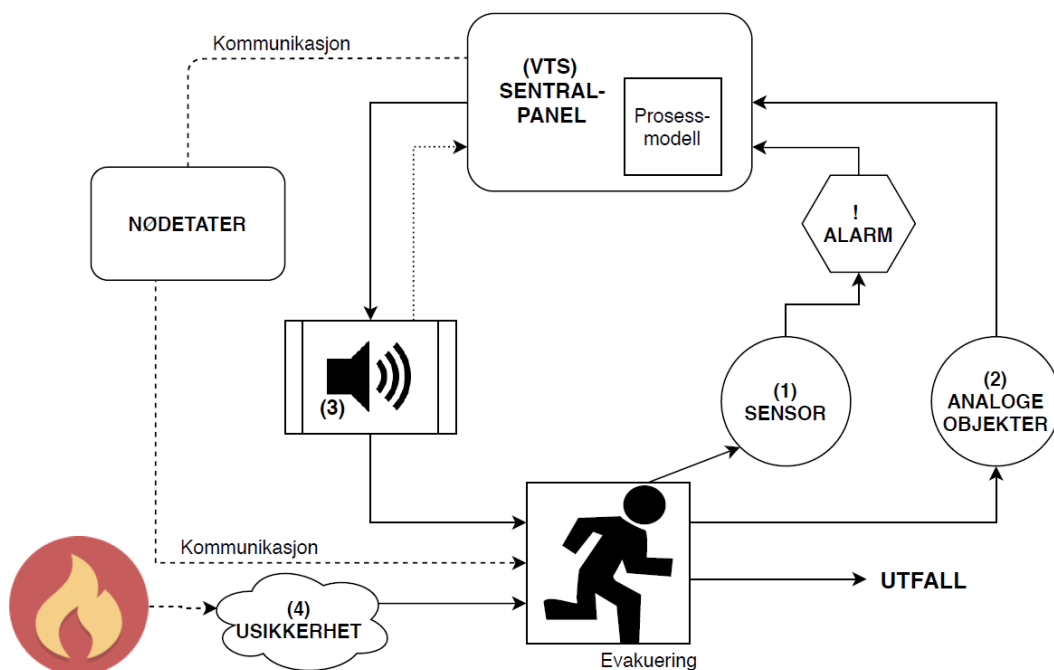
Figur 2 Prosessdiagram for røykkontroll (konstruert med informasjon hentet fra SVV (2018a) og modell utviklet av Leveson (2011, s. 93))

Ved brann i tunnel, iverksettes en brannplan. Brannplanen inneholder flere kommandoer, blant annet aktivering av brannventilasjon og nedstenging av tunnelen. Brannplanen baserer seg på tunnelens totale sikkerhetsutstyr, og har oftest en automatisk respons for hvordan styringen generelt skal starte. Prosessdiagrammet tar utgangspunkt i en gitt situasjon, i dette tilfellet kontroll av røyk. Dersom det oppstår en brann, vil brannen og røyken etter en viss tid bli detektert av en sensor (1), som videresender et signal til en alarm hos VTS og i tunnelen. Deteksjon og varsling er en viktig del for å iverksette konsekvensreducerende tiltak i tunnelen, ettersom mange av systemene er en aktiv respons ved en hendelse. Tidlig deteksjon kan være essensielt for å unngå, overføre eller redusere en fare (Lunde, 2014, s. 34). Sensorer som kan fange opp en tunnelbrann er for eksempel varsling fra tunnelen via utstasjonerte nødtelefoner eller brannskap, videoovervåkning, samt andre målinger som fanger opp røyk eller varme (SVV, 2020; SVV, 2018a). Det kan variere hvor raskt en brann oppdages. Alarmen varsler VTS ved aktivering og igangsetter manuelt eller automatisk en reaksjon med konsekvensreducerende tiltak. Reaksjonen skjer på bakgrunn av oppfattet prosess og forståelse av hvordan situasjonen skal håndteres, med andre ord en forhåndsvalgt prosessmodell. For at denne modellen skal være mest mulig lik den reelle situasjonen, og VTS skal ha et korrekt bilde av situasjonen og anlegget, bør prosessmodellen ta høyde for inngangssignaler og reelle oppfattelser fra sensorene – ikke kommandoer som er gitt ut fra VTS, eller forventet respons og utvikling (Leveson, 2011; SVV, 2018a). Et av bidragene for situasjonsforståelsen er nødvendig tilførsel av informasjon som kommer fra analoge objekter (2) i tunnelen. Dette er samlet informasjon fra vindmålere, CO/NO-sensorer, kameraer som oppdager kø eller kjøretøy, observasjoner og muntlige tilbakemeldinger eller andre relevante inputs for å skape et oversiktsbilde. Samlet vil dette gi grunnlaget for kommandoer gitt fra sentralpanelet til ventilasjonsanlegget (3), og mulighet for å tilpasse eller endre kommandoene basert på riktige opplysninger.

Dersom opplysninger fra (1) og (2) er feil, kan det resultere i at nødvendige kommandoer ikke blir gitt, at potensielle korrekte kommandoer blir gitt til feil tid eller at kommandoene blir stoppet for tidlig eller for sent (Leveson, 2011, s. 88). Ventilasjonsanlegget kan gi tilbakemelding til styresystemet om kontaktorfeil eller overlastvern, dersom kontaktoeren ikke gir tilbakemelding eller det er tilbakemelding fra motorvern. Den kan òg gi status om andre feil dersom signalet ikke eksplisitt er dekket av andre feilmeldinger (SVV, 2018a). Dette er markert med stiplet linje mellom (3) og (VTS), og vil kunne bidra til å forhindre avvik mellom prosessmodellen og inputs fra den reelle situasjonen. Kommandoene skal huskes frem til det kommer en kontrakommando fra toppsystemet (SVV, 2018a). Ventilatorene kan direktestyres

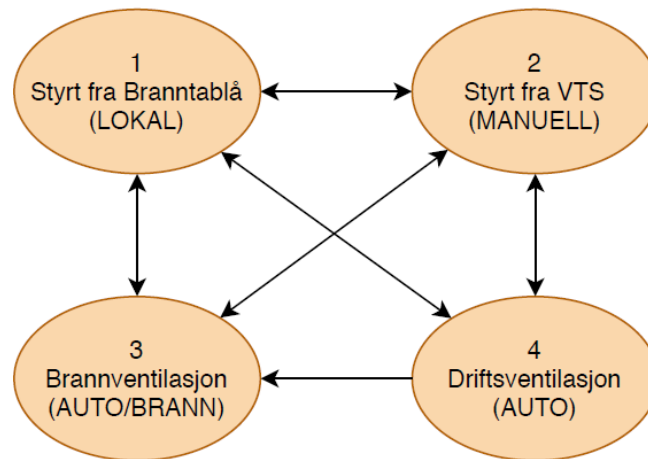
fra VTS både som et ventilasjonsobjekt eller enkeltstyres, styres automatisk eller styres lokalt fra et nødstyringspanel på utsiden av tunnelen. Nødstyringspanelet brukes av innsatsleder. Nødetatene vil òg observere situasjonen fra nært hold, og kan bruke panelet for å tilpasse lys og ventilasjon ved brannslukning og redningsinnsats. Samtidig må en ta høyde for mulige usikkerheter (4) som kan påvirke røykkontroll og prosessmodellen. Usikkerhet kan være knyttet til tidsforsinkelser, miljøendringer og menneskelig atferd.

I prosessdiagrammet i figur 2 blir den røyk kontrollert, og det ønskelige utfallet kan relateres til å sikre trygg evakuering. På samme måte som VTS og innsatsleder for nødetatene ønsker å kontrollere røyken, ønskes det òg å tilrettelegge og veilede trafikantene for evakuering. Da blir røyk fra brann et av de usikre variablene som operatørene og trafikantene må høyde for, som vist i figur 3 nedenfor. Disse to parallelle prosessene symboliserer hvordan ventilasjonsanlegget både kan opptre som en aktuator for røykkontroll, samt en variabel for trafikantenes forutsetninger for evakuering. Da vil den parallelle røykkontroll-prosessen være en del av usikkerheten i forbindelse med miljøet, med andre ord om tunnelen er røykfylt, og om det er god eller dårlig sikt. Å ha en prosess for evakuering, tilsier at operatørene må ha en beredskapsplanlegging som inkluderer omgivelsene omkring. I denne prosessen vil sensorer (1) detektere mennesker i tunnel, analoge objekter (2) kan være kameraer som oppdager fotgjengere, og aktuatoren (3) blir informasjons- og kommunikasjonskanaler, for eksempel høyttaleranlegg eller nødtelefoner.



Figur 3 Prosessdiagram for evakuering (konstruert med informasjon hentet fra SVV (2018) og modell utviklet av Leveson (2011, s. 93))

De fleste tunneler har i hovedsak ett automatisk styringsmønster for ventilasjon. I de tilfellene der anlegget er komplisert og har behov for flere brannplaner, kan VTS skille ventilasjonsstyringsteknikker basert på hvor i tunnelen det brenner, og hvorvidt det er en storbrann eller normal brann (SVV, 2018a). For at prosessmodellen skal kontrollere en brann gunstig, er kommunikasjon en svært viktig faktor. Det er derfor, inkludert normaldrift, fire ulike måter en tunnelbrann kan styres, vist i figuren nedenfor.



Figur 4 Styringsmodi (SVV, 2019c)

Tallene i figuren markerer styringsmodiet i prioritert rekkefølge. Lokal direktestyring av ventilasjon overstyrer direktestyring fra VTS. VTS kan manuelt overstyre automatisk brannventilasjon. Automatisk brannventilasjon iverksettes og overstyrer driftsventilasjon ved en alarm. Styring av ventilasjon kan fritt flyttes mellom ulike modus i løpet av en hendelse, med unntak av at brannventilasjon ikke automatisk kan gå tilbake til normaltilstand. Overlappende styringssystemer kan skape tvetydighet rundt prosessene. Det blir desto viktigere med tydelig kommunikasjon og situasjonsforståelse i begge prosesser.

2.2 Dimensjonering

Dimensjonering av ventilasjonsanlegget inkluderes i kontekstkapittelet, for å bli forstått sammen med systembeskrivelsen og prosessdiagrammene. Anlegget installeres og dimensjoneres, slik at både forurensingsnivået ved normaltilstand og røyken ved branntilstand skal være forsvarlig (SVV, 2020). Informasjon om dimensjoneringskrav for normal luftkvalitet i tunneler ved forurensing kan leses i «Håndbok N500 Vegtunneler» (SVV, 2020). Videre blir det beskrevet hvilke rutiner og forhold som må inkluderes for en forståelse av brannventilasjon.

2.2.1 Dimensjonerende ventilasjonsrutiner

I «Håndbok N500 Vegtunneler» (SVV, 2020) kreves det en fast rutine for brannventilasjon for horisontale tunneler. Disse rutinene beskriver forventet atferd for systemet:

I tunneler med toveis trafikk skal brannventilasjon, ved melding om brann, iverksettes på følgende måte:

1. Ventilasjonsretning skal fortsette i samme retning som ventilasjonen hadde da brannen oppstod. Dette innebærer at ventilasjonsretning og lufthastighet skal instrumenteres slik at opplysninger om ventilasjonsretning og lufthastighet er tilgjengelig for de som er ansvarlig for å regulere ventilasjonsanlegget.
2. Skadestedsledelsen avgjør om og når brannventilasjonen skal endre både når det gjelder retning og styrke. Slik regulering kan gjøres fra nødstyrepanel ved tunnelen eller fra VTS.
3. En lufthastighet på om lag 2 m/s legger forholdene godt til rette for evakuering i en tidlig fase. (SVV, 2020, s. 61)

Det første og andre punktet handler om styringsforholdet, og hvem som har ansvar for brannventilasjonen. Punkt 2 henviser til at både nødetater på området og VTS kan regulere røykstyring basert på deres behov. Det blir ikke beskrevet i dybden hvordan samvirket pågår. Punkt 3 er en direkte føring av anbefalt styring for evakuering. Det er verdt å merke seg at røykhastigheten og ventilasjonshastighet på vifter ikke betyr det samme, og at punkt 3 kun omhandler hastighet på luft og røyk. Viftene må da kunne justere skyvkraft i samordning med omgivelsene, og samtidig få tilbakemeldinger om pågående lufthastighet, noe som kan være problematisk ettersom det kan ta tid å få en jevn strømningshastighet i tunnelen. Mer informasjon om røykens drift gis i kapittel 3.

2.2.2 Beregningsmodeller for brannventilasjon i bratte tunneler

Basert på styrende dokumenter, krav og behov skal ventilasjonsviftene dimensjoneres for å ivareta nok skyvkraft i begge tunnelretningene, slik at røyken kan fordeles som vist i figur 10 og 11 på side 33-34. Skyvkraft er, basert på Newtons bevegelseslover, den kraften som trengs for å flytte røyk eller luft gjennom ventilasjonsviftene med en gitt akselerasjon. Utrekningene, for å bestemme dimensjonering, kan gjøres ved å konvertere bevegelsesmengden til statisk trykk som kreves for å akselerere luftstrømningene. Beregningsmodellene er ikke aktuelle for

simuleringer eller matematiske utregninger i denne oppgaven, men brukes for å tolke forskningsresultatene. Konverteringsformelen er gitt nedenfor:

$$\Delta p_v = \rho_{inne} * Q_v * u_v * \frac{1}{A_t} - \Delta p_o$$

Δp_v symboliserer trykkøkningen som ventilasjonen må tilføre med hensyn på tetthet i tunnelen (ρ_{inne}), viftens luftstrømning (Q_v) med andre ord mengden luft eller røyk som kan passere gjennom viftene i en gitt tid, og hastighet på viftene (u_v) dividert på tverrsnittarealet av tunnelen (A_t) (Technical Committee 5 Road Tunnels, 1996, s. 49). Bratte tunneler må òg ta høyde for trykkbidraget Δp_o . Hvis Δp_o er positiv, vil trykkbidraget øke kravet til viftekapasiteten. I hovedsak vil det være behov for større ventilasjonstrykk enn drivkreftene fra røyken. Desto større differanse, desto kortere tid vil det ta å kontrollere røyken vekk fra et område. Ved å tolke formelen kan det leses at tunnelens størrelse og viftenes størrelser begge er variabler av betydning for å forstå sikkerhetsbidraget til mekanisk ventilasjon. Designerne må òg legge inn forventet differanse basert på hovedårsaker til tap av effektivitet i viftene, for eksempel med friksjon mot overflater og tilkomst av kjøretøy, samt en sikkerhetsdifferanse som følge av matematisk usikkerhet. Summen på det totale trykkøkingsbehovet blir deretter fordelt på antall vifter (Technical Committee 5 Road Tunnels, 1996). Bestemmelsen av antall vifter og plassering av viftene blir gjennomført med forbehold om spesifikasjonene for å utnytte maksimal kraft innen økonomiske rammer, for å opprettholde et sikkerhetsnivå.

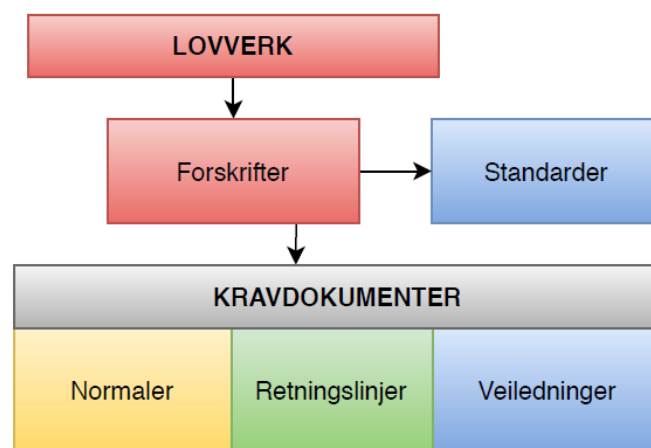
I bratte tunneler må brannventilasjon inkludere flere variabler som meteorologiske og termostatiske trykkeffekter, ved høydedifferanse og helning i tunnel. Undersjøiske tunneler har både helning nedover og stigning oppover, som gir et lavpunkt i bunnen av tunnelen. Den naturlige oppdriften mot tunnelportalene øker trykkbehovet, dersom ventilatorene skal trekke luftstrømmen nedover i tunnelen. Oppdrift vil med andre ord medføre at mer av røyken går med tunnelens stigning, og temperaturforskjeller i tunnelen kan påvirke de meteorologiske trykkforskjellene. Trykkbidraget fra naturlig vind og oppdrift er hentet fra Bernoullis likning om statisk trykk for fluider, og kan beregnes i likningen nedenfor:

$$\Delta p_o = \frac{1}{2} \rho_{ute} * u_{\infty}^2 + (\rho_{ute} - \rho_{inne}) * g * \Delta H$$

Der u_{∞} er naturlig vind med tetthet utenfor tunnelen (ρ_{ute}), g er gravitasjonskreftene ($9,8 \text{ m/s}^2$), og ΔH er høydeforskjellen i tunnelen. I formlene er det antatt konstant helning og massestrøm, med andre ord likt tverrsnittareal, lufttetthet og hastighet gjennom tunnelen (SVV, 2014, c).

2.3 Krav om ventilasjon fra regelverk

Regelverket gir krav, råd og veiledning ved arbeid med tunnelsikkerhet. Slik kan tunnelsystemene bli dimensjonert med hensyn til hjemmel i regelverket, tekniske begrensninger og ytelse. Inkludert i regelverket menes lover, forskrifter, standarder, normaler, retningslinjer og veiledninger. Disse kan være internasjonale, europeiske og nasjonale. I dette delkapittelet blir det gjennomgått et utvalg av relevante regelverk for å forstå hvordan beslutningene for design og drift gjennomføres.



Figur 5 Regelverkshierarki

2.3.1 Hjemmel i lovverket

Mange av forskriftene har hjemmel etter Vegloven (2014, §13), der det står at departementet har rett til å gi instruksjoner om anlegg på offentlig veg. Videre står det i § 62 at Samferdselsdepartementet kan gi pålegg og krav om å kvalitetssikre og standardisere data på det offentlige vegnettet.

Brann- og eksplosjonsvernloven (2002) er òg relevant for tunneler. En tunnel er definert som særskilt brannobjekt, og vil derfor være inkludert i § 13 om særskilte objekter. Denne loven gir hjemmel til å pålegge tiltak knyttet til alle former for brannsikring, deriblant tekniske og utstyrmessige forhold av betydning for brannbekjempelse og innsats. Selvredningsprinsippet, har hjemmel i krav til egenberedskap, og er i samsvar med EUs branndirektiv. Standarder kan gi mer detaljerte beskrivelser til EU-direktiver, nasjonale lover og forskrifter, blant annet ved å gi føringer om kvalitetskrav til ulike materialer, som ytelsestesting av ventilasjonsanlegget (Standard Norge, 2020).

2.3.2 Tunnelsikkerhetsforskriftene

Forskrift om minimum sikkerhetskrav til visse vegtunneler, «Tunnelsikkerhetsforskriften», (2007), utgjør den norske implementeringen av et felles europeisk regelverk. Formålet med forskriften er å sikre det laveste tillate sikkerhetsnivået for trafikanter, både forebyggende og konsekvensreducerende. Forskriften er gjeldende for tunneler med lengde på over 500 meter. Tunneler i Oslo har en egen forskrift, og er ikke relevant for tunnelutvalget.

Det er et krav fra EFTA at vegtunneler på det transeuropeiske vegnettet skal rehabiliteres og utbedres i henhold til Tunnelsikkerhetsforskriftene. I Norge skal disse fullføres innen 2022/2023, til tross for at opprinnelig frist var april 2019. Disse utbedringene har vært startskuddet for flere tunneloppgraderingsplaner av ventilasjonssystemene.

I Tunnelsikkerhetsforskriftens «Vedlegg 1» krever tunneler en risikoanalyse som forsvarer beslutningen om langsgående ventilasjon ved toveistrafikk, med hensyn til akseptabel risiko. I Norge er langsgående ventilasjon uansett praksis. En slik risikoanalyse skal likevel gi et grunnlag for å ta avgjørelser der utfallet og konsekvensene kan være usikre. Det påpekes i samme paragraf at andre tiltak kan veie opp for mangelfull ventilasjon, dersom dette lar seg gjøre. De gitte kravene er funksjonelle. Funksjonelle krav betyr at det står spesifikt hvilke anbefalinger og begrensninger myndighetene har til sluttresultatet som skal oppnås, men at det i mindre grad er bestemt hvilken fremgangsmåte som kan gjennomføres for å nå målene, for eksempel som nevnt i 2.2.1 at lufthastigheten skal være 2 m/s. Det er flere eksempler på tilrettelegging for skjønnsbasert vurdering, i hovedsak fordi kravene kan være vage, for eksempel at det «jevnlige» skal arrangeres felles øvelser for tunnelpersonal og redningstjenestene, eller at informasjon om ventilasjon skal være «tilgjengelig».

2.3.3 Kravdokumenter

Kravdokumenter, også kalt håndbøker, har som hensikt å stille krav til funksjonalitet, kvalitet og utførelse av styresystemene i tunnelene. SVV utgir både normaler, retningslinjer og veiledninger. Normaler har hjemmel i lovverk og gjelder for alle tunneler. Retningslinjene gjelder for riksveger, og har hjemmel i lovverk og instruksjoner fra Vegdirektøren. Disse kravene er ufravikelige. Veiledninger kan alternere og eksisterer for å understøtte og utdype normalene og retningslinjene (SVV, 2019d).

«Håndbok N500 Vegtunneler» (SVV, 2020) blir nevnt gjennomgående i teksten. Håndboken er utarbeidet av Vegdirektoratet i Norge, og instruerer hvordan et vegtunnelprosjekt

gjennomføres fra start til slutt. Disse instruksene er spesifikke for hvordan tunneleier, designere og forvaltere kan ivareta minimum sikkerhetskrav. Håndboken har et eget kapittel om tekniske anlegg, deriblant et delkapittel om ventilasjon, samt dimensjonering og forutsetninger for nødvendig ventilasjonsstyring. Håndbok N500 Vegtunneler spesifiserer dagens standard for ventilasjonsanlegget, både ved forurensing og dimensjonering for brann basert på de ulike geometriske tunnelutformingene.

«Håndbok N601 om elektriske anlegg» (SVV, 2017) spesifiserer ventilasjonsanlegg i tunnel som et styringssystem. Den forklarer hvordan VTS og nødøstater skal kunne styre mekanisk ventilasjon fra nødøstreskapet, samt at ventilatorene skal kunne styres enkeltvis. I tillegg vises det til vern mot overlast, der ventilasjonsmotoren skal ta hensyn til lave lufttemperaturer og høyt trykk (SVV, 2017).

«Håndbok R610 Standard for drift og vedlikehold av riksveger» (SVV, 2014 a) spesifiserer all sikkerhetsutrustning og teknisk anlegg som skal finne seg i en tunnel. Denne håndboken er mindre omfattende enn «Håndbok N500 Vegtunneler». For ventilasjonssystemet er det verdt å merke seg om vedlikehold og manglende ventilasjon: «Ved feil på ventilator skal feilretting starte innen 1 døgn eller etter spesiell beskrivelse.» (SVV, 2014a, s. 61).

«Håndbok R511 Sikkerhetsforvaltning av vegtunneler» (SVV, 2019b) omhandler ansvarfordelingen og roller for tunnelsikkerhet. Her blir det beskrevet at det er krav om forvaltning av tunneler ved tre ulike nivåer. Øverste nivå er forvaltningsmyndigheter, som i dette tilfellet er Vegdirektoratet. Vegdirektoratet skal påse at sikkerheten er ivaretatt på riksveger. Ved fylkesveger har fylkeskommunen forvaltningsmyndighet. Statens Vegvesen har som ansvar å utarbeide sikkerhetsdokumentasjon, utpeke brannvernleder og arrangere øvelser for personal og redningstjenester. Det siste nivået er sikkerhetskontrolløren, som har en rådgivende rolle for tunnelforvalter, og skal vurdere dokumentasjon og delta ved utarbeidelse for beredskapsplaner. For mer informasjon om ansvarsområder, refereres det til vedlegg A og B.

«TS 2007:11 Veileder for risikoanalyser av vegtunneler» (SVV, 2007) beskriver hvilke analyser som kan være aktuelle for ulike formål, samt hvordan grov risikovurdering og detaljerte risikoanalyser med risikoberegninger kan gjennomføres.

3. TEORI

I dette kapitlet vil det bli redegjort for relevante teorier forankret i tunnelsikkerhetsarbeid, risiko, systemsikkerhet og brannodynamikk. Hensikten med kapitlet er å formidle et rammeverk som setter problemstillingen i et faglig perspektiv. Perspektivene er valgt for å forstå hvordan mekanisk ventilasjon er en barriere i et system, og forhold som kan påvirke denne barrieren. Teorien vil anvendes for å forstå hvordan beslutninger om ventilasjonssystemet gjennomføres i innsamlede dokumenter og intervjuer, og vil være et produkt som kan fremme et realitetsbilde, enten ved å bistå datafunnene eller synliggjøre utfordringer mellom teori og praksis.

3.1 Tunnelsikkerhetsarbeid

Tunnelsikkerhetsarbeid og trafiksikkerhet er ofte sammenfallende i transportsektoren. Tunnelsikkerhet omhandler tiltak som sikrer trygge forhold for trafikanter, både i normaltilstand og ved en uønsket hendelse. Tunnelsikkerhet er nødvendig for å ivareta tunnelenes funksjon. Videre vil det beskrives bakgrunn og ulike faktorer som bør inkluderes, for en helhetlig forståelse av tunnelsikkerhetsarbeid.

3.1.1 Tunneler som dimensjoneringsgrunnlag

Vegtunneler er definert som «byggverk som fører vegen i en underjordisk eller undersjøisk passasje» (SVV, 2020). Tunneler kan ses på som et åpent system, avhengig av miljøet og karakteristikkene rundt, som er i konstant endring. Tunneler blir derfor dimensjonert etter individuelle behov basert på trafikkmengde, geografi og geologi. Med trafikkmengde menes det forventet årsgjenntrafikk (ÅDT), 10-20 år etter tunnelens åpning. Tunnelene kan slik bli inndelt i ulike tunnelklasser, med bakgrunn i informasjonen oppgitt. Klassene bestemmer krav til sikkerhetsutrustningen i tunnelene, og kategoriseres fra A til F, der tunnelklasse A er de korteste tunnelene med minst trafikk. For tunneler over 10 km må sikkerhetsutrustningen vurderes spesielt, og for tunneler i klasse E og F stilles det krav til to løp (SVV, 2020). I Norge er det gjennomsnittlig 21,25 branner per år per 1000 tunneler, med andre ord en brann gjennomsnittlig annenhver uke (Nævestad & Meyer, 2012). Tunnelene som blir gjennomgått i oppgaven er alle av tunnelklasse B, C, D og E. Oslofjordtunnelen som har tunnelklasse E skal i 2026 få sitt andre løp, men er foreløpig en ettløpstunnel. Det er tunnelklassene, sammen med en risikoanalyse, som blir brukt for å vurdere dimensjoneringsgrunnlaget for sikkerhet i tunnel. Det er vanlig for tunnelklasse A-D å dimensjoneres for en branneffekt på 50–100 MW. Ved

stigning over 2 % skal lufthastigheten beregnes spesielt, ettersom stigning og trykkbidrag påvirker røykens spredning, og derfor også ventilasjonskapasiteten (SVV, 2020, s. 60).

3.1.2 Sikkerhetssystemer

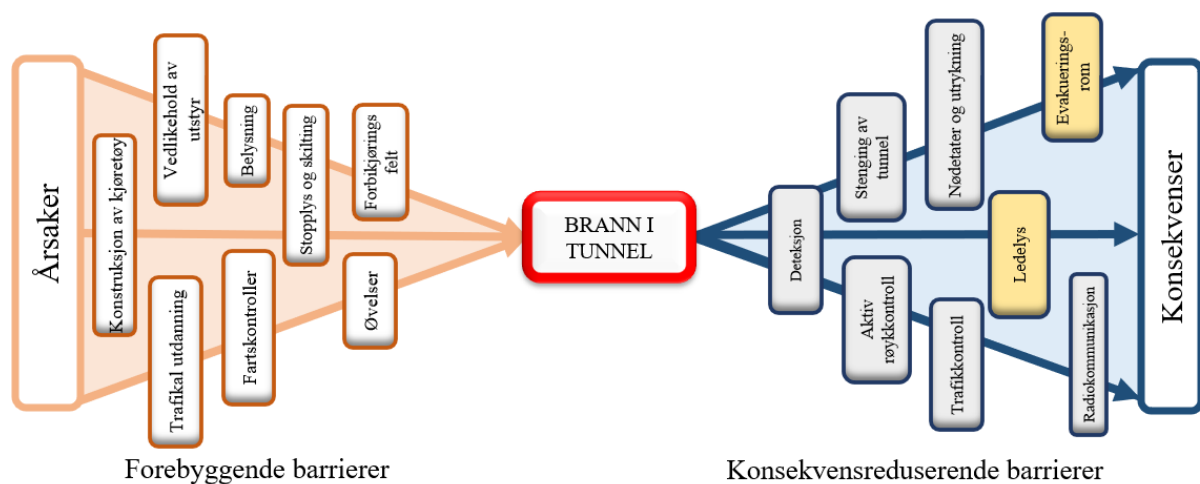
Et sikkerhetssystem kan beskrives som et system designet for å ivareta en viss standard av sikkerhetskrav, eller et allerede etablert system som har integrerte sikkerhetsløsninger. Disse sikkerhetsløsningene skal redusere eller avverge skadevirkninger ved en ulykke. Sikkerhetssystemer er med andre ord et beredskapstiltak. NORSOK Standard Z-013N (2001, s. 6) definerer beredskap grunnleggende ved å forklare formålet: «Tekniske, operasjonelle og organisatoriske tiltak, inkludert nødvendig utstyr, som planlegges for iverksettelse under ledelse av beredskapsorganisasjonen ved inntrådte fare- og ulykkessituasjoner for å beskytte mennesker, miljø og økonomiske verdier». Forenes dette med begrepet tunnelsikkerhet, kan sikkerhetssystemer beskrives som tiltak for å redusere risiko og alvorlighet av konsekvenser for trafikanter og tunnelstruktur. Alle tunneler over 500 meter har krav om sikkerhetstiltak, og ved over 1000 meter stilles det krav om ventilasjonstiltak. Eksempler på annen sikkerhetsutrustning er evakueringsrom, passiv brannbeskyttelse, nødstrømssystem ved strømutfall, rømningslys, nødstasjoner eller brannslukningsapparat. Videre vil det gis en oversikt over forebyggende og konsekvensreducerende sikkerhetssystemer ved brann i tunnel. Mange av disse systemene er avhengig av hverandre, og tilfører elementer, som sammen styrker tunnelsikkerheten.

3.1.3 Sikkerhetsfaktorer og -tiltak

Ved snakk om uønskede hendelser som en brann i tunnel, kan det ofte skilles mellom forebyggende og beskyttende tiltak. Forebyggende tiltak har som hensikt å begrense sannsynligheten for at en uønsket hendelse inntreffer, og helst eliminere hendelsen i seg selv. Beskyttende tiltak er tiltak som iverksettes etter en uønsket hendelse har inntruffet, slik at utfallet etter hendelsen blir mildere og konsekvensene for ulike verdier mindre alvorlige eller eliminert (Beard & Carvel, 2005, s. 82). Et annet ord for beskyttende tiltak er *konsekvensreducerende* tiltak, og viser i større grad hvordan tiltakene kan graderes etter effektivitet, der noen tiltak eliminerer hele eller deler av det negative konsekvensomfanget, hvor andre tiltak reduserer konsekvensene av ulik grad. Utfallet etter en uønsket hendelse kan påvirke liv, helse, materielle verdier, økonomiske midler, omdømme eller miljø. Tiltakene kan kategoriseres som tekniske, organisatoriske og operasjonelle. Tekniske tiltak kan være branneteksjonssystemet, utstyr eller fysiske sperringer. Organisatoriske tiltak omhandler

bemanning, kompetanse og samordning. Operasjonelle tiltak kan være varslingsystemer, vedlikehold og sikring av kvalitet (Njå, Sommer, Rake & Braut, 2020)

I figur 6 illustreres et sløyfediagram for et barrieresystem ved brann i tunnel. Illustrasjonen har som formål å vise hvordan forebyggende og beskyttende tiltak virker, før og etter krysningstunktet med en uønsket hendelse. Illustrasjonen kan leses kronologisk fra venstre til høyre. De underliggende og utløsende årsakene ligger helt til venstre, med forebyggende barrierer mellom årsakene og den uønskede hendelsen. I noen tilfeller kan de forebyggende barrierene alene avverge en hendelse. Etter en uønsket hendelse har inntruffet, vil de konsekvensreducerende barrierene lede til et utfall med konsekvenser og tap. Totalt sett kan sløyfediagrammet brukes for å se på beskyttelse av en verdi i dybden, og slik måle effektiviteten av ulike sikkerhetsbarrierer: Barrierer som var på plass og hvordan dem presterte på godt og vondt, barrierer som var på plass, men som det ikke var behov for, og barrierer som manglet, men som var nødvendige (Sklet, 2006).



Figur 6 Sløyfediagram for brann i tunnel

Det er mulig å skille mellom aktive og passive barrierer blant de konsekvensreducerende tiltakene. Aktive barrierer er direkte knyttet til pågående styring og må aktiveres, kommuniseres eller detekteres av en hendelse før de fungerer. For eksempel kan dette være stenging av en tunnel, slokking av flammer eller ventilerings av røyk. I figuren er disse markert blå. Ventilasjonssystemet blir betraktet som en aktiv barriere, markert «aktiv røykkontroll» i sløyfediagrammet, ettersom systemet bidrar til å endre potensielle konsekvenser. Passive barrierer er fysiske barrierer eller frittgående systemer for å redusere hastighet for røyk- og varmeoverføring, som allerede er monterte og vanskelige å påvirke underveis i en pågående situasjon (Leveson, 2011; KBT, u.å.). Eksempler på dette kan være etablerte rømningsveier, strukturell beskyttelse i tunnelen, brannvegger og liknende. Disse er markert lysegule i

sløyfediagrammet. Barrierer kan både være uavhengige og avhengige av hverandre, men forsvar-i-dybden brukes om uavhengige faktorer som alene og lagvis reduserer farer.

3.1.4 Ytelse av barrierer

Barrierene kan videre vurderes på ytelse basert på funksjonalitet, responstid, pålitelighet og robusthet. Barrierefunksjonalitet er evnen til å utføre en funksjon under gitte tekniske og operasjonelle tilstander. Responstid til en sikkerhetsbarriere er tiden fra aktivering er gjort til hele barrieren virker. Barrierepålitelighet er evnen til å utføre funksjonen med den forventning eller krav som er gitt av den faktiske funksjonaliteten eller responstiden, og robusthet er evnen til å motstå belastning i alle sekvenser av en hendelse (Sklet, 2006). Felles for disse vurderingsgrunnlagene er at barrieren må være tilstrekkelig for situasjonen både i tid og mengde, og ikke miste funksjonsevne underveis. Dette danner valg av dimensjonering for barrieren. Dimensjoneringsgrunnlaget og krav for barrieredesign vil være avhengig av valgt sikkerhetsnivå. Et sikkerhetsnivå kan beskrives som et akseptabelt nivå for å ivareta nødvendig sikkerhet for trafikantene i tunnelen (Njå m.fl., 2020).

I regelverket er det omtalt ulike nivåer for hva som er akseptabelt i en gitt sammenheng, blant annet minimumskrav, men det er òg sammenlikninger og forventninger om dagens nivå, ofte med bakgrunn i risikoanalyser. Aven (2006, s. 14) definerer risikoakseptkriterier som verbale eller tallfestede uttrykk, som setter grenser for hvilken risiko som er akseptabel eller ønskelig. For å vurdere om løsningene er tilfredsstillende, kan løsningene knyttes opp mot krav som omhandler ulike deler ved et system, innretning eller situasjon.

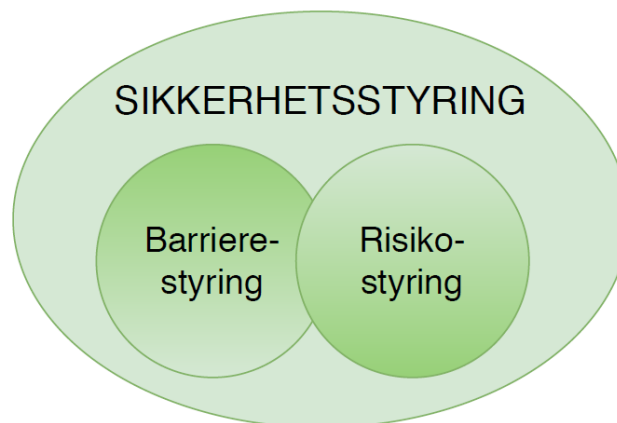
For å skille mellom barrierene før og etter en hendelse brukes begrepene sikkerhet og beredskap. Sikkerhet knyttes til preventive tiltak relatert til et fysisk miljø, menneskelige og sosiale faktorer gjennom ulike faser av en prosess. Beredskap knyttes i større grad til de tiltakene som gjør at den uønskede hendelsen hindrer alvorlige konsekvenser (Aven, Boyesen, Njå, Olsen & Sandve, 2004). Sikkerhet kan samtidig opptre som en tilstand, og handler om evnen til å unngå skader og tap. Sikkerhetsstyring og tunnelsikkerhet handler derfor både om å redusere sannsynligheten for at noe inntreffer, men òg å redusere konsekvensene av en hendelse.

3.2 Systemsikkerhet og styring av risiko

Tunnelsikkerhetsarbeid handler om å opprettholde et nivå av sikkerhet, slik at det skal være trygt å ferdes gjennom tunnelen. Videre i delkapittelet vil det gis et innblikk i hvordan beslutningstakere kan vurdere sikkerhetsnivået i tunnelen, og hva som legges i føringene for tiltak og styring av risiko.

3.2.1 Sikkerhetsstyring

Njå m.fl. (2020) definerer sikkerhetsstyring som «alle tiltak som iverksettes for å oppnå, opprettholde og videreutvikle et sikkerhetsnivå med definerte mål». Sikkerhetsstyring kan med andre ord brukes for å overvåke praktisk gjennomføring av tiltakene, og slik skape forutsigbarhet for mulige utfall. Videre skiller Aven (2006) mellom to ulike former for sikkerhetsstyring: Risikostyring og barrierestyring. Felles for begrepene er tolkningen av hvordan sikkerhet har vært vurdert tidligere, hva som gjøres nå, og hvilken beslutningsstøtte som potensielt eksisterer i fremtiden.



Figur 7 Sikkerhetsstyring, barrierestyring og risikostyring

Risikostyring handler om aktørenes ønske om å styre risiko i forbindelse med en aktivitet. Begrepet *risiko* blir brukt i definisjoner som omhandler en situasjon eller en gitt hendelse med tilhørende konsekvens, verdi, sannsynlighet og usikkerhet. Risiko blir med andre ord relevant i forbindelse med menneskers liv og helse, miljø, materielle verdier og produksjon. Definisjonen innebærer å identifisere, estimere og kontrollere hendelser knyttet til risiko, ved hjelp av mål og tiltak. Målene kan omhandle menneskets trygghet og håndtering for et mer ønskelig utfall av en hendelse. For å oppnå målene må en iverksette tiltak. Tiltakene kan være pålitelig teknisk utstyr, strengere krav til bruk av utstyr, holdningskampanjer eller liknende. Fysiske forhold, ressurser, aktørinkludering og krav kan være begrensninger for valg av virkemidler, og valgene

som blir gjort må være realistiske og overkommelige. For å forstå hvordan risiko blir definert er det relevant å trekke frem tre faser: Først identifisering og vurdering av farer og akseptkriterier, deretter vurdering av hvilke tiltak som kan forhindre, redusere eller endre konsekvensene av situasjonen. Til slutt påpekes det hvordan risikokommunikasjon kan tette kunnskapsgapet mellom eksperters beslutninger og folks evne til å forstå og handle, samt tolke risiko basert på valgte avgjørelser (Aven & Renn, 2010, s. 50-52).

Den andre formen for sikkerhetsstyring, *barrierestyring*, handler om bedriftens ønske å styre påliteligheten av et teknisk produkt, for eksempel røykkontroll ved hjelp av mekanisk ventilasjon. Barrierestyring vil kun ta for seg én av barrierene som vist i sløyfediagrammet i figur 6, og fokuserer på hvorvidt denne barrieren opprettholder tiltenkt funksjon eller ei. Det gjøres ved å teste ytelsen i en aktuell situasjon, som forklart i kapittel 3.1.4. Barrierestyring kan òg bestå av en funksjon, prosess eller løsning, for eksempel valg og retningslinjer for ventilasjonsstyringsprinsipp eller advarsler og alarmer ved fare, og trenger derfor ikke direkte å være en fysisk gjenstand. Ulempen med barrierestyring kan være den uoversiktlige kompleksiteten i systemet (Reason, 1997, s. 7).

Forskjellen på disse to sikkerhetsstyringstilnærmingene er i hovedsak om sikkerhetsstyringen skal omhandle en spesifikk innretning eller et helt system som er sammensatt av alle barrierene og virkemidler som blir brukt. For risikostyringsperspektivet vil ventilasjonsanlegget bli en del av et større bilde, med total sikkerhetsutrusning i tunneler. Prioritering av sikkerhetsstyring og valg av løsninger kan endre seg. Hvilke perspektiver brukes i dag ved dimensjonering og drift av sikkerhetstiltak for tunnelbrann? Begge styringsforholdene kan spille inn ved analysering og vurdering av tunnelens og trafikantenes behov.

3.2.2 Systemsikkerhet

Ved vurdering av sikkerhetsstyring i komplekse prosesser er det hensiktsmessig å introdusere konseptet systemsikkerhet. Leveson (2011) omtaler systemsikkerhet som en organisering av kompleksitet. Tilnærmingen setter søkelys på systemet som en helhet, der barrierestyring ikke kan foregå uten risikostyring. Beard & Carvel (2005) skriver at et system kan defineres som en enhet, enten konseptuell eller fysisk, som består av flere sub-systemer og komponenter. Samtidig vil Leveson sin teori videre forklare at disse sub-systemene er avhengige av hverandre, og dermed er mer enn summen av de separate komponentene. Prosjekterende aktører og operatører må derfor forutse og tolke systemegenskaper med hensyn til alle sosiale og

tekniske påvirkninger, slik at hele samhandlingsprosessen med kommunikasjonspraksis inkluderes, til tross for at hver enkelt barriere blir vurdert separat.

Systemteori er grunnlagt på to ideer. Den første ideen er hierarkiteoretisk og dynamisk, der målet med systemteori er å forklare forholdet mellom ulike nivåer i systemet, hva som separerer dem og kobler dem. Dette kan eksemplifiseres slik: I følge Levesons teori er ikke en ventilasjonsvifte sikker kun basert på at den er pålitelig og fungerer, så lenge konteksten og situasjonen ikke er beskrevet. Det betyr at for ventilasjonsanlegget må det videre ses på relasjonen mellom den fungerende viften og miljøet rundt. Dersom en ventilasjonsvifte blåser røyk i en gitt hastighet, er det ikke trygt eller korrekt hvis resultatet blir at røyken styres i feil retning relatert til trafikantene eller andre verdier. Ideen kan dermed brukes ved planlegging og operering av et system. Flere komponenter tydeliggjør situasjonen, og skaper mer trygghet for beslutningsgrunnlaget. På den andre siden kan samme tiltak øke kompleksiteten, og skape usikkerhet og tvetydighet, dersom signalene ikke kan tolkes raskt.

Den andre ideen er dannet på synet om at et åpent system kan kastes ut av en likevektstilstand som følge av en miljøendring, og tar for seg kommunikasjon og kontroll av sikkerhet (Leveson, 2011). I ulykker med raske endringer spiller denne modellen en viktig rolle, og er i prosessdiagrammet fra kapittel 2 en del av usikkerhetselementet. For å kontrollere et åpent system kreves det fire betingelser: Kontrolløren må ha ett eller flere målsetninger, kontrolløren må ha mulighet til å påvirke tilstanden til systemet, kontrolløren må ha tilgjengelig en modell og forstå hvordan prosessen fungerer, og kontrolløren må ha mulighet til å observere systemtilstandene (Njå m.fl., 2020). Uten disse veiledningene, vil det være større risiko ved beslutninger.

Samtidig er det viktig å inkludere et tidsperspektiv, der hver prosess påfører forsinkelser. Med dette menes det at det tar tid å motta informasjon, fortolke og sende videre et budskap. En beredskapssituasjon bryter ned en hendelse i ulike faser: Varsling, bekjempelse, redning, evakuering og normalisering (Aven m.fl., 2004, s. 71). Ikke alltid skjer en hendelse i rekkefølgen som forventes, og ved brann i tunnel kan det pågå evakuering, bekjempelse og redning samtidig. Dette kan medføre økt kompleksitet for systemet.

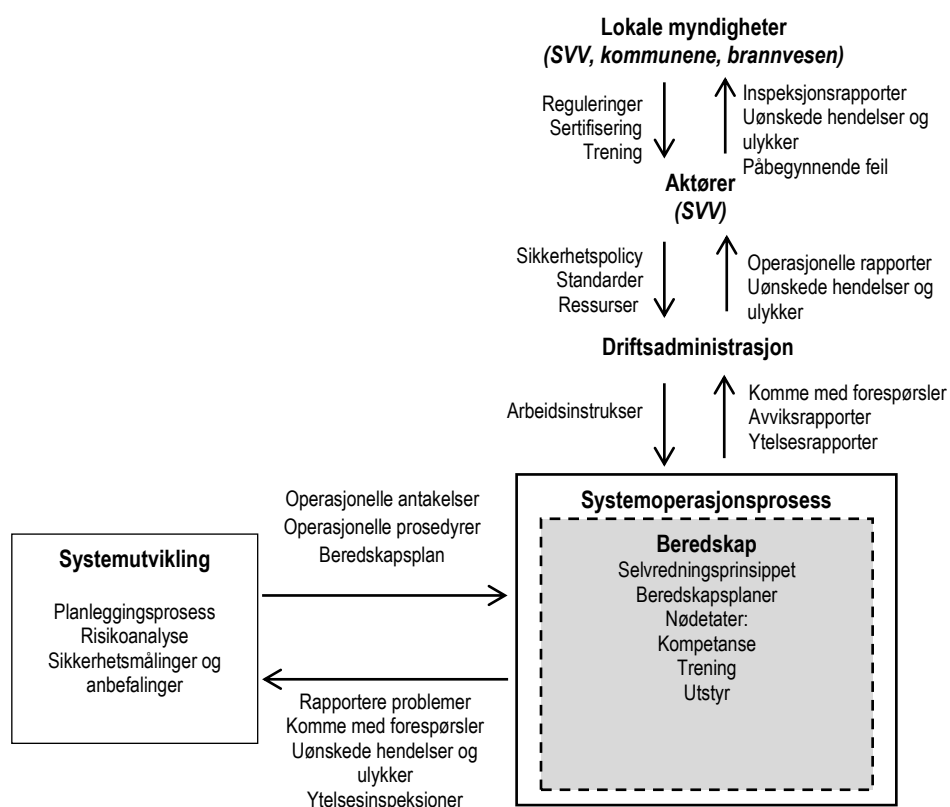
Det er òg usikkerhet i forbindelse med andre tilførsler til prosessen, som ennå ikke er observert, og ukontrollerte forstyrrelser, som sammen danner et resultat med tilhørende konsekvenser. Prosessen krever en systemtilnærming, med hensyn til hvordan hver barriere eller mekanisme blir kontrollert, og hvilke sammenhenger som må inkluderes når sikkerhet omhandler flere

prosesser. Leveson (2011) viser til fire handlinger som må skje for at aktiv røykkontroll som en barriere skal iverksettes: Oppdagelse av en uønsket hendelse, måling av variabler, diagnostisering og tolkning av variablene, og til slutt en valgt respons.

Videre vil det beskrives hvordan responsen for røykkontroll kan gjennomføres før hendelsen er oppdaget i seg selv, og hvilke variabler beslutningstakere bruker i tunnelsikkerhetsarbeidet.

3.2.3 Kommunikasjon mellom systemutvikling og operasjonsprosessen

I forskningsspørsmålene blir det både vurdert dimensjonering ved systemutvikling og -drift. For å forstå de hierarkiske beslutningene i et systemperspektiv, må det skilles mellom fasene. I forrige delkapittel ble det gjennomgått en hierarkisk systemteoretisk tilnærming for beslutninger. Planlegging av et system må skje i tett samarbeid med operativ kontroll, og med kommunikasjon mellom nivåene. Figuren nedenfor viser et utdrag av ventilasjonssystemet i en røykkontrollprosess. Systemutvikling kan kategoriseres i ulike hierarkiske nivåer på samme måte som systemoperasjonsprosessen, men i samferdselssektoren er det gjennomgående Vegdirektoratet og SVV både nasjonalt og regionalt, samt lokale variasjoner, som påvirker systemet. Dette studiet vil hovedsakelig berøre forholdet mellom lokale myndigheter og aktører, samt forholdet mellom utvikling- og operasjonsprosessene.



Figur 8 Utdrag fra vegtunneler som et sosioteknisk system, basert på Leveson (oversatt fra Njå & Svela, 2017)

I operasjonsfasen må det sørges for at forutsetningene, som er gjort i planleggingsfasen, overholdes for å sikre ønskelig resultat. Ved utfordringer skal det kommuniseres tilbake til planleggere og beslutningstakere ansvarlige for systemutvikling, slik at prosessen tilpasses. Samvirket krever samarbeid mellom fylkeskommunen og SVV, òg innad i egne lokale myndigheter, slik at alle har en felles forståelse på strategisk, taktisk og operasjonelt nivå (Njå m.fl., 2020). For mer informasjon om aktørenes ansvar for tunneler, se vedlegg A.

3.3 Prosjektering og beslutning under usikkerhet

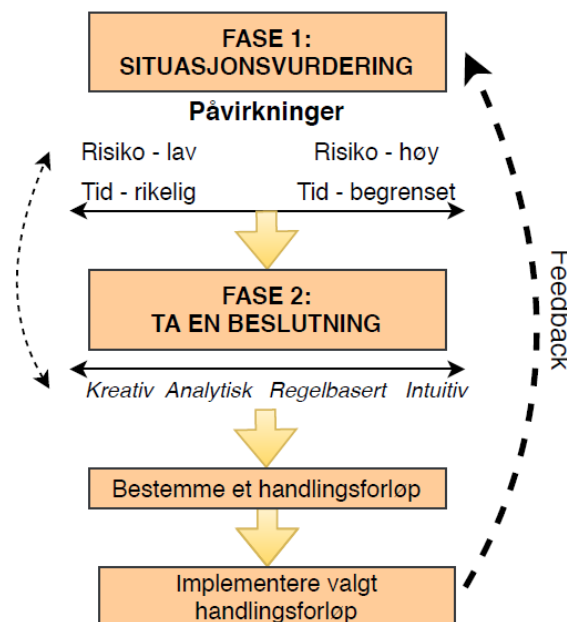
Videre er det ønskelig å se på hvordan beslutningstakere kan komme frem til design- og prosessløsninger, basert på forutsetninger for røykkontroll og brannscenarier. Prosjektering handler om å se på ulike alternativer, evaluere og gjøre vurderinger av alternativene, og til slutt gjennomføre en beslutning. Både i designfasen og driftsfasen må det fattes beslutninger for ventilasjonssystemet, men i designfasen er det betydelig mer tid for å vedta valg av handlinger til senere, i motsetning til driftsfasen ved en uønsket hendelse.

3.3.1 Usikkerhet

Usikkerhet er et begrep som ofte brukes i forbindelse med hvordan beslutningstakerne opplever og håndterer risiko. Husby (1999, s. 13) definerer usikkerhet som differansen mellom den informasjon som er nødvendig for å ta en sikker beslutning, og den tilgjengelige informasjon (Husby, 1999, s. 13). I oppgaven vil usikkerhet referere til mangel på kunnskap og sikkerhet ved avgjørelser, samt usikkerhet i forbindelse med hvilken risiko som er til stede for nødetater og trafikanter. Usikkerhet omkring hendelsesforløpet kan medføre restrisiko ved prosjektering, som forklarer hvordan beslutningstakerne ikke kan gardere seg mot alle brannscenarier som kan oppstå (Lunde, 2014, s. 34). Restrisiko kan beskrives som uforutsett risiko etter sikkerhetstiltakene og barrierene er iverksatt, for eksempel svikt i systemene, menneskelige feilhandlinger eller uforutsette hendelsesforløp. Usikkerhet avhenger med andre ord av en rekke faktorer som bør inkluderes i beslutningsprosessen for aktiv røykkontroll. Det er begrenset hvor mye kunnskap som kan innhentes i forkant av en hendelse, og usikkerhet kan være en av de store årsakene til hvorfor det eksisterer ulike beslutningsstrategier.

3.3.2 Beslutningsstrategier

Beslutningstaking kan beskrives som en to-steps-prosess som først innebærer å vurdere situasjonen. Spørsmålet er hvor høy risiko finnes, hva kan skje og hvor mye tid som foreligger før beslutninger gjennomføres. I den andre delen skal beslutningstakeren gjennomføre et valg basert på situasjonen. Flin, O'Connor & Crichton (2008) har utviklet fem ulike beslutningsstrategier basert på tilgjengelig tid: *kreativ, analytisk, regelbasert, intuitiv og risikobasert* beslutning. Forfatterne skriver om beslutningsstrategier ved kompleks teknologi og risiko, i den skarpe enden av krisehåndtering. I dette studiet vil beslutningsstrategiene brukes for å utdype hvordan systemutvikling og -operasjonsprosessen ved røykkontroll må skilles mellom planleggingsfasen, i forkant av en hendelse, og en akutt situasjon, når hendelsesforløpet utvikler seg raskt, og der avgjørelser gjennomføres med begrenset tid og innspill.



Figur 9 Simplisert modell for beslutningstaking (oversatt fra Flin, O'Connor og Crichton, 2008, s. 44)

I systemutviklingsfasen konstruerer, reviderer og bruker beslutningstakerne risikoanalyser, potensielle brannscenarier og eksterne anbefalinger for å beskrive hvordan ventilasjonssystemet kan brukes for aktiv røykkontroll. I figuren ovenfor vil denne fasen ligge på venstresiden av beslutningsprosessen. Helt til venstre beskrives kreativ beslutningstaking. Denne vil være mindre relevant for tunnelbranner, som har statistisk grunnlag fra tidligere hendelser, samt testede løsninger for bruk av mekanisk ventilasjon. Beslutningstakerne kan i større grad benytte seg av analytisk beslutningstaking, som baserer seg på tolkninger av innsamlet informasjon for å predikere mulige utfall ved bruk av røykkontroll, og deretter komme med løsningsalternativer. Løsningsalternativene kan sammenliknes med ulike modeller

og innfallsvinkler. Beslutningstakerne kan foreslå den løsningen de anser som mest optimal. Beslutningene kan òg gi grunnlag for valg av sikkerhetskrav i designprosessen, og bestemmelse av hvilke sikkerhetssystemer som er kritiske. Validering av en slik designprosess er komplisert, ettersom designet må definere fremtidige perspektiver og systemegenskaper opp mot en tunnelbrann (Borg, Njå & Torero, 2015).

I en systemoperasjonsprosess vil beslutningstakeren ha mindre tid tilgjengelig etter brannen er oppdaget til å gjennomføre beslutninger. Beslutningene kan òg medføre opplevelse av høyere risiko, ettersom det gjerne er trafikanter eller andre avhengige faktorer av valgt løsning. Regelbasert beslutningstaking innebærer å bruke vanlig praksis, prosedyrer og regler, og er enkel å rettferdiggjøre for operatører i etterkant. Da blir gjerne tidligere analytiske beslutninger fulgt. Ulempen med regelbasert beslutningstaking er at situasjonsforståelsen og viktige faktorer overses, i frykt for å gjøre feil handlinger. Den forhåndsdefinerte strategien som ble besluttet i den analytiske prosessen er kanskje ikke gunstig, fordi situasjonen har utviklet seg annerledes enn hva som var forventet. Beslutningstakeren kan da handle mer intuitivt. Intuitiv beslutningstaking fattes ved å gjenkjenne en situasjon tidlig i hendelsesforløpet, basert på tidligere erfaringer, uten å reflektere over dette i en situasjon med begrenset tid på å vedta en løsning (Engen, Kruke, Lindøe, Olsen, Pettersen & Pettersen, 2016, s. 313). En intuitiv beslutning kan virke negativt ved å utelukke detaljer og legge forventninger i hva som kan skje videre, men kan òg være en god strategi dersom beslutningstakerne er kompetente og hendelsesforløpet kjent.

Flin m.fl. (2008) introduserer risikobasert beslutningstaking som en siste variabel, som kan gjennomføres med knapp tid i en operasjonsprosess. Fokuset med risikobasert beslutningstaking ligger i å vurdere usikkerhet som kan ha betydning for utfallet. Beslutningstakeren må først identifisere kritiske faktorer som kan påvirke konsekvensspekteret, og vurdere valgmuligheter som allerede finnes. Valgmulighetene er gjerne de alternative løsningene som er gjennomført analytisk. Beslutningstakeren må da vite hvilke forhold og størrelser som ble brukt ved etablering av de predefinerte røykkontrollalternativene (Borg m.fl., 2015). Disse mulighetene prioriteres basert på hva som er kritisk for videre innsats. Strategien er nyttig i ukjente situasjoner, og krever vurdering av risiko ved å gjennomføre aktuelle beslutningsalternativer. En risikobasert beslutningstaking kan i stor grad likne på prosessdiagrammet presentert i kapittel 2, der VTS kan fatte beslutninger om å overstyre automatisk respons, ved å se på usikkerhet omkring situasjonen og tolke signalene som kommer inn til toppsentralen.

Beslutningene omkring røykkontroll vil med andre ord overlape hverandre i to svært ulike faser. En slik beslutningstaking krever at kommunikasjonen mellom disse fasene er virkningsfull, slik at beslutningene gjort for dimensjonering har vært med hensyn på operasjonsprosessen.

3.4 Tunnelbrann

Dette delkapittelet gir kort innføring i et brannforløp, med vekt på røykens atferd og ventilasjonens påvirkning av røyk. Det er viktig å forstå brannens omfang og potensielle scenarioer, for å kunne dimensjonere for tunnelbranner. Dette kan videre påvirke hvordan ventilasjonssystemet opereres, samt hvilken respons som kan være mest gunstig.

3.4.1 Hvordan oksygentilførsel og tunnelens geometri påvirker brann

Gjennomsnittlig kan vi forvente én brann annenhver uke i en av Norges tunneler (Nævestad & Meyer, 2012). En tunnelbrann kan starte i alle typer kjøretøy, alt fra personbiler, vaner, busser, lastebiler, sølt diesel eller bensin, el-utstyr i tunnel eller annet. De mest alvorlige brannene har skjedd som et resultat av branntilløp i tunge kjøretøy og kjøretøyslast, og konsekvensene av den enorme varmeutvekslingen en tunnelbrann fører med seg, kan skade utstyr og tunnelstruktur, samt forhindre tilkomst for nødetater ved redning og sløkning (Gehandler, 2015; Beard & Carvel, 2012; DSB, 2015). Tekniske problemer i tunge kjøretøy er den hyppigste årsaken til alvorlige branner i Norge, og de fleste brannene registreres i midtsonen av tunnelen (Nævestad & Meyer, 2012).



Figur 10 Brannforløp som funksjon av tid

I figur 10 ovenfor, illustreres det en forenklet graf om hvordan et brannscenario forløper gjennom tre faser. Først sprer brannen seg fra antennelseskilden, for eksempel motorrommet i

et kjøretøy. Dersom det ikke igangsettes aktiv respons eller forsøk på å slokke brannen, vil alt brennbart materiale etter en gitt tid være oppslukt i flammer. Mulighet for å slokke brannen på egenhånd reduseres, etter hvert som brannen øker i omfang. Etter en stund, har brannen nådd maksimal brannstyrke, med høyest varmeavgivelse og temperatur ved forbrenning. Varmeavgivelse er blant de viktigste faktorene som bidrar til alvorligheten av en brann. Varmeutvekslingsrate kan beskrives som den maksimale utvekslingen en brann gir til miljøet basert på luftstrømningene, og er avhengig av volumetrisk luftstrømning. Ved dimensjonering for tunnelbrann er det denne raten på y-aksen som brukes, og brannscenarioer involverer gjerne forklaringer av forventet varmeutvekslingsrate med tidsforløp, samt andre materielle egenskaper og miljøbetingelser. Et av målene ved å stadfeste maksimal varmeutvekslingsrate er å vurdere ytelsen til et valgt system (Borg m.fl., 2015). Etter en gitt tid vil intensiteten til brannen avta igjen, enten naturlig ved at materialene brennes opp, eller tvungen ved aktiv slokking.

Tunnelbrann skiller seg fra åpne branner, og utviklingen av tunnelbranner er komplekse. For å se hvor raskt flammer sprer seg i brennende materiale, må det i hovedsak inkluderes to faktorer: Det første er alt som er relatert til selve flammen, blant annet overflaten, tetthet og mengde brennstoff, termisk kapasitet og branngemetrien. Den andre faktoren er alt som påvirker miljøet rundt, slik som temperatur, luftstrømninger og sammensetning av luften, deriblant oksygenmengde (Jagger & Grant, 2012). Gehandler (2015) påpeker i sitt kapittel at ved tunnelbrann er miljøet omkring spesielt viktig, ettersom både takhøyde og ventilasjonsforhold kan påvirke flammestruktur og røykens spredning: For det første vil et lukket miljø i en tunnel gjøre at brannen kan utvikle seg raskere, ettersom varmen blir sendt tilbake til flammeoverflaten. For det andre kan oksygenivået i tunnelen være mer begrenset enn på en åpen plass, og dermed påvirke forbrenningens renhet (Gehandler, 2015; Ingason, 2012). Usikkerhet ved validering av brannforløpet kan knyttes til hvorvidt tunnelbrannmodellen klarer å fange de relevante egenskapene og situasjonsbaserte forholdene som påvirker utviklingen (Borg m.fl., 2015).

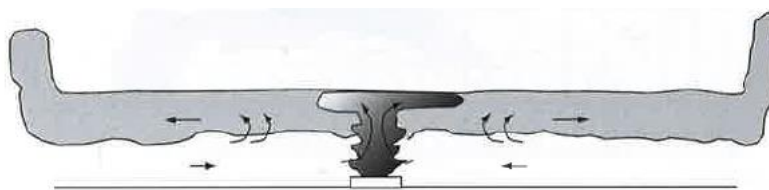
I Beard & Carvel (2012, s. 223) sin bok om brannsikkerhet i tunnel, presenterer de en grafisk fremstilling av sannsynlighet for at mekanisk ventilasjon påvirker tunnelbrann. Grafen sammenlikner varmeavgivelsen i vekstfasen mot ventilasjonshastighet. De anslår en sannsynlighet for at mekanisk ventilasjon øker varmeavgivelse på cirka 50 %. Videre viser de at mekanisk ventilasjon på mer enn 4 m/s ved tyngre kjøretøy kan gi en brann med fire ganger så stort omfang, selv om brannen i første fase i hovedsak er kontrollert av tilgangen på brennbart

materiale. Dette er kun relatert til fasen før brannen har nådd fullskala, men en slik periode kan være kritisk for redning og brannslukking.

Jagger & Grant (2012) påpeker derimot at økt ventilasjonshastighet kan redusere alvorligheten ved en brann og sørge for en renere forbrenning, noe som kan være tryggere for trafikanter. De ser ikke bort fra at samme handling òg kan øke varmeutveksling og spre brannen på et større område. Både Beard & Carvel (2012) og Jagger & Grant (2012) trekker frem at mekanisk ventilasjon kan redusere mindre tunnelbranner, og at omfanget av brannen bør kartlegges hurtig. Jagger & Grant (2012) anbefaler ikke å ha fast ventilasjonsrate, ettersom ulike tunneler og ulike scenarioer bør vurderes separat i hvert enkelttilfelle.

3.4.2 Ventilasjonens påvirkning på røyk ved tunnelbrann

Tunnelbrann kan medføre alvorlig fare for liv og helse. Viktigst er farene ved eksponering for røyk som består av giftige partikler, og begrenset sikt, som kan påvirke evakueringsmuligheter. En alvorlig brann vil bruke mye av oksygenet i luften, og påvirkes derfor av hvor mye luft som blir tilført. Dersom det er tilstrekkelig tilgang på brensel og høy temperatur kan brannen utvikle seg til å være *ventilasjonskontrollert*, eller underventilert, der tilgang på luft er bestemmende for videre utvikling. Ved overventilert eller brenselskontrollert brann kan det oppstå røykpropper, som kan medføre utfordringer for evakuering. Tunnelbranner er avhengig av kontinuerlig tilførsel av oksygen, og luftsirkulasjon er en av de viktigste faktorene for oksygentilgang til brannen (Gehandler, 2015). I figur 11 illustrerer pilene hvordan luftstrømningene tilfører friskt oksygen i det nederste sjiktet av tunnelen, og at oppvarmet røyk beveger seg vekk fra flammene i øverste sjiktet.

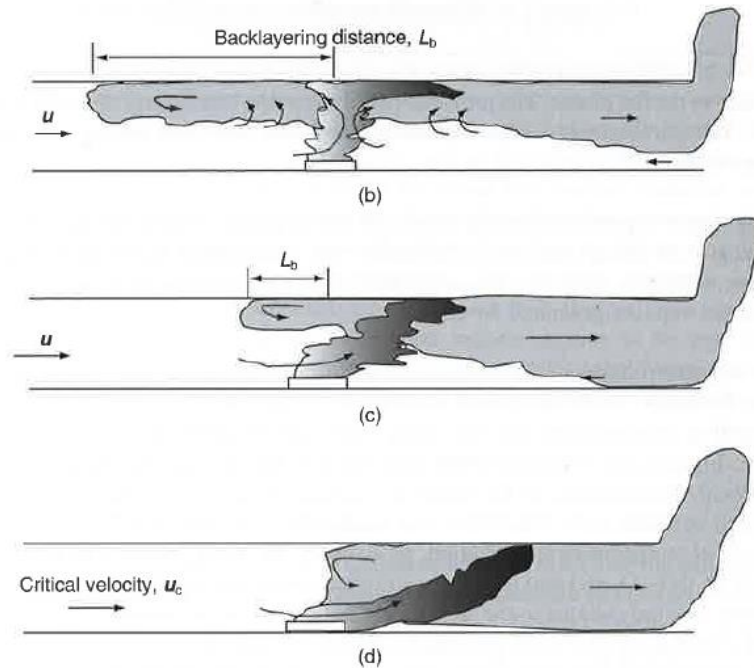


Figur 11 Illustrasjon (a) av røyk i tunnel (Ingason, 2012, s. 285)

3.4.3 Utbredelse av røyk i tunnel

Til tross for at ventilasjon kan ha innflytelse på tunnelbrannen, blir det i denne oppgaven fokusert på hvordan mekanisk ventilasjon kan kontrollere røyk for å sikre selvredning. Uten ventilasjon vil røyken bevege seg opp og legge seg langs taket på tunnelen, som vist i figur 11. Varmen vil dermed overføres til taket, vegger og omkring i luften. Etter hvert som varmen økes

og røykfangets relative rekkevidde er nådd, kan røyken ekspandere nedover og ligge lavere i terrenget. Etter en gitt tid eller avstand vil lagdelingen opphøre som følge av varmeutveksling og temperatur. Ved lang transportvei eller objekter i tunnelen, kan det forventes at røyken kjøler seg ned og legger seg langs vegbanen.



Figur 12 Illustrasjon (b),(c),(d) av røykfordeling i tunnel ved ulike ventilasjonshastigheter (Ingason, 2012, s. 285)

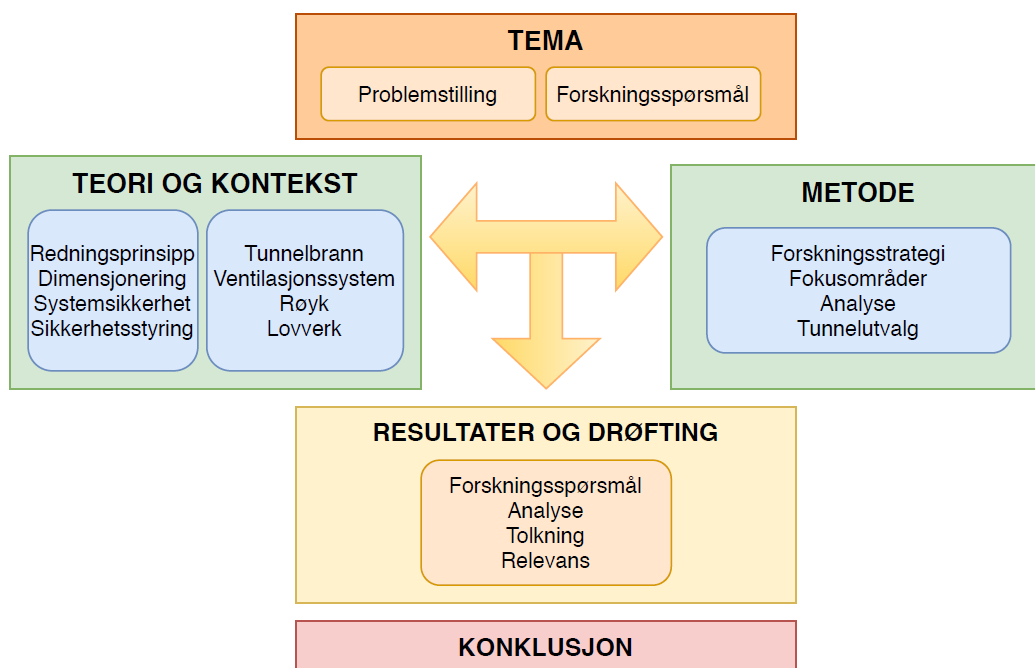
I figur 12 vises det tre eksempler på hvordan røyken sprer seg, basert på ventilasjonshastighet og -retning. Øverst vises et eksempel med lav ventilasjon på 1 m/s. Større deler av røyken vil gå med vindretning, men det vil fremdeles være røyk oppstrøms til venstre. På figuren vises distansen for backlayering, også kalt *motstrømningssjikt*. Motstrømningssjiktet er definert som avstanden mellom brannen og til avgrensningen av ventilasjonstrykket, når røyktrykket fra brannen overgår trykket som kommer fra naturlig og mekanisk ventilasjon (KBT, u.å.). I midten illustreres det moderat ventilasjonshastighet på 1-3 m/s, og nederst en ventilasjonshastighet som omtales som *kritisk hastighet* for røyk. Kritisk hastighet gir en motstrømningssjiktet på 0 (Jagger & Grant, 2012). Da vil det ikke være røyk oppstrøms for brannen, men trafikanter nedstrøms kan oppleve røykproblemer. Fordelen med lav hastighet når røyken starter, som vist i (a) og (b) i figur 10 og 11, er at den røykfrie sonen gir oversiktlige evakueringsmuligheter i nedre sjiktet av tunnelen for trafikanter (Technical Committee 5 Road Tunnels, 2007). Borg m.fl. (2015) legger vekt på at modellene for røykkontroll må definere alle fremtidige perspektiver for tunnelbrannen, og inkludere sosiale forhold, samt refleksjoner om systemtelsen til sikkerhetstiltakene.

4. FORSKNINGSMETODE

I forskningsmetode vil valgene om tilnærming til oppgaven bli begrunnet og forklart utdypende. De første delkapitlene presenterer valg av forskningsstrategi og -design. Videre forklares hvordan datamaterialet er innhentet og analysert fra dokumenter, intervjuer og observasjoner. Deretter følger refleksjoner om overførbarhet og utfordringer ved oppgaven. Til slutt beskrives det hvilken evaluering som ligger til grunn for tunnelutvalget.

4.1 Forskningsstrategi

Problemstilling vil styre valg av forskningsdesign (Moen & Karlsdóttir, 2011; Dale, Jones & Martinussen, 1985; Morse & Richards, 2002). Problemstillingens formål var strategisk å kartlegge et spesifikt system opp mot sikkerhetsstyring, samt valg av prosesser og designløsninger. Det var ønskelig å gjennomføre oppgaven ved å bruke kvalitativ forskning, både for å samle inn og analysere data. Forskningsstrategien tar utgangspunkt i en systematisk innsamling og analyse av datamaterialet som kommer frem. Som en komparativ casestudie var det ønskelig å innhente mest mulig informasjon som kan belyse ventilasjonens rolle i sikkerhetsstyring. Allerede tidlig ble det bestemt at det var viktig å kunne tilpasse oppgaven etter hvert som ny informasjon ble tilgjengelig, fordi resultatet og drøftingen i stor grad ble konstruert av funnene. Samtidig var det viktig å holde seg til forskningsspørsmål og problemstilling for å avgrense oppgaven, og oppnå målet med å komme frem til en konklusjon.



Figur 13 Forskningsstrategi

Forskningsstrategi blir gjerne delt mellom abduktiv, deduktiv og induktiv metode. Deduktiv forskningsmetode tar utgangspunkt i et teoretisk grunnlag, og undersøker hvordan data kan støtte opp den forståtte teorien. Induktiv metode tar utgangspunkt i et sett med datamateriale og generaliserer en tese ut ifra disse. Abduktiv tilnærming er en sammensetning av disse, der hensikten er å studere hvordan data kan bygge opp under teori, og hvordan eksisterende teori eventuelt bør redefineres (Thornberg, 2012). Denne oppgavens forskningsstrategi tar utgangspunkt i slik abduksjon, der det blir innhentet teorier som er nødvendige for å forstå datagrunnlaget, og som samtidig kan utfordre det eksisterende teoretiske rammeverket i lys av problemstillingen (Blaikie & Priest, 2019). Ved bruk av abduktiv strategi, kan nye funn eventuelt legge grunnlag for endring av metodisk fremgangsmåte. Derfor anses abduktiv metode som mest hensiktsmessig for å besvare problemstillingen.

4.1.1 Forskningsprosessen

Prosessen med å utvikle masteroppgaven startet allerede sommeren 2019, et halvt år før selve arbeidet begynte. Det ble tidlig fattet interesse for arbeid med brann i tunnel, ettersom tematikken var dagsaktuell og spennende. Da det ble foreslått fra universitetet å sette seg inn i ventilasjonssystemets rolle og styring ved brann i tunnel, var det ikke lengre tvil om hvilken tematisk vinkling masteroppgaven skulle ha. I vedlegg F ligger det en mer detaljert prosedyre for forskningsprosessen, beskrevet som et hendelsesforløp fra januar til juni.

4.2 Forskningsdesign

Det ble valgt å gjennomføre oppgaven ved bruk av kvalitativ design for å ta et dypdykk i analytiske beskrivelser om brannventilasjon og røykkontroll. Yin (2003, s. 3) skiller mellom tre ulike strategier for tilnærming i et forskningsprosjekt. Det kan enten være deskriptivt ved å beskrive hvordan noe er, kausalt ved å forklare hvorfor noe er slik det er, eller eksplorerende ved å ha en mer utforskende tilnærming. Eksplorerende studier kan ofte begrunnes med at eksisterende teori ikke er tilfredsstillende for å forstå fenomenet (Andersen, 1997, s. 131). Det er ønskelig å kartlegge det kausale og deskriptive i oppgaven ettersom et teknisk system er et håndfast produkt, men samtidig prøve å sette dette i et analytisk perspektiv.

4.2.1 Casestudie

For å illustrere og utdype problemstillingen, ble det benyttet en komparativ multippel casestudie. Hensikten med casene var å vurdere ulike tilnærminger som ble brukt i valg av dimensjonering, drift og kritiske faktorer knyttet til ventilasjon. Andersen (1997, s. 10) forklarer casestudie som en kritisk eller kvalitativ tilnærming som kan gripe det særegne.

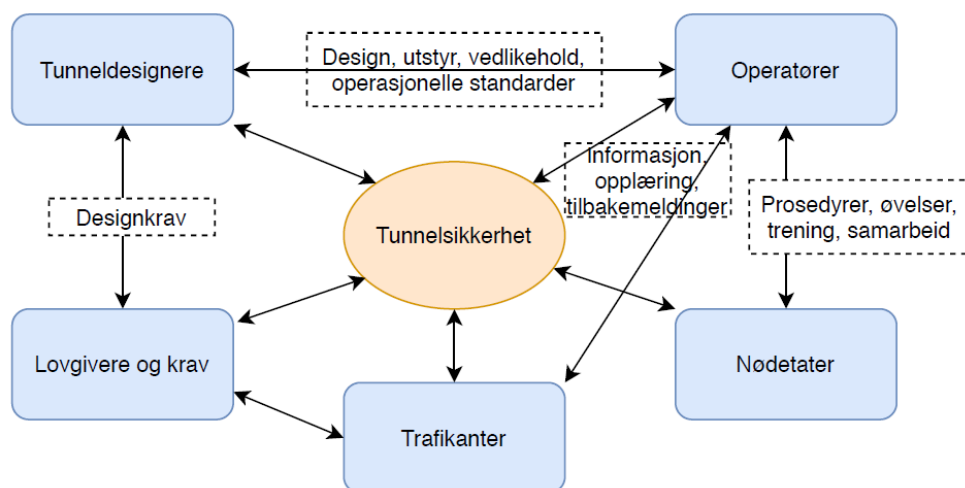
Komparativ casestudie tar utgangspunkt i flere enkelte casestudier, som alle presenteres individuelt og separat. Hensikten med disse studiene er å se på variasjon blant studiene, eller i dette tilfelle variasjon mellom ventilasjonssystem og sikkerhetsstyringsprosesser i de ulike tunnelene. Blant annet ble det slik åpnet opp for å se på hvordan erfaringer fra tidligere hendelser påvirker valg av beredskapsløsninger. Multippel casestudier har blitt kritisert tidligere, blant annet for å generalisere forskning (Yin, 2018; Andersen, 1997). Flybjerg (2013) argumenterer derimot for at casestudier kan generere og teste hypoteser. Målet med oppgaven er å forstå variasjon, dimensjoneringspraksiser og praktisk oppfølging av ulike konseptuelle metoder for ventilasjonsstyring. Generalisering kan dreie seg om begrepsgjøring og klargjøring av fyldige sammenhenger for bestemte klasser under bestemte betingelser, ifølge Andersen (1997, s. 16). Det er derfor en viktig refleksjon å ta med seg ved belysning av ventilasjonssystemet som et beredskapstiltak, og tilnærmingen krever et rikt materiale, samtidig som variablene kan sammenliknes. Videre vil det derfor beskrives nærmere hvilket materiale som bistod i casestudiet.

4.3 Datainnsamlingsteknikker og analyse

For å innhente data er det tatt i bruk dokumentanalyse og kunnskap fra nøkkelinformanter, via semi-strukturerte intervjuer. I dette studiet er det analysert totalt 56 dokumenter, en sammensetning av beredskapsplaner, risikoanalyser, kart over tunnelgeometriene, og notater om læring etter hendelser. Det ble òg gjennomført 12 intervjuer fra 13 respondenter, og deltatt på én befarings og én deltakende observasjon på et seminar. Moen & Karlsdóttir (2011, s. 10) forklarer at hensikten med et omfattende datamateriale er å grundigere beskrive feltet, og for å forstå og synliggjøre ulike respondenters og kilders perspektiv. Det er derfor hensiktsmessig å beskrive hvilken innfallsvinkel oppgaven har innhentet informasjon fra.

4.3.1 Grunnlag for datainnsamling

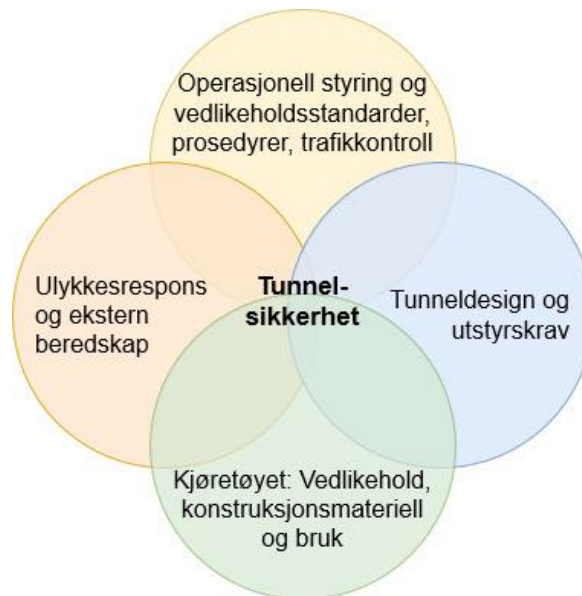
I arbeidet med tunnelsikkerhet kan man inkludere fem ulike grupper interessenter: Lovgivere, tunneldesignere, tunneloperatører, nødetater og trafikanter. Alle kommuniserer og påvirker hverandres arbeid med tunnelsikkerhet. I denne masteroppgaven er informasjon innhentet fra offentlige krav via lover, håndbøker, hendelsesanalyser fra SHT, samt tunneleier og -forvalter som har dokumenter brukt av operatører og tunneldesignere, deriblant beredskapsplaner og dimensjoneringsgrunnlag. Det kunne vært hensiktsmessig å se nærmere på andre interessenter ved tunnelsikkerhetsarbeidet, blant annet i større grad inkludere andre nødetater og entreprenører, for å fremme enda flere tilnærminger mot tunnelsikkerhetsarbeidet. På bakgrunn av forskningsspørsmålenes avgrensning og dokumenttilgjengelighet, ble ikke dette prioritert. Det er samlet inn data gjennom tre ulike tilnærminger: Intervjuer, dokumenter og observasjoner, med vekt på de to førstnevnte. Dokumenter som ble forsøkt innsamlet er markert i stiplede bokser, i sammenheng med interessenter og potensielle intervjuobjekter.



Figur 14 Tunnelsikkerhetsinteressenter (oversatt fra Gillard, 2012, s. 511)

Det er fire viktige faktorer som påvirker hvordan tunnelsikkerhetsarbeidet foregår, vist i figur 15 på neste side. Alle disse faktorene vil òg spille stor rolle ved tunnelbrann. Blant annet vil ulykkesrespons i sirkelen til venstre handle om hvordan forholdet mellom prosedyrer og reelle situasjoner, kommunikasjon med utstyr og aksjon som blir utført der og da. Sirkelen med kjøretøy har mye å si for hvordan brannen tilløper og utvikler seg, samt mengde og egenskaper til det brennbare materialet. Tunneldesign handler om hvilke krav som er satt for design av ventilasjonssystemet. Operasjonell styring og standardiserte prosedyrer for ventilasjonsstyring handler om beslutningstaking. Denne oppgaven vil i hovedsak fokusere på datainnsamling av beskrivelsene i gul og blå sirkel. Avgrensningen ble gjort for å velge en tunnelteknisk profil i

oppgaven. Det kom likevel frem i datainnsamlingen at disse faktorene ofte overlapper hverandre, spesielt ulykkesrespons kan påvirke valg av operasjonell styring, og vice versa.



Figur 15 Faktorer som påvirker tunnelsikkerheten (oversatt fra Gillard, 2012, s. 511)

4.3.2 Dokumentinnsamling og -analyse

Dokumentanalyse brukes for å undersøke eller sammenlikne historiske data eller kilder (Morse & Richards, 2002). Andersen (1997) påpeker at casestudier ofte starter induktivt, ved at teoretisk relevans fremkommer underveis i vurdering av datamaterialet. Det ble derfor tidlig opprettet kontakt med SVV for å skaffe oversikt over samtlige dokumenter som er arkivert, knyttet til sikkerhet i de respektive tunnelene. Det var ønskelig å samle inn store mengder med relevant dokumentasjon, for å se hvilke tendenser som var gjentakende, både blant generelle og ventilasjonsspesifikke dokumenter.

Deriblant var det et stort antall dokumenter som beskrev risiko og drift. Vanskeligere var det for undertegnede å få tak i dokumenter som beskrev dimensjoneringsgrunnlag eller mer tekniske aspekter ved ventilasjonssystemet. En mulig forklaring er at dette kan være oppdragsbasert ved de ulike tunnelene, siden slike tolkninger krever mye kunnskap og utregninger. Å oppsøke potensielle konsultentselskaper og innhente informasjon derifra var krevende, og ble etter hvert nedprioritert da flere dokumenter var utgått, manglende eller fremstilte tunnelutvalget skjevt. Det er likevel blitt inkludert flere dokumenter og møtereferater for å belyse denne delen av oppgaven. Mengden dokumenter har variert mellom de ulike tunnelene, og har vært av ulik kvalitet. Flere av dokumentene har ikke vært ferdigstilt, som følge av nasjonal omorganisering i organisasjonen etter fylkessammenslåingen, og som følge

av oppdateringer av sikkerhetsutrustning i tunnelene. Derfor vil ikke alle dokumentene analyseres og videreformidles i sin helhet, noe som påvirker detaljnivået og kvalitet i beskrivelsen av tunnelutvalget. Det er viktig å påpeke at mesteparten av dokumentene er utarbeidet av SVV, og mye av innhentet informasjon er funnet i deres informasjonsdatabase, noe som kan påvirke hvilke dokumenter som har vært tilgjengelige.

Basert på de første innhentede dokumentene ble det bestemt en protokoll for datainnsamling. Tunnelene ble behandlet som ulike case, med individuelle tilhørende dokumenter og intervjuer. Dokumentene ble analysert, og funnene kryssjekket med aktuelle respondenter. Det ble deretter sett på implikasjoner, variasjoner og likheter drøftet i lys av forskningsspørsmål. Oversikt over alle analyserte dokumenter finnes i vedlegg E. Det har òg blitt benyttet nyhetsarkiver for å supplere datainnsamlingen, som finnes i referanselisten. Ulykker er ofte redegjort av lokalaviser og medier, gjerne med bilder og annen tilleggsinformasjon og uttalelser. Disse arkivene gir nyttig informasjon om tidligere, og spesielt alvorlige hendelser.

Analyse av innsamlet materiell har fokusert på forståelsen av hvordan sikkerhetsstyring foregår i ulike prosesser, med ventilasjonssystemet som en sentral fokusdel i tunnelsystemet. Kvalitativ analyse legger vekt på å tolke data og forstå de spesifikke forholdene som blir utforsket, med bakgrunn i hypoteser. Slik kan man danne en oversikt som er representativ for å løse en problemstilling (Grønmo, 1982, s. 109). Når målet er å analysere datamaterialet komparativt, er det viktig å reflektere over hvilken kunnskap som ble dekket, og hvilke avgrensinger som ble gjort. Resultater må drøftes i fellesskap for å unngå spredte enkeltresultater, og for å få frem tendensene og felles funn. Fordelen hvis analysene kommer frem til noenlunde samme resultat, er at datamaterialet kan antas med høy grad av validitet, men funnet kan òg settes i diskusjon hvordan spesifikke valg gjennomføres (Dale m.fl. 1985, s. 120).

4.3.3 Intervju

Der det ikke har vært mulig å analysere og tolke data fra dokumenter er det gjennomført datagenering, med andre ord konstruering av data som følge av dybdeintervjuer. I intervjuene ble det undersøkt ulike respondenters opplevelser, handlinger, holdninger og beslutningsgrunnlag ved brann i tunnel. Alle intervjuene ble gjennomført i mai 2020. Intervjuene ble gjennomført som semi-strukturerte. Disse karakteriseres ved å inkludere åpne spørsmål i intervjuguiden, som gir mulighet til å utvikle spørsmålene underveis i et pågående intervju (Morse & Richards, 2002). Informasjonsflyten ble ved hjelp av semi-strukturerte intervjuer mer åpen, og intervjuet kunne tilpasses hvilken retning samtalen gikk. Det var opprinnelig et ønske

å gjennomføre intervjuene på respondentenes arbeidsplass, samt dra på befaringsrundt i Norge. Som følge av virusutbruddet med SARS-CoV-2, ble intervjuer holdt over videosamtaler på nett med kun ett unntak, og det ble i større grad lagt vekt på resultatene fra de innhentede dokumentene. Formell intervjuguide er vist i vedlegg C. Det ble tatt utgangspunkt i lik intervjuguide for alle intervjuer, men ettersom ny informasjon ble tilgjengelig underveis, ble intervjuene preget av kunnskapsutvikling og åpen samtalestruktur. Det ble òg gjort tilpasninger knyttet til tunnelutvalget ved utdyping av intervju spørsmålene, og intervjuene har vært viktig for redegjørelse av uklarheter i casene. Respondentene signerte under på en samtykkeerklæring (se vedlegg D), før intervjuene ble gjennomført. Det er gjort lydopptak av alle intervjuene, som senere ble transkribert og kodet, for å analysere materialet nærmere. Etter transkribering og bruk i oppgaven, har opptakene blitt slettet. Intervjuguide og samtykkeskjema er godkjent av NSD, i henhold til deres rammeverk.

Grunnleggende kildekritikk er viktig i en intervjusituasjon, og en forutsetning for å analysere datamaterialet (Dale m.fl., 1985). Det er derfor ønskelig å skille mellom normative og kognitive utsagn. Normative utsagn kalles for vurderende utsagn, og forteller om hvordan noe bør være, ønsker, oppfordringer eller relative vurderinger. Kognitive utsagn er beskrivende og forklarende om saksforholdet, og beskriver det reelle i en situasjon. I intervjuene er det ønskelig å få frem både meninger og fakta, for å utdype problemstillingen (Dale m.fl., 1985, s. 69). Et problem kan imidlertid være at disse elementene overlapper hverandre, og at respondentens inntrykk av de faktiske forholdene kan avvike, eller bli påvirket av andre kilder og erfaringer. Det er derfor hensiktsmessig å bruke flere kilder for å supplere eller skille normative mot kognitive utsagn, noe som dannet hovedteorien om å ta utgangspunkt i dokumentanalyse.

4.3.4 Respondenter

Respondentene ble valgt på bakgrunn av deres innsikt i temaet og erfaring relatert til tunnelsikkerhet ved brann, og er primære datakilder ettersom informasjonen kommer som førstehåndskunnskap. Mange av respondentene kan òg gå under definisjonen *nøkkelinformant*. Nøkkelinformanter er generelt ressurssterke bærere av informasjon og kunnskap, som kan nyttiggjøre for tolkninger og forklare hendelser (Andersen, 2006), og har vært viktig for å skape kontinuitet i oppgaven. En nærmere beskrivelse av respondentene er gitt i vedlegg B. Det er lagt vekt på å få variasjon i respondenter til oppgaven, både geografisk for å representere valgte tunneler, men òg gjennom deres bakgrunn og erfaring. Mange av respondentene har samme tittel som brannvernleder eller tunnelforvalter, noe som har bidratt til å vurdere

situasjonsspesifikke rammer på detaljnivå. Det er likevel inkludert et bredere utvalg av respondenter for å bistå med faglig presisjon, og vurdere utsagn i et mer kritisk perspektiv. Alle casene har hatt minst én respondent med tittel «brannvernleder» eller «tunnelforvalter», som har bidratt til å supplere datamaterialet. Andre respondenter har nevnt flere av casene som eksempler for å fremme et poeng eller et syn.

For å benytte datamateriale fra intervjuene er det valgt å anonymisere respondentene. Dette ble ansett som gunstig for å omtale alvorlige hendelser og intervju respondenter med potensielt stort ansvar, slik at respondentene i større grad kan åpne seg personlig om beslutninger og opplevelser. Det er likevel hensiktsmessig å informere om respondentens tilknytning og ansvar, slik at utsagnene fremstår troverdige (Andersen, 2006). utfordringer tilknyttet bevaring av anonymitet har blitt belyst med respondentene, som følge av betydningen av å spesifisere erfaring. Det kom frem i intervjuene at fagmiljøet innen tunneler og tunnelventilasjon i Norge er lite. Begrenset anonymitet kan påvirke påliteligheten av påstandene som er gitt, og respondentenes opplevelser og erfaringer. Det er gjennomført anonymisering av hensyn til respondentenes forhold til en eventuell utenforstående leser av dokumentet, samt geografisk anonymisering av brannvernledere med begrunnelse om at dette ikke er relevant for oppgavens helhetlige resultat. Derfor er ikke respondentenes geografiske stilling utdypet videre.

I analysekapittelet vil intervjuene presenteres med utsagn og påstander. Respondentene er kodet med utgangspunkt i deres roller i tilknytning tunnelene. Tunnelforvaltere og brannvernledere er kodet med forkortelsen R, respondenter i tilknytning til brannvesenet med RB, og respondenter med faglig fordypning i tunnelsikkerhetsfeltet med RS. Ansatte i VTS og konsultantselskap, er kodet som RK og RV. Tabell over alle respondentene, koding og deres ansvarsområder er gitt i vedlegg B.

4.3.5 Befaring og deltakende observasjon

Det ble gjennomført én befaring relatert til prosjektet. Muligheten kom frem som følge av ett av intervjuene i mai, da det ble diskutert at tunnelen var planlagt midlertidig stengt. Siden det igjen var muligheter for å reise etter restriksjonene tidligere i semesteret, ble befaringen gjennomført for Oslofjordtunnelen. Hensikten med å dra på befaring var å øke systemforståelse av tunnelen, og hva som kan ramme systemet. Alle observasjoner som ble gjort på befaringen er i stor grad beskrevet selektivt. Det må påpekes at empirisk kunnskap innhentet fra befaring derfor ble bevisstgjort av undertegnede, og det ble reflektert rundt hvordan forutsetningene i

tunnelen kan skape variasjoner i resultatet og tolkningen. Befaringen ble derfor brukt som supplerende forståelse for diskusjon.

Det ble òg gjennomført deltakende observasjon på et seminar for nødetater om tunneler, i tilknytning nyåpning av to tunneler i Kongsberg. Metodisk ble deltakende observasjon brukt for å se samhandling mellom aktører i naturlige situasjoner. Hensikten med seminaret var å få mer kunnskap om beredskapsplaner, hendelser i tunneler, etterarbeid etter hendelse og samvirkearbeid mellom VTS, SVV og nødetater. Det ble skrevet ned observasjonsnotater underveis i seminaret, som dannet grunnlag for spørsmål. Notatene ble diskutert med foredragsholderne slik at subjektive tolkninger ble oppklart. Deltakelsen ga oppklaringer om nødetatenes atferd, samvirkeforståelsen i sikkerhetsarbeidet, og tidligere øvelser og hendelser.

4.4 Kvalitetskriterier

Kvalitetskriterier er en fellesbetegnelse på kriteriene som ligger i bunn for den forskningsmetodiske fremstillingen i oppgaven. Videre blir det drøftet hvordan oppgaven har blitt skrevet med hensyn på forskningens kvalitet, og det blir gjort refleksjoner om metodebruk.

4.4.1 Validitet og reliabilitet

Njå & Borg (2013) skriver at validering blir brukt for å bestemme forklaringsstyrken og troverdighet for en modell. Med andre ord handler validitet om tolkningene som er gjort er gyldige i forhold til den virkeligheten som er studert (Thagaard, 2010). Ved forskning brukes det tre ulike former for validitet; intern validitet som eliminerer alternative forklaringer og løsninger, ekstern validitet som handler om generalisering og overførbarhet av en studie, og økologisk validitet som sammenlikner hvordan studiet reflekterer den virkelige verdenen. Yin (2003) utdyper videre at ekstern validitet kan være en utfordring, ettersom datamaterialet kan være innhentet fra analytisk generalisering fra kvalitative metoder. For å sikre troverdighet har det vært ønskelig å samle inn datamateriale fra flere tunneler, og konstruere en validitet basert på datakildene. Spesielt har økologisk validitet vært viktig, ettersom det har vært påpekt i flere tilfeller i intervjuer og dokumenter at den virkelige verden kan være svært annerledes enn det teoretiske grunnlaget som ligger tilgjengelig, og konsekvensomfanget ved tunnelbrann er omfattende. Intern validitet har blitt styrket ved å se etter mønstre i studiene. Samtidig er det viktig å påpeke at egne oppfatninger, kunnskap og synspunkt kan påvirke oppgaven. For å sikre pålitelighet har det derfor vært viktig å begrunne valg som er gjort i oppgaven. Reliabilitet er

forsøkt ivare tatt ved å argumentere for fremgangsmetoder, slik at leseren kan fortolke og komme frem til tilsvarende analyse med samme fremgangsmåte og koding. Datamaterialet er organisert og sortert i et eget vedlegg, og evalueringsmodellen er presentert i kapittel 4.5.

4.4.2 Overførbarhet

Oppgaven har som mål å løfte frem relevante funn knyttet til temaene tunnelsikkerhet, sikkerhetsstyring og ventilasjonssystemet. Overførbarhet ved oppgaven vil i kvalitativ forskning supplere ved å gi detaljerte beskrivelser av et tema, der forskningens funn er overførbare til andre case (Yin, 2003). Forskningsprosjektet inneholder svært mange avgrensninger i forbindelse med tunnelenes kompleksitet, men underliggende forståelser for ventilasjonsstyring er et av funnene som kan overføres. Oppgavens vinkling er å fremme et læringspotensial for en leser. Studiet er med andre ord i større grad deskriptivt, og har som formål å forklare ventilasjonssystemets tilstand, og hensikt med røykkontroll. Oppgavens teoretiske bidrag om sikkerhetsstyring kan òg overføres til flere prosjekter om tunnelsikkerhet.

4.4.3 Metodiske styrker og svakheter

Enhver forskningsmetode har utfordringer i arbeidet. Det har blant annet vært mange spørsmål knyttet til konfidensialitet rundt hva som kan bli videreført og ikke, noe som kan være i konflikt med dataenes troverdighet ovenfor leseren, og en svakhet ved oppgaven. Det har òg vært problematisk å samle inn nok dokumentinformasjon for å støtte opp informantenes påstander. Derimot har omfattende intervjuer og oppfølgingsspørsmål bidratt til å oppklare misforståelser og feiltolkninger. Det var utfordrende å organisere intervju av informanter av flere grunner. For det første tok det lang tid å spore opp aktuelle personer som hadde kunnskap om tunnelene. For det andre er SVV igjennom nasjonal omorganisering som har påvirket ansvarsområdene til aktuelle intervjuobjekter, og for det tredje ble hele prosessen forsinket da SARS-Cov-2-viruset tvang ansatte til å ha hjemmekontor. For å opprettholde validitet ble det derfor gjennomført lengre intervjuer, og i større grad ble metodikken preget av dokumentanalyse.

Det var utfordrende å argumentere og skille mellom hva som skulle inkluderes i oppgaven, av hensyn til sikkerhetssensitiv informasjon eller sårbarheter knyttet til sikkerhetssystemene i tunnel. Problematikken har blitt fremmet ved datainnsamling av både dokumenter og i intervjuer, og resultert at visse forbehold er gjort. Utfordringen med sensitiv informasjon er at manglende presentasjon av informasjon kan skape et svekket bilde av situasjonen, og resultatet

kan bære preg av detaljmangler. Det har likevel ikke hindret i å få nok resultatgrunnlag, slik at problemstillingen kan konkluderes.

Det har òg vært utfordrende å spisse problemstillingen i løpet av semesteret. Oppgavens størrelse og omfang av case-utvalget skapte et stort empirisk rammeverk, som måtte gjennomgås. Deretter var det viktig å utdype hvilke vinklinger som var hensiktsmessige for å beskrive ventilasjonssystemet tilstrekkelig. Samtidig var det òg mye tilgjengelig informasjon om redningsinnsats, materialkvalitet og et teorigrunnlag som måtte begrenses. Stadige nedskjæringer har vært en viktig del av oppgavens utforming, og det har vært nødvendig å holde seg til en rød tråd, til tross for fristelsen for å utdype anekdoter. Dette har styrket oppgavens validitet ved å skape en mer strømlinjeformet sammenheng mellom teori og analyse.

Oppgaven har benyttet seg av et stort datagrunnlag, men datagrunnlaget var av varierende kvalitet. Noe av datamaterialet som ble mottatt viste seg underveis i semesteret å være utdatert. Det å skille mellom hva som var gjeldende, hva som kom ved hvilket lovverk og hvordan oppgraderinger var gjennomført, var det varierende tilgjengelighet i.

Det kan diskuteres hvorvidt våren 2020 var det mest gunstige tidspunktet å vurdere prinsipper for røykkontroll og brannventilasjon i tunnelutvalget. Store deler av ventilasjonssystemene er nylig oppgradert eller under oppgradering. Det betyr at beredskapsplaner revideres. Det er gjort endringer i ansvarsområder for tunnelforvaltere, som følge av fylkessammenslåingen, og som ennå ikke er endelige. Det må bemerkes at de pågående og fremtidige endringene i casene kan svekke gyldigheten av oppgaven over tid.

4.5 Evalueringsmodell av tunnelutvalget

Metodisk ble evalueringsmetode valgt basert på refleksjoner om hvordan kunnskap om ventilasjonssystemet i Norges tunneler kan fremstilles. For å kunne evaluere sikkerhetsstyring av ventilasjonssystemet for ti utvalgte tunneler, har det vært tatt i bruk en felles evalueringsmodell. Andersen (1997, s. 20) forklarer viktigheten av en evalueringsmodell for forutsetninger om egen forskning, ettersom analysen og prosessen sjelden er standardisert, og egen forskning kan møte på distraksjoner og funn som ikke er relevante for problemstillingen. Formålet med modellen er å komme frem til overordnede anbefalinger om ventilasjonssystemet, og se på naturlige variasjoner i casene.

4.5.1 Avgrensing og valg av tunneler

Tunnelutvalget skal dekke problematiske utviklinger ved branntilløp. I første omgang ble det gjort en idémyldring om hvilke tunneler som var belyst i medier vedrørende større tunnelbranner. Gudvangatunnelen og Oslofjordtunnelen var betydelig representert i søkeresultatene. I en rapport om risiko for tunnelbrann, informerte DSB om overrepresentasjon av alvorlige tunnelbranner i undersjøiske tunneler med bratt stigning. Det ble derfor gjennomført søk på hvilke tunneler i Norge som var aktuelle. Overraskende mange tunneler kan kvalifiseres med bratt stigning, eller av undersjøisk omfang. Derfor ble det avgrenset slik at problemstillingen undersøker områder som kan være sårbare for ventilasjonsstyring, nemlig lengre, undersjøiske ettløpstunneler. Studiet falt på et utvalg av ti tunneler; Byfjord-, Bømlafjord-, Eiksund-, Godøy-, Gudvang-, Karmøy-, Mastrafjord-, Nordkapp-, Oslofjord- og Skatestraumtunnelene. Denne avgrensingen er utført med bakgrunn i tunnelenes utforming, der alle tunnelene er undersjøiske ettløpstunneler, og med en lengde på over 1,9 km. Gudvangatunnelen er et unntak ettersom den ikke er undersjøisk, men er inkludert i oppgaven basert på tidligere alvorlige hendelser med tunnelbrann.

4.5.2 Sammensetningen av dokumenter

Innsamlingen av dokumenter er allerede beskrevet kort i 4.3.2 om dokumentanalyse. Det er likevel ønskelig å nevne at dokumentutvalget utviklet seg, etter hvert som det ble belyst i evalueringsmodellen at det manglet informasjon for å svare på forskningsspørsmålene. De første dokumentene som ble innhentet var generelle, og mange av dokumentene ga ingen innblikk i ventilasjonssystemet for den respektive tunnelen. Etter hvert ble det mer spesifisert hva som manglet av informasjon, og hvilket materiale som var nødvendig å få tilgang til. Materialet som senere ble innhentet, fremmet mer teknisk informasjon om ventilasjonssystemet, tidligere hendelser, samt hvilke rutiner som normativt skal gjøres i en beredskapssituasjon. Noe av informasjonen som ble mottatt var utdatert, og det var en tidkrevende prosess å finne ut om systemene var oppdaterte siden forrige endring. For en oversikt over dokumentutvalget, henvises det til vedlegg E. Øvrig informasjon om beslutninger og valg av dimensjonering kom ikke tydelig frem i dokumentene, men var nødvendig for å svare på oppgavens problemstilling. Det er gjennomgående mangel på dokumenterte beslutningserfaringer relatert til ventilasjonsstyring, og det kan antas at det finnes mye kunnskap blant eksperter som bør videreformidles og dokumenteres. Ettersom det var ønskelig å ha kontinuitet for presentasjonen av de utvalgte tunnelene, samt et rettfærdig

sammenlikningspotensial, ble det i hovedsak lett etter dokumenter tilknyttet forskningsspørsmål om dimensjonering og drift av ventilasjonsanlegget. Dokumentene måtte være relevante for å vise frem hvilken teknisk funksjon ventilasjonsanlegget hadde, samtidig som oppgaven ikke kunne neglisjere ventilasjonens rolle i et tunnelsystem og relativt til andre sikkerhetsutrustninger.

4.5.3 Fremgangsmåte for dokumentanalyse

Ved gjennomgang av dokumentene, ble det fulgt en overordnet fremgangsmåte. Aller først ble sammensetningen av dokumentene evaluert, og det ble sett etter potensielle behov for å utdype eller begrense omfanget av dokumentene. Videre ble det sett på hvem som var relevante for den respektive tunnelen. For å presentere tunnelutvalget, ble det reflektert rundt hvilke spørsmål som skulle besvares i oppgaven. Hvordan kommer man frem til en konklusjon, og hvordan kan man fremme likheter og variasjoner mellom tunnelene? Aller først ble det utarbeidet en oversikt over tunnelene, med utdypet informasjon om relevante data for tunnelventilasjon, deriblant tunnelprofil, trafikkmengde, lengde og stigningsforhold.

Ved analysering av dokumentene, ble hver tunnel inndelt i fire ulike kategorier for analyse: Forutsetninger for tunnelen og ventilasjonssystemet, risiko og funksjonelle krav, ventilasjonssystemets styringsprosesser og scenarier, samt historiske tilpasninger og tidligere hendelser. Under hver av disse kategoriene ble det videre utdypet hva som var ønskelig å lete etter av informasjon. Spørsmålene er fremvist i tabellen nedenfor:

Tabell 2 Utdypende spørsmål fra dokumentanalysen

Kategorier	Spørsmål
Forutsetninger for tunnelen og ventilasjonssystemet	Hvordan er tunnelens utforming? Hvor er ventilasjonssystemet plassert i tunnel? Hvor stor kapasitet har ventilasjonssystemet? Når ble ventilasjonssystemet oppgradert sist?
Risiko og funksjonelle krav	Hvilke kriterier ligger det for valg av dimensjonering? Hvilke reguleringskrav blir nevnt? Hvordan sikres det at regelverket blir ivaretatt? Hvilke materialvalg er gjort for viftene? Er det gjort noen spesielle tilpasninger for ventilasjonen?

Ventilasjonssystemets styringsprosesser og scenarioer	Hva inkluderes i utforming av prosedyrer? Hvordan skal ventilasjonssystemet driftes ved branntilstand? Hvilke brannscenarioer er det tatt forbehold om? Hva er begrunnelsen for valgt automatisk styring? Hvor mange brannplaner eller styringsprinsipper har tunnelen?
Historiske tilpasninger og tidligere hendelser	Hvordan oppleves risiko for tunnelbrann? Hvordan blir brannsikkerhet ivaretatt? Har det tidligere vært erfart tunnelbrann? Hvor ofte revideres dokumentene?

Forskningsspørsmålene har utgjort sentrale deler av evalueringsstrategien. For å styrke forskningsprosjektet, er det derimot unngått å bruke samme spørsmålsgrunnlag for å generere og evaluere datainformasjon. Det har vært ønskelig å lete etter sammenhengene mellom ventilasjonssystemet og brannsikkerhet. Ikke alle tunnelene har klart å besvare alle spørsmål, men hensikten har vært å tydeliggjøre hvilke data som skal innhentes, og se etter mønstre underveis i arbeidet.

Forskningsspørsmålene har òg i ulik grad blitt representert av ulike innsamlingsteknikker, og studiet har vært en kontinuerlig prosess for å lete etter sammenhenger. Blant annet viste det seg at ventilasjonssystemet ikke eksplisitt kom frem som en kritisk faktor i dokumentene, men ble i større grad tydeliggjort i intervjuene. Drift av ventilasjonssystemene var derimot mer utdypet i mange av dokumentene, dog på ulikt detaljnivå. Forskningsspørsmålene kan på denne måten besvares ved å lete etter perspektiver og variasjoner mellom analyser, løsninger og erfaringer i datamaterialet. Videre vil resultatet av dokumentanalysen presenteres i en oversikt over tunnelutvalget.

5. TUNNELUTVALG

I dette kapittelet presenteres relevante data for ventilasjon og styringsprosesser for tunnelutvalget, samt historiske tilpasninger og tidligere hendelser. Hensikten med presentasjonen er å kartlegge og fremme hvilke beslutninger som er gjort, og karakteristikken for bratte ettløpstunneler. Informasjonen er viktig for å utdype forskningsspørsmålene senere.

Informasjonen innhentet i dette kapittelet stammer fra analyserte dokumenter og intervjuer, med brannvernledere og fagkyndige innen brann- og tunnelsikkerhet. Oversikt over respondentene kan leses i vedlegg B. Dokumentutvalget som er brukt for de respektive tunnelene er i hovedsak beredskapsplaner, risikoanalyser, innsatskort for ulike nødetater ved brannhendelser og aksjonskart. Alle dokumentene er beskrevet i vedlegg E.

Det ble funnet flere likheter mellom tunnelene. Enkelte funn kan argumenteres for at det er geografiske ulikheter som påvirker, men det ble òg funnet variasjoner innad i fylkeskommuner, som blir forklart senere.

Et typisk trekk for tunnelene er at de dimensjoneres etter fortolkninger i krav fra håndbøkene, da tunnelene ble åpnet for trafikk. Disse dimensjoneringene ble bestemt ut fra risikoanalyser og funksjonskrav. Kun noen få tunneler blir dimensjonert for mer enn minstekravene. Argumentasjonen for overdimensjonering er knyttet til risikousikkerheter og oppgraderinger, som er reflektert i risikoanalysene og prosjekteringer, med andre ord erfaringsbaserte innspill.

Det finnes variasjoner i valgt styringsprinsipp for tunnelene. De fleste tunnelene har et prinsipp der ventilasjonen styres i én retning, med fast skyvkraft. Mange tunneler opererer med ulike brannplaner, og spesielt i Region Vest legges det vekt på at vifter med nær avstand til brannen ikke iverksettes. De fleste av tunnelene anvender mekanisk ventilasjon i fast trekkretning, på bakgrunn av plassering av innsatspersonell og brannstasjoner. En ny holdning for enkelte tunneler, er at røyk skal gå i naturlig trekkretning, og at ventilasjonen bygges med et symmetrisk prinsipp. Det er òg observert at naturlig trekkretning kan bestemmes på forhånd i normalfase, slik at trekket samsvarer med en potensielt mer gunstig brannventilasjon. De fleste tunnelene starter opp ventilasjon umiddelbart ved varsling om brann.

I kapittel 6 og 7 om analyse og drøfting blir det videre oppsummert hvordan tunnelene jobber med læring etter hendelser, hvilken usikkerhet samt variasjoner som eksisterer, hvordan styringsprinsippet påvirker kritikaliteten ved sikkerhetsstyring, og hvordan ventilasjonssystemet brukes i sikkerhetsarbeidet.

5.1 Tabelloversikt over utvalgte tunneler

Tunnel	Lengde (meter)	Størst stigningsprosent	ÅDT/ Andel tunge kjøretøy ³	Tunnelklasse	Utforming av ettløps-tunnelen	Åpnet (årstall)	Fylke	Valgt dimensjonerende brannventilasjon ⁴	Tidligere dramatiske ⁵ tunnelbranner	Andre kommentarer for ventilasjon
Byfjord	5875	8 %	9700 / 11%	D	Undersjøisk	1992	Rogaland	100 MW ¹	Ja	Oppgradert i 2014/2015
Bømlafjord	7888	8,5 %	5241 / 14%	C	Undersjøisk	2000	Vestland	50 MW	Ja	
Eiksund	7765	9,6 %	3129 / 7%	B	Undersjøisk	2008	Møre og Romsdal	20 MW	Ja	
Godøy	3844	10 %	1041/ 8 %	B	Undersjøisk	1989	Møre og Romsdal	20 MW	Nei	Rehabilert i 2017-2019
Gudvanga	11 428	3,5 %	2362 / 18 %	B	Fjelltunnel	2000	Vestland	50 MW	Ja	Under oppgradering
Karmøy	Samlet 9028	7,4 %	4367 / 13 % 4644 / 10 % 4253 / 16 %	C	Undersjøisk med rundkjøring	2013	Rogaland	50 MW	Nei	Ventilasjonsjakt ved rundkjøring
Mastrafjord	4424	8 %	8100 / 12%	D	Undersjøisk	1992	Rogaland	100 MW	Ja	Oppgradert i 2014/2015
Nordkapp	6875	10 %	282 / 26 %	B	Undersjøisk	1999	Troms og Finnmark	20 MW	Nei	
Oslofjord	7306	7 %	10346 / 14 %	E	Undersjøisk	2000	Viken	100 MW	Ja	Oppgradert i 2019
Skatestraum	1902	10 %	407 / 11 %	B	Undersjøisk	2002	Vestland	50 MW	Ja	Rehabilert

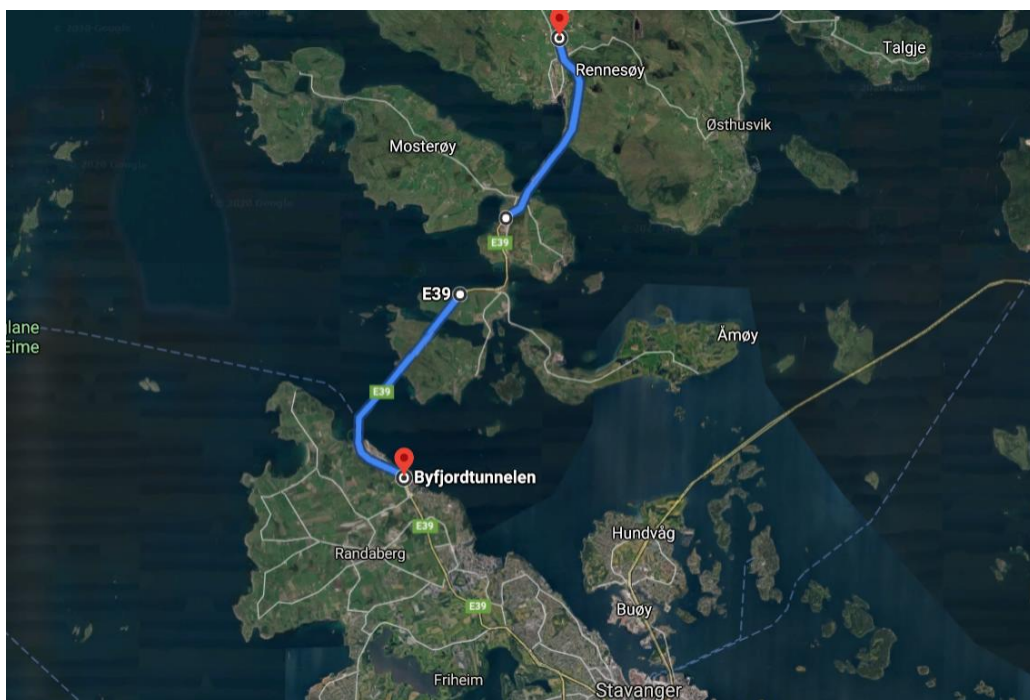
³ ÅDT og Andel tunge kjøretøy er her hentet fra Statens Vegvesen trafikkdata, <https://www.vegvesen.no/fag/trafikk/trafikkdata/trafikkregistreringer>. Andel tunge kjøretøy er beregnet som kjøretøy med mer enn 5,6 m lengde. Tallene er oppdatert fra 2018 og 2019, med unntak av Rennfast, der tallene er hentet fra beredskapsplanene fra 2016.

⁴ Dimensjonerende brannventilasjon er en estimert størrelse på et tunnelbrannscenario som det er forventes at brannventilasjonen tilstrekkelig kan kontrollere. Brannstørrelsen er valgt på bakgrunn av tunnelklasse jamfør regelverket, samt risikoanalyser. Brannventilasjon er uttrykt i MW, som er en måleenhet for varmeutvikling en brann gir per sekund.

⁵ Dramatisk brukes her som alvorlige dødsulykker som videre har utviklet seg til tunnelbrann, tunnelbranner som kan tangere dimensjonerende brannventilasjon, eller tunnelbranner med svært brennbare materialer som farlig gods.

5.2 Rennfasttunnelene

Rennfast er en fastlandsforbindelse, som blant annet består av to undersjøiske tunneler: Byfjordtunnelen og Mastrafjordtunnelen. Rennfastforbindelsen åpnet i 1992. Tunnelene går fra Randaberg utenfor Stavanger, i retning mot Haugesund og Bergen. Forbindelsen er en del av Europaveg E39, sammen med et ferjesamband nord for tunnelene. Ferjesambandet kan komplisere trafikkbildet til tunnelene, ettersom ferjeavgang og -atkomst nord på Rennesøy kan føre til tettere trafikk. I tilknytning Rennfasttunnelene ble det analysert ti dokumenter, og hentet supplerende informasjon fra to intervjuer. Tunnelene ble behandlet som to ulike forskningscase, men er senere samlet, som følge av mange fellestrekk.



Bilde 1 Byfjordtunnelen og Mastrafjordtunnelen (Skjermdump av Kartdata ©2020 fra Google Maps, u.å.)

5.2.1 Grunnleggende informasjon om Byfjordtunnelen og Mastrafjordtunnelen

Byfjordtunnelen er 5860 meter lang med en maksimal stigningsgrad på 8% i 2,8 kilometer. Årsdøgntrafikken var i 2016 på 9700, herav med 11 % tunge kjøretøy. I Byfjordtunnelen er det nå installert 43 symmetriske vifter. Viftene kan levere en skyvekraft på opptil 7 m/s, ifølge tunnelforvalteren. Relatert til Byfjordtunnelen, er det forventet innsatstid for Brann- og redningsvesenet på 10 minutter.

Mastrafjordtunnelen er 4390 meter lang, med en årsdøgntrafikk på 8100 i 2016, hvorav 12% bestod av tunge kjøretøy. Tunnelen har stigning på 8 % i 1,5 kilometer. I Mastrafjordtunnelen er det nå installert 45 symmetriske vifter.

5.2.2 Valg av dimensjonering for Rennfasttunnelene

Tunnelene var opprinnelig dimensjonert for et brannforløp på 20 MW ved åpning i 1992. Tunnelene ble bygd etter tunnelklasse B, og utstyret dimensjonert for klasse C. I 2014 og 2015 ble Rennfasttunnelene totalrenovert med nye vifter, etter nye reguleringskrav spesifisert i «Håndbok 021» (SVV, 2010). Tunnelene skulle ifølge håndboken dimensjoneres for 50 MW tunnelbrann som tunnelklasse C, men basert på en gjennomgående risikooppfatning av tunnelene, ble det bestemt av SVV at tunnelene burde dimensjoneres for et brannscenario på 100 MW tilsvarende tunnelklasse D. Beslutningen ble gjennomført i henhold til økende ÅDT. I fremtiden estimeres det at ÅDT synker når Rogfastforbindelsen åpner i 2025.

Etter oppgraderingen av Rennfasttunnelene i 2014/2015, ble det installert symmetriske ventilatorer som kan trekke 37 kW hver. Ventilatorene bidrar totalt med netto skyvekraft på 40 kN i Byfjordtunnelen og 42 kN i Mastrafjordtunnelen. Videre er det nok kapasitet i hele tunnelen for å snu ventilasjonsretning ved behov. Rent matematisk er ytelsen i Mastrafjordtunnelen ansett som kraftigere enn ytelsen for Byfjordtunnelen.

5.2.3 Ventilasjonssystemets styringsprosesser

Ved iverksetting av brannventilasjon skal alle viftene blåse i retning nordover, ifølge beredskapsplanene fra 2005 og 2014. Dette valget ble gjort slik at nødetatene kan komme fra Stavanger. I innsatsplanen for VTS skal brannventilasjon startes umiddelbart etter stenging av tunnel. Begge tunnelene har kameraer for å gi oversikt ved en hendelse.

5.2.4 Historiske tilpasninger og tidligere hendelser

Rennfasttunnelene er teknisk oppgraderte, men styringsprinsippet har forblitt det samme i lang tid. Begge tunnelene har opplevd brann i vogntog. Mellom 2002 og 2015 var det henholdsvis 7 branner og 14 branntilløp i Byfjordtunnelen, og 9 branner og 3 branntilløp i Mastrafjordtunnelen. Totalt 20 av hendelsene oppstod i tunge kjøretøy.

I 2013 oppstod det brann i et vogntog nederst i Byfjordtunnelen, og flere biler ble fanget som følge av røyk (Mitchell & Skretting, 2013). Senere samme år ble det publisert en artikkel i Stavanger Aftenblad der brannvesenet utrykte bekymring for brannene: «Det siste året har det vært fem branner i biler og vogntog på vei gjennom Byfjordtunnelen. Bare i september har det vært tre branner eller branntilløp» (Sandø, 2013). I Mastrafjordtunnelen brant det i 2006 i et vogntog med flere biler og andre vogntog i tunnelen. Ingen personer ble skadd, men brannvesenet hadde problemer med å komme seg frem i tunnelen på grunn av stor røykutvikling (Berven, 2006). Mastrafjordtunnelen stengte òg i 2015 som følge av branntilløp i vogntog

(Askildsen, 2015). Det kom frem i intervjuene at erfaring med tidligere branner, samt jevnlig øvelser, kan bistå i å tilpasse styringsprinsippene i fremtiden. På seminaret om tunnelbranner ble Mastrafjordtunnelen trukket frem som en av tunnelene der det regelmessig gjennomføres øvelser, for å studere partikkelsammensetningen i røyk.

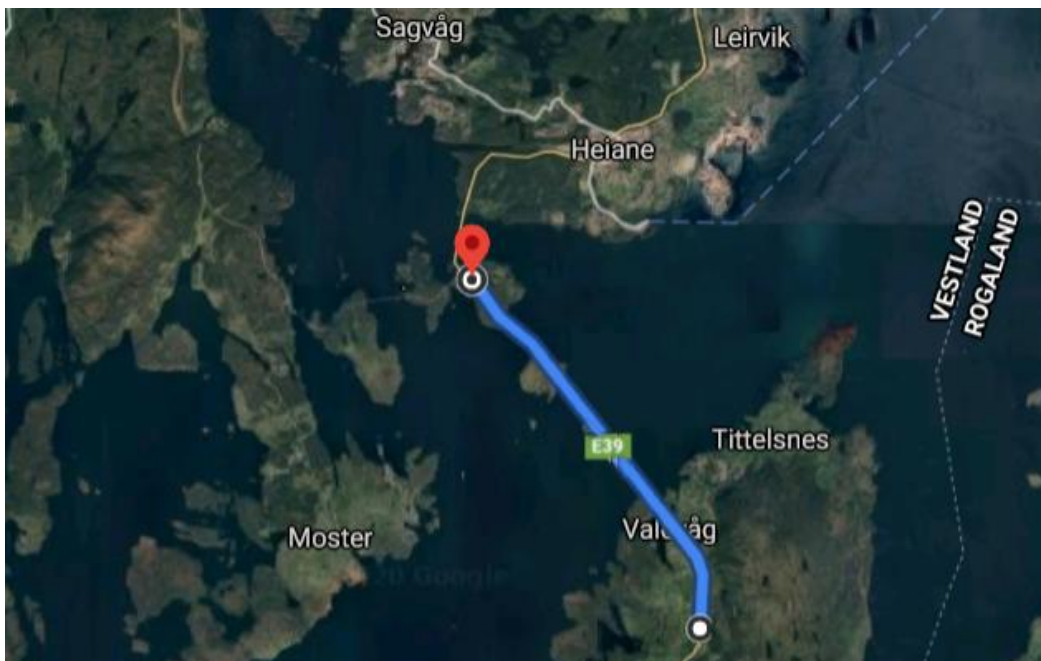
Nå som begge tunnelene er teknisk oppgraderte medfører det òg nye beredskapsplaner. Disse er foreløpig ikke ferdigstilt, men skal være klare i løpet av 2020. Da *kan* det hende styringsprinsippet endres.

5.2.5 Oppsummering

Rennfasttunnelene er begge tunneler som anses som høyrisikotunneler. Tunnelforvalteren uttrykte spesiell bekymring knyttet til Byfjordtunnelen: «Er det en plass det kommer til å smelle, så er det i Byfjordtunnelen. Byfjordtunnelen er desidert den mest utsatte tunnelen vi har med tanke på ulykker, det skjer noe hver eneste dag i den tunnelen. Det viser seg at det stort sett går greit [...]». Påstanden reflekterer hvorfor SVV har valgt et høyere dimensjonerende sikkerhetsnivå. Mastrafjord- og Byfjordtunnelen har høy ÅDT, med andre ord mye trafikk. Dette kan gi utslag for ventilasjonsmålinger, både som følge av stempeleffekt av kjøretøy, og objekter i veibanen ved oppstart av mekanisk ventilasjon.

5.3 Bømlafjordtunnelen

Bømlafjordtunnelen er Norges nest lengste undersjøiske ettløpstunnel, og ligger langs E39 mellom Stord og Sveio. Tunnelen er 7888 meter lang, med stigning på opptil 8,5 %. Bømlafjordtunnelen ligger nord for Haugesund og er en del av E39, sammen med Rennfasttunnelene som binder Stavanger og Bergen på Vestlandet. Ventilasjonsanlegget er konstruert for et brannscenario på inntil 50 MW. I forbindelse med Bømlafjordtunnelen ble det analysert fem dokumenter og én e-postsamtale om oppgradering av ventilasjonssystemet i tunnelen, samt verifisert og hentet supplerende informasjon fra tre intervjuer.



Bilde 2 Bømlafjordtunnelen (Skjermdump av Kartdata ©2020 fra Google Maps, u.å.)

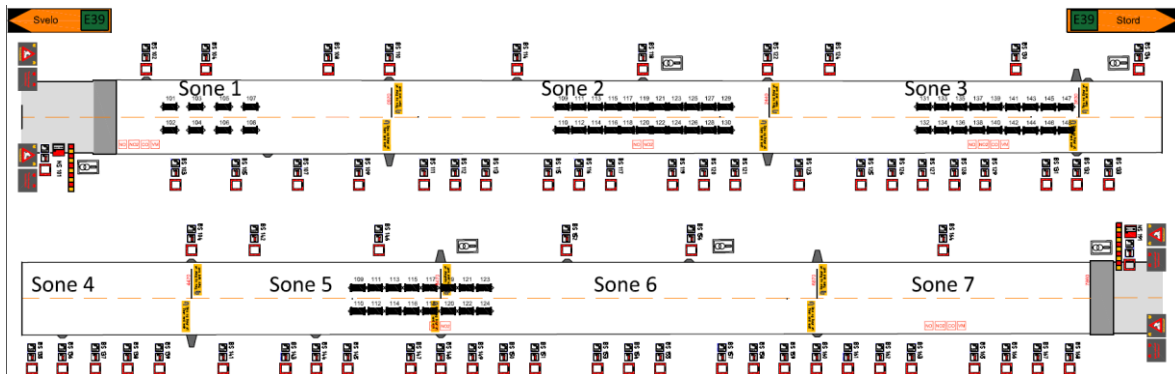
5.3.1 Grunnleggende informasjon om ventilasjonssystemet

Bømlafjordtunnelen har totalt 64 ventilatorer, alle med samme skyvekraft på 22 kW. Hver vifte kan med andre ord levere skyvekraft på 0,94 kN i begge retninger. Ved brann i tunnel vil det automatisk aktiveres en brannplan og viftene vil startes. Det er totalt syv brannplaner, avgrenset med hensyn til ulike soner i tunnelen, slik at viftene i brannområdet verken bråker for mye for trafikanter som varsler, eller tilfører mer oksygen til selve brannen.

5.3.2 Valg av dimensjonering

Ventilasjonssystemet i tunnelen ble ferdig oppgradert i 2018. Før oppgraderingen var det installert totalt 96 asymmetriske vifter, som alle hadde lavere skyvekraft enn nåværende dimensjonering. Dimensjonering er valgt på bakgrunn av de nye sikkerhetskravene.

Bømlafjordtunnelen har kamera- og radarovervåkning, evakueringslys og nye nødstasjoner som følge av teknisk oppgradering, i henhold til krav i tunnelsikkerhetsforskriftene.



Figur 16 Aksjonskart over ventilasjon i Bømlafjordtunnelen

5.3.3 Ventilasjonssystemets styringsprosesser

Ved brann i tunnel skal ventilasjonen fortsette i retning sørover. Det kom frem at normal driftsretning i nesten alle tilfeller var sørover mot Sveio, basert på at brannmannskapet fra Stord hadde kortere utrykningstid, 8 minutter mot 20-25 minutter fra Sveio, og derfor raskere kunne mobilisere til tunnelen. I beredskapsplanen stod det òg at et slikt styringsprinsipp kunne være negativt, dersom røyken blir snudd i motsatt retning av naturlig trekkretning, og at det da var ønskelig at driftsretning fulgte normale sikkerhetsanbefalinger.

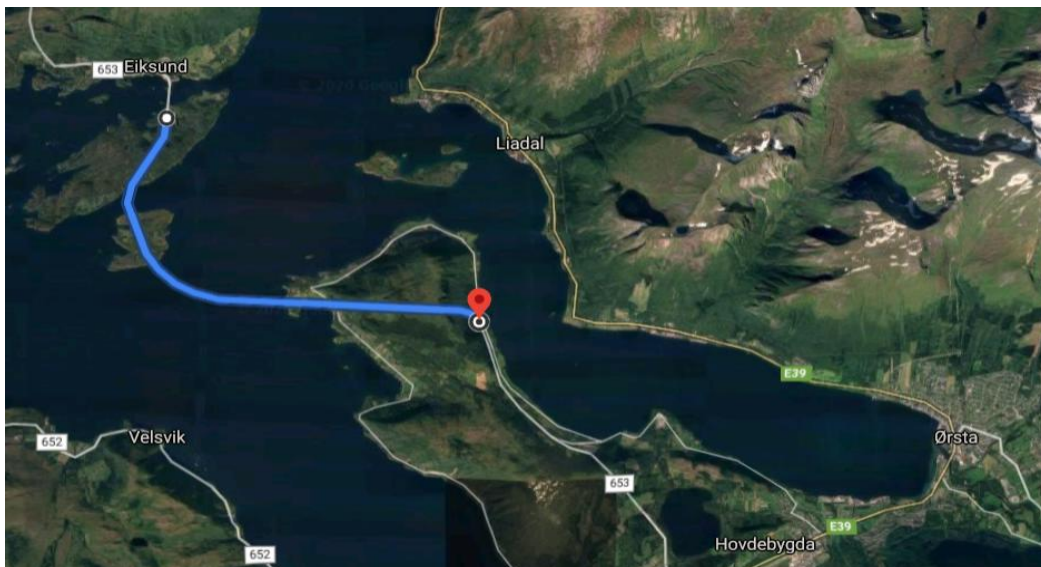
I den nyeste beredskapsplanen som er under arbeid hos SVV, blir det lagt vekt på at dimensjonering og driftsprosedyrer gjøres i henhold til selvretningsprinsippet. Dette medfører eventuell nedprioritering av ventilatorer i brannområdet, for å kommunisere med trafikantene, og oppstart av ventilasjon på lavest trinn. På trinn 1 brukes det få vifter, for å oppnå det som ble kalt «evakueringsventilasjon». Ved melding om brann startes brannventilasjon på tilnærmet 2 m/s, som er forventet røykhastighet for viftene. Ikke alle vifter blir brukt under normal brannventilasjon, og VTS kan styre ventilasjon på ulike trinn ved behov for større skyvkraft. Lokalstyring fra nødstyringspanelet kan styre ventilasjon i 10 trinn, der skyvkraften økes 10 % ved hvert trinn.

5.3.4 Tidligere hendelser

Bømlafjordtunnelen har tidligere vært eksponert for en alvorlig tunnelbrann. I 2018 tok det fyr i en varebil én kilometer inn i tunnelen fra Bømlø. Varebilen inneholdt et fat med smøreolje som gjorde brannsløkking vanskelig. Ventilasjonen ga brannmannskapet fra nordsiden god sikt, men fra sørsiden måtte brannvesenet snu. Ingen ble skadet som følge av brannen (Johansen & Granli, 2018).

5.4 Eiksundtunnelen

Eiksundtunnelen er en riksveggtunnel som ble åpnet i 2008. Ved åpning var det verdens dypeste veggtunnel, med hensikt å binde sammen Ørsta og Volda. Eiksundtunnelen er en del av Eiksundsambandet, som består av tre tunneler: Eiksund, Helgehorn og Morkaås. Relatert til Eiksundtunnelen er det analysert tre dokumenter og gjennomført ett intervju. Eiksundtunnelen kan symbolisere tunnelutforming, geometri og strategi som gjennomgående er «typisk» for tunneler med begrensede muligheter for teknisk utstyr, som gir oversikt ved en hendelse.

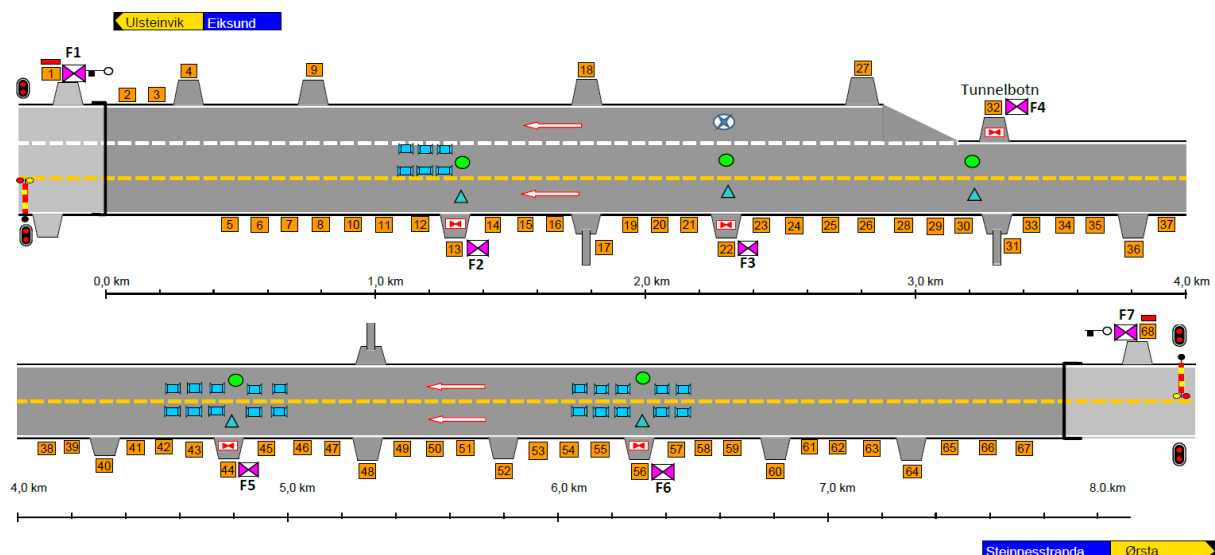


Bilde 3 Eiksundtunnelen (Skjermdump av Kartdata ©2020 fra Google Maps, u.å.)

5.4.1 Grunnleggende informasjon om tunnelen og ventilasjonssystemet

Eiksundtunnelen er 7765 meter lang med ÅDT på 3129 og 7% tungtrafikk, som er relativt lav sammenlignet med andre tunneler. Det kan begrunnes med at tunnelen binder små tettsteder fra Eiksund og øyene inn mot større sentrum, som Ørsta, for pendling til arbeidssted og andre fritidsinteresser. Tunnelen er blant de tunnelene med høyest fall, og har stigning på 9,6 % på det bratteste. Tunnelsiden mot Ørsta har stigning på 7,6 %. I beredskapsplanen ble det antatt årlig brannfrekvens på 0,083, som tilsvarer én brann hvert tolvte år. Innsatstid for brannvesenet er om lag 20 minutter fra begge sider av tunnelen.

Eiksundtunnelen har totalt 28 ventilatorer, montert parvis gjennom tunnelen med flest vifter nærme Ørsta, markert i figuren på neste side. Ventilasjonsretningen er markert med røde og hvite piler mot Eiksund.



Figur 17 Kart over ventilasjon i Eiksundtunnelen

5.4.2 Valg av dimensjonering og styringsprosesser

Ventilatorene skal gi en beregnet lufthastighet på 2,5 m/s ved brannventilasjon. De symmetriske viftene har alle samme effekt på 22 kW. Plassering av vifter medfører at røyken mest effektivt kan ferdes mot Ulsteinvik, ved å motvirke oppdrift mot Ørsta. Dette er òg fast ventilasjonsretning. I 2019 ble det gjennomført en omfattende brannøvelse i Eiksundtunnelen. I løpet av øvelsen ble det forklart at brannventilasjonen ikke imøtekommer de nyeste sikkerhetskravene, og at prosjekterende ville gjort andre valg for dimensjonering og installasjon i dag (Folkestad, 2019). Samtidig er det bekreftet av SVV at det foreløpig ikke er planer for oppgradering av anlegget, ettersom den følger sikkerhetskravene gjeldende for 2008.

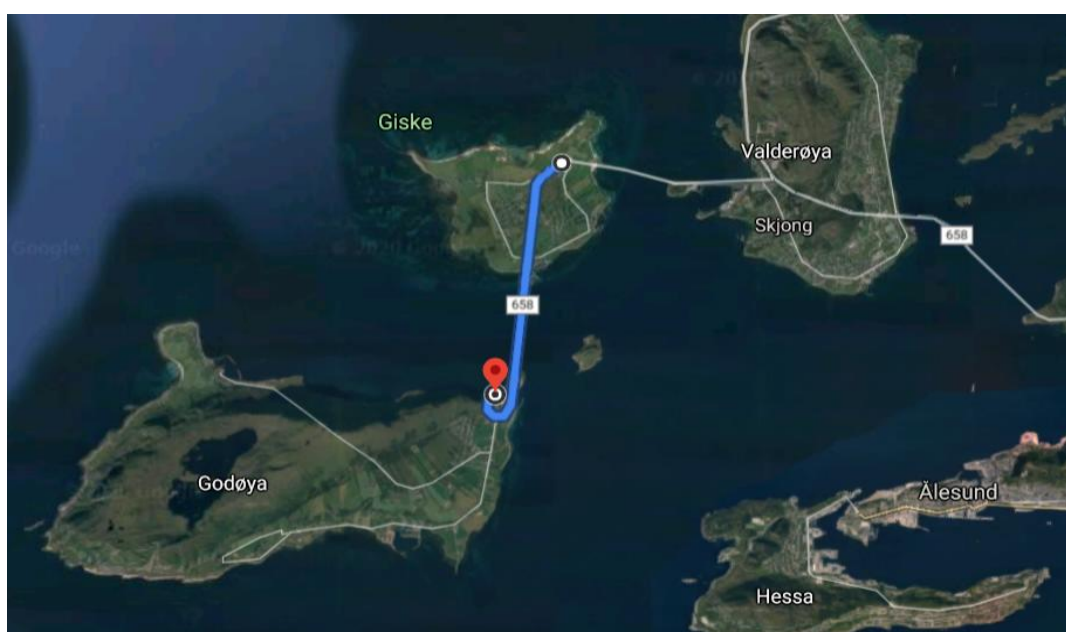
Brannventilasjonen er programmert å starte opp med fast ventilasjonsretning mot Eiksund, men kan overstyres av VTS i Trondheim. Dette er valgt fordi branninnsats og ansvar i hovedsak kommer fra Volda kommune. Ulstein brannvesen blir likevel varslet ved brann i tunnel, og har noenlunde samme innsatstid. Det er beskrevet i beredskapsplanen at brannventilasjon ikke skal startes før det er gjennomført målinger ved uhell med farlig gods, som kan avgi eksplosjonsfarlige gasser. Dette krever rask vurdering av VTS, ettersom ventilasjonen skal starte umiddelbart i fast ventilasjonsretning. Brannscenarioet som omhandler brann i kjøretøy, er beskrevet i risikoanalysen som personbilbrann i motorrommet, midt i tunnelen. Det er totalt beskrevet tre scenarioer. Et annet scenario som omhandler trafikkulykke med personskaade, henviser til oljesøl og store brannfarer, og impliserer at VTS skal aktivisere en brannplan.

5.4.3 Tidligere hendelser

Sommeren 2009 omkom fem personer som følge av en kollisjonsulykke i Eiksundtunnelen, 2,5 km inn fra Ulstein-siden. Ulykken utviklet seg til bilbrann som medførte store mengder røyk ut av tunnelen. Fosse & Vikås (2009) opplyser om at røyken medførte at slokningsinnsats ble gjennomført under vanskelige forhold, og det tok tid før røyken lettet. Ingen ble alvorlig skadet som følge av røykutviklingen (Fosse & Vikås, 2009). De tre siste årene har det vært to dødsulykker i tunnelen (Folkestad, 2019), men tunnelen har ikke opplevd større brannhendelser.

5.5 Godøytunnelen

Godøytunnelen er en undersjøisk tunnel som ligger mellom øyene Giske og Godøya utenfor Ålesund i Møre og Romsdal. Relatert til Godøytunnelen er det analysert seks dokumenter med supplerende informasjon fra én respondent. Dokumentene er hentet inn fra en informant ansatt i Møre og Romsdal fylkeskommune og en ansatt i SVV. Godøytunnelen er 3844 meter lang med en stigningsgrad på opptil 10%. Den ble åpnet i 1989 og skulle da dimensjoneres for tunnelbranner på 20 MW. Årsdøgntrafikken er på 1041. Ulykkesfrekvens, med hensyn til branntilløp, er beskrevet som 0,050 per år for lette biler og 0,006 per år for tunge biler, med andre ord hvert 20. og 167. år.

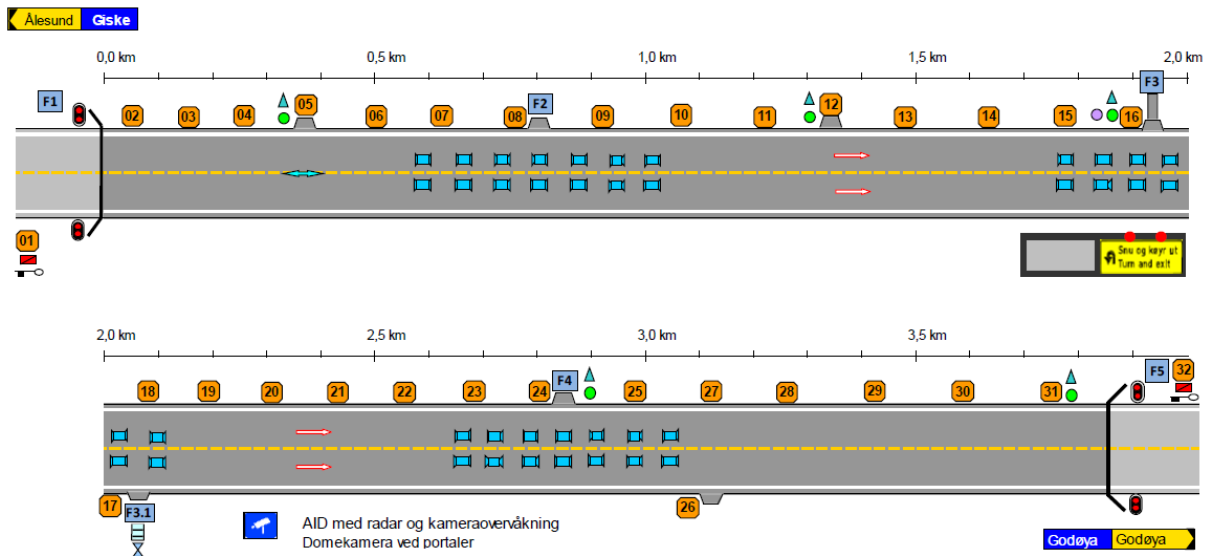


Bilde 4 Godøytunnelen (Skjermdump av Kartdata ©2020 fra Google Maps, u.å.)

5.5.1 Valg av dimensjonering

I beredskapsplanen blir det henvist til brannvernloven §13 og tunnelsikkerhetsforskriftene. Beredskapsplanen viser at forventet ventilasjon ved brann er 2,5 m/s. På en HAZID-samling i 2016 mellom SVV, nødetater, konsultentselskapet EFLA og Norges Lastebileier Forum ble det problematisert flere avvik, blant annet manglende tekniske og fysiske tilpasninger som sammen med ventilasjonssystemet kan være alvorlige faktorer for forutsetningene for selvredning. Oppgraderinger var nødvendige fra et sikkerhetsperspektiv. Ingen tiltak ble diskutert rundt utfordringene nevnt med brannvesenets begrensede kapasitet og innsats, dersom det oppstår alvorlig brann. Det ble derimot påpekt at mindre branner er mer alvorlige i nedre del av tunnelen, og at tunge kjøretøy i stor grad består av turist- og skolebusser. Hendelse med brann i tyngre kjøretøy er den eneste hendelsen som faller innenfor rød kategori, i risikomatriksen deres

i risikoanalysen. I Godøytunnelen er det totalt 40 vifter. Viftene er plassert i tre klynger på mellom 12 og 14 vifter, fordelt parvis.



Figur 18 Aksjonskart over ventilasjon i Godøytunnelen

5.5.2 Ventilasjonssystemets styringsprosedyrer

I tunnelens brannfilosofi er det beskrevet et ønske om ventilasjonshastighet på 2,5 m/s. Fremgangsmåten for ventilasjonsstyringen ble beskrevet i et kapittel om sikkerhetsutrustning i den spesielle beredskapsplanen for Godøytunnelen. 40 kameraer og flere deteksjonsapparater varsler om en hendelse. Ved deteksjon eller aktivering av unntakstilstand, blir tunnelen stengt i begge portaler og ventilasjonen stoppes automatisk. Objektet får status «AUTOSTENG», og videre blir det telt ned 360 sekunder (6 minutter) før automatisk brannventilasjon blir satt i gang. Disse minuttene skal spesifikt brukes til å skaffe oversikt i tunnelen og eventuelt overstyre den forhåndsbestemte ventilasjonen manuelt. Dersom tiden går ned til 0, vil det startes en forhåndsbestemt ventilasjon med retning mot Godøya med status «BRANNVENTILASJON STARTER». Dette trinnet er satt til å telle ned fra 240 sekunder (4 minutter). Dersom VTS eller brannvesenet ikke overstyres dette manuelt, vil full brannventilasjon med alle vifter være iverksatt. Brannvesenet har ankomsttid på omtrentlig 10 minutter fra Giske. I intervjuet med den aktuelle respondente for tunnelen, ble det forklart at ventilasjonsstrategien baserer seg på stedlige betingelser som brannvesenets innsats. Det er derfor i hovedsak én ventilasjonsretning.

5.5.3 Historiske tilpasninger og oppsummering

Fra 2017-2019 ble det gjennomført flere tekniske oppgraderinger i tunnelen, for å sikre et mer helhetlig sikkerhetssystem, blant annet kameraer og overvåking. Godøytunnelen har ikke opplevd tidligere alvorlige tunnelbranner. I beredskapsplan del 1 for Region Midt, påpekes det

at det bør gjennomføres øvelser der ventilasjonssystemet blir testet ved brann med farlig gods, for å være proaktiv dersom det skjer en hendelse.

Godøytunnelen er en av tunnelene med lav ÅDT, men som også har vært gjennom stor utvikling over tid. Tunnelen er ikke bygd etter dagens krav til tunnelgeometri, noe som kan gjøre utvikling av brann og selvredningsmuligheter vanskeligere. Derfor har målet vært å holde seg innenfor akseptable grenser med andre virkemidler, slik at totalsikkerheten opprettholdes.

5.6 Gudvangatunnelen

Gudvangatunnelen ble åpnet i 1992, og er 11 428 meter lang. Gudvangatunnelen er ikke undersjøisk, men svært lang med maksimal stigning på 3,5 %, noe som avviker fra resten av tunnelutvalget. Hele det elektriske anlegget i Gudvangatunnelen er foreløpig under oppgradering. Byggestart var i august 2018, og det er forventet at arbeidet skal være helt fram til august 2020. Aksjonskart og beredskapsplan for tunnelen er ikke ferdigstilt før høsten 2020. Gudvangatunnelen er analysert med ti dokumenter vist i vedlegg E. Det har vært hentet inn supplerende datamateriale og utbedringer fra to intervjuer, der dokumentene var ufullstendige.



Bilde 5 Gudvangatunnelen (Skjermdump av Kartdata ©2020 fra Google Maps, u.å.)

5.6.1 Valg av dimensjonering

Det er bestemt at Gudvangatunnelen skal dimensjoneres for brann på 50 MW som følge av en forventet ÅDT på 2850, ifølge tunneloppgraderingsplanene, noe som samsvarer med statistisk ÅDT på 2362 i 2019.

I samme dokument om tunneloppgradering, står det at ventilatorene skal dimensjoneres for minimum 20 års levetid i et korrosivt og forurenset miljø. I to av intervjuene ble det bekreftet at det nye ventilasjonssystemet delvis er implementert i Gudvangatunnelen, og at det per mai 2020 er en blanding av nye og eldre vifter i systemet.

Ved åpning av tunnelen i 1992 hadde ventilasjonsanlegget kapasitet for cirka 20 MW brann. 60 av totalt 92 vifter hadde lik skyvkraft i begge retninger. 32 vifter i enden lengst fra Gudvangen

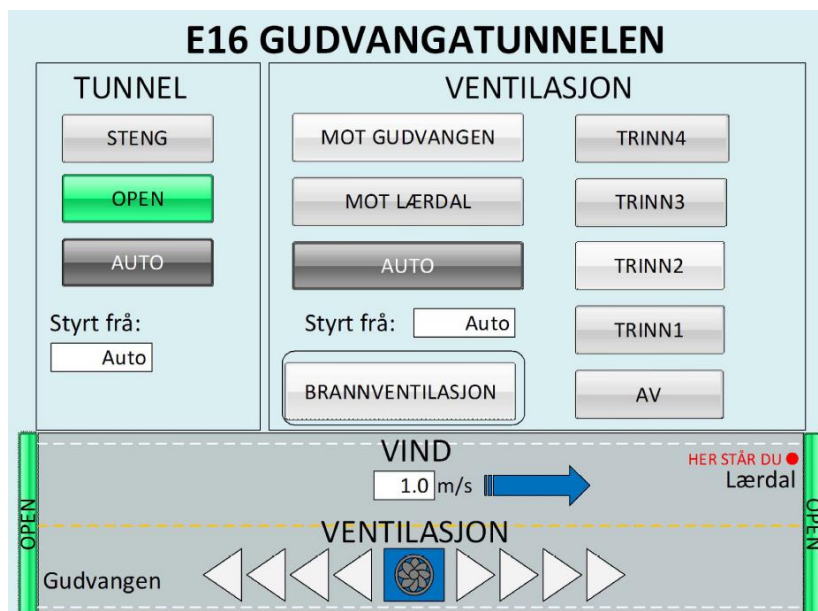
hadde betydelig større motor og nesten dobbelt så stor skyvekraft mot Gudvangen i forhold til de andre viftene. Disse viftene hadde liten skyvkraft mot Flåm.

I plantegningene informeres det om at det nå skal leveres totalt 60 vifter med 15 kW motor og 48 vifter med 22 kW motor. Prosjektert skal de symmetriske vifteparene installeres med avstand på cirka 1,3 km fra hver tunnelåpning. De opptrer i klynger på 3-5 viftepar, med cirka 45-85 meters avstand mellom hvert par. Det er videre avstand mellom klyngene på henholdsvis 160-285 meter og 1,0-1,2 km.

5.6.2 Ventilasjonssystemets styringsprosesser

I 2013 var viftene forhåndsprogrammert til å blåse røyk i retning mot Gudvangen. Aurland brannvesen hadde kortest utrykningstid, og det var ønskelig at de raskt kunne komme fram til brannen. Fremover skal Gudvangatunnelen styres slik at røyken blir ventilert med naturlig trekkretning. Ventilasjonen stoppes automatisk nærmest de dørene eller brannskapene som ble brukt, av hensyn til støy fra vifter. Ved stenging av dørene startet viftene igjen.

Ventilasjonen kan styres i fire trinn, der det første baserer seg på at viftene leverer skyvkraft på 1-2 m/s, andre trinn baserer seg på 2-3 m/s, tredje trinn på 3-4 m/s og fjerde trinn på 100 % ventilasjonskapasitet. Disse trinnene kan styres i begge retninger.



Figur 19 Forslag på utforming av nødstyrepanel fra planheftet i Gudvangatunnelen

5.6.3 Tidligere hendelser

I 2013 begynte det å brenne i en trekkvogn til et vogntog uten last. 67 personer ble fanget i røyken og 28 personer ble påført akutte skader, som følge av at røyken var forhåndsbestemt i retning mot Gudvangen. Brannen ble ventilert hele 8,5 km mot Gudvangen, før trafikanter fikk

informasjon om å evakuere. I etterkant har SHT avdekket svakheter ved tunnelens sikkerhetsutrustning. Ventilering av røyk blokkerte den eneste evakueringsmuligheten for trafikanter på den ene siden av brannen, noe som kategoriserte ventilasjonsanlegget som en styringsfeil. Tunnelen hadde ingen overvåking som ga informasjon om antall kjøretøy i tunnelen, og det var manglende trafikkstyring og informasjon som kunne bistått trafikantene i henhold til selvredningsprinsippet (SHT, 2015).

I 2015 skjedde det en liknende situasjon da det begynte å brenne i en turistbuss. Bare 360 meter inn i tunnelen stanset sjåføren, da brannen ble oppdaget. Sjåføren tok et brannslukningsapparat fra veggen og prøvde å slukke brannen, samt evakuerte turistene ut fra bussen. Brannventilasjonen som ble startet da brannapparatet ble fjernet, hadde en forhåndsbestemt innstilling mot Gudvangen på opptil 4 m/s, slik at røyken ble ventilert den lengste retningen på 11,1 km der òg flest trafikanter befant seg. Dette påvirket muligheter for selvredning, samt VTS og brannvesenets situasjonskontroll. I motsetning til brannen i 2013, evakuerte ikke trafikantene til fots, men søkte tilflukt i kjøretøy. 35 minutter etter brannventilasjonen var startet, ble ventilasjonsretningen snudd mot Langhuso, da Aurland brannvern observerte turistbussen, og røykproppen vendte tilbake. Da var allerede røyken driftet halvveis gjennom tunnelen, og sikten var dårlig. I etterkant mente SHT at SVV burde endre denne automatikken slik at mulighetene for trafikantenes evakuering ivaretas (SHT, 2016b).

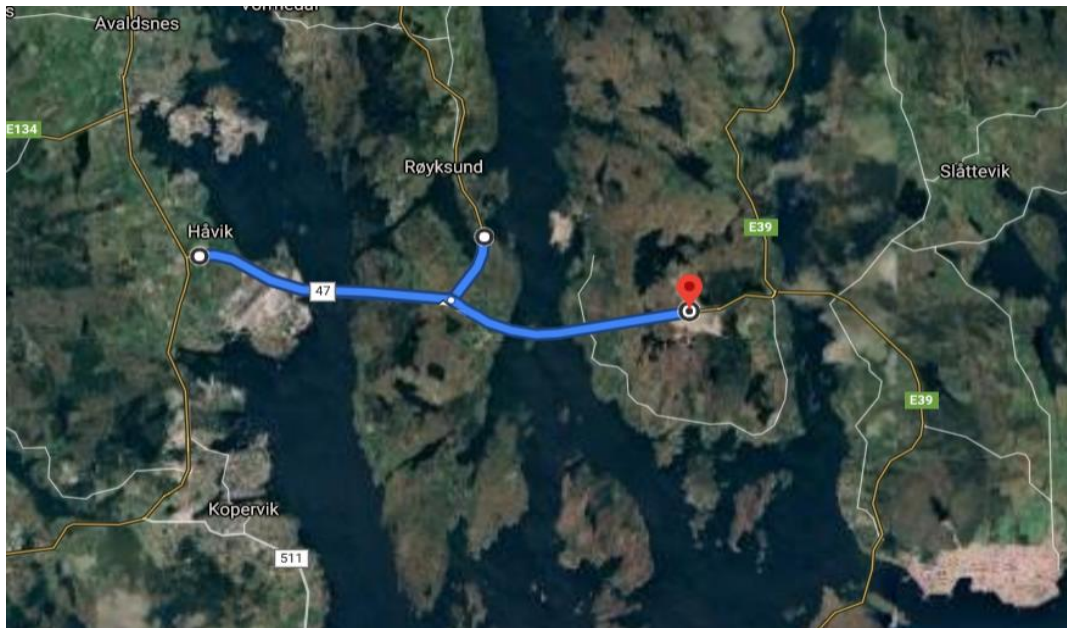
I mars 2019 tok et vogntog med semitilhenger fyr i Gudvangatunnelen. Tunnelen hadde kolonnekjøring som følge av oppgraderingsarbeidet. Tre vogntog og flere vedlikeholdsarbeidere befant seg i tunnelen og måtte evakuere (Hattrem & Silseth, 2019). Ingen ble alvorlig skadet, men konsekvensomfanget kunne potensielt bli svært alvorlig. Hendelsen er markert som en pågående undersøkelse hos SHT.

5.6.4 Oppsummering

Gudvangatunnelen er i en spennende fase. Både omkobling av anlegget etter sommeren 2020, og et helt nytt elektronisk system kan gi tunnelen et betydelig bedre utgangspunkt ved en uønsket hendelse, men et komplekst system krever òg korrekt bruk og testing. Læring etter hendelser har tydelig satt preg på valg av styringsprinsipper, noe som gjør Gudvangatunnelen aktuell.

5.7 Karmøytunnelen

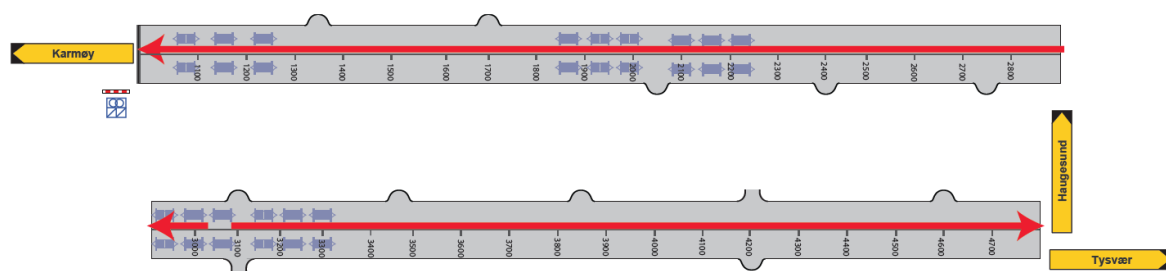
Karmøytunnelen er den nyeste og mest komplekse av de utvalgte tunnelene, med bakgrunn av dens utforming. Tunnelen er en del av T-forbindelsen, ettersom geometrien kan likne på bokstaven T, med tre løp og en rundkjøring som binder løpene sammen. Tunnelen går under Karmsundet og Førresfjorden med ett løp opp til øya Fosen. Relatert til Karmøytunnelen ble det gjennomgått fem dokumenter og gjennomført ett supplerende intervju.



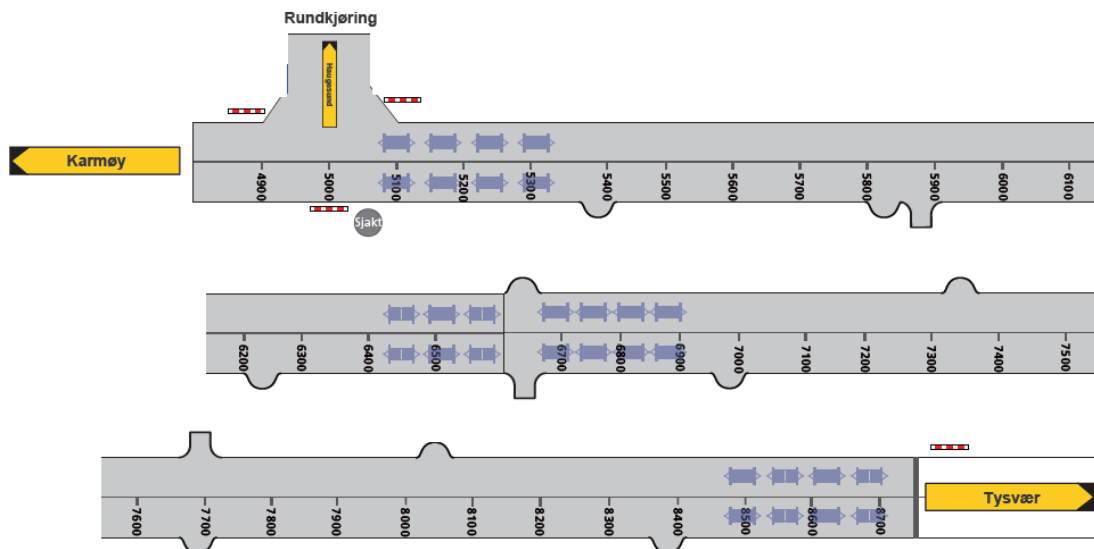
Bilde 6 Karmøytunnelen (Skjermdump av Kartdata ©2020 fra Google Maps, u.å.)

5.7.1 Grunnleggende informasjon om dimensjonering av ventilasjonssystemet

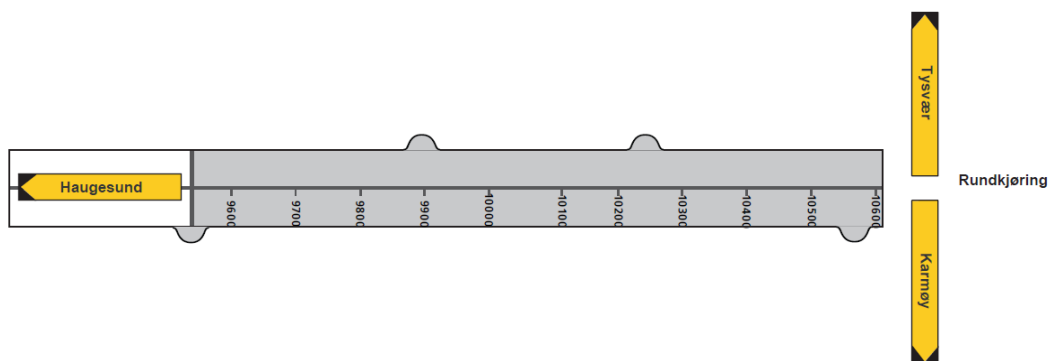
Karmøytunnelen er totalt 9028 meter lang og åpnet så sent som i 2013. Tunnelen har stigning på opptil 7,4% mot Karmøy og Tysvær. Mot rundkjøringen i krysspunktet av tunnelene vil trafikantene oppleve å kjøre oppover igjen. Fra Haugesund er fallet mot rundkjøringen stabilt på cirka 6 %. I risikoanalysen for Karmøytunnelen antas det brann i personbil/varebil hvert 11. år, og i tungt kjøretøy hvert 42 år, henholdsvis sannsynligheter på 0,091 og 0,024 hvert år.



Figur 20 Ventilasjonssystemet i T-forbindelsen fra Karmøy til rundkjøringen



Figur 21 Ventilasjonssystemet i T-forbindelsen fra rundkjøringen til Tysvær



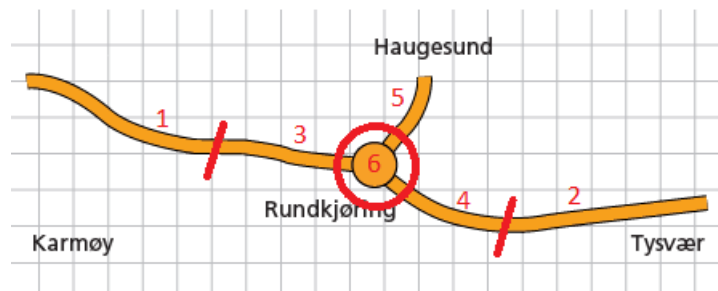
Figur 22 Tunnelprofil av T-forbindelsen nord fra Haugesund til rundkjøringen

Ventilasjonssystemet består av totalt 60 vifter montert i to av tunneløpene. I tunneløpet mot Haugesund er det ikke installert vifter. Karmøytunnelen skiller seg fra de andre tunnelene som eneste tunnel med ventilasjonssjakt 60 meter øst for rundkjøringen i tunnelen. Sjakten er markert øverst til venstre i figur 21. Passasjen kan håndtere cirka $600 \text{ m}^3/\text{s}$ på grunn av tre sjaktvifter vendt oppover i løpet. Viftenes funksjon er å styre røyken opp passasjen og ut av tunnelen. Stenging av sjakt vil ved behov ta 1-2 minutter, og gjennomføres ved bruk av spjeld som kan lukke seg.

5.7.2 Ventilasjonssystemets styringsprosesser

I et av intervjuene kommer det frem at ved melding om brann vil viftene automatisk aktivere brannplan, med oppstart av alle vifter i predefinert retning. Ventilasjonsprinsippet for Karmøytunnelen er i hovedsak å styre røyken med dens naturlige oppdrift, med andre ord oppover i tunnelen. Et slikt ventilasjonsprinsipp skapte behovet for ventilasjonssjakten. Uten denne ville alternativet vært å styre røyken ut av en eller flere av tunnelåpningene, og derfor i en lengre bane i tunnelen.

Karmøytunnelen har totalt seks ulike brannprogram som markert med numre i figuren nedenfor. De to røde strekene markerer tunnelenes bunnpunkt og sirkelen innrammer rundkjøringen i tunnelen.



Figur 23 Horisontalkurvatur av Karmøytunnelen fra aksjonskartet

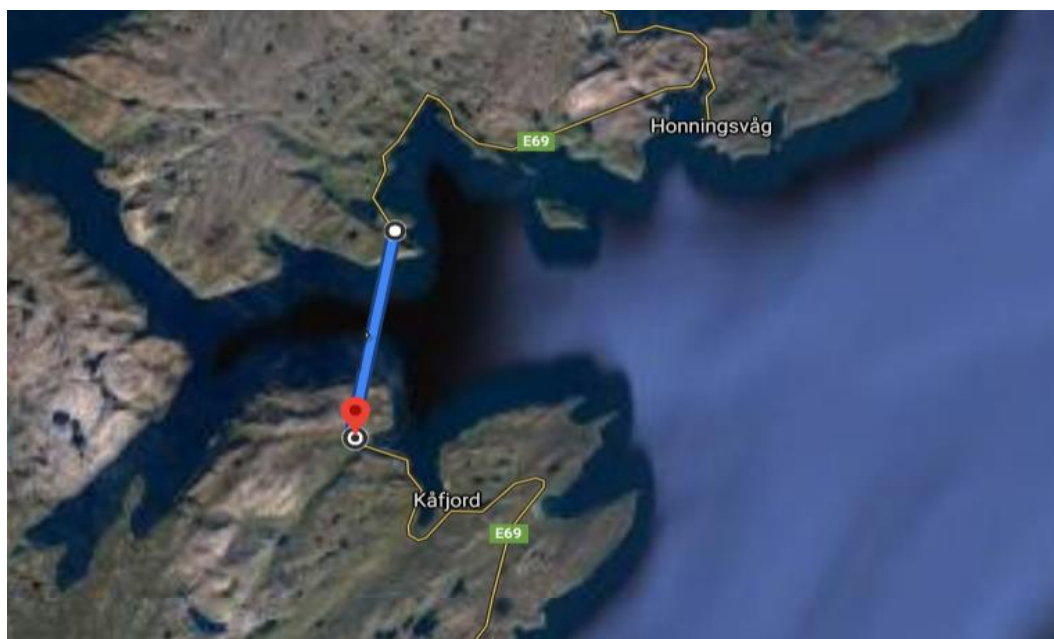
Ved brann i stigning opp mot Karmøy eller Tysvær (1 og 2 i figur 23) skal røyken ventileres mot nærmeste tunnelportal. Røyken vil ventileres opp og ut, og de andre tunnellopene bør være frie for røyk. Med andre ord må ventilasjonsretningen snu. Ved brann i stigning mot rundkjøringen (3 og 4) vil impulsiftene blåse i retning mot sjakten. Resterende deler av Karmøytunnelen holdes dermed røykfri, ved hjelp av avsug fra sjakten og ventilasjonskraften. I tunnellopet mellom rundkjøringen og Hellevik/Haugesund (5) er det ikke installert impulsiftene. Prosedyren blir derfor å stenge avtrekkssjakten ved rundkjøringen og skru på viftene i de to andre tunnellopene, i retning inn mot rundkjøringen. En sammensetning av oppdrift og vind inn fra de andre tunnelene vil styre røyken ut av tunnellopet. Ved brann i rundkjøringen (6) vil normal ventilasjonsretning være utgangspunkt, og kapasiteten for sjaktviftene reguleres til maksimal kapasitet. For å sikre at røyken ikke sprer seg i tunnelen mot Haugesund, vil ventilasjonshastighet fra Tysvær og Karmøy være lavere enn i brannplan 5. Alle tunnelviftene er inndelt i viftegrupper, der antall vifter som skal starte er basert på plassering og brannplan.

5.7.3 Oppsummering

Karmøytunnelen er fortrinnsvis relativt ny sammenliknet med mange av Norges ettløpstunneler. Den har en forholdsvis enkel strategi med å «ventilere oppover» uavhengig av situasjon, noe som kan komme godt med i en tunnel med relativt komplisert trafikk. Samtidig kom det frem i intervjuet at Karmøytunnelen ikke har kameraovervåkning, og operatørene må skaffe seg et oversiktsbilde ved brann basert på informasjon fra trafikanter. I tillegg er innsatsmulighetene avhengig av hvor i tunnelen det brenner. Faste brannplaner kan derfor gi forutsigbarhet for nødetatene.

5.8 Nordkapptunnelen

Nordkapptunnelen åpnet i 1999 som en del av E69, mellom fastlandet og Magerøya i Finnmark. I forbindelse med Nordkapptunnelen ble det analysert tre dokumenter og gjennomført ett intervju. Tunnelen er 6879 meter lang med en ÅDT på 282 der 26% er tunge kjøretøy, mange turistbussar, ifølge risikoanalysen. Nordkapptunnelen har overlegent størst prosent tunge kjøretøy. Tunnelen har en stigning på 10 %.



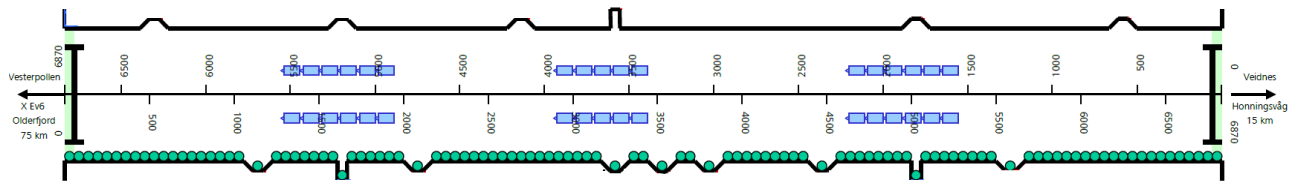
Bilde 7 Nordkapptunnelen (Skjermdump av Kartdata ©2020 fra Google Maps, u.å.)

5.8.1 Grunnleggende informasjon om ventilasjonssystemet og valg av dimensjonering

Nordkapptunnelen er underdimensjonert for dagens branntekniske krav, og risikoanalysen for tunnelen anbefaler etablering av brannventilasjon på 50 MW, med bakgrunn i mange eldre og utenlandske turister, mange busser, samt kun én realistisk innsatsvei. Ventilasjonssystemet kan dateres tilbake til 1998 da tunnelen ble bygd, men er regelmessig vedlikeholdt og testet. Anlegget består av 36 ventilatorer.

Bestemt etter et handlingsprogram 2014-2017 tilsier kravene at tunneler over 1 km med mer enn 1000 ÅDT skal ha brannventilasjon. Til tross for at ÅDT kun er på 450, informerte en av respondentene fra SVV at den i høysesong kan være opp mot 1200 med mange turistbussar og utenlandske eksportkjøretøy, noe som medfører et særskilt krav om ventilasjon. Tunnelen er utrustet med nødtelefoner, men har ikke kameraer, vannforsyning og i tillegg uforutsigbar trekk, ifølge tunnelforvalteren og beredskapsplanen. Nordkapptunnelen er eneste tunnel i utvalget

med kuldeport for å unngå frostspreng og isdannelse. Ventilasjonssystemet er derfor avhengig av at kuldeportene er minst 1/3 åpne ved brann, noe som gjør tunnelen mer kompleks.



Figur 24 Aksjonskart av vifter i Nordkapptunnelen

5.8.2 Ventilasjonssystemets styringsprosesser

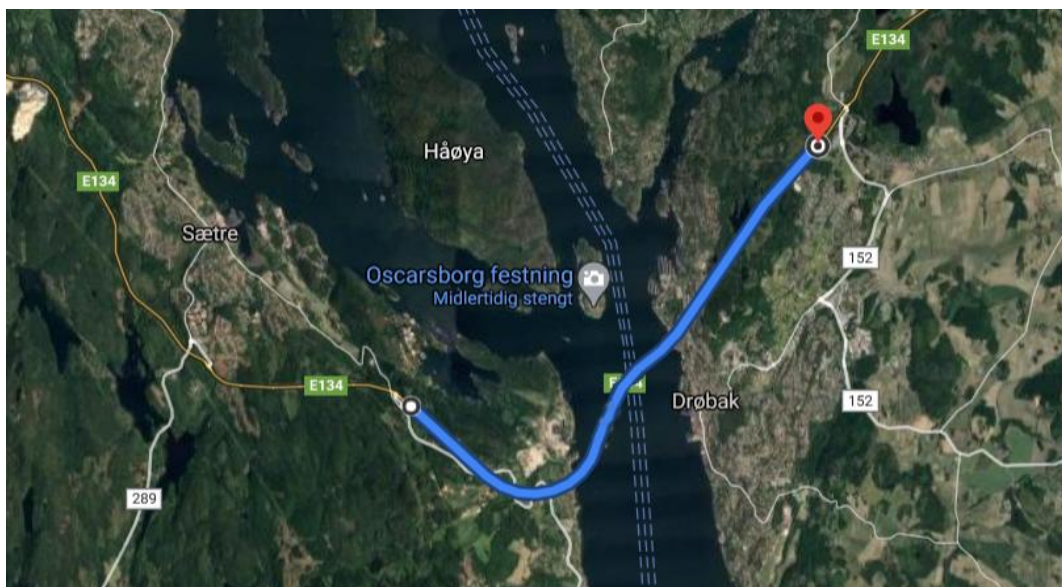
Tunnelen stenges umiddelbart ved henvendelse om brann. Deretter startes brannventilasjon sørover fra Magerøya, med bakgrunn i at nødetatene har kortest innsats tid fra nordsiden, om lag 20 minutter. Fra sørsiden må det enten flys inn innsatspersonell med helikopter uten vannforsyning, eller få hjelp fra Hammerfest, noe som tar 2,5 time. Brannventilasjonen har dimensjonerende lufthastighet på 2 m/s, ifølge beredskapsplanen, uten at det er beskrevet nærmere. Det er lagt vekt på at innsatspersonellet trenger frisk luft i ryggen for tilkomst til brannen eller ulykken. Brannvesenet bestemmer angrepsvei for innsats, noe som er vesentlig for valg av ventilasjonsretning, ifølge innsatsplanene. Brannventilasjon kan styres i tre trinn med 0 %, 50 % eller 100 % av antall vifter. Brannventilasjon skal iverksettes med samme prosedyrer, dersom det er meldt søl med farlig gods. I beredskapsplanen om innsats ved hendelser, står det beskrevet at VTS skal varsle trafikanter om å evakuere tunnelen, ved å snu bilen eller rømme til fots. Trafikantene får beskjed etter at viftene er startet opp. Ved uhell med farlig gods, skal trafikantene få beskjed om å parkere bilen og rømme til fots mot tunnelåpningen, noe som strider imot rutinene ved brann.

5.8.3 Historikk og oppsummering

Nordkapptunnelen har foreløpig ikke opplevd alvorlige hendelser som kan utfordre sikkerhetsutrustningen, men er preget av hardt vær og kaldt klima. Tunnelen er en viktig del av infrastrukturen og vegnettet, både for turisme og annen industri, men det foreligger ikke mye offentlig dokumentasjon om Nordkapptunnelen.

5.9 Oslofjordtunnelen

Oslofjordtunnelen er en undersjøisk ettløpstunnel som forbinder øst- og vestsiden av Oslofjorden mellom Frogn og Asker. Tunnelen er et vegnettalternativ for trafikanter som ikke ønsker å kjøre E18 gjennom Oslo. Det er bestemt at det skal bygges et nytt løp parallelt med det eksisterende løpet, slik at hele Oslofjordforbindelsen blir firefelts motorvei. Målet er å ferdigstille toløpstunnelen i 2026. I forbindelse med Oslofjordtunnelen ble det analysert ni dokumenter, gjennomført to intervjuer, og dratt på én befarings.

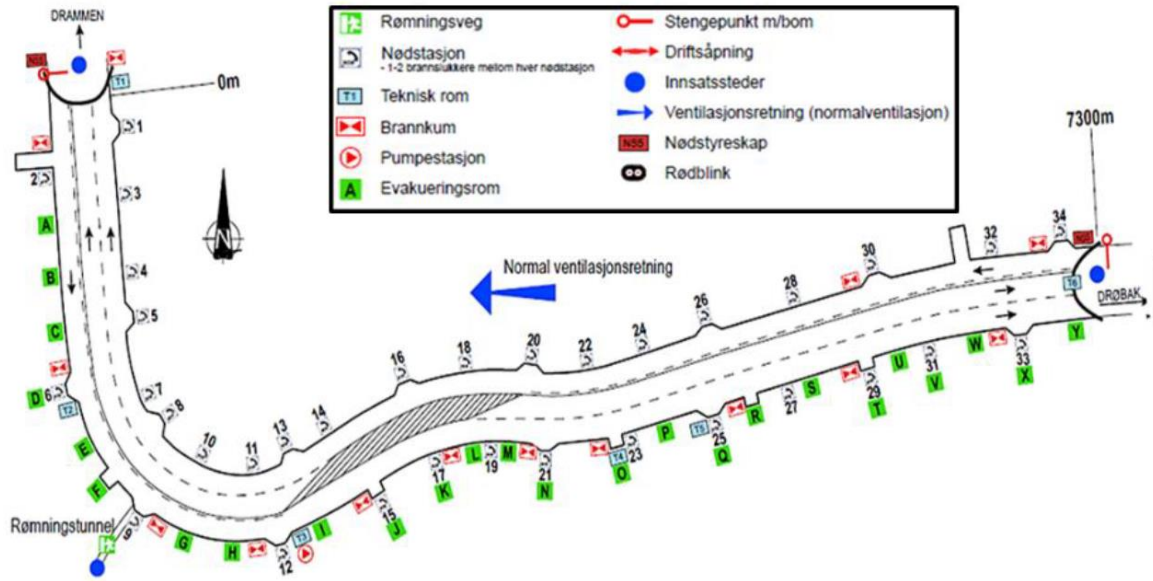


Bilde 8 Oslofjordtunnelen (Skjermdump av Kartdata ©2020 fra Google Maps, u.å.)

5.9.1 Grunnleggende informasjon om dimensjonering av ventilasjonssystemet

Oslofjordtunnelen ble åpnet i år 2000. Den er 7273 meter lang med jevn stigning på 7%, og ÅDT på 10346 med en tungbilandel på 14%. Tunnelen er tunnelklasse E. Oslofjordtunnelen har 36 vifter som ble ferdig montert i desember 2019. Viftene er plassert i klynger på 4-8 symmetriske vifter i par gjennom hele tunnelen, 16 på Drammenssiden og 18 på Drøbakssiden.

Før det ble installert nye vifter i tunnelen var ventilatorene dimensjonert for 50 MW og asymmetriske, med kraftigst utblåsning mot Drammen. Forutsetningen for dette var at branninnsats i hovedsak skulle komme fra Frognssiden, uavhengig av hvor i tunnelen det brant.



Figur 25 Illustrasjon for ventilasjonsprinsipp i Oslofjordtunnelen (SHT, 2018)

Ventilasjonsberegningene for Oslofjordtunnelen var gjennomført med hensyn til metodikken fra «Håndbok N500» fra 2014. Basert på denne, samt en risikoanalyse for Oslofjordtunnelen og tidligere hendelser som har inntruffet, ble tunnelen da dimensjonert for å håndtere 100 MW brann med lik skyvkraft begge retninger.

Ventilasjonsberegninger viste krav om netto skyvkraft 54,9 kN, noe som medførte behov for å øke viftekapasiteten og installere nye vifter. Viftene kan blåse med kraft på 44 kW. Viftene har gitt ytelse etter krav i ISO 13350 om ytelsesprøving av jetvifter, og er bestilt i rustfritt og syrefast stål. I et intervju om Oslofjordtunnelen kom det frem at materialkvalitet var viktig for dem, som følge av at miljøet i tunnelen kunne være dårlig som følge av eksos, veisalt og veistøv fra trafikken.



Bilde 9 Vifter bestilt til Oslofjordtunnelen i rustfritt og syrefast stål

5.9.2 Ventilasjonssystemets styringsprosesser

I et utdrag fra et samarbeidsmøte mellom SVV, Hurum brannvesen, Røyken brann og redning, Asker og Bærum brannvesen IKS og Follo brannvesen IKS gjennomført 4.3.2019, nevnt i dokumentet om «Sikkerhetstiltak for E134 Oslofjordtunnelen», kommer det frem at det kan ønskelig å endre ventilasjonsprinsippet slik at utblåsning går i retning som gir best forhold med selvredning. Det ble foreslått tre ulike prinsipper i møtet: 3-deling, 2-delt og situasjonsvurdering. Prinsippene går ut på å dele tunnelen opp i soner med valgt respons basert på hvor ulykken befinner seg. Fordelen er forutsigbarhet og klare innsatsordre, mens ulempen kan være usikkerhet dersom en hendelse befinner seg i midten av tunnelen ved en 3-deling, eller krav til kompetanse og press på beslutningstaker ved vurdering av enkeltsituasjoner. Det kom frem at et 2-delt ventilasjonsprinsipp, med nullpunkt i bunn av tunnelen, var mest gunstig.

Det ble forklart i begge intervjuene knyttet til Oslofjordtunnelen at det per dags dato ikke er iverksatt et nytt ventilasjonsprinsipp, og at røyken fremdeles styres i retning Drammen. Respondentene bekreftet at vurdering og detaljene om et nytt ventilasjonsprinsipp fortsatt er pågående.

Vanlig praksis ved en brannhendelse er at ventilasjonen holdes igjen i 6-7 minutter, før den aktiveres av VTS. Dette valget ble gjort på bakgrunn av å ivareta selvredningsprinsippet. I SHT sine rapporter bekreftes dette. Ved deteksjon blir signalplanen «Brannstengt» iverksatt og all ventilasjon stoppes. Hensikten med dette er, ifølge beredskapsplan del 2, å gi sikt i tunnelen for kameraer og hindre røyk- og brannspredning, noe som òg blir vektlagt tunnelforvalteren. Tunnelforvalteren påpekte òg at disse minuttene gir VTS anledning til å iverksette andre sikkerhetstiltak i tunnel. 7 minutter er maksimal stopptid for ventilasjonsanlegget før den må aktiveres. Deretter gjennomføres brannventilasjon for å iverksette brannsluknings- og redningsarbeid. Brannventilasjonen er vanligvis gjennomført med vifte hastighet på 2-3 m/s, men kan gjennomføres med 5-6 m/s ved innsatspersonellens ønske. Utrykningsleder instruerer VTS om ønskelig ventilasjon.

5.9.3 Historiske tilpasninger

I beredskapsplanen til Oslofjordtunnelen, antas det brannstatistikk på 0,494 for personbiler og varebiler, og 0,2 for tunge kjøretøy, med andre ord hvert andre og femte år. Etter Oslofjordtunnelens åpning i 2000, har det vært 23 ulykker og 24 branner eller branntilløp. Totalt 39 personer er sendt til sykehuset som følge av brannene. Nedenfor er det hentet to eksempler som har satt spor i medier og rapporter.

I 2011 begynte det å brenne i et vogntog i Oslofjordtunnelen som følge av motorhavari. Brannventilasjonen ble igangsatt på 2-3 m/s, cirka 4 minutter etter at VTS registrerte brannen på overvåkningssystemet. 25 av 34 trafikanter evakuerte på egenhånd, men røykutviklingen ga redningsinnsatsen problemer med å komme frem til ulykkesstedet, og flere trafikanter ble fanget i røyken (SHT, 2013).

I 2017 oppstod det en ny alvorlig brann i Oslofjordtunnelen. Et vogntog var på vei opp stigningen igjen da det begynte å brenne som følge av motorhavari, svært likt som hendelsen i 2011. Flere alvorlige avvik ble fortløpende oppdaget i tunnelens sikkerhetsutrustning. Da Oslofjordtunnelen skulle stenges ved brann ble ventilasjonen stoppet automatisk, men forsøkt aktivert igjen seks minutter senere. Dette ble problematisk som følge av at tunnelstatus var «Brannstengt», og VTS måtte enkeltstyre og overkjøre dette fra et eksternt styringssystem. Ventilasjonen ble effektivt brukt med full kraft litt senere for å ventilere røykproppen vekk fra nødetatene i tunnelen slik at de kunne gjennomføre brannslukning. Ventilasjonen hadde hastighet på 5-6 m/s. Det viste seg i etterkant at totalt seks vifter ikke fungerte under hendelsen, der fire allerede var kjent, som følge av dårlig vedlikehold og oppfølging (SHT, 2018). I 2019 annonserte Statens Vegvesen at Oslofjordtunnelen i november og desember skal ha fått montert 36 nye vifter for å lette innsatsarbeidet og styre ventilasjonen i begge retninger (SVV, 2019a).

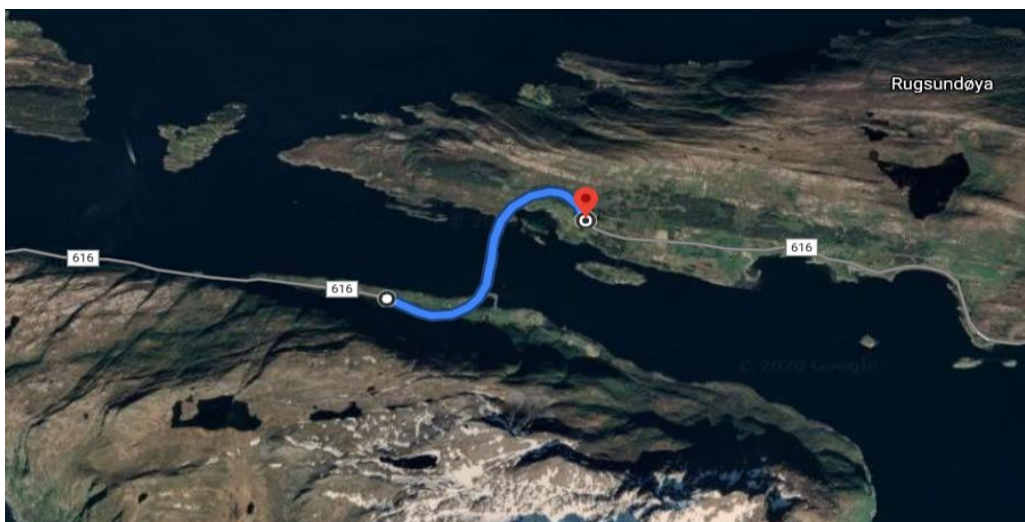
I etterkant av hendelsene ble det gjennomført flere restriktive tiltak, blant annet nedjustering av fartsgrensen til 70 km/t, og tidvis restriksjoner for å kjøre vogntog gjennom tunnelen i rushtiden, ifølge tunnelforvalteren. Tidsrestriksjonene er nå opphevet.

5.9.4 Oppsummering

Oslofjordtunnelen kommer til å gjennomgå store utviklinger fremover. Det er bestemt som en del av Oslofjordforbindelsen å bygge et nytt tunnellop, noe som var årsaken til oppgradering av ventilasjonssystemet, ifølge tunnelforvalteren fra SVV. VTS har òg god dekning for å overvåke tunnelen. Oslofjordtunnelen har mange erfaringer med tunnelbrann, og har høy ÅDT. En av de store fordelene for Oslofjordtunnelen er nærhet til innsatspersonell på Drøbakssiden, noe som ved rask deteksjon og innsats kan være forebyggende for tunnelbrannutvikling.

5.10 Skatestraumtunnelen

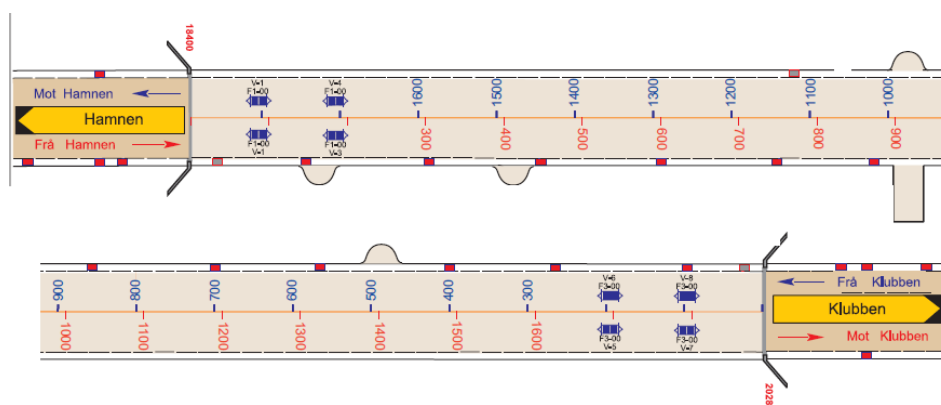
Skatestraumtunnelen er 1902 meter lang og har en årsdøgntrafikk på 407, der 11 % er tunge kjøretøy. Skatestraumtunnelen binder Bremangerlandet inn mot fastlandet vest for Jostedalbreen, og området er kjent for flotte turmuligheter. Tunnelen ble åpnet i 2002, og renovert etter en større tunnelbrann i 2015. Tunnelen har et fall på 10% fra begge sider. I forbindelse med Skatestraumtunnelen er det analysert seks dokumenter, og tunnelen ble nevnt i fire av intervjuene.



Bilde 10 Skatestraumtunnelen (Skjermdump av Kartdata ©2020 fra Google Maps, u.å.)

5.10.1 Grunnleggende informasjon om ventilasjonssystemet og valg av dimensjonering

Tunnelen har fire impulsvifter i hver ende av tunnelen, totalt åtte vifter, markert blått på figuren nedenfor. Brannventilasjon starter automatisk ved å fjerne et brannsløkningsapparat. Ventilasjonen er bestemt i retning på 2 m/s fra Hamnen mot Klubben, avgjort i samråd med brannvesenet, men ventilasjonsretningen kan endres.



Figur 26 Aksjonskart av vifter i Skatestraumtunnelen

Viftene er dimensjonert for å håndtere brann på 50 MW. Ventilatorene hadde opprinnelig diameter på 1120 og 1000 mm med motorer på 22 kW og 30 kW, men etter brannen i 2015 ble halvparten av ventilatorene erstattet med fire nye på 30 kW. Skatestraumtunnelen har ikke installert overvåkningskameraer, men har totalt 14 nødstasjoner.

Viftebladene består av aluminium- og silisiumlegering som har smeltepunkt på 565-585 °C. I 2015 smeltet ventilatorparet som befant seg 300 meter unna brannen. Motorene ble ikke skadet av brannen, og er sertifiserte for drift i én time ved temperaturer på 250 °C. Ved tunnelbrannen i 2015 ble motorene kun driftet i 10-12 minutter, og kortsluttet som følge av svikt i kablene.

5.10.2 Ventilasjonssystemets styringsprosesser

Brannventilasjonen starter automatisk med bestemt retning fra Hamnen til Klubben, med forbehold om at normal driftsventilasjon òg er i samme retning. Det kom frem i et av intervjuene at styringsprinsippet opprinnelig følger tunnelens naturlige trekkretning. Ved testing av branneffekt ble det observert at viftene kan gi et branntrekk ved kald tunnel på opptil 6,5 m/s fra Klubben.

5.10.3 Historiske tilpasninger

I Skatestraumtunnelen i 2015 løsnet en tilhenger fra en trekkbil, traff tunnelveggen og slo hull slik at 16 500 liter bensin lakk ut og nedover tunnellopet. Bensinen ble antent og brannen spredde seg på en strekning på ca. 900 meter. Alle de 17 personene i tunnelen klarte å evakuere uten alvorlige skader. Ventilasjonsviftene ble hardt skadd som følge av røyk- og varmeskader ettersom den ytre delen av viftebladene smeltet, som vist på illustrasjonen nedenfor. Ventilasjonsanlegget ga et trekk på ca. 2 m/s. 32 minutter etter at tunnelen ble stengt, overtok VTS styring av vifter, men allerede da hadde viftene havarert. Som konsekvens av tidlig ventilasjon, var ikke lufttemperatur nedenfor tanktilhengeren like høy. Samtidig konkluderes det i SHT (2016a) sin rapport etter brannen at ventilasjonssystemet ikke hadde innvirkning på forløpet, ettersom de genererte luftstrømningene fra brannen var kraftigere, og oppdriften fra brannen var langt større enn trykket de fire viftene hadde gitt. Det kommer frem fra notatet om brannen at endring av driftsretning seks minutter etter at tunnelen ble stengt, hadde gjort lite utslag fordi brannen ble slukket, og tunneltemperaturen var under 30 °C igjen. I etterkant er det gjennomført et anslag av branneffekt, på grunnlag av opplysninger om bensinen og flammeobservasjoner. Anslått tid på brann er mellom 20 og 60 minutter, og branneffekt på mellom 150 og 400 MW. Fra SHT sin rapport antas brannen å vare i overkant av 40 minutter med maksimal branneffekt på 440 MW.



Bilde 11 Skade på ventilatorene fra brannen i Skatetraumtunnelen

6. ANALYSE

Analysen presenterer relevante funn hentet fra datainnsamlingen, for å kunne svare på problemstillingen senere. Funnene knyttes opp mot eksempler fra tunnelutvalget, intervjuer og observasjoner, men vil òg bære preg av egne refleksjoner og oppfordringer. Forskningsspørsmålene danner struktur for delkapitlene, men flere av funnene kan beskrives på tvers av forskningsspørsmålene.

6.1 Hvorfor er mekanisk ventilasjon ved brann i tunnel en kritisk faktor?

Røykkontroll som følge av mekanisk ventilasjon er omtalt som en sikkerhetsbarriere i teorikapittelet, og dermed én av flere faktorer som kan påvirke konsekvensutfallet ved en tunnelbrann. I et sikkerhetsstyringsperspektiv kan *kritisk* tolkes som noe svært viktig for ønsket utfall, en funksjon som ikke kan erstattes av andre liknende faktorer. Kritikalitet kan med andre ord knyttes til ventilasjonsanleggets evne til å påvirke brannscenarioene. Det blir videre avklart om mekanisk ventilasjon kan rettferdiggjøres som en kritisk faktor.

6.1.1 Forebyggende versus konsekvensreducerende tiltak

Mekanisk ventilasjon og røykkontroll er kategorisert som konsekvensreducerende tiltak i arbeidet med tunnelsikkerhet. Gehandler (2015) illustrerer funn som forklarer at 80 % av sikkerhetstiltakene, som er gjort for tunnelsikkerhet, handler om å redusere konsekvensene, til tross for at han mener at preventive tiltak er mer effektive. Respondentene erkjenner òg et skille mellom forebyggende og konsekvensreducerende tiltak. Videre blir betydningen av forebyggende tiltak som trafikantopplæring og vedlikehold av kjøretøy trukket frem. Likevel blir det påpekt av samtlige respondenter at et tunnelbrannscenario kan utvikle seg på ulike måter. De tiltakene som VTS og innsatspersonell kan gjøre for å påvirke konsekvensene, er å tilrettelegge for rask slukking og assistert redning. Blant annet blir det argumentert at tunneleier sitter igjen med *restrisiko* etter forebyggende tiltak, som gjør at hendelsen i seg selv aldri kan elimineres. Risikoen for tunnelbrann liten, men samtidig aktuell, slik at konsekvensreducerende sikkerhetsbarrierer må kunne iverksettes for å beskytte trafikantene.

6.1.2 Hva legger aktørene i tunnelsikkerhet?

For å forstå sikkerhetsfaktorer som inngår ved brann i tunnel, er det nødvendig å utdype tunnelsikkerhetsbegrepet. Begrepet *tunnelsikkerhet* er verken definert i «Håndbok N500» eller

Tunnelsikkerhetsforskriften, men kan tolkes på bakgrunn av forskriftens formål (Tunnelsikkerhetsforskriften, §1): «Formålet med forskriften er å sikre laveste tillatte sikkerhetsnivå for trafikanter i tunneler ved krav til å forebygge kritiske hendelser som kan sette menneskeliv, miljøet og tunnelanlegg i fare og til å sørge for vern i tilfelle av ulykker.» Tunnelsikkerhet kan med andre ord, ifølge regelverket, beskrives som tiltak for å forebygge kritiske hendelser som kan sette menneskeliv, miljø og tunnelanlegg i fare. Kritiske hendelser kan både tolkes som en utløsende hendelse, for eksempel brann i tunnel, men òg som konsekvensutfall, for eksempel tapte verdier. Å forebygge tapte verdier eller konsekvenser tilsvarer begrepet konsekvensreducerende tiltak i oppgaven.

I «Håndbok N500» blir tunnelsikkerhet nevnt spesifikt for tekniske tiltak. Respondentene i intervjuene vektla derimot tunnelsikkerhet som et helhetlig begrep. Både respondent R2, RS1, RS2 og RK splittet begrepet i to presiseringer, der den første presiseringen definerer tunnelsikkerhet som trafikantsikkerhet, og den andre omtaler tunnelsikkerhet som konstruksjonssikkerhet, brannsikkerhet eller barrieresikkerhet. Sistnevnte begreper beskriver tunnelsikkerhet som pålitelighet av de tekniske elementene. Alle respondentene vektla veiledning av trafikanter som en viktig del av tunnelsikkerhetsbegrepet. R2 utdypet videre at tunnelsikkerhet betyr å ivareta trafikanters trygge ferdsel, tilgang på rask hjelp og sikkerhetsutstyr ved behov. RS1 beskrev at god tunnelsikkerhet kan ivaretas med regler og rutiner. Respondent R11 omtalte òg tunnelsikkerhet som gode internkontrollrutiner. Fra beredskapsplanene blir tunnelsikkerhet vektlagt som et samvirkearbeid mellom tekniske innretninger og innsats, fra nødetater samt tunneleier. Røykkontroll kan illustreres som et slikt arbeid. I tunnelenes innsatskort blir røykkontroll og oppstart (eller bevisst nedstenging) av mekanisk ventilasjon ett av de første tiltakene som iverksettes etter at tunnelen stenges. Iverksetting av røykkontroll skjer ofte før trafikantene blir varslet om å evakuere, og det legges vekt på at røykkontroll kan utføres av både VTS og innsatsleder for brannvesen.

6.1.3 Nullvisjonen og selvredningsprinsippet

Trafikantsikkerhet er tungt vektlagt for Staten og SVV, og er utarbeidet med et overordnet mål, kalt nullvisjonen. Nullvisjonen er basert på regjeringens visjon om at det ingen skal bli drept, eller hardt skadd i trafikken. I St. Meld. 33 (Justis- og Beredskapsdepartementet, 2017) om nasjonal transportplan, er det videre satt hovedmål om å etterstrebe at alle transportulykker skal reduseres til det minimale. For å opprettholde målet, må alle involverte parter ha kjente forutsetninger og kunnskap om vegsystemet. Videre må tunneleier tilpasse et teknisk

sikkerhetssystem som kan bidra til sikker atferd, og tilrettelegge for trafikantenes handlinger og forutsetninger. Dette tilsier at alle har delt ansvar for trafikksikkerheten: både trafikanter, myndigheter, produsenter av kjøretøy, nødetater og andre aktører og interessenter (SVV, Politiet, Trygg Trafikk, Utdanningsdirektoratet, Kommunesektorens Organisasjon og Helsedirektoratet, 2018).

Selvredningsprinsippet henger sammen med trafikantenes ansvar om egenberedskap for å nå nullvisjonen. Ved brann eller ulykke er det forventet at alle i tunnelen skal evakuere og redde seg selv, enten med bil eller til fots, uten hjelp fra nødetater eller redningspersonell, uavhengig av hendelse (SVV, 2010). Selvredningsprinsippet er en viktig forutsetning for håndtering av tunnelulykker, og gjelder for alle norske vegtunneler. Prinsippet tar utgangspunkt i at alle trafikanter har evne til å motta informasjon og tolke signaler, som blir iverksatt ved tunnelbrann. I tunnelenes innsatskort ble det beskrevet at trafikanter skal få informasjon fra VTS om evakueringsmuligheter. Sterke stigninger og røyktetthet kan vanskeliggjøre evakuering og påvirke selvredning. Selvredning i ettløpstunneler kan skje enten ved å stoppe utenfor en stengt tunnel, ved å kjøre forbi brannen, ved å snu og kjøre ut eller ved å forlate bilen og gå til nærmeste utgang, eller evakueringsrom. Alle eksemplene, med unntak av å kjøre forbi brannen, ble nevnt i beredskapsplanene og innsatskortene for de utvalgte ettløpstunnelene. Det var forholdsvis lik forventning til evakuering uavhengig av brannscenarioene, men i risikoanalysene ble det vektlagt større risiko for trafikantene ved større brann i tunge kjøretøy eller ved farlig gods. Det har tidligere kommet frem at ikke alle er klar over hvilket ansvar trafikantene har for seg selv, at det kan være vanskelig for dem å forstå at det brenner, og hvor alvorlig eller raskt en tunnelbrann kan utvikle seg. SVV har derfor vinteren 2019/2020 iverksatt en ny kampanje for å informere trafikanter om trafikkatferd ved brann i tunnel (Solberg, 2019).

6.1.4 Hensikt med mekanisk ventilasjon

Hensikten med en sikkerhetsbarriere er basert på selvredningsprinsippet og nullvisjonen fra kapittel 3.1, om å ivareta trafikantenes sikkerhet. I nesten alle intervjuer ble det uoppfordret trukket frem *selvredning* som en av de viktigste hensiktene med sikkerhetsutrustning i tunnel på et generelt grunnlag. Senere vil det diskuteres om intensjon med mekanisk ventilasjon i utgangspunktet kan bistå med dette. RS2 var blant respondentene som forklarte hvordan hensikt med mekanisk ventilasjon har endret seg over tid. Han uttalte at «Tankegangen var å ventilere for å tilrettelegge for brannslukking og adkomst for brannvesenet. Evakuering var underordnet. Etter brannene var det snudd opp ned. Nå er det evakuering og redning som er viktigst,

brannslukking mindre aktuelt og kommer i andre rekke» (RS2). Dette kan beskrives som at mekanisk ventilasjon har to hensikter. Den første hensikten er å gi brannvesenet adgang til tunnelbrannen for å iverksette slukking. RB2 legger òg vekt på at brannslukking kan bistå til selvredning: «Det første fokuset vårt er å stanse brannen så raskt som mulig for å stoppe røykproduksjon, det skal gagne trafikanten» (RB2). RB1 formidlet at en fordel for brannvesenets slukkeinnsats er mindre skade på tunnelen, og for trafikkflyt, ved å begrense perioden med en stengt tunnel som følge av reparasjonstiden i etterkant. Han la òg vekt på at viftene er nødvendige for å slukke brannen. Den andre hensikten med tunnelventilasjon, var ifølge RS2 å ha en side av tunnelen med frisk luft der trafikantene kan forlate tunnelen ved evakuering, eller som R4 påpeker: «[Brannventilasjonen] skal òg føre oksygen inn i røyk for å bedre forholdene i røyken med oksygentilførsel til potensielt fangede trafikanter» (R4). RS2 utdypet hvordan holdningene har endret seg over tid:

Tidligere var det vurdert som det viktigste, å få brannvesenet fort inn og slukke. Men etter brannene vi har hatt siste tiden ser vi at det å slukke brannen ikke egentlig er så viktig. Det vi må fokusere på, det er evakuering. (RS2)

Samtidig kommer det frem fra kapittel 5 at mange ventilasjonsfilosofier i praksis omtaler røykkontroll som kritisk, med hensyn til slokningsarbeid. Ventilasjonsfilosofier og beslutninger blir nærmere beskrevet i tabellen på neste side.

6.1.5 Hovedfunn og oppsummering

Mekanisk ventilasjon som et tunnelsikkerhetstiltak kan være noe som skal ivareta tekniske krav, men på den andre siden òg kontrollere røyk for å fremme veiledning for selvredning. Sistnevnte faktor knyttes til bruk av utstyr og kommunikasjon mellom operatører, nødetater og trafikanter. Det kan derfor argumenteres for at mekanisk ventilasjon må forholde seg til en kombinasjon av trafikantsikkerhet og brannsikkerhet. Kunnskap om røykkontroll blir av respondentene rettfærdiggjort ved at den er essensiell for menneskelig atferd ved selvredning. Det bemerkes at forventningene til mekanisk ventilasjon har endret seg over tid, men at det i tunnelutvalget strides om hvorfor mekanisk ventilasjon utgjør en kritikalitet. I tabell 3 på neste side presenteres kritikaliteten som beslutningstakernes vektlegginger. Tabellen vil brukes videre, i forbindelse med dimensjonering og drift. Informasjonen er innhentet fra dokumentene i tunnelutvalget og koding av intervjuene. Den er med andre ord representativ for casene i kapittel 5.

Tabell 3 Beslutninger og prinsipper for ventilasjonssystemet i ulike faser av en brannhendelse

Tidslinje	Utviklings-fase	Normal-tilstand	Utløsende hendelse	Branntilstand			Etter hendelsen
Ulykkesfaser			Deteksjon og varslings	Evakuering	Bekjempelse	Redning	Normalisering
Hvem gjør beslutninger?	Tunneleier Prosjekterende aktører Nødetater	VTS	Automatikk VTS Trafikanter	VTS Innsatsleder Trafikanter	Innsatsleder	Innsatsleder Nødetater	Tunneleier Prosjekterende aktører Nødetater
Hva vektlegges av beslutnings-takerne?	Håndbøker Risikoanalyse Systemhelhet Funksjonalitet	Frisk luft uten høy konsentrasjon av farlige partikler	Informere om evakuering. Trippelvarslings til nødetater. Informasjon om kjøretøy og brannen.	Selvrednings-prinsippet. Hindre spredning av brannen, henholdsvis varme og røyk.	Brannvesenets tilgang til brannstedet. Hindre spredning av brannen, henholdsvis varme og røyk.	Søk og redning etter trafikanter i røyk Helsesjekk av trafikanter. Frakte skadede til legevakten.	Ny prosjektering og utvikling av ventilasjons-systemet SHT og rapporter etter hendelser
Hvilke styrings-prinsipper eksisterer?	Prosjektering av styrings-alternativer	Valg av trekk-retning. Naturlig vind, oppdrift og kjøretøyenes retning.	Automatisk oppstart eller nedstenging av vifter opp i en forutbestemt retning med en gitt hastighet.	Ventilasjon i en gitt retning med en gitt (eller ingen) hastighet.	Ventilasjonsanlegget bør ha kapasitet i henhold til brannens størrelse og tunnelplassering for å motvirke motstrømning av røyk. Brannvesenet bør «ha vinden i ryggen» ved innsats.	Få røyken raskest mulig ut fra tunnelen.	Tunnelen gjenåpnes for trafikk – effektiv opprydding og sjekking av systemene Læring etter hendelser
Usikkerhet	ÅDT Fremtidig trafikkbilde Interesse-konflikter	-	Manglende eller misvisende informasjon fra trafikanter eller utstyr. Teknisk svikt. Kommunikasjons-svikt.	Røykspredning. Valgt styringsprinsipp. Trafikanter forståelse av brann. Evakuering til fots eller med bil.	Røykspredning. Behovet for andre ressurser til å takle brannstørrelsen.	Antall trafikanter i tunnelen og toleranse for røykens giftige gasser. Helsetilstand til trafikantene og redningsinnsatsens egen sikkerhet	Påførte skader og psykisk belastning for trafikanter og mannskap. Materialskader.

6.2 Hvilke forutsetninger har prosjekterende aktører for dimensjonering av mekanisk ventilasjon?

Mekanisk ventilasjon kan sikkerhetsmessig påvirkes av hvilken funksjon ventilasjonen forsyner. Prosjekterende aktører har ansvar for å vurdere risikoforholdene og prosjektere sikre løsninger, som senere kan anvendes i styringsprinsippene. Dette forskningsspørsmålet vil derfor se på hva som ligger til grunn for valgte beslutninger for dimensjonering, i lengre ettløpstunneler og tunnelutvalget.

6.2.1 Et funksjonsbasert regelverk

Lovverkene nevnt i kapittel 2 om tunnelsikkerhet er i stor grad funksjonsbaserte. Det stilles med andre ord krav til et ferdig resultat med hensikt å fremme et gitt ytelsesnivå, som skal oppnås, blant annet gjennom ytelseskrav og risikovurderinger. Det kommer frem i notatene og planheftene, samt intervjuene, at tunnelene dimensjoneres med hensyn på håndbøkene. Videre argumenteres det for at sikkerheten er forsvarlig så lenge håndbøkene er fulgt. RS2 forklarer at Norge har de samme tunnelsikkerhetsforskriftene som resten av Europa, men at «Håndbok N500» bestemmer hovedsystemene i Norge. R4 påpeker at håndboken stiller høyere krav enn forskriftene. Det kan tolkes dit at så lenge minstekravene oppgitt i de sentrale dokumentene er innfridd, er tunnelforvalterne stort sett fornøyd. Minstekrav vil beskrive den skyvkraften som kreves med hensyn til tunnelenes utforming og dimensjonerende brannscenario.

Minimumskrav er en predefinert godkjent løsning. Så er det opptil hver enkelt om man vil legge lista høyere og har økonomi til å gjennomføre det eller ikke. Alt er stort sett dimensjonert etter håndbøkene, men tunnelene kan ha særtrekk der risikoanalysen òg kan legge føringer for valgt dimensjonering. (R1)

Tendensen for de utvalgte tunnelene er å følge veiledningene som er gitt ved tunnelens oppstart. Enkelte av tunnelene er likevel oppjustert, blant annet Skatestraumtunnelen, ved å overdimensjonere de nyere viftene som ble installert etter brannen i 2015, og Oslofjord- og Rennfasttunnelene som nylig har valgt et høyere dimensjonerende brannscenario enn håndbøkene krever. Respondent R2 forklarer «Hvis tunneleier ønsker å gå vekk ifra håndbok krav uavhengig av om kravene er bedre eller dårligere, må det søkes om et avvik.» R2 utdyper videre at dette avviket må argumenteres med en særskilt risikovurdering, og deretter godkjennes av Vegdirektoratet. Tunnelsikkerhetsforskriften krever risikoanalyser i tunneler som er lengre enn 500 meter, og spesielt for tunneler med bratt stigning. R4 forklarer risikoanalyser som gode

for å kartlegge hvilke ressurser man har i nærheten av tunnelen, og for å dimensjonere med lokale betingelser som utgangspunkt. «Har man stor kapasitet og profesjonalitet i brannvesenet er det ikke sikkert tunnelsikkerheten trenger å dimensjoneres opp i himmelen» (R4). Det blir òg påpekt at risikoanalysene kan involvere nødetater, brannvesen, politi og helse, slik at de med lokalkunnskap kan forklare hvordan det er ønskelig å håndtere situasjonene. «Påvirkningskraft ligger i risikoanalysen» (R2). En respondent fra brannvesenet påpeker òg at de har vært en pådriver for å gjennomføre risikoanalysene, og RB3 la til at «Dimensjonering må være basert på en grundig analyse av reelle risikoforhold som kan oppstå i tunnelen» (RB3).

De funksjonelle kravene i Tunnelsikkerhetsforskriften legger opp til en skjønnsbasert vurdering, der det er opptil tunneleier og prosjekterende å tolke reglene. Ved spørsmål om brannfilosofi i håndbøkene, blir det i intervjuene forklart at brannfilosofi ikke er oppgitt, og at det heller ikke står noe om det i veiledningene. R1 forklarer:

Vi har ikke noe annet. Så kan du godt si at det er mange andre ting som bør tas inn i håndboken som et dimensjoneringsgrunnlag, men per i dag har vi bare tunnelsikkerhetsforskriftene og håndbok å forholde oss til, og de sier egentlig ikke så mye om brannventilasjon, de sier en del om ventilasjon. (R1)

Det er likevel funnet operasjonelle krav om funksjonalitet og utførelse av styringssystemer i «Håndbok N500», deriblant spesifiserte krav for lufthastighet, kvalitet og dimensjonerende skyvkraft, som vist i kapittel 2. Den nyeste håndboken stiller faste rutiner for brannventilasjon, blant annet at røyken skal kontrolleres i naturlig trekkretning. Dette er ikke tilfelle i flere av de utvalgte tunnelene. Erfaring etter læring, i tillegg til egne løsninger, vektlegges mer av brannvesenet og tunnelforvalterne. Fordelen med håndbøkene og veiledningene, er at SVV kan sikre felles tilnærming til regelverket. Ulempen er at mye av det som står der ikke gjennomføres i praksis, og at ikke alle løsningene passer komplekse tunneler. I de fleste tilfeller stemmer strategianbefalingen heller ikke, med bakgrunn i at mange av Norges tunneler er eldre, og dermed ikke faller inn under de nye rettledningene. «[Det er en] svakhet at tunneler som blir bygd etter gamle håndbøker ikke møter dagens standard, men det er ikke et avvik.» (R3). Eldre tunneler har ikke samme krav om brannteknisk dimensjonering som dagens tunneler. R4 argumenterer for at sikkerheten kan ivaretas med tilstedeværende løsninger, så lenge risikoanalysene underbygger og rettferdiggjør hvorfor sikkerhetstiltakene er valgt. Den nye Tunnelsikkerhetsforskriften var likevel startskuddet for et nasjonalt prosjekt om oppgraderinger av alle riksveg-tunneler på over 500 meter, slik at tunneltilstandene er mer sammenfallende med nye dimensjoneringsvalg.

6.2.2 Tunnelenes dimensjoneringsbeslutninger

De gjennomgående forutsetningene for dimensjonering av ventilasjonssystemet er i tunnelutvalget beskrevet som et gitt brannscenario. Brannscenarioene er utarbeidet i tunnelenes risikoanalyse. Risikoanalysen er grunnlaget for å gjøre bevisste beslutninger, og definere hensikten med brannventilasjon (SVV, 2007). I tunnelutvalget skiller risikoanalysene mellom to typer brannscenarioer: brann i lette kjøretøy og i tunge kjøretøy. Flere av tunnelene vektlegger uhell med farlig gods som et potensielt brannscenario, men røykkontroll og dimensjonering av mekanisk ventilasjon blir ikke definert med hensyn til hva slags scenario som utspiller seg. I et utdrag fra risikoanalysen i beredskapsplanen til Eiksundtunnelen, står det et avsnitt om trusler for førsteinnsatspersonell der røyk, dårlig sikt og forgiftningsfare er representert. Det nevnes òg i situasjonsbeskrivelsen at dårlig sikt og røyk gjør det umulig for innsatspersonell å kjøre gjennom røykproppen, for å se etter innestengte biler. Risikoanalysen fra Godøy-tunnelen anser brann i tunge kjøretøy som høyrisiko, med begrunnelse for lang evakueringsvei for trafikanter. Samtidig blir ventilasjonssystemet kun nevnt i dimensjonering for brannslukking. Gudvanga- og Karmøy-tunnelen omtaler begge mekanisk ventilasjon som et tiltak for å redusere skadeomfang ved evakuering av personer truet av røyk og brann. Det blir ikke utdypet i dybden hvordan røykkontroll skal hjelpe, annet enn at ventilasjonsanlegget er montert, og kan styres av VTS. Det kan stilles spørsmål om dagens ventilasjonsanlegg er dimensjonert i henhold til ønskelig utfall om å bistå selvredning. Det kan virke som om det gjennomgående i dokumentene er mangel på bevisst dimensjonering relatert til selvredning og evakuering, i et sett av flere fare- og ulykkessituasjoner, blant annet brannens plassering.

Valg av dimensjonering er òg avhengig av åpningsåret til tunnelene. Det ble spesielt trukket frem i intervjuene at Eiksund- og Nordkapp-tunnelene er dimensjonert etter en gammel håndbok, og at det før ble lagt mer vekt på normaldrift enn skyvekraft ved brann. Det kan òg antas at på bakgrunn av at det ikke har skjedd alvorlige ulykker i tunnelene som kunne ødelagt større deler av tunnelens utrustning, har det vært tilstrekkelig med vedlikeholdsarbeid for å opprettholde funksjonaliteten til ventilasjonen. Viktige forutsetninger for ventilasjonssystemet er å kunne tilpasse seg dynamisk og raskt for å håndtere røyk. Det kan derfor argumenteres at flere av tunnelene kan oppgradere ventilasjonssystemet, med bakgrunn i at valg av drift eller respons har endret seg over tid. Oppgraderinger av ventilasjonssystemene gjennomføres i en prosessutviklingsfase. Denne fasen kan iverksettes proaktivt, ved ønske om å revurdere systemets ytelse, eller reaktivt, etter en hendelse, som blant annet skjedde med Gudvanga- og Skatestraum-tunnelene.

Likheten med tunnelenes viftesystem er valgt prinsipp om å plassere vifter i klynger for å forbedre jevn skyvkraft, og i par for å dekke hele tunnelens tverrsnitt. RS4 forklarte at beslutningen om å plassere viftesystemene i klynger er basert på elektrotekniske begrensninger og spenningsfall, ved at ventilatorene er sammenkoblet med kabler til et teknisk bygg, utarbeidet av innleide elektroingeniører.

6.2.3 Bratte tunneler er lite reflektert i det teoretiske rammeverket

Dokumentanalysen belyser hvordan de funksjonelle reglene har vært tolket av prosjektører og tunneleiere. De funksjonelle reglene er knyttet til konstruksjonssikkerhet, brannsikkerhet og driftssikkerhet. Det kan være fordelaktig at regelverket er funksjonsbasert, ved at det åpner opp for tolkninger og tilpasninger til enkelttunnelene. Ulempen er at kompleksiteten ved en bratt tunnel kan bagatelliseres, spesielt i forbindelse med driftssikkerhet og prosedyrer. Dokumentene viser hvordan det oppstår avvik fra dimensjoneringsregelverket i bratte tunneler. Risikoanalysene reflekterer hvordan aktørene har en risikobasert tilnærming, ved å inkludere tidligere hendelser og trekke frem lokale variasjoner. En av de store avvikene mellom de standardiserte prosedyrene oppgitt i «Håndbok N500» og tunnelenes valg av utforming, er blant annet dimensjonerende skyvkraft. I håndboken står det oppgitt at minimumshastighet for tunneler under 2 % stigning skal være 3,0 m/s. Det blir videre gitt at «Ved stigning over 2 % skal nødvendig lufthastighet beregnes» (SVV, 2020, s. 60), uten videre føringer for hvordan. R4 forklarer hvordan avvikene kan forstås:

Kapasiteten har mye å si for hvilke valg man har ved brann. I forhold til nye tunneler kommer brannvesenet med anbefaling på hvordan vi skal programmere ventilasjonen. Ventilasjonen dimensjoneres for å ta opp til 7 m/s. Det er mange tunneler som ikke har så stor kapasitet, på grunn av stigning og så videre. Det er mange forhold som spiller inn i forhold til dimensjonering. De gamle ventilatorene har ikke den samme krafta som de nye. (R4)

Dimensjonerende skyvkraft må kunne motvirke oppdrift ved brattest stigning, samt normal trafikkretning oppover. Samtidig kan det argumenteres for at det er gunstig å ventilere oppover mot tunnelutgangen, noe som blir beskrevet i kapittel 6.3.

«Usikkerhet med tanke på oppdrift må inngå i dimensjoneringskriteriene. Alt inngår i standardiserte kriterier for dimensjonering av tunnelen» (RK). Med andre ord må stedlige betingelser påvirke valg av dimensjonering. Det står spesifisert at tunneler skal bygges med

maksimalt 5 % stigning, og at sikkerheten må forbedres dersom stigningen blir over 3 % (SVV, 2020, s. 16). I dokumentet om brannventilasjon i Rennfast forklares det òg at termisk trykkmotstand kan variere, slik at ytelsen for brannventilasjon må være større ved en varm sommerdag for å hindre et motstrømmingssjikt. RS4 la vekt på meteorologiske endringer, spesielt ved lengre tunneler som Gudvangatunnelen. Klimatiske endringer kan variere stort gjennom døgnet, med både kulde og varme i dalen relativt til klimaet utenfor, samt naturlig vindretning som snur på ettermiddagen. R4 trekker inn risikovurdering som et viktigere mål enn å utvikle et felles teoretisk rammeverk. «Jeg synes det er viktig at vi må komme oss til et nivå hvor ting er godt nok. Vi lager en haug med håndbøker, men virkeligheten er annerledes.» Viktige størrelser for dimensjonering av bratte tunneler kan reflekteres i tunnelgeometri, evakuering ved potensielle brannscenarier og hvilke prosedyrer som er gjennomførbare for innsats.

6.2.4 Hovedfunn og oppsummering

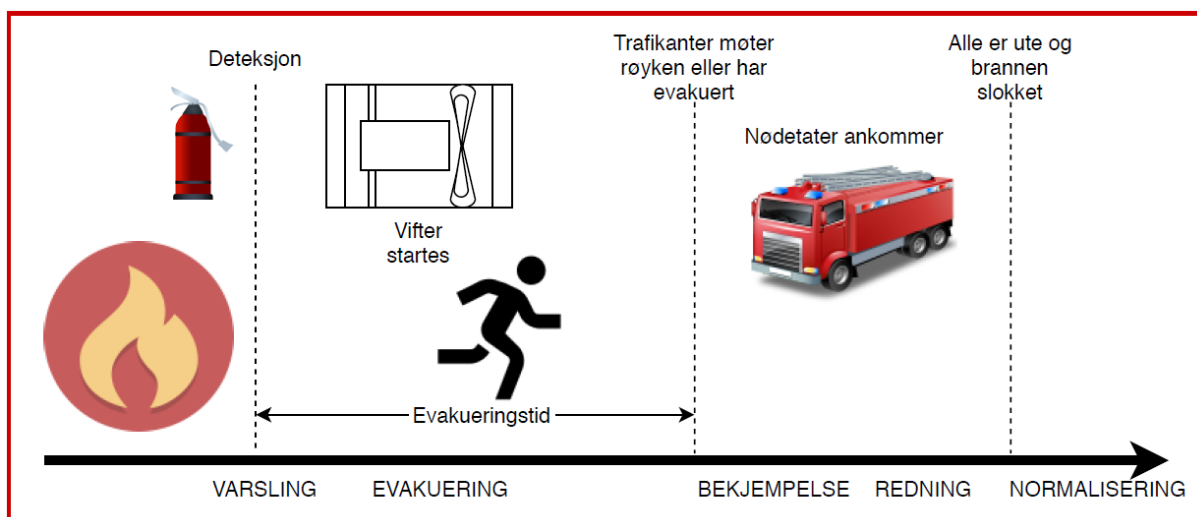
Oppgaven avdekker dimensjonering for ti utvalgte tunneler. Vegdirektoratets valg om å levere et funksjonsbasert regelverk er til dels tatt godt imot av tunnelforvalterne, men det påvirkes av subjektive vurderinger. Til syvende og sist vil ventilasjonsberegninger og risikoanalyser ligge til grunn for valg av dimensjonering, noe som i praksis gjør at tunnelforvalter, innleide konsulenter og lokalt innsatspersonell må utføre et samvirke i prosjekteringsarbeidet. Beslutningene for dimensjonering blir vurdert basert på hva som er standarder og krav, men òg i henhold til tilpasninger gjort i hver case. De prosjekterende aktørene må ta utgangspunkt i lokale variasjoner, tunnelens utforming, samt forventning om risiko for brannscenarier for å gjennomføre en overveiet beslutning. Erfaringer kan gi større beslutningsgrunnlag og forutsetninger for mekanisk ventilasjon, ved at tidligere hendelser «tvinger» systemet tilbake i en systemutviklingsfase, og gir tunnelforvalterne behov for å vurdere sikkerhetstiltakene på nytt. Mange av forventningene til akseptabel dimensjonering er knyttet til kjennskap, og opplevelser av tidligere hendelser. Definerte fare- og ulykkessituasjoner er lite beskrevet med hensyn til funksjonaliteten av mekanisk ventilasjon, og brannscenariene forklarer ikke hvordan dimensjonerende brannventilasjon kan ha ulike betingelser i de ulike tunnelene.

6.3 Hvordan driftes mekanisk ventilasjon i en branntilstand?

Forskningsspørsmålet ønsker å se på styringsforholdene som en naturlig del av sikkerhetsstyringsperspektivet ved brann. Det blir lagt vekt på hvilke styringsprinsipper som er etablert i de utvalgte tunnelene, fordeler og ulemper ved ulik drift, samt hvordan hensikten for tunnelventilasjon kan endre seg i ulykkesfasene. Til slutt redegjøres det for hvilken innflytelse mekanisk ventilasjon har på hendelsesutfallet. Forskningsspørsmålet bistår problemstillingen ved å utdype hvilke styringsmuligheter som anvendes.

6.3.1 Tidslinje for en brannulykke

For å illustrere etablert innsats, vil det bli presentert en tidslinje for generelle brannulykker nedenfor. Tidslinjen har tatt utgangspunkt i alminnelige beredskapsfaser tilpasset brann, med grunnlag i Aven m.fl. (2004).



Figur 27 Simplifisert brannforløp som funksjon av tid

Respondentene forklarte at ved branntilløp vil kjøretøyet stoppe raskt. Operatørene på VTS detekterer hendelsen og iverksetter en brannplan, stenger tunnelen, informerer trafikanter og starter opp ventilasjonen. Dette samsvarer med Leveson (2011) sine fire handlinger for å iverksette en barriere. Ifølge respondent RV er røykdeteksjon mest effektivt for å oppdage brann, men deteksjon og iverksetting kan òg skje automatisk, ved at trafikanten løsner et brannslukningsapparat. Etter en viss tid vil brannen utvikle seg frem til alt brennbart materiale har tatt fyr. «Av erfaring tar det cirka 5-6 minutter fra brannen er oppdaget til kjøretøyet er overtent [...] Jo større kjøretøy, jo raskere produksjon av røyk» (RV). Ved deteksjon skal det trippelvarsles til nærliggende nødteater, og trafikantene blir informert om evakueringsmuligheter. Evakueringstiden kan defineres fra tiden trafikantene får beskjed om å

evakuere, til det ikke lengre er tilrettelagt for evakuering, for eksempel ved at røyken forhindrer oversikt i tunnelen, og trafikantene blir tvunget til å stå i ro. Når nødetatene ankommer tunnelen vil de starte med brannslukking, dersom dette er tilrettelagt av røykkontroll. «Der det er kort utrykningstid for brannvesenet, har du også større mulighet for å slokke brannen. Hvis du kommer innen 10 minutter, kan det være brannvesenet kan slå ned brannen og redusere skaden» (RS2). Ventilasjonen kan gi tilgang til brannstedet fra den ene tunnelsiden, ved å ventilere røyken andre vei. RB1 og RB2 oppgir begge at redning ikke utføres før brannen er tilnærmet slokket, og røykdykkere og brannvesenet trygt kan ferdes i tunnelen. Brigadesjefen oppgir «Det kan godt være vi kjører videre med varmesøkende kamera i sikre omgivelser, og driver søk og redning. Da er vi avhengige av at ventilasjonen trykker på for å tømme tunnelen for røyk. Den filosofien har vi i forhold til søk og redning» (RB2). Han legger videre et ønske om at trafikantene klarer å evakuere så raskt som mulig i samarbeid med VTS. «Hvis ikke blir det å slå ned brannen så raskt som mulig, få ned skadestedet og drive søk og redning så fort som mulig på en forsvarlig måte» (RB2).

Valg av ventilasjon kan variere før og etter evakuering. I kapittel 6.1 ble ventilasjonens kritikalitet beskrevet som en funksjon av hvilken hendelsesrespons det var ønskelig å påvirke. I tabell 3 på side 81, varierte ventilasjonsprinsippene i ulike faser. Videre vil det beskrives hvilke styringsprinsipper som kan oppstå basert på ulike brannscenarier.

6.3.2 Styringsprinsipper

Den komparative analysen viser variasjoner i valgte styringsprinsipper. Styringsprinsippene kan beskrives som beslutninger om røykkontroll gjort med hensyn på (1) ventilasjonsretning, (2) ventilasjonshastighet og (3) tidspunkt for oppstart av brannventilasjon. RS1 forklarer at de valgte styringsprinsippene kan bli besluttet med grunnlag i stedlige betingelser og erfaringer som tidligere har vært vellykket, ved at det tilfeldigvis ga et gunstig utfall forrige gang. Det ble intervjuet fire ulike brannvernledere, som alle ga ulike argumenter for hvorfor styringsprinsippene var formulert og utarbeidet som de var.

Den største likheten i tunnelutvalget, og den variabelen som òg har færrest valgmuligheter, er valgt ventilasjonsretning. Nesten hele tunnelutvalget ventilerer i fast retning, basert på brannplanen. De fleste tunnelene har fast ventilasjonsretning én vei uavhengig av brannens plassering i tunnel, med bakgrunn i hvor innsatsstyrken var lokalisert. Andre tunneler har innført, eller vurderer å innføre, et prinsipp med fast ventilasjonsretning ut den korteste vei fra tunnelens nullpunkt, eller som planene til Karmøy-tunnelen ble formulert: «ventilasjon

oppover». Ved denne ventilasjonsretningen må brannscenarioene beskrives for å gi et fullstendig risikobilde. Risikovurderingen til Proactima, ved oppgradering av Rennfasttunnelene, vurderte denne ventilasjonsretningen, og konkluderte med at ventilasjonsfilosofien kan medføre at færre trafikanter eksponeres for røyk ved brann i et kjøretøy nedadgående i tunnelene. Filosofien ga mindre konsekvensreduseringer i midten av tunnelen, eller i oppadgående retning. Gudvangatunnelen og Bømlafjordtunnelen kan skilte med valgt ventilasjonsretning som følger naturlig trekkretning ved brannens tilløp. R4 argumenterte for at det er lurt å følge naturlig trekkretning for å unngå et uheldig utfall, der motarbeidende trykk kan medføre røyklommer, dersom brannventilasjonen bruker for lang tid på å opparbeide seg nok kraft for å snu det naturlige trekket. RS2 uttrykte at naturlig vind i kombinasjon med stigning òg er en viktig faktor. I bratte tunneler vil oppdriften kreve at viftene trenger økt kapasitet for å eventuelt kontrollere røyk nedover ved en fast retning, og at ventilasjonsretning dermed bør ta hensyn på termisk oppdrift.

Ventilasjons hastighet varierte stort mellom minimumshastigheter på 1-3 m/s (3-10 km/t), som er tilsvarende anbefalt trekkhastighet i «Håndbok N500» (kapittel 2.2.2), og opp til maksimale hastigheter på 7 m/s (25 km/t). I beredskapsplanene var det sjelden tallfestet ventilasjons hastighet. I stedet ble det brukt prosentvis kapasitet av viftenes skyvkraft, for eksempel ved at viftene skulle «gå 50 %» (RB1). Det kan antas at fordelene med prosentvis skyvkraft er for å forenkle den tekniske styringen av viftene, med bakgrunn i hva som blir observert av hendelsen hos VTS og nødetatene. RS3 påpekte i intervjuet at det kan ta noe tid før ventilasjonssystemet kan skape jevn luftstrøm. Dette kan antas å medføre usikkerhet i målte vindhastigheter. RS2 forklarte gitt ventilasjons hastighet med at «God drift er liten ventilasjon, der du har et minimum slik at hvis du er på feil side, kan du gå ut før røyken når deg igjen» (RS2). Han påpekte òg at ventilasjon har negativ effekt ved å gi større brann, dersom oksygentilførselen er god. «Det står i en anbefaling at 1-2 meter per sekund kan være et passelig nivå ved evakuering. Men vi vet at mange tunneler har beredskapsplan der det står full ventilasjon, og det er feil» (RS2). RV motargumenterer og forklarer at mekanisk ventilasjon kan tilføre brannen mer energi, men òg tynne ut røyken som kan øke overlevelsesmulighetene, dersom trafikantene blir fanget i røyk.

Det er ønskelig at trafikantene skal evakuere innen røyken har nådd dem. Hvis røykventilasjonen beveger seg opp mot 7 m/s, er det selvfølgelig at det ikke tar lang tid før røyken når trafikantene. Derfor har det oppstått et styringsprinsipp på Østlandet der VTS stenger ventilasjonen en gitt tid, før den igjen blir igangsatt. RV uttaler at det er viktig å ha gode

rutiner og varsle trafikantene, slik at de har god tid. «Derfor mener jeg at å holde igjen ventilasjon kan være viktig. Video viser ofte at det tar tid før den er overtent, og at man bør holde røyken mest mulig i ro frem til alle har snudd» (RV). RB1 forklarer at VTS ofte ikke ønsker å sette på viftene før alle er i sikkerhet, men at brannvesenet ønsker å starte viftene så raskt som mulig for å ha en høy hastighet på røyken. «Vi kan ikke kjøre i røykfylt miljø med brannbil. Vi ønsker å få trykk på røyken slik at vi kan komme oss helt frem til ulykkesstedet» (RB1). RK er enig med RB1 og sier: «Når skal vi starte ventilasjonen? Mest fornuftig er så fort som mulig, da blir røyken minst giftig.» Han mener at renere forbrenning og fortykning er mest gunstig, og sier «Skal man varme opp luften krever det energi. Man får ikke så stor økning i forbrenningen som oppvarmning av luft tilsier, og man får tynnet ut gassene» (RK). Han referer til at energimengden som kreves for å holde på temperaturen er større enn energimengden som øker ved tilførsel av ekstra oksygen. Det er tydelig uenighet om det er larest å starte brannventilasjonen umiddelbart ved oppdagelse, for å gjøre røyken mindre forurenset og tilrettelegge for slokking og redning, eller utsette oppstart for å gi trafikantene mer tid før røyken spres. Godøytunnelen og Oslofjordtunnelen venter begge med å starte opp brannventilasjon. Rennfast-, Bømlafjord-, Eiksund-, Karmøy-, og Nordkapp-tunnelene har automatisk oppstart av ventilasjon, i mange tilfeller med alle viftene. Videre blir det sett på hvorfor betingelsene og prinsippene er ulike.

6.3.3 Bevissthet om funksjonell styring

I tabell 3 kom det frem at styringsprinsipper for ventilasjon er avhengig av hvilken beslutningsstøtte som fremkommer i de ulike fasene, ved tunnelbrann. Respondentene ga gjennomtenkte svar om ønsket ventilasjonsfilosofi, men de vektla ulike betingelser og forventninger om hvordan mekanisk ventilasjon opptrådte som et hjelpemiddel. Det var samtidig usikkerhet om ventilasjonsstyringens virkemåter ved reelle hendelser. Funksjonell styring handler om å styre ventilasjonen etter forventning om hvilken verdi den tilfører et overordnet system. Disse systembetingelsene kan endre seg i ulike faser, og basert på disse fasene eller verdiene, gi ulike bevisstheter om hvordan det er mest hensiktsmessig å kontrollere røyken. Ventilasjonsstrategien kan tilrettelegges basert på hvem i tunnelen røykkontroll skal bistå. Skal anlegget bistå brannvesen eller trafikanter? Kan prosessmodellen skifte strategi raskt? Valgt ventilasjonsretning kan gi forutsigbarhet både for trafikanter og redningsinnsats, men er òg avhengig av noe som kan kategoriseres som stedlige betingelser.

Med stedlige betingelser menes lokale forutsetninger som påvirker valgt sikkerhetsstyring. Stedlige betingelser kan reflektere tunnelenes geografiske plassering, både med hensyn til terreng i området, samt tilkomst av nødetater. R1 og R3 mente at det er viktig å se tunneler som et helhetsperspektiv, som inkluderer området utenfor tunnelen. Blant annet Oslofjordtunnelen og Rennfasttunnelene befinner seg i geografiske områder med mye flatt terreng, noe som gjør at kjøretøyet ikke eksponeres for varme eller overanstrenger motoren og bremsene, før tunnelene blir den store prøvelsen. Dette kan gjøre at forekomsten av ulykker øker, som følge av plutselig bratte bakker. Samtidig kan områder med mange bakker og slite på motoren i tunge kjøretøy, og tunnelen kan være det avgjørende utfallet. Rushtrafikk og vindretning er og stedlige betingelser som må tas hensyn til. Når vinden står tilnærmet i ro, kan normaldrift lage en ønsket trekkretning.

En annen stedlig betingelse er tunnelenes tilgang på nødetater. Nordkapptunnelen og Gudvangatunnelen har lang innsatstid for brann- og redningsvesen, noe som kan medføre at tidslinjen for et brannforløp endrer seg betraktelig. R1 uttrykker «Alle [tunneler] er litt forskjellige, alle har sine særtrekk, alle har sine brannvesen, sine beliggenheter. Det å lage en overordnet brannfilosofi, kan være godt, men behøver ikke å være det. Det er mange avvik fra normalen for å tilpasse [strategiene], hvis du skal begynne å gjøre det beste for hver tunnel» (R1). R1 beskriver hvordan brannfilosofiene er ulike i tunnelutvalget. Stedlige betingelser påvirker hvilken lokalkunnskap som ligger til grunn i valgte beslutningsstrategier, og dermed og hvilken ventilasjonsstyring som kan være mest gunstig.

6.3.4 Situasjonsbetinget drift og operatørens rolle

Det kom frem at funksjonell styring av ventilasjonssystemet kan gjennomføres ved bruk av situasjonsbetinget drift fremfor et fast styringsprinsipp. Slik kan potensielt færre trafikanter bli utsatt for røyk, men situasjonsbetinget drift kan og medføre problematikk når det gjelder valg av risiko. Forenklet kan situasjonsbasert drift gjennomføres med utgangspunkt i hvor det skjer en hendelse, og deretter ha fokus på viftebruk basert på type og plassering av brannen. Potensialet ble fremmet som en løsning for tunneler med vanskeligheter for å lage en fast rutine for alle situasjoner. RV forklarte at det ideelle for tunnelene vil være faste planer, men at operatørene kan beslutte endring av drift dersom de har rett situasjonsforståelse, samt nok kunnskap til å overstyre brannen og gripe inn med andre tiltak. RS2 argumenterer for at situasjonsbetinget drift kun kan gjennomføres, dersom det forekommer god kommunikasjon mellom VTS og brannvesenet. Han utdyper:

Det er viktig at brannvesenet forstår at vi [operatørene] har mulighet til å styre røyk i begge retninger. Tidligere var innstillingen å starte ventilasjon, kjøre på og håpe at det går bra. I etterkant har vi sett at vi må inn og styre mye mer nøyaktig enn det som har vært gjort tidligere (RS2).

Han forklarer videre om potensialet ved utviklingen for situasjonsbetinget drift: «Det er en helt ny måte å tenke på i forhold til tidligere – når du kan se ting har du òg mulighet til å styre» (RS2). Operatøren kan styre prosessen ved å systematisere den pågående informasjonen, og avdekke usikkerhetslementer som ikke passer. Deretter kan operatøren iverksette tiltak for å påvirke og styre usikkerhet, i henhold til Flin m.fl. (2008) sin intuitive eller risikobaserte beslutningstakingsprosess. Det krever at operatøren utnytter kunnskapen sin og bruker erfaringer. RS2 påpeker at tilgang på utstyr og videoovervåking i større grad bør brukes som et middel for å vurdere ventilasjonsstyring og fravike originalplaner. Operatøren har ansvar for å identifisere kritiske faktorer og videreføre denne informasjonen, både til seg selv og innsatslederen, slik at de kan styre mekanismene. Da er det viktig at alle beslutningstakerne har felles tilnærminger, slik at den kontrollerte prosessen ikke får motstridende signaler.

Det ble samtidig lagt vekt på stor fare for menneskelig svikt, blant annet av R2 som uttalte at forhåndsbestemte prinsipløsninger reduserer sannsynligheten for nettopp dette.

Det er begrenset hvor mye man kan forvente av operatørene som skal ha oversikt over alle tunneler i regionen, noe som gjør automatikk mer viktig. VTS har mye å sette seg inn i og huske på, hvis hver tunnel hadde hatt sin egen spesielle løsning på valg av prinsipper. (R2)

Med automatikk menes de styringssystemene som ligger innebygget fra før av. Ved brannen i Gudvangatunnelen i 2015 tok det 8 minutter fra den automatiske brannventilasjonen var startet, til operatøren på VTS oppdaget dette og kunne iverksette andre tiltak (SHT, 2016b). Det er rimelig å anta at det er mer sannsynlig å gjøre feil hvis kommunikasjonen ikke er effektiv. Det krever mye av trafikkoperatøren å gjøre beslutninger med potensielt store konsekvenser, og det ligger enormt etisk ansvar til grunn for de risikobaserte beslutningene. Funksjonell styring må med andre ord ses i sammenheng med hva som er gjennomførbart, og hvilke utfordringer som kan oppstå.

Respondent RK anbefaler at operatøren ikke handler intuitivt som en beslutningstaker, men bør forholde seg til regelbaserte beslutninger. «Når reglene følges havner det tilbake på meg som konsulent. Da har det vært gjennom lange vurderinger og diskusjoner med fagfolk.

Kvalitetssikring og vurdering fra folk som kan det» (RK). R2 la òg vekt på at det er de menneskelige og styringstekniske faktorene som svikter, med forbehold om at det ikke er gitt at hendelsen skjer alene, samtidig som det blir referert til Murphys lov om at ting kan gå galt ved gitt mulighet, uavhengig av situasjonen.

6.3.5 Ventilasjonsretningsdilemmaet

Mange av brannplanene i de utvalgte tunnelene skal styre røyken i fast retning, samtidig som de nye symmetriske ventilatorene prosjekteres med mål om å være reversible, for å sende røyken mest gunstige retning. Ifølge R2 kan symmetriske ventilatorer gi viftekapasitet for å føre røyken korteste vei ut av tunnelen. Et av argumentene er at operatørene ikke tilrettelegger optimalt for selvredning dersom brann og røyk føres lengst vei mot potensielt flest trafikanter. R3 utdyper at for å ha en strategi der ventileringen styres i begge retninger, må innsats òg kunne skje fra begge retninger. RB2 forklarer innsatsmulighetene: «Vi har brannvesen på hver side [av tunnelen], men det betinger at de [andre brannvesen] har rette type utstyr» (RB2). På seminaret for tunneler ble det lagt vekt på nødetatenes innsats ved tunnelåpningene. Det ble spesielt påpekt at nødetatene må forvente å mobilisere fra begge sider av tunnelen, ettersom brannvesenets tilgang fra den ene siden gjør at det kan komme potensielt skadede eller desorienterte trafikanter, samt medier og journalister, på den andre siden. Dette krever politiets og ambulansens tilstedeværelse.

Reversible ventilatorer kan òg være tilpasset naturlig trekkretning, som symboliserer gitt brannretning, besluttet i prosjektering og revidering av beredskapsplan, som nevnt i 6.3.3. Etter brannen i Gudvangatunnelen, uttalte SHT følgende:

Ventilasjonen fungerte som forutsatt for innsatsmannskapene. De hadde fri sikt til brannstedet og kunne iverksette slokking som planlagt. Det er imidlertid stilt spørsmål ved hvorvidt brannsjefen burde ha valgt å snu ventilasjonsretningen da han oppdaget hvor brannen var. DSB mener avgjørelsen om å beholde ventilasjonsretningen slik beredskapsplanen beskriver, var i tråd med gjeldende veiledninger og anbefalinger. En viktig funksjon av brannventilasjon er ifølge DSBs vurderinger å fortynne røyken gjennom tilførsel av friskluft. Dette vil lette selvredning. De mener imidlertid at høyere ventilasjonshastighet ville resultert i at røykproppen hadde beveget seg raskere, og ville vært ute av tunnelen på om lag halve tiden (SHT, 2015, s. 45)

En mulighet ved symmetriske ventilatorer, er valget om å snu ventilasjonsretning ved brann. «Det er lett å se i etterpåklokskap hva som var gjort feil, men akkurat i det det brenner er det ikke lett å se hva som er rett eller feil» (RS2). Respondenten snakker om valgmuligheter for å tilpasse selvredning, som òg SHT nevnte. R1 uttrykker ved snakk om ventilasjonsretning ved slokking: «Det sier seg selv at da står kanskje ikke selvberging i fokus, da står kanskje slokking i fokus» (R1). Ved å snu ventilasjonsretningen kan operatøren øke risikonivået for trafikanter som har valgt å evakuere, dersom de blir fanget i en røykpropp. Tidligere hendelser, blant annet etter brannen i Gudvangatunnelen, har likevel vist at trafikantene kan bli fanget selv uten at ventilasjonsretningen endres, og at en beslutning om å snu ventilasjonsretning eventuelt må skje tidlig. RS1 forklarer at det er en ulempe å skifte retning, fordi det er mye treghet i store mengder luft, noe som forlenger tiden før ventilasjonen er effektiv. Han mener kunnskapsinnhenting er svært viktig i tidlig fase, for å kunne gjøre denne beslutningen. RS2 stiller seg skeptisk til å snu retning og begrunner med at:

Evakuering skal skje sikkert. Vi skal ikke snu trekken og sende røyken etter folk som rømmer ut. Det er antatt at folk vil se hvilken vei røyken går idet brannen starter. Da vil de oppfatte én side som sikker og den andre som farlig. (RS2)

RB1 eksemplifiserer at det kan ta lang tid å snu ventilasjonen, og at røyken i løpet av denne tiden vil spres i alle retninger. På seminaret ble det nevnt at eksempelvis Bømlafjordtunnelen kan forvente å inneholde cirka 500 tonn med luft. Det kommer òg frem av teorikapittelet at å snu ventilasjonsretningen, eller utsette oppstart av ventilasjon, vil gjøre at røyken presses tilbake over brannen, og kan derfor få forhøyet konsentrasjon av giftige gasser og ufullstendig forbrenning. RS3 påstår at det kan være farlig å styre ventilasjonen feil. Dette er òg preget av usikkerhet. I dokumentet «Sikkerhetstiltak for Oslofjordtunnelen», ble det gjennomført en sammenligning av brann basert på ventilasjonsprinsippene og kjøretøyets last. Her argumenteres det for hvorfor beslutningen om å snu ventilasjonsretningen kan være hensiktsmessig: «Ventilasjonsretning vil redusere brannspredning ved å føre varm røyk og flammer fra motorrommet fremover og vekk fra kjøretøyet, og eventuelle kjøretøyer bakover i tunnelen». RB1 forklarer at erfaringsmessig, hvis det tar fyr i motorrommet, vil det være fordelaktig å styre røyk med vogntogets kjøreretning for å få flammer og varme vekk fra potensiell farlig last, eller motsatt ved brann i lasterommet. Slik kan ventilasjon forhindre spredning av brann i kjøretøyet, noe som reflekteres i SHT (2018) sin rapport etter brannen i Oslofjordtunnelen 2017.

6.3.6 Utfordringer ved drift av bratte tunneler

I kapittel 3 ble det utdypet hvordan mekanisk ventilasjon påvirker utfall av røyk og brann. I et dokument angående ventilasjonshastighet for Rennfasttunnelene ble det referert til en branntest i Runehamartunnelen. Det ble gjennomgått konklusjoner om at trekk på 3 m/s gir lavere røyktemperatur, men at samme trekk kan føre til rask brannutvikling og større fare for overtenning, før brannvesenet kommer frem til tunnelen. Samtidig påpekte respondent R1 at grunnventilasjon av erfaring på 2 m/s vil være altfor lite og medføre et motstrømmingssjikt, med hastighet som trafikantene ikke kan gå fra i de bratte tunnelene. Den nedlagte forskningstunnelen, Runehamartunnelen, er heller ikke like bratt som Rennfasttunnelene, nærmere 1 % stigning, noe som kan ligge i grunn for avviket.

Respondent RV la vekt på at det ikke står noe om når man skal starte brannventilasjonen, og at det derfor må forventes at store luftmengder må flyttes på, noe som tar tid og krefter for ventilasjonssystemet. RK fremlegger problematikk om at det heller ikke alltid er gjennomførbart å blåse røyk nedover ved kraftig brann, fordi trykket blir for stort for raskt. «[Vi] må ta innover oss at bratte tunneler har helt andre forutsetninger å jobbe under, spesielt med tanke på termiske krefter. Termodynamikken har større bidrag for utvikling av brannens spredning, både fordi væske kan renne nedover og gass går oppover.» (R1). Det blir blant annet referert til bensinbrannen i Skatestraumtunnelen, der brannen utfoldet seg over et stort areal med bensin som rant nedover tunnellopet, og røyken som trakk oppstrøms.

I undersjøiske tunneler vil det merkbare trykkfallet være mellom tunnelens lavpunkt og tunnelåpningen. Trykkbidraget fra oppdriftskreftene, som forklart i 3.4.3, kan både motvirke og hjelpe skyvekraftsbehovet, basert på hvilken vei røyken styres. RK anbefalte ikke å bremse oppdriftskreftene på grunn av den ufullstendige forbrenningen som kan skje. R3 la òg vekt på at kjøleeffekten kan akselereres ved å ventilere røyk, og at sikten forsvinner når røyken faller i terrenget. Denne risikoen kan øke ved bratt stigning som følge av at det allerede er et gitt trykk, som frakter røyken oppover i tunnelen uavhengig av ventilasjon.

6.3.7 Hovedfunn og oppsummering

Det er funnet flere prinsipper for hvordan drift kan pågå i ulike faser av en tunnelbrann. I disse fasene vektlegges ulike verdier, men det er mye usikkerhet i respondentenes vurderinger og prediksjoner for potensielle utfall. Røyken kan styres med termisk oppdrift av hensyn til innsatsretning eller med naturlig trekkretning. Nødetater bør møte ved begge tunnelåpninger,

uavhengig av prinsipp. Det kom frem i analysene at innsatstid påvirker mulighet for redning, noe som øker viktigheten av ventilasjon for evakuering. Videre ble det lagt vekt på stedlige betingelser som avgjørende faktorer for å ivareta funksjonaliteten til ventilasjonssystemet. Stedlige betingelser er nødvendig kunnskap for at operatøren skal gjøre intuitive beslutninger. Bratte tunneler skaper utfordringer for røykkontroll, og er en viktig variabel ved funksjonell styring av mekanisk ventilasjon.

6.4 Hvilke usikkerheter kan påvirke sikkerhetsstyring ved brann i tunnel?

Forskningsspørsmålet identifiserer hvilke usikkerheter i sikkerhetsstyringsarbeidet, som kan forhindre eller komplisere responsen for røykkontroll. Usikkerhetene kan gi indikasjon om forventninger i forbindelse med den utløsende hendelsen og branntilstandsfasen fra tabell 3, for de komparative casene. Forskningsspørsmålet bidrar til å reflektere om hvorfor mekanisk ventilasjon er anvendt slik som den er, og hvilke andre faktorer som kan påvirke det kunnskapsbaserte usikkerhetsperspektivet. Usikkerhetselementer kan både være interne med endringer i funksjonelle krav, teknisk usikkerhet eller eksterne med hendelsesusikkerhet og kommunikasjon.

6.4.1 Usikkerhet i forbindelse med beslutninger på bakgrunn av innhentet informasjon

Røykkontroll er tidligere klassifisert som en barrierefunksjon, med andre ord en medvirkende risikoreduserende faktor i sikkerhetsstyring. Sløyfediagrammet i figur 6 på side 22 forklarer dette med at anlegget er en del av et helhetlig sikkerhetsbilde. Prosessmodellen i figur 2 på side 11 illustrerer ventilasjonssystemets avhengighet av andre objekter i tunnelen. Det kommer frem i intervjuene at ventilasjon alene ikke kan tilrettelegge for selvredning, men kan brukes som et verktøy sammen med andre barrierer. RS3 trekker frem tilleggsinformasjon som en viktig del av styringsprosessen, og mener at røykkontroll kun er en kritisk faktor når beslutningstakerne har innsikt i tunnelen. Røykventilasjon er med andre ord avhengig av at operatørene og nødetatene mottar direkte informasjon underveis. I forbindelse med brannfasene kan det trekkes frem flere usikkerhetselementer i de komparative casene. I Gudvangatunnelens første alvorlige brann, ble det konkludert med at konsekvensutfallet ville blitt svært annerledes, dersom styring av røyk hadde tatt hensyn til hvor trafikanter befant seg i tunnelen. I SHT sin rapport ble det

forsvart at operatørene fikk innhentet lite informasjon før nødetatene kom på plass. Oslofjordtunnelen tilpasser oppstart av mekanisk ventilasjon, på bakgrunn av nåværende situasjonsbilde. Korrekthet av informasjon blir med andre ord både viktig, men kan òg medføre usikkerheter.

Det kan for så vidt kan være en grei måte å gjøre det på i Oslofjordtunnelen, der de har beredskap, maskiner, materiell og oversikt over tunnelen, slik at de kan gjøre en forskjell. Hvis de ikke hadde hatt kamera i Oslofjordtunnelen, og hatt samme filosofien, hadde de sett i blinde. De vet at det kanskje brenner en eller annen plass i tunnelen, det er alt de vet. Basert på en innringing fra en tysk bobil eller nordmann eller noen som står på utsiden og sier at det lukter røyk. De vet i prinsippet veldig lite. (R1)

Det kommer frem fra intervjuene at det anbefales kameraovervåking i tunnel eller automatisk hendelsesdeteksjon for å redusere informasjonsusikkerhet ved en hendelse. Det støttes òg av oppgraderingsplanene i casene, der installasjon av overvåkingskameraer har vært prioritert, blant annet i Rennfastløpene. RB2 forklarer at den andre muligheten for innhenting av informasjon er ved hjelp av nødtelefoner, men at forklaringene fra trafikantene kan være veldig subjektive, og at trafikantene ofte kjører et stykke, før de stopper og varsler om en brann de tidligere observert. RB2 forklarte videre at korrekt informasjon kan være problematisk, og at mange har en tendens til å overdrive brannomfanget. Det kan antas at en av årsakene til at trafikantene overdriver, er fordi det er deres måte å håndtere usikkerhet på. «Det er ikke alltid lett å stole på infoen, men når man ikke har andre muligheter må man det» (RB2). Det er òg usikkerhet knyttet til deteksjon av gasser, røyk og varme. RV illustrerte at varmesøkende kameraer sjelden klarer å observere et brannutløp før brannen er synlig, eller kjøretøyet har stanset. Gassdeteksjonsapparater kan være plassert slik at det ikke blir utslag på unormalt gassnivå oppstrøms for brannen, og i de utvalgte tunnelene er det begrenset antall detektorer. Røykdeteksjon ble beskrevet som det analoge objektet med minst usikkerhet, ettersom røyken spres raskt.

Tolkning av innhentet informasjon kan òg være problematisk:

Du får beskjed om at det kan være at det brenner i tunnelen. Du vet ikke hvor det brenner, du vet ikke hvor mye som brenner, du vet ikke om det brenner, faktisk. Og da skal du gjøre et valg basert på at noen har sagt at det muligens brenner i en tunnel. Det er det som er det vanskelige å ta bestemmelsen for (R1).

Operatørens rolle er tidligere beskrevet i kapittel 6.3.4, og analysene indikerer at beslutningsarbeid ikke kan gjennomføres uten usikkerhet. Menneskelige feil skjer som følge av kompleksitet, og dilemmaer oppstår når personellet ikke får innsyn i alle potensielle utfall. RS1 illustrerer dette: «Noe vil gå galt. Mennesker gjør feil og teknologi svikter, det vet du utmerket godt. Da er det barrierer man må bygge inn for å avverge at det får dramatiske konsekvenser. Vi gjør alle feil ved ulike tidspunkt» (RS1). Beslutninger vil med andre ord alltid medføre kunnskapsbasert usikkerhet, fordi forståelsen av en situasjon sjelden er fullkommen. Videre vil det beskrives hvordan samvirkearbeid mellom responspersonellet kan innebære usikkerhet.

6.4.2 Usikkerhet i forbindelse med kommunikasjon og samvirke

Etter brannen i Oslofjordtunnelen, mente SHT at usikkerhet om antall trafikanter i tunnel kunne blitt avklart tidligere ved et tettere samarbeid mellom nødetater og VTS:

SHT vurderer at det kunne ha blitt gjennomført søk i deler av tunnelen med egnet utstyr i tidsrommet på 20 minutter fra ankomst til tunnelen, og frem til røykproppen nådde tunnelportalen. Selv om VTS hadde en viss oversikt over den trafikale situasjonen før røyken dekket for kameraene, var det fortsatt usikkerhet om hvorvidt det befant seg flere personer i tunnelen i tillegg til de to trafikantene i tilfluktsrom «P». (SHT, 2018, s. 74)

Et usikkerhetselement som indirekte er nevnt i forrige delkapittel, samt i sitatet ovenfor, omhandler kommunikasjon. Det kan være utfordrende å kommunisere usikkerhet, både mellom trafikanter og VTS, men òg mellom innsatspersonellet. På seminaret med nødetatene i Kongsberg i juni 2020, ble det spesielt trukket frem bruk av terminologi, blant annet stedsnavn og tunnelenes himmelretninger, for å redusere usikkerhet omkring aksjonene.

RS3 trekker frem tidlig og tydelig varsling til trafikanter, samt kvalitet i informasjonen, som to tiltak for å begrense usikkerhetsgapet. Etter brannen i Skatestraumtunnelen, kom det frem i SHT sin rapport (2016a, s. 49) at systemet for innsnakk til trafikanter over radio ikke fungerte: «VTS-operatøren som håndterte hendelsen var ikke klar over at innsnakk under gjeldende tidspunkt var satt ut av drift.» Dette bidro til usikkerhet om hvilken atferd som var anbefalt for evakuering, som følge av at trafikantene manglet kunnskap om hendelsen. Uroen og stress for trafikanter kan òg øke som følge av evakuering, etter at røykproppen har tatt dem igjen. Det går ikke an å forvente hvilken kunnskap og helsetilstand trafikantene har. Det viktigste er at de

oppfatter den alvorlige situasjonen de står i, samtidig som stress og usikkerhet setter preg på beslutningene deres.

For eksempel ble det forklart etter brannen i Gudvangatunnelen i 2013: «Han [trafikanten] prøver en snumanøver, men plutselig er røyken der. De kolliderer med tunnelveggen og ser nå ingen ting og gir opp». (SHT, 2015). Etter brannene i Gudvangatunnelen viste det seg at trafikantene oppfører seg ulikt. Et vanlig begrep knyttet til overlevelsesmekanismer er å «flykte eller kjempe». Noen trafikanter ble sittende i bilen, og gjorde en apatisk ikke-beslutning relatert til selvredning. Andre trafikanter løp ut av bilene og prøvde å evakuere til fots, i begge retninger. I risikovurderingen for oppgradering av Rennfast ble gjennomsnittlig ganghastighet satt til 1 m/s, og 0,2 m/s i røykfylte områder. Trafikanter kan prøve å slokke brannen, og dermed avverge faren, eller redusere konsekvensomfanget ved å hjelpe hverandre. I Gudvangatunnelen i 2013 tok en mann med familie med seg seks andre personer i bilen på vei ut (SHT, 2015), og er et symbol på hvordan trafikantene kan bistå i samvirket ved å evakuere andre.

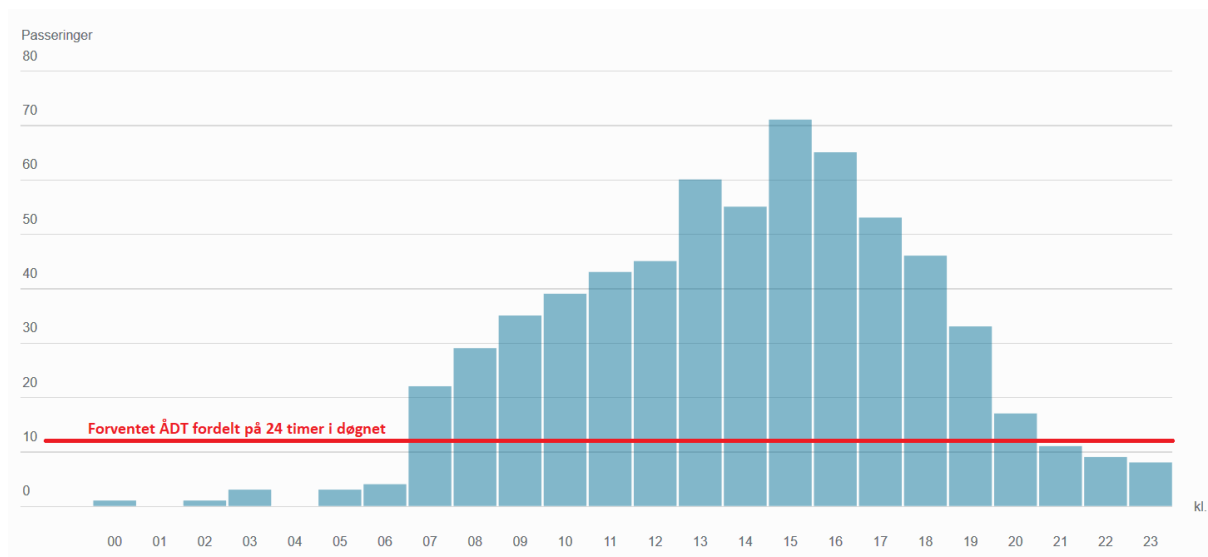
SHT har òg fremmet hendelser der samvirke har bidratt til å begrense følelsen av usikkerhet, blant annet etter brannen i Oslofjordtunnelen i 2017:

SHT vil spesielt fremheve VTS sin håndtering av trafikantene inne i tilfluktsrommet da slukningsinnsatsen pågikk i tunnelen. VTS videreformidlet statusinformasjon mellom redningsmannskapene og trafikantene, noe som beroliget trafikantene i tillegg til at det ga innsatspersonellet viktig informasjon som beslutningsgrunnlag for videre innsats og evakueringen. (SHT, 2018, s. 76)

6.4.3 Usikkerhet i forbindelse med dimensjonering

I kapittel 2.2.3 ble det beskrevet at tunneler i utgangspunkt dimensjoneres for et brannscenario med hensyn på tunnelklassen, avhengig av tunnelens geometri og ÅDT, samt tolkninger fra et funksjonsbasert regelverk og risikoanalyser. Nordkapptunnelen er en av tunnelene som dimensjoneres med lav ÅDT, men som varierer ved høysesong for turisme og eksport. Nordkapptunnelen hadde i 2019 en ÅDT på 282, ifølge trafikkdataene (SVV, u.å.). Tallet kan divideres til gjennomsnittlig 11,75 kjøretøy i timen. Dette kan derimot variere, grunnet rutiner som arbeidstid og liknende. RS4 forklarte at ÅDT i liten grad utdyper detaljnivået for trafikk- og tunnelrisiko. Ved å gå inn på reell døgntrafikk kan dette eksemplifiseres: Fredag 6. september 2019, en tilfeldig dato, passerte 653 kjøretøy gjennom Nordkapptunnelen på ett døgn, med andre ord mer enn dobbelt så mange som årsdøgngjennomsnittet. 28 % av disse

kjøretøyene hadde lengde på over 5,6 meter, klassifisert i oppgaven som tunge kjøretøy. Totalt 71 kjøretøy passerte tunnelen mellom 15:00 og 16:00 på ettermiddagen, der 23 av kjøretøyene var tunge. ÅDT for Nordkapptunnelen antar at totalt 73 tunge kjøretøy passerer på ett døgn. Hadde timeseksempelet blitt brukt for forventet ÅDT, ville ÅDT vært på over 1700. Eksempelet gir ikke utslag på valgt tunnelklasse og branndimensjonering, men illustrerer hvordan risiko kan endre seg gjennom sesongene og på ulike tidspunkt, og hvordan brannscenarioer kan ta høyde for andre faktorer enn ÅDT.



Figur 28 Antall kjøretøypasseringer 06.09.2019 gjennom Nordkapptunnelen for alle typer kjøretøy (SVV, u.å.)

6.4.4 Usikkerhet i forbindelse med hendelsesforløpet

«Derfor er det greit å finne ut hvor stor den [brannen] er, og lukke den usikkerheten tidlig slik at vi kan gi råd til de i tunnelen» (RK). Respondent RK er blant respondentene som illustrerte usikkerhet i forbindelse med hendelsens forløp, med hensyn til brannstørrelse og tid. Hvordan skal operatørene balansere tiltak og beslutninger, og formidle dette til trafikantene, uten å vite hvordan brannen eskalerer?

En av de store usikkerhetene i hendelsesforløpet er tiden beslutningstakerne og trafikantene har til å evakuere. Tid er én av få kvantitative variabler som påvirker både beslutningsstøtten for røykkontroll, samt utfallet av hendelsene. Selv om det i forkant av en hendelse kan estimeres hvor lang tid det tar å nå maksimal røykproduksjon, hvor lang tid brannvesenet bruker på å rykke inn, hvor lang tid viftene bruker for å aktiveres, og hvor lang tid trafikantene bruker på evakuering, er det mange faktorer som spiller inn på disse antakelsene. I brannforløpet blir ikke

tid kvantifisert. Respondentene uttrykte tid som noe viktig, men utfordrende og variabelt, knyttet til manglende kunnskap om hvilke betingelser som er gitt den aktuelle situasjonen.

Branner kan forårsake høye temperaturer og enorm røykproduksjon, der omfanget av flammene, konsentrasjonen og giftigheten av røyken fremdeles er til dels uvisst. RS4 beskrev hvordan usikkerhet oppstår ved uvisshet om hva som brenner, og at det kan være vanskelig å identifisere kjøretøyets last. Tunge kjøretøy kan være lastet med alt fra farlig gods som lett vil brenne, til mindre brennbare materialer. I Gudvangatunnelen 2013 brant det i et vogntog uten last. I etterkant ble brannen antatt å være cirka 25 MW. To år senere brant det i Skatestraumtunnelen. Anslått varmeavgivelse var 400 MW, med andre ord 16 ganger så høyt som i Gudvangatunnelen, med årsak «farlig gods». Farlig gods skal markeres på kjøretøy, fordi det kan gi eksplosjoner eller svært giftige gasser i røyken, som gjør opphold i røyk eller røykproppen mer uutholdelig for trafikanter. På seminaret i Kongsberg i juni ble det trukket frem tre forsøk gjennomført i Mastrafjordtunnelen med 18 MW brann, og 2-6 m/s ventilasjonshastighet med en røykpropp. Der ble det forklart at røykgassens bestanddeler og senvirkninger var mer farlige for trafikanter enn mangel på oksygen. Det var betydelig høyere konsentrasjon av hydrogensulfid og karbonmonoksid i røykproppen, og det ble lagt frem en tese om at ufullstendig forbrenning lager flere giftige gasser. Oksygennivået forble tilstrekkelig på over 20 %, selv i røykproppen, under forsøket. Det ble ikke besvart hvordan større brannomfang kan endre oksygennivået.

Enkelte respondenter reflekterte òg at et brannscenario kan bli mer alvorlig, jo flere trafikanter og tunge kjøretøy som befinner seg i tunnelen. Ventilasjonsdimensjonering er at av kravene som ofte er kvantifisert i SVV, røykkontroll vil derfor være avhengig av objekters påvirkningskraft på røykens utbredelse i tunnelen. Røykkontroll vil derfor igjen være avhengig av grad av kvalitet og detaljer i informasjonen som mottas. Etter den første brannen i Gudvangatunnelen stod 16 kjøretøy igjen i tunnelen, og kunne forhindre jevn luftstrømning.

6.4.5 Hovedfunn og oppsummering

Analysene viser usikkerhet, i tilknytning anleggets dimensjoneringsgrunnlag, faktorer som påvirker røykkontroll og beslutninger som påvirker sikkerhetsstyring av mekanisk ventilasjon. Usikkerhet bør ikke undervurderes, og det kommer frem i analysene at usikkerhet kan oppstå for alle involverte parter i et dynamisk miljø. Derfor er det ønskelig at innhentet informasjon blir så korrekt som mulig tidlig i hendelsesforløpet, slik at kunnskap kan styrke beslutninger for brannventilasjon og røykkontroll.

7. DISKUSJON

I dette kapitlet blir analysen trukket frem i lys av utfordringer og dilemmaer. Kapitlet er kategorisert i tre utvalgte temaer, som vil bistå i å besvare problemstillingen. Først beskrives hvilke verdier som vektlegges under beslutninger for valgt respons, og intensjonen med mekanisk ventilasjon som en kritisk faktor vil bli satt i perspektiv. Videre diskuteres det hvordan røykkontroll kan være utfordrende i de komparative casene, og valg av sikkerhetsstyringsstrategi. Til slutt reflekteres det rundt potensielle brannscenarier, og hvordan systemkunnskap om ytelse kan påvirke responsinnsatsen.

7.1 Konsekvensavveining

Røykkontroll ble rettferdiggjort som en viktig faktor i henhold til selvredning og brannsløkking, men forventningene om hvordan mekanisk ventilasjon opptrådte som en barriere i tunneltilfellene var tvetydig og uklar. Videre vil det diskuteres mer utdypende om ventilasjonssystemets intensjon, og hvordan verdiene i konsekvensutfallet kan avveies opp mot hverandre.

7.1.1 Tvetydighet om ventilasjonssystemets intensjon

Beard & Carvel (2005, s. 82) beskrev intensjonen med beskyttende sikkerhetsfaktorer som noe som skal gi reduserte konsekvenser ved en hendelse. Sløyfediagrammet i kapittel 3 viser at konsekvensutfallet kan påvirkes i ulike retninger. Oppgaven har fokusert på å forsterke selvredningsprinsippet og hvordan ventilasjon kan brukes med intensjon. Samtidig ble det forklart at brannvesenet er avhengig av at ventilasjonssystemet sin intensjon er i tråd med deres ønsker om tilstrekkelig brannventilasjon. Røykkontroll skal være gunstig for nødetatens egensikkerhet, og forutsetninger ved brannsløkking. Fokus på selvredning for trafikanter kan imidlertid begrense brannvesenets muligheter til tidlig respons. Ved å ivareta den ene funksjonen til mekanisk ventilasjon, kan det med andre ord gi negativ påvirkning på andre intensjoner. Nasjonale føringer for ventilasjon i et sikkerhetsstyringsperspektiv kan i større grad skape samhold i beslutninger, for å forhindre dette dilemmaet. Det er ingen tvil om at verdiene som ønskes å ivaretas både er trafikantenes og utrykningsmannskapets helse. Spørsmålet er hvor godt det går an å gjennomføre dette i praksis, og hvor avgjørende de ulike handlingene er i en reell situasjon.

Det er beskrevet mange aksepterte løsninger om hva som er trygt for trafikantenes selvredning. Selv om det diskuteres den reelle risikoen for røykpåkjennning, er det usikkerhet relatert til hva som er best praksis. Intensjonen med mekanisk ventilasjon kan på den ene siden påvirke vilkårene for evakuering, ved at røykkontroll gir mer tilrettelagte forhold for selvredning. På den andre siden kan mekanisk ventilasjon brukes for å fortynne røyken, ved å spre den på et større område, og gi sikt for trafikantene gjennom hele brannforløpet. Det overordnede spørsmålet blir da hvilken restrisiko som skal gjenstå. Restrisiko kan innebære eksponering av røyk, iverksetting av ugunstige tiltak og dilemmaer omkring redning av trafikanter. I tillegg til alle dilemmaer menneskenes verdi, må de økonomiske og materielle konsekvensene tas i betraktning.

Det kom frem i resultatene at aktørene skiller mellom begrepene «selvredning» og «evakuering», der førstnevnte er mer omfattende. Selvredning kan beskrives som å tilrettelegge fysiske forhold for trafikanter, både ved selvevakuering, og i tiden etter at røyken forhindrer evakueringsmulighetene. Med andre ord inkluderer selvredning tiden der trafikantene må sørge for egen sikkerhet i røyken, samt assistert redning og beskyttelse av trafikantene som er forhindret i å evakuere, som følge av skader av ulykken eller andre fysiske begrensninger. Evakueringsbegrepet alene, eller selvevakuering, blir mer bevisst brukt i tiden før brannslukking, med andre ord før trafikantene opplever forhold som forhindrer dem i å rømme. Aktørenes terminologiforståelse kan oppklare hvordan bevissthet om bruk av mekanisk ventilasjon er kontraproduktiv. Usikkerhetene, nevnt i kapittel 6.4, kan òg påvirke hvor mye aktørene vektlegger å ivareta enten mulighet for evakuering, eller mulighet for å ivareta selvredning og assistert evakuering der selvevakuering kan være utfordrende.

7.1.2 Læring etter tidligere hendelser

Utfordringer fra tidligere hendelser kan i praksis brukes for å forbedre forutsetninger for respons ved neste hendelse. Beslutningstakerne kan, etter en ulykke, argumentere for at valgt respons var gunstig eller misvisende, på bakgrunn av tilgjengelig informasjon og etterpåklokskap. Brannen i Gudvangatunnelen kan symbolisere et eksempel på hvordan læring etter hendelser kan utforme nye prinsipløsninger for røykkontroll. Etter at hendelsesforløpet ble analysert, ble røykkontroll igjen omtalt som et dilemma mellom trafikanter og redningsinnsats. Tidligere erfaringer kan flagge hvordan mekanisk ventilasjon forsvares som et kritisk virkemiddel, ved å se på hvilken intensjon mekanisk ventilasjon hadde i gitte øyeblikk, og hvordan dette ga fordeler og utfordringer for de ulike intensjonene. Slik kan VTS og

nødetatene ha mulighet til å ta ansvar og komme med innspill, med den hensikt at konsekvensutfallene alle blir vurdert i tråd med kritikalitet, i ulike situasjoner.

7.1.3 Delkonklusjon

Det kan være problematisk å få frem essensen ved tunnelsikkerhet, og sikkerhetsløsningene blir ofte generaliserte når intensjonen kan være så omfattende. Ventilasjonssystemets intensjon skal begrunnes med gjennomføringsevne i alle faser av en brann, noe som gjør valg av kritiske faktorer og ønskelig konsekvensutfall viktig å stadfeste. Det er med andre ord avgjørende at aktørene, som gjennomfører samvirke, kommer til enighet om hvilken intensjon som skal være styrende, hvordan dette varierer underveis, og hva som kan være mest passende i gitt situasjon. Dette må òg være i tråd med hvilke tiltak som kan utføre valgt funksjon.

7.2 Røykkontroll som kritisk styring

I analysen ble det forklart at det eksisterer ulike forståelser for kritisk styring, og at dette sammenfaller med ventilasjonssystemets evne til å yte med en gitt situasjon. I analysen ble det beskrevet at røykkontroll i tunnelene var mer påvirket av hvordan røyk har innvirkning på trafikantene og brannmannskapets innsats, fremfor oksygenets innvirkning på brannutviklingen. Videre vil det diskuteres hvordan usikkerheter omkring røykkontroll, samt personellens kapasitet og kunnskap, kan gi utfordringer ved valg av sikkerhetsstyring og styringsprinsipper.

7.2.1 Hvorfor er det så mye usikkerhet i styringsprosessen?

Det vil alltid foreligge usikkerhet som gjør at konsekvensutfallet ikke kan være 100 % forutsigbart. Tidligere i et hendelsesforløp eksisterer det mer usikkerhet, fordi det er lite tilgang på informasjon som operatørene og nødetatene kan anta er korrekt. Problemer som kan oppstå under usikkerhet er tilknyttet innhentet informasjon, innsatstid og -ressurser, varme og røykutvikling fra kjøretøyet, samt riktig bruk av tekniske sikkerhetstiltak. Røykkontroll er en av sikkerhetstiltakene som iverksettes tidlig i hendelsesforløpet, og må derfor styres under usikkerhet. En av de store utfordringene knyttet til røykkontroll er generalisering, ettersom tunnelen har med komplekse sammensetninger av brann og fluidstrømninger. Leveson (2011, s. 93) beskrev hvordan kompleksitet kan oppstå i styringsprosessen, ved at informasjon kan være feil eller forsinket. I et teoretisk perspektiv fra kapittel 2 ble prosessmodellen advart som

potensielt inkonsekvent, ufullstendig eller direkte feil. Selv om det er gjort gode beslutningsstrategier i forkant av hendelsen, vil det nesten alltid være behov for å tilpasse prosessen basert på nye inntrykk. Usikkerhet kan gjøre at avvik fra en beslutningsprosess er helt nødvendig, ettersom uforutsette hendelser stiller krav til fleksibilitet i styringsprosessen. Etter hvert som kunnskap innhentes, kan det derfor være aktuelt å se på hvordan røykkontroll påvirkes av usikkerheten som oppstod, og hvorvidt den nye kunnskapen legger til grunn andre anbefalinger. Usikkerhet kan komme av manglende kompetanse, eller manglende mulighet, til å skape korrekte situasjonsbilder, med kommunikasjon og spredning av informasjon. Uenighet som oppstår mellom beslutningstakere, kan være resultat av denne usikkerheten.

Usikkerhet kan ikke kvantifiseres på samme måte som andre variabler, og følelsen av usikkerhet kan være reflektert i beslutningstakernes tidligere erfaringer, kunnskap, og følelsen av kontroll over situasjonen. Et av de viktige tiltakene for å illustrere usikkerhet er gi begrepet en fellesbenevnelse. Det kan for eksempel være å se på naturlige variasjonsintervaller, kvantifisere ventilasjonens påvirkning av brannstørrelsen ved ulik ventileringshastighet, eller oppgi usikkerhetsmomentene som bør vurderes i risikoanalysen. I forkant av en hendelse kan risikoanalysene tilføre usikkerhetsmålinger og forventninger til de ulike beslutningstakerne. Samtidig kan den reelle situasjonen være annerledes fra antakelsene gjort i planleggingsprosessen og risikoanalysene. Det kan medføre mangelfulle faktorer, noe som gjør at beslutningstakerne gjør feilgrep ved å ikke inkludere usikkerhetsmomentene.

I samsvar med Flin m.fl. (2008) sin prosess, vil måten røykkontroll driftes, i stor grad handle om hvilke prioriteringer beslutningstakerne vektlegger i utviklingsfasen. I forkant av en hendelse kan det være flere valg av løsninger som passer potensielle handlingsforløp, som beslutningstakerne kan gi uttrykk for. En valgt beslutningsprosess kan enten være rigid, eller åpne opp for flere alternative tolkninger. De fleste beslutninger blir gjort i normalfase eller utviklingsfase, der aktørene kan bruke mye tid på å tilpasse tunnelkonseptet til de stedlige betingelsene, gjennom analytisk og kreativ beslutningstaking. Det betyr å velge en løsning som kan innebære faste alternativer, men òg gi mulighet for å optimalisere valgt løsning. Etter hvert må fokuset rettes på gjennomføring og redusering av den gjenværende restrisiko, med andre ord må det gjennomføres nye situasjonsvurderinger. Utfordringer kan oppstå hvis det allerede er innsnevrede muligheter for styring av ventilasjon. Denne handlingen gir operatøren lite handlingsrom for å ta risikobaserte beslutninger, ved at den analytiske beslutningsstrategien fra før av låser operatøren til å gjennomføre en mer regelbasert beslutning. Det vil da være umulig å fravike planen uten å bryte reglene som er gitt. I praksis kan det oppstå situasjoner som gjør

at det er vanskelig å følge den forhåndsantatte sikkerhetsstyringen, blant annet et eventuelt behov for å snu ventilasjonsretning eller observasjon av trafikanter i tunnelen. Det ønskes at beslutningstakerne er oppmerksomme på at noe som tidligere er antatt som «riktig fasit», ikke nødvendigvis er like hensiktsmessig å gjøre neste gang.

Usikkerhet for samvirke ble omtalt i analysekapittelet som en differanse mellom antakelser om atferd, både mellom innsatspersonell og trafikanter, og den faktiske atferden. Når operatøren i VTS informerer trafikantene om at de må snu og kjøre ut, har VTS en antakelse om hvor lang tid trafikantene bruker. Trafikantene har antakelser om når redningsmannskapet kommer, og redningsmannskapene har antakelse både om hvordan VTS opererer og hvordan trafikantene velger å evakuere. Denne kunnskapen er basert på tidligere erfaringer og erfaringsoverføring, samt informasjonsinnhenting og gitte beskjeder i den aktuelle situasjonen. Respons krever med andre ord kompetent personell som har evne til å tilpasse seg situasjonen. I kapittel 2 ble det vist hvordan prosessmodellen både skal ta hensyn til røyk og trafikantenes evakuering som et gunstig utfall. Differansen mellom antakelsene, vil i prosessmodellen være avgjørende for om beslutningene er gode. I prosessdiagrammet kan usikkerhet være knyttet til feilmeldinger, eller til tidsforsinkelser og miljøforhold. Samtidig vil oppdeling av ulykkesfaser, som vist i figuren i kapittel 6.3, bidra til at beslutningstakerne forstår hvordan et system gradvis kan endre tilstand.

7.2.2 Motsetninger i ventilasjonsfilosofienes terminologi

Det er samtidig tvetydighet i terminologien for anbefaling av styring, som kan gi utfordringer for røykkontroll. For eksempel ble det på Vestlandet ønsket at brannventilasjon kjøres med «full effekt», med andre ord at alle viftene starter opp ved deteksjon av brann. I noen tilfeller kan maksimal vindhastighet bety at Δp_v skal gi så høy trykkøkning som mulig, mens argumentasjon viser at dette igjen kan gi negativ effekt for røykkontrollens intensjon. RS2 påpekte at 1-2 m/s var passelig ventilasjonsmengde, og i «Håndbok N500» (SVV, 2014b, s. 109) står det «Ved å påtrykke et litt høyere trykk enn det som generes ved brann, vil man over tid overvinne den naturlige ventilasjonen». Det kan virke som at Δp_v på full effekt er det samme som å motvirke trykkbidraget Δp_o . Denne tvetydigheten kan både skape utfordringer ved samvirkearbeid i den akutte situasjonen, men òg kommunikasjonen mellom prosjektering av ventilasjonsanlegget og drift.

Utfordringene kan eksemplifiseres ved å ta utgangspunkt i Godøytunnelen. I valg av dimensjonering står det i beredskapsplanen at forventet ventilasjon ved brann er 2,5 m/s. Videre står det i driftsprosedyrene for den automatiske brannventilasjonen at viftene aller først stoppes

i seks minutter, før brannventilasjonen bruker fire minutter på å nå «full brannventilasjon». Godøytunnelen har et av tunnelutvalgets bratteste stigninger. Sammen med oppdriftskrefter og røykens trykkbidrag, kan dette tilsvare en reell røykhastighet på betydelig mer enn 2,5 m/s. Hvis brannventilasjonen er gitt å styre røyken nedover i tunnelen, kan det hende at anslått 2,5 m/s ikke er nok. Disse motstridende påstandene viser hvor viktig det er å spesifisere kritisk røykkontroll. Manglende informasjon i beredskapsanalysene kan skape forvirring om styringsfilosofiene.

7.2.3 Delkonklusjon

Diskusjonen belyser hvordan røykkontroll medfører usikkerhet i valg av beslutninger, og hvordan usikkerhet bør stadfestes for å erkjenne behovet for røykkontroll i ulike faser. Informasjon som støtter styringsprosessen er viktig, men kan være mangelfull i prosjekteringsfasen og tidlig i hendelsesforløpet. Spesifikk bruk av terminologi ved bestemmelse av styringsprinsipper, samt tydeliggjøring av ønskelig kritisk styring med muligheter for variable avvik, er med andre ord noe som i større grad kan vektlegges i forkant av en hendelse.

7.3 Brannscenarier

For å synliggjøre hvordan røykkontroll er avhengig av variasjoner i brannforløpet, kan dimensjonerende brannscenarier utformes som en del av risikotilnærmingen til hver enkelt tunnel. De komparative tunnelcasene i oppgaven har alle til felles at de viser utfordringer ved gjennomførelse av bevisst røykkontroll i brannforløpet. Dette kommer som følge av tunnelenes geometriske utforming og stedlige betingelser. Gjennom oppgaven har det blitt belyst at ventilasjonsfilosofiene er forenklede tilnærminger til ulike scenarier. Som det kommer frem i kapittel 2.1.2, har tunneler i hovedsak ett automatisk styringsmønster for ventilasjon, men VTS kan skille mellom styringsteknikker ved behov. Dette ble reflektert i forskningscasene, med få unntak. I 7.2 ble det beskrevet hvordan styringsprinsippene kan være rigide eller åpne opp for større handlingsrom. Det vil derfor videre være ønskelig å få frem hvordan begrepet «brann i tunnel» kan utdypes fra problemstillingen, i henhold til konseptet «kritisk styring».

7.3.1 Prediksjon og etablering av brannscenarier

I beredskapsplanene og risikoanalysene til de utvalgte tunnelene, ble det diskutert hvilke dimensjonerende hendelser beredskaps- og prosjekteringsaktørene må ta høyde for. Fra kapittel 3.3.1 ble det forklart hvordan usikkerhet omkring hendelsesforløpet medfører restrisiko for kritisk styring. I forskningscasene skiller grovanalysene mellom brann i tungt kjøretøy og brann i lett kjøretøy. Risikoanalysene hadde samme predefinert ventilasjonsprinsipp til begge hendelsene. Det var lite variasjon i valgte brannscenarier, og risikoanalysene fulgte i stor grad «TS 2007:11 Veileder for risikoanalyser av vegtunneler» fra SVV (2007). Karmøytunnelen skilte seg ut, ettersom brannplanene deres i større grad tok hensyn til hvor i tunnelen brannen oppstår, og flere andre tunneler er i en prosess der disse strategiene evalueres og vurderes.

For at mekanisk ventilasjon skal anvendes som en kritisk sikkerhetsløsning ved brann i bratte ettløpstunneler, er det interessant å se på etablering av brannscenarier. Brannscenarier ble forklart som hendelser relevante for å anslå potensielle konsekvenser (Borg m.fl., 2015), og det ble i kapittel 3 beskrevet hvordan varmeutvekslingsraten blant annet kunne brukes for å etablere egenskaper til brannen. Til tross for at varmeutvekslingsraten brukes aktivt for dimensjonering, gir det ingen uttelling på aktørens aktive iverksetting av røykkontroll. Sett i lys av oksygenets påvirkning ved en storbrann (Beard & Carvel, 2012) mot renere forbrenning og nedkjøling av en liten brann (Jagger & Grant, 2012), kan det antas som svært hensiktsmessig å legge mer vekt på forskjellene mellom brann i personbil og brann i vogntog. Brannscenariene kan òg knyttes opp mot farlig gods, trafikkmengde, samt andel tungbiler i tunnelene, for å kartlegge omfanget av potensielle hendelser.

Det må påpekes at det finnes utallige brannscenarier som prosjekterende aktører kan inkludere, ved beslutninger om ventilasjonsstrategi. Hvordan etablere tilstrekkelig detaljerte brannscenarier som er representative for de bratte tunnelene? Brannscenariene bør ta høyde for å kunne presisere ulike beslutningsstrategier, og samtidig ha gjenkjennelige og oversiktlige løsninger for operatøren og innsatslederen. Det anbefales å se på egenskaper i et brannscenario, med hensyn til det brennbare materialet, samt lokale miljøbetingelser. Utdypende kan dette bestå av kjøretøyets kjøreretning og last, plassering av brann i tunnelsoner, avstand fra tunnelåpningene med hensyn på fluktruter, trafikkmengde med tanke på forstyrrelser i fluidstrømningene, tunnelens geometri med stigning, og stedlige betingelser som nødetatens innsatstid. Borg m.fl. (2015) sine drøftinger om hvordan aktive barrierer kan påvirke retningen brannforløpet endres underveis i en situasjon, er òg verdt å nevne i den sammenheng.

Hensikten med røykkontroll er å bestemme gunstige prosedyrer. Operatøren kan bruke disse scenarioene til å beslutte respons, som videre kan utvikles og tilpasses ved ny informasjon og erfaring. Nordkapp-tunnelen kan her brukes som et interessant eksempel. I innsatsplanen blir responsrekkefølgen forklart som at VTS først skal iverksette brannventilasjon, og deretter varsle 110, som bestemmer angrepsvei. Innsatsplanen legger opp til å snu brannventilasjon med hensyn til brannvesenets ønske, etter at det allerede er utført aktiv respons i prosedyrene. I eksempelet kan det antas at brannvesenet har ulike tilnærminger til de forskjellige scenarioene. Dette gir en gylden mulighet til å tilpasse scenarioene til sikkerhetsbarrierene i tunnelen.

7.3.2 Risikoforestilling

Videre kan det drøftes hvilket handlingsrom beslutningstakerne og innsatspersonellet har ved en hendelse. På seminaret med nødetatene ble det bemerket at det nesten er uunngåelig at trafikanter evakuerer i røykfylte miljøer. Dette kan legge føringer for viktigheten av å tette kunnskapsgapet når det gjelder informasjon om risikoene ved tunnelbrann, blant annet i lys av evakueringsanbefalinger. Det erkjennes at det har vært utvikling med fokus på risikoforståelse. Risikoforestillingene kan medvirke til å oppnå et gunstig sikkerhetsnivå, med felles målsetninger for alle aktører. Samtidig må beslutningstakerne ta høyde for at sikkerhetsnivået ikke kan oppnås ved å håndtere alle utfordringer og hendelsesforløp, med samme tiltak.

7.3.3 Hvordan forstå hva som er godt nok?

Det er opp til hver enkel tunneleier å velge hvordan de skal møte overordnede krav. Det kan være utfordrende å tolke et funksjonsbasert regelverk, og basert på tolkningen, argumentere for at valgte løsninger for mekanisk ventilasjon er gode nok. Flere tunnelforvaltere uttrykte at de ønsket mer detaljerte krav og tilpasninger for bratte tunneler. En av ulempene med funksjonsbaserte regelverk, er at de sikkerhetsløsningene som tidligere ble ansett som gode nok, fremdeles kan opptre som en fasit. Sikkerhetsløsningene kan videre gi inntrykk av validering av dimensjonering, på samme måte som forslagene i veiledninger for horisontale tunneler kan misoppfattes som potensielle alternativer for bratte tunneler. Spesielt ved stramme økonomiske rammer, eller begrenset kunnskap, kan funksjonsbaserte regler føre til nedvurdering av mer spesifiserte og tilpassede krav. Det er viktig for aktørene å forstå at strategitilnærmingen for én tunnel, ikke kan tolkes som riktig tilnærming for en annen. R4 trakk frem under intervjuet at det viktigste for dimensjonering er å komme opp på et «godt nok» sikkerhetsnivå som reflekterer virkeligheten. Alder på tunnelen ga utslag på risikotoleransen, og disse variasjonene

ble reflektert i tunnelforvalternes svar på hva som er sikkert nok i henhold til forskriftene. Det kan være behjelpelig at dimensjonering av brannscenarioer prosjekteres etter annen betinget informasjon, innhentet i senere tid. Risikoanalysene inneholder allmennforklaringer for potensielle scenarioer, og tydeliggjør barrierestyling av mekanisk ventilasjon opp mot kvalitative krav. En fordel med risikoanalysene, er at de kan brukes som et kommunikasjonsmiddel i et sosioteknisk system, i henhold til Leveson (2011) sitt skille mellom systemutvikling- og systemoperasjonsprosessfasene. Risikoanalysen kan anvendes ved å tilpasse ventilasjonsanlegget basert på testet beredskap, ytelsesrapporter og antakelser. Strukturen viser hvordan systemet bør utvikle seg over tid. På denne måten kan systemet ses på i et risikostyringsperspektiv. Vinklingen krever at aktørene har felles tilnærming til hva som kategoriseres som et akseptabelt sikkerhetsnivå på barriereplan, og deretter tilpasse løsningene i et risikostyringsperspektiv.

7.3.4 Ventilasjonssystemets ytelse i aktuelle scenarioer

Ventilasjonssystemets kvalitetskriterier er avhengig av ytelsen, og vurdering av ytelseskrav er en av forventningene for å kunne si noe om barriereløsningen er tilfredsstillende til et aktuelt scenario. Fra befaringen og intervjuene ble det forklart at vifter blir målt på kapasitet, vurdert etter avvik, og gjennomgått slik at programmeringen stemmer med forhåndsbestemte beslutninger. Ytelsen kan slik kategoriseres etter funksjonalitet, responstid, pålitelighet og robusthet, som beskrevet i 3.1.4. Videre vil disse fire ytelseskravene vurderes opp mot gjeldende praksis funnet i casene.

Funksjonalitet til mekanisk ventilasjon vil være å kontrollere røyken, etter valgt beredskapsplan på operasjonelt og organisatorisk nivå. Beredskapsplanene tok utgangspunkt i minimumskrav som et referansenivå, i tillegg til risikoanalyser, som grunnlag for valgt funksjonalitet. I 6.2.2 ble det implisert at risikoanalysene for tunnelutvalget ikke representerer dimensjonering og drift, i henhold til ønsket om å tilrettelegge mer for selvredning. Funksjonaliteten kan derfor i større grad ta hensyn til trafikantenes forståelse og evne til å evakuere, og på denne måten bistå overgangen til helhetlig sikkerhetsstyring. Nåværende styringsprosesser kan påstås å være optimistiske, med tanke selvredning. SVV (2020) foreslo i «Håndbok N500» styrt vindhastighet på om lag 2 m/s, for å legge til rette for evakuering. Det tilsier at trafikanter må bevege seg i mer enn 7,2 km/t bort fra brannen for å unngå å bli fanget i røyk, noe som er høyere enn antatt gangfart i en slik situasjon. Det kan heller ikke antas at alle trafikanter klarer å snu bilen, eller velger å bruke kjøretøyet for evakuering. Enkelte forskningscase viste hastigheter opp mot 6-7

m/s, noe som òg motstrider tanken om funksjonalitet knyttet til ventilasjonens intensjon, nevnt i kapittel 7.1.

Responstid kan uttrykkes som teknisk kravspesifikasjon for dimensjonering. Viftene må være kraftige for å kunne snu røyken ved behov, og det må være nok tid til å igangsette viftene. For et ventilasjonsanlegg må det forventes forsinkelser fra aktiveringspunktet, til alle viftene jobber med nødvendig kapasitet i riktig retning. Samtidig må responstiden for mekanisk ventilasjon stemme med forventning til innsatstid, og behovet for å gjøre raske beslutninger i henhold til scenariene og styringsprinsippene. Dette legger opp til nødvendigheten av systemkunnskap og helhetsforståelse for drift av anlegget.

Påliteligheten til mekanisk ventilasjon kan tolkes som at viftene skal utføre en funksjon med flere krav og forhold som er gitt, blant annet forventning til røykmengde og brannstørrelse, relatert til antall trafikanter og kjøretøy. Viftene må ha nok pålitelighet til å håndtere mengden røyk frem til evakuering eller innsatsarbeidet er fullført, basert på dagens trafikknivå og variabler. Det kom frem i teorikapittelet at lagdeling av røyk, samt ventilasjonskrefter raskt kan forstyrres ved store objekter i tunnelen, andre vogntog eller endringer i tunneltverrsnittet. Pålitelighet handler med andre ord om at funksjonaliteten må opprettholdes på tross av forstyrrelser og eksterne belastninger. Robusthet vil da være ventilasjonssystemets evne til å motstå denne belastningen over tid. Flerparten av tunnelene er dimensjonert for å håndtere en 50 MW brann, men det er ikke spesifisert hvor lenge brannen pågår, noe som kunne vært aktuelt å diskutere i brannscenarioene. De tekniske ytelseskravene må med andre ord bekjempe varmen over en periode frem til brannen ikke lengre er en fare.

7.3.5 Delkonklusjon

Det kom frem at en av de store utfordringene ved tunnelbrann, er manglende mulighet til å kvantifisere og beskrive alle situasjoner. I forkant av en hendelse kan risikoanalyser bidra ved å tilføre situasjonsvariasjoner, og belyse potensielle responser. Prediksjoner av hendelsesforløp kan bidra med variabler, for å forstå hvordan handlingsrommet for røykkontroll kan nyttiggjøres. Omgivelsesendringer krever at aktører tilpasser seg. Ventilasjonens ytelse og godhet kan kobles opp mot ytelseskrav, men òg valgt driftsløsning i ulike scenarioer.

8. KONKLUSJON

Konklusjonskapittelet avslutter oppgaven og bidrar til å besvare følgende problemstilling:

Hvordan kan styring med mekanisk ventilasjon anvendes som en kritisk faktor i sikkerhetsstyring ved brann i tunnel?

I de foregående kapitlene har oppgaven gitt ulike vinkler på den overordnede problemstillingen, med formål å undersøke hvordan ventilasjonssystemet kan bistå tunnelsikkerhetsarbeidet. I et sikkerhetsstyringsperspektiv vil mekanisk ventilasjon støtte bruk av røykkontroll som et konsekvensreducerende tiltak. Sikkerhetsstyring tar for seg drift, vedlikehold og utvikling av ventilasjonssystemet, men det er likeså viktig at designprosessen legger opp til forutsetninger som må være til stede, før en ulykke inntreffer.

Forskningscasene viser at tunnelforvalterne bruker et funksjonsbasert regelverk, åpent for subjektive vurderinger. For videre å beskrive hvordan mekanisk ventilasjon kan anvendes, tas det utgangspunkt i vurderinger fra risikoanalysene. Her kan lokale aktører involveres ved bestemmelse av risikobildet. Risikoanalysene kan tilpasse mekanisk ventilasjon, med hensyn til lokale variasjoner, stedlige betingelser, samt ulike fare- og ulykkesscenarioer. Scenarioene skilte mellom ulike brannstørrelser, men ga lite innsikt i andre forutsetninger, som brannens utvikling, plassering og materialkomposisjon, eller andre miljøfaktorer som påvirker brannforløpet.

Røykkontroll vil være det mest kritiske mekanisk ventilasjon kan effektivt utføre. Kritiske faktorer ble i oppgaven beskrevet som sikkerhetstiltak, som nødvendige forutsetninger for at tunnelen skal opprettholde et akseptabelt sikkerhetsnivå. Trenden for røykkontroll i de utvalgte bratte ettløpstunnelene var enten å styre røyk oppover i tunnelen med termisk oppdrift, av hensyn til nødetatens innsatsretning, eller med naturlig trekkretning. I forbindelse med røykkontroll, ble det funnet usikkerheter rundt prediksjonen av hendelsesforløpet. Bratte tunneler kan skape utfordringer for røykkontroll, og tunnelenes helning er en viktig variabel. Både fysisk design av ventilasjonsanlegget, tekniske spesifikasjoner og administrative prosedyrer og systemer, spiller en rolle i valg av røykkontrollstrategier.

Det samlede datamaterialet viser tvetydighet om hvordan mekanisk ventilasjon er knyttet til dimensjonerende og praktisk arbeid med tunnelsikkerhet. Selvredning, selvevaktering og funksjonalitet ble viktige holdepunkter for å beskrive hvordan denne tvetydigheten kan oppstå. Beslutningen om gode prosessmodeller er krevende, og det er avgjørende at operatørene som

kontrollerer ventilasjonsanlegget har god systemkunnskap. Interaksjoner mellom ulike sikkerhetsbarrierer, og relasjonen mellom VTS og nødetatene, kan påvirke kvaliteten av styringen. Beslutningstakerne skal balansere konflikter som kan oppstå mellom preskriptive løsninger og fleksibiliteten som kreves, for at ventilasjonssystemet skal yte sin funksjon. Preskriptive tilnærminger til styring krever mye kunnskap og erfaring basert på eksplisitte forståelser. Når brannen kan endre seg på kort tid, er det viktig med fortløpende beslutningstaking. Beslutningstaking ved sikkerhetsstyring kan enten basere seg på situasjonsbaserte beslutninger, strukturerte responsprinsipper som kan påvirkes underveis, eller serier med preskriptive løsninger korresponderende med brannscenarioer.

Usikkerhet kan oppstå som følge av at tunneler er dynamiske miljøer, og oversikt over hendelsen ved hjelp av andre sikkerhetstiltak kan støtte mekanisk ventilasjon sin kritikalitet. Tid ble ansett som en viktig faktor for vurderingsgrunnlaget. Usikkerhet krever situasjonsforståelse som tar utgangspunkt i mekanisk ventilasjon sin rolle, både som en aktuator og en miljøforutsetning for trafikantene. Usikkerhet knyttet til mekanisk ventilasjon som en funksjon er avhengig av trafikantenes evne og vilje til selvredning, samt pålitelighet i systemene.

Forskningscasene viser et komplementært tunnelsikkerhetsbilde, som forklarer hvordan mekanisk ventilasjon kan anvendes på ulike måter. De er dog motstridende i valg av strategiprinsipper, og hvordan mekanisk ventilasjon skal yte som en kritisk faktor, noe som indikerer at det er mye som kan evalueres i forbindelse med utviklingen av prosedyrer for innsatsrespons. Erfaringer med tidligere hendelser kan gi større beslutningsgrunnlag for de aktuelle tunnelene, ettersom systemet reaktivt tvinges inn i en utviklingsfase.

Denne forskningsoppgaven har vist at mangelfull eller feil bruk av mekanisk ventilasjon, kan gi utilstrekkelige forhold for evakuering og brannslukking. Mange av tunnelcasene har lik tilnærming til valg av strategiprinsipper, og optimistisk sikkerhetstenkning om at mekanisk ventilasjon ivaretar trafikantsikkerhet, uten begrunnelse om hvordan. Hensikt med et sikkerhetssystem er å sikre at sikkerhet kan styres på en organisert måte. Det kom frem i oppgaven at det slik kan legges mer vekt på at mekanisk ventilasjon ivaretar verdiene, som var ønskelig å beskytte ved brann.

8.1 Anbefalinger

Oppgaven grunngir et behov for å revurdere ventilasjonsstrategier. Det anbefales at brannventilasjon vurderes med ønske om hvilken funksjon røykkontroll skal yte, og selvredning kan komme tydeligere frem som et mål. Det anbefales òg mer inkludering av stedlige forhold som kan påvirke effekten av røykkontroll. Her kan lokalkunnskap i enda større grad involveres for å samle et reelt risikoperspektiv. Det er mye usikkerhet knyttet til ulike brannscenarier og generalisering av ventilasjonsstrategiene. Det anbefales derfor at SVV tilegner seg mer kunnskap om røykkontroll ved ulike brannscenarier, og ser på mulighetene for å bruke disse. Det anbefales òg at nødetatene finner muligheter til å nyansere fellesbegreper for tunnelene som er underordnet deres responsaksjoner, slik at alle forstår konseptualiseringen av ventilasjonsbruk.

Til slutt må det utdypes et funn fra metodekapittelet, der ble beskrevet en krevende innsamlingsprosess for å samle et fullstendig prosjekteringsgrunnlag, knyttet til hvert ventilasjonssystem i de utvalgte casene. Det kan derfor anbefales at SVV samler oppdatert informasjon fra ulike leverandører og entreprenører, for å sikre erfaringsoverføring og dokumenttilgjengelighet i fremtiden.

8.2 Videre forskning

Videre forskning bør videreføre fokuset på risikofaktorer relatert til undersjøiske og bratte vegg-tunneler, blant annet hvordan selvredningsprinsippet i tunnelene blir ivaretatt av andre sikkerhetstiltak, og hvilke kombinasjoner av sikkerhetstiltakene som kan være gunstige i et systemperspektiv. Det ble gjort interessante funn om hvordan kommunikasjon og terminologi mellom ulike aktører kan påvirke innsatsarbeid, som kan være spennende å utdype med ulike case og erfaringer. I denne oppgaven ble det ikke gjennomført simuleringer, men det ligger et potensial i å se på hvilken effekt røykkontroll har på miljøforhold og mennesker i tunnelen. Videre arbeid kan òg være å utvikle prosessdiagrammet som ble introdusert i kapittel 2, for å optimalisere aktørenes forståelse for styringssystemer med variabel innsikt fra prosessene.

Det må legges til at det i oppgaven kom frem behov for å tilegne seg mer kunnskap om giftige gasser, blant annet konsentrasjoner av partikler og oksygentilgjengelighet i røyk, samt menneskets evne til å overleve de varige skadene etter inhalering av røyk. Dét må òg legges til at undertegnede håper på mer diskusjon i fremtiden knyttet til usikkerhet om giftige gasser,

brennbart materiale i kjøretøy, spesielt den fremtidige utviklingen av en bilpark bestående av flere elektriske biler, hydrogenbiler og potensielt mer tungtrafikk, samt et trafikkbilde som preges av byutvikling og sentralisering.

8.3 Avsluttende ord

Innledningsvis ble det trukket frem hvordan «flaks» har beskrevet positive konsekvensutfall etter tidligere hendelser. Underveis i studiet kom det frem at utfallene har forløpet seg på bakgrunn av flere faktorer, men at kunnskap og erfaring i fagmiljøet på tvers av regioner i Norge, trafikantenes og nødetatenes heldedåder, samt utviklingen av sterkere sikkerhetsfokus med nullvisjonen, har mer skyld i konsekvensutfallene enn «flaks».

REFERANSELISTE

- Andersen, S. (1997). Case-studier og generalisering: Forskningsstrategi og design. Bergen: Fagbokforlaget
- Andersen, S. S. (2006) Aktiv informantintervjuing. *Norsk Statsvitenskapelig tidsskrift*, 22, s. 278-298.
- Askildsen, A. (2015, 10.08) Mastrafjordtunnelen ble stengt på grunn av brann. *Bergens Tidende*. Hentet fra <https://www.bt.no/nyheter/lokalt/i/2P5zq/mastrafjordtunnelen-ble-stengt-paa-grunn-av-brann>
- Aven, T. (2006). *Pålitelighets- og risikoanalyse* (4. utg. ed.). Oslo: Universitetsforlaget
- Aven, T., Boyesen, M., Njå, O., Olsen, K., & Sandve, K. (2004). *Samfunnsikkerhet*. Oslo: Universitetsforlaget.
- Aven, T., og Renn, O. (2010). *Risk management and governance : Concepts, guidelines and applications* (Vol. Volume 16, Risk, governance and Society). Heidelberg: Springer.
- Bakken, S. G. (2015, 15.07) Større fare for brann i undersjøiske tunneler. *NRK*. Hentet fra <https://www.nrk.no/vestland/storre-fare-for-brann-i-undersjoiske-tunneler-1.12458377>
- Carvel, R., & Beard, A. (2005). *The Handbook of tunnel fire safety*. London: Thomas Telford.
- Beard, A. & Carvel, R. (2012) The influence of tunnel ventilation on fire behaviour. I Beard A. og Carvel, R. (2012) *The Handbook of Tunnel Fire Safety* 2nd edition (s. 217-236). USA: ICE Publishing.
- Bendelius, A. G. (2005) Chapter 7. Tunnel Ventilation – State of the Art. I Beard A. og Carvel, R. (2005) *The Handbook of Tunnel Fire Safety* (s. 127-143). USA: Thomas Telford Publishing.
- Benjaminsen, C. (2017, 24.01) – Enkle sikkerhetstiltak vil redde liv i tunneler. *Forskning.no* Hentet fra <https://forskning.no/partner-sikkerhet-sintef/enkle-sikkerhetstiltak-vil-redde-liv-i-tunneler/1284769>
- Berven, S. B. (2006, 20.09) Brann i Mastrafjordtunnelen. *NRK*. Hentet fra <https://www.nrk.no/rogaland/brann-i-mastrafjordtunnelen-1.1023251>
- Blaikie, N., & Priest, J. (2019). *Designing social research: The logic of anticipation* (3rd ed.). Cambridge, UK: Polity Press.
- Borg, A., Njå, O. & Torero, J.L. (2015) A Framework for Selecting Design Fires in Performance Based Fire Safety Engineering. *Fire Technology* (51), s. 995–1017. Hentet fra <https://doi.org/10.1007/s10694-014-0454-x>
- Brann- og eksplosjonsvernloven (2002) Lov om vern mot brann, eksplosjon og ulykker med farlig stoff og om brannvesenets redningsoppgaver (LOV-2002-06-14-20) Hentet fra <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2002-06-14-20>
- Capella, P. (1999, 27.03) 35 die, 1 Briton missing in Mont Blanc tunnel fire. *The Guardian*. Hentet fra <https://www.theguardian.com/world/1999/mar/27/6>

- Dale, B., Jones, M., & Martinussen, W. (1985). Metode på tvers: Samfunnsvitenskapelige forskningsstrategier som kombinerer metoder og analysenivåer. Trondheim: Tapir.
- Direktoratet for Byggkvalitet (2017, 29.06). Slik leser du TEK17. Hentet fra <https://dibk.no/byggereglene/alt-om-tek/slik-leser-du-tek17/>
- Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap (2015) *Risikoanalyse av brann i tunnel – delrapport til Nasjonalt risikobilde 2014*. Tønsberg: Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap
- Engen, O., Kruke, B., Lindøe, P., Olsen, K., Pettersen, O., & Pettersen, K. A. (2016). *Perspektiver på samfunnssikkerhet*. Oslo: Cappelen Damm akademisk.
- Flin, R., O'Connor, P., & Crichton, M. (2008). *Safety at the sharp end: A guide to non-technical skills*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Flyvbjerg, B. (2013). Five Misunderstandings About Case-Study Research. *Qualitative Inquiry*. 12(2). DOI:10.1177/1077800405284363.
- Folkestad, R. (2019, 19.03) Eiksundtunnelen sitt viftesystem for røyk stettar ikkje dagens krav. *Møre-nytt*. Hentet fra <https://www.morenytt.no/nyheiter/2019/03/19/Eiksundtunnelen-sitt-viftesystem-for-r%C3%B8yk-stettar-ikkje-dagens-krav-18696521.ece>
- Fosse, A. & Vikås, M. (2009, 29.06) Fem personer omkom etter tunnelbrann. *VG*. Hentet fra <https://www.vg.no/nyheter/innenriks/i/dxn6z/fem-personer-omkom-etter-tunnelbrann>
- Gehandler, J. (2015) Road tunnel fire safety and risk: a review. *Fire Science Review*. 4:2 Hentet fra <https://doi.org/10.1186/s40038-015-0006-6>
- Gillard, J. (2012) Road tunnel operation during a fire emergency. I Beard A. og Carvel, R. (2012) *The Handbook of Tunnel Fire Safety* 2nd edition (s. 509-524). USA: ICE Publishing.
- Google Maps (u.å.) Rennfasttunnelene. Hentet 09.06.2020 fra <https://www.google.com/maps/@59.0619051,5.5752066,11.75z>
- Google Maps (u.å.) Bømlafjordtunnelen. Hentet 09.06.2020 fra <https://www.google.com/maps/@59.7036077,5.3500289,11.21z>
- Google Maps (u.å.) Eiksundtunnelen. Hentet 09.06.2020 fra <https://www.google.com/maps/@62.2210895,5.879684,15294m/data=!3m1!1e3>
- Google Maps (u.å.) Godøy tunnelen. Hentet 09.06.2020 fra <https://www.google.com/maps/@62.5057483,6.0427533,14.5z>
- Google Maps (u.å.) Gudvangatunnelen. Hentet 09.06.2020 fra <https://www.google.com/maps/@60.8623347,6.6443491,9.75z>
- Google Maps (u.å.) Karmøy tunnelen. Hentet 09.06.2020 fra <https://www.google.com/maps/@59.3124544,5.3193848,13z>
- Google Maps (u.å.) Nordkapptunnelen. Hentet 09.06.2020 fra <https://www.google.com/maps/@70.9218154,25.5608196,10.75z>

- Google Maps (u.å.) Oslofjordtunnelen. Hentet 09.06.2020 fra <https://www.google.com/maps/@59.6650943,10.6051314,13.46z>
- Google Maps (u.å.) Skatestraumtunnelen. Hentet 09.06.2020 fra <https://www.google.com/maps/@61.871993,5.1994925,13z>
- Grønmo, S. (1982). Forholdet mellom kvalitative og kvantitative tilnæringer i samfunnsforskningen i Holter, H. & Kalleberg, R.: Kvalitative metoder i Samfunnsforskning. Oslo: Universitetsforlaget
- Hattrem, H. & Silseth, I. (2013, 30.03) Vogntog tok fyr i Gudvangatunnelen – fire til sykehus. VG. Hentet fra <https://www.vg.no/nyheter/innenriks/i/kJ0ykj/vogntog-tok-fyr-i-gudvangatunnelen-fire-til-sykehus>
- Husby, O. (1999) *Usikkerhet som gevinst: styring av usikkerhet i prosjekter: mulighet – risiko, beslutning, handling*. Trondheim: Norsk senter for prosjektledelse.
- Ingason, H. (2012) Fire dynamics in tunnels. . I Beard A. og Carvel, R. (2012) *The Handbook of Tunnel Fire Safety* 2nd edition (s. 273-307). USA: ICE Publishing.
- Jagger, S. & Grant , G. (2012) The use of tunnel ventilation for fire safety. I Beard A. og Carvel, R. (2012) *The Handbook of Tunnel Fire Safety* 2nd edition (s. 177-216). USA: ICE Publishing.
- Justis- og Beredskapsdepartementet (2017) *Nasjonal transportplan 2018-2029* (St. Meld. 33) Utgiversted: Justis- og Beredskapsdepartementet.
- Johansen, E. N. & Granli, L. (2018) Her velter røyken ut fra den undersjøiske tunnelen. NRK. Hentet fra https://www.nrk.no/vestland/lange-koar-pa-e39-_-bomlafjordtunnelen-stengd-etter-bilbrann-1.14243339
- Kollegiet for Brannfaglig Terminologi (u.å.) Faguttrykk. Hentet fra <http://www.kbt.no/faguttrykk.asp>
- Leveson, N. (2011). *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*. Cambridge, Mass: The MIT Press.
- Lunde, I. (2014). *Praktisk krise- og beredskapsledelse*. Oslo: Universitetsforlaget
- Mitchell, U. & Skretting, T. (2013, 11.08) Brann i vogntog skapte trafikkaos i Rennfast. *Aftenposten*. Hentet fra <https://www.aftenposten.no/norge/i/0nEvB/brann-i-vogntog-skapte-trafikkaos-i-rennfast>
- Moen, T., & Karlsdóttir, R. (2011). Sentrale aspekter ved kvalitativ forskning. Trondheim: Tapir akademisk.
- Morse, J., & Richards, L. (2002). Read me first for a user's guide to qualitative methods. Thousand Oaks, Calif: Sage.
- National Academy of Engineering (US) (1986) *Dealing With Uncertainty About Risk in Risk Management*. I National Academy og Engineering (1986) *Hazards: Technology and Fairness*. Washington: National Academies Press (US). Hentet fra <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK217564/>

- Njå, O. & Borg, A. (2013) Concept of Validation in Performance-Based Fire Safety Engineering. *Safety Science*, 52, s. 57-64. Hentet fra <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.03.011>
- Njå, O. & Svela, M. (2017). *A review of competencies in tunnel fire response seen from the first responders' perspectives*. Fire safety journal. ISSN 0379-7112. Volum 97. s. 137-145. Hentet fra <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.05.005>
- Njå, O., Sommer, M., Rake, E. L., & Braut, G. S. (2020) *Samfunnssikkerhet. Analyse, styring og evaluering*. Oslo: Universitetsforlaget
- NORSOK Standard (2001) Z-013. Risiko- og beredskapsanalyse. Oslo: Norwegian Technology Centre
- Norsk Standard (2016) *NS 5834:2016: Samfunnssikkerhet. Beskyttelse mot tilsiktede uønskede handlinger. Planlegging av sikringstiltak i bygg, anlegg og eiendom*.
- NOU 2006:6 (2006) *Når sikkerheten er viktigst*. Oslo: Justis- og Beredskapsdepartementet.
- Nævestad, T. & Meyer, S. (2012) Kartlegging av kjøretøybranner i norske vegtunneler 2008-2011. Transportøkonomisk institutt: Oslo.
- PIARC (u.å.) Ventilation design and dimensioning. *Road Tunnels Manual*. Hentet fra: <https://tunnelsmanual.piarc.org/en/strategy-and-general-design-ventilation-concepts/design-and-dimensioning>
- Ramsdal, R. (2013, 09.08) Slik sikret de dødstunnelen gjennom Mont Blanc. *Teknisk Ukeblad*. Hentet fra <https://www.tu.no/artikler/slik-sikret-de-dodstunnelen-gjennom-mont-blanc/234905>
- Reason, J. (1997). *Managing the Risks of Organizational Accidents*. New York: Ashgate Publishing
- Sandø, T. (2013, 29.09) Brannvesenet bekymret over alle brannene i Byfjordtunnelen. *Stavanger Aftenblad*. Hentet fra <https://www.aftenbladet.no/lokalt/i/xQ3Wp/brannvesenet-bekymret-over-alle-brannene-i-byfjordtunnelen>
- Sklet, S. (2006) Safety barriers: Definition, classification, and performance. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* (19:5), s. 494-506. Hentet fra <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2005.12.004>
- Statens Havarikommisjon for Transport (2013) *Rapport Vei 2013/05 Rapport om brann i vogntog på RV 23, Osloffjordtunnelen, 23. juni 2011*. Lillestrøm: Statens Havarikommisjon for Transport.
- Statens Havarikommisjon for Transport (2015) *Rapport Vei 2015/02. Rapport om brann i vogntog på E16 i Gudvangatunnelen i Aurland 5. august 2013*. Lillestrøm: Statens Havarikommisjon for Transport.
- Statens Havarikommisjon for Transport (2016, a) *Rapport Vei 2016/05 Rapport om brann i tanktilhenger i Skatestratumtunnelen i Sogn og Fjordane 15. juli 2015*. Lillestrøm: Statens Havarikommisjon for Transport.

- Statens Havarikommisjon for Transport (2016, b) *Rapport Vei 2016/03 Rapport om bussbrann i Gudvangatunnelen på E16 i Aurland 11. august 2015*. Lillestrøm: Statens Havarikommisjon for Transport.
- Statens Havarikommisjon for Transport (2018) *Rapport Vei 2018/04 Rapport om brann i vogntog på RV 23, Oslofjordtunnelen 5. mai 2017*. Lillestrøm: Statens Havarikommisjon for Transport.
- Skovro, T. L. S. & Storvik, H. F. (2015, 15.07) Vegvesenet – Rein flaks at det gjekk bra. *NRK*. Hentet fra https://www.nrk.no/vestland/vegvesenet_-rein-flaks-at-det-gjekk-bra-1.12458674
- Solberg, M. G. (2019, 02.12) Vet du hva du skal gjøre om det brenner i en tunnel? *Teknisk Ukeblad*. Hentet fra <https://www.tu.no/artikler/vet-du-hva-du-skal-gjore-om-det-brenner-i-en-tunnel/480224>
- Standard Norge (2020, 04.01) Standardisering. Hentet fra <https://www.standard.no/standardisering/>
- Statens Vegvesen (2001) *Håndbok 144: Kvalitetshåndbok for Statens Vegvesen*. Oslo: Vegdirektoratet. Hentet fra <http://hdl.handle.net/11250/2607432>
- Statens Vegvesen (2007) *TS 2017:11 Veileder for risikoanalyser av vegtunneler (Revidert)* Oslo: Vegdirektoratet. Hentet fra <https://www.vegvesen.no/attachment/61037>
- Statens Vegvesen (2010) *Håndbok 021 Vegtunneler*. Oslo: Vegdirektoratet
- Statens Vegvesen (2014a) *Håndbok R610 Standard for drift og vedlikehold av riksveger*. Oslo: Vegdirektoratet
- Statens Vegvesen (2014b) *Håndbok N500 Vegtunneler*. Oslo: Vegdirektoratet.
- Statens Vegvesen (2017) *Håndbok N601 Elektriske anlegg*. Oslo: Vegdirektoratet
- Statens Vegvesen (2018). Prosessgrensesnitt. Hentet fra <https://www.mercell.com/nb-no/m/file/getfile.ashx?id=40582049>
- Statens Vegvesen (2018, 28.03) Vegtunneler. Hentet fra <https://www.vegvesen.no/fag/teknologi/tunneler>
- Statens Vegvesen, Politiet, Trygg Trafikk, Utdanningsdirektoratet, Kommunesektorens Organisasjon & Helsedirektoratet (2018) *Nasjonal tiltaksplan for trafiksikkerhet på veg 2018-2021*. Oslo. Hentet fra <https://www.vegvesen.no/trafikkinformasjon/trafiksikkerhet/kampanjer>
- Statens Vegvesen (2019a, 13.11) Monterer nye vifter i Oslofjordtunnelen – nattestengt tunnel i fire uker. Hentet fra <https://www.vegvesen.no/om+statens+vegvesen/presse/nyheter/lokalt/Region+%C3%98st/monterer-nye-vifter-i-oslofjordtunnelen-nattestengt-tunnel-i-fire-uker>
- Statens Vegvesen (2019b) *Håndbok R511 Sikkerhetsforvaltning av vegtunneler*. Oslo: Vegdirektoratet

- Statens Vegvesen (2019c) *Ventilasjonsstyring i ettløps-tunneler med toveis trafikk. Funksjonsspesifikasjon*. Utgave 06
- Statens Vegvesen (2019d) Om håndbøkene. Hentet fra <https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/handboker/om-handbokene/om-handbokene>
- Statens Vegvesen (2020) *Håndbok N500: Vegtunneler*. Oslo: Vegdirektoratet
- Statens Vegvesen (u.å.) Trafikkdata. Nordkapptunellen. Hentet fra <https://www.vegvesen.no/trafikkdata/start/utforsk?datatype=volume&display=chart&rom=2019-09-06&lengthRanges=%5B..%5C%2C5.6%2C%5B12.5%5C%2C16.0%2C%5B16.0%5C%2C24.0%2C%5B24.0%5C%2C..%2C%5B5.6%5C%2C7.6%2C%5B7.6%5C%2C12.5%2Cunknown&trpids=66106V930299>
- Technical Committee 5 Road Tunnels (1996) *Road Tunnels: Emissions, Environment, Ventilation*. Frankrike: PIARC. Hentet fra <https://www.piarc.org/en/order-library/3908-en-Road%20Tunnels:%20Emissions,%20Environment,%20Ventilation>
- Technical Committee 5 Road Tunnels (2007) *Systems and equipment for fire and smoke control in road tunnels*. Frankrike: PIARC. Hentet fra <https://www.piarc.org/en/order-library/5425-en-systems%20and%20equipment%20for%20fire%20and%20smoke%20control%20in%20road%20tunnels.htm>
- Thagaard, T. (2010) *Systematikk og innlevelse. En innføring i kvalitativ metode*. (3. utg.). Bergen: Fagbokforlaget.
- Thornberg, R. (2012) Informed grounded theory. *Scandinavian Journal of Educational Research*. 56(3): 243-259.
- Tunnelsikkerhetsforskriften (2007) Forskrift om minimum sikkerhetskrav til visse vegtunneler (FOR-2007-05-15-517). Hentet fra <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2007-05-15-517>
- Vegloven (2014) Lov om vegar (LOV-1963-06-21-23) Hentet fra <https://lovdata.no/dokument/NL/lov/2019-06-21-68>
- Yin, R. (2003). *Case study research : Design and methods* (3rd ed., Vol. Vol. 5, Applied social research methods series). Thousand Oaks, Calif: Sage.
- Yin, R. (2018). *Case study research and applications : Design and methods* (Sixth ed.). Los Angeles: SAGE.

VEDLEGG

Vedlegg A: Aktørenes ansvarsområde og -fordeling

I dette vedlegget forklares det hvilket ansvar som ligger hos de nevnte aktørene i oppgaven. Hensikten med vedlegget er å tydeliggjøre ansvarsfordeling. Informasjonen er innhentet fra datamateriale, herunder beredskapsplaner som er analysert, samt fra seminaret for nødetater i Kongsberg og aktørenes egne nettsider.

Politiske myndigheter

Politiske myndigheter inkluderer Stortinget og Regjeringens politikk og føringer. Disse regulerer aktivitet ved hjelp av å utvikle lover og forskrifter som gir føringer for utbygging og dimensjonering. Vegtrafikkloven, Vegloven, Plan- og bygningsloven og Brann og eksplosjonsvernloven inngår blant disse.

Statens Vegvesen (SVV)

Statens Vegvesen er eier av riksvegtunnelene, og derfor òg forvalter av tunnelene på disse vegene. Med dette menes at de har direkte ansvar for daglig drift og vedlikehold av infrastruktur, blant annet styringssystemene for tunneler, slik at funksjonene i tunnelen ivaretas (Statens Vegvesen, 2001). Ved utbygging, kan SVV operere som byggherre og prosjektansvarlig. I etterkant av en ulykke skal Statens Vegvesen rydde skadestedet og normalisere forholdene slik at tunnelene igjen blir åpnet for trygg trafikk. SVV har òg ansvar for trafikkavvikling, avviksbehandling og iverksetting av beredskapstiltak, knyttet til evakuering og redning ved en ulykke. Vegdirektoratet i SVV er underlagt Samferdselsdirektoratet. Vegdirektoratet har forvaltnings- og tilsynsoppgaver i forbindelse med veglovene. Dette medfører ansvar for å samarbeide med myndigheter, føre tilsyn ved befaringer og dokumentere tunnelsikkerhetsarbeid.

Statens Vegvesen har òg et ansvar i forbindelse med veiledning og tilsyn av føreropplæring, samt registreringer av kjøretøy og kjøretøykontroller (Statens Vegvesen, 2001).

Vegtrafikksentralen (VTS)

Statens Vegvesen har ansvar for å drifte en vegtrafikksentral. Vegtrafikksentralen overvåker alle tunneler og vegtrafikk, og har ansvar for å oppdatere innsatspersonell om situasjoner i tunnelene. VTS skal varsle politi eller brannvesen ved hendelser og bistå nødetatene, samt

varsle operative enheter ved iverksetting av konsekvensreducerende tiltak. Vegtrafikksentralen kan kommunisere med viktige meldinger over radionettet i tunnelene, for å varsle trafikanter.

Statens Havarikommisjon for Transport (SHT)

Statens Havarikommisjon for Transport er en undersøkelseskommissjon, og har ansvar for å granske ulykker knyttet til luftfart, veitrafikk, jernbane eller sjøfart. De blir kontaktet ved behov for gransking av ulykker, og samler sammen informasjon, fremmer sikkerhetstilrådninger og finner avvik etter undersøkelser, som kan forebygge fremtidige transportulykker. SHT er en uavhengig kommissjon, og tar ikke stilling til strafferettslig skyld eller ansvar (SHT, 2013; 2016a; 2016b; 2018). Rapportene som SHT har utarbeidet blir brukt i denne oppgaven for å eksemplifisere tidligere hendelser og illustrere hvordan ventilasjonssystemet driftes.

Nødetater

Med nødetater menes henholdsvis Politi (112), Brann- og redningssentralene (110) og Akuttmedisinsk kommunikasjonsentral (AMK, 113).

Politiet har overordnet myndigheten på vegen. Dette betyr et ansvar som innsatsledelse ved hendelser i det dem ankommer et ulykkessted. Politiet skal òg sikre skadested, gjennomføre etterforskning og tildele annet ansvar på skadestedet. I forkant har politiet ansvar for å gjennomføre øvelser og utarbeide og evaluere egne innsatsplaner.

Brann- og redningssentralen har ansvar for å registrere nødmeldinger og overføre tilgjengelig informasjon om brannforløpet. Brannvesenet har innsatsledelse frem til politiet ankommer. Videre skal brigadesjef eller innsatsleder hos brann klargjøre et skadested, før de tar seg inn i tunnelen for å utføre assistert redning eller slokke en brann. Brann- og redningssentralen har tilgang til å utføre røykkontroll og gi signaler i tunnelen gjennom et nødstyrepanel på utsiden av tunnelene. Brann- og redningssentralen skal kjenne til tunnelen og sikringsutstyr som er tilgjengelig.

AMK har ansvar for å varsle VTS og samarbeide med innsatspersonellet. Ambulansepersonellens ansvar er å organisere en innsats for liv og helse på skadestedet, samt gjennomføre øvelser og ha kunnskap om tunnelsikringsutstyret.

Trafikanter

For at nullvisjonen skal nås, er det viktig at trafikanter forholder seg til gitte regler og føringer, samt tar imot informasjon ved en hendelse og er klar over eget ansvar. Vegtrafikkloven § 3 sier

grunnleggende at «Enhver skal ferdes hensynsfullt og være aktpågivende og varsom så det ikke kan oppstå fare eller voldes skade og slik at annen trafikk ikke unødig blir hindret eller forstyrret.». Statens Vegvesen kommer med fem følgende tips ved tunnelbrann i ettløpstunneler (Solberg, 2019):

- Ikke kjør inn i tunnelen ved rødt lys, skilt som informerer om at tunnelen er stengt, eller ved stengte bommer.
- Handle raskt, ikke vent på hjelp.
- Redd deg selv, og hjelp andre. Om mulig, snu og kjør ut av tunnelen.
- Bruk nødtelefonen i tunnelen fremfor egen mobiltelefon. Nødtelefonen er direkte koblet til Vegtrafikksentralen.
- Lytt til trafikkmeldinger på radioen.

Mer informasjon om tunnelvett kan leses på www.vegvesen.no/tunnel

Entreprenører, prosjekterende aktører og leverandører

Entreprenører og leverandører kan bestå av ulike offentlige og private aktører eller bedrifter som har ansvar for ulike deler av bygging av et veganlegg, eller levering av tekniske installasjoner. Disse har et felles ansvar for å ivareta sikkerhet ved deres kompetanse og valg av materiale og løsninger. De skal forholde seg til lover og krav som er spesifisert i kontraktene. Et eksempel på dette kan være et konsulentselskap som utfører sikkerhetsvurderinger for tunnelen, en leverandør av vifteanlegget, entreprenører som prosjekterer nybygg, eller selskaper som får kontrakter for annet utførende arbeid i tunnelene.

Vedlegg B: Respondenter

Kode	Respondent	Nøkkel-informasjon	Erfaring Ansettelsesforhold og ansvar
R1	Respondent Brannvern- leder 1	Mann. Utdannet elektroingeniør	Ansatt som tunnelforvalter og brannvernleder for fylkeskommunen, tidligere SVV i snart syv år. Forvaltnings- og oppsynsansvar.
R2	Respondent Brannvern- leder 2	Kvinne. Utdannet branningeniør	Jobber som brannvernleder i SVV, foreløpig i fire år. Har nylig òg blitt praktisk tunnelforvalter. Jobbet tidligere i brannvesenet med forebyggende arbeid.
R3	Respondent Brannvern- leder 3	Mann. Ingeniør innen elkraft	Brannvernleder og tunnelforvalter i fylkeskommunen. Tidligere arbeidet med tunnelinstallasjoner.
R4	Respondent Brannvern- leder 4	Mann. Utdanning ikke oppgitt	Tunnelforvalter i fylkeskommunen og brannvernleder. Tidligere jobbet som teknisk sjef og brannsjef i en kommune.
RB1	Respondent Brannvesen 1	Mann. Brannmester	Jobbet i brannvesenet i 33 år. Utrykningsleder i brigaden, og tar avgjørelser for sikkerhetsstyring ved tunnelbrann
RB2⁶	Respondent Brannvesen 2	Mann. Brigadesjef	Jobbet i brannvesenet i 36 år. Brigadesjef og innsatsleder for brann.
RB3⁶	Respondent Brannvesen 3	Kvinne. PhD stipendiat	Forsker på kompetanseutvikling i brannvesenet i samarbeid med UiS.
RS1	Respondent Tunnel- sikkerhet 1	Mann. Senioringeniør	Jobber med forskning og utvikling av tunnelteknologi i Vegdirektoratet. Har vært involvert i internasjonalt tunnelarbeid.
RS2	Respondent Tunnel- sikkerhet 2	Mann. Utdannet sivilingeniør	Jobber i SVV og har lang erfaring og ansvar innen prosjektering, vegplanlegging og tunnelventilasjon
RS3	Respondent Tunnel- sikkerhet 3	Kvinne. Sivilingeniør innen bygg og anlegg	Sikkerhetskontrollør i SVV, utnevnt at tunnelforvalter for å påse at minimum tunnelsikkerhetskrav er ivaretatt gjennom sikkerhetsdokumentasjon i henhold til Tunnelsikkerhetsforskriften
RS4	Respondent Tunnel- sikkerhet 4	Mann. Utdannet elektriker og elektroingeniør	Teknisk faglig rådgiver i SVV. Har prosjektert for tunnelsikkerhet og jobbet med beslutningsarbeid og analyser ved valg av ventilasjon.
RK	Respondent Konsulent	Mann. Seniorrådgiver	Erfaring med tunnelsikkerhet og tunnelautomasjon i et prosjekterende og rådgivende konsultantselskap. Har ansvar for dimensjonering av ventilasjon i ettløpstunneler.
RV	Respondent Vegtrafikk- sentralen	Mann. Seniorrådgiver	Har faglig ansvar for opplæring av trafikkoperatører for VTS i Norge. Tidligere trafikkoperatør i VTS, og har òg prosjektert og testet tekniske anlegg i tunnel.

⁶ RB2 og RB3 ble intervjuet samtidig, og er begge tilknyttet samme brannvesen.

Vedlegg C: Intervjuguide

Intervjuguide

I forbindelse med en masteroppgave i Teknisk Samfunnssikkerhet ved UiS ønskes det å belyse hvordan mekanisk ventilasjon er etablert i tunnelsikkerhetsarbeidet ved brann i tunnel. Nedenfor er det formulert en intervjuguide som danner strukturen for intervjuet. Hensikten med intervjuguiden er å komme i dybden og knytte erfaringer på valg av ventilasjonssystem og styringsprinsipper i et utvalg tunneler, og det er derfor ønskelig at respondenten forbereder seg tilstrekkelig i forkant av intervjuet.

Introduksjon

Kan du først fortelle om din bakgrunn og erfaring?

Kan du fortelle litt om ansvaret du har i forbindelse med brann i tunnel?

Design av ventilasjonssystemet

Hva mener du bør ligge til grunn for valg av kriterier for dimensjonering av sikkerhetsutstyr i tunnel?

Hvem designer ventilasjonssystemet? Har du innflytelse på tilpasning av design?

Hvor kan man finne tilgjengelig dokumentasjon for designet?

Hvordan vil du si at design for ventilasjonssystem har utviklet seg over tid?

Hvordan håndteres usikkerhet for dimensjonering av tunnelbrann?

Synes du det i utgangspunktet var et godt design relatert til grunnleggende behov?

Drift av ventilasjon

Hvilken erfaring har du med drift av ventilasjon?

Hvordan gjennomføres kontroll på at ventilasjon og utstyr fungerer i ulike situasjoner?

Hva må til før vifter vedlikeholdes?

Hva er de viktigste funksjonene for mekanisk ventilasjon ved brann i tunnel?

Hvilke kriterier og begrensinger gir bruk av ventilasjon?

Hvilket potensial tror du ventilasjonsanlegget kan ha ved brann?

Er du selv fornøyd med hvordan ventilasjon driftes i dag?

Tunnelsikkerhet og samvirke

Hva legger du i begrepet tunnelsikkerhet?

Hva må til for å opprettholde god tunnelsikkerhet?

Hvor sannsynlig anser du risikoen for en tunnelbrann?

Har du erfaring med hvordan beslutningsarbeid gjennomføres med hensyn på tunnelsikkerhet og mekanisk ventilasjon?

Hvordan fungerer samvirke i praksis ved tunnelbrann?

Hvem anser du som mest kompetente for ventilasjon?

Hvem samarbeider du med i forbindelse med tunnelsikkerhet?

Til slutt

Har du noen antakelser om hva som kommer til å skje med tunnelsikkerhetsutviklingen i fremtiden?

Er det noe annet du ønsker å legge til?

Vedlegg D: Samtykkeerklæring

Samtykkeerklæring

Bakgrunn og formål

I forbindelse med en masteroppgave i Teknisk Samfunnssikkerhet ved Universitetet i Stavanger (UiS), skal jeg gjennomføre intervjuer. Tematisk omhandler masteroppgaven design, dimensjonering og styring av mekanisk ventilasjon ved brann i tunnel. Formålet er å belyse hvilken praksis som gjennomføres og hvilken rolle ventilasjonssystemet har i tunnelsikkerhetsarbeidet.

Hva innebærer deltakelse i oppgaven?

De utvalgte som blir intervjuet representeres gjennom deres deltakelse knyttet til tunneler, ventilasjonsanlegg og/eller brannekspertise. For deg innebærer dette at informasjonen som blir gitt, blir behandlet som datamateriale i oppgaven. For at datamaterialet skal være mest mulig troverdig og for å analysere de funnene som er gjort, ønskes det å benytte lydopptak av intervjuet. Opptaket vil kun bli hørt av undertegnede, og transkribert før det blir slettet. Ved ferdig sensurering av ferdigstilt masteroppgave, vil også filen med transkriberingen bli slettet.

Det er ønskelig å sikre konfidensialitet for informantene, så intervjuet vil bli anonymisert. Dersom det er ønskelig, kan du/dere få tilgang til og godkjenne gitt informasjon som brukes i oppgaven før levering. Dette må gis beskjed om i god tid før innlevering av oppgaven, senest 1. juni 2020 for at det skal være tilstrekkelig tid til gjennomlesing og eventuell korrigerings.

Å delta i oppgaven er frivillig, og du kan når som helst trekke deg uten å oppgi grunn. Ved spørsmål kan du henvende deg på e-post eller på telefon.

Dersom du ønsker å henvende deg til oppgavens veileder ved UiS for spørsmål som ikke kan besvares ellers, kan du kontakte Ove Njå. Veileder er ikke ansvarlig for masteroppgaven.

Samtykke til deltakelse:

Ved å signere erklæringen godtar du at opplysningene som er gitt under intervju kan benyttes videre i oppgaven.

.....
Silje Marie Gusfre Angell
Masterstudent i Teknisk Samfunnssikkerhet
Universitetet i Stavanger

.....
Respondent

Vedlegg E: Oversikt over analyserte dokumenter

Tunnel	Nr.	Dokumenttittel	Utgivelsesdato	Utgiver
Rennfasttunnelene (Byfjord- og Mastrafjordtunnelen)	1	Innsatsplan for Statens Vegvesen v/VTS ved stenging av: EV39 Byfjordtunnelen	u.å.	SVV
	2	Aksjonskart del 1 og del 2 for E39 Byfjord	u.å.	SVV
	3	Byfjordtunnelen. Beredskapsplan for tunneler. Region vest – spesiell del	2014	SVV
	4	Notat om utskiftning av tunnelvifter til Statens Vegvesen	2012	Multiconsult
	5	Aksjonskart del 1 og del 2 for E39 Mastrafjord	u.å.	SVV
	6	Mastrafjordtunnelen. Beredskapsplan for tunneler. Region vest – spesiell del	2005	SVV
	7	Brannventilasjon Rennfast – Byfjordtunnelen og Mastrafjordtunnelen	2018	Computational Industry Technologies AS
	8	Starthastighet Brannventilasjon, teknisk avklaring	2014	SVV, Norconsult
	9	Beredskapsplan tunnel. Byfjordtunnelen. E39. Randaberg og Stavanger kommuner.	2020 (Under revidering)	SVV
	10	Risikovurdering i forbindelse med oppgradering av Rennfast	2017	Proactima
Bømlafjordtunnelen	11	Beredskapsplan spesiell del for Bømlafjordtunnelen	08.04.2019	SVV
	12	Tilleggsplan vedrørende elektrooppgradering av E39 Bømlafjordtunnelen. Tidsperiode: 07.11.2016-01.07.2018	2016	SVV
	13	Kontroll av ventilasjonsanlegget i Bømlafjordtunnelen	2016	SVV
		Aksjonskart Bømlafjordtunnelen	2018	SVV
	14	Utkast til Beredskapsplan tunnel del 2 spesiell del for E39 Bømlafjordtunnelen.	2019	SVV
Eiksund-tunnelen	15	Beredskapsplan Eiksundtunnelen	2016	SVV
	16	Innsatskort Fv 653 Eiksundtunnelen	u.å.	SVV
	17	Oversiktstegning Eiksundsambandet	2008	SVV
Godøy-tunnelen	18	Beredskapsplan for Region Midt	2017	SVV
	19	Beredskapsplan spesiell del for Fv. 658 Godøytunnelen	2018	SVV

	20	Beredskapsplan teknisk del for Fv. 658 Godøytunnelen	2019	SVV
	21	Møtoreferat fra HAZID-samling	08.03.2016	EFLA
	22	Risikoanalyse av Godøytunnelen	2016	EFLA
	23	TUSI-beregninger Godøytunnelen	2016	-
Gudvangatunnelen	24	Rapport om bussbrann i Gudvangatunnelen på E16 i Aurland 11. august 2015	2016	SHT
	25	Rapport om brann i vogntog på E16 i Gudvangatunnelen i Aurland 5. august 2013	2015	SHT
	26	Beredskapsplan for E16 Gudvangatunnelen	2015	SVV
	27	Tidslinje for brann i Gudvangatunnelen 11.08.2015	2015	SVV
	28	Ventilasjon, røyk og CO nivå i Gudvangatunnelen 11.08.2015	u.å.	SVV
	29	Tidslinje for brann i Gudvangatunnelen 5.8.2013	Revidert i 2014	SVV
	30	Midlertidig beredskapsplan. Gudvanga- og Flenjatunnelen	2019	SVV
	31	Notat om E16 Gudvangatunnelen, drift av ventilasjonsanlegget 05.08.2013	2013	SVV
	32	E16 Tunneloppgradering Gudvangatunnelen og Flenjatunnelen. Elektroinstallasjoner	2016	SVV
	33	Planhefte for Gudvangatunnelen elektroinstallasjoner. Konkurransegrunnlag (Tekniske teikningar)	2017	SVV
Karmøy-tunnelen	34	Beredskapsplan for Karmøy-tunnelen	2013	SVV
	35	Plassering og styring av vifter	2012	SVV
	36	Aksjonskart for «T-forbindelsen»	u.å.	SVV
	37	Brannplaner for ulike scenarier	u.å.	SVV
	38	Styring av vifter Karmøy-tunnelen	2012	SVV
Nordkapp-tunnelen	39	Aksjonskart for Ev69 Nordkapp-tunnelen	2009	SVV
	40	Beredskapsplan for Nordkapp- og Honningsvågtunnelen	2013	SVV
	41	Risikoanalyse Nordkapp-tunnelen 2019	2019	SVV
Oslofjord-tunnelen	42	Sikkerhetstiltak for E134 Oslofjordtunnelen	08.11.2019	SVV
	43	Beredskapsplan del 2 spesiell del for E134 Oslofjordtunnelen	2019	SVV
	44	Utkast til nytt kapittel for Brannventilasjon til beredskapsplan del 2	u.å.	SVV
	45	Rapport etter hendelse: Rv. 2 Oslofjordtunnelen brann, 05.05.2017	31.08.2017	SVV

Oslofjordtunnelen	46	Rapport om brann i vogntog på RV 23, Oslofjordtunnelen 5. mai 2017	2018	SHT
	47	Rapport om brann i vogntog på RV 23, Oslofjordtunnelen, 23. juni 2011	2013	SHT
	48	Oslofjordforbindelsen TU-01 Ventilasjonsberegninger	2015	SVV & Aas Jacobsen
	49	Monteringsanvisning for JM Aerofil Aksialvifte	u.å.	Ventistål AS
	50	Technical Data Sheet Jetfoil – JMTS Reversible 1D Silencers	2017	Fläktwoods
Skatestratumtunnelen	51	Beredskapsplan for Fv 616 Skatestratumtunnelen	2016	SVV
	52	Aksjonskart for Skatestratumtunnelen	2016	SVV
	53	Innsatsplan for Skatestratumtunnelen	2014	SVV
	54	Notat: Brannen i Skatestratumtunnelen, 15. juli 2015	2015	SVV
	55	Rapport om brann i tanktilhenger i Skatestratumtunnelen i Sogn og Fjordane 15. juli 2015	2016	SHT
	56	Viftene i Skatestratumtunnelen etter brann	2015	SVV

Vedlegg F: Detaljert prosedyre for forskningsprosessen

I januar 2020 begynte arbeidet aller først med å konstruere en fremdriftsplan. Det ble satt kortsiktige mål, slik at gjennomføringen av å sammensette en oppgave med slikt omfang følte mer overkommelig. Videre i januar ble det prioritert innsamling av relevant forskning og teorier, knyttet til sikkerhetsstyring og brann i tunnel. Hensikten med dette var å øke forståelsen og kunnskap knyttet til temaet. I slutten av januar ble arbeidsproblemstillingen endret, slik at studiet fikk en mer komparativ tilnærming. Det resulterte til at mye av forarbeidet og notater måtte erstattes, og nytt materiale måtte innhentes.

I februar startet arbeidet med å innhente datamateriale fra de utvalgte tunnelene. Parallelt med dette startet skrivingen av teori- og kontekstkapitlene. Mot slutten av februar ble det første datamaterialet analysert, det ble utformet en evalueringsmodell for hver tunnel. Fremdriftsplanen ble endret. Tidlige hendelser og rapporter fra SHT skapte struktur for hva man kunne se etter videre i datamaterialet.

Mars-måneden startet med å studere hvordan ventilasjonssystemet ble omtalt i dokumenter og medier. Samtidig ble det søkt mye etter relevant dokumentasjon, og det ble opprettet kontakt med respondenter som kunne være aktuelle for å gi innblikk i de relevante tunnelene. Flere dokumenter for de aktuelle tunnelene ble innhentet, og det kom frem at noen av dokumentene var utdaterte som følge av tunneloppgraderinger. Viruset SARS-CoV-2 satte en demper på effektiviteten halvveis i mars, som følge av at mange etablerte hjemmekontor, både undertegnede og respondenter som hadde begrenset dokument-tilgjengelighet.

I april fortsatte søket og evalueringen av relevante dokumenter, ettersom mye annet var satt på vent. Teori- og kontekstkapittelet ble i stor grad ferdigstilt. Det ble gjort et nytt forsøk på å se etter flere relevante kontaktpersoner for å intervjuer da det ble tydeliggjort hva som manglet av datagrunnlag. Analysekapittelet tok form etter hvert som materialet ble analysert.

Gjennom hele mai var fokus på å gjennomføre intervjuene. Intervjuene bidro til ferdigstilling av den innsamlede empirien og analyser. Resten av måneden bestod av å fremstille analyse- og drøftingskapittelet, samt redigering av tidligere kapitler for å skape rød tråd gjennom oppgaven.

I juni dro undertegnede på befaring til Oslofjordtunnelen, og deltok på et seminar i tilknytning nyåpning av to tunneler i Viken. De siste ukene før innlevering ble oppgaven korrekturlest og innsnevret, og sammendrag, forord og konklusjon ble ferdigstilt.

Gjennom det siste halvåret ble det tydelig at en læringsprosess ikke er lineær, men i stor grad interaktiv gjennom ulike faser av datainnsamling, tolkning av data og drøfting. Alle kapitlene ble derfor hyppig oppdatert og endret helt fra januar til juni etter hvert som oppgaven tok form, og basert på nye funn ble fremgangsmåten endret, som en del av abduktiv forskningsstrategi.