SWECO

RAPPORT

RISIKO KNYTTET TIL BRANN VED ULIKE KONSEPTER FOR SUDURØYTUNNELEN



Kunde:	Landsverk, Færøyene
Prosjekt:	Sudurøytunnelen, Risiko ved brann
Prosjektnummer:	10226294

SWECO

Sammendrag:

Landsverk, som er vegmyndighet på Færøyene, planlegger en undersjøisk vegforbindelse mellom Sandøy og Sudurøy, sør på Færøyene. Forbindelsen planlegges med tovegs trafikk i ett løp.

Minste lengde for en tunnel fra Sandøy til Sudurøy er på ca. 22 km. Andre alternativer gir tunnellengde på ca. 26 km. Forventet trafikk i sambandet er lavt, ca. 1300 ÅDT. Det er likevel usikkert om en ettløps tunnel har tilstrekkelig sikkerhet. I forbindelse med en studie relatert til geologiske og bergmekaniske forhold i tunnelen ble det foreslått ulike traseer og forskjellige utforminger av tunnelen. Det ble vurdert tre ulike traséalternativer og tre ulike sikkerhetstiltak (i tillegg til utforming med T10,5 ihht. til Håndbok N500) for tunnelen.

Brann anses for å være den mest kritiske hendelsen i en tunnel og at det vil være styrende for behovet for rømning og redning. Denne studien fokuserer på det sikkerhetsmessige aspektet for tunnelen, og vurderer spesielt risiko for brann for de ulike konseptene. Formålet med risikovurderingen er en sammenlikning av risiko for de ulike traséalternativene (tunnelalternativ 1, 2, 3 og 4) og sikkerhetstiltakene (0, 1, 2 og 3). Målet er å kunne anbefale hvilke tunnelalternativer og sikkerhetstiltak man kan gå videre med i planleggingen.

For å kunne sammenligne risiko mellom de ulike tunnelalternativene og sikkerhetstiltakene må man kunne si noe om risikoen for brann for hvert enkelt brannscenario. I arbeidet med risikoanalysen er det derfor gjort beregninger med bruk av ulike verktøy for å kunne predikere sannsynligheter og konsekvenser for ulike brannscenario i tunnelen. I tillegg er det beskrevet gjennomføring av ventilasjonsprinsipper for de ulike alternativene, for å vise beste håndtering av ventilasjon dersom en brann oppstår.

Som grunnlag for vurdering av sannsynlighet av uønskede hendelser, er det utført beregninger av de ulike tunnelalternativene med bruk av modell utarbeidet av Transportøkonomisk Institutt (TØI)[L]. Modellen baserer seg på statistikk fra norske tunneler frem til 2017. For å estimere konsekvenser ved ulike branntilfeller er det gjennomført beregninger av brannutvikling og røykspredning for å videre beregne røykens påvirkning på de evakuerende. Metodikken er en forenklet endimensjonal modell som angitt i boken Tunnel Fire Dynamics [T]. For ventilasjonsberegningene er det vurdert en strategi med langsgående ventilasjon der luft trekkes inn gjennom én tunnelmunning og sendes ut gjennom den andre. Tunnelalternativ 2 og 4 gir i tillegg muligheter til å ventilere røyk opp mot Skugvøy via henholdsvis ventilasjonssjakt og tunnelløp.

Resultatene viser at tunnelalternativene ikke gir store forskjeller i risiko, med unntak av alternativ 1 som har to tunneler og dermed økt sannsynlighet for at brann oppstår. Dette skyldes i hovedsak at man har dobbelt antall stigninger, inkludert brattere stigninger på 6% opp til Skugvøy. Det anbefales derfor at tunnelalternativ 2, 3 eller 4 bør velges på nåværende tidspunkt, med mindre man ser store økonomiske eller lokale gevinster med å etablere kjøreadkomst til Skugvøy. Konsekvensberegninger gir ikke nevneverdige forskjeller mellom de ulike sikkerhetstiltakene, med unntak av sikkerhetstiltak 0, som gir vesentlig høyere konsekvenser. Dette skyldes i all hovedsak at trafikanter må evakuere svært lange strekninger i røykfulle omgivelser. Røyken fra en brann som oppstår i midten av tunnelen vil etter hvert ta igjen de som evakuerer til fots. Det vil være begrenset hvor lenge de evakuerende tåler dette. Selv om man legger til grunn et deteksjonssystem som identifiserer brann hurtig, samt iverksetter varsling etter kort tid, vil dette trolig ikke være tilstrekkelig for å hindre fatale konsekvenser. Sikkerhetstiltak 1, 2 og 3 bidrar til tryggere selvberging i tunnelen enn tiltak 0. I et sikkerhetsmessig perspektiv anbefales det at konsepter med økt mulighet til rømning i forhold til sikkerhetstiltak 0 inkluderes i det videre planleggingsarbeidet.

Styring av ventilasjonsanlegget i en brannsituasjon vil være enklest for alternativ 1 og alternativ 3. Alternativ 2 og 4 krever flere vurderinger da de ulike tunneldelene og sjaktventilasjonen skal styres ulikt avhengig av brannscenariet som oppstår. Dette kan i verste fall medføre ventilasjon av røyk i feil retning under et brannscenario, som kan medføre fatale konsekvenser.

Rapporteringsstatus:

- Endelig
  - Oversendelse for kommentar
  - Utkast

Utformet av:	Sign.:
Vidar Dahle Martin Hagen Olav Søyseth	
Kontrollert av:	**Sign.:**
Bent Aagaard Karl Gunnar Holter, NGI	
Prosjektleder:	**Prosjekteier:**
Bent Aagaard	Torbjørn Yri

Revisjonshistorikk:

01	19.04.2022	Korrigert tunnellengder	NOVIDD	NOBENT
00	26.01.2022	Oversendelse av rapport	NOVIDD	NOBENT
Rev.	Dato	Beskrivelse	Utformet av	Kontrollert av

SWECO

Innholdsfortegnelse

1 Innledning 6
1.1 Bakgrunn og hensikt 6
1.2 Omfang og avgrensninger 6
1.3 Terminologi og forkortelser 7
2 Beskrivelse av analyseobjekt 8
2.1 Tunnelalternativer 9
2.1.1 Tunnelalternativ 1 - To etterfølgende tunneler med dagsone på Skugvøy 9
2.1.2 Tunnelalternativ 2 - Én tunnel under Skugvøy med ventileringssjakt 9
2.1.3 Tunnelalternativ 3 - Én tunnel med kortest mulig lengde 10
2.1.4 Tunnelalternativ 4 - Tunnel fra Sandøy til Sudurøy, med tunnelarm opp til Skugvøy 11
2.2 Sikkerhetstiltak 11
2.2.1 Sikkerhetstiltak 0 13
2.2.2 Sikkerhetstiltak 1 14
2.2.3 Sikkerhetstiltak 2 16
2.2.4 Sikkerhetstiltak 3 19
2.3 Beredskap 20
3 Vurderingskriterier 22
3.1 Nullvisjonens krav til et sikkert vegsystem 22
3.2 Selvbergingsprinsippet 22
3.3 Risikoaksept 22
3.4 ALARP-prinsippet 22
4 Metode 24
5 Risikovurdering av tunnelalternativer med tilhørende sikkerhetstiltak 26
5.1 Sannsynlighetsberegninger 26
5.1.1 Sannsynligheter alternativ 1 27
5.1.2 Sannsynligheter alternativ 2 28
5.1.3 Sannsynligheter alternativ 3 29
5.1.4 Sannsynligheter alternativ 4 30
5.1.5 Sannsynligheter referansetunnel 31
5.1.6 Oppsummering av sannsynlighetsberegninger 32
5.2 Konsekvensberegninger 34
5.2.1 Beskrivelse av metode for beregning av evakueringsdyktighet 34
5.2.2 Forutsetninger og inndata brann 34
5.2.3 Trafikkscenario ved brann 37
5.2.4 Brann og røykutvikling i det tidlige brannforløpet 37
5.2.5 Forutsetninger og antagelser om evakueringsadferd ved brann 38

5.2.6 Resultater brann i mindre lastebil (50 MW) 39
5.2.7 Resultater brann i vogntog (100 MW) 42
5.2.8 Resultater fra 10 km tunnel, ÅDT 4000 iht. N500 46
5.2.9 Diskusjon og oppsummering av konsekvensberegninger 47
5.2.10 Usikkerheter vedrørende pålitelighet til sikkerhetstiltak 49
5.3 Brannventilasjonsberegninger 51
5.3.1 Generelt 51
5.3.2 Ventilasjonsanlegg ved tunnelalternativ 1 (to tunneler) 53
5.3.3 Ventilasjonsanlegg ved tunnelalternativ 2 (sjaktventilasjon ved Skugvøy) 54
5.3.4 Ventilasjonsanlegg ved tunnelalternativ 3 (én tunnel) 55
5.3.5 Ventilasjon ved alternativ 4 (tunnelløp til Skugvøy) 56
5.3.6 Vurdering av de fire tunnelalternativene med tanke på brannventilasjon 57
5.4 Oppsummering av beregninger 59
6 Diskusjon 61
7 Sammenfatning og anbefaling 67
8 Referanser 69
9 Vedlegg 72
10 Vedlegg: Numerisk beregningsmodell av konsekvenser 73
10.1 Numerisk løsning av røykspredning i tunnel 73
10.2 Beregningsmetodikken FED 73
10.3 Usikkerheter i beregningsmetodikken for røykspredning og FED 74
10.3.1 Vurdering av usikkerhet av utvalgte parametere 74
10.4 Inndata med realistiske parametere / sensitivitetsanalyse 75

1 Innledning

1.1 Bakgrunn og hensikt

Landsverk, som er vegmyndighet på Færøyene, planlegger en undersjøisk vegforbindelse mellom Sandøy og Sudurøy, sør på Færøyene. Forbindelsen planlegges med ett løp, dvs. med tovegs trafikk i én tunnel og uten parallell redningstunnel. Minste lengde for en slik tunnel er på ca. 22 km.

I forbindelse med planlegging av tunnelen er det aktuelt å vurdere ulike konsepter for å finne forskjeller i kostnad og sikkerhet. Denne studien fokuserer på det sikkerhetsmessige aspektet for tunnelen, og vurderer risiko for brann for de ulike tunnelkonseptene. Brann anses for å være den mest kritiske hendelsen i en tunnel og vil være styrende for behovet for rømning og redning.

Det er foreslått fire ulike tunnelalternativer og fire ulike sikkerhetstiltak for tunnelen. Formålet med risikovurderingen er en sammenlikning av risiko mellom de ulike linjeforslagene (alternativ 1, 2, 3 og 4) og sikkerhetstiltakene (0, 1, 2 og 3). Målet er å kunne anbefale hvilke tunnelalternativer og sikkerhetstiltak man kan gå videre med.

1.2 Omfang og avgrensninger

Følgende omfang og avgrensninger ligger til grunn for analysen:

- Analysen ser kun på risiko for brannscenarier i tunnelen. Andre uønskede hendelser er ikke vurdert.
- Analysen dekker kun personrisiko under normaldrift, ikke materielle skader, miljøeffekter eller terrorisme og sabotasje. Personrisiko ved utførelse av vedlikeholdsarbeid i tunnelen dekkes ikke.
- Analysen hensyntar ikke kostnader til bygging av tunnelkonseptene.
- Analysen fokuserer ikke på kapasiteter fra nødetater.

Analysen har til hensikt å vurdere et sett med tunnelalternativer og sikkerhetstiltak, også i kombinasjon med hverandre. Se Tabell 1-1 for oversikt over tunnelalternativer og sikkerhetstiltak, videre beskrevet i kap. 0.

Tabell 1-1: Vurderte tunnelalternativer og sikkerhetstiltak

	Tunnelalternativ	**1**	**2**	**3**	**4**
Sikkerhets tiltak	**Beskrivelse**	To tunneler; dvs. kjørbart opp til Skugvøy	Én lang tunnel, Ventilasjonssjakt fra Skugvøy	Én lang tunnel	Én lang tunnel med rundkjørsel og veg opp i Skugvøy
0	Ingen spesielle sikkerhetstiltak (tiltak iht. til N500)				
1	Som 0, med redningscontainere c/c 375 m Som 0,				
2	med delt tverrsnitt for redning, Dør c/c 375 m				
3	Separat redningstunnel, Tverrtunnel c/c 375 m				

1.3 Terminologi og forkortelser

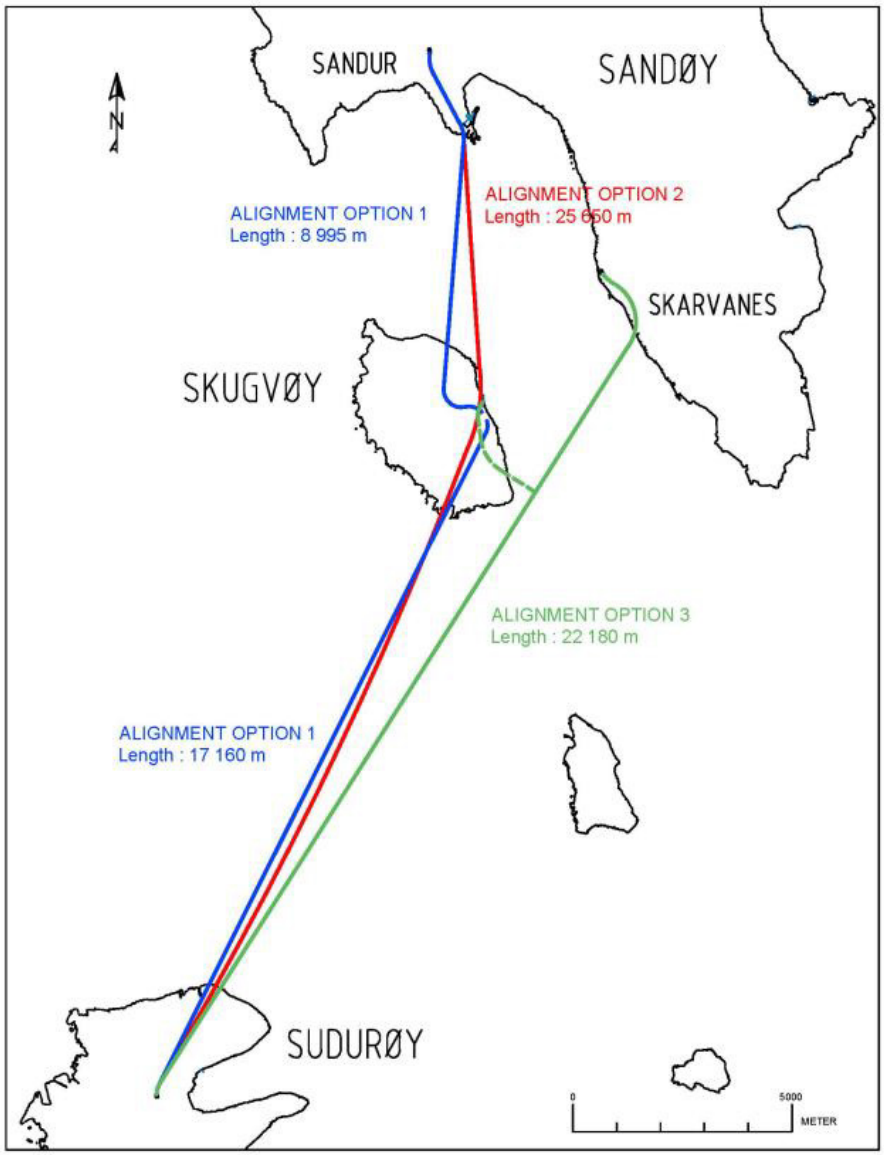
Tabell 1-2: Forkortelser

Forkortelse	Forklaring
SVV	Statens vegvesen
VTS	Veitrafikksentralen
ÅDT	ÅrsDøgnTrafikk- gjennomsnittlig antall kjøretøy per døgn
NTP	Nasjonal Transportplan
ALARP	As Low As Reasonably Practicable (Så lavt som praktisk mulig)
SHK	Statens havarikommisjon
FED	Fractional Effective Dose

2 Beskrivelse av analyseobjekt

Ulike konsepter for utførelse av Sudurøytunnelen, både mtp. trasévalg og sikkerhetsutrustning, er med i studien. I følgende kapitler er de ulike tunnelalternativene og sikkerhetstiltakene beskrevet.

Tunnelalternativene 1, 2 og 3 er hentet fra Norges Geotekniske Institutts rapport «Sudurøy subsea road tunnel, executive study» [H]. I tillegg har Landsverk ønsket at et tunnelalternativ med avgreining med veg til Skugvøy skulle være med i analysen, tunnelalternativ 4. Tunnelalternativene er vist i Figur 2-1



Figur 2-1: Tunnelalternativer som er med i studien

Tunnelalternativ 1: To etterfølgende tunneler via Skugvøy. Tunnelene blir hhv. 9km og 17km lange.

Tunnelalternativ 2: Tunnel passerer under Skugvøy med ventilasjonssjakt eller ventilasjonstunnel til Skugvøy. Tunnelen blir 25,6 km lang.

Tunnelalternativ 3: Korteste alternativ. Passerer nær Skugvøy. Gir mulighet for ventilasjon på Skugvøy. Tunnelen blir 22,2 km lang.

I tillegg er tunnelalternativ 3 vurdert med avgreiningstunnel til Skugvøy fra rundkjøring i hovedtunnelen (tunnelalternativ 4). Tunnelen opp til Skugvøy kan ha tverrsnitt T5,5. Med stigning 1 : 10 vil lengden bli ca. 1500 m.

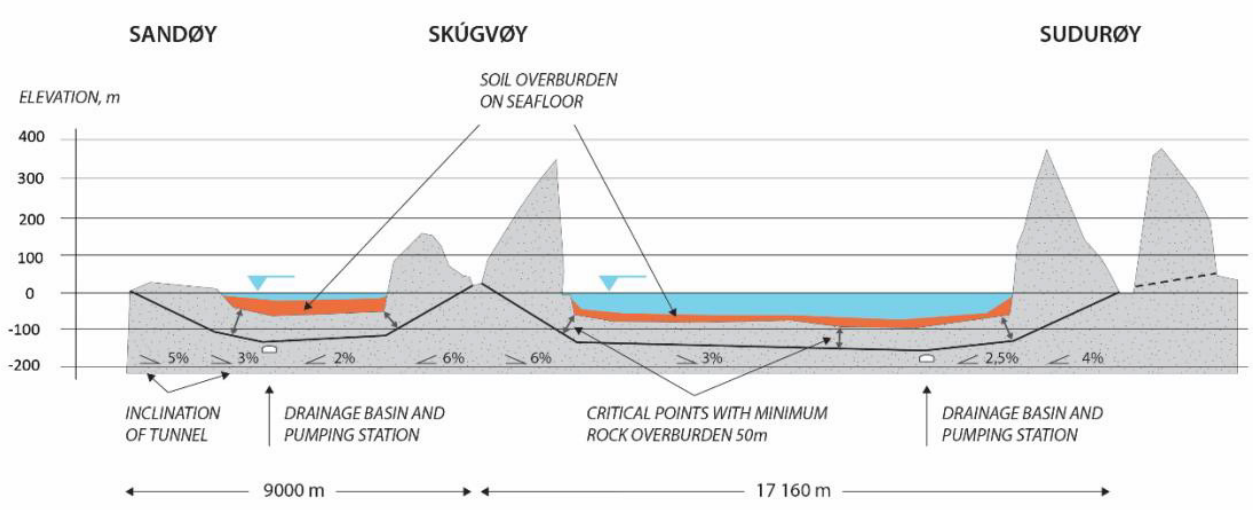
2.1 Tunnelalternativer

I de følgende delkapitlene er de ulike tunnelalternativene beskrevet ytterligere.

2.1.1 Tunnelalternativ 1 - To etterfølgende tunneler med dagsone på Skugvøy

Alternativ 1, vist i Figur 2-2Figuren viser tunnelalternativ 1 med to separate tunneler med dagsone i Skugvøy. Lengdetverrsnitt av alternativet. viser de to etterfølgende tunnelene fra Sandøy til Skugvøy (portal i Sandur) og Skugvøy til Sudurøy med lengder på omtrent 8,5km og 17,5km.

I et ventilasjons-, sikkerhets- og redningsperspektiv, representerer denne løsningen to relativt separate løsninger, både i anleggs- og driftsfase. Alternativet har relativt bratte seksjoner ved Skugvøy, med omtrent 6% stigning ved de gitte tunnellengdene. Dersom man setter krav om 5% stigning, vil tunnellengden bli noe lengre.

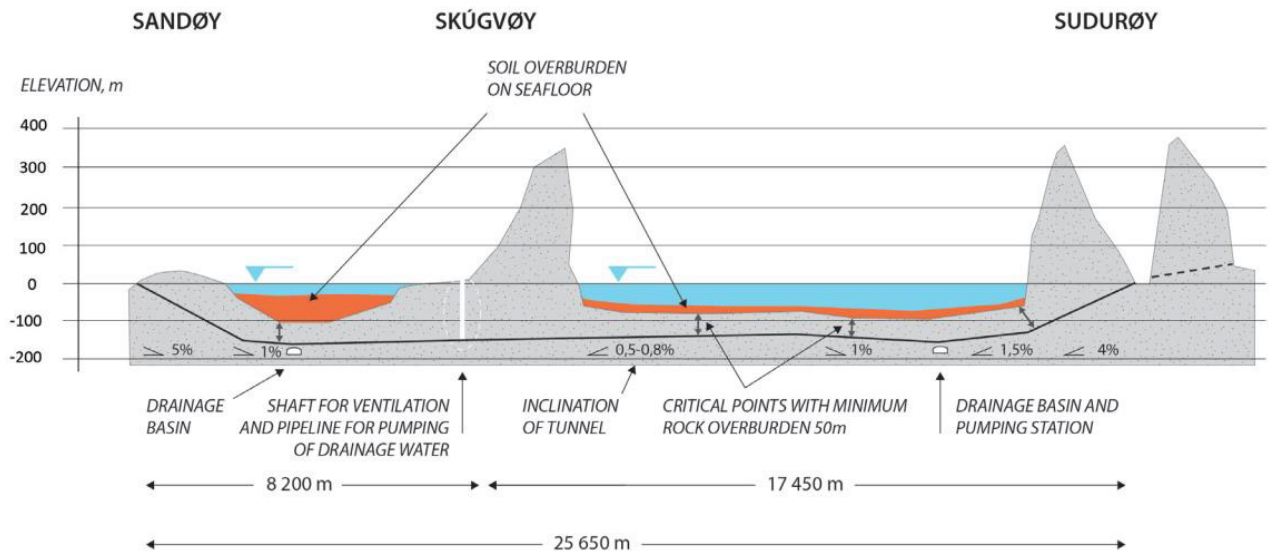


Figur 2-2: Figuren viser tunnelalternativ 1 med to separate tunneler med dagsone i Skugvøy. Lengdetverrsnitt av alternativet.

2.1.2 Tunnelalternativ 2 - Én tunnel under Skugvøy med ventileringssjakt

Tunnelalternativ 2 gir én lang tunnel fra Sandøy (portal ved Sandur) til Sudurøy, der man passerer under Skugvøy. Alternativt er vist i Figur 2-3. Tunnelen passerer under Skugvøy på et sted som gir mulighet til å bygge et sjaktsystem til ventilasjon og pumping av dreneringsvann. Systemet kan bestå av to separate sjakter eller én sjakt for å dekke behovet. Sjakten vil være vertikal.

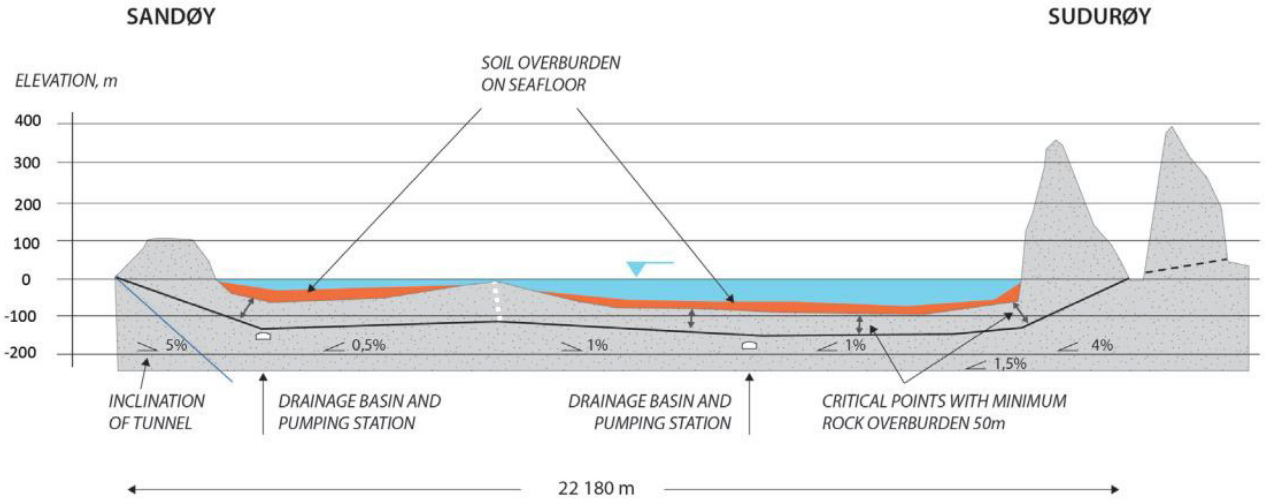
Dette alternativet gir muligheten til å seksjonere tunnelen mtp. ventilasjons- og brannperspektiv.



Figur 2-3: Figuren viser tunnelalternativ 2 med en lang tunnel som passerer under Skugvøy med ventilasjonssjakt. Lengdesnitt av alternativet.

2.1.3 Tunnelalternativ 3 - Én tunnel med kortest mulig lengde

Alternativ 3, illustrert i Figur 2-4, består av én lang tunnel med kortest mulig linje fra Sandøy (portal ved Skarvanes) til Sudurøy. Tunnelen passerer rett øst for Skugvøy. Det er dermed en mulighet å etablere ventilasjonstunnel/sjakt med tilgang til Skugvøy også for dette alternativet.



Figur 2-4: Figuren viser tunnelalternativ 3 med en lang tunnel som passerer øst for Skugvøy med mulighet for ventilasjonstunnel (tunnelalternativ 4). Lengdetverrsnitt av alternativet.

2.1.4 Tunnelalternativ 4 - Tunnel fra Sandøy til Sudurøy, med tunnelarm opp til Skugvøy

Tunnelalternativ 4 er her vurdert med avgreiningstunnel til Skugvøy fra rundkjøring eller T-kryss i hovedtunnelen (tunnelalternativ 3). Tunnelen opp til Skugvøy er planlagt med tverrsnitt T5,5. Med stigning 1 : 10 vil lengden bli ca. 1500 m.

2.2 Sikkerhetstiltak

Alternativer for sikkerhetstiltak er også hentet fra Norges Geotekniske Institutts rapport «Sudurøy subsea road tunnel, executive study» [H].

I Tabell 2-1 viser en overordnet fremstilling av de forskjellige sikkerhetstiltakene.

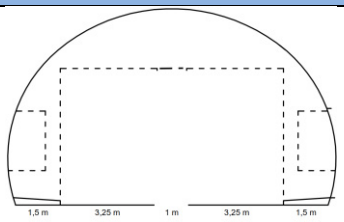
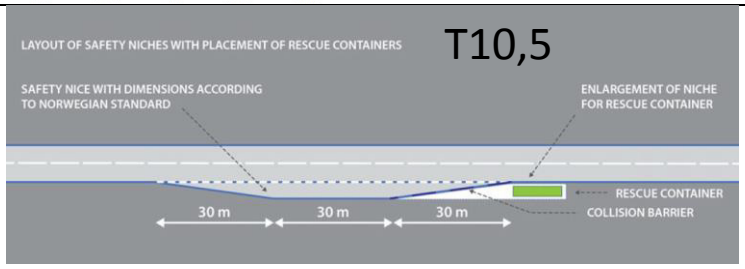
Tunnel med sikkerhetstiltak 0 er en vegtunnel med tverrsnitt og tiltak iht. til Statens vegvesens håndbok N500.

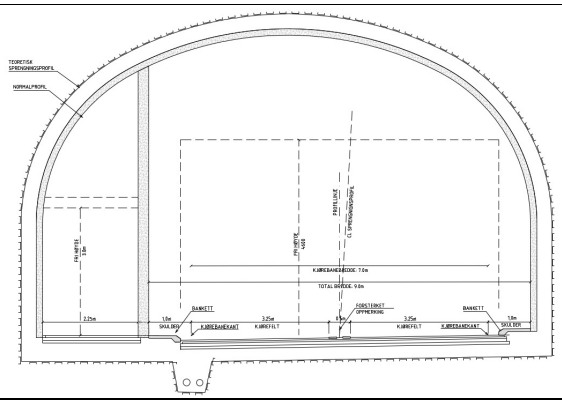
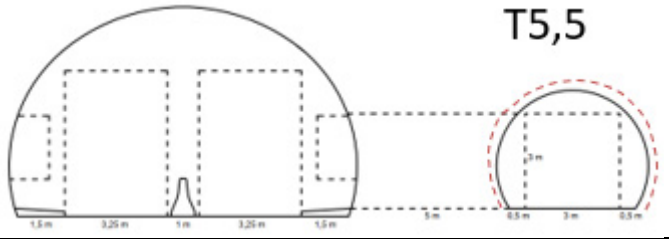
Sikkerhetstiltak 1 er likt med sikkerhetstiltak 0 mht. tunnelutforming, men er utstyrt med redningsrom/containere med avstand 375 m.

Sikkerhetstiltak 2 er en ettløps tunnel med tverrsnitt T12,5 som gir plass til etablering av en rømningskanal som løper langs den ene sideveggen fra tunnelpåhugg til tunnelpåhugg. Rømningskanalen er adskilt fra trafikktunnelen med en brannsikker vegg.

Sikkerhetstiltak 3 har separat redningstunnel, T5,5 langs hele vegtunnelen med tverrtunneler c/c 375 m.

Tabell 2-1: Sikkerhetstiltak 0 til 3

Sikker hetstiltak	Beskrivelse	Utforming
0	Ingen spesielle sikkerhetstiltak (tiltak iht. til N500)	
1	Som 0, med redningscontainere c/c 375 m	

2	Som 0, med delt tverrsnitt for redning, Dør c/c 375 m	 T12,5
3	Separat redningstunnel, Tverrtunnel c/c 375 m	T10,5  T5,5

2.2.1 **Sikkerhetstiltak 0**

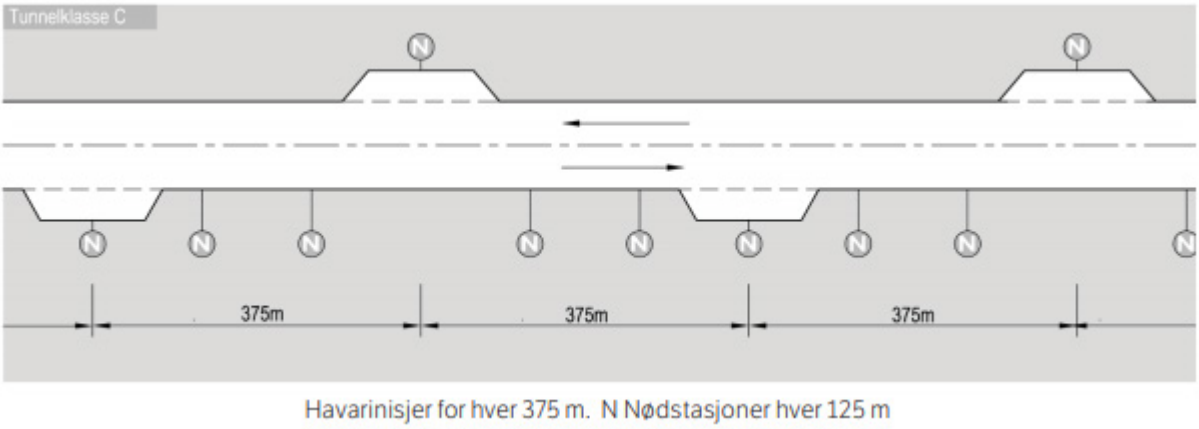
Sikkerhetstiltak 0 har ingen spesiell sikkerhetsutrustning og tiltak utover det som er definert i Statens Vegvesens håndbok N500. Iht. håndboken klassifiseres tunneler med ÅDT mellom 200 og 4000 og opp til 10 km tunnellengde til klasse B. Alle tunnelalternativene for Sudurøytunnelen er langt over 10 km. Det er derfor lagt til grunn i det videre arbeidet at sikkerhetskrav for Sudurøytunnelen følger tunnelklasse C i håndbok N500, se Tabell 2-2 og Tabell 2-3.

Tabell 2-2: Krav til sikkerhetstiltak og -utrustning for ulike tunnelklasser.

● Krav ○ Vurderes	Tunnelklasser						Merknader
	A	B	C	D	E	F	
SIKKERHETSTILTAK							
Havarinisjer		●	●	●	●	●	Se kapittel 3 Geometrisk utforming
Snunisjer		●	●	●			Se kapittel 3 Geometrisk utforming
Nødutganger			○	●	●	●	Se kap. 3.6
SIKKERHETSUTRUSTNING							
Strømforsyning, belysning og ventilasjon	Se kapittel 9 Tekniske anlegg						
Skilt og signaler	Se kapittel 5						
Nødstrømsystem	●	●	●	●	●	●	Belysning ved strømutfall. Se 4.3.2.1 og 9.3.6
Rømningslys	●	●	●	●	●	●	25 m avstand for tunneler < 5 km. Ettløpstunneler > 5 km skal ha sammenhengende lys. Se 4.3.2.2
Nødstasjon	●	●	●	●	●	●	Hver 125 m. Se kap. 4.3.2.3. Ved oppgradering min. hver 250 m (jf. 4.3.4). I tillegg utenfor hver tunnelåpning
Slokkevann	●	●	●	●	●	●	Se 4.3.2.4
Fjernstyrte bommer for stengning		○	●	●	●	●	Se 4.3.2.5
ITV-overvåking		○	○	○	○	○	Krav i tunneler > 3 km og ÅDT > 4 000. Krav i tunneler > 5 km og ÅDT > 300. Se 4.3.2.6
Høyttalersystem		○	○	○			Krav i tunneler > 3 km og ÅDT > 4 000. Krav i tunneler > 5 km og ÅDT > 300. Se 4.3.2.7
Nødnett og radiokringkasting	●	●	●	●	●	●	Se 4.3.3
Høydehinder (avviser)	●	●	●	●	●	●	Se 4.3.2.8

Tabell 2-3: Krav til avstand mellom havarinisjer og snunisjer for ulike tunnelklasser.

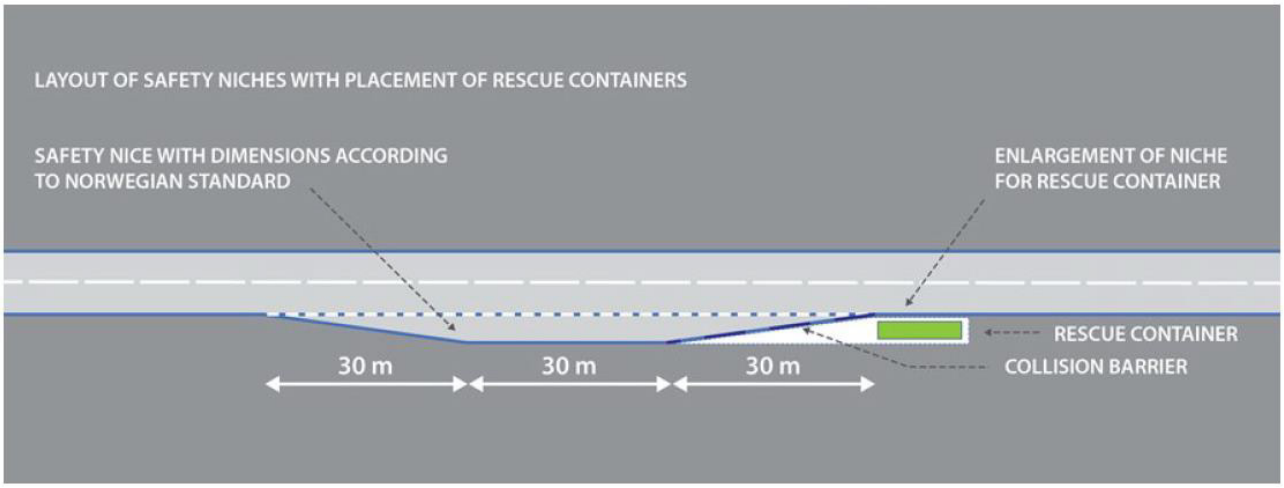
Tunnel-klasse	Normalavstand havarinisje	Normalavstand snunisje	Kommentar
A	-	-	Møteplasser
B	500 m	2 000 m	Snunisje bygges i tunneler > 4 km
C	375m	1 500 m	Snunisje bygges i tunneler > 3 km
D	250 m	1 000 m	Snunisje bygges i tunneler > 2 km
E	500 m	-	Angitt avstand gjelder for hvert tunnelløp
F	250 m	-	Angitt avstand gjelder for hvert tunnelløp



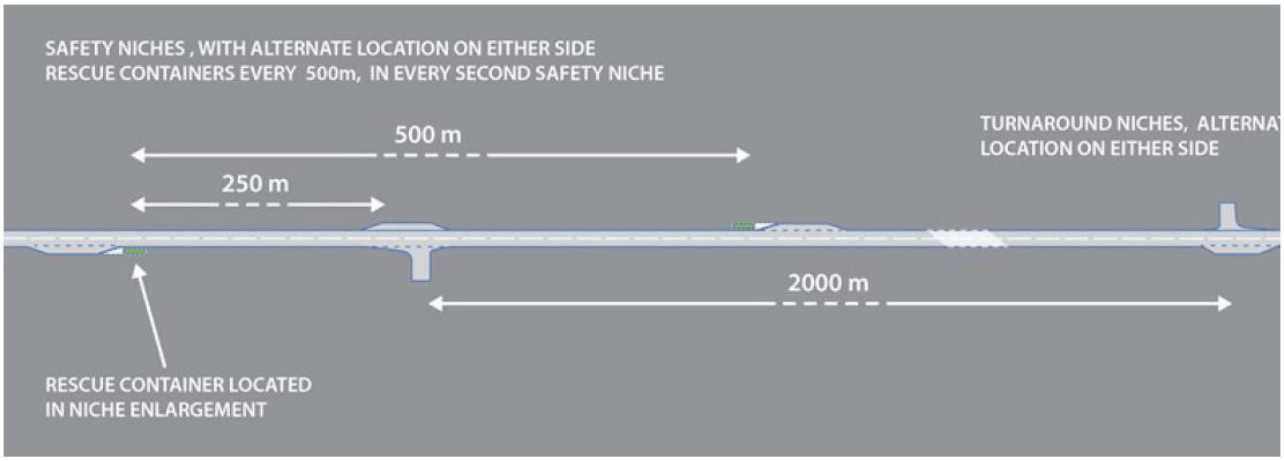
Figur 2-5: Tunnelklasse C, havarinisjer og nødstasjoner

2.2.2 Sikkerhetstiltak 1

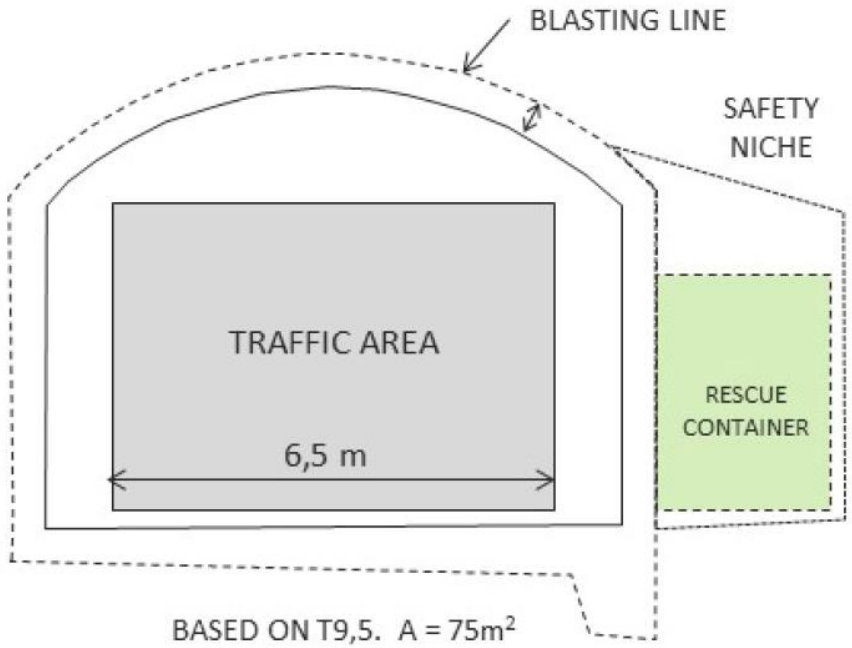
Sikkerhetsalternativ 1 er likt som alternativ 0, men har i tillegg evakueringsrom hver 375m i forlengelse av havarinisjer. Bruk av slike rom er per dags dato ikke godkjent i henhold til EU sitt tunneldirektiv som kom i 2004 (TEN-T), samt den norske tunnelsikkerhetsforskriften (TSF). Evakueringsrom utredes nå i Norge, og det jobbes for å få slike rom godkjent. Dersom redningsrom skal benyttes, må dette godkjennes av Samferdselsdepartementet (gjelder Norge) og i EFTAs overvåkningsorgan (ESA). Redningsrom brukes blant annet i jernbanetunneler og metroanlegg, i gruveindustrien, for arbeidsplasser under bakken, under byggefasen i vegtunneler og i enkelte operative vegtunneler. I Norge er det foreløpig bare etablert slike rom i Oslofjordtunnelen, som et midlertidig avbøtende tiltak etter en alvorlig brannepisode i 2011. Redningsrom er ett av flere tiltak Statens Vegvesen vurderer for å bedre forutsetningene for selvberging, særlig i vegtunneler med lav trafikk der det ikke er aktuelt å bygge et nytt parallelt løp. [J]



Figur 2-6: Figuren viser plassering av redningsrom tilknyttet havarinisje.



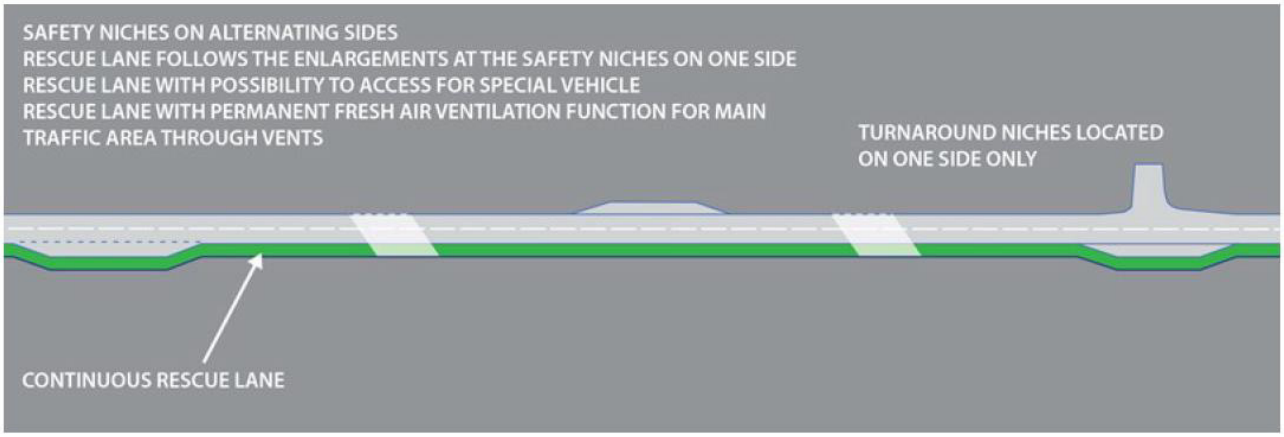
Figur 2-7: Figur som viser prinsippet av løsningen. Merk at vårt alternativ, med tunnelklasse C, har 375m mellom evakueringsrommene.



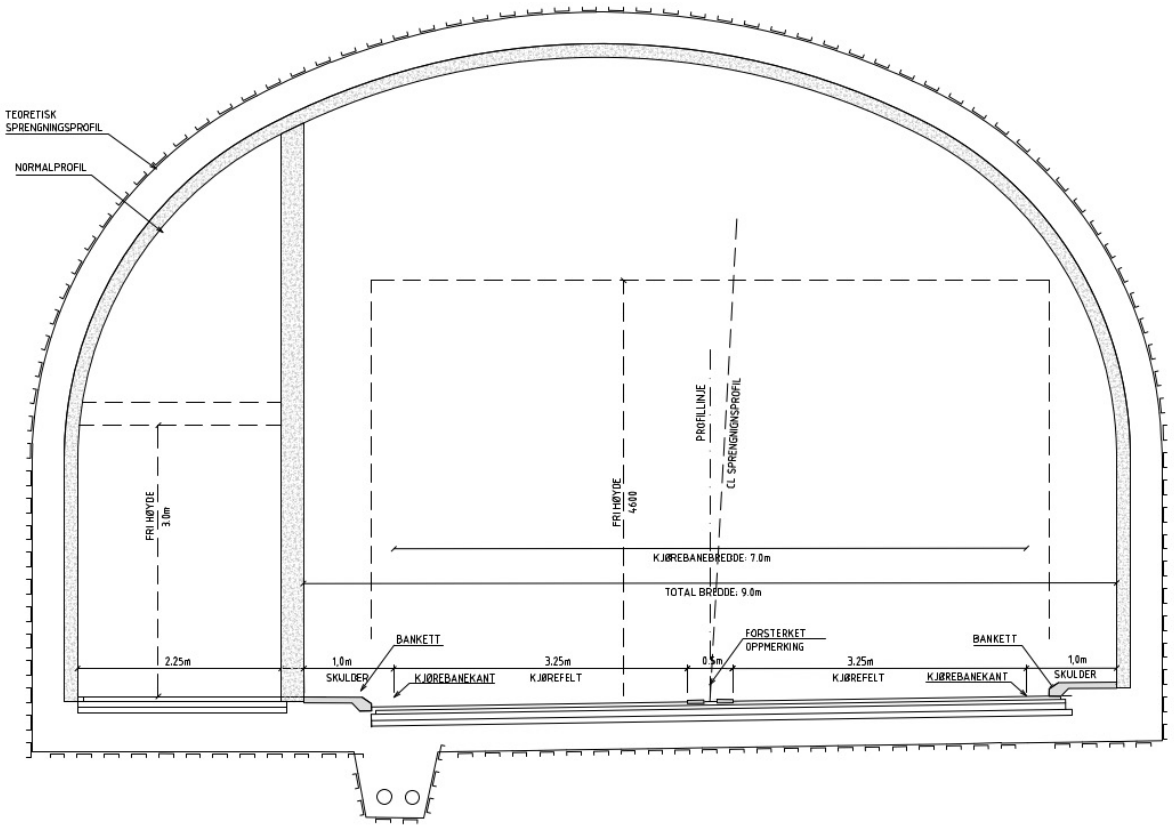
Figur 2-8: Figur som viser prinsipielt tverrsnitt av løsningen. Hovedtunnelen må ha tverrsnitt T10,5.

2.2.3 **Sikkerhetstiltak 2**

Et alternativ til parallelt løp med nødutganger er etablering av en rømningskanal som løper langs den ene sideveggen fra tunnelpåhugg til tunnelpåhugg. Rømningskanalen er adskilt fra trafikktunnelen med en brannsikker vegg, med sluser c/c 375 m langs hele tunnelen. Rømningskanalen har eget ventilasjonssystem. Det krever økt tunnelprofil der et T10,5 profil erstattes med et T12,5 profil der det er plass til en rømningskanal med bredde 2,25 m, se Figur 2-9 og Figur 2-10. Med denne løsningen må snunisjer plasseres på samme side i hele tunnelen, ikke annenhver side, slik man vanligvis gjør.

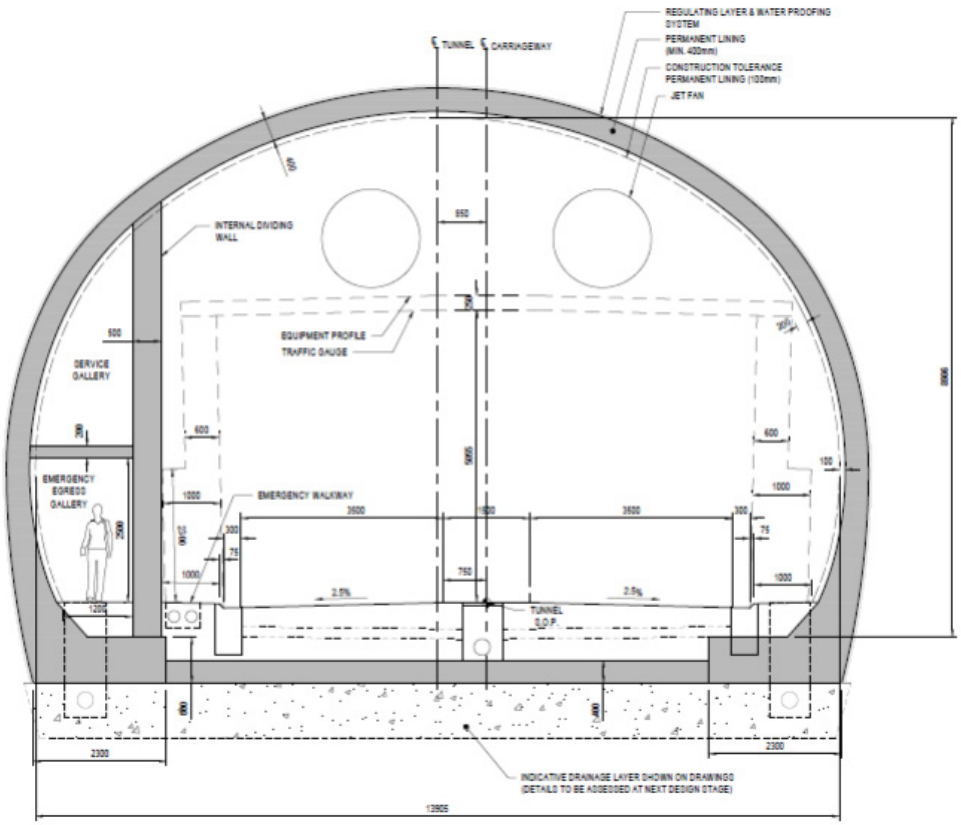


Figur 2-9: Rømningskanal langs tunnelveggen



Figur 2-10: Rømningskanal adskilt fra vegtunnelen med brannsikker vegg.

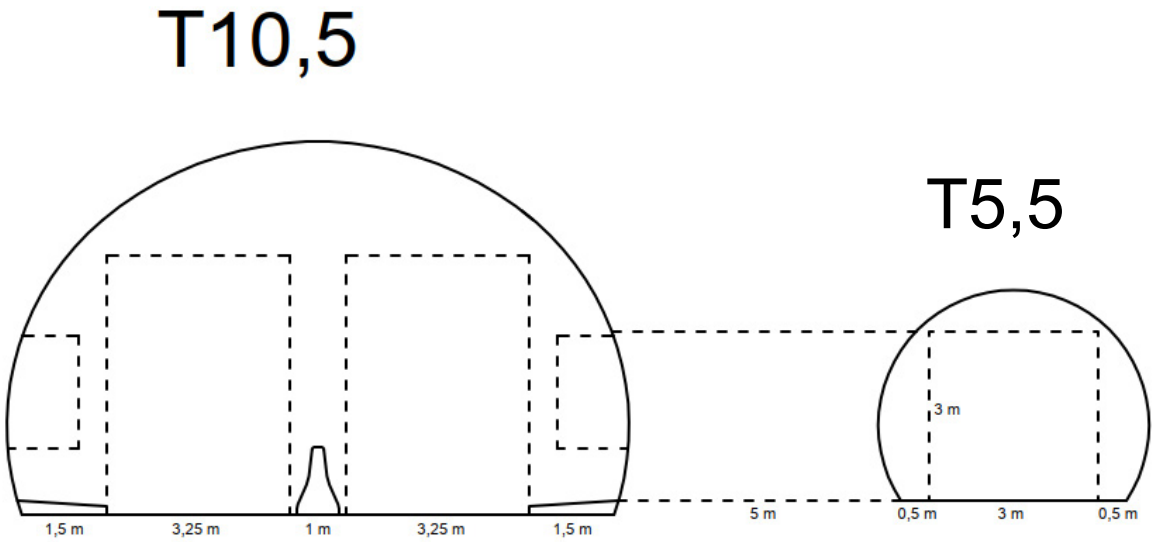
Figur 2-11 viser rømningskanal som er foreslått brukt av SINTEF i en 14km lang undersjøisk tunnel på Malta, med ÅDT på 9000. Utformingen er foreløpig ikke detaljert og godkjent.



Figur 2-11: Konsept for rømningskanal for tunnelen på Malta.

2.2.4 **Sikkerhetstiltak 3**

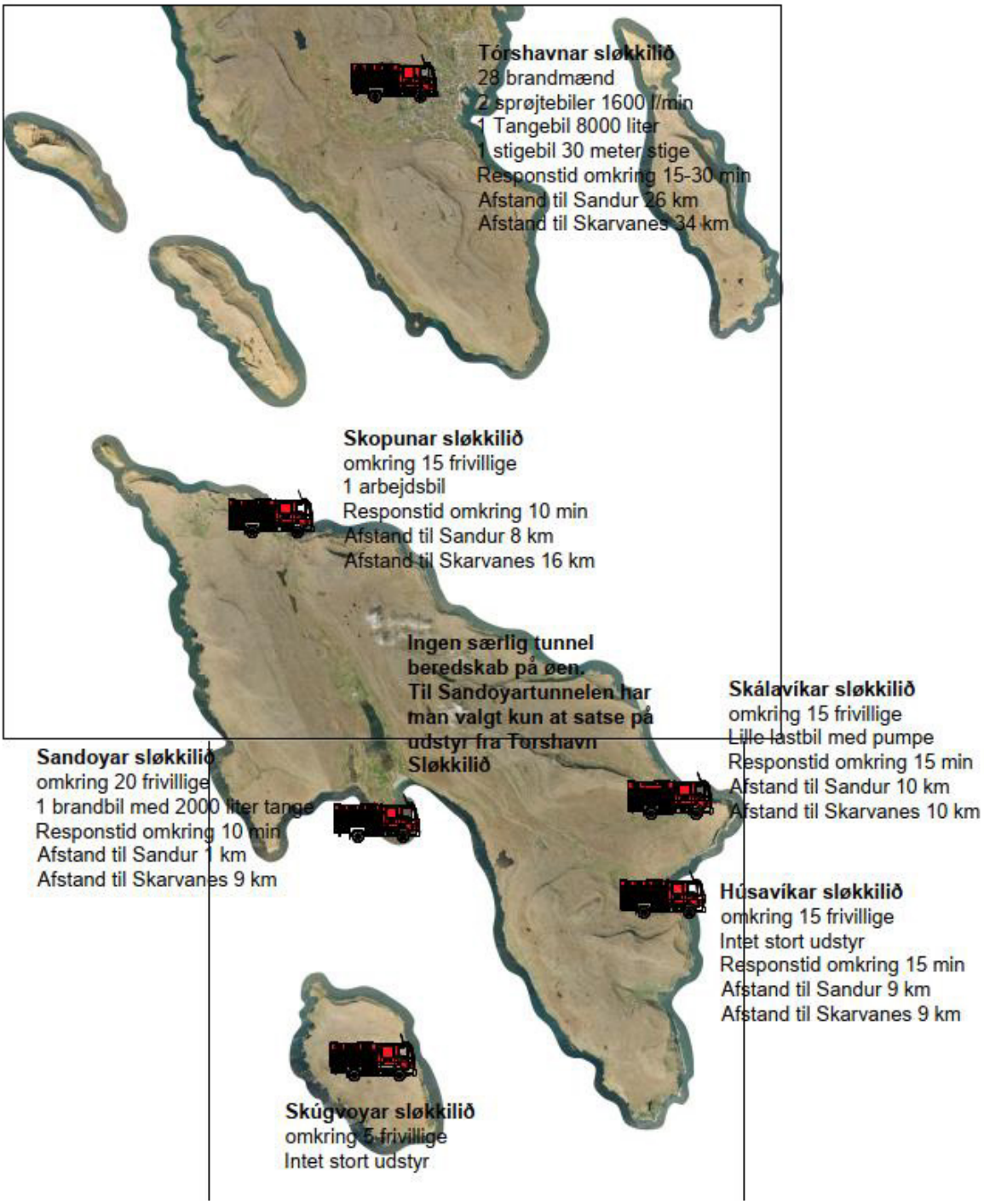
Sikkerhetsalternativ 3 innebærer separat redningstunnel langs hele tunnelen. Mellom trafikktunnel og redningstunnel er det en tverrtunnel hver 375 m. Tverrtunnelen er lukket med dør i hver ende slik at det blir en sluse mellom de to tunnelene. Dette konseptet tilfredsstiller krav til sikkerhet for lange tunneler med høy ÅDT. Skissen i Figur 2-12 er prinsipiell. Størrelse på redningstunnel er T5,5. Lengde av tverrtunnel vil trolig være mer enn 5 m. Betongelement mellom kjørefelt er ikke en forutsetning og vil ikke være aktuelt. Rømningstunnel vil ha eget ventilasjonssystem, som alternativ 2.



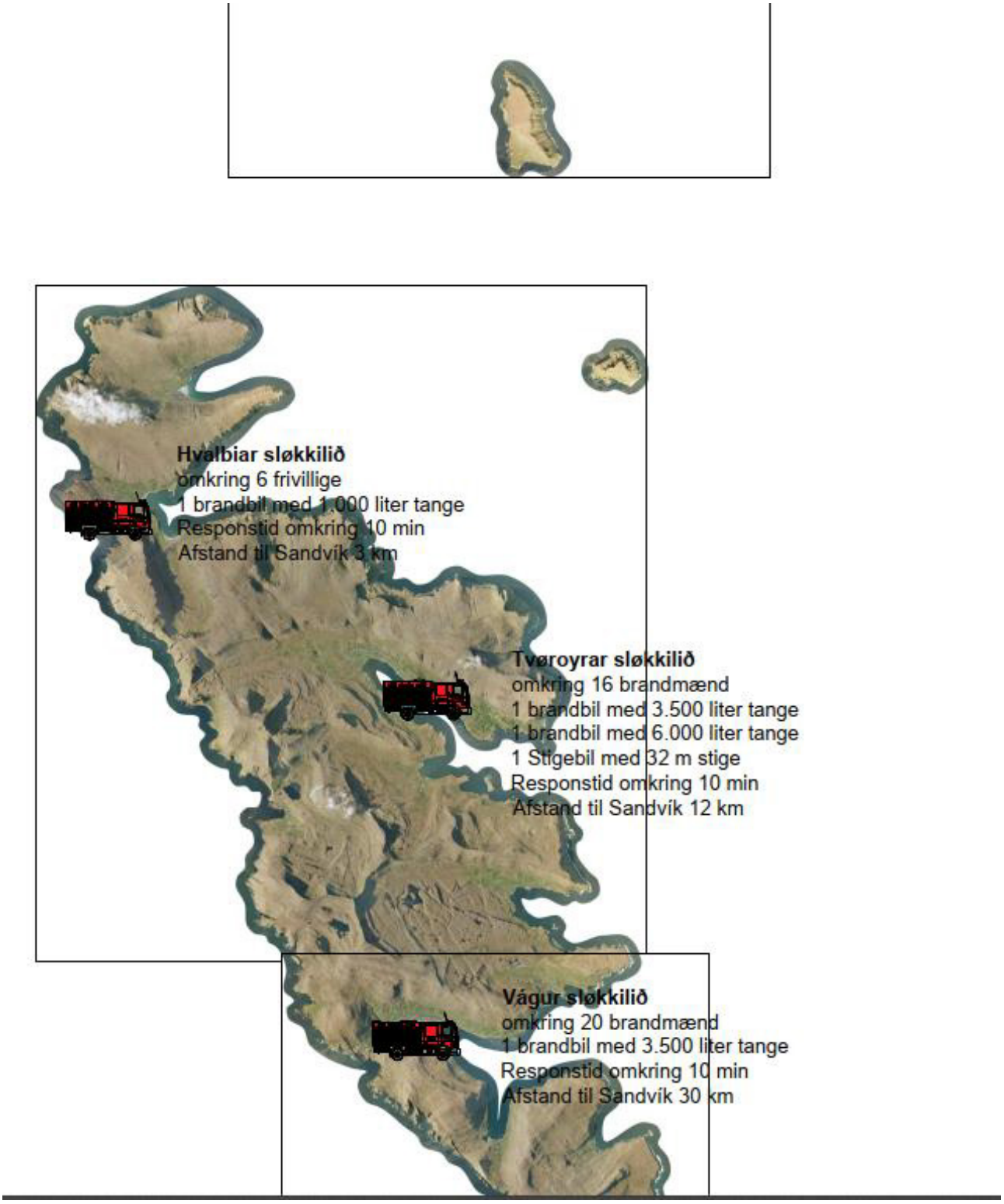
Figur 2-12: Sikkerhetsalternativ 3 med redningstunnel T5,5

2.3 Beredskap

Landsverk har laget en oversikt som viser hvor brannvesen er lokalisert på Færøyene, samt antall brannmannskaper og hvilket utstyr som er plassert på de ulike lokalisasjonene. Responstider vist i Figur 2-13 og Figur 2-14 er omtrentlige tall på hvor lang tid brannvesenet bruker fra de får et varsel til de er ved en fremtidig Sudurøytunnel.



Figur 2-13: Rednings- og brannberedskap Torshavn og Sandøy



Figur 2-14: Rednings- og brannberedskap på Sudurøy

Oversikten viser at det er begrenset hva man kan regne med av innsats dersom det skulle begynne å brenne midt i en lang undersjøisk tunnel mellom Sandøy og Sudurøy. Trolig vil trafikanter i tunnelen måtte belage seg på selvbergingsprinsippet ettersom det vil ta for lang tid for brannmannskaper til å kunne bidra med redning.

3 Vurderingskriterier

3.1 Nullvisjonens krav til et sikkert vegsystem

I Norge opererer man med «Nullvisjonen» som ble vedtatt av Stortinget ved behandlingen av Nasjonal Transportplan (NTP) 2002 – 2011. Trafikksikkerhetsarbeidet skal ha som visjon «et transportsystem som ikke fører til tap av liv eller varig skade», hvor grunnpilaren er at ethvert menneske er unikt og uerstattelig. Målet er at veier skal utformes for menneskets forutsetninger og ha barrierer mot feilhandlinger og potensielle konsekvenser av disse.

Nullvisjonens krav til sikre veger (Veileder for risikoanalyser av vegtunneler (Revidert) – TS2007:11)

- Vegens utforming skal lede til sikker atferd. Løsningene skal være logiske og lettleste for trafikantene og redusere sannsynligheten for feilhandlinger. Vegen skal gi trafikantene nødvendig informasjon uten å være stressende. Vegen skal invitere til ønsket fart gjennom linjeføring, utforming og fartsgrenser. Det skal være enkelt å handle riktig og vanskelig å handle feil.
- Vegens utforming skal beskytte mot alvorlige konsekvenser av feilhandlinger. Vegen skal ha beskyttende barrierer som tilgir en feilhandling. Fartsnivået skal være tilpasset vegens sikkerhetsnivå og menneskets tåleevne.

3.2 Selvbergingsprinsippet

Dersom det er behov for å evakuere en tunnel i forbindelse med ulykkeshendelse eller brann, er det lagt til grunn at dette skal kunne utføres av den enkelte bilfører eller passasjer. Selv om prinsippet er allment akseptert i hverdagen er det fortsatt viktig at det legges til rette for at dette kan utføres uten at tidsfaktoren blir kritisk. Det er flere forhold i en tunnel som kan komplisere en slik evakuering dersom en hendelse oppstår, og dette må inkluderes i design og utforming av tunnelen og det integrerte sikkerhetsutstyret.

Selvredningsprinsippet er i samsvar med EU-direktivet og den norske tunnelsikkerhetsforskriften og gjelder som hovedprinsipp i alle norske vegtunneler. Avhengig av responstid og tilgjengelig utstyr, er det begrenset i hvilket omfang en kan påregne at eksterne redningsmannskaper kan komme til unnsetning ved en brannhendelse i en tunnel. Ved vanlige ulykker uten brannutvikling, vil det fungere som ved respons på en tilsvarende ulykke i friluft.

Det verste scenarioet som kan inntreffe er en omfattende brann. Tidsaspektet vil da bli avgjørende med hensyn på det å redde mennesker og unngå tap av liv. Erfaring fra tunnelbranner som har inntruffet i Norge og andre steder i Europa angir at et brannforløp kan utvikle seg meget hurtig i en tunnel. Brannvesenet og andre redningsetater vil i de fleste tilfeller ikke ankomme tunnelen før det har gått minst et kvarter og kjøretøyet er overtent. Tid er en kritisk faktor ved en stor brann og selvredningsprinsippet forutsetter at trafikantene ikke blir værende i bilene og vente på hjelp, men selv evakuerer til fots eller klarer å kjøre ut. [I]

3.3 Risikoaksept

Det er ikke entydig gitt hva som anses akseptabelt med hensyn til sikkerhet i tunneler. I utgangspunktet gir Håndbok N500 krav til hva som er akseptabelt, hva angår utforming av tunnelen. Kravene i håndboken er imidlertid ikke tilpasset en tunnel som Sudurøytunnelen. Spesielt går lengden på Sudurøytunnelen langt ut over det som vurderes i Håndbok N500, der øverste grense er 10km.

3.4 ALARP-prinsippet

For alle identifiserte farer anbefaler Sweco at behov for risikoreduserende tiltak vurderes ut fra ALARP-prinsippet, det vil si at risikoen skal reduseres så langt praktisk mulig, der «praktisk mulig» ses i forhold til alle de andre fordelene (godene) og ulempene ved alternativet. ALARP-prinsippet innebærer «omvendt

bevisbyrde»: som betyr at identifiserte tiltak skal implementeres, med mindre det kan dokumenteres at det er et urimelig misforhold mellom kostnader/ulemper og nytten av tiltaket. ALARP-prosessen innebærer med andre ord, mer enn en kost/nytte-vurdering.

Dersom risikoen er neglisjerbar, er det vanlig å si at risikoen ikke er i ALARP-område. Tiltak kan fortsatt identifiseres og anbefales, men det er ikke nødvendigvis et krav. Det anbefales at alle tiltak vurderes for alle risikoer, da det kan ligge antagelser eller forutsetninger til grunn som har blitt endret, eller var feile under analysetidspunktet.

4 Metode

For ordinære risikoanalyser av veitunneler benyttes metodikk beskrevet i veileder fra Statens Vegvesen [E], støttet opp av NS5814:2008 [F]. Siden denne analysen skal vurdere ulike konseptløsninger av en fremtidig tunnel, og det kun er ønskelig å vurdere brannscenarier, er det valgt å gjøre noen justeringer på fremgangsmåten og metoden.

Denne studien følger følgende 4 trinn i gjennomføringen.



Figur 4-1: Gjennomføring av grov risikovurdering

En sentral del av en risikovurdering er å identifisere uønskede hendelser som kan oppstå. Dette gjennomføres normalt i en HAZID-samling der aktuelle fagressurser deltar. I dette prosjektet er det kun brannscenarier som skal vurderes - prosessen med å identifisere uønskede hendelser faller dermed bort. Gjennomføring av prosjektet inkluderer dermed følgende elementer:

- Beskrive bakgrunn, formål og analyseobjekt

  Beskrivelse av bakgrunn og hensikt med analysen, samt beskrivelse av de ulike tunnel- og sikkerhetsalternativene.

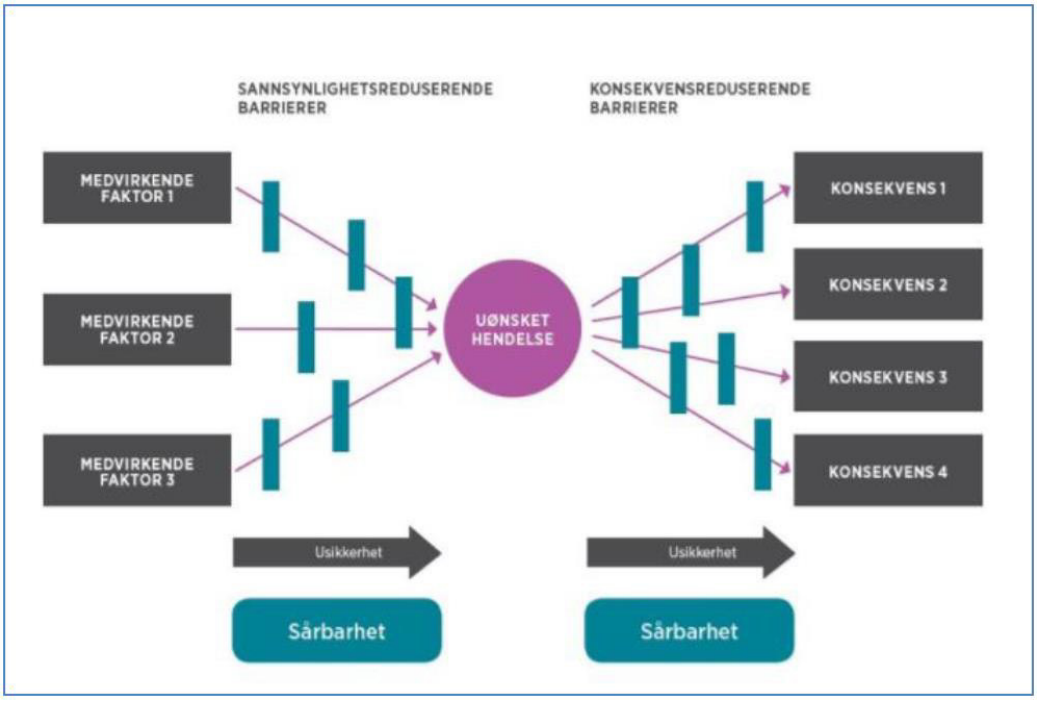
- Identifisere uønsket hendelse

  Vurdering av risiko av brannscenarier er grunnlaget for analysen fordi brann anses for å være den mest kritiske hendelsen i en tunnel, og risikoen for en brann vil være styrende for behovet for rømning og redning. Det er derfor ikke brukt tid på å identifisere ytterligere uønskede hendelser.

- Vurdere risiko (identifisere konsekvenser og vurdere sannsynlighet)

  For å vurdere risiko er det benyttet ulike verktøyer for å predikere sannsynligheter og konsekvenser. Den samlede risikoen for ulike konsepter er deretter diskutert og sammenlignet.

Figur 4-2 illustrerer sammenhengen mellom årsaker og konsekvenser for en uønsket hendelse, samt hvordan sannsynlighets- og konsekvensreduserende tiltak kan redusere risiko for hendelsen. Venstre side viser hva som påvirker sannsynligheten for den uønskede hendelsen, og høyre side hva som påvirker konsekvensene av hendelsen. I begge tilfeller dreier dette seg om sårbarhet og etablerte barrierer (tiltak). Det knytter seg usikkerhet både til om hendelsen vil inntreffe, og hva konsekvensene vil bli.



Figur 4-2: Sløyfediagram som viser sammenheng mellom årsaker og konsekvenser tilknyttet en uønsket hendelse.

Å foreslå risikoreduserende tiltak er ikke et fokusområde i denne analysen, men aktuelle tiltak som kan redusere risiko for tunnelalternativene diskuteres. Identifiserte tiltak kan enten være forebyggende eller skadereduserende.

• Dokumentere (inkludert vurdering av resultater, prioritering og anbefaling)

Risikovurderingen dokumenteres i form av en skriftlig rapport som belyser bakgrunnsinformasjon, funn og resultater. Det diskuteres hvilke alternativer som er uakseptable, samt forslag til hvilke konsepter man bør jobbe videre med.

5 Risikovurdering av tunnelalternativer med tilhørende sikkerhetstiltak

For å kunne sammenligne risiko mellom de ulike tunnelalternativene og sikkerhetstiltakene må man kunne si noe om risikoen for brann for hvert enkelt brannscenario. For å gjøre dette er det benyttet modeller og beregningsverktøy for å predikere sannsynligheter og konsekvenser for brann. I tillegg er det beskrevet gjennomføring av ventilasjonsprinsipper for de ulike alternativene, for å vise beste håndtering av ventilasjon dersom en brann oppstår.

5.1 Sannsynlighetsberegninger

Som grunnlag for vurdering av sannsynlighet av uønskede hendelser, er det utført beregninger av de ulike tunnelalternativene med bruk av modell utarbeidet av Transportøkonomisk Institutt (TØI)[L]. Sikkerhetstiltak spiller ikke inn på sannsynligheten for at en brann oppstår og er ikke vurdert. Modellen baserer seg på statistikk hentet fra norske tunneler frem til 2017. Modellen er beregnet med negativ binomial regresjon med variabel overspredningsparameter.

Beregningen er utført ved bruk av tekniske data og trafikale forhold vist i tabeller for hver tunnel i de kommende kapitlene. Resultatene fra beregningene er deretter vist i egne tabeller.

Avgrensninger for beregninger med bruk av TØI-modell:

- TØI-beregninger er begrenset til de fire scenarioene som er listet i resultattabellene, og viser ingen fordeling mellom type ulykker eller skadeomfang.
- TØI-beregningene gjelder kun for selve tunnelløpet og dermed ikke for dagsonene.
- TØI-beregningene tar ikke hensyn til lokale forhold ved tunnelen.

Det er viktig å merke seg at det usikkerhet knyttet til resultatene fra modellen. Statistikk gir på generelt grunnlag en god oversikt over hva som har skjedd i fortiden, og man kan i mange tilfeller dra paralleller og lærdommer til det som skal skje i fremtiden. Man kan likevel aldri være sikker på hvordan statistikk fra fortiden vil stemme overens med utviklingen i fremtiden.

Selv om man har samlet inn mye statistikk fra tunneler, har man lite statistikkgrunnlag fra så lange tunneler som Sudurøytunnelen. Det oppstår dermed en usikkerhet når man benytter en modell for å predikere sannsynligheter for Sudurøytunnelen, som har svært spesielle egenskaper når det kommer til utforming. Faktorer som monotoni og eventuelle andre negative faktorer som kan oppstå på grunn av ekstrem lengde, vil i mindre grad være inkludert i modellberegningene. Ulykkesfrekvenser i Sudurøytunnelen vil antageligvis fravike statistisk fra frekvenser i andre «ordinære» tunneler. Bruk av statistikk fra kortere tunnelen på lengre tunneler antas å kunne medføre mindre konservative resultater.

5.1.1 Sannsynligheter alternativ 1

Alternativ 1 består av to etterfølgende tunneler fra Sandøy til Skugvøy (portal i Sandur) og Skugvøy til Sudurøy med lengder på omtrent 8,5km og 17,5km. For illustrasjon av alternativ 1, se Figur 2-2.

5.1.1.1 Tunnel 1: Sandøy - Skugvøy

Tabell 5-1: Tekniske data og trafikale forhold brukt i beregninger

Hva	Data
Lengde	9000 m
ÅDT	1300
Andel lange kjøretøy	7%
Fartsgrense	80 km/t
Fri høyde	4,5 m
Lengde med stigning over 5%	2080 m

Tabell 5-2: Resultater fra TØI-beregninger for tunnel mellom Sandøy og Skugvøy

Scenario	Frekvens per år	Tid mellom hver hendelse
Ulykke med personskader (PSU)	0,384	2,6 år
Ulykker med drepte eller hardt skadde(DHSU)	0,034	29,4 år
Brann i personbil/varebil	0,113	8,8 år
Brann i tungt kjøretøy	0,052	19,2 år

5.1.1.2 Tunnel 2: Skugvøy - Sudurøy

Tabell 5-3: Tekniske data og trafikale forhold brukt i beregninger

Hva	Data
Lengde	17160 m
ÅDT	1300
Andel lange kjøretøy	7 %
Fartsgrense	80 km/t
Fri høyde	4,5 m
Lengde med stigning over 5%	2415 m

Tabell 5-4: Resultater fra TØI-beregninger for tunnel mellom Skugvøy og Sudurøy

Scenario	Frekvens per år	Tid mellom hver hendelse
Ulykke med personskader (PSU)	0,733	1,4 år
Ulykker med drepte eller hardt skadde(DHSU)	0,064	15,6 år
Brann i personbil/varebil	0,233	4,3 år
Brann i tungt kjøretøy	0,106	9,4 år

5.1.1.3 Sannsynligheter for alternativ 1

Siden dette alternativet har to tunneler vil det være naturlig å legge sammen resultatene for å se hvor mange ulykker/branner som kan oppstå totalt for alternativet. Tabellen under viser forventet tid mellom hver hendelse for alternativet som helhet:

Tabell 5-5: Forventet tid mellom hver hendelse for alternativet som helhet.

Scenario	Frekvens per år	Tid mellom hver hendelse
Ulykke med personskader (PSU)	0,117	0,9 år
Ulykker med drepte eller hardt skadde(DHSU)	0,098	10,2 år
Brann i personbil/varebil	0,346	2,9 år
Brann i tungt kjøretøy	0,158	6,3 år

Disse resultatene tar ikke høyde for effekten som kan oppstå ved at to tunneler ligger etter hverandre. Resultatene viser kun summen av to separate tunneler. To tunneler med lange stigninger i forlengelse av hverandre er antatt å kunne gi ytterligere økning i sannsynlighet for at brann oppstår, som følge av den akkumulerte økningen i belastning på kjøretøy i opp- og nedkjøring fra tunnel.

5.1.2 Sannsynligheter alternativ 2

Dette alternativet består av én lang tunnel fra Sandøy (portal ved Sandur) til Sudurøy, der man passerer under Skugvøy (tverrslag med ventilasjon til Skugvøy). Alternativt er vist i Figur 2-3.

Tabell 5-6: Tekniske data og trafikale forhold brukt i beregninger

Hva	Data
Lengde	25650 m
ÅDT	1300
Andel lange kjøretøy	7 %
Fartsgrense	80 km/t
Fri høyde	4,5 m

Lengde med stigning over 5%	0 m

Tabell 5-7: Resultater fra TØI-beregninger for tunnel

Scenario	Frekvens per år	Tid mellom hver hendelse
Ulykke med personskader (PSU)	1,089	0,92 år
Ulykker med drepte eller hardt skadde(DHSU)	0,097	10,3 år
Brann i personbil/varebil	0,198	5,1 år
Brann i tungt kjøretøy	0,093	10,8 år

5.1.3 Sannsynligheter alternativ 3

Alternativ 3 består av én lang tunnel med kortest mulig linje fra Sandøy (portal ved Skarvanes) til Sudurøy, illustrert i Figur 2-4.

Tabell 5-8: Tekniske data og trafikale forhold brukt i beregninger

Hva	Data
Lengde	22180 m
ÅDT	1300
Andel lange kjøretøy	7 %
Fartsgrense	80 km/t
Fri høyde	4,5 m
Lengde med stigning over 5%	0 m

Tabell 5-9: Resultater fra TØI-beregninger for tunnel

Scenario	Frekvens per år	Tid mellom hver hendelse
Ulykke med personskader (PSU)	0,942	1,06 år
Ulykker med drepte eller hardt skadde (DHSU)	0,084	11,9 år
Brann i personbil/varebil	0,171	5,8 år
Brann i tungt kjøretøy	0,08	12,5 år

5.1.4 Sannsynligheter alternativ 4

Tunnelalternativ 4 er identisk med alternativ 3, men inkluderer avgreiningstunnel til Skugvøy fra rundkjøring eller T-kryss i hovedtunnelen.

5.1.4.1 Tunnel 1: Sandøy - Sudurøy

Tabell 5-10: Tekniske data og trafikale forhold brukt i beregninger

Hva	Data
Lengde	22180 m
ÅDT	1300
Andel lange kjøretøy	7 %
Fartsgrense	80 km/t
Fri høyde	4,5 m
Lengde med stigning over 5%	0 m

Tabell 5-11: Resultater fra TØI-beregninger for tunnel mellom Sandøy og Sudurøy

Scenario	Frekvens per år	Tid mellom hver hendelse
Ulykke med personskader (PSU)	0,942	1,06 år
Ulykker med drepte eller hardt skadde(DHSU)	0,084	11,9 år
Brann i personbil/varebil	0,171	5,8 år
Brann i tungt kjøretøy	0,08	12,5 år

5.1.4.2 Tunnel 2: Tunnelarm opp til Skugvøy

Det er valgt å benytte ÅDT = 50 for denne tunnelen. Dersom det opprettes en kjørbar veg opp til Skugvøy, er det naturlig å forvente at dette kan initiere både ny bosetting og aktivitet.

Tabell 5-12: Tekniske data og trafikale forhold brukt i beregninger

Hva	Data
Lengde	2140 m
ÅDT	50
Andel lange kjøretøy	7 %
Fartsgrense	80 km/t
Fri høyde	4,5 m
Stigning	7 %

Tabell 5-13: Resultater fra TØI-beregninger for tunnelrampe opp til Skugvøy

Scenario	Frekvens per år	Tid mellom hver hendelse
Ulykke med personskader (PSU)	0,0097	103 år
Ulykker med drepte eller hardt skadde(DHSU)	0,0013	769 år
Brann i personbil/varebil	0,0044	227 år
Brann i tungt kjøretøy	0,0025	400 år

5.1.4.3 Sannsynligheter for alternativ 4

Tabell 5-14: Kombinert sannsynlighet for alternativ 4

Scenario	Frekvens per år	Tid mellom hver hendelse
Ulykke med personskader (PSU)	0,952	1,05 år
Ulykker med drepte eller hardt skadde(DHSU)	0,085	11,7 år
Brann i personbil/varebil	0,175	5,7 år
Brann i tungt kjøretøy	0,083	12,1 år

I likhet med alternativ 1 består alternativ 4 av to tunneler. Også her er det summen av sannsynlighetsberegningene som er presentert. Dette vil medføre noe usikkerhet i resultatene. I tillegg er ikke potensiell ulykkesrisiko forbundet med T-kryss/rundkjøring i tunnel vurdert. Det kan antas at dette vil medføre et økt bidrag i sannsynlighet for ulykker, men i svært liten grad. ÅDT for tunnelarmen opp til Skugvøy er svært lav og de trafikale utfordringene denne trafikken vil medføre er vurdert å være svært lav.

5.1.5 Sannsynligheter referansetunnel

Det er ønskelig å sammenligne de aktuelle tunnelalternativene med en tunnel som er bygget iht. Håndbok N500 og tunnelklasse C. Dette tilsvarer den lengste tunnelen og den høyeste trafikken som tillates for en ettløpstunnel uten egne rømningsutganger. Ved å legge inn tunneltekniske data i modellen kan vi sammenligne sannsynligheter for at branner oppstår.

Tabell 5-15: Tekniske data og trafikale forhold brukt i beregninger

Hva	Data
Lengde	10000 m
ÅDT	4000
Andel lange kjøretøy	7 %
Fartsgrense	80 km/t
Fri høyde	4,5 m
Stigning	0%

Tabell 5-16: Resultater fra TØI-modell for referansetunnel

Scenario	Frekvens per år	Tid mellom hver hendelse
Ulykke med personskader (PSU)	0,920	1,087 år
Ulykker med drepte eller hardt skadde (DHSU)	0,071	14,1 år
Brann i personbil/varebil	0,152	6,6 år
Brann i tungt kjøretøy	0,072	13,9 år

5.1.6 Oppsummering av sannsynlighetsberegninger

Tabell 5-17: Oppsummering av resultater for de ulike tunnelalternativene.

Scenario	Tid mellom hver hendelse (år)				
	Alternativ 1	Alternativ 2	Alternativ 3	Alternativ 4	Referansetunnel
Ulykke med personskader (PSU)	0,9 år	0,92 år	1,06 år	1,05 år	1,09 år
Ulykker med drepte eller hardt skadde (DHSU)	10,2 år	10,3 år	11,9 år	11,7 år	14,1 år
Brann i personbil/varebil	2,9 år	5,1 år	5,8 år	5,7 år	6,6 år
Brann i tungt kjøretøy	6,3 år	10,8 år	12,5 år	12,1 år	13,9 år

Som resultatene viser gir alternativ 1 høyest sannsynlighet for brann. Dette er i hovedsak fordi dette alternativet har to stigninger (dobbelt antall av de andre alternativene) opp til Skugvøy, med stigning over 5%. I tillegg vil to tunneler som ligger i forlengelse av hverandre kunne gi en ekstra akkumulert belastning på kjøretøyene, ved at man får dobbelt antall stigninger og nedkjøringer.

Tunneler med lengre stigning over 5% er kraftig overrepresentert når det gjelder branner fordi stigningsforholdene kan føre til varmgang i motor og bremser, særlig i tunge kjøretøy. Statistikk viser at 44 % av alle tunnelbranner skjer i de 4 % av tunnelene som har stigningsgrad mer enn 5 %. Dette gjelder 30 undersjøiske og 10 andre tunneler.[I]

Tabellen viser også at en referansetunnel iht. N500 gir noe lavere sannsynlighet for brann enn de øvrige alternativene. Forskjellen er ikke signifikant. Undersjøiske tunneler har, i kombinasjon med lang lengde, økt sannsynlighet for varmgang i bremser i utforkjøringer i forhold til tunnel uten helning, og økt brannrisiko i tyngre kjøretøy sammenlignet med lette kjøretøy. Tilsvarende gjelder for varmgang i motor i oppoverbakke. Jo lengre disse stigningene er jo mer øker sannsynlighet for brann. Lengden og prosent stigning/fall øker fare for kødannelser pga. saktegående tyngre kjøretøy, som også kan føre til forbikjøringsulykker.

Størrelsen på branner (målt i MW) er i liten grad oppgitt i tunnelbrannstatistikker for europeiske land. I arbeidet med *PIARC c3.3 wg 2* opererer man med følgende betingede sannsynligheter (gitt at det oppstår en brann) for ulike brannstørrelser, avhengig av om det er branner i lette eller tunge kjøretøy:

Tabell 5-18: Fordeling av brannstørrelser basert på PIARCs ekspertvurderinger

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

Tabellen viser at hhv. 95% av branner i lette kjøretøy og 51% av branner i tunge kjøretøy antas å ende opp med å bli i størrelsesorden 5MW eller lavere. En bilbrann på 5MW gir begrenset røyk og strålingsvarme og er stort sett håndterbar i tunnel. De fleste av disse brannene stanses raskt ved bruk av utstyret som er å finne i tunnelene.

En fremstilling av tid mellom hver hendelse fordelt på brannstørrelser er vist i tabellen under:

Tabell 5-19: Fremstilling av tid mellom hver hendelse fordelt på brannstørrelser

	Tid mellom hver hendelse (år)							
	Alternativ 1		**Alternativ 2**		**Alternativ 3**		**Alternativ 4**	
	Lette kjt.	Tunge kjt.	Lette kjt.	Tunge kjt.	Lette kjt.	Tunge kjt.	Lette kjt.	Tunge kjt.
1 MW	4,1 år	31,6 år	7,2 år	53,8 år	8,4 år	62,5 år	8,1 år	60,6 år
5 MW	11,6 år	20,4 år	20,2 år	34,7 år	23,4 år	40,3 år	22,8 år	39,1 år
25 MW	57,8 år	25,3 år	101 år	43 år	117 år	50 år	114 år	48,5 år
50 MW		39,6 år		67,2 år		78,1 år		75,8 år
100 MW		105,5 år		179,2 år		208,3 år		202 år
200 MW		316,5 år		537,6 år		625 år		606,1 år

5.2 Konsekvensberegninger

5.2.1 Beskrivelse av metode for beregning av evakueringsdyktighet

For å estimere konsekvenser ved et branntilfelle i tunnel er det gjennomført enklere beregninger av brannutvikling og røykspredning for å videre beregne røykens påvirkning på de evakuerende. Metodikken er en forenklet endimensjonal modell som angitt i boken Tunnel Fire Dynamics [T], og er satt opp i et Excel regneark. Den forenklede modellen er å anse som en konservativ tilnærming, da den legger til grunn at alt av branngasser strømmer med ventilasjonsretningen i tunnelen (ingen spredning av branngasser oppstrøms brannen). Metodikken er også kun gyldig med en lufthastighet på minst 1,0 m/s, noe som vil være tilfelle for de fleste tunneler mht. naturlig strømning/ventilasjon. Metodikken og regnearket er kontrollert mot relevante eksperimentelle data. Modellen beregner gasskonsentrasjoner, temperatur, sikt som en funksjon av tid og distanse, i tillegg har regnearket forenklede beregningsmoduler for rømning, for å kunne vurdere påkjenningen av kvelende gasser og temperatur på en vilkårlig evakuerende person, som en funksjon av tid og distanse. Modellen regner kun på rømningsfasen i tunnelen frem til en utgang, men ikke på videre rømning i rømningstunnel eller opphold i evakueringsrom.

Den samlede effekten av kvelende gasser utrykkes med parameteren FED (Fractional Effective Dose). FED er ratioen av en faktisk akkumulert dose mot en akkumulert dose som resulterer i en spesifisert effekt på en gjennomsnittlig person. En FED på 1 er ofte definert som den akkumulerte dosen som vil gjøre 50 % av befolkningen ute av stand til evakuering mens svært få vil kunne evakuere med FED >1,3. En mer utfyllende beskrivelse av metodikken er beskrevet i vedlegg 10.2.

5.2.2 Forutsetninger og inndata brann

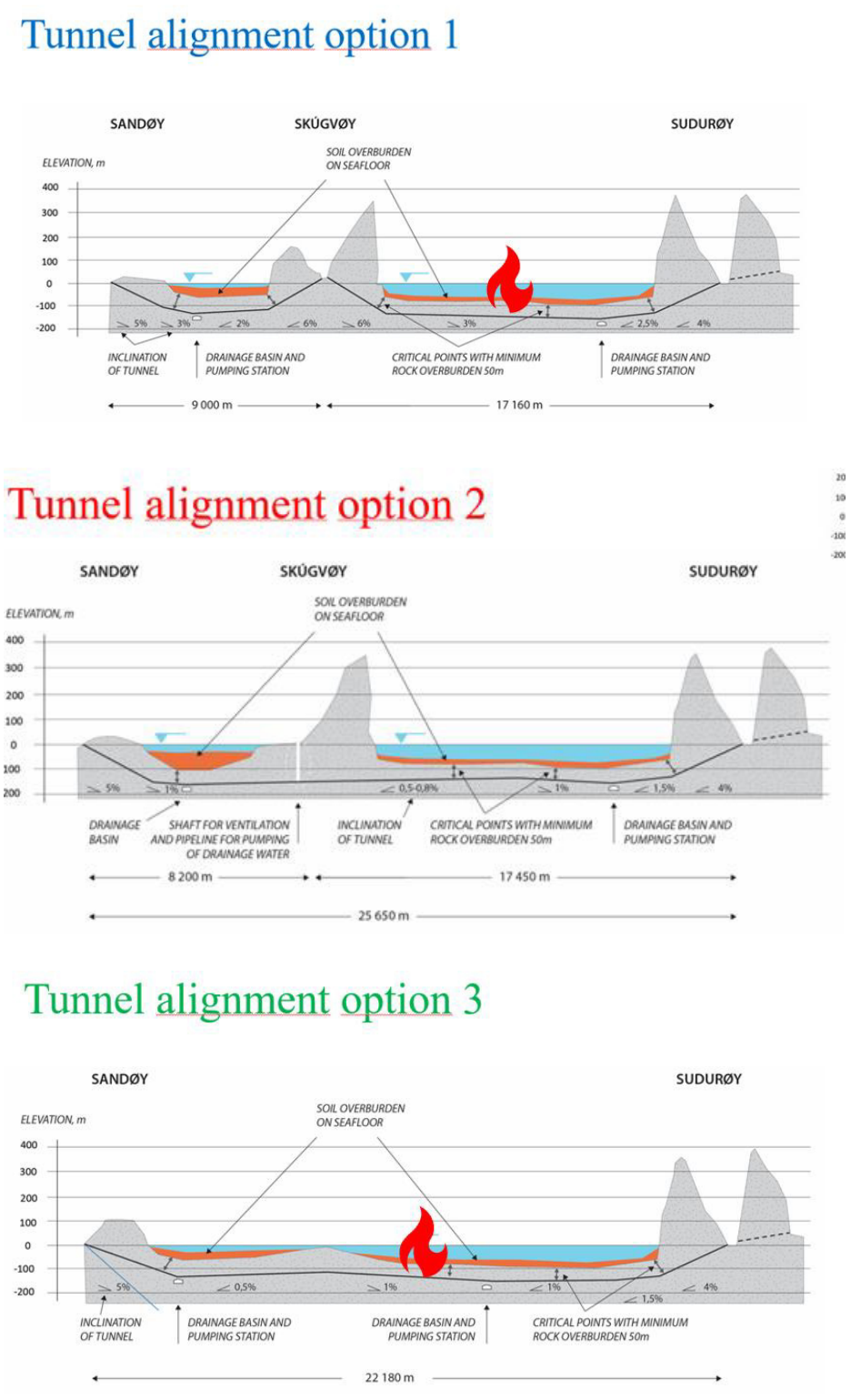
Tabell 5-20 gir sentrale inndata i beregningene av røykspredning og påfølgende beregning av evakueringsdyktighet.

Flere av disse inndataene vil være forbundet med usikkerheter og større variasjoner. Da denne risikoanalysen i stor grad gjøres komparativt vil fremdeles forholdene mellom resultatet fra de ulike tunellvariantene vises, selv om flere parametere har større variasjon. Det er generelt tatt høyde for konservative inndata, men enkelte parametere vil ha mindre grad av konservativitet. Dette er ytterligere belyst i Vedlegg: Numerisk beregningsmodell av konsekvenser.

Tabell 5-20: Sentrale inndata i beregningsmodell for røykspredning og evakueringsdyktighet

Sentrale inndata i beregninger	
Brannkjemi (forbrenningsprodukter og brennverdi)	
Andel HCN	0,01 kg/kg [S].
Andel CO_2	2,5 kg/kg [S].
Andel CO	0,1 kg/kg [S].
Sotfraksjon	0,1 kg/kg. Omregnet til optisk tetthet 378 m_2/kg med masse-spesifikk konstant på 8700 m_2/kg [S] [T].
Gjennomsnittlig brennverdi	25 MJ/kg [S]
Brannscenario	
Brannscenario (hentet fra [S]),	50 MW rask (lastebil med brennbar last) Sensitivitets scenarioer med 100 MW (brann i vogntog)
Brannvekstkurve	Anbefalingene fra [S] benyttes som beskriver en rask brann opp til 50 MW for ventilasjonshastigheter opp til 3 m/s. Det gjøres ytterligere en sensitivitetsanalyse med en ultrarask brann opp til 100 MW samt effekten av en hurtigvoksende lineær brannvekst.

Plassering av brann	Brann plasseres midt i tunnelen og midt mellom to utganger. Se Figur 5-1		
Ventilasjon			
Ventilasjonshastighet	1 m/s for naturlig ventilasjon og 3,0 m/s for viftedrevet mekanisk ventilasjon		
Røykbevegelser i det tidlige brannforløpet			
Tidspunkt for når sjiktning av røyklaget bryter sammen	Rask brann 50MW:	Vent. hastighet: 1 m/s Vent.	Ca. 420 s og 420 m fra brannen Ca
		hastighet: 3 m/s	300 s og <900 m fra brannen
	Ultrarask brann 100 MW	Vent. hastighet: 1 m/s Vent.	Ca 270 s, og 270 m fra brannen Ca
		hastighet: 3 m/s	180 s og <540 m fra brannen
Øvrige antagelser som røykbevegelser	Se kap 5.2.4		
Adferdsmessige forutsetninger			
Ganghastighet	Ganghastighet i røyk 0,3 m/s [T] Nær brannen er det benyttet en modell hvor ganghastighet er en funksjon av sikt: Ganghastighet (m/s)= 0.5678 x sikt (1/m)+0.303[T]		
Reaksjonstid etter stopp i kø eller ved møtende røykfront	60 s. Dette parameteret har stor variasjon og kan i flere tilfeller være lite konservativt. Se vedlegg for utdypende diskusjon		
Øvrig adferd	Se kap. 5.2.5		
Trafikk forutsetninger			
Trafikk ved branntidspunktet og tilhørende hastighet	Det beregnes en trafikk på 225 kjøretøy/timen (totalt i begge retninger) med hastighet 80km/t. Beregnet fra ÅDT 1300 og tidspunktet for mest trafikk gjennom året basert på tidligere studie [U]		
Antall kjøretøy i hver retning	Det er benyttet en «peak hour factor» med fordeling av kjøretøy per retning på 80%/20 % [U]		
Fordeling av kjøretøy og personer	Kjøretøy antas jevnt fordelt med 1,5 personer per bil eller lastbil/vogntog samt en buss med 40 passasjerer		
Stenging av tunnel	Bom ved tunnelmunning antas å stenge 4 min etter brannstart		
Geometriske forutsetninger			
Tunnelprofil	Sikkerhetstiltak 2 (delt tverrsnitt): T12,5 Sikkerhetstiltak 0,1 og 3: T10,5		
Tunnel høyde	6,614 m (påvirker ikke beregning direkte)		
Tverrsnittsareal	Sikkerhetstiltak 2 (delt tverrsnitt): 57 m_2 og Sikkerhetstiltak 0,1 og 3: 61,5 m_2		
Omkrets	Sikkerhetstiltak 2 (delt tverrsnitt): 29,4 m Sikkerhetstiltak 0,1 og 3: 30,05 m		



Figur 5-1: Plassering av brannscenario for de ulike alternativene (options)

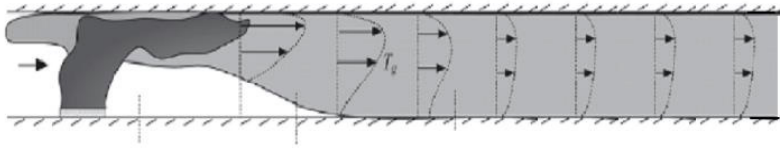
5.2.3 Trafikkscenario ved brann

Brannscenarioet tar utgangspunkt i en kollisjon i tunnelløpet hvor en lastebil og personbil er involvert og blokkerer all trafikk i begge retninger. Det antas maksimal trafikk ved ulykkestidspunktet da det også anses som det tidspunktet hvor det antas sannsynligheten for en brannstart er størst. Det er tatt utgangspunkt i en ÅDT på 1300 i år 2030 hvor antallet kjøretøy på branntidspunktet er estimert til 225 kjøretøy/timen, hvorav 80 % av denne trafikken har retning Sandøy mot Sudurøy. Denne trafikken er forventet ved ettermiddagsrush på en fredag i juni. Forventet fordeling av kjøretøy gjennom året og døgnet er hentet fra en tidligere rapport som overordnet omhandler risiko ved de aktuelle tunnelene [U]

5.2.4 Brann og røykutvikling i det tidlige brannforløpet

Hurtig brannvekst og stor effektavgivelse kan raskt medføre kritiske forhold for eksponerte personer i en tunnel. I det tidlige brannforløpet vil brannvekst og røykutvikling bestemmes av flere faktorer som tilgjengelig brannenergi i kjøretøyet, ventilasjonsretning og -hastighet. Type kjøretøy som involveres er en av de mest styrende variablene for brannutvikling og branneffekt. De mest alvorlige og dødelige brannene kjennetegnes ofte ved ett eller flere vogntog i brann. Brann i personbiler gir normalt ikke dødelige konsekvenser [T].

I brannens tidlige fase vil det være en sjikting av røyken med en lavere røykfri sone med god sikt. Ved lav eller ingen ventilasjon vil røyk strømme på begge sider av brannen med denne sjiktingen som vist øverst i Figur 5-3. Norske risikoanalyser operer ofte med en tommelfingerregel at lengden på sonen strekker seg 10-20 tunneldiametere fra brannen og at kritiske forhold kan oppstå i størrelsesorden 10 min ved en større brann. Simuleringer og forsøk for større branner viser også lignende resultater, men indikerer også at større branneffekter (typisk 10>MW) medfører at sjiktingen brytes fort sammen nedstrøms og sikten reduseres [DD]70[W]. Forsøk og simuleringer viser nettopp at økning av brannvekstrate og branneffekt samt økning av ventilasjonshastigheten vil redusere tid og distansen fra brannen hvor sjiktningen brytes sammen. Figur 5-2 viser et prinsipielt bilde av røykspredningen i tunnel med en ventilasjonshastighet og større brann. Røyken strømmer hurtigere under taket lokalt ved brann, for deretter å avta når røyklaget senkes ned mot gulvet. Når sjiktningen av røyklaget forsvinner vil forbrenningsproduktene fylle tverrsnittet av tunnelen og røyklaget vil fortsette å strømme i en hastighet som ofte er i samme størrelsesorden som ganghastigheten til de evakuerende. Naturlig trekk i tunnelen og større branneffekter, spesielt i kombinasjon med helning på tunnelen, kan medføre at røyken beveger seg hurtigere enn de evakuerende.



Figur 5-2: Røykspredning med en større brann og en dominerende ventilasjonsretning . Hentet fra [T]

Ved aktivering av ventilasjon vil røyken hurtig miste sjiktingen og i større grad følge ventilasjonshastigheten i tunnelen, som normalt vil være hurtigere enn ganghastigheten til de evakuerende. Ingason [T] angir tre kategorier vedørende ventilasjonshastigheter som vist i Figur 5-3;

- lav ventilasjonshastighet; 0-1 m/s
- moderat ventilasjonshastighet; 1-3 m/s
- høy ventilasjonshastighet; > 3 m/s

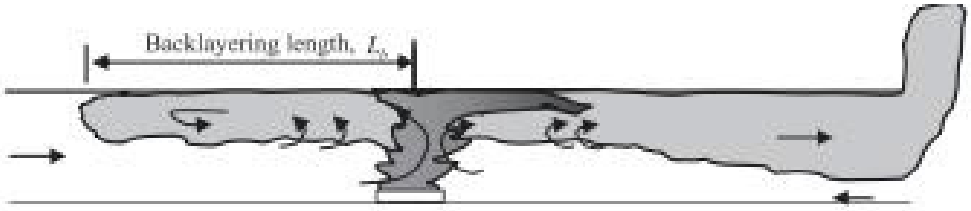


Fig. 12.2 A sketch showing the smoke stratification with a flow velocity of 1 m/s

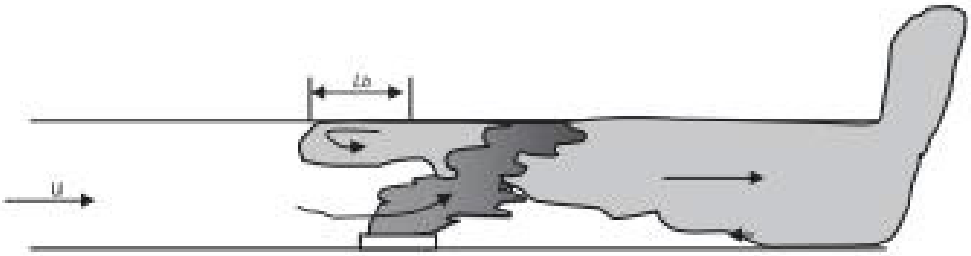


Fig. 12.3 A sketch showing a typical smoke stratification for group 2



Fig. 12.4 A sketch showing a typical smoke stratification for group 3, i.e. a flow velocity larger than the critical flow velocity, u_c

Figur 5-3: Sjiktning av røyken med økende ventilasjon. Hentet fra [T]

I denne risikoanalysen er følgende antatt om røykbevegelsene:

- All røyk spres i en retning med hastighet lik angitt ventilasjonshastigheten (1 m/s og 3 m/s)
- Siktningen av røyklaget antas å bryte sammen hurtigere ved økende ventilasjonshastighet eller økende brannvekstrate (se Tabell 5-20).
- Med unntak av temperaturen og hastigheten av røykfronten er tilstanden til røyken antatt lik i modellen i hele tunnellengden nedstrøms

5.2.5 Forutsetninger og antagelser om evakueringsadferd ved brann

I likhet med brannutvikling kan adferden til de evakuerende være avgjørende for utfallet av en tunnelbrann. Selv om antallet studier rundt adferd i tunnelbranner er begrenset er det samtidig økende forståelse av rundt dette i takt med blant annet benyttelse av mer avansert teknologi for å visualisere branner. Det eksisterer også noen få studier med faktiske tunnelforsøk hvorav en studie fra UPTUN prosjektet er en av disse[X]. Her ble det gjennomført forsøk i en tunnel med biler i kø etter et vogntog, hvor kunstig røyk ble utløst. Forsøkene viste svært begrenset med reaksjon inntil en talemelding ble aktivert etter 5 minutter, da reagerte de fleste innen et minutt. Forsøkene viste også at personer vil reagere mye hurtigere om andre reagerer samt at ingen vil passere det «brennende» kjøretøyet. Personer rømmer generelt til den nærmeste utgangen hvis ikke rømmer de fra brannen til den nærmeste utgangen.

I forsøkene var det en person per kjøretøy, faktiske branner viser også at flere faktorer kan påvirke og forsinke reaksjonsmønstre slik som gruppetilhørighet ved eksempelvis familietilknytning, reisende i en buss og lignende. Manglende informasjon og/eller manglende oversikt over hendelsene/brann som inntreffer kan også forsinke reaksjoner. Ved større branner er det også erfart at reduksjon i sikten inntreffer meget hurtig da røyken beveger seg raskt ned mot veibanen, slik at personer fort blir desorienterte [Y], [Z].

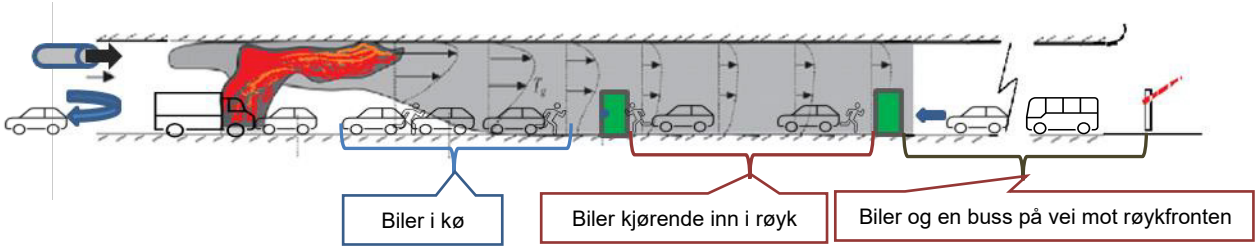
Brannhendelser viser videre at svært få rømmer til fots med mindre de ikke er mulig å kjøre videre, ofte grunnet dårlig sikt og påfølgende kollisjoner. Flere blir også værende i bilen, enten for å avvente situasjonen eller etter et mislykket forsøk på å kjøre ut. Årsaken til at personer avventer i kjøretøyet er både grunnet manglende informasjon eller informasjon om faktisk å bli i kjøretøyet i påvente av innsatsmannskaper[Y][AA]

Forsøkene og observasjonene over er stor grad relatert til kjøretøy i kø eller i nærhet av brannen. Kødannelser, ofte på grunn av kollisjoner, er en hyppig medvirkende årsak til katastrofale branner i tunneler [T] [BB]. På en annen side er det flere alvorlige brannhendelser hvor biler ofte kan passere brannen og vil passere selv med større branneffekter. Konsekvensene ved slike alvorlige hendelser hvor man kan passere brannen er ofte lavere [T], [Y], [Å].

For kjøretøy som ikke står i kø, men kjører mot en møtende røykfront, viser undersøkelser av større branner i både Oslojordtunnelen og Gudvangatunnelen at mange trafikanter vil prøve å snu om de møter røykfronten i tunnelen, men mange av disse som snur kan miste sikten i røyken og få problemer med å kjøre ut [Y], [Å]. Tidlig varsling via radio og/eller i høyttalere sammen med stopplys og skilting om å snu har vist seg effektivt i f.eks. Gudvangatunnelen [Z]. I et større branntilfelle i Oslofjordtunnelen ble det ikke erfart at mange kjørende snudde, men det er samtidig usikkert når skiltingen om å snu ble aktivert samt at informasjonen var mangelfull. Bilister som kjører mot brannen, men i samme retning som ventilasjonen og røykbevegelsene, vil normalt klare å snu og kjøre ut[BB].

I denne studien er det forutsatt følgende:

- Biler som er oppstrøms brannen (i begge kjøreretninger) antas alle å kjøre ut eller evakuere til fots ut av tunnelen uten å eksponeres for røyk eller brann.
- Personer nær brannen (biler i kø) antas å rømme gående fra brannen til nærmeste utgang.
- Øvrige personer oppstrøms brannen antas å stoppe når sikten blir lav (<10m sikt) for deretter å rømme til fots til nærmeste nødutgang.(Biler kjørende inn i røyk)



Figur 5-4: Prinsipiell beskrivelse av brannscenario med trafikale forhold og rømningsadferd

Det bemerkes at biler som stopper i kø, i stor grad forventes å kunne rømme under røyksjiktet og således eksponeres for mindre røyk. Denne røyksjiktningen vil gradvis bryte sammen i takt med økningen av brannen. I beregningene og resultatene vises det også ulike resultater for kjøretøy som kjører inn i røyk og for kjøretøy som står i kø bak brannen.

5.2.6 **Resultater brann i mindre lastebil (50 MW)**

Resultatene under viser antall personer som påvirkes av røyken i så stor grad at de mister evnen til å evakuere. Beregningene reflekterer kun rømningsfasen i tunnelen frem til en utgang, men ikke på videre rømning i rømningstunnel eller opphold i evakueringsrom. Beregningen baseres på FED som beskrevet i kap. 5.2.1 og ytterligere vist i grafer i kap. 0 Tabellen under viser beregninger med en rask brann med en maksimal branneffekt på 50 MW. Denne effektutviklingen tilsvarer normalt en brann i lastebil med noe brennbar last. Det bemerkes at brannvekst og effektstørrelse er parametere med stor variasjon og stor

påvirkning på resultatet. Både hurtigere og langsommere branner enn beregnet her kan inntreffe i en lastebil og kan følgelig påvirke resultatet i henholdsvis negativ og positiv retning. Inndata i beregningene er vist i Tabell 5-20. Forutsetninger rundt adferd og trafikale forhold er prinsipielt vist i Figur 5-4.

Tabell 5-21: Resultater antall personer som mister evnen til å evakuere. brann i lastebil (50 MW)

Antall personer som mister evnen til å evakuere ved brann i lastebil (50 MW) I senter av tunnel										
Tiltak	**Beskrivelse tiltak**	**Plassering av de evakuerende**	**Alternativ 1 To tunneler; dvs. kjørbart opp til Skúgvoy**		**Alternativ 2 Én lang tunnel, Ventilasjons sjakt fra Skúgvoy,**		**Alternativ 3 Én lang tunnel**		**Alternativ 4 med rundkjørsel og veg til Skúgvoy**	
			Nat. -vent-vent-ilasjon 1 m/s	Mek. Ve ilasjon 3 m/s	Nat. ilasjon ilasjon 1 m/s	Vent 3 m/s	Nat. vent-ilasjon 1 m/s	Mek. Vent-ilasjon 3 m/s	Nat. vent-ilasjon 1 m/s	Mek. Vent-ilasjon 3 m/s
0	Ingen spesielle sikkerhetstiltak (tiltak ihht til N500)	Kø nær brann	31,5	22,5	31,5	22,5	31,5	22,5	31,5	22,5
		Kjørende inn i røyk	53,5	62,5	68,5	77,5	62,5	71,5	52	61
		Totalt	**85**	**85**	**100**	**100**	**94**	**94**	**84**	**84**
1	Som 0, med redningscontainere c/c 375 m	Kø nær brann	0	0	0	0	0	0	0	0
		Kjørende inn i røyk	11,5	0,79	14,7	0,98	13,4	0,9	11,4	0,77
		Totalt	**11,5**	**0,79**	**14,7**	**0,98**	**13,4**	**0,9**	**11,4**	**0,77**
2	Som 0, med delt tverrsnitt for redning. Utganger c/c 375 m	Kø nær brann	0	0	0	0	0	0	0	0
		Kjørende inn i røyk	12,5	1,05	16,02	1,3	14,61	1,2	12,16	1,02
		Totalt	**12,5**	**1,05**	**16,02**	**1,3**	**14,61**	**1,2**	**12,16**	**1,02**
3	Separat redningstunnel. Utganger c/c 375 m.	Kø nær brann	0	0	0	0	0	0	0	0
		Kjørende inn i røyk	11,5	0,79	14,7	0,98	13,4	0,9	11,4	0,77
		Totalt	**11,5**	**0,79**	**14,7**	**0,98**	**13,4**	**0,9**	**11,4**	**0,77**

Resultatene viser mindre forskjeller mellom ulike sikkerhetstiltak da beregningene og forutsetningene for rømningsfasen er tilnærmet lik med de ulike sikkerhetstiltakene. Dette med unntak av sikkerhetstiltak 0 som gir langt høyere konsekvenser som tilsier at alle trafikanter i tunnelene mister sin evne til å evakuere.

De ulike tunellvariantene/-alternativene gir også mindre forskjeller i konsekvenser. Forskjellene skyldes i hovedsak økning i lengden på tunellene og følgelig økning i antall kjøretøy i tunell som potensielt kan eksponeres for røyk og brann.

I forhold til en endret plassering av brann, endret ventilasjonsretning eller endring i trafikkmengde kan følgende sammenhenger gjøres øvrige forutsetningene som er beskrevet i kap. 5.2.2, 5.2.3, 5.2.4 og 5.2.5:

- Hvis ventilasjonsretningen snus og brannen er i senter av tunnelen (som vist i Figur 5-1) vil antall personer som mister evnen til å evakuere være proporsjonal med antall biler som kjører inn mot ventilasjonsretningen. Hvis ventilasjonsretningen var i motsatt retning vil antall personer i Tabell 5-21 reduseres med tilsvarende reduksjon i trafikken i motsatt retning (20/80, 20 % trafikk i motsatt retning)
- Hvis brannen flyttes oppstrøms vil antall personer som mister evnen til å evakuere økes i takt med avstand brannen flyttes. Hvis brannen flyttes nedstrøms, vil antallet bli tilsvarende redusert. Antallet vil også kunne påvirkes av hvor brannen oppstår mellom to utganger, men denne avhengigheten vil i større grad påvirkes ved enda hurtigere brannvekst og branneffekter.
- Antall personer som mister evnen til å evakuere vil være helt proporsjonal med økning eller reduksjon i trafikken. Et gjennomsnittlig trafikkscenario med bruk av ÅDT 1300 vil eksempelvis utgjøre ca. ¼ del av trafikken beregnet i tabellen over.

5.2.7 **Resultater brann i vogntog (100 MW)**

Tabell 5-22: Resultater antall personer som mister evnen til å evakuere. brann i ultrarask brann i vogntog (100 MW). Denne effektutviklingen tilsvarer normalt en brann i et vogntog med brennbar last, hvor lasten gir et vesentlig bidrag.

Antall personer som mister evnen til å evakuere ved brann i vogntog (100 MW) I senter av tunnel										
Tiltak	**Beskrivelse tiltak**	**Plassering av de evakuerende**	**Alternativ 1 To tunneler; dvs. kjørbart opp til Skúgvoy**		**Alternativ 2 Én lang tunnel, Ventilasjonsjakt fra Skúgvoy,**		**Alternativ 3 Én lang tunnel**		**Alternativ 4 med rundkjørsel og veg til Skúgvoy**	
			Nat. vent-ilasjon 1 m/s	Mek. Vent-ilasjon 3 m/s	Nat. vent-ilasjon 1 m/s	Mek. Vent-ilasjon 3 m/s	Nat. vent-ilasjon 1 m/s	Mek. Vent-ilasjon 3 m/s	Nat. vent-ilasjon 1 m/s	Mek. Vent-ilasjon 3 m/s
0	Ingen spesielle sikkerhetstiltak (tiltak ihht til N500)	Kø nær brann	21	14	21	14	21	14	21	14
		Kjørende inn i røyk	64	71	79	86	73	80	64	70
		Totalt	**85**	**85**	**100**	**100**	**94**	**94**	**85**	**84**
1	Som 0, med redningscontainere c/c 375 m	Kø nær brann	0,33	0	0,33	0	0,33	0	0,33	0
		Kjørende inn i røyk	39	13	47	17	43	16	38,06	13
		Totalt	**39,33**	**13**	**47,33**	**17**	**43,33**	**16**	**38,39**	**13**
2	Som 0, med delt tverrsnitt for redning. Utganger c/c 375 m	Kø nær brann	0,6	0	0,6	0	0,6	0	0,6	0
		Kjørende inn i røyk	40,3	15,1	48	17	45	16	39,36	14,76
		Totalt	**40,9**	**15,1**	**48,6**	**17**	**45,6**	**16**	**39,96**	**14,76**
3	Separat redningstunnel. Utganger c/c 375 m	Kø nær brann	0,33	0	0,33	0	0,33	0	0,33	0
		Kjørende inn i røyk	39	13	47	17	43	16	38,06	13
		Totalt	**39,33**	**13**	**47,33**	**17**	**43,33**	**16**	**38,39**	**13**

For brannscenarioet med vogntog i Tabell 5-22, vil tallene endres med lignende tendenser som beskrevet i kap. 5.2.6 for en rask brann til 50 MW. Forholdene mellom konsekvensene av de ulike sikkerhetstiltakene og tunnelalternativene er i stor grad de samme som beregnet for den raske brannen til 50 MW men

konsekvensene økes generelt for den ultra raske brannen til 100 MW. Tallene viser også at den ultraraske brannen kan medføre at noen får problemer med rømme til nærmeste utgang ved kø.

Med unntak av sikkerhetstiltak 0 øker også antallet personer som mister evnen til å evakuere vesentlig ved en økning i brannvekstraten. For sikkerhetstiltak 0 viser beregningene for en ultrarask brann til 100 MW, i likhet med en rask brann til 50 MW, at alle kjørende mister evnen til å evakuere.

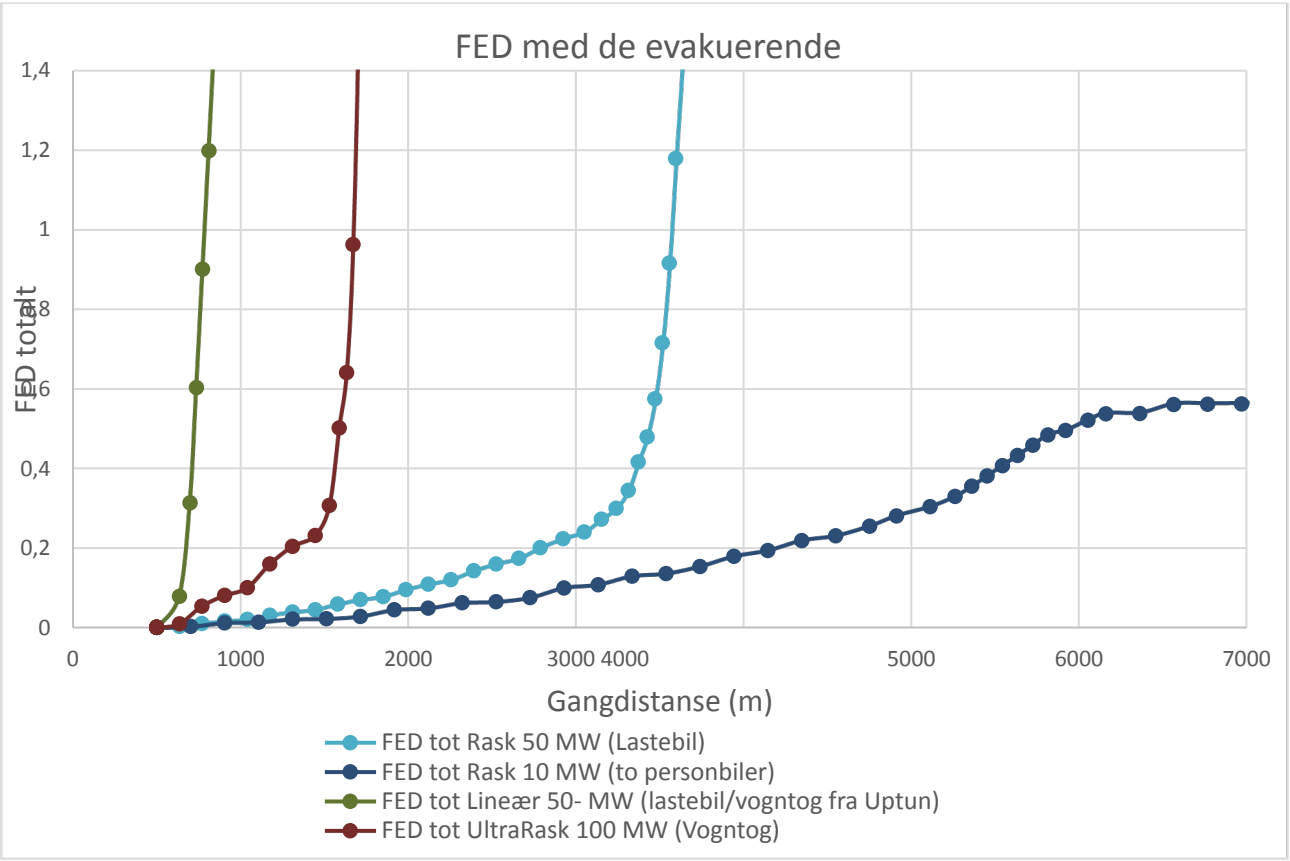
Øvrige betraktninger rundt endring av ventilasjonsretning og flytting av brannen vil ha lignende tendenser som beskrevet i forrige kapitel:

- Hvis ventilasjonsretningen snus og brannen er i senter av tunellen (som vist i Figur 5-1) vil antall personer som mister evnen til å evakuere være proporsjonal med antall biler som kjører inn mot ventilasjonsretningen. Hvis ventilasjonsretningen var motsatt retning vil antall personer i Tabell 5-21 reduseres med tilsvarende reduksjon i trafikken i motsatt retning (20/80, 20 % trafikk i motsatt retning)
- Hvis brannen flyttes oppstrøms, vil antall personer som mister evnen til å evakuere generelt økes i takt med avstand brannen flyttes. Hvis brannen flyttes nedstrøms, vil antallet bli tilsvarende redusert. Antallet vil også for en svært rask brann (i dette tilfelle ultrarask) påvirkes av hvor brannen oppstår mellom to utganger. Hvis brannen starter i nærheten av en utgang og blokkerer denne kan gangdistansen øke og antallet personer som mister evnen til å evakuere vil øke.
- Antall personer som mister evnen til å evakuere, vil være helt proporsjonal med økning eller reduksjon i trafikken. Et gjennomsnittlig trafikkscenario med bruk av ÅDT 1300 vil eksempelvis utgjøre ca. ¼ del av trafikken beregnet i tabellen over.

Sensitivitetsvurderinger av gangdistanse som funksjon av FED

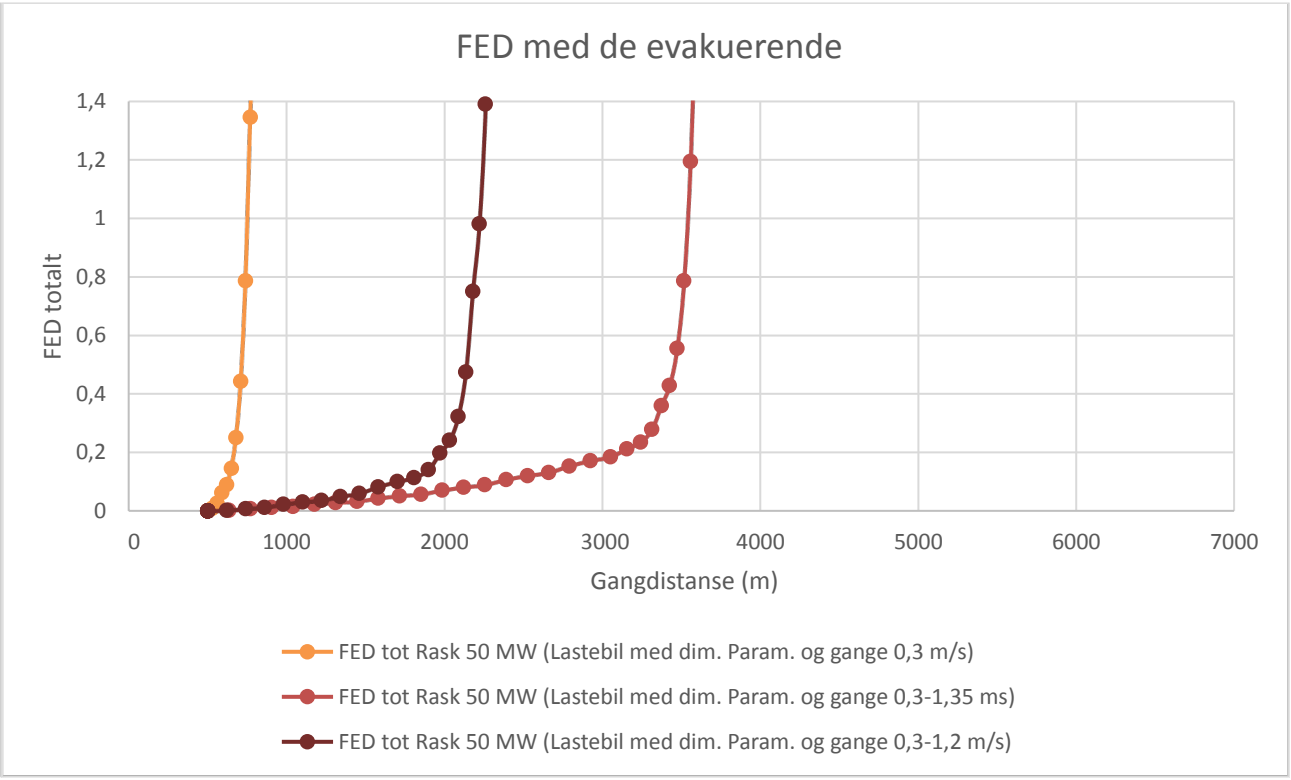
Resultatene og antallet i tabellene ovenfor i kap. 5.2.6 og 0 baseres på verdien FED som en funksjon av eksponering av kvelende gasser ved evakuering til utgangene. Det er samtidig benyttet konservative inndata i disse beregningene som er anbefalt for dimensjonering av tunneler. Figur 5-5 viser hvordan FED varierer med evakuert distanse med ulike brannvekstrater. Øvrige inndata i disse kurvene er justert for i større grad reflektere sannsynlige/gjennomsnittlige inndata heriblant noe høyere ganghastigheter. Se vedlegg 10.4 for utfyllende inndata for disse sensitivitetsvurderingene. Det bemerkes også at evakuering starter 500 m fra brannen når sikten reduseres 10 meter i røyk samt at ventilasjonshastigheten er 1,5 m/s. Dette vil i praksis tilsi at evakueringen starer tidligere jo hurtigere og større brannen er, da sikten reduseres fortere med hurtigere brannvekst.

Figuren viser at en brann i ca. 2 personbiler vil påvirke evakueringen i vesentlig mindre grad enn branner i større kjøretøy. Beregningen viser samtidig at ved ventilasjonshastigheter som er i samme størrelsesorden som ganghastigheter og noe høyere, kan selv mindre branner tilsvarende flere biler/liten lastebil bli utfordrende ved svært lange gangavstander. Brann i vogntog med brennbar last vil svært hurtig kunne utfordre evakueringen. Det bemerkes også Figur 5-5 viser en konservativ kurve anbefalt fra det større tunnelprosjektet Uptun [II]. I dette prosjektet ble det anbefalt en lineær brannvekstrate på 20 MW/min for alle branner større enn 30 MW. Det bemerkes at slike hurtige brannvekstrater inntrer normalt lenger inn i brannforløpet, men de viser også at branner i vogntog og lastebiler kan variere mye grunnet stor variasjon i brennbar last og lokalisering av startbrann [T]. Med brannvekstrate på 20 MW/min vil antallet personer som mister evnen til å evakuere øke betraktelig i forhold til beregnede resultater.



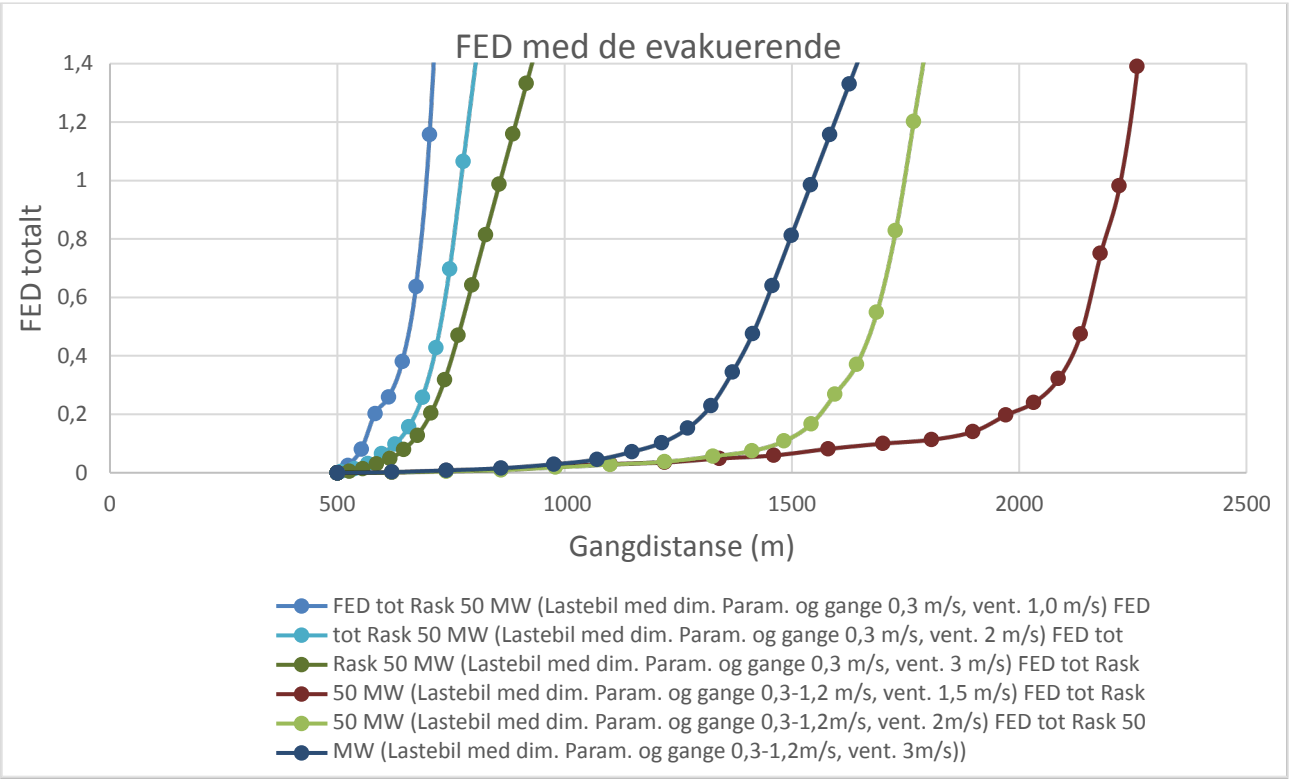
Figur 5-5: FED som funksjon av evakuert distanse i røyk, med ulike brannstørrelser (1,5 m/s V. hastighet)

Figur 5-6 viser tilsvarende tilfelle med brann i lastebil på 50 MW som vist i Figur 5-5, men i denne figuren er inndata basert på de «dimensjonerende» parameterne benyttet i beregningene av antall personer som mister evnen til å evakuere sammen ulike ganghastigheter. Kurvene sammenligner en konstant lav ganghastighet 0,3 m/s med en variabel ganghastighet i diktert av sikt i røyk. Slik det vises av disse resultatene vil evakuert distanse naturlig avhenge av ganghastigheter. Figuren viser samtidig at mindre endringer i ganghastigheter har stor betydning for evakuert distanse når ventilasjonshastigheten er i samme størrelsesorden som ganghastigheten. Figuren viser også hvordan en konstant lav ganghastighet 0,3 m/s gir en vesentlig reduksjon i evakueringsmulighet sett i forhold til ganghastigheter som er nærmere erfarte ganghastigheter.



Figur 5-6: FED som funksjon av distanse i røyk, med ulike sensitiviteter i ganghastighet. Vent. hastighet 1,5 m/s)

Figur 5-7 viser tilsvarende tilfelle med brann i lastebil på 50 MW som vist i Figur 5-5 og Figur 5-6 med de «dimensjonerende» parameterne benyttet i beregningene, men med ulike ganghastigheter. Kurvene sammenligner en ventilasjonshastighet på 1-,2- og 3 m/s med konstant lav ganghastighet 0,3 m/s samt en ventilasjonshastighet på 1,5-,2- og 3 m/s med variabel ganghastighet diktert av sikt i røyk. Slik det vises av disse resultatene vil evakuert distanse naturlig avhenge av ulike ventilasjonshastigheter, men de viser samtidig en vesentlig forskjell mellom konstant lav- og en variabel ganghastighet. Figuren viser at en økning i ventilasjonen er gunstig med en konstant lav ganghastighet, men en økning i ventilasjonshastighet med en høyrere variabel ganghastighet medfører at de evakuerende hurtigere blir tatt igjen av røyken.



Figur 5-7: FED som funksjon distanse i røyk, med ulike sensitiviteter i ventilasjonshastighet

5.2.8 Resultater fra 10 km tunnel, ÅDT 4000 iht. N500

Tabell 5-23 viser resultater fra en rask brann 50 MW sentrert i en 10km tunnel med ÅDT 4000. Dette tilsvarer den lengste tunnelen og den høyeste trafikken som tillates for en ettløpstunnel uten egne rømningsutganger i den norske tunellhåndboken N500. Inndata og scenario er som beskrevet i kap. 5.2.2 med bruk av geometriske verdier tilsvarende tunnelprofil T10,5. Det er tatt høyde for tilsvarende rushtids scenario som beskrevet i kap. 5.2.3 men oppjustert med økningen i ÅDT (4000/1300)

Tabell 5-23: Resultater antall personer som mister evnen til å evakuere. rask brann i lastebil (50 MW)

Tiltak	**Beskrivelse**	**Plassering av de evakuerende**	**Referanse tunnel N500 10 km, 4000 ÅDT**	
			Naturlig ventilasjon 1 m/s	Mekanisk Ventilasjon 3 m/s
0	Ingen spesielle sikkerhetstiltak (tiltak ihht til N500)	Kø nær brann	145	145
		Kjørende inn i røyk	0	0
		Totalt	145	145

Tallene fra Tabell 4-5 vil variere tilsvarende som beskrevet i kap.4.3.6. Det bemerkes også at ingen mister evnen til å evakuere ved kjøring inn i røyk. Dette er fordi lengden og hurtig stenging av tunnelen medfører at alle kjøretøyene ankommer brannen og køen før sikten og røyklaget faller.

5.2.9 Diskusjon og oppsummering av konsekvensberegninger

5.2.9.1 Vurdering av mer sannsynlige scenarioer

Konsekvensberegningene i kap. 5.2.6 og 5.2.7 tar utgangspunkt i et konservativt scenario hvor noen av de mer konservative parameterne er relatert til trafikkmengde, ventilasjonsretning og delvis adferd. Trafikkmengden er beregnet på et tidspunkt hvor den vil være på sitt høyeste med en høy rushtidsfordeling. Et mer gjennomsnittlig trafikkscenario vil utgjøre trolig mindre enn ¼ av den beregnede trafikken basert på en ÅDT tilsvarende 1300. I tillegg til dette er ventilasjonsretningen beregnet mot rushtrafikken. Ventilasjonsretningen vil trolig være med rushtidstrafikken slik at antall kjøretøy som møter en røykfront ved en brann kan ytterligere være redusert i størrelsesorden 1/4. Dette medfører at ved et mer gjennomsnittlig scenario i rushtrafikken, vil antall kjøretøy i en retning og følgelig antall personer som ikke kan evakuere, reduseres i størrelsesorden 1/4*1/4=1/16. I tillegg til dette er det antatt at ingen av kjøretøyene som kjører mot røykfronten snur før de møter røykfronten. Med god varsling og tydelig skilting viser erfaringen at mange vil klare å snu kjøretøyet før kritiske forhold inntreffer slik at antallet kunne justeres ned ytterligere.

Det er samtidig mange større branner i tunneler som inntreffer uten at trafikken blokkeres i det tidlige brannforløpet[Å] [JJ]. Dette kan forhindre eller redusere potensiell kø og således redusere konsekvenser.

Det er videre søkt å benytte konservative inndata for forbrenningsprodukter, ganghastigheter og tidspunkter for når røyklaget kommer ned i hodehøyde. Disse inndataene baseres allikevel i stor grad på anbefalte og eksperimentelle verdier [S] [W] slik at graden av konservativitet vil ikke være urimelig stor. Dette medfører at mer gjennomsnittlige verdier for disse parameterne kan medføre at tallene reduseres ytterligere.

Kap. 5.2.9.1 og 5.2.9.2 gir noen sensitivitetsbetraktninger av brannstørrelser, inndata, ventilasjonshastigheter og ganghastigheter. Slik Figur 5-5 viser, er brannstørrelsen og brannveksten særs viktig for utfallet av en brann.

Med disse betraktningene kan det oppsummeres at gjennomførte beregninger av antall personer som mister evnen til å evakuere vil med mer gjennomsnittlige parametere, men med samme brannstørrelse, reduseres vesentlig. En mer gjennomsnittlig trafikksituasjon alene kan eksempelvis redusere tallene i størrelsesorden 1/16. Dette vil reduseres ytterligere med gode muligheter for å vende og/eller muligheter for å passere skadestedet. Basert på erfart adferd synes det rimelig å anta en stor andel av kjøretøy oppstrøms vil kunne snu med god varsling. Tilsvarende synes det rimelig å anta at en stor andel kjøretøy vil kunne passere ulykkesstedet ved brannen før sikten reduseres i tunnelen, gitt at det er passering av brannstedet er mulig.

5.2.9.2 Ventilasjons- og ganghastigheter

I tillegg til brannstørrelsen og brannveksten vil forholdet mellom ganghastighet og ventilasjonshastighet diktere hvorvidt evakuerende nedstrøms kan evakuere før de blir innhentet av røyk med kritiske forhold. Dette vises også av sensitivitetsbetraktningene i kap.5.2.7. I svært lange tunneler må det forventes stort trykktap ved strømning slik at ventilasjonshastigheten kan bli lavere, men det er samtidig sannsynlig at en skjevfordeling av trafikken i rushtidsscenario kan gi drivkrefter slik at ventilasjonshastigheter blir høyere enn ganghastigheter, slik beregninger i denne rapporten viser. Den naturlige ventilasjonshastigheten kan også øke med størrelsen på brannen, spesielt ved helning på tunnelen. Det anses derav ikke usannsynlig at en brann som har en effekt over eksempelvis 20 MW kan medføre at strømningshastigheten generert av brannen overgår ganghastigheten[DD]. En mekanisk viftedrevet ventilasjon vil normalt ha hastigheter høyere enn ganghastigheter slik at mekanisk viftedrevet ventilasjon kan medføre at evakuerende blir innhentet av røyk, spesielt i lange tunneler uten utganger eller redningsrom.

Det bemerkes at i denne studien er det benyttet en ventilasjonshastighet på 1 m/s og 3 m/s, hvorav 1m/s er lavere enn normale ganghastigheter. I scenarioer med kø hvor tunnelene er uten redningsrom eller nødutganger er maksimal ganghastighet satt til 1,2 m/s men evakueringen starter først når sikten reduseres vesentlig. Dette medfører at ganghastigheten hurtig reduseres ned til minimum ganghastighet 0,3 m/s. Hvis evakuering starter tidligere før røyk innhenter de evakuerende, kan man teoretisk rømme tunnelen i forkant av en røykfront. Det er derimot usikkerheter knyttet til den naturlige ventilasjonshastigheten og hvorvidt de evakuerende kan opprettholde en ganghastighet over veldig lange avstander hvorav store deler av denne avstanden er med stigning. Derav er det konservativt antatt en sen start av evakuering i beregningene som medfører lave ganghastigheter i røyk.

Det vil også generelt være en fordeling av ganghastigheter i befolkningen avhengig av f.eks. alder, helsetilstand, gruppetilhørighet med mer. I beregningsmodellene er det ofte benyttet hastigheter med funksjonsfriske yngre mennesker[T]. I den beregnede modellen for ganghastighet i denne rapporten er derfor maksimale ganghastigheter redusert fra 1,35 m/s til 1,2 m/s. Det bemerkes at det fremdeles vil være en fordeling av ganghastigheter både lavere og høyere enn den angitte maksimale ganghastigheten.

Det bemerkes også at resultatene som vist i Tabell 5-21 og Tabell 5-22 gir en vesentlig lavere konsekvens ved bruk av mekanisk ventilasjon på 3 m/s. Dette skyldes, som diskutert over, at evakuering ved naturlig ventilasjon (1m/s) starter først med redusert sikt i røyk samt at økt ventilasjon medfører en «uttynning» av de kvelende røykgassene. Dette kan derav gi et unyansert bilde da tidlig evakuering uten ventilasjon (tilsvarende 1 m/s) vil kunne forekomme uten eksponering av røyk med følgelig vesentlig lavere konsekvens. Tilsvarende kan mekanisk ventilasjon medføre at evakuerende blir innhentet av røyk. Dette kan være kritisk ved større branner. Dette er også vist i Figur 5-7 i sensitivitetsanalysen.

5.2.9.3 Oppsummering av konsekvensberegninger med ulike tunnelvarianter, inkludert referansescenario N500 (10 km tunnel)

Resultatene vist i Tabell 5-21 og Tabell 5-22 kan som diskutert anses som nær tilnærmet «worst case» scenarioer, men forholdet mellom de ulike tunnelvariantene forventes å være det samme om mindre konservative scenarioer beregnes. Konsekvensberegningene vurderer ikke direkte de ulike sikkerhetsalternativene i form av redningsrom eller rømningstunneler. Beregningene gir derimot et bilde av evakuering i tunnelen til nærmeste utgang som en funksjon av trafikken. Det er tunnellengder, størrelse på tverrsnittsprofil, trafikk, antall evakuerende og deres ganghastigheter, avstand til nødutganger samt brannutvikling og plassering som er avgjørende for disse beregningene.

Basert på disse forutsetningene gir ikke beregningene nevneverdige forskjeller mellom de ulike sikkerhetstiltakene med unntak av scenarioet uten tiltak som gir vesentlig høyere konsekvenser. De minimale forskjellene i beregnet konsekvens mellom sikkerhetstiltakene skyldes noe ulike areal av tunneltverrsnittet med de ulike sikkerhetstiltakene. Større tverrsnittsareal medfører normalt mer innblanding av «frisk luft» og derav lavere konsentrasjoner av kvelende forbrenningsgasser.

Beregningene viser derimot ulike konsekvenser mellom de ulike tunnelalternativene. Dette skyldes primært ulike tunnellengder og derav flere eksponerte trafikanter.

Scenarioet fra tunnelhåndboken N 500 med 10 km tunnel, gir også høyere konsekvenser enn øvrige beregnede scenarioer for Sudurøytunnelen for alle sikkerhetstiltakene inkludert sikkerhetstiltak 0. Brannen er fremdeles en rask 50 MW brann, men trafikken er økt til ÅDT 4000. Også her må man ta i betraktning at dette reflekterer konsekvenser av ett spesifikt scenario. I denne risikoanalysen er det forutsatt en kollisjon mellom kjøretøy som medfører at biler ikke kan passere ulykkesstedet. Konsekvensene vil reduseres om kjøretøyer kan passere ulykkesstedet. I dette tilfellet ville en 10 km tunnel fra N500 skille seg fra tunnelene i denne studien, da svært mange kjøretøy i den 10 km lange tunnelen kan passere ulykkesstedet før kritiske forhold oppstår. Dette avhenger av blant annet brannplassering, men med utgangspunkt i den sentrerte brannen i lastebil (50 MW) og tidene som er forutsatt før kritiske forhold inntreffer (420 s), er det sannsynlig

at konsekvensene er lavere i den 10 km lange tunnelen fra N500, enn ved et scenario der kjøretøy kan passere ulykkesstedet i Sudurøytunnelen.

5.2.10 Usikkerheter vedrørende pålitelighet til sikkerhetstiltak

I forbindelse med evakuering i et brannscenario kan det potensielt oppstå usikkerheter forbundet med påliteligheten til de ulike sikkerhetstiltakene som er aktuelle for tunnelen. Disse er diskutert under.

1. Usikkerhet vedrørende lokalisering av nødutganger. Ulykke med påfølgende brann i tunnel utløser i mange tilfeller kaos. Røyk, økende varme og redusert sikt er bidragsytere til at panikk oppstår. I slike sitasjoner kan det være utfordrende å evakuere. Sikten kan være så dårlig at man ikke får orientert seg, og de evakuerende kan ha utfordringer med å frem til nødutganger. Forskning SINTEF har gjort på feltet viser at trafikanter klarer å finne fram til evakueringsrom med riktige ledesystem, selv i tykk svart røyk uansett alder, kjønn og nasjonalitet. [Q] SINTEF har dokumentert effekt av visuelle og akustiske ledesystem som hjelper å finne raskt fram til evakueringsrommene. Erfaring fra tidligere hendelser gir indikasjoner om at meldinger via ulike informasjonskanaler, radio, mobiltelefon, skilt, dynamiske ledelys og godt merkede dører kan være god støtte til selvredning. Likevel er det ikke sikkert det er tilstrekkelig i tett røyk. Når visuelle holdepunkter er vanskelig å finne i røyken, kan hørbare meldinger i bilen, tunnelrommet og akustiske kallesignal som leder trafikanten til nødutganger og redningsrom være et godt supplement.[J]

2. Usikkerheter forbundet med evakueringsrom

- Tåleevne mot brann - varme og røyk I et evakueringsrom har man ingen mulighet til å rømme videre til det fri. Ulykken i Mont Blanc-tunnelen har vist at rommene ikke har tålt påkjenningen av brannen, og har ført til omkomne.[J] Det forventes bedre kvalitet på rommene dersom disse hadde blitt bygget i dag, med design som hadde håndtert erfarte svakheter. Med økt fokus på evakueringsrom kan det i fremtiden komme funksjonskrav som bør gjøre rommene sikrere. Det er trolig lite sannsynlig at man får et tilsvarende stort brannscenario i Sudurøytunnelen som i Mont Blanc-tunnelen, da det vil være vesentlig lavere ÅDT i Sudurøytunnelen.

- Psykologisk trygghet i evakueringsrom over tid For utforming av evakueringsrom er det naturlig å se til gruveindustrien og til byggefasen av tunnel. Det er likevel viktig å huske på at bilister i tunnelen ikke er profesjonelle og ikke har fått opplæring i bruk av rommene. Det er viktig at utformingen av rommene gir følelsen av trygghet og at det er akseptabelt å være der over lengre tid. Hvis evakueringsrommet ikke oppfattes trygt er sannsynligheten høy for at trafikantene ikke vil benytte rommene. [J] Nyere studier viser at selv med inntil 20 personer i et trangt evakueringsrom, opplevdes rommene som trygge over en lengre periode.[Q] Ingen forsøkte å forlate rommet på egenhånd. Et viktig funn i studiet var at kommunikasjon med vegtrafikksentralen er viktig for å føle seg trygg og ivaretatt under opphold i evakueringsrom. God belysning er også viktig for opplevd sikkerhet i evakueringsrom.

3. Etablering av en rømningskanal som løper langs den ene sideveggen, adskilt fra trafikktunnelen med en brannsikker vegg er foreløpig ikke gjennomført som løsning i noen av dagens tunneler. Konseptet er presentert og lagt til grunn for den kommende Malta - Gozo-tunnelen, men detaljer er foreløpig ikke detaljert. Det er derfor fortsatt usikkerhet knyttet til løsningen. I teorien er dette en god løsning

som vil være vesentlig billigere enn å bygge et parallelt evakueringsløp. Men for at løsningen skal være sikker ligger må det legges noen premisser til grunn, som foreløpig innebærer noe usikkerhet:

- Betongkonstruksjonen må være sterk nok til å fungere som en barriere for en eventuell kollisjon fra kjøretøy som treffer innsiden av evakueringskanalen, samt tett nok til å forhindre røyksmitte fra tunnelløpet.
- Betongkonstruksjonen møter krav til temperaturmotstand produsert av en dimensjonerende brann.
- Det må foreligge sikker utforming av sluseløsning mellom rømningskanal og tunnel, spesielt med tanke på trykksetting, for å unngå røyksmitte.

5.3 Brannventilasjonsberegninger

5.3.1 Generelt

Denne rapporten forutsetter langsgående ventilasjon av tunnelen. Luft trekkes inn gjennom en tunnelmunning og sendes ut gjennom den andre. I første fase pågår selvredning fra tunnelen og hastigheten settes da gjerne til 1-1,5 m/s. Dette er et kompromiss mellom å unngå tilbakeslag av røyk og å ikke ventilere raskere enn at det er mulig å rømme uten å bli tatt igjen av røyk. Når selvrømningsfasen er over, økes ventilasjonshastigheten slik at røyken sendes i en retning uten tilbakeslag. Med en dimensjonerende brann på 50 MW krever dette en ventilasjonshastighet på 3 m/s. Oppstrøms stedet hvor brannen vil det da være ren luft. Nedstrøms vil røyk blande seg i hele tunnelens tverrsnitt, og en røykfront som beveger seg med samme hastighet som ventilasjonshastigheten.

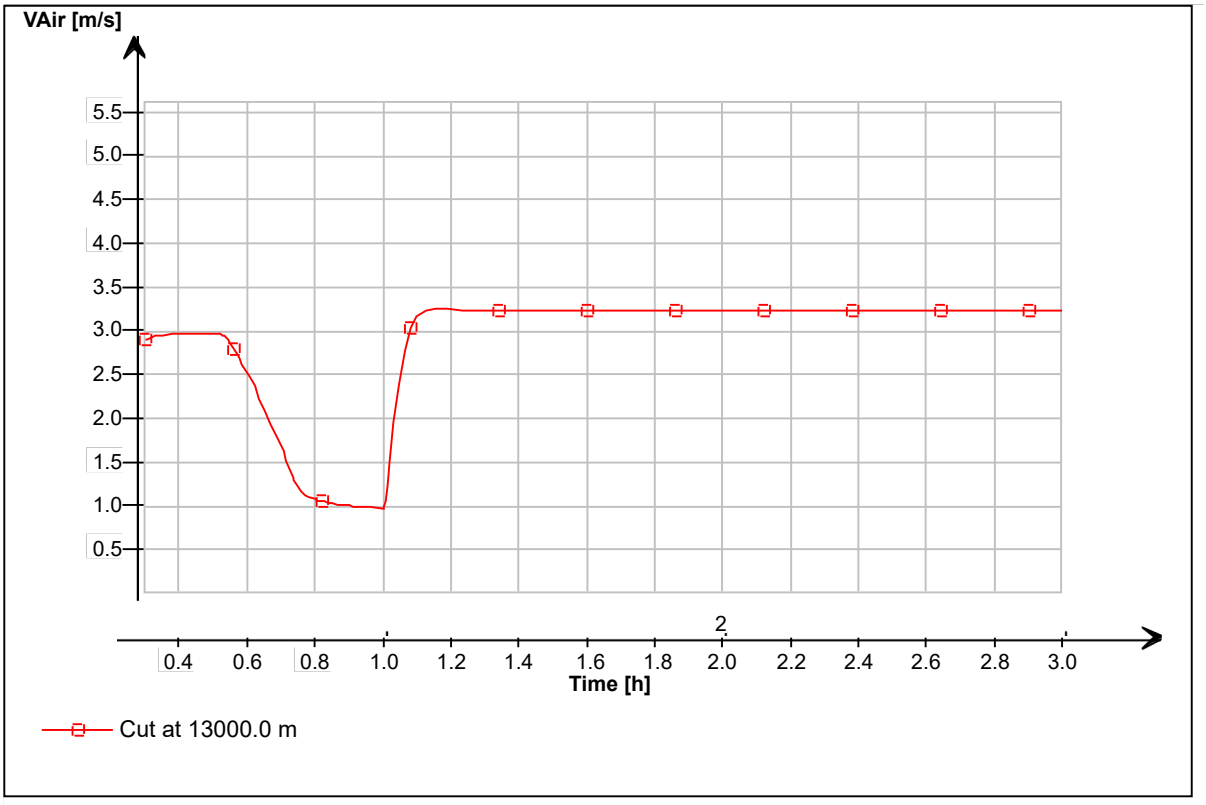
Alternativt kunne transvers ventilasjon vært benyttet. Det vil si at det benyttes lokale røykavtrekk med avtrekkskanaler i tak hvor motoriserte spjeld gjør at røyk kan trekkes av lokalt så nært brannen som mulig, gjerne med en avstand mellom spjeldene på ca. 100 m. Avtrekkskanalene blåser røyken ut via tverrslag.

Regelverket i EU tilsier at langsgående ventilasjon kan benyttes hvis en risikoanalyse tilsier at dette er tilstrekkelig ut fra utforming, trafikktall etc.

De lokale reglene i enkelte europeiske land går derimot mye lenger. I Tyskland er det påkrevet med lokale røykavtrekk hvis en tunnel er lenger enn 1,2 km. Tilsvarende krav for Sveits er ved 1,5 km og for Østerrike 3,0 km. Dette er imidlertid en svært kostbar og teknisk komplisert løsning med krav til nøyaktig deteksjon for hvor brannen er lokalisert, og avstand mellom tverrslagene kan ikke være lenger enn 3-5 km uten at avtrekkskanalene blir for plasskrevende i tunnelprofilet. Denne løsningen er derfor lite egnet i dette tilfellet og er ikke vurdert som realistisk.

Vi går ut fra følgende ventilasjonsstrategi ved brann:

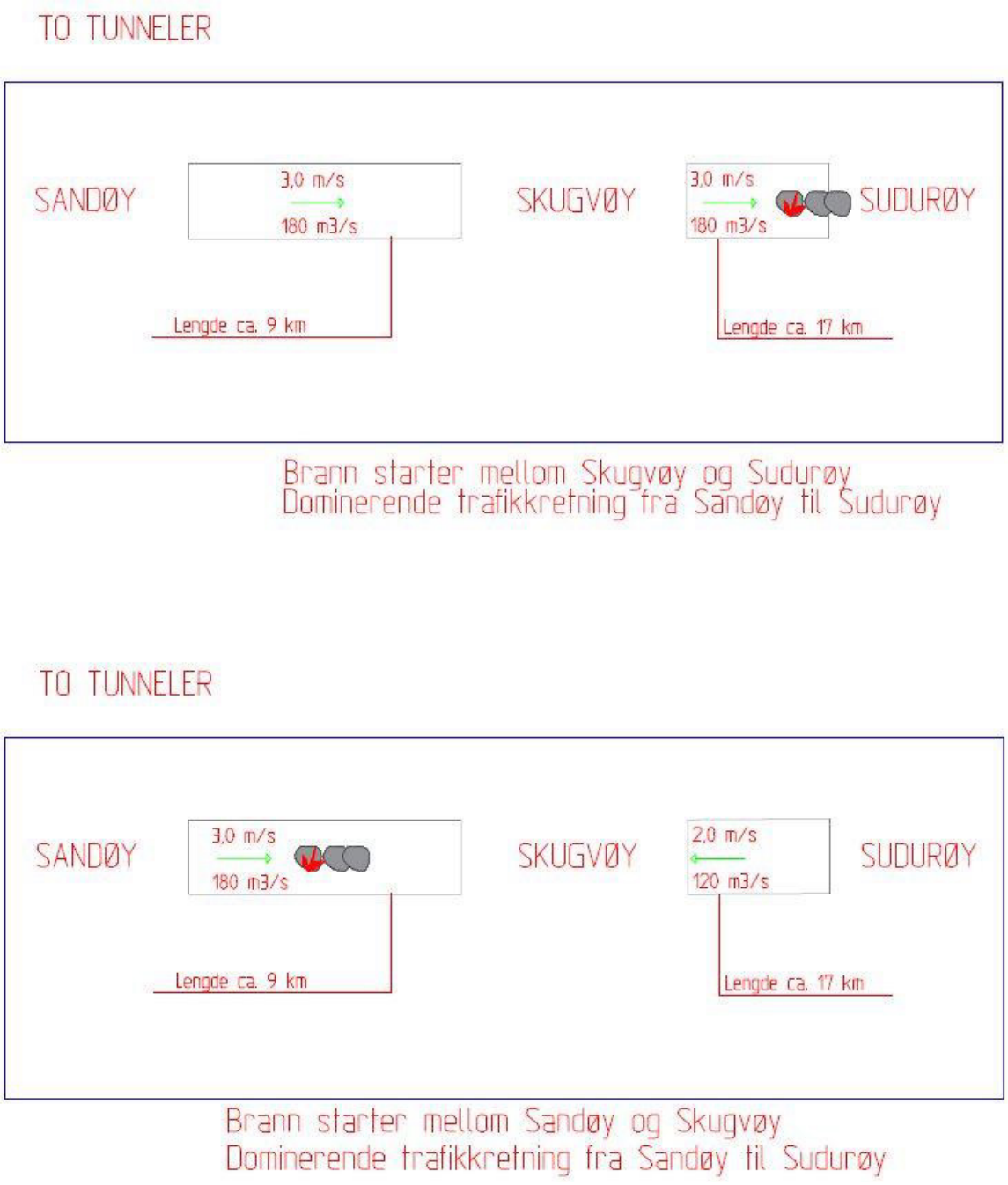
- Når brann oppdages stenges innkjøring til tunnelen i begge retninger, via bommer og/eller via trafikklys. Det vil ta ca. 20 minutter før tunnelen er tømt for biler. I denne perioden vil ventilasjonshastigheten i tunnelen bli påvirket av skyvkreftene fra biltrafikken.
- Ventilasjonsanlegget starter og regulerer ventilasjonshastigheten til minimum 1 m/s i eksisterende ventilasjonsretning i tunnelen.
- Når redningsmannskap ankommer ca. 30 minutter etter at brannen har startet opp, kan ventilasjonshastighet reguleres opp til 3 m/s etter vurdering på plassen. Normalt vil ventilasjonsretningen holdes uendret, men dette må vurderes ut fra hvor det befinner seg folk i tunnelen.



Figur 5-8: Ventilasjonshastighet i tunnel

Figur 5-8 viser ventilasjonshastighet i tunnelen ved dimensjonerende trafikkmengde. Brann oppdages og lukking av tunnelen skjer ved tidspunktet 0.5 (tidspunkt 0:30). Tunnelen har da en naturlig ventilasjonshastighet på 3 m/s på grunn av skyvkrefter fra bilene. Etter hvert som bilene kjører ut av tunnelen synker denne hastigheten. Ventilasjonsanlegget sørger for at hastigheten ikke synker under 1 m/s. Ved dimensjonerende trafikkmengde tar det ca. 20 minutter før hastigheten er så lav. 30 minutt etter at brann er detektert, angitt som tidspunkt 1.0 i figuren, ankommer redningsmannskap og ventilasjonshastigheten økes til 3 m/s. Figuren viser dermed at gjennomsnittshastighet i tunnelen den første halve timen etter utløst brannalarm er ca. 2 m/s ved dimensjonerende trafikkmengde. Dette medfører at røykfronten vil bevege seg ca. 3 km fra der brann er detektert til redningsmannskapet er på plassen. Ved lavere trafikktall vil gjennomsnittlig hastighet i første fase synke ned mot 1 m/s som er minimumshastigheten ventilasjonsanlegget tillater. En lavere ventilasjonshastighet enn det bør ikke benyttes da det vil gi lokalt høye konsentrasjoner av farlige branngasser samt gi svært høye temperaturer i nærheten av brannstedet.

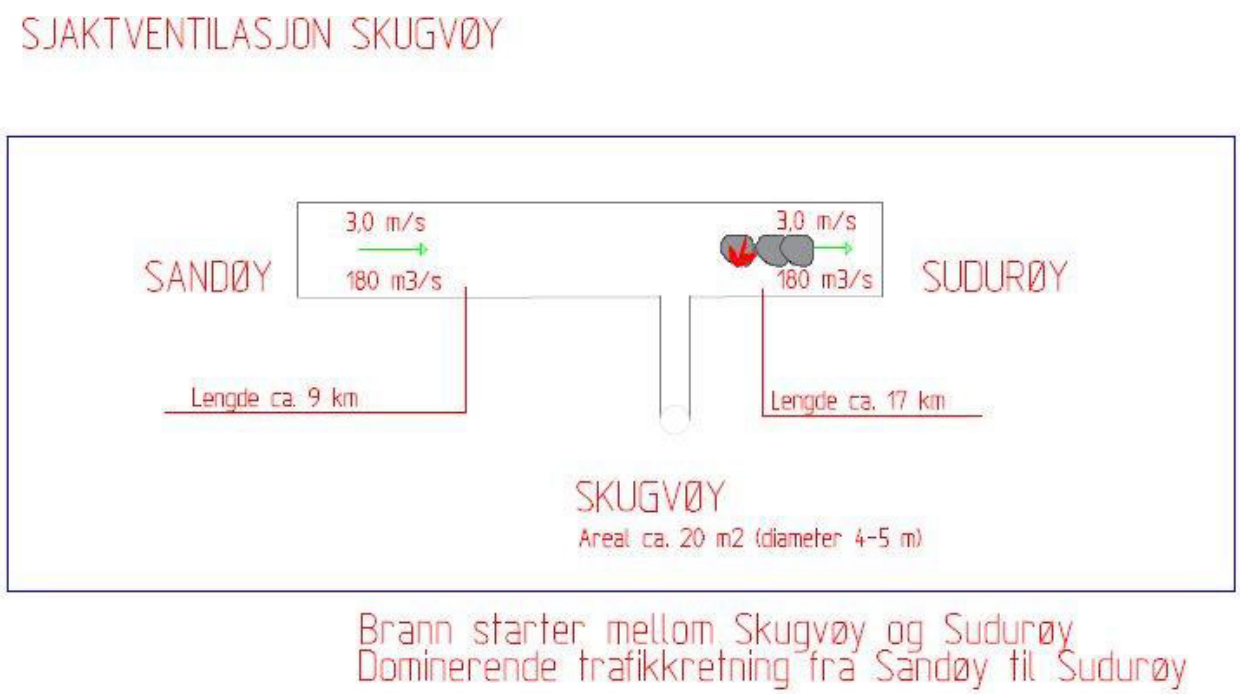
5.3.2 **Ventilasjonsanlegg ved tunnelalternativ 1 (to tunneler)**

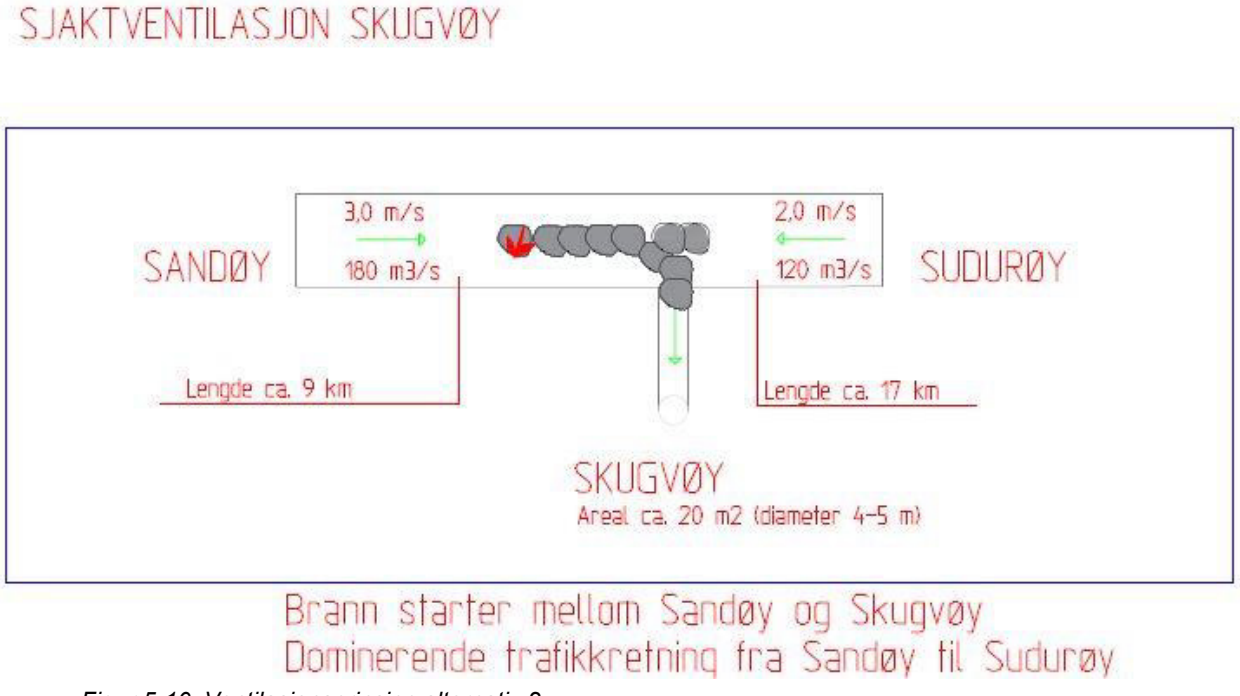


Figur 5-9: Ventilasjonsprinsipp alternativ 1

Figur 5-9 viser prinsippløsning for ventilasjon for tunnelalternativ 1 med ventilasjonsretning fra Sandøy til Sudurøy, hvor det er to tunneler som ventileres uavhengig av hverandre. Det installeres reversible jetvifter ved tak slik at tunnelene kan ventileres i begge retninger. Oppstart av vifter vil normalt skje i samme retning som den naturlige trekkretningen i tunnelen, noe som regel er i dominerende trafikkretning. Tunnelen det ikke er brann i ventileres retning mot tunnelen det er brann i for å unngå at røyk trekkes inn også i denne tunnelen.

5.3.3 Ventilasjonsanlegg ved tunnelalternativ 2 (sjaktventilasjon ved Skugvøy)





Figur 5-10: Ventilasjonsprinsipp alternativ 2

Figur 5-10 viser prinsippløsning for ventilasjon ved brann for tunnelalternativ 2 med ventilasjonsretning fra Sandøy til Sudurøy hvor det installeres ventilasjon via et tverrslag mot Skugvøy. Det installeres reversible vifter slik at tunnelen kan ventileres i begge retninger. Det installeres tverrslagsvifter i ventilasjonssjakt mot Skugvøy. Dette vil ventilasjonsmessig dele tunnelen inn i to deler forutsatt at tverrslagsventilasjonen er igangsatt, og dermed redusere lengden av tunnelen som forurenses med røyk. Det stilles imidlertid ekstra krav til at ventilasjonsanlegget styres korrekt da tverrslagsventilasjonen kun skal benyttes i enkelte scenarier, avhengig av eksisterende ventilasjonsretning og hvor ulykken er plassert i tunnelen.

Tabell 5-24: Ventilasjonsprinsipp for bruk av sjaktventilasjon

	Retning Sandøy – Sudurøy	Retning Sudurøy - Sandøy
Brann mellom Sandøy og Skugvøy	Sjaktventilasjon benyttes	Ingen sjaktventilasjon
Brann mellom Sudurøy og Skugvøy	Ingen sjaktventilasjon	Sjaktventilasjon benyttes

Overstående tabell viser hovedprinsipp for bruk av sjaktventilasjon. Det er en god del modifikasjoner til denne tabellen. Hvis brannen oppstår nært en av portalene eller nært sjakta er det ofte riktig å snu ventilasjonsretningen i tunnelen slik at lufta går ut ventilasjonssjakta for å unngå at hele tunnelen fylles med røyk, hvis trafikksituasjonen ellers tilsier at det er riktig. Dette må vurderes i hvert enkelt tilfelle.

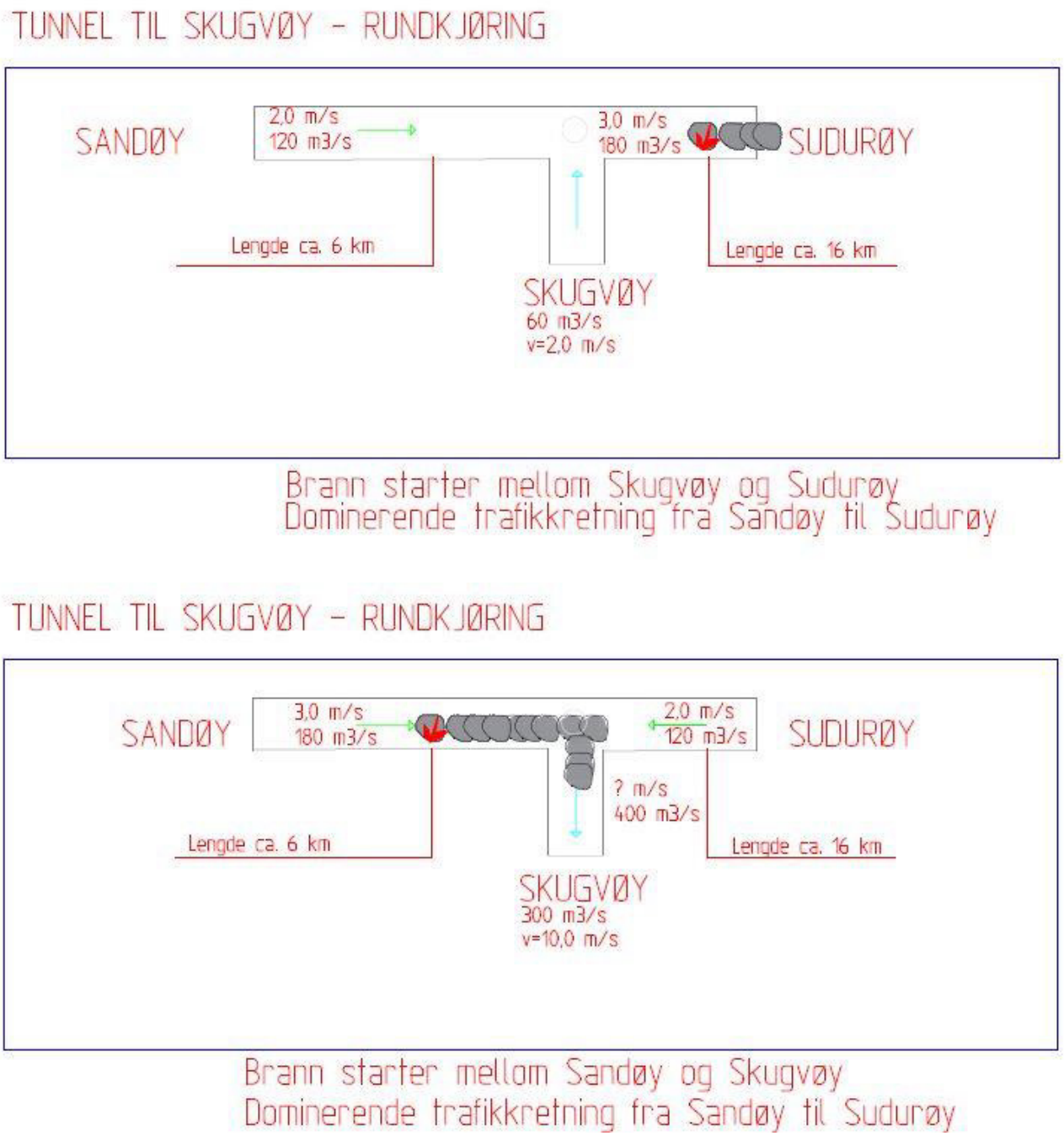
5.3.4 **Ventilasjonsanlegg ved tunnelalternativ 3 (én tunnel)**



Figur 5-11: Ventilasjonsprinsipp alternativ 3

Figur 5-11 viser prinsippløsning for ventilasjon for tunnelalternativ 3 med ventilasjonsretning fra Sandøy til Sudurøy. Det installeres reversible vifter slik at tunnelen kan ventileres i begge retninger. Oppstart av vifter vil normalt skje i samme retning som den naturlige trekkretningen i tunnelen, som regel i dominerende trafikkretning.

5.3.5 **Ventilasjon ved alternativ 4 (tunnelløp til Skugvøy)**



Figur 5-12: Ventilasjonsprinsipp alternativ 4

Figur 5-12 viser prinsippløsning for ventilasjon for tunnelalternativ 4 med ventilasjonsretning fra Sandøy til Sudurøy hvor det bygges et tunnelløp opp til Skugvøy. Det installeres reversible vifter slik at tunnelen kan ventileres i begge retninger. Dette gjelder også tunnelløpet til Skugvøy. Tilsvarende alternativ 2 vil dette

ventilasjonsmessig dele hovedløpet mellom Sandøy og Sudurøy inn i to deler. Det stilles også her ekstra krav til at ventilasjonsanlegget styres korrekt da ventilasjonsretning og mengde i tunnelløpene er ulik ved ulike scenarioer.

Alternativet er lite egnet hvis sikkerhetstiltak 1, 2 eller 3 benyttes. Tunnelløpet til Skugvøy vil ha et mye mindre tverrsnittsareal enn hovedtunnelen mellom Sandøy og Sudurøy med T5.5 profil mot T10,5 profil i hovedtunnelen. Samtidig skal den ha kapasitet til å ventilere både tunnelstrekket mellom Skugvøy og Sandøy og tunnelløpet mellom Skugvøy og Sudurøy. Dette vil gi ventilasjonshastigheter i denne tunnelen på over 10 m/s. Her kan det heller ikke benyttes tverrslagsvifter med stor kapasitet når det gjelder luftmengde og trykk slik vi kan i alternativ 2, men er tvunget til å benytte jetvifter i tak med mye lavere kapasitet. Det er ikke mulig å installere tilstrekkelig med jetvifter i tunnelløpet til Skugvøy, noe som medfører at viftene i hovedtunnelen må lage tilstrekkelig overtrykk i krysset med avkjøring til Skugvøy for å presse lufta opp gjennom tunnelen til Skugvøy. Hovedtunnelen vil dermed få et stort overtrykk noe som vil presse inn luft fra tunnelen inn i det som skal være sikkert areal å rømme til, det vil si redningstunnel eller redningsrom. Det vil også gi problemer med å åpne dørene inn til sikkert areal.

5.3.6 Vurdering av de fire tunnelalternativene med tanke på brannventilasjon

Det er forutsatt langsgående ventilasjon for tunnelen. I alternativ 2 og 4 er det i tillegg mulig å ventilere røyk opp mot Skugvøy via henholdsvis ventilasjonsjakt og tunnelløp.

En sammenligning av brannventilasjon for tunnelalternativene er gjort, der det er benyttet tunnelalternativ 3, en sammenhengende tunnel på ca. 22 km, som sammenligningsgrunnlag. Vi har forutsatt at brannventilasjon igangsettes først etter at redningsmannskap har fått oversikt over situasjonen og kan igangsette ventilasjon, som beskrevet i kapittel 5.3.1. Dette vil ta min. 30 min fra brannen er registrert.

Tunnelalternativ 1 med to tunneler via Skugvøy gir to kortere tunneler på henholdsvis 17 km og 9 km sammenlignet med tunnelalternativ 3, som er en sammenhengende tunnel på ca. 22 km. Det medfører at en kortere tunnel må evakueres i tunnelalternativ 1 i forhold til tunnelalternativ 3. Dette forkorter også tiden det tar å evakuere tunnelen for biler med ca. tre minutter i forhold til alternativ 3.

I tunnelalternativ 2, med ventilasjonssjakt til Skugvøy, er mellomstopp på Skugvøy i alternativ 1 erstattet med et røykavtrekk til Skugvøy. Dette medfører at tunnelen også i dette tilfelle er delt inn i to deler på henholdsvis 17 og 9 km hvor røyk ikke vil smitte mellom tunneldelene så lenge ventilasjonsanlegget styres slik at røyk trekkes av på Skugvøy i de scenarioene hvor det er aktuelt. Vi får derfor i teorien samme fordel i tunnelalternativ 2 som i tunnelalternativ 1 når det gjelder rømning til fots.

Dette krever imidlertid at ventilasjonsanlegget i en brannsituasjon styres riktig. Røykavtrekk til Skugvøy skal kun benyttes i de tilfellene der ventilasjonsretning og plassering av brann gjør at røykfronten passerer ventilasjonssjakten. De to delene av tunnelen på hver side av røyksjakten skal ventileres ulikt ut fra hvor brannen er plassert, hvor det er personer i tunnelen og hvilken retning den naturlige ventilasjonsretningen har.

Det er derfor enklere å gjøre riktige beslutninger i tunnelalternativ 1 enn i tunnelalternativ 2.

Når det gjelder evakuering av biler vil alternativ 2 ta 3 minutt lenger tid enn alternativ 3, siden tunnelen fysisk sett er lenger og det derfor tar lenger tid å kjøre ut av tunnelen.

Tunnelalternativ 4 med mulighet for avkjøring til Skugvøy gir mulighet for å røykventilere til Skugvøy via tunnelen. I de scenarioene hvor avkjøringen til Skugvøy benyttes som røykavtrekk, kan den naturlig nok ikke benyttes som rømningsvei. Samtidig er det ikke behov for denne som rømningsvei i de scenarioene hvor Skugvøy ikke skal benyttes som røykavtrekk. Alternativ 4 vil derfor på de fleste måter være tilsvarende alternativ 2.

Forskjellen er at tunnelalternativ 4 ikke er egnet hvis sikkerhetstiltak 1, 2 eller 3 velges. På grunn av et trangt tverrsnitt kombinert med bruk av jetvifter i stedet for tverrslagvifter blir det behov for et mye høyere trykk i hovedtunnelen i området rundt avkjøringen til Skugvøy, noe som vil gi problemer i forhold til eventuell rømningstunnel eller rømningscontainer, både med tanke på å få overtrykk i rømningstunnelen/ rømningscontainer i forhold til hovedtunnelen for å sikre at røyk ikke presses inn samt i forhold til det å åpne og lukke dører inn til rømningstunnelen eller rømningscontainer. Dette alternativet anbefales derfor ikke hvis sikkerhetstiltak 1,2 eller 3 velges uten at tverrsnittet på avkjøring til Skugvøy økes til T9 slik at overtrykket kan reduseres.

Det vil ta like lang tid å evakuere denne tunnelen som tunnelalternativ 2, det vil si ca. 3 minutter lenger enn alternativ 3.

Alternativene til tunnelalternativ 3 har dermed som eneste fordel at lengden av tunnelen som utsettes for røyk reduseres fra ca. 22 til maksimalt 17 kilometer. Denne reduksjonen kan man oppnå både i alternativ 1, 2 og 4. Samtidig vil tiden det tar å tømme tunnelen for biler øke med ca. 3 minutt for alternativ 2 og 4 mens den reduseres for alternativ 1.

Tunnelalternativ 1 er den løsningen som er enkleste å styre i et tilfelle brann.

Tunnelalternativ 2 er mer krevende å styre riktig.

Tunnelalternativ 4 vil fungere tilsvarende tunnelalternativ 2 ved sikkerhetstiltak 0. Tunnelalternativ 4 anbefales ikke hvis sikkerhetstiltak 1, 2 eller 3 velges.

5.4 Oppsummering av beregninger

Sannsynlighetsberegningene gjennomført i kap. 5.1 viser at man kan anta ulike sannsynligheter for brann i de ulike tunnelalternativene. Tabell 5-25 under viser oppsummering av predikerte sannsynligheter for ulike brannstørrelser for hvert tunnelalternativ. Tallene omfatter branner i både lette og tunge kjøretøy.

Tabell 5-25: Tid mellom hver brannhendelse for de ulike tunnelalternativene, fordelt på brannstørrelse.

	Tid mellom hver hendelse (år)			
	Alternativ 1	**Alternativ 2**	**Alternativ 3**	**Alternativ 4**
1 MW	3,7 år	6,4 år	7,4 år	7,2 år
5 MW	7,4 år	12,8 år	14,8 år	14,4 år
25 MW	17,6 år	30,2 år	35 år	34 år
50 MW	39,6 år	67,2 år	78,1 år	75,8 år
100 MW	105,5 år	179,2 år	208,3 år	202 år
200 MW	316,5 år	537,6 år	625 år	606,1 år

Tabell 5-17 viser at alternativ 2, 3 og 4 gir relativt lik sannsynlighet for at det vil oppstå brann i tunnelene. Alternativ 1 kommer dårligere ut fordi, hovedsakelig fordi alternativet består av to tunneler som begge har brattere stigning opp til Skugvøy.

Predikert tid mellom hendelser for beste (alt. 3) og dårligste (alt. 1) alternativ er omtrent en dobling i frekvenser av antatte branner. En brann på 100 MW er antatt å kunne oppstå én gang hvert 105,5 år for alternativ 1 og 208,3 år for alternativ 3.

En oppsummering av konsekvensene for en 100 MW brann er fremstilt i tabellene under. Tabell 5-26 viser antatt omkomne personer i et worst case-scenario, Tabell 5-27 viser et scenario i en tilnærmet normalsituasjon. Tallene i Tabell 5-27 er en noe unøyaktig forenkling av scenariet, og er kun skalert ned fra et worst case-scenario, men gir likevel et bilde på konsekvensene en kan forvente seg.

Tabell 5-26: Tabellen viser antatt omkomne i et worst case scenario for 100MW brann

Antall personer som mister evnen til å evakuere ved brann i vogntog (100 MW) i senter av tunnel								
Sikkerhets-tiltak	**Alternativ 1**		**Alternativ 2**		**Alternativ 3**		**Alternativ 4**	
	Naturlig ventilasjon 1 m/s	Mekanisk Ventilasion 3 m/s	Naturlig ventilasion 1 m/s	Mekanisk Ventilasion 3 m/s	Naturlig ventilasion 1 m/s	Mekanisk Ventilasion 3 m/s	Naturlig ventilasion 1 m/s	Mekanisk Ventilasion 3 m/s
0	**85**	**85**	**100**	**100**	**94**	**94**	**85**	**85**
1	**39,33**	**13**	**47,33**	**17**	**43,33**	**16**	**47,33**	**17**
2	**40,9**	**13,2**	**48,6**	**17**	**45,6**	**16**	**48,6**	**17**
3	**39,33**	**13**	**47,33**	**17**	**43,33**	**16**	**47,33**	**17**

Tabell 5-27: Tabellen viser konsekvenser av en 100MW i en normalsituasjon. Tallene er skalert ned fra et worst case scenario for å vise situasjonen for en normal trafikksituasjon.

Antall personer som mister evnen til å evakuere ved brann i vogntog (100 MW) i senter av tunnel								
Sikkerhetstiltak	**Alternativ 1**		**Alternativ 2**		**Alternativ 3**		**Alternativ 4**	
	Naturlig ventilasjon 1 m/s	Mekanisk Ventilasion 3 m/s	Naturlig ventilasion 1 m/s	Mekanisk Ventilasion 3 m/s	Naturlig ventilasion 1 m/s	Mekanisk Ventilasion 3 m/s	Naturlig ventilasion 1 m/s	Mekanisk Ventilasion 3 m/s
0	**5,3**	**5,3**	**6,25**	**6,25**	**5,88**	**5,88**	**5,31**	**5,31**
1	**2,46**	**0,81**	**2,96**	**1,06**	**2,71**	**1**	**2,96**	**1,06**
2	**2,56**	**0,83**	**3,04**	**1,06**	**2,85**	**1**	**3,04**	**1,06**
3	**2,46**	**0,81**	**2,96**	**1,06**	**2,71**	**1**	**2,96**	**1,06**

Tabellene viser at konsekvensene er vesentlig lavere i en normalsituasjon enn i et worst case scenario.

En 50 MW brann vil, som vist i kap. 5.2.6, føre til vesentlig mildere konsekvenser for sikkerhetstiltak 1-3 enn for en 100 MW brann. For sikkerhetstiltak 0 vil konsekvensene være tilnærmet like både i et worst case scenario og i et scenario med normaltrafikk.

6 Diskusjon

I Norge har man en nullvisjon i trafikksikkerhetsarbeidet som sier at man skal ha «et transportsystem som ikke fører til tap av liv eller varig skade», hvor grunnpilaren er at ethvert menneske er unikt og uerstattelig. Målet er at veier skal utformes for menneskets forutsetninger og ha barrierer mot feilhandlinger og potensielle konsekvenser av disse. I denne sammenheng er selvbergingsprinsippet spesielt viktig. Dette prinsippet innebærer at trafikanter skal kunne ta seg ut av tunnelen på egen hånd, enten til fots eller i eget eller andres kjøretøy, dersom en ulykke oppstår. En forutsetning er at de som er involvert i en situasjon som krever selvredning må kjenne til dette prinsippet og den faktiske faren vedkommende befinner seg i. Selvredningsprinsippet er i samsvar med EU-direktivet og den norske tunnelsikkerhetsforskriften. I tunneler skal det derfor være lagt til rette for at folk skal kunne komme seg ut av tunnelen på egen hånd, eller overleve i tunnelen, dersom det oppstår en ulykke.

Skal selvredning fungere, og trafikantene ha en reell sjanse til å gjennomføre evakuering i røykfylte omgivelser på egen hånd, må tunnelen være konstruert og utstyrt med tekniske installasjoner som vil gi hjelp og støtte til trafikantene i en nødssituasjon.

Et av de farligste scenariene som kan oppstå i en tunnel er en stor brann i vogntog med farlig last (100MW eller større). Erfaringer fra slike branner viser at det er omtrent 10 minutter tilgjengelig for evakuering før trafikantene er fanget i en kritisk situasjon nær brannen. I løpet av denne tiden må trafikantene som berøres rømme tunnelen til et trygt sted. [J] Ved en slik brann må mennesker i utgangspunktet redde seg selv. Å vente på hjelp fra redningsetater kan bli fatalt ettersom det kan ta tid før redningsetatene ankommer brannstedet.[N] Dette gjelder spesielt for Sudurøytunnelen der avstandene tilsier at brannvesen vil ha en responstid som overstiger 15 minutter. Med tunnelalternativer som overstiger 20 km vil utrykningstid i tunnelen alene kunne ta over 10 minutter. Det er derfor ekstra viktig at selvbergingsprinsippet ivaretas slik at trafikanter kan redde seg selv.

Det kan derfor stilles spørsmål ved om forutsetningene for selvredning vil være tilstede i Sudurøytunnelen, spesielt dersom man ikke etablerer nødutganger. Tunnelen vil, uavhengig av valgt alternativ, være lang, med lange stigninger i hver ende. Selvredning i Sudurøytunnelen kan i prinsippet skje på tre måter:

1. Ved å kjøre forbi brannobjekt og ut motsatt portal av der man kom inn
2. Ved å snu og kjøre ut samme portal man kom inn
3. Ved å forlate kjøretøy og gå til nærmeste utgang, nødutgang eller redningsrom

Det er rimelig å anta at alle de tre selvredningsprinsippene vil bli benyttet i en større brann i Sudurøytunnelen.

Punkt 1 og 2 på denne listen vil utspille seg relativt likt for de ulike sikkerhetstiltakene. Så lenge man benytter kjøretøy til evakuering er det lite som skiller sikkerhetstiltakene fra hverandre når det kommer til utforming av tunnelløpene. Den største forskjellen i påvirkning på selvbergingsprinsippet finner man under punkt 3; når man er nødt til å forlate kjøretøyet sitt og evakuere til fots.

Tilfeller der man ser seg nødt til å forlate kjøretøyet for å rømme, er som regel hvis man oppholder seg tett på brannen, med redusert sikt og tilløp til en kaotisk situasjon. En slik situasjon gjør det vanskelig å snu kjøretøyet og kjøre ut, spesielt hvis det har begynt å samle seg kjøretøy på stedet. Undersøkelser Statens havarikommisjon (SHK) har gjort av tunnelbranner viser også at det er svært krevende å gjennomføre en sikker evakuering med eget kjøretøy i et røykfylt tunnelmiljø. Sikten reduseres ofte raskt, før den forsvinner helt.[S] I en slik situasjon er selvredningsprinsippet adskillig bedre ivaretatt for sikkerhetstiltak 1, 2 og 3, der man har mulighet til å rømme vekk fra det røykfylte tunnelløpet. Evakuering ved sikkerhetstiltak 0 vil måtte skje i de røykfylte omgivelsene langs tunnelløpet og ut til en av portalene.

Erfaringer fra evakuering i røykfylte omgivelser

Erfaringer fra brann i den 11,4 km lange Gudvangatunnelen i 2013 viser at fem av de evakuerende trafikantene klarte å rømme omtrent 8 km i røykfylte omgivelser. Disse selvevakuerte umiddelbart etter at brannen startet og gikk til fots i samme retning som røyk/ventilasjonsretningen i tunnelen. Under evakueringen utførte de et oksygenkrevende fysisk arbeid (gjennomsnittlig ganghastighet 5 km/t) over 95 minutter i svært røykfylte omgivelser. Disse kom levende ut av tunnelen, men med meget alvorlig skade. 23 andre trafikanter ble sittende i sine kjøretøy i inntil 75 minutter og hovedsakelig evakuert ut med redningsbiler. Skadeomfang for de 23 ble i etterkant definert som alvorlig skadd. På bakgrunn av høye estimerte kullosverdier og alvorlige kliniske sykdomstegn er det grunn til å tro at ytterligere røykeksponering i tunnelen ville satt de fem pasientene som hadde meget alvorlig skade i akutt livsfare. Det samme må antas innenfor gjeldende eksponeringstid dersom en eller flere av disse hadde hatt vesentlig høyere alder, kronisk hjerte- eller lungesykdom eller vært fysisk svekket av annen årsak. Ung alder og god helse var trolig medvirkende årsaker til at liv ikke gikk tapt under brannen. [S]

Under en brann i vogntog i Gudvangatunnelen i 2019 valgte to førere å forlate vogntogene sine og evakuere til fots. Statens Havarikommisjon for transport (SHT) regner med at de to vogntogførerne var eksponerte for røyk i omtrent 22 minutter totalt og hadde karbonmonoksid i blodet fordi de hadde blitt eksponerte for røykgassene fra brannen. Karbonmonoksid er en svært giftig branngass som binder seg 250 ganger sterkere til hemoglobin enn det oksygen gjør. Karbonmonoksid hindrer effektivt oksygentransport i blodet i kroppen. SHT mener at situasjonen kunne ha blitt livstruende dersom de to førerne hadde blitt eksponert for røykgassene over lengre tid, for eksempel dersom brannen hadde oppstått lenger inne i tunnelen. [NN]

I Gudvangatunnelen i 2013 og i Oslofjordtunnelen i 2011 fikk ikke trafikantene varsel i tide til å evakuere før tunnelen ble fylt med røyk. SHT mener at tidlig varsling er essensielt for å kunne ivareta trafikantenes muligheter for selvredning. I den siste brannen i Gudvangatunnelen klarte 19 kjøretøy å snu før de ble fanget i røyken, men SHT mener at varslingen likevel kan forbedres. [S]

Sikkerhetstiltak 0

Erfaringene fra Oslofjordtunnelen og Gudvangatunnelen er svært relevante for Sudurøytunnelen, spesielt for et alternativ uten nødutganger. I Sudurøytunnelen ville man i forhold til Gudvangatunnelen kunne ha enda lengre distanse å evakuere, og i tillegg en krevende stigning på 5% i enden av tunnelen. Dette gjør at eventuelle konsekvenser kan være enda mer alvorlige. Den største utfordringen med Sudurøytunnelen er lengden. Det er nærliggende å anta at dersom det oppstår en større brann vil en eller flere trafikanter være nødt til å evakuere til fots. Lengste foreslåtte alternativ for Sudurøytunnelen er i overkant av 25 kilometer. En brann i senter av tunnelen vil i slikt tilfelle føre til en evakueringslengde på 12,5 km i begge retninger. Figur 5-7 viser at de evakuerende kan klare å evakuere få km i røyk. Å skulle evakuere hele distansen til nærmeste tunnelmunning vil som både beregningene viser samt erfaring føre til fatale konsekvenser.

Et scenario der en full buss må stoppe som følge av et vogntog som brenner, vil være av de farligste scenariene. Det vil være en del busstransport gjennom tunnelen, både rutebusser og turistbusser, spesielt i sommerhalvåret. En buss vil ikke kunne snu på stedet og busspassasjerer må sannsynligvis evakuere til fots. Er man heldig finnes det andre kjøretøy i nærheten som kan plukke opp de gående. En usikkerhet er at man aldri kan vite hvem de evakuerende er og man har ingen garanti for at disse er i fysisk god form. En busslast kan bestå av eksempelvis eldre og funksjonshemmede som vil bruke lengre tid på å evakuere og kanskje ikke har samme tåleevne av giftige gasser som andre.

Sikkerhetstiltak 1, 2 og 3, som gir en mulighet til å rømme bort fra tunnelløpet, vil i så måte være betydelig sikrere.

Sikkerhetstiltak 1

Katastrofen i Mont Blanc-tunnelen i 1998 hvor 18 vogntog sto i brann og 39 mennesker omkom, hvorav to av dem omkom i evakueringsrom, førte til endringer i EU-direktivet vedrørende bruk av evakueringsrom. Direktivet krever nå at evakueringsrom skal ha utgang ut til det fri. En fransk kommisjon som gransket ulykken konkluderte med at ingen ville finne fram til rommene og at løsningen ikke var trygg nok, til tross for at mange overlevde på grunn av redningsrom som lå lengre unna brannen.

Evakueringsrom vil kunne tilby en god evakueringsmulighet vekk fra brann, samt fra røyken gjennom hele tunnelløpet. Erfaringer med bruk av evakueringsrom ved tidligere hendelser har vist at rommene kan være sårbare i bruk tett opptil brannen, som følge av varmeeksponering og varighet. Redningsrom er ett av flere tiltak Statens Vegvesen vurderer for å bedre forutsetningene for selvberging, særlig i vegtunneler med lav trafikk der det ikke er aktuelt å bygge et nytt parallelt løp. [J] Rommene har vist seg å redde liv i flere tilfeller, og etter utredning har Vegdirektoratet i Norge sendt brev til departementet med anbefaling om at evakueringsrom bør tas i bruk i norske vegtunneler. SHK mener også at tilstrekkelig isolerte og rett utformede evakueringsrom kan være effektive kompenserende tiltak for å hindre røykpåvirkning.[S] Det har vært stor utvikling siden 1998 og SINTEF mener nå at dagens redningsrom er langt bedre enn de som eksisterte på denne tiden. Evakueringsrommene i Mont Blanc tunnelen var ikke dimensjonert for mer enn 800 grader i 2 timer. Varmeutviklingen ved brann i vogntog med last antas å være på 100-300 MW og varmeutviklingen kan komme opp i 1500-2000 grader. Ved riktig valg av materialer, utforming og plassering vil det være mulig å dimensjonere rom som tåler denne belastningen over lengre tid.[J]

Dersom man kan legge til grunn at evakueringsrom vil tåle en større brann, kan dette være det beste alternativet for tunnelen, hvis man også inkluderer kostnadsbildet. Som tidligere nevnt er den største utfordringen med sikkerhetsalternativ 0 at man må evakuere store avstander til fots i røyk i tunnelen. Med evakueringsrom har man muligheter langs hele tunnelløpet der man kan unnslippe røyken.

Sikkerhetstiltak 2

Etablering av rømningskanal som løper langs den ene sideveggen, adskilt fra trafikktunnelen med en brannsikker vegg er foreløpig ikke gjennomført som løsning i noen av dagens tunneler. Konseptet er presentert og lagt til grunn for den kommende Malta - Gozo-tunnelen, men detaljer er foreløpig ikke utarbeidet eller godkjent. Det er derfor fortsatt usikkerhet knyttet til løsningen. I teorien er dette en god løsning som vil være vesentlig billigere enn å bygge et parallelt evakueringsløp. Men for at løsningen skal være sikker, må det legges noen premisser til grunn, som foreløpig innebærer noe usikkerhet:

- Betongkonstruksjonen må være sterk nok til å fungere som en barriere for en eventuell kollisjon fra kjøretøy som treffer innsiden av evakueringskanalen. Et brudd i konstruksjonen vil kunne blokkere for evakuering, samt at røyksmitte kan oppstå mellom tunnelløpet og rømningskanalen.

- Betongkonstruksjonen må møte krav til temperaturmotstand produsert av en dimensjonerende brann. I tillegg til må konstruksjonene være tette uten svakheter for å unngå røyksmitte inn i rømningstunnelen.

SINTEF/Cowi har i en egen studie anslått at en betongvegg må være opptil 50cm for å møte disse kravene. [P] Dersom man med sikkerhet kan si at disse usikkerhetene er ivaretatt vil dette være en god løsning for videre arbeid med tanke på sikkerhet. Det poengteres at løsningen trolig vil kreve sluser ved redningsdørene, og evakuering videre ut i det fri må også håndteres. Kanalen vil være trang og kan fort føre til kaotisk evakuering. Dersom brannmannskaper skal benytte kanalen til redning, kan det fort blir trangt. Det er likevel positivt at brannmannskaper faktisk har mulighet til å benytte kanalen i forbindelse med redning.

Løsningen er ikke videre vurdert i denne analysen og det anbefales at man følger det videre arbeidet på Malta. Før løsningen eventuelt besluttes tatt i bruk for Sudurøytunnelen, bør det gjennomføres en konkret studie på at løsningen vil være akseptabel for Sudurøytunnelen.

Sikkerhetstiltak 3

Sikkerhetstiltak 3 vil være det sikreste alternativet, men også det dyreste. Dette alternativet medfører lite usikkerhet og en kan anta at det vil være en pålitelig løsning i tilfelle det skulle oppstå en brann.

En psykologisk fordel tiltak 2 og 3 har, er at evakuerende trafikanter som rømmer gjennom en rømningsdør kan fortsette rømningen videre vekk fra brannområdet. Dette vil føles tryggere enn for et alternativ med evakueringsrom, der man må sitte og vente til å bli reddet eller til situasjonen har de-eskalert.

En felles fordel sikkerhetstiltak 1, 2 og 3 har, er at evakueringsrom og evakueringskanaler kan benyttes av nødetater som en del av utrykningen. Nødetatene vil ha områder med frisk luft de kan benytte i tunnelløpet, og kan benytte fasilitetene til å strategisk nærme seg brannen. I disse omgivelsene kan de restituere, samt kommunisere med nødetater på utsiden før de fortsetter redningsarbeidet. Dette vil kunne bidra til forbedret innsats.

I tilfeller der evakueringssituasjonen blir kaotisk grunnet høy varme, redusert sikt og innånding av røyk, er det viktig at de evakuerende finner frem til nødutgangene. Det er gjennomført en rekke studier [KK] [LL] [MM] som tar for seg denne problemstillingen og hvilke tiltak som er mest effektive for å sluse de evakuerende i riktig retning vekk fra ulykkessituasjonen og ut nødutganger. Det anbefales at slike studier benyttes i planleggingen dersom man velger et av disse sikkerhetstiltakene.

Sikkerhetstiltak 0 vs. referansetunnel

I analysen er det forsøkt å sammenligne risiko for Sudurøytunnelen uten nødutganger med en «lovlig» referansetunnel utformet i henhold til akseptable kriterier gitt i Statens Vegvesens Håndbok N500. Håndboken sier at det er lov å bygge en 10 km lang tunnel med ÅDT på 4000 uten nødutganger. Det poengteres at håndboken sier at det skal *vurderes* om nødutganger skal etableres for denne tunnelklassen. Som resultatene i kapittel 5.2.8 viser, er konsekvensene ved en brann svært avhengig av trafikksituasjonen på tidspunktet en eventuell brann inntreffer.

Referansetunnelen gir i konsekvensberegningene høyere konsekvenser enn øvrige beregnede scenarioer. Grunnen til dette er at referansetunnelen skiller seg fra tunnelene i denne studien med høyere ÅDT. I beregningene er det forutsatt en kollisjon mellom kjøretøy som medfører at biler ikke kan passere ulykkesstedet. Dette vil føre til raskere opphoping av kjøretøy i referansetunnelen på grunn av høy ÅDT. Konsekvensene vil reduseres om kjøretøyer kan passere ulykkesstedet, noe som er vanlig i minuttene etter brannstart. Dette vil snu om på resultatene fra beregningene slik at konsekvensene vil være lavere for et scenario i referansetunnelen.

Oppsummeringen av sannsynlighetsberegningene i Tabell 5-17 viser at man kan anta lengre tid mellom brannhendelser i referansetunnelen i forhold til alle alternativer for Sudurøytunnelen.

Denne sammenligningen gir dermed ingen entydige svar på hvilken tunnel som gir lavest risiko med hensyn til brann. Utviklingen av scenarioene er svært avhengig av trafikksituasjonen på ulykkestidspunktet. Man bør likevel ta hensyn til at Sudurøytunnelen overskrider kravene i håndboken med over dobbel lengde. I valg av konseptløsning bør usikkerheten dette medfører bidra til at man legger inn en ekstra sikkerhetsmargin.

Generelle betraktninger

Lange tunneler medfører at flere kjøretøy oppholder seg i tunnelen og dermed influeres ved en hendelse enn tilfellet er i en kortere tunnel med tilsvarende ÅDT. Fordelen med lange tunneler med lav ÅDT er at det i teorien er langt mellom bilene og sannsynligheten for at det blir opphoping av kjøretøy er lavere. Dersom en brann detekteres i Sudurøytunnelen har man tid til å varsle kjøretøy i tunnelen som er på vei mot brannen. Effektiv deteksjon og varsling gir bilister muligheten til å snu i tunnelen å kjøre ut før man møter røyk/brann.

En av de store usikkerhetene i forbindelse med evakuering i tunnel er trafikantenes adferd. For alle tunnelalternativene og sikkerhetstiltakene er det svært viktig å sørge for hurtig deteksjon og varsling. Likevel

er det erfaringsmessig en stor usikkerhet knyttet til adferden til trafikantene som mottar varslinger. Utfordringen med å implementere tiltak som i teorien vil gi en mer effektiv selvredning, er at det kan være stor forskjell i hva trafikanter burde gjøre og hva de faktisk gjør. Selv om man legger til rette for hurtig deteksjon og varsling til trafikantene, kan man ikke være sikre på at trafikanter starter evakuering umiddelbart. SINTEF skriver at tidligere tunnelbranner viser at trafikanter ofte ikke selv tar initiativ til å evakuere til fots, men i stedet velger å forbli i eller i nærheten av kjøretøyet sitt. Slike avgjørelser er grunnet mangel på bevissthet om faresituasjonen, usikkerhet rundt riktig adferd, motvilje mot å forlate den tilsynelatende sikkerheten i kjøretøyet og motvilje mot å forlate en bil med eiendeler du har eierskap til. I en nødsituasjon har man en tendens til å vente på informasjon eller instruksjon, snarere enn å søke det opp. [J][R] Studier basert på innsamling av erfaringsdata fra VTS viser til og med at ca. 20% av trafikanter kjører inn i tunnelen selv om den er stengt. Dette er et også et internasjonalt fenomen.

Undersøkelser gjennomført av SHK av for eksempel av brannen i Gudvangatunnelen i 2015 og brannen i Oslofjordtunnelen i 2017, viser at vogntog er særlig sårbare i en evakueringssituasjon når det brenner i en tunnel. Når slike kjøretøy blir innhentet av røyken, har førerne i realiteten bare to valg dersom de ikke lykkes å kjøre forbi brannstedet; enten å evakuere til fots eller å bli værende i kjøretøyet.[S] Selv om det er fysisk plass å snu kjøretøyet i snunisjer eller store nisjer, vil røyken hindre sikten og gjøre det vanskelig for føreren å justere kjøretøyet i forhold til tunnelveggen. I kombinasjon med distraksjoner fra andre trafikanter og kjøretøy vil dette til sammen skape et høyt stressnivå.[S]

Ventilasjon:

Beregninger viser at det vil ta ca. 14-20 minutt, avhengig av tunnelalternativ, før tunnelen er tømt for biler etter at tunnelen stenges ved brann. I denne perioden vil ventilasjonshastigheten være gjennomsnittlig 2 m/s, og vi kan regne med at røykfronten har beveget seg ca. 3 kilometer før redningsmannskap har ankommet tunnelen etter ca. 30 minutter. Når redningsmannskapet er ankommet kan de styre anlegget slik at en ventilasjonshastighet på opptil 3 m/s kan oppnås. Dette behøves før redningsmannskap eventuelt kan gå inn i tunnelen og gjøre sluknings- eller redningsarbeid slik at de arbeider med frisk luft i ryggen. Men hastigheten kan ikke reguleres opp før alle som rømmer til fots nedstrøms brannen er ute av tunnelen, da de ellers risikerer å bli fanget i røyk. Hvis sikkerhetstiltak 0 velges kan det derfor ta svært lang tid, opptil flere timer, før redningsmannskap kan utføre arbeid i selve tunnelen. Sikkerhetstiltak 1, 2 eller 3 gjør at de som rømmer i tunnelen raskt vil kunne søke sikkerhet i rømningsrom eller rømningstunnel. Dette fører igjen til at brannventilasjon kan aktiveres tidligere og innsats fra brannvesenet kan påbegynnes.

Vår vurdering er at sikkerhetstiltak 1, 2 eller 3 vil gi mye høyere sikkerhetsmessig effekt enn å velge ett annet tunnelalternativ enn alternativ 3, da personer i tunnelen med sikkerhetstiltak raskt kan rømme til et trygt sted og redningsmannskap mye raskere får mulighet for aktivt redningsarbeid.

Oppgradering av Lærdalstunnelen

Lærdalstunnelen i Norge skal oppgraderes etter 22 års drift. Det er flere likhetstrekk mellom Lærdalstunnelen og Sudurøytunnelen. Tunnelen har ett løp, er ca. 24,5 km lang og har ÅDT på 2000. I forbindelse med oppgradering av tunnelen har SVV vært nødt til å gjøre noen av de samme vurderingene av sikkerhet som er gjort i denne analysen. Tunnelen har i dag ikke lagt til rette for rømning gjennom nødutganger (evakueringsrom, rømningstunnel, etc.).

Tiltaksplanen som er utarbeidet for oppgradering av tunnelen viser at SVV har valgt å ikke oppgradere tunnelen med nødutganger. Oppgraderingen vil omfatte belysning, ventilatorer, utvidelse av havarilommer og etablering av 17 tekniske rom i 40 meter dype nisjer på tvers av tunnelen. En slik avgjørelse er i strid med vurderingene i denne analysen. Man vil ha de samme problemstillingene i Lærdalstunnelen som i Sudurøytunnelen ved en brann. Det er ikke kjent om det ligger en risikoanalyse til grunn for denne avgjørelsen. En av grunnene til denne konklusjonen er trolig at dette er en eksisterende tunnel og at det ikke stilles samme krav til gamle konstruksjoner, som nye. En annen antakelse er at man har definert

Lærdalstunnelen som tunnelklasse B, ut fra ÅDT i tunnelen. For tunnelklasse B er det som kjent ikke krav til nødutganger.

Vi stiller spørsmål ved sikkerhetsnivået i tunnelen etter at tunnelen er oppgradert. Når man også tar i betraktning at oppgraderingen er estimert å koste omtrent 2,3 mrd. NOK, stiller vi spørsmål ved om man ikke burde benyttet muligheten til å etablere et nytt løp for en noe høyere kostnad. Et stort bidrag til disse kostnadene er at tunnelen skal holdes åpen under oppgraderingen, som er antatt å ta fem år. Arbeidet vil gjennomføres mellom kl. 22 og 07. Ved etablering av nytt løp vil sikkerheten i tunnelen økes, i tillegg til at man unngår fem års anleggstid med stengt tunnel på nattestid.

7 Sammenfatning og anbefaling

I dette kapittelet følger en kortfattet oppsummering og anbefaling av de viktigste punktene fra studien.

Tunnelalternativer:

- Tunnelalternativene gir ikke store forskjeller i risiko, med unntak av alternativ 1 som har to tunneler og dermed økt sannsynlighet for at brann oppstår. I henhold til beregningene kan en anta omtrent en dobling i frekvens for at en brann oppstår, i forhold til det beste alternativet. Dette skyldes i hovedsak at man har dobbelt antall stigninger, inkludert brattere stigninger på 6% opp til Skugvøy. Konsekvensberegningene viser at selv om man har to kortere tunneler spiller ikke dette nevneverdig positivt inn på resultatene.
- Det anbefales at tunnelalternativ 2, 3 eller 4 bør velges på nåværende tidspunkt, dersom man vurderer ut ifra et sikkerhetsperspektiv. Alternativ 1 bør kun vurderes dersom man ser store økonomiske eller lokale gevinster med å etablere kjøreadkomst til Skugvøy.
- Tunnelalternativ 4 (rundkjøring og bratt veg til Skugvøy) gir ikke redusert risiko i forhold til tunnelalternativ 2. Dersom det brenner i tunnelen og man ventilerer røyk ut tunnelarmen til Skugvøy, hindrer dette muligheten til å evakuere samme vei. Alternativ 4 bidrar dermed ikke til økt sikkerhet ved å ha flere evakueringsmuligheter enn alternativ 2.
- Styring av ventilasjonsanlegget i en brannsituasjon er enklest for alternativ 1 og alternativ 3. Alternativ 2 og 4 krever flere vurderinger da de ulike tunneldelene og sjaktventilasjonen skal styres ulikt avhengig av brannscenariet som oppstår. Dette kan i verste fall medføre ventilasjon av røyk i feil retning under et brannscenario, som kan medføre fatale konsekvenser.
- Tunnelalternativ 4 bør ikke velges hvis sikkerhetstiltak 1, 2 eller 3 benyttes, på grunn av de kompliserte trykkforholdene dette vil medføre i tunnelen.

Sikkerhetstiltak:

- Sikkerhetstiltak 0 gir store konsekvenser ved store branner. Dette skyldes lengden på tunnelen(e) og manglende mulighet for rømning i tunnelløpet. Konsekvensberegninger gir ikke nevneverdige forskjeller mellom de ulike sikkerhetstiltakene med unntak av sikkerhetstiltak 0, som gir vesentlig høyere konsekvenser. Som diskutert i forrige kapittel skyldes dette i all hovedsak at trafikanter må evakuere svært lange strekninger i røykfulle omgivelser. Røyken fra en brann som oppstår i midten av tunnelen vil etter hvert ta igjen de som evakuerer til fots. Det vil være begrenset hvor lenge de evakuerende tåler dette. Selv om man legger til grunn et deteksjonssystem som identifiserer brann hurtig, samt iverksetter varsling etter kort tid, vil dette trolig ikke være tilstrekkelig for å hindre fatale konsekvenser.
- Sikkerhetstiltak 1, 2 og 3 bidrar til tryggere selvberging i tunnelen enn tiltak 0. Det er fortsatt noe usikkerhet tilknyttet utforming av tiltak 1 og 2, men dersom en setter som forutsetning at disse usikkerhetene kan elimineres, fremstår begge disse tiltakene som gode løsninger man kan utrede videre.
- Sikkerhetstiltak 3 (rømningstunnel) anses som den tryggeste løsningen.
- Dersom man velger sikkerhetstiltak 1, 2 eller 3, som har mulighet for rømning i tunnelløpet, vil man ikke ha bruk for ventileringssjakt (tunnelalternativ 2) eller rømningstunnel (tunnelalternativ 4) til Skugvøy.
- Dersom man velger sikkerhetstiltak 0 er det fordelaktig å velge tunnelalternativ 2, med mulighet til å ventilere røyk til Skugvøy. Ventilering til Skugvøy vil redusere lengden av tunnelløpet som er fylt med

røyk og dermed øke muligheten til å rømme. Det er usikkert hvor effektivt dette vil være, avhengig av hvor brannen oppstår. Tunnelalternativ 3 (lang tunnel) har større risikobidrag knyttet til brann enn de andre tunnelalternativene for sikkerhetstiltak 0.

- Sikkerhetstiltak 0, med lang tunnel (alt. 3), har omtrent samme risiko knyttet til brann som Referansetunnelen (10 km, ÅDT 4000). Lengden på Sudurøytunnelen (min. 19 km med veg til Skugvøy) gjør likevel at sannsynligheten for fatal utgang (omkomne ved brann) for enkelthendelser er større for Sudurøytunnelen.
- I et sikkerhetsmessig perspektiv anbefales det at konsepter med økt mulighet til rømning i forhold til sikkerhetstiltak 0 inkluderes i det videre planleggingsarbeidet.

Analysen påpeker at det er svært viktig at en brann detekteres og varsles fort til trafikantene i tunnelen. Uavhengig av hvilket tunnelalternativ eller sikkerhetstiltak man velger, er det anbefalt å vurdere ytterligere risikoreduserende tiltak i tunnelen som bidrar det dette, utover det som er angitt i Håndbok N500.

8 Referanser

[A]. Samferdselsdepartementet: *Forskrift om minimum sikkerhetskrav til visse tunneler på fylkesvegnettet og kommunalt vegnett i Oslo (tunnelsikkerhetsforskriften for fylkesveg m.m);* 01.01.2015

[B]. Samferdselsdepartementet: *Forskrift om minimum sikkerhetskrav til visse vegtunneler (tunnelsikkerhetsforskriften);* 01.01.2020

[C]. Statens vegvesen; *Håndbok N500 Vegtunneler,* januar 2020

[D]. Statens vegvesen; *Håndbok N101 Rekkverk og vegens sideområder,* juni 2014

[E]. Statens vegvesen; *Veileder for risikoanalyser av vegtunneler (Revidert)*, TS 2007:11; 2007-10-31

[F]. NS 5814:2008 *Krav til risikovurderinger*

[G]. Det Kongelige Samferdselsdepartement; *Nasjonal transportplan 2018-2029,* Meld. St. 33 (2016-2017)

[H]. Norges Geotekniske Institutt; *Sudurøy subsea road tunnel, Executive study for the early planning phase, Doc. No. 20210198-01-R,* Rev.no.0, 2021-08-27

[I]. Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB); *Risikoanalyse av brann i tunnel - delrapport til Nasjonalt risikobilde*, 2014

[J]. SINTEF; *Litteraturundersøkelse - Selvredning i vegtunneler. Erfaringer med bruk av redningsrom*, okt. 2017

[K]. Transportøkonomisk Institutt (TØI); *Kartlegging av kjøretøybranner i norske vegtunneler 2008-2015*, 2016

[L]. Modell for predikering av branner, ulykker og havarier i vegtunneler (TØI-rapport 1705/2019, modellversjon aug. 2019). Høye, A., Nævestad, T.O. & Ævarsson, G.

[M]. Statens Vegvesen; *Tiltak for å bedre brannsikkerhet i utsatte vegtunneler- Sikkerhetsforvaltning av vegtunneler*, Søvik, A.P. og Henning, J. E., 2015

[N]. Garatun, M. G; *Brann i tunnel - selvbergingsprinsippet: Dette skal du gjøre når det brenner i en tunnel.* Artikkel Teknisk Ukeblad, nov. 2015

[O]. G. A. Khoury; *Passive fire protection of concrete structures*, juni 2008.

[P]. SINTEF v/Lynghaug N., Grøv E., Myklebyst T.; *Evacuation og an Hyperloop pod in a long tunnel*, jan 2020

[Q]. SINTEF v/Jenssen G. D., Skjermo J., Home Å. S., Arnesen P., Frantzich H., Nilsson D.; *Simulering av evakuering i tunnel*, okt 2018

[R]. Fridolf K., Nilsson D, Frantzich H; *Fire evacuation in underground Transportation systems: A review of Accidents and empirical research.* 2013

[S]. [J. Gehandler, H. Ingason, A. Lönnermark, H. Frantzich, og M. Strömgren, Funktionsbaserade krav och rekommendationer för brandsäkerhet i vägtunnlar (FKR-BV12). 2012. Åpnet: okt. 20, 2021. [Online]. Tilgjengelig på: http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-5071

[T]. Tunnel Fire Dynamics | Haukur Ingason | Springer. Åpnet: okt. 19, 2021. [Online]. Tilgjengelig på: https://www.springer.com/gp/book/9781493921980

[U]. [G. Jenssen, trond Foss, og E. Grøv, «Sikkerhet Suduroyatunnilin Vurdering av sikkerhet i alternative tunneltraseer mellom Sandoy og Suduroy på Færøyene», SINTEF, mai 2019.

[V]. [H. K. Kim, A. Lönnermark, og H. Ingason, «Effective Firefighting Operations in Road Tunnels», s. 89.

[W].[T. Lemaire og Y. Kenyon, «Large Scale Fire Tests in the Second Benelux Tunnel», Fire Technol, bd. 42, nr. 4, s. 329–350, okt. 2006, doi: 10.1007/s10694-006-8434-4.

[X]. [A. Noren og J. Winér, «Modelling Crowd Evacuation from Road and Train Tunnels - Data and design for faster evacuations», undefined, 2003, Åpnet: nov. 26, 2021. [Online]. Tilgjengelig på: https://www.semanticscholar.org/paper/Modelling-Crowd-Evacuation-from-Road-and-Train-Data-NorenWin%C3%A9r/193fbab8919a600ac3da7bc26aab9d02f9a3a2e5

[Y]. [Statens Havarikommisjon for transport, «RAPPORT Vei 2015/02 RAPPORT OM BRANN I VOGNTOG PÅ E16 I GUDVANGATUNNELEN I AURLAND 5. AUGUST 2013», mar. 2015.

[Z]. Statens Havarikommisjon for transport, «Rapport Vei 2016/03 RAPPORT OM BUSSBRANN I GUDVANGATUNNELEN PÅ E16 I AURLAND 11. AUGUST 2015», jul. 2016.

[AA]. M. Bettelini, H. Neuenschwander, A. Henke, M. Gagliardi, og W. Steiner, «The fire in the St Gotthard tunnel of October 24, 2001», Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires, nov. 2003.

[BB]. «Detail of a publication | Virtual Library of PIARC | A comparative analysis of the Mont-Blanc, Tauern and Gotthard tunnel fires». https://www.piarc.org/en/order-library/5446-en-A comparative analysis of the Mont-Blanc, Tauern and Gotthard tunnel fires (åpnet nov. 30, 2021).

[Å]. Statens Havarikommisjon for transport, «RAPPORT Vei 2018/04 RAPPORT OM BRANN I VOGNTOG PÅ RV 23, OSLOFJORDTUNNELEN 5. MAI 2017», nov. 2018.

[DD]. «BN-97-09-2 -- The Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program: The Longitudinal and Natural Tests». https://www.techstreet.com/standards/bn-97-09-2-the-memorial-tunnel-fire-ventilation-test-program-the-longitudinal-and-natural-tests?product_id=1712595 (åpnet des. 22, 2021).

[EE]. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.

[CC]. M. Tohir og M. Zahirasri, «Multiple Vehicle Design Fire Scenarios in Car Parking Buildings», undefined, 2015, Åpnet: des. 14, 2021. [Online]. Tilgjengelig på: https://www.semanticscholar.org/paper/Multiple-Vehicle-Design-Fire-Scenarios-in-Car-TohirZahirasri/24206523144489e003a215f951a78aa4a5cec37b

[GG]. «FIT Annex2 Technical Report Part 1 Design Fire Scenarios | PDF | Justice | Crime & Violence», Scribd. https://www.scribd.com/document/205086831/FIT-Annex2-Technical-Report-Part-1-Design-Fire-Scenarios (åpnet des. 14, 2021).

[EE]. N.S.-E.N., «Eurokode 1: Laster på konstruksjoner - Del 1-2: Allmenne laster - Laster på konstruksjoner ved brann», Standard Norge, 1991.

[II]. H. Ingason, Design fires in tunnels, Second International Symposium, Safe & Reliable Tunnels, 2006

[JJ]. «Detail of a publication | Virtual Library of PIARC | Experience with Significant Incidents in Road Tunnels». https://www.piarc.org/en/order-library/25831-en-Experience with Significant Incidents in Road Tunnels (åpnet 20. januar 2022).

[KK]. Nilsson, D. & Johansson, A, «Social influence during the initial phase of a fire evacuation - Analysis of evacuation experiments in a cinema theatre. » Fire Safety Journal, 44(1), 71-79, 2009

[LL]. Higgins L., Rozytckie S., Jenssen G. D., «Proposed Guidelines for Emergency Exit Signs and Marking Systems for Hughway Tunnels», 2015

[MM]. Nilsson, D., Frazich F., Rochi E., Fridolf K., Lindgren A., Modig W.H. «Integrating ecexuation research in large infrastructure tunnel projects - Experiences from the Stockholm Bypass Project. », 2017

[NN]. Statens Havarikommisjon for transport: «RAPPORT OM BRANN I VOGNTOG PÅ E16 I GUDVANGATUNNELEN I AURLAND 30. MARS 2019», Apr. 2020.

9 Vedlegg

1. Avsjekk tunnelsikkerhetsforskrifter opp mot alternative oppgraderingsløsninger.

10 Vedlegg: Numerisk beregningsmodell av konsekvenser

10.1 Numerisk løsning av røykspredning i tunnel

Den endimensjonale modellen benyttet i denne studien er beskrevet i [2] og gir utrykk for blant annet gjennomsnittlig temperatur basert på energibalanser, transporttid av forbrenningsprodukter og siktberegninger. Siktberegninger regnes med en konstant k=2 for forholdet mellom sikt og koeffisient for bledning av lys gjennom røyk. Gasskonsentrasjoner beregnes ut ifra fastsatte massefraksjoner av aktuelle gasser CO_2,CO og HCN slik at avgivelsen av gass er proporsjonal med brenselets massetapsrate og derav energiavgivelsen. Oksygen konsentrasjon beregnes basert på avgitt energi per masse oksygen forbrent (13100 MJ/g). Beregningene løses med en kombinasjon av en numerisk og empirisk modell ved hjelp av 41 tidssteg i 20 ulike posisjoner.

10.2 Beregningsmetodikken FED

I dette tilfellet beregnes det en effekt av kvelende gasser på de evakuerende ved hjelp av en såkalt «Fractional Effective Dose» eller FED. FED er ratioen av en faktisk akkumulert dose mot en akkumulert dose som resulterer i en spesifisert effekt på en gjennomsnittlig person. Dette er anerkjente modeller som eksempelvis gjengis i [1] og som er inkludert i beregningsmodellen og vist under. En FED på 1 er ofte definert som den akkumulerte dosen vil gjøre 50 % av befolkningen ute av stand til evakuering.
Flere kilder [1] foreslår imidlertid en FED på 0,3 som et mulig akseptkriterium. For å regne evnen og sannsynligheten for vellykket evakuering beregnes FED for ulike personer i tunnelen som funksjon av gangavstand til utgang. De evakuerende beregnes i grupper hvor FED verdien og gangavstand til utgang er innenfor et angitt intervall.

Sannsynligheten for at de evakuerende mister sin evne til å evakuere som en funksjon av FED er hentet fra [13]. Det er konservativt antatt at ingen kan evakuere når FED overgår 1,3.

FED beregnes ut ifra følgende formler, gjengitt fra [2]:

$$F_{IN,n} = (F_{ICO,n} + F_{ICN,n}) \times V_{CO2,n} + F_{IO2,n}$$

Hvor $F_{IN,n}$ er fraksjonen av dosen påkrevet for at de evakuerende mister sin evne til å evakuere for et gitt tidssteg. Tilsvarende er $F_{ICO,n}$, $F_{ICN,n}$ og $F_{IO2,n}$ henholdsvis fraksjonen av samme dose for CO, HCN og O_2
For CO regnes denne dosen med følgende sammenheng med tidssteget $(t_n - t_{n-1})$.

$$F_{ICO,n} = 2{,}7642 \times [CO]_{1{,}036} \times (t_n - t_{n-1})$$

For HCN regnes denne dosen med utrykket under

$$F_{ICN,n} = \frac{(t_n - t_{n-1})\ 1{,}2 \times 10_6 \times}{[HCN]_{-2{,}36}}$$

Og for lave konsentrasjoner av O_2 regnes denne dosen med utrykket under

$$F_{IO2,n} = \frac{(t_n - t_{n-1}) \exp\ (8{,}13 - 0{,}54 \times}{(20{,}9 - [O_2]}$$

$V_{CO2,n}$ er utrykk for økt pustefrekvens med økende CO_2 konsentrasjon og derav økt opptak av andre kvelende gasser og bestemmes ut ifra:

$$V_{CO2,n} = exp\ (\frac{C_{CO2,n}}{5})$$

Alle fraksjonene av de beregnede dosene summeres numerisk til å gi FED verdien.

10.3Usikkerheter i beregningsmetodikken for røykspredning og FED

Beregningsmetodikken er en grov numerisk beregning av ganghastighet, temperaturer, sikt, gasskonsentrasjoner hvor igjen FED beregnes som funksjon av disse parameterne. Med unntak av energiavgivelse og enkelte av ganghastighetsmodellene baseres metodikken på konstante forhold for ventilasjonshastighet, konstanter for varmeavgivelse, gasskonsentrasjoner og sotfraksjoner. Disse forholdene kan naturlig endres gjennom et brannforløp. Validering mot eksperimentelle forsøk viser derimot at metodikken viser trender tilfredsstillende i det tidlige brannforløpet. Med sensitivitetsvurderinger av konstanter vil disse usikkerhetene kunne reduseres. Ved sammenligning av ulike konsepter, inndata eller scenarioer kan man tilsvarende redusere usikkerhetene da flere parametere beholdes uforandret i en sammenligning og det er forholdet mellom resultatene som er avgjørende.

Den numeriske tilnærmingen kan også medføre usikkerheter basert på numerisk inndeling i tid og distanse. Disse numeriske feilkildene vil være størst der gradienter er størst, men reduseres med bruk av analytiske løsninger for blant annet transporttid for røyk. Også her viser validering tilfredsstillende resultater selv med grov inndeling i tid og distanse.

Ved deterministiske analyser vil også valg av konservative inndata redusere usikkerhetene. Spesielt ved beregning av lave ventilasjonshastigheter og store branner eller i den tidlige fasen før eventuell brannventilasjon øker ventilasjonshastigheten, vil det også være en større grad av konservativitet i beregningen da det beregnes at alle forbrenningsprodukter strømmer i ventilasjonsretningen. I disse nevnte tilfellene vil en brann medføre at deler av forbrenningsproduktene strømmer i motsatt retning av angitt ventilasjonsretning og derav redusere mengden forbrenningsprodukter i en retning.

10.3.1 Vurdering av usikkerhet av utvalgte parametere

Selv om beregningsmetodikken kan vise tilfredsstillende tendenser er det samtidig flere inndata som er forbundet med større variasjon og større usikkerhet. Parametere som erfaringsmessig har større variasjon og samtidig stor påvirkning på resultatene inkluderer blant annet trafikkmengde, ventilasjonsstørrelser og -retning, brannstørrelser og brannvekst og menneskelig adferd. Disse parameterne er delvis belyst i rapporten, men det er samtidig enkelte parametere som fremheves spesielt da de også kan ha stor påvirkning på resultatene.

- Reaksjonstid ved start av evakuering
- Tid til tunnel stenger (port lukker)
- Generell adferd i kjøretøy, herunder snu i tunnel , passere brannstedet og evt. evakuering i eget eller andres kjøretøy.
- Avgivelse av andre forbrenningsprodukter fra kjøretøy med nye energibærere. Dette gjelder eksempelvis elektriske kjøretøy som vil kunne produsere større mengde irriterende gasser ved brann.

I denne analysen er det benyttet en reaksjonstid på 60 s i alle situasjoner. Denne vil normalt variere og vil avhenge av en rekke forhold og kan være lavt i forhold til erfarte situasjoner. Det er alikevel noen forhold som kan tilsi lavere reaksjonstid i dette tilfelle, herunder kortere køer med bedre muligheter for å se ulykkesstedet samt at nyere tuneller som forutsettes utført med gode løsninger for varsling både via høytalere og annen kommunikasjon.

Tid til tunnel stenger eller port lukker vil i stor grad diktere hvor mange kjøretøy som kan eksponeres for brann og røyk og har i så mate en stor påvirkning på beregningene. Det er benyttet 4 minutter som er i samme størrelsesorden som tilsvarende norske risikoanalyser, men det forventes at denne forsinkelsen ville kunne variere med f.eks. organisering av den part som får ansvar for å overvåke og evt. iverksette tiltak i tunnelen.

Adferd er grovt behandlet i rapporten, men det er også viktig å påpeke at den menneskelige adferden kan ha en vesentlig påvirkning på resultatene. Det er samtidig viktig å poengtere at menneskelig adferd vil ha stor variasjon og derav forbundet med usikkerheter. Det er eksempelvis erfart at selv om man har tydelige tiltak som eksempelvis en lukket bom vil flere passere denne og fortsette inn i tunnelen.

Det er i nyere tid blitt økt fokus og økt omfang av kjøretøy med alternative energibærere. Denne trenden med økt omfang av alternative energibærere forventes å fortsette frem i tid. Nyere studier viser at eksempelvis brann i kjøretøy med batterier kan produsere større mengder irriterende gasser. Her kan det være aktuelt å revurdere beregningene i takt med tilgang til bedre modeller og inndata.

10.4Inndata med realistiske parametere / sensitivitetsanalyse

Sentrale inndata i realistiske beregninger/sensitivitetsanalyse	
Brannkjemi (forbrenningsprodukter og brennverdi)	
Andel HCN	For bilbrann (10 MW) :0,0016 kg/kg [T] For brann i lastebil og vogntog (50 MW og 100 MW): 0,00165 basert på verdier fra [Y]
Andel CO_2	For bilbrann (10 MW): 2,4 kg/kg [T] For brann i lastebil og vogntog (50 MW og 100 MW): 2,11 basert på verdier fra [Y].
Andel CO	For bilbrann (10 MW) 0,063 kg/kg [T] For brann i lastebil og vogntog (50 MW og 100 MW): 0,146 basert på verdier fra [Y]
Sotfraksjon	Som i øvrige beregninger 0,1 kg/kg [S]. Omregnet til optisk tetthet 378 m_2/kg med masse-spesifikk konstant på 8700 m_2/kg [T]
Gjennomsnittlig brennverdi	Som i øvrige beregninger 25 MJ/kg [S]
Designbrann	
Brannscenario og brannenergi	10 MW Brann i to biler [S]. Gjennomsnittlig brannenergi for større personbiler er hentet fra [CC] 50 MW rask (lastebil med begrenset brennbar last). Brannenergi er estimert fra [GG]
Brannvekstkurve og brannforløp	Anbefalingene fra [S] benyttes, som beskriver en rask brann opp til 10- og 50 MW for ventilasjonshastigheter opp til 3 m/s. For branneffekter 100 MW og større beskrives en ultrarask brann. Brannen antas konstant etter maksimal energiavgivelse inntil 70 % brannenergien er forbrukt, da antas en lineær reduksjon av effekten iht. [EE]
Plassering av brann	Brann plasseres midt i tunnelen. Ikke vesentlig for sensitivitetsberegningene
Ventilasjon	
Ventilasjonshastighet	Det er benytte både 1,0-, 1,5-, 2-, og 3 m/s for ventilasjonshastigheter. Det er benyttet 1,5 m/s i beregning med en høyere ganghastighet på 1,35 m/s. Dette da de evakuerende ville ha beveget seg hurtigere enn en ventilasjonshastighet på 1,0 m/s.
Adferdsmessige forutsetninger	

Ganghastighet	Ganghastighet i røyk 1,35 m/s-0,3m/s som funksjon av sikt [T]. Ganghastighet (m/s)= 0.5678 x sikt (1/m)+0.303[R] Maksimal hastighet korresponderer med erfarte størrelser[Y]
Adferd / start evakuering	Evakuering starer når sikten er 10 m, 500 meter nedstrøms brannen
Trafikk forutsetninger	
Trafikk	Påvirker ikke direkte sensitivitets beregningene
Geometriske forutsetninger	
Tunnelprofil	tilsvarende sikkerhetstiltak 0,1 og 3: T10,5
Tunnel høyde	6,614 m (påvirker ikke beregning direkte)
Tverrsnittsareal	Sikkerhetstiltak 0,1 og 3: 61,5 m_2
Omkrets	Sikkerhetstiltak 0,1 og 3: 30,05 m