SINTEF F26316 · Fortrolig

Rapport

E-39 Rogfast. ROS Analyse, tunnel. Revisjon 2

Forfattere
Per R. Hokstad, Bodil Aamnes Mostue, Gunnar D. Jenssen, Trond Foss (SINTEF); Niels Peter Høj (HOJ Consulting); Christian Boye, Per Casselbrant, Jørgen Holst (COWI)

SINTEF Teknologi og samfunn
Sikkerhet
2014-11-18

SINTEF

COWI

Rapport

E-39 Rogfast. ROS Analyse, tunnel.

Revisjon 2

EMNEORD:
Risiko
Tunnel
Trafikk

VERSJON

DATO
2014-11-18

FORFATTER(E)
Per R. Hokstad, Bodil Aamnes Mostue, Gunnar D. Jenssen, Trond Foss; Niels Peter Høj (HOJ Consulting). Christian Boye, Per Casselbrant, Jørgen Holst (COWI)

OPPDRAGSGIVER(E)
Statens vegvesen Region vest

OPPDRAGSGIVERS REF.
Tor Geir Espedal

PROSJEKTNR
102005861

ANTALL SIDER OG VEDLEGG:
201/4 vedlegg

SAMMENDRAG
Se side 9.

UTARBEIDET AV
Seniorforsker Per Hokstad

SIGNATUR
Per Hokstad

KONTROLLERT AV
Sjefsforsker Eivind Grøv og Jørgen Kampmann

SIGNATUR

GODKJENT AV
Forskningssjef Stian Antonsen

SIGNATUR

RAPPORTNR	ISBN	GRADERING	GRADERING DENNE SIDE
SINTEF F26316	ISBN-nummer	Fortrolig	Åpen

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
Versjon 1	2012-02-03	Endelig versjon
Versjon 2	2014-09-16	Oppdatert versjon, inkludert TRANSIT beregninger og noe endrede forutsetninger.
Versjon 3	2014-11-18	Oppdatert versjon med vurderinger av gasstransport i tunnel utført av SP Fire Research

Innholdsfortegnelse

Forord **8**

Sammendrag og konklusjoner **9**

1. Innledning **14**
1.1 Bakgrunn og formål med analysen 14
1.2 Nøkkeldata for Rogfast-tunnelen 15
1.3 Metodikk for gjennomføring av ROS-analysen 16
1.4 Disposisjon av denne rapporten. 17
1.5 Forkortelser og definisjoner. 19

2 Beskrivelse av analyseobjekt og problemformulering **21**
2.1 Linjeføring og lengdeprofil 21
2.1.1 Linjeføring og lengdeprofil for hovedtunnel 21
2.1.2 Linjeføring og lengdeprofil for armen til Kvitsøy 22
2.2 Tunneltverrsnitt 24
2.3 Data - Basistunnel 26
2.4 Beredskap. Brann – og redningstjeneste 29

3 Overordnede vurderinger av risiko og risikoaksept **31**
3.1 Overordnede vurderinger av risiko knyttet til Rogfast 31
3.2 Risikoaksept 32
3.3 Referansetunnel 32
3.4 Datagrunnlag og kvantifisering 35
3.4.1 Ulykkesårsaker i tunneler 35
3.4.2 Tunnelbranner 36
3.4.3 Trafikkulykker i norske tunneler 37

4 Grov risikoanalyse **40**
4.1 Sannsynlighets- og konsekvens-kategorier 40
4.2 Kategorier av uønskede hendelser 41
4.3 Totalgjennomgang av ulykkeshendelser, tunnel 41
4.4 Vurdering av hendelser som gir utilgjengelighet av tunnel 48

5 Tiltak **51**

6 Kvalitative vurderinger **55**
6.1 Tunnelutforming 55
6.1.1 Tunnelutforming Kvitsøy 55
6.1.2 Krabbefelt i hovedtunnel 56
6.1.3 Skulderbredde 56
6.1.4 Frihøyde 57
6.1.5 Gangbare tverrforbindelser 57

6.1.6 Kjørbare tverrforbindelser ... 57
6.1.7 Kryssløsningen ... 59
6.1.8 Bergrom / estetisk utforming / belysning og bryting av monotoni ... 63
6.1.9 Portalområdet ... 67
6.2 Tunnelventilasjon ... 68
6.2.1 Generelt om ventilasjon i Rogfast ... 68
6.2.2 Alternativ med ett løp i Kvitsøy tunnelen ... 70
6.2.3 Alternativ med to løp i Kvitsøy tunnelen ... 73
6.2.4 Avvikssituasjonen ... 74
6.2.5 Kryssløsning og generelle kommentarer til ventilasjonsanlegget ... 74
6.3 Mekanisk og elektrisk utstyr ... 75
6.3.1 Redundans i Mekaniske og elektriske systemer ... 75
6.3.2 Aktive slokkeanlegg (Fixed Fire Fighting Systems, FFFS) ... 77
6.4 Trafikksikkerhetstiltak, Normalsituasjonen ... 79
6.4.1 Dimensjonerende trafikk ... 79
6.4.2 Risikoreduserende tiltak ... 81
6.4.3 Tiltak for å få kjøretøy til å holde avstand ... 81
6.4.4 Hastighetsbegrensninger ... 86
6.4.5 Tilfartskontroll ... 86
6.4.6 Eventuelle restriksjoner på farlig gods transport ... 88
6.4.7 Eventuelle restriksjoner og forbikjøringsbegrensninger på tyngre kjøretøy ... 90
6.5 Avvikssituasjoner ... 90
6.5.1 Innledning ... 90
6.5.2 Hvor mye trafikk kan avvikles i ett løp? ... 91
6.5.3 Trafikkavvikling ved tilfeldige og ikke planlagte hendelser ... 94
6.5.4 Planlagte avvik ... 95
6.5.5 Hyppighet av ikke planlagte avvik ... 95
6.6 Beredskap og styring ... 97
6.6.1 Effektivisering av rømning og redning ... 97
6.6.2 Portalbygningene ... 101
6.6.3 Beredskapsbehov i forbindelse med drift og vedlikehold ... 103
6.6.4 Ulykkesberedskap ... 107
6.6.5 Tiltak for redusert responstid ... 109
6.6.6 Oppstillingsplass og fergeberedskap ... 110
6.7 Sammendrag av kvalitative vurderinger og tiltak ... 112

7 TRANSIT-beregninger ... 118
7.1 Utførte beregninger ... 118
7.2 Sammenfatning av resultater ... 119
7.3 Rogfast hovedalternativ ... 120
7.4 Varianter av hovedalternativet ... 125
7.4.1 Toløpstunnel til Kvitsøy ... 125
7.4.2 Avstand mellom nødutganger 125 m ... 126

7.4.3 Krabbefelt ... 126
7.4.4 Hovedtunnel med ett løp ... 128
7.5 Referansetunneler ... 129
7.5.1 Referansetunnel med V-formet lengdeprofil ... 129
7.5.2 Referansetunnel helt uten stigning ... 130
7.6 Sensitivitet og nye tiltak ... 131
7.6.1 Øket trafikk i hovedtunnelen ... 131
7.6.2 Øket trafikk og høyere tungtrafikkandel i hovedtunnelen ... 132
7.6.3 Øket tungtrafikkandel i hovedtunnelen ... 133
7.6.4 Øket andel av farlig gods ... 133
7.6.5 Øket risiko for kø ... 134
7.6.6 Alarm (varsling om evakuering) ... 135
7.6.7 Kvitsøyarmen med 5% stigning ... 136

8. Konsekvensanalyser av brannscenarier ... 137
8.1 Valg av brannscenarier, tunnel ... 137
8.2 Inngangsdata og antakelser i brannberegninger ... 139
8.3 Estimering av konsekvens ift brannscenarier i hovedløp, normalsituasjon (to løp) ... 143
8.4 Estimering av konsekvens i hovedløp, avvikssituasjon (toveis trafikk i ett løp) ... 145
8.4.1 Toveis trafikk i ett løp ... 145
8.4.2 Enveis trafikk i *deler* av tunnelen – Kvalitativ vurdering ... 147
8.5 Estimering av konsekvens ift brannscenarier i Kvitsøy arm ... 148
8.5.1 Kvalitativ vurdering av brannscenarier i Kvitsøy-arm ... 149
8.5.2 Kvantitativ vurdering av brannscenarier i Kvitsøy-arm ... 150
8.6 Detaljert analyse av brannscenarier – Konklusjoner ... 155
8.7 Gasstransport i tunnel ... 156
8.7.1 Egenskaper til LPG ... 157
8.7.2 Gassspredning ... 157
8.7.3 Scenarier ... 158
8.7.4 Diskusjon ... 161

9. Diskusjon og vurderinger av tiltak ... 163
9.1 Usikkerhet ... 163
9.1.1 Modellusikkerhet ... 163
9.1.2 Datausikkerhet ... 163
9.2 Kvalitative vurderinger av tiltak ... 164
9.3 Noen kvantitative resultater mht effekt av tiltak ... 167
9.4 Effekt av sentrale tiltak ... 168

10. Risiko for tredje part, anleggsperioden ... 171

11. Referanser ... 172

Vedlegg A: Seksjonering av tunnelene ... 176

Referansetunneler 179
Arm til Kvitsøy med maksimal 5 % 179

Vedlegg B: Dokumentasjon brannscenario-beregninger 181
Tid til udyktiggjøring - Beregningsresultater 181
Hovedtunnel – normalsituasjon (enveis trafikk i to løp) 182
Avvikssituasjoner i hovedtunnel 186
Tunnel til Kvitsøy 188
Sensitivitetsberegninger 194

Vedlegg C: Risiko for tunge kjøretøy på lange strekninger med store gradienter 196
Innledning 196
Rogfast hovedtunnel 196
Arm til Kvitsøy 197
Arm til Kvitsøy med maksimalt 5 % 199

Vedlegg D: Gasstransport 201

Forord

Denne rapporten er en oppdatering av tidligere risikoanalyse for planlagt Rogfast tunnel, gjennomført av SINTEF og COWI 2012. I en ny versjon av 2014-09-16 ble en del forutsetninger om utforming av tunnelen endret, bl.a. er største stigning i hovedløpet nå ca. 5 %, (mens den i første analyse var 7 %). Videre ble det innarbeidet risiko-beregninger utført av Hoj Consulting, der programmet TRANSIT ble benyttet. Dermed ble tidligere TUSI beregninger utelatt, og rapporten ble generelt noe oppdatert.

I sise foreliggende versjon av 2014-11-18 er det innarbeidet en rapport om konsekvenser ved ulike gasseksplosjonsscenarier, utført av SP Fire Research; denne rapporten er i sin helhet gjengitt i Vedlegg D.

Sammendrag og konklusjoner

Rapporten er en revidert versjon av rapport datert 2012-02-03 med samme tittel. SVV har besluttet at maksimal stigning i hovedløpet til E39 Rogfast skal være ca. 5 % (i henhold til EU-direktivet). Stigning på 7 % i armen til Kvitsøy er opprettholdt. Rapporten er oppdatert i forhold til denne reduksjonen i stigning/fall fra 7 % til ca.5 % ved Arsvågen og dertil økt lengde av tunnelen. Videre er tidligere estimater på hyppighet av branner og trafikkulykker beregnet ved hjelp av TUSI, nå erstattet med TRANSIT-beregninger. Revidert versjon inneholder i tillegg TRANSIT-beregninger av forventet antall skadde og omkomne i ulykker i tunnelen.

Rapporten gir en beskrivelse av Rogfast tunnelen med hensyn til lengde, stigning, ÅDT osv., og med de spesifikasjoner som følger av minimumskrav i HB021 for tunnelklasse F, og med en del tiltak utover disse (dels vedtatt etter at forrige rapport ble utgitt). Egne spesifikasjoner gis for armen til Kvitsøy. En refererer til dette som Rogfast basistunnel.

Det foretas en grov risikoanalyse med liste over alle uønskede hendelser (ulykker), og vurdering av sannsynlighets- og konsekvenskategori for hver hendelse. Disse innsettes i risikomatriser.

Det gis en oversikt over viktige problemstillinger som vurderes, og tiltak som vurderes blir listet. Deretter gjennomgås ulike kvalitative vurderinger i detalj.

Risikoberegninger for Rogfast utføres både for basisløsningen og for løsninger der tiltak er implementert. Beregningsprogrammet TRANSIT benyttes for å bestemme hyppighet og konsekvenser av ulykker og branner. For utvalgte brannscenarier gjennomføres detaljerte kvalitative vurderinger og kvantitative beregninger. I kvantifiseringene innføres også en referansetunnel med lengde 10 km og en trafikkbelastning, som refererer til tunnelklassifiseringssystemet i HB021.

Rogfast basisløsning kommer for normalsituationen godt ut av en slik sammenlikning med en referansetunnel, uten at en bør legge for stor vekt på det. I avvikssituasjonen (toveis trafikk i ett løp) vil trafikken kunne overskride løpets kapasitet, og sammenlikningen viser at tiltak bør iverksettes (trafikkreduksjon).

Totalt vil rapporten diskutere tiltak ut over "basisløsning", bl.a. med henvisning til 0-visjonen til SVV og det såkalte ALARP (As Low As Reasonaly Practicable) – prinsippet. Rapporten diskuterer også tiltak, som nå er implementeret, men ikke var det i den tidigere utgave. Tiltakene dekker både tunnelutforming, tunnelventilasjon, mekaniske og elektriske installasjoner, trafikksikkerhetstiltak, avvikssituasjoner og beredskap/styring. Vurderingene som ligger bak forslagene er både kvalitative og kvantitative. Merk at konklusjoner i hovedsak er basert på risikovurderinger/nyttebetraktninger, og i liten grad på kostnadsvurderinger.

- En sentral beslutning som må tas er antall løp og utforming for armen til Kvitsøy. I utgangspunktet er ett løp, T8,5 spesifisert for denne armen. Dette er nå endret til T9,5.
  - Både for ett løp og den ordinære to-løps løsningen kan en reise den prinsipielle innvending at de muliggjør lekkasje av røyk fra et løp i hovedtunnelen til det andre løpet, om det oppstår brann i/nær krysset.
  - Totalt er vurderingen – at ved å benytte styring av røyk via ventilasjonssystemet og bruk av brannporter i krysset (dvs to barrierer) – bør en kunne håndtere problemet med mulig røyklekkasje. Dermed fremstår ett løp å gi tilstrekkelig sikkerhet, men det anbefales å bygge inn noe mer sikkerhet, T10,5, med ”romlestripe”, bl.a. med henvisning til stor stigning (nå på ca

5%). Det kunne også være ønskelig å inkludere rømningsvei for å sikre røykfri evakuering også i denne del av tunnelen, men dette er neppe et kostnadseffektivt tiltak.
  - Hvis en prinsipielt vil utelukke muligheten for lekkasje av brannrøyk mellom de to hovedløp i krysset, har en løsningen med to løp, som er koplet til hvert sitt hovedløp, (slik at begge løp til Kvitsøy har toveis trafikk). Dette er noe problematiske med hensyn til fletting av trafikken ut/inn av tunnelen på Kvitsøy, og er kostnadskrevende.

Merk at TRANSIT beregningene viser at totalirisikoen (omkomne/år) for hele tunnelen reduseres med ca 1 % ved å la armen til Kvitsøy ha to løp med envegstrafikk. Dette er en ganske betydelig reduksjon sett i forhold til at armen til Kvitsøy er anslått å ha kun 1-2 % av totalrisikoen. Reduksjonen skyldes, at antall trafikkulykker i Kvitsøyarmen ca. halveres; brannraten reduceres kun ubetydligt. Også dette må oppfattes som et meget kostbart tiltak ift reduksjon i risiko.

- Krabbefelt ble anbefalt i tunnelens hovedløp der stigning var $\geq$ 7 %, spesielt av hensyn til risiko relatert til trafikk/brannulykker. Tiltaket bør primært iverksettes i nordgående felt. Selv om dette kun har moderat effekt på totalrisiko, økes kapasiteten i avvikssituasjonen, og det gir også noe større mulighet for vedlikeholdsarbeid uten å stenge et løp helt.
  - Krabbefelt oppover (nordgående løp) har betydning for trafikksikkerhet både i normalsituasjonen og avvikssituasjonen, samt for trafikkavvikling i avvikssituasjonen, (når sørgående løp er lukket for trafikk).
  - Krabbefelt nedover (sørgående løp) foreslås ikke benyttet i normalsituasjonen, men det kan også da gi en liten risikoreduksjon, da det kan virke som "nødfelt". I avvikssituasjonen når nordgående løp er lukket, gir krabbefeltet større kapasitet og risikoreduksjon.

  Tunnelen har nå maksimal stigning på vel 5%. Krabbefelt oppover vil likevel anbefales. Ifølge TRANSIT-beregningene er krabbefelt i stigningene et tiltak som har betydelig effekt på totalrisikoen; reduktion ca. 10 % ved krabbefelt oppover både mod Arvågen og mod Harestad.

- Øket skulderbredde på høyre side til 2,0 m anbefales. Dette er nå vedtatt. Det foreslås anvendt betongkantstein (rullekantstein), alternativt asfaltert skulder i samme nivå som kjørefelter. Dette har en viss betydning både for trafikksikkerhet og evakuering, evt. opplevd risiko, og vil også ha risikoreduserende effekt. Dette er nå vedtatt.

- Det anbefales å øke frekvens av gangbare tverrforbindelser fra 1 per 250 m til 1 per 125 m. Dette er vurdert å ha signifikant effekt for risiko ifm en del brannscenarier. TRANSIT beregningene viser en reduksjon i totalrisiko på ca 1.5 % for normalsituationen. Effekten vil være større for avvikssituationen, men dette er ikke beregnet. Dette er nå vedtatt på strekninger hvor stigning er > 5 %.

- Det anbefales kjørbare tverrforbindelser i hovedløp, (for å muliggjøre toveis trafikk *i deler av tunnelen*). Dette benyttes for trafikkavvikling ved ulykker og planlagt vedlikehold. Spesielt gunstig å kunne opprettholde to løp i bratteste partier av tunnel. Antall slike forbindelser synes ikke å være svært vesentlig, 3-5 foreslås. Det er nå vedtatt å legge in kjørbare tverrforbindelser ca. hver 4 km. Det må vises at røykspredning via kjørbare tverrforbindelser til det sikre tunnelløp kan forhindres før røykkontroll er etablert etter en branndeteksjon.

- Det anbefales å bygge fire bergrom for hvert løp, inklusiv ved kryss til Kvitsøy. Dette vil motvirke monotoni, opplevd risiko, (og sannsynligvis ulykkesfrekvens). Ses i sammenheng med belysningstiltak for visuell føring og sikker avstand. Det er nå vedtatt å legge in fire bergrom for hvert løp.

- Det skal bygges kryss fra hovedløp til Kvitsøy. Rapporten vurderer to toplanskryss (som rundkjøring og ruterkryss) og treplanskryss med direkteførte ramper. Trafikkavviklingen i krysset fremstår som noe kompleks når ett hovedløp er stengt (avvikssituasjonen). De ulike løsningene har fordeler og ulemper med hensyn til risiko:
  - Treplans kryss vil ha noe færre trafikkulykker. Kryssløsningen vil ikke ha de samme snumulighetene som de andre løsningene. For å tillate alle svingebevegelser dersom ett løp skal stenges, må det bygges som femplanskryss.
  - Rundkjøringen har en stor fordel ved at den gir gode snumuligheter (bl.a. for trafikanter fra Kvitsøy), og trafikkulykker i rundkjøringer har normalt lav konsekvens. Dersom ett løp er stengt må imidlertid halve rundkjøringen kunne avvikle tovegstrafikk.
  - Ruterkryss har samme kvalitet mht fleksibilitet som rundkjøringen med unntak av snumulighet for trafikk fra Kvitsøy. Dersom ett løp er stengt gir kryssløsningen et logisk kjøremønster.

- Det anbefales ytterligere evaluering av ventilasjon (tredjepartsverifikasjon) under byggeplanfasen, spesielt for å vurdere håndtering av brann i kryss og brann i avvikssituasjon (toveis trafikk i ett løp) i deler av tunnelen. I denne evaluering bør det inngå en vurdering av spredning av røyk før brannventilasjon har oppnådd tilstrekkelig effekt, ulike plasseringer av branner, samt styring av ventilasjon under brann. I en del tilfeller kan dette bli komplisert; en bør ha presis informasjon om hvor brannen er.

- Totalt anbefales at ventilasjonsanlegget dimensjoneres for å håndtere 200 MW branner for også å håndtere store branner. Et argument for å vurdere en slik økning av viftekapasitet kan være en viss usikkerhet knyttet til effekten av at tunnelen har W-lengdeprofil.

- Brannporter bør benyttes for å gi en ekstra barriere, i tillegg til styring av røyk ved hjelp av ventilasjon. Spesifikasjon av og styring av brannporter bør vurderes videre.

- TRANSIT beregninger viser også at innføring av alarm (varsling om evakuering) har en signifikant effekt på totalrisiko (reduksjon anslått til 2.5 %).

På mer generelt grunnlag har en at:

- Det anbefales god redundans/reservekapasitet for viktig utstyr: vifter, slokkevann, strømforsyning, tunnelpumper og styre- og overvåkningsanlegg.

- Anbefaler relevante trafikksikkerhetstiltak for sikker avstand, feltregulering, hastighetsbegrensning og forbikjøringsbegrensning. Rapporten lister og diskuterer en rekke slike tiltak, uten å spesifisere eksakt hvilke som bør implementeres. Bl.a. skal en være oppmerksom på potensielle problemer ved trafikk som kommer ned relativt bratt nedfart fra Kvitsøy til krysset, dessuten ved bruk av kjørbare tverrslag.

- Tunnelen må utstyres med moderne branndeteksjons- og brannslokkingssystem. Gunstig både med slanger og pulverapparat.

- Tunnelen må videre utstyres med effektive informasjonssystem (høyttalere, VMS-skilt, radiokommunikasjon).

- Sprinkler/vanntåkeanlegg er vurdert, men anbefales ikke.

- Begrensninger på farlig gods (FG) anbefales; spesielt å begrense FG transport ved stor trafikk og ved trafikk i ett løp, eller for å forhindre for mange FG kjøretøy samtidig i tunnel. Omfang av

restriksjonene (inkl. type FG som omfattes) bør vurderes ut fra trafikktelling av mengde og type FG transport i tunnelen. Det bør videre foretas analyser av potensielle skader på selve tunnelen ved lekkasje/eksplosjon i kjøretøy som transporterer LPG (liquified petroleum gas), og totalforbud av slik transport kan vurderes.

- Avvikssituasjonen (toveis trafikk i ett løp) vil (uten restriksjoner) ha signifikant større risiko enn normalsituasjonen, og bør så langt som mulig begrenses/planlegges til perioder med lav trafikk.

- Oppstillingsplass er realistisk sett relevant for beredskapskjøretøy, farlig gods kjøretøy (evt. for kontroll eller ved begrensning i antall kjøretøy med spesiell last som får oppholde seg samtidig i tunnel), og videre for oppstilling av tyngre kjøretøy som ikke får snudd ved tunnelinngangen i forbindelse med stenging av ett eller to løp. Det anbefales i størrelsesorden avsatt 2 mål for kjøretøy ved utgang av hvert hovedløp (10 vogntog), samt 0,5 mål på Kvitsøy.

- Det bør også opprettes egne helikopterplasser; også for SeaKing som krever stor plass. I tillegg kommer plass for ambulansehelikopter. Her kan en planlegge for at kjørebanen foran tunnelinngang kan benyttes, (forutsetter at master trekkes noe unna).

- Det må ordnes med god snumulighet for ankommende kjøretøy ved portalen. Dette gjelder spesielt når ett eller begge løp stenges, og varsel om stenging må gis i god tid før ankomst til portal.

- Fergeberedskap i form av fergeleier klare til bruk, foreslås opprettholdt da en ikke kan utelukke lengre stenging (evt. av ett løp); cf. brann, andre større ulykker (ras/flom), og siden det er mangel på alternative ruter ved stenging.

- Ny brann/redningstjeneste nær tunnelutløp bør utredes nærmere i samarbeid med berørte etater.

- Ny Vegtrafikksentral – evt. felles for flere tunneler i området - bør utredes nærmere i samarbeid med berørte etater.

Det påpekes at rapporten har fokus på trafikk/brannulykker, og særlig storulykker.

Både kvantitative og kvalitative resultater er gitt for utvalgte (større) brannscenarier. Disse resultatene er en del av underlaget for anbefalingene, og bygger på en rekke forutsetninger og dels usikre data. Likevel vurderes sammenlikningen mellom Rogfast og den definerte referansetunnel å være relativt robust med hensyn til disse antakelser, og en har funnet:

- Samlet risiko (personskade ved trafikkulykke/brann) i Rogfast basistunnel er (for disse brannscenarier) lik / mindre enn den i referansetunnel; som altså indikerer akseptabel risiko for Rogfast-tunnelen.

- Øket frekvens av gangbare tverrforbindelser er det tiltak som har størst effekt for risiko i de undersøkte brannscenarier.

- Ved avvikssituasjonen er totaltrafikk i basistunnel større enn i referansetunnelen, og risikoen i dette tilfelle er ikke akseptabel uten at det innføres begrensninger. Hvis avvikssituasjonen også inntreffer under perioder med høy trafikk er det aktuelt å begrense tilgang av kjøretøy. Tiltak som "krabbefelt" og utvidet skulder/øket tverrsnitt er gunstige særlig med tanke på avvikssituasjonen (både sikkerhetsmessig og for avvikling av trafikk).

En rekke vurderinger er knyttet opp til brannscenariene, og for disse er krysset i tunnelen en utfordring; spesielt når det gjelder å få kontroll med røykspredning for ulike scenarier. Styring av ventilasjon i forbindelse med brann/gasslekkasje blir avhengig av plassering av brannen, og en rekke komponenter (vifter) må fungere korrekt for et vellykket resultat.

Øvrige ulykkescenarier, som ras, flom, oversvømmelse (tunnelmunning eller ventilasjonstårn) er ikke grundig vurdert opp mot lokale forhold og detaljer vedrørende utføring av arbeidet med Rogfast, og kun grove vurderinger er derfor gjennomført for slike hendelser. Disse hendelsene kan imidlertid forekomme, og det er viktig at en også i planleggingen sikrer seg mot disse, ikke minst siden de kan føre til langvarig nedstenging av tunnelen, hvis de forekommer.

1. Innledning

Innledningskapittelet inneholder:

1. Bakgrunn og formål med analysen
2. Noen nøkkeldata for Rogfast-tunnelen
3. Metodikk for gjennomføring av ROS-analysen.
4. Disposisjon av denne rapporten
5. Forkortelser og definisjoner

1.1 Bakgrunn og formål med analysen

Foreliggende rapport er en revisjon av den eksisterende risikoanalyse fra 2012. Grunnen til oppdateringen er at Rogfast tunnelen revideres i lengdeprofil, nå med maksimalt 5.15 % gradient (og øket lengde). For denne nye løsningen er det gjennomført beregninger med programmet TRANSIT for å bestemme hyppigheter av hendelser og tilhørende risiko.

Det er gjennomført flere risiko- og sårbarhetsanalyser av Rogfast-forbindelsen. Den siste fra januar 2012, utarbeidet av SINTEF og COWI, [55], var en oppdatering og detaljering av ROS-analysen utført av Norconsult i 2006, [1]). En av målsetningene med risikoanalysen var å vurdere tiltak med hensyn til sikkerhet på grunnlag av lengde og stigning på tunnelen. SINTEF og COWI kom i rapporten med en rekke anbefalinger vedrørende standard, som går ut over normalkrav for tunneler i Håndbok 021 Vegtunneler, bl.a.:

- Ett-løps tunnel til Kvitsøy med tverrsnitt T 10,5.
- Eget krabbefelt i stigningen på 7 % opp til Arsvågen.
- Det legges inn gangbare tverrforbindelser per 125 m.
- Det legges inn 4 bergrom som en utvidelse av hvert hovedløp (ett i forbindelse med kryss for arm til Kvitsøy) som tiltak for å motvirke monotoni.
- Det legges inn kjørbare tverrforbindelser ca. hver 4 km.

I slutten av 2012 og begynnelsen av 2013 gjennomførte HOJ Consulting spesielle risikoanalyser med fokus på tungtrafikk og risikoen ved lange stigninger [51]. Stigningsforholdene ble ytterligere diskutert i [63].

I etterkant ble det av Statens vegvesen besluttet å redusere tunnelens stigningsforhold fra opp til 7 % til max. ~5 % stigning, og prosjektet er blitt endret som vist i [64].

I forbindelse med den nye prosjekteringen skal også risikoanalysen [55] oppdateres. I denne oppdaterte rapporten foretas risikoberegningene med TRANSIT, som også var tilfelle i rapporten med vurdering av tungtrafikk [51].

De nye beregninger som skal utføres, er spesifisert i [83]: Risikoen beregnes for en ”basistunnel”, som svarer til prosjektet, slik det foreligger på nåværende tidspunkt – og varianter av dette.

Denne risikoanalysen for *Rogfast, tunnel* skal, som foregående rapport [55], dekke

I. Normalsituasjonen
II. Avvikssituasjoner (i driftsperioden)
III. Anleggsperioden.

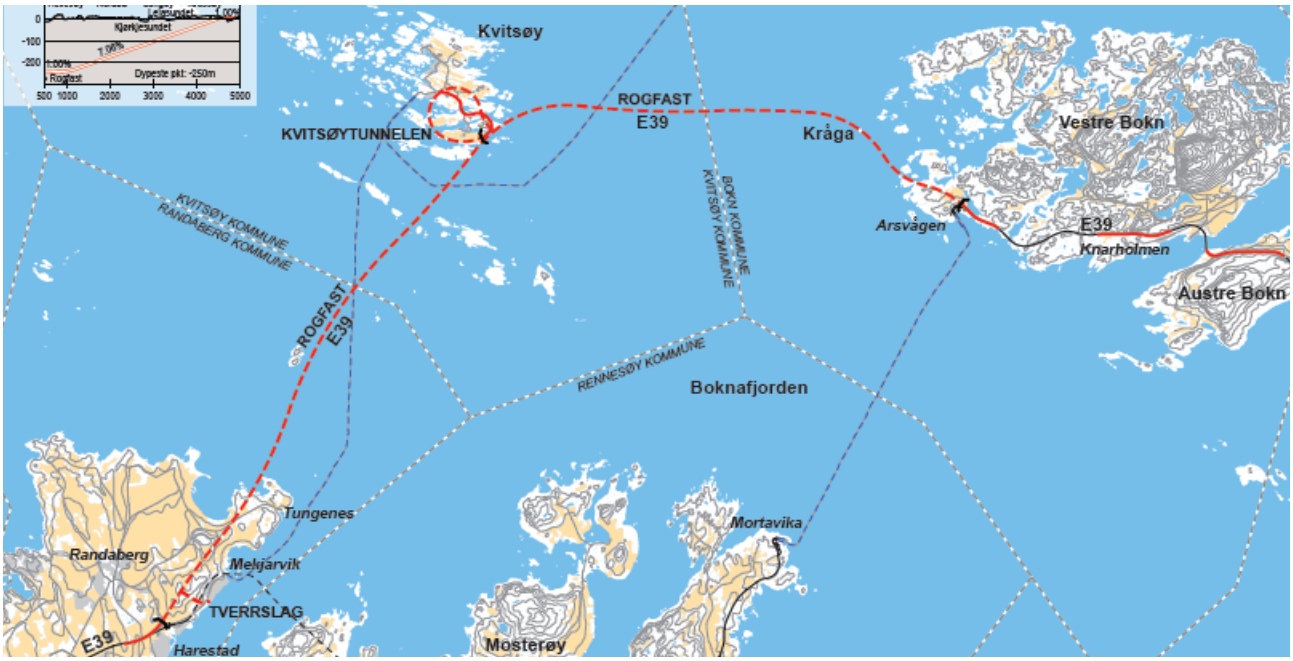
Arbeid og rapportstruktur bygger på Veileder for risikoanalyse av vegtunneler, SVV 2007, [2]. Generelt er målsetting med analysen gitt som følger:

Målsettingen med ROS-analysen er å gi et grunnlag for å velge en god og trafikksikker standard i tunnelen med alle enkeltkomponenter den består av. Analysen skal dermed også gi grunnlag for sikkerhetsgodkjenning av tunnelen i forhold til HB 269, samt utarbeidelse av beredskapsplan.

1.2 Nøkkeldata for Rogfast-tunnelen

Tunnelsystemet omfatter en meget lang undersjøisk tunnel mellem Harestad i syd og Arsvågen i nord. Det har også en avgrening til Kvitsøy og et tilhørende underjordisk kryss.

E39 Rogfast starter ved nytt kryss på E39 i Randaberg kommune, kryss under Boknafjorden og ender ved Arsvågen i Bokn kommune. Rogfast får to tunnelløp på ca. 27 km og vil få en største dybde på nær 390 m under havoverflaten. Den største stigning i hovedtunnelen blir på 5.15 % og 5.09 % opp mot de to portalene. Tunnelsambandet får et underjordisk to-planskryss med en enkel arm til Kvitsøy i Kvitsøy kommune. I armen til Kvitsøy er stigningen 7 %.



Figur 1 Plassering og linjeføring for Rogfast svarende til projektet i 2012 – 2013 før endringen av tunnelen ved Arsvågen.

Tabell 1 Nøkkeldata for tunnelen. ÅDT1 er årsdøgnstrafikken i åpningsåret og ÅDT20 er 20 år etter åpning, SDT er sommerdøgntrafikken.

Lengde	ÅDT1* [kt/d]	ÅDT20 [kt/d]	SDT20 [kt/d]	Tungtrafikk -andel	Farlig gods andel av tungtrafikk	Maksimal gradient	Tverrsnitt
26.7 km	5000	13000	15000	15 %	3 %	5.15 %	2 løp @ 2 felt, 2.00 m skuldre (T10,5)
3.1 km	-	900	-	15 %	3 %	7.00 %	1 løp @ 2 felt, (T10)

I tabellen over sammenfattes noen nøkkeldata for Rogfast. En del øvrige data:

- Stigning/fall: hovedtunnelen har en ca. 6 km strekning med 5.15 % stigning/fall og en 6.5 km lang strekning med stigning/fall 5.09 %.
- Hovedtunnelen utformes etter tunnelklasse F, selv om trafikken med ÅDT20 = 13000 kt/d er langt fra grensen på 50000 kt/d.
- Hovedtunnelen har to delte kjøreretninger og 2 kjørefelt i hvert løp.
- Der er tverrpassasjer for hver 250 m, og hver 125 m ved stigning 5 %.
- Der er dessuten kjørbare tverrpassasjer (for nødetater og for trafikanter).
- Tunnelen har et kraftigt ventilasjonsanlegg
- Der er et underjordisk (nivåfritt) kryss med to sett av- og påkjørselsramper plassert 13 – 14 km fra hovedtunnelens portaler
- Krysset forbinder hovedtunnelen med en tunnelarm
- Tunnelarmen har en 3.1 km lang strekning med 7 % stigning/fall
  (Den samlede lengde av tunnelarm og rampe er opp til 4.8 km)
- Tunnelarmen har ett tunnelløp med tovegstrafik
- Tunnelarmen har tunneltverrsnitt T9,5, som er bedre enn kravet for en tunnel med ÅDT = 900 kt/d
- Fartsgrensene er 90 km/t i hovedtunnelen, 80 km/t i armen til Kvitsøy og 50 km/t i rampene.

Basert på forslag i tidligere rapport, er basisløsningen nå endret på en del punkter:

- Endring i stigning og lengde (maks stigning ca. 5 % i hovedtunnel)
- Ett-løps tunnel til Kvitsøy med tverrsnitt T9,5
- Øket vegskulder til 2m på høyre side i hovedløp (dvs. 2xT10,5).
- Frekvens av gangbare tverrforbindelser øket til 1 per 125 m ved stigning 5 %.
- Etablering av bergrom, bl.a. for å motvirke monotoni.

1.3 Metodikk for gjennomføring av ROS-analysen

Veileder for risikoanalyse av vegtunneler (2007), [2], angir fem trinn i risikoanalyseprosessen (Avsnitt 2.7):

i. Beskrivelse av analyseobjekt, formål og vurderingskriterier. Avgrensing, hensikt, krav.
ii. Identifisere sikkerhetsproblemer. Hvilke uønskede hendelser kan inntreffe og hvorfor?
iii. Vurdere risiko. Hvor ofte kan de uønskede hendelsene inntreffe og hva er konsekvensene?
iv. Foreslå tiltak. Hva er effektive risikohåndterende tiltak?
v. Dokumentere. Beskrive datagrunnlag, fremgangsmåte og resultater av vurderingen.

Dette oppfattes som gangen i en *grov risikovurdering*, [2]. Imidlertid vil rapporten for Rogfast dokumentere en *detaljert risikoanalyse*. Det betyr at det foretas grundigere kvalitative vurderinger, og videre at det gjennomføres detaljerte kvantifiseringer av totalrisiko ved bruk av programmet TRANSIT. Risiko måles bl.a. ved brannfrekvens og antall omkomne Dessuten blir konsekvenser i ulike brannscenarier også kvantifisert.

De kvantitative vurderinger og beregninger utføres først for Rogfast "basistunnel", (dagens løsning, spesifisert i neste kapittel). Det vil derfor også foretas beregninger for ulike varianter av denne basisløsningen.. Trafikksimuleringer og sensitivitetsbetraktinger er inkludert i beregningene.

Videre gjennomføres beregninger for en såkalt "referansetunnel". Denne har lengde 10 km, svarende til maks lengde som inngår i tunnelklassifiseringssystemet i HB021, men den har til gjengjeld høyere ÅDT enn Rogfast, for å få et bedre sammenlikningsgrunnlag. En sammenlikner totalrisiko og konsekvenser forbundet med ulike scenarier for henholdsvis Rogfast basistunnel og referansetunnel, og dette gir innspill til å vurdere om risikoen for Rogfast-tunnelen er "lav nok", og til å vurdere effekt av ulike tiltak.

De overordnede totale vurderinger og forslag til tiltak er basert på en rekke kvalitative vurderinger, identifisering og vurdering av uønskede hendelser, samt de kvantitative sammenlikninger mellom Rogfast-tunnelen og referansetunnelen. De kvalitative vurderinger vil dels fokusere på en del hovedproblemstillinger, bl.a. knyttet til scenarier i avvikssituasjonen (toveis trafikk i ett løp) eller ventilasjon i forbindelse med brannscenarier i/nær krysset opp til Kvitsøy. Videre gis kvalitative vurderinger av de enkelte tiltak som anses relevante.

ROS-analysen er gjennomført i hovedsak som en prosjektintern prosess, men med god dialog med SVV og brann/redningstjenesten i området.

Prosesskrav
Veilederen [2] angir en rekke prosesskrav for gjennomføring av grov risikovurdring (Avsnitt 2.8):

- Risikoanalysen planlegges av en mindre gruppe på 2-3 personer, som fremskaffer informasjon.
- Den tverrfaglige analysen gjennomføres typisk i løpet av en heldagssamling. Eks. på møtedeltakere: medarbeider med erfaring fra planlegging, bygging og drift og vedlikehold av tunneler, vegforvaltning/trafikkteknikk, elektroinstallasjoner i tunneler, trafikkstyring (VTS), trafikantadferd, tunge kjøretøy og brannvesen og ambulansetjenesten, og evt. brukerrepresentanter fra bilorganisasjoner og transportselskaper (f.eks. busselskap), evt. kommunerepresentanter.
- Den mindre gruppe fullfører dokumentasjonen.

Veilederen [2] angir også de nødvendige forberedelser til det tverrfaglige møtet. I forbindelse med rapporten [55] ble en slik intern tverrfaglig analyse er gjennomført som internt SINTEF/COWI møte i november 2011. Et overordnet møte med deltakelse fra SVV og B&R etater ble avholdt 6. desember 2011 for utarbeidelse av foreliggende rapport har det vært en nær kontakt mellom SINTEF/COWI og Hoj Consulting for å integrere resultatene i [57] med rapporten [55].

1.4 Disposisjon av denne rapporten.

Rapporten starter i kapittel 2 med å gi en spesifikasjon av Rogfast basistunnel.

I kapittel 3 gis en overordnet vurdering av risiko knyttet til Rogfast, hvilke prinsipper og dokumenter som ligger til grunn for bestemmelse av akseptabel risiko, og datagrunnlag for tunnelulykker og kvantifisering.

I kapittel 4 følger en grov risiko-analyse med liste over alle uønskede hendelser (ulykker), og vurdering av sannsynlighets- og konsekvenskategori for hver hendelse, (i samsvar med veileder [2] benyttes fem kategorier både for sannsynlighet og konsekvens).

Kapittel 5 gir en oversikt over tiltak som vil bli vurdert. (Disse er nå i stor grad innarbeidet i nåværende "basistunnel".) I kapittel 6 gjennomgås de kvalitative vurderinger i detalj.

Kapittel 7 presenterer TRANSIT-beregninger av risiko i hele tunnelen for henholdsvis Rogfast basis- og referanse-tunnel. Det gis frekvenser for trafikkulykker og branner, og forventet antall skadde og omkomne pr år i hele tunnelen.

Kapittel 8 presenterer detaljerte kvantitative beregninger av utvalgte brannscenarier. Scenarieberegningene, (såkalte deterministiske konsekvensanalyser), er utført for å vurdere konsekvenser av alvorlige branner på spesielle steder i tunnelen. Kvantifiseringene er utført både for basisløsningen og varianter av denne.

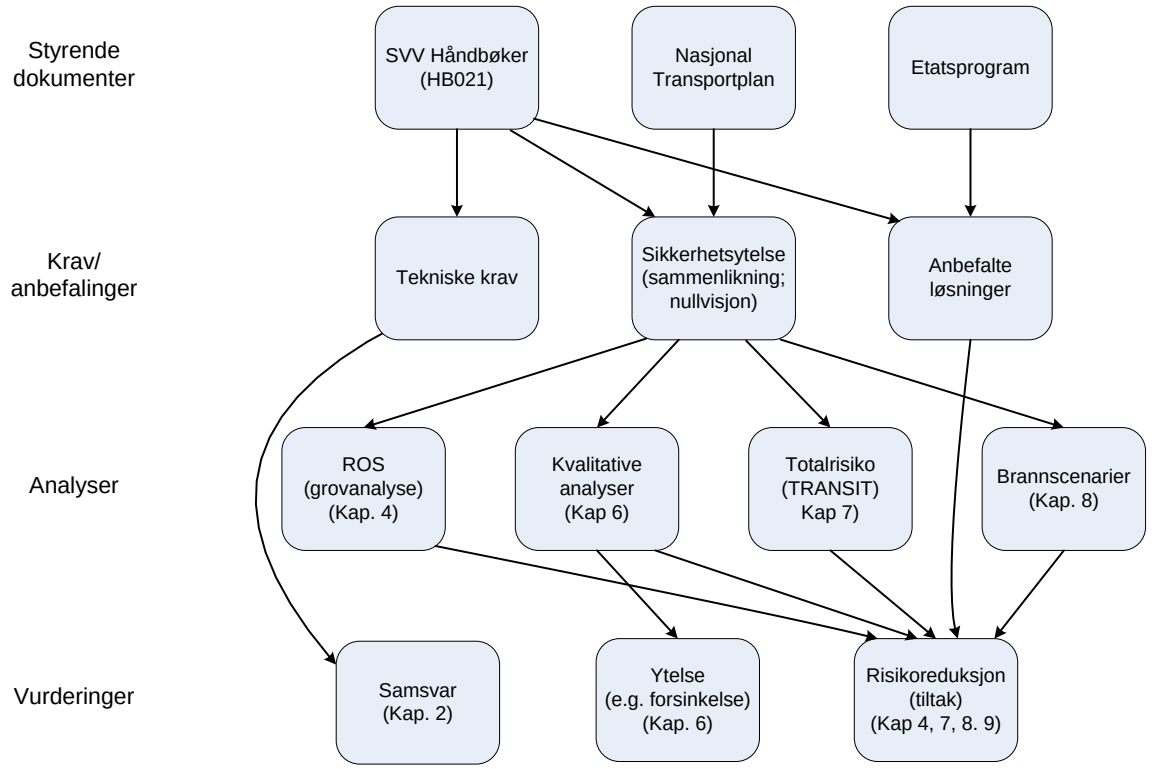
Kapittel 9 gir sammenfattende vurderinger og anbefalinger av tiltak for tunnelen, basert på de foregående kapitler.

Mens kapitlene 4-9 omfatter driftsperioden, vil kapittel 10 presentere en grov risikoanalyse av anleggsperioden. En ser kun på risiko for tredje part, da det antas at risiko for de som utfører arbeidet er dekket av andre analyser.

Konklusjonene er samlet i Sammendraget på side 9.

En del dokumentasjon finnes i Vedlegg A, B og C.

Figuren under gir en samlet oversikt over dokumenter og krav/anbefalinger som er basis for gjennomførte analyser og for vurderinger av tiltak.



Figur 2 Basisdokument, krav/anbefalinger som ligger til grunn for utførte analyser og vurderinger i rapporten.

Figuren skisserer en modell som viser sammenhenger mellom ulike myndighetskrav (regelverk i forhold til tunnelbygging), ulike analyser og etterfølgende vurderinger, (jfr. Fig. 2 i [56]). Den angir også koplinger til ulike kapitler i rapporten. Figuren har fire "nivå":

1. SVV har en rekke styrende dokumenter som berører bygging av undersjøiske vegtunneler. Bl.a. de følgende er viktige:
    a. Ulike håndbøker, spesielt HB021, men også en rekke andre, f.eks. HB 269. (Også påvirket av krav fra EU.)
    b. Nasjonal transportplan (med bl.a. vektlegging av "nullvisjonen").
    c. Etatsprogram; spesielt nevnes Moderne vegtunneler, 2008-2011, se [48] - [50].
2. Av disse dokumentene kan utledes en rekke krav og anbefalinger for bygging av tunnel:
    a. Tekniske krav og spesifikasjoner med hensyn til utførelse.
    b. Krav til sikkerhetsytelse; f.eks. sammenlikning med sikkerhet på andre typer veg; eller generelt mål om risikoreduksjon f.eks. ut fra "nullvisjonen" nedfelt i Nasjonal transportplan, [54].
    c. Anbefalte løsninger, uten at disse er formulert som krav.
3. Som grunnlag for videre vurderinger må det utføres en rekke analyser, spesielt ulike risikoanalyser.
    a. En ROS-analyse, dvs. grov risikoanalyse (ofte omtalt som "grovanalyse"), for å identifisere mulige ulykker/hendelser, og foreta en grov vurdering av risikoen knyttet til disse.
    b. Ulike kvalitative vurderinger knyttet til tekniske løsninger (bl.a. relatert til trafikksikkerhet og evakuering).
    c. Kvantitative analyser for å anslå brannfrekvens og konsekvens ved slike ulykker; her er programmet TRANSIT benyttet.
    d. Kvantitative beregninger av ulike brannscenarier, spesielt konsekvensberegninger med hensyn til antall omkomne.
4. På basis av krav/anbefalinger og gjennomførte analyser utføres så ulike vurderinger:
    a. Ut fra rent preskriptive krav som er gitt, skal det kontrolleres at disse er oppfylt i den foreslåtte løsningen; (her er det ikke nødvendig med analyser eller virkelige vurderinger).
    b. Ytelse; f.eks. tilgjengelighet, omfang av forsinkelser som følge av ulykker
    c. Risikoreduksjon: Her vurderes i hvor stor grad risiko er redusert til et akseptabelt nivå (e.g. ut fra ALARP prinsippet, sammenliknet med øvrig trafikk, kost/nytte-betraktninger, osv.)

1.5 Forkortelser og definisjoner.

Følgende forkortelser blir benyttet:

ATK	Automatisk Trafikk-kontroll
ALARP	As Low As Reasonably Practicable
BLEVE	Boiling liquid expanding vapor explosion
CFD	Computational fluid dynamics
DSB	Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap
FG	Farlig gods
FFFS	Fixed Fire Fighting Systems
Hb	Statens vegvesens håndbok
IDS	Incident Detection System (Hendelsesdetekteringssystem)
IDU	Intelligent Distributed Unit (local data oppsamlingsenhet)

ITS	Intelligent Transport Systems
ITV	Interactive Television (videoovervåking)
LED	Light Emitting Diodes
LPG	Liquified petroleum gas
M&E	Mekaniske og elektriske
MW	Megawatt
PLS	Programmerbar Logisk Styring
ROS	Risiko og sårbarhet
SVV	Statens vegvesen
TRANSIT	Risikoanalyeprogram for beregning av risiko i vegtunneler
TUSI	Program for TUnnelSIkkerhetsberegning
UPS	Uninterrupted Power Supply
VD	Vegdirektoratet
VMS	Variable Message Signs (Variable meldingsskilt)
VTS	Vegtrafikksentral
ÅDT	Gjennomsnittlig Årsdøgntrafikk

Definisjon av en del begreper benyttet i rapporten:

Basistunnel	Spesifisert Rogfast løsning, (Kapittel 2; dvs. noe endret ift. foregående rapport)
Referansetunnel	Definert tunnel ut fra klassifiseringen i HB021, som har spesifisert verdi av antall kjøretøykm pr døgn, (produkt av ÅDT og tunnellengde), som tilsvarer basistunnelen.

2 Beskrivelse av analyseobjekt og problemformulering

I dette kapittel blir foreliggende løsning for Rogfast-tunnlen beskrevet, dvs. tunneldata for den såkalte basisløsning. Dette sammenholdes mot gjeldende forskriftskrav. Merk at siden tunnelen har en spesiell utforming (inneholder et kryss og en arm, der ÅDT er svært lav), vil ikke HB021 nødvendigvis gi et entydig svar på hva som er "minimumskravet". Videre blir referansetunnelen definert.

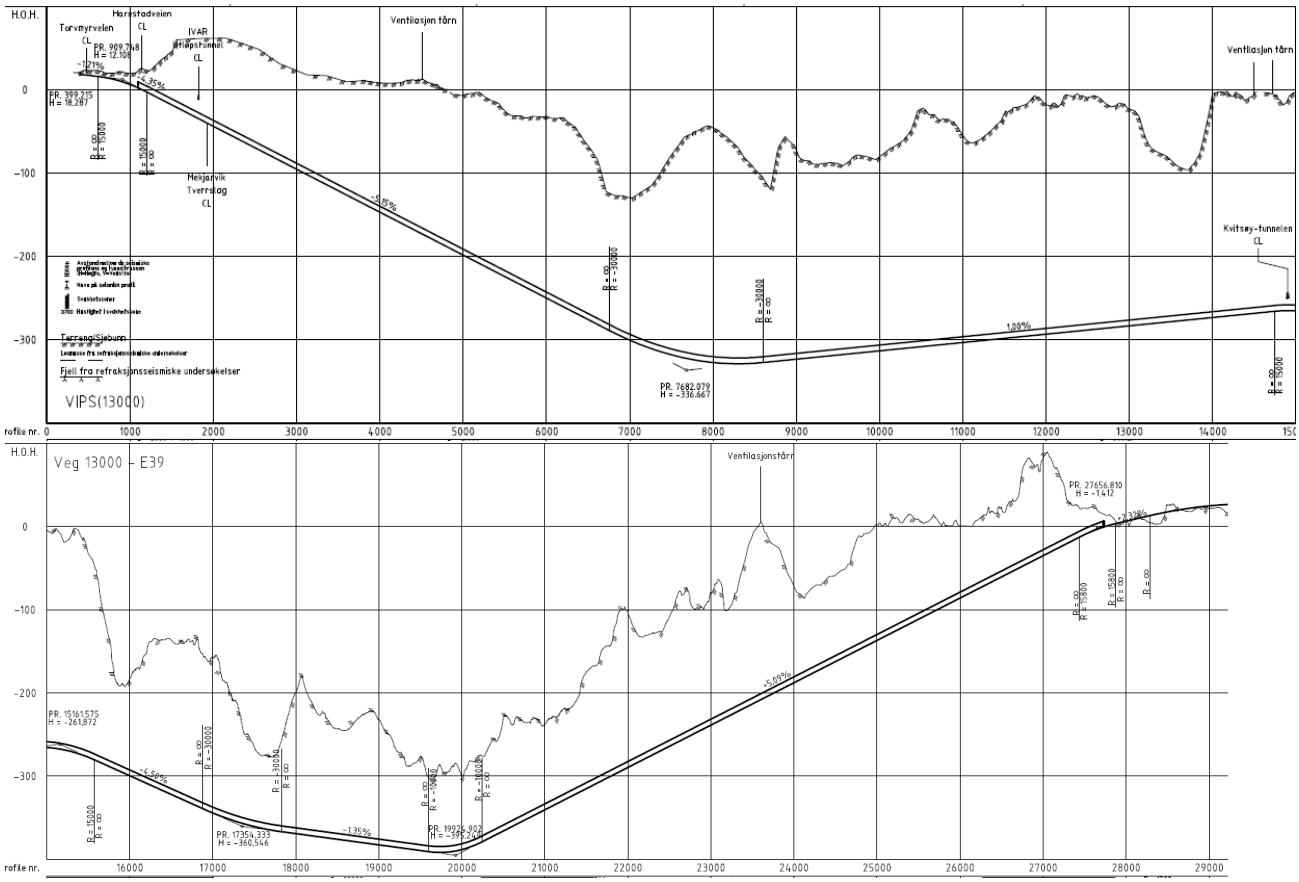
2.1 Linjeføring og lengdeprofil

2.1.1 Linjeføring og lengdeprofil for hovedtunnel

Tunneltraseen er vist i Figur 3, og skjematisk lengdeprofil av tunnelen er gitt i **Figur 4**.

Lengdeprofil og linjeføring for hovedtunnelen er illustrert i figurene under. De geometriske data er sammenfattet i Tabell 2.

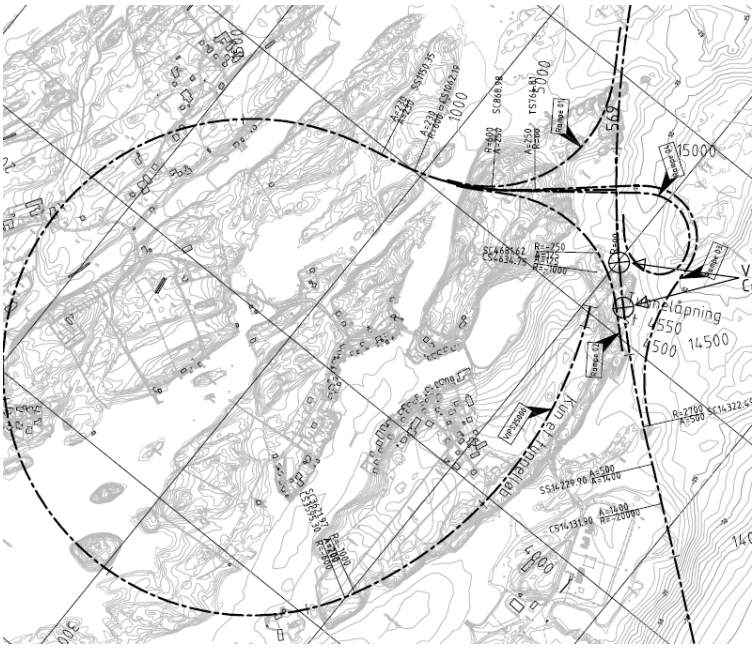
Figur 3 Linjeføring for hovedtunnel (og armen til Kvitsøy), nord er nedover mod høyre.



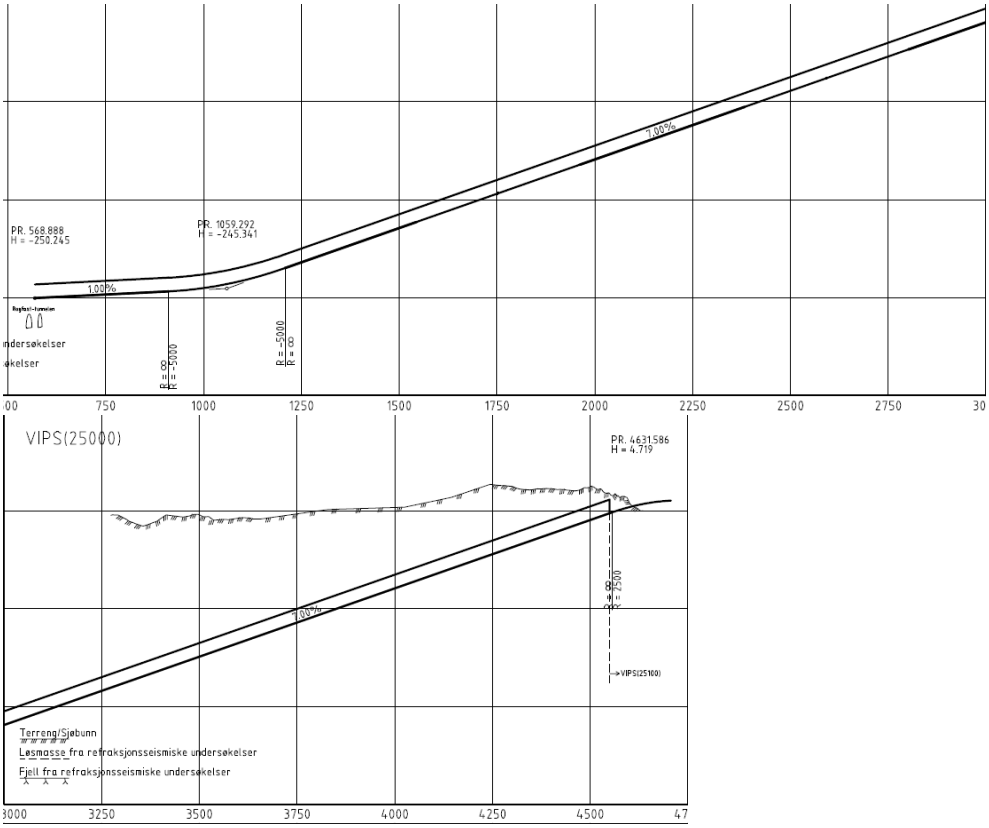
Figur 4 Hovedtunnelens lengdeprofil, nord er mot høyre.

2.1.2 Linjeføring og lengdeprofil for armen til Kvitsøy

Lengdeprofil og linjeføring for armen til Kvitsøy er illustrert i figurene under. De geometriske data for armen er sammenfattet i Tabell 3.

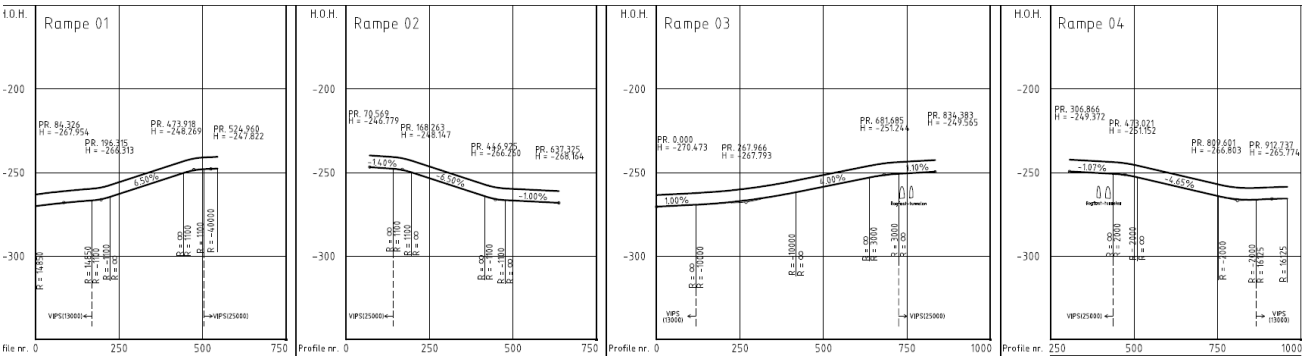


Figur 5 Linjeføring for armen til Kvitsøy, nord opp mod høyre.



Figur 6 Lengdeprofil for armen til Kvitsøy.

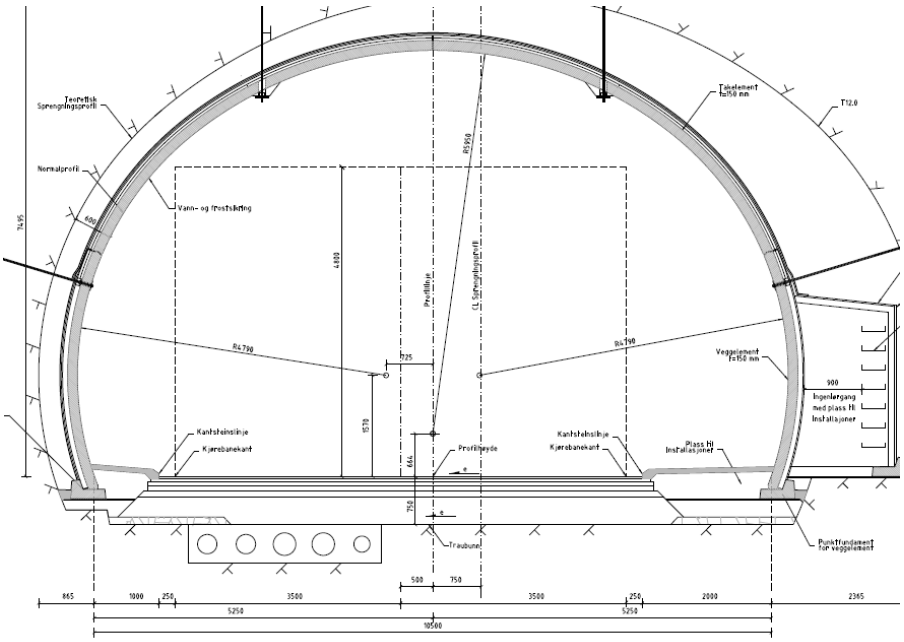
Utover denne armen er det fire ramper i krysset. Disse ramper er opp til 800 m lange. Linjeføringen for disse ramper kan ses i **Figur 7**. De geometriske data for rampene er sammenfattet i Vedlgg A.



Figur 7 Ramper (01 – 04) i det underjordiske kryss.

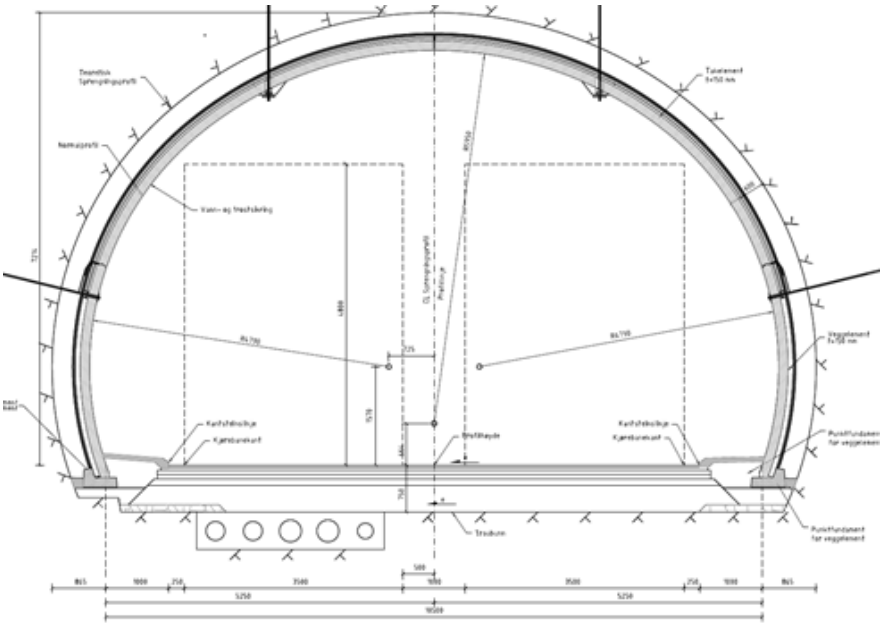
2.2 Tunneltverrsnitt

Tunneltverrsnittet for hovedtunnelen, Figur 8, svarer til 2 x T10,5, dvs. i hver retning 2 x 3.50 m brede kjørefelter og en 2.00 m bred skulder i høyre side av vegen og en 1.00 m bred skulder i venstre side.



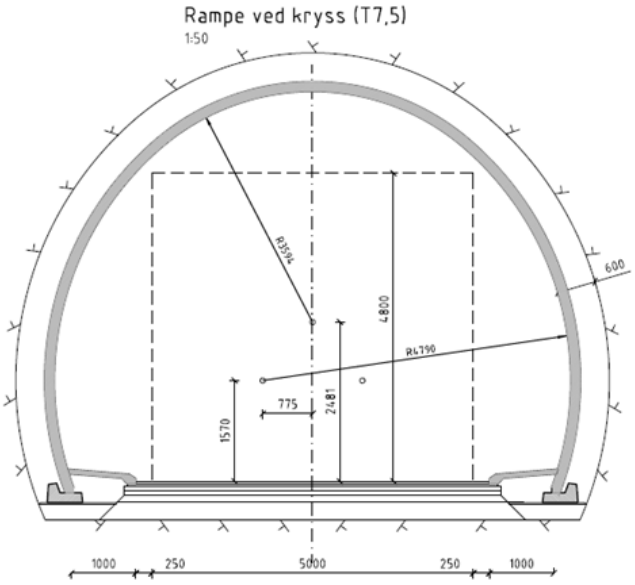
Figur 8 Tunneltverrsnitt for hovedtunnelen.

Tunneltverrsnittet for armen til Kvitsøy, Figur 9, svarer til T9,5, dvs. to 3.5 m brede kjørefelter. Dessuten er der 1 m brede skuldre på begge sider.



Figur 9 Tunneltverrsnitt for arm til Kvitsøy[1].

Tunneltverrsnittet for rampetunnelene, Figur 10, ved det underjordiske krysset svarer til T7.5 med et 3,50 m bredt kjørefelt og sidearealer, så avstanden mellom skuldrene er 5,00 m.



Figur 10 Tunneltverrsnitt for rampetunneler ved det underjordiske krysset.

[1] Figur viser T10,5 og er ikke oppdatert, da gjeldende løsning har tverrsnitt T9,5, dvs 1m midtrabatt er fjernet..

2.3 Data - Basistunnel

Tabellene under gir først helt grunnleggende informasjon/data om utførelse/utrustning og trafikk i tunnel; deretter gis informasjon om diverse sikkerhets- og tilleggsutstyr.

I kommentarfelt presiseres bl.a. relevante referanser, bl.a. til Håndbok 021, [4], Tunnelsikkerhetsforskriften, [21], (som også referer til EU krav, [12]), og videre til Konsekvensutredning, [3] og SVVs etatsprogram "Moderne vegtunneler", [48] og [51].

Tabell 2 Definisjon av basistunnel for vurdering av risiko. Hovedløp, Harestad-Arsvågen.

Parameter / utstyr	Verdi	Ref. / kommentar
Tunnelklasse	F	HB021 sier tunnelklasse E for ÅDT på 13000.
Lengde,	Ca. 26,7 km	HB021 dekker tunneler opp til 10 km
Stigning/fall, maks	5.15 % (6 km med 5.15 % og 6.5 km med 5.09 %)	Redusert ift tidligere rapport. Tunnelsikkerhetsforskriften, [21], krever <5 % "med mindre ingen annen løsning er geografisk mulig"; det forutsetter tiltak hvis stigning > 3 %. I vedlegg s 61 i [48] og [51] frarådes det "at det bygges tunneler med stigning og fall på over 5 prosent med tilhørende kjørelengde over 5 kilometer" inntil det foreligger tilstrekkelig dokumentasjon på effektene av kombinasjoner av stigning/fall og kjørelengder.
Laveste punkt	390 m.u.h.	
ÅDT	13.000	ÅDT 20 år etter åpning
Skiltet hastighet	Maks 90 km/t	
Tunge kjøretøy	Andel 15%	Ingen spesifikke data
Tunneltverrsnitt	2 x T10,5 - T12.5 ved havarinisje	To parallelle løp (hver med to felt). Tilrettelegges for to-vegs trafikk i ett løp ved vedlikehold og større uhell. Plass til installasjoner, øket skulderbredde, og evt. ekstra kjørefelt ved høye stigninger bør vurderes. SVVs nye strategi er imidlertid at tunnelprofil T10,5 skal brukes for alle vegtunneler (også to-løpstunneler) med ÅDT20 større enn 1500 [48].
Gangbar tverrforbindelse mellom tunnelløp (nødutganger)	T4, pr maks 250 m	Minimumsavstand ifølge HB021 er 250 m. Tidligere rapport foreslo 125 m.
Tverr-Forbindelse	T5.5 pr 1500 m	Gjennomkjøring for beredskapskjøretøy ved uttrykning. Se [21].
Frihøyde.	4,80 m	HB021 sier minimum 4,60 m + 0,20 m m/installasjon.
Skulder	Min. 1 m	Bredden på skulderen må vurderes ut fra plassbehov for installasjoner.
Vann- og frostsikring	Veggelementer av betong med min. høyde 3,50 m over kjørebane	Krav fremgår av klasse F (jfr krav i [6]). Betongelementer i tak eventuelt erstattet med bruk av duk og nettarmert sprøytebetong vurderes i hele eller deler av tunnelen. Lys betongkappe og/eller sprøytebetong, er fordel også i forhold til sikkert lysnivå i tunnel og opplevd sikkerhet,

		se [8]. Branntekniske egenskaper må sjekkes ut i forhold til dimensjonerende brann.
Pumpestasjon	Min. totalvolum på pumpemagasiner: 24 timers innlekkasje; trinnpumping.	Krav, jfr [4]. Magasin volum på min 36 timers innlekkasje må vurderes
Drenasje, overvann		Krav, jfr [4]. Forslag til løsning beskrevet i [8].
El-kraft-forsyning og transformator-stasjoner	Uavhengig ekstern forsyning fra Harestad og Arsvågen. Plassering lavt, i kulvert Nødstrømsforsyning på sikkerhetsutstyr (spesifisert i pkt 5.2.2.1 [4]) i minimum 1 time.	Krav, jfr [4]. Forslag: Nødstrømsforsyning på ventilasjonsanlegget (4 timer) Nødstrømsforsyning for nødnettet for radiosamband, min 4 timer. Nødstrømsforsyning i tverrforbindelsene fra begge løp.
Ventilasjon	Minimum 3,5 m/s ved 50 MW, Min. 4,5 m/s ved 100 MW.	Med kjøreretningen. Dimensjonere for 100 MW brann. Kapasitet og pålitelighet av ventilasjonssystem bør vurderes videre.
Belysning	Belysningskrav i henhold til HB 021 kap10 Belysning Kap 3.11.3 for lange tunneler og kap 10.3.3 særskilt belysning av havarilommer	Belysning påvirker mulighet til å oppdage hinder, monotoni, følt sikkerhet, årvåkenhet, kjøreadferd og dermed ulykkesrisiko. Type belysning, effektbelysning i soner med utvidet tverrsnitt og plassering av lyskilder for optisk ledning, sikker avstand og økt attraktivitet (reduksjon av ubehag/angst) bør vurderes i hovedprosjektet
Sikkerhets-belysning	Arrangeres ved hver fjerde armatur og skal lyse min. 1 time etter bortfall av strøm	Krav, jfr. [4]
Ledelys	Ledelys installeres i veggelement til å belyse skulder ved evakuering, i henhold til kravene i HB 021.	Krav, jfr. [4]
Havari- og snu-nisjer	Pr. maks 250 m	Snu-nisjer er generelt ikke aktuelt. Heller ikke havarinisjer aktuelt der det er krabbefelt.
Bergrom	4	Utvidelse av hvert hovedløp (ett i forbindelse med kryss for arm til Kvitsøy), som tiltak for å motvirke monotoni. Nytt ift tidligere løsning.
Teknikkrom	Plassering og størrelse.	Se Notat [8]
Nødtelefon	Ringesignal når røret løftes av. Gir kontakt med veitrafikksentral.	
Nødstasjon	Hver nødstasjon skal inneholde en nødtelefon og to brannslokkere. Pr. maks 125 m	Krav, jfr. fig 5.5 i [4] Vårt forslag er at nødtelefon også plasseres inne i tverrforbindelsene.

Nødstasjons-skap	Pr. maks 125 m.	Krav, jfr. [4].
Stoppblink-signal	Foran tunnelåpningene	Krav, jfr. [4]
Radiosamband		Krav, jfr. [4]
ITV overvåking	Videoovervåking (ITV) med automatisk registrering av hendelser	Krav, jfr. [4]
Mobiltelefon-dekning	Mobiltelefondekning	Ikke krav i [4], men er vanlig i dagens tunneler.
Bommer	I god avstand før innkjørsel til tunnel.	Krav om fjernstyring av bommer i pkt 5.2.2.5 i [4]. Forslag: også bommer ved kjørbare tverrforbindelser for trafikanter for å unngå feilkjøring ved åpning av tverrforbindelse, (fjernstyrte porter).
Høydehinder		Plasseres før en kommer inn i tunnelen. Standard krav i pkt. 5.2.2.7 i [4]
Materialkvalitet		Jfr. særskilte norske normer
Portaler		Krav, jfr. [4]
Styre og overvåkings-anlegg	Alt teknisk og sikkerhetsmessig utstyr kobles opp til styre og overvåkningsanlegg?	Ikke omtalt i HB021
Dimensjoner-ende brann	Krav til viftekapasitet: 100 MW. Brannmotstand av tunnelutstyr skal dimensjoneres for å motstå brannbelastning i henhold til RWS-kurve i 2 timer	100 MW er kravet i klasse F. For senketunnel er kravet 200MW. (jfr. pkt. 5.4.2 i [4]). (Lengde og stigning påvirker brannhyppighet og evakueringstid). Forslag: Vurder å dimensjonere viftekapasitet for 200 MW brann.
CO, NO, NO_2 sensor		Jfr. tab 10.3 i [4] Evt. problem ved toveis trafikk må utredes av SVV.
Slokkesystem	Slokkevann, dreneringsreservoar m/skum, handbrannslokker;	Håndslokkere ved nødstasjoner. Tiltak: Også vannslange. Vurder deluge/overrisling; jfr. diskusjon i [8]. Evt gasslokkeanlegg til eltavler o.l. og skumsprinkler i vann-magasin der spill fra tankbil etc kan samles (eksplosjonsrisiko).
Slokkevann	Slokkevann utformes som ett hydrantsystem med gjennomgående vannledning.	Krav, jfr. [4]. Slokkevann utformes som ett hydrantsystem med gjennomgående vannledning. Ledelys til slokkevann tennes automatisk, ved fjerning av brannslokker eller ved iverksetting av nødsituasjon fra VTS eller fra nødstyreskap utenfor tunnelen.
Mekaniske og elektriske installasjoner		Mekaniske og elektriske installasjoner er grundig behandlet i [8].

Tabell 3 Definisjon av basistunnel for risikovurderinger som er spesifikke for avgreningen (arm) til Kvitsøy. Øvrige data for utforming av arm til Kvitsøy er som i hovedtunnelen beskrevet i tabellen over.

Parameter / utstyr	Verdi	Ref./ kommentar
Tunnelklasse	-	Ut fra den lave ÅDT på denne armen, kan en ikke si at [4] entydig angir klasse; men samlet lengde fra Kvitsøy til nærmeste utgang er altså ca. 15 km. Spørsmål om hele tunnelsystem skal ha samme klasse. Se også diskusjon i Avsnitt 3.1.
Tunneltverrsnitt	T9,5	Øket ift tidligere rapport, [55].
Lengde	Ca. 3.1 km	Gjelder kun armen fra kryss inne i tunnel. Samlet lengde av tunnelarm og rampe er opp til 4.8 km.
Stigning, maks	7 %	Ok i forhold til HB021. SVVs strategi er imidlertid maks 5 % stigning/fall [48]. (Cf. Kommentar i Tabell 2.)
Laveste punkt	260 m	
ÅDT	900	Anslått ÅDT 20 år etter åpningsår.
Skiltet hastighet	Maks 80 km/t	
Andel tunge kjøretøy	15 %	Ingen spesifikke data
Ramper: Av – og påkjøringsramper i kryss i tunnel til Kvitsøy	T7.5	Redusert ift tidligere rapport. Bør ha plass til to kjøretøyer i bredden bl.a. av hensyn til redningskjøretøy. NB, kombinasjon av sving, stigning, tunnel.
Skiltet hastighet rampene	50 km/t	Vurderes nærmere hvis høy hastighet blir et sikkerhetsproblem. Eksempelvis VMS med anbefalt hastighet til de som kjører over 50km/t. Behov for tiltak avhenger blant annet av detaljprosjektering mht. lengde og kurvatur på rampene.

2.4 Beredskap. Brann – og redningstjeneste

Data/ informasjon som har stor betydning for utfall av ulykker:

- Midler for overvåking/varsling
- Avstengingsprosedyrer for tunnel ved uhell
- Innsatstider/responstider, brannvesenet (innsatstid til tunnelmunning):
    - Brannvesen Stavanger (Kvernevika): 10-12 minutter
    - Interkommunalt brannvesen Tysvær/Bokn/Karmøy (nærmest Arsvågen): 30-40 minutter

  En bør i hovedsak basere seg på disse to brannvesen med hensyn til innsats inne i tunnelen.
- Omfang av bemanningsinnsats (døgnbemanning eller tidsbegrenset bemanning supplert med tilkalling)
- VTS ligger i Bergen. En stasjon i tillegg på sørsiden av tunnel kan vurderes.

Bl.a. når det gjelder responstider for brann/redningstjeneste må en komme fram til et rimelig kompromiss mellom hva som er praktisk gjennomførbart og hva som anses påkrevet for å oppnå en rimelig grad av sikkerhet. Pr i dag har ikke SVV formulert overordnede krav med hensyn til slike størrelser, som et ledd i å redusere konsekvenser av ulykker.

3 Overordnede vurderinger av risiko og risikoaksept

I dette kapitlet presenteres først noen overordnede vurderinger av risiko knyttet til Rogfast. Videre diskuteres kort risikoaksept og spesielt bruk av den såkalte referansetunnel.En del data om ulykkesårsaker og ulykkesfrekvenser i tunneler blir også presentert.

3.1 Overordnede vurderinger av risiko knyttet til Rogfast

ROS-analysen [1] lister en rekke uønskede hendelser, og vurderer nærmere i alt ni hendelser som betegnes som ”representative”. Denne analysen vil imidlertid ta utgangspunkt i en modifisert liste, som underlag for diskusjon med den ”tverrfaglige gruppen”. Før vi angir en slik liste, gis noen overordnede betraktninger:

Hovedtunnelen (mellom Harestad og Arsvågen) bygges ifølge klasse F, dvs. to løp med to felt i hvert løp, med tilhørende sikkerhetsutstyr; samt en del ekstra tiltak. Rogfast har imidlertid spesielle utfordringer. Det er en lang undersjøisk tunnel, ca. 27 km lang, og med lengre strekninger med litt over 5 % stigning i hovedløpet og 7 % i Kvitsøy-armen. Overordnede sikkerhetsvurderinger tilsier at en spesielt er obs. på følgende forhold:

- *Stor lengde:*
  - Lengre responstid ved hendelser, ulykker, brann
  - Monotoni med resulterende, søvnighet, uoppmerksomhet og dermed økt ulykkesrisiko
  - Økt sannsynlighet for engstelse og angstanfall med resulterende farlig kjøreatferd
  - Lengden medfører at flere kjøretøy influeres ved en hendelse enn i en kortere tunnel med tilsvarende ÅDT
  - Lengden er en kritisk faktor ved teknisk svikt i strømtilførsel, ventilasjon, svikt i pumpesystem osv. (lang vei ut)

- *Stort stigningsforhold (evt. i kombinasjon med lengde):*
  - Økt risiko for varmgang i bremser ned bakke i forhold til tunnel uten helning, og økt brannrisiko i tyngre kjøretøy sammenlignet med lette kjøretøy
  - Økt risiko for varmgang i motor opp bakke i forhold til tunnel uten stigning, og økt brannrisiko i tyngre kjøretøy sammenlignet med lette kjøretøy
  - Lengden på stigning/fall øker brannrisiko
  - Lengden og prosent stigning/fall øker fare for kødannelser pga. saktegående tyngre kjøretøy
  - Lengden og prosent stigning/fall øker faren for forbikjøringsulykker pga. saktegående kjøretøy som kjører forbi mer saktegående kjøretøy
  - Lengden og det skarpe fallet øker faren for at tyngre kjøretøy mister bremseevne (tapt kontroll, ulykker, brann).

  Merk at en rekke undersøkelser fra ulike land viser at en skarp økning i ulykkesrate for stigninger/fall over 6 %. Økningen er størst for fall over 6 %. En amerikansk studie viser 63 % høyere ulykkesfrekvens i nedoverbakke enn opp og større alvorlighetsgrad for ulykkene [33]. Rapporten [84] viste at (2005-2012) sju av 15 dødsulykker i undersjøiske norske tunneler skjedde på strekning der det utløsende kjøretøyet hadde en helling på minst 8 %. Kjørelengden med stigning/helning har i tillegg stor betydning. SVV anbefaler at det ikke bygges tunneler med stigning og fall på over 5 % med tilhørende kjørelengde over 5 km, inntil det foreligger tilstrekkelig dokumentasjon på effekten av disse forholdene [48, vedlegg].

- Opplevd risiko er relevant for en slik tunnel, og må trekkes inn i vurderingen av tiltak som bør implementeres.

- Kryss-løsningen inne i tunnel må vurderes spesielt. Eventuell overgang fra enveistrafikk til toveis trafikk (når en skal til Kvitsøy) bør også vies oppmerksomhet. Dette fører spesielt til utfordringer med å håndtere ventilasjon (ifm en del brannscenarier).

- Brannventilasjon kan være kritisk og utfordrende, både ift kryssløsning og envegstrafikk i deler av tunnelen, (mulighet for røyklekkasje over i "sikkert løp"). Videre kan en brann i Kvitsøy-armen nær hovedtunnelen føre til at hele armen bli røykfylt, da ventilasjonsretningen går mot Kvitsøy.

- Tunnelklassifiseringen er problematisk. Klassifiseringen i HB 021 tar ikke hensyn til lengder som overstiger 10 km, noe som er en svakhet ved klassifiseringen. Klasse B for arm til Kvitsøy kan ikke begrunnes med at tunnelarmen har lengde ca. 3 km. Ved brann som blokkerer utkjørsel ved Kvitsøy vil en trafikant til/fra Kvitsøy oppleve tunnelen som 12 – 15 km lang.

Ulykkesscenariene vil velges slik at en spesielt får vurdert disse aspekter ved tunnelsikkerheten. Videre velges de slik at de illustrerer effekt av aktuelle sikkerhetstiltak. En bør spesielt se på muligheten for storulykker og to samtidige hendelser.

3.2 Risikoaksept

Det er ikke entydig gitt hva som anses akseptabelt/”godt nok” med hensyn til sikkerhet. I utgangspunktet gir HB 021 krav til hva som er ”godt nok”. Imidlertid kan en neppe si at kravene her er tilpasset en tunnel som Rogfast med dens lengde, stigningsforhold og innlagt vegkryss; spesielt går lengde langt ut over det som vurderes i Håndbok 021.

Rogfast-prosjektet har angitt at en skal sammenlikne Rogfasttunnelens sikkerhet opp mot tunnel (uten ekstra tiltak) av lengde 10 km, se "referansetunnel", beskrevet i avsnitt under. Videre er det essensielt at tunnelen skal ha en sikkerhetsgodkjenning i samsvar med HB 269 [5].

Men som nevnt i Avsnitt 3.1.4 i [2] skal SVV også styre etter nullvisjonen. Det er altså pålagt et krav om i størst mulig grad å begrense konsekvenser (fare for dødsulykker), og her bør en ikke minst ha oppmerksomhet rettet mot faren for større ulykker. Det kan medføre at en bør vurdere å formulere absolutte krav, f.eks. til redningstjenestens responstider, selv om det kun vil være et fåtall ulykker der dette er meget viktig.

ALARP (As Low As Reasonably Possible)-prinsippet er også relevant her. Selv om risiko kan anses tolerable, skal alle risikoreduserende tiltak vurderes, og hvis ikke kostnad er "urimelig" bør de implementeres. Generelt skal altså risikoreduserende tiltak utover absolutt minstekrav vurderes.

SVVs egne strategier er også av betydning. Forslag til en strategi for bl.a. geometrisk utforming og sikkerhet er gitt i "Moderne vegtunneler" [48].

3.3 Referansetunnel

I tillegg til kvalitative ROS vurderinger vil det foretas kvantitative risikoberegninger (bl.a. knyttet til utvalgte brannscenarier). Den beregnete risikoen for trafikk i Rogfast-tunnelen (med trafikk i begge løp) vil

da sammenlignes med resultatet for en **referansetunnel** av lengde 10 km med maks trafikk 50.000 i ÅDT, (som er det ÅDT tall som for en 10 km tunnel i HB021ikke lenger oppfyller krav til kl. E, men utløser krav til kl. F, (2xT9,5)). I prinsippet kunne en definere referansetunnel med høyere ÅDT. Referansetunnelen svarer altså til et "trafikkarbeid" på 50.000 kjøretøykm per døgn. For øvrig skal referansetunnelen ha en utforming som ligger innenfor de rammer som HB021 gir for kl. F, [4].

Frekvenser av ulykker/ branner og antall personer som eksponeres er avhengig av både trafikkmengden (ÅDT) og kjørt strekning (dvs. tunnellengde). Jo lengre kjøretøyene oppholder seg i tunnelen, jo lengre er eksponeringstiden for trafikantene. Ved å måle "eksponering" ("trafikkarbeid") i tunnel ved antall kjøretøykm per døgn er det en måte å prøve å balansere ÅDT og tunnellengde for referansetunnelen og Rogfast-tunnelen.[2] Risiko for en 10 km tunnel med ÅDT = 50.000 skulle da være sammenliknbar med en tilsvarende tunnel med lengde 27 km og ÅDT = 18.500, siden (lengde) x ÅDT ≈ 500.000 kjøretøykm per døgn i begge tilfelle. Merk at vår basistunnel har antatt ÅDT=13.000 selv 20 år etter oppstart, og det vil derfor ta lang tid før denne kommer opp i 18.500 kjøretøykm per døgn.

Tabell 4 Referansetunnel

Referansetunnelen (for hovedløpet) har tunnelklasse F med følgende spesifikasjoner:
• Lengde: 10 km • ÅDT: 50.000 (dvs. 500.000 kjøretøykm pr døgn) • Profil 2xT9,5 (Enveis trafikk i to løp) • Gangbare tverrforbindelser pr 250 m • Havarinisje pr 250 m • Skulder 1 m • Andel tyngre kjoretoy: 15 % • Fartsgrense: 90 km/t • V-formet lengdeprofil; 5 km helning -5 %, 5 km stigning 5 %.

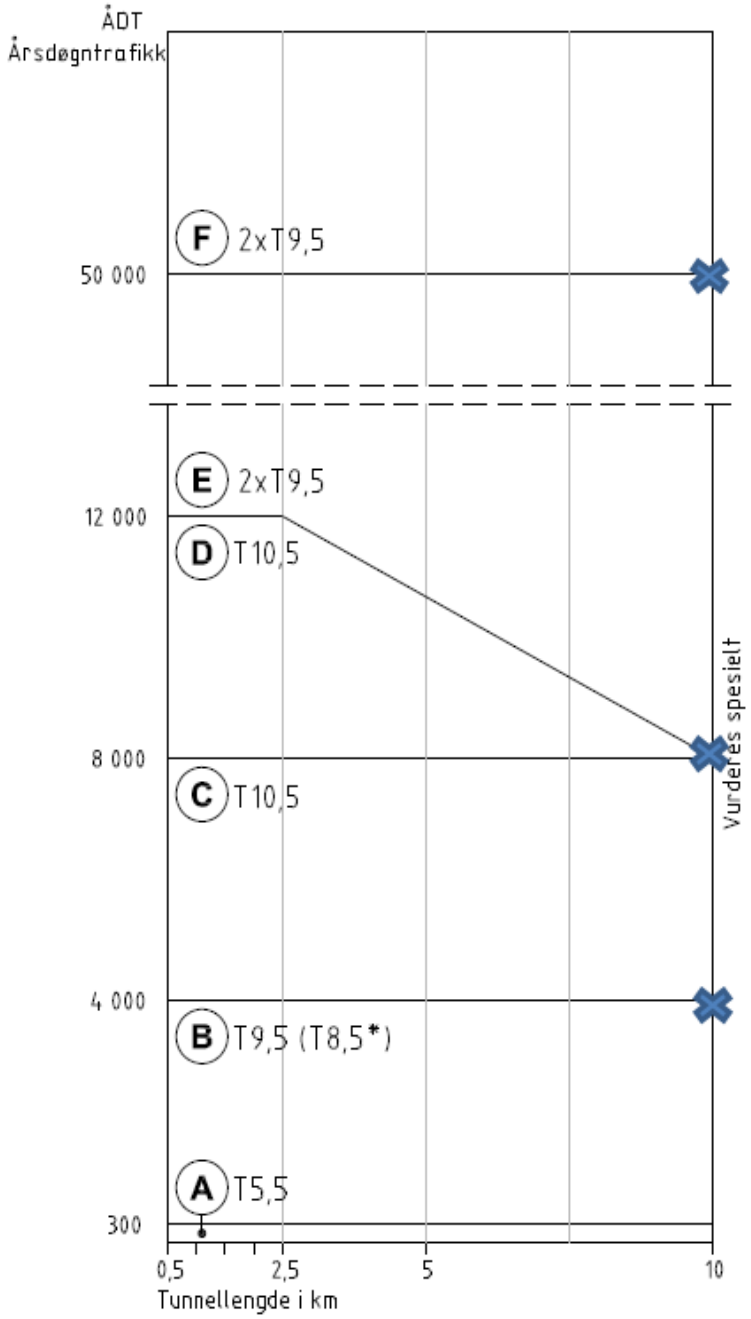
I **Figur 11** er Fig. 4.4 i HB021 gjengitt, og referansetunnel er inntegnet som et kryss (på grensen mellom klasse E og F).

Som et ledd i risikovurderingen vil en foreta og sammenlikne risikoberegninger for henholdsvis referansetunnel og Rogfast basisløsning. Det vil både utføres konsekvensberegningene av ulike (brann)scenarier, samt TRANSIT-beregninger av frekvens og risiko for hele tunnelen.

Det må understrekes at verdien av disse sammenlikninger er begrenset, og SVV bør arbeide mot å videreutvikle tabellklassifikasjonen til også å omfatte tunneler av lengde > 10 km. Merk at risikoberegningene for Rogfast hovedløp benytter en ÅDT = 13.000, noe som vil virke positivt for basistunnelen. Imidlertid ligger valgte referansetunnelen på grensen mellom klasse E og F, som må oppfattes som konservativt, da en kunne argumentere for at klasse E er godt nok. I tilfeller Rogfast vil gi lavere risiko enn referansetunnelen, kan det derfor være en indikasjon på at i hvert fall klasse F er godt nok for Rogfast. Sammenligningene mellom Rogfast og referansetunnelen er altså kun én input til de endelige risikovurderinger og vurdering av hvilke tiltak som bør prioriteres for Rogfast-tunnelen. (I tillegg kommer all usikkerhet knyttet til slike beregninger.)

[2] Argumentasjonen for sammenlikning bygger vel på at klassifiseringen kan bestemmes ut fra "trafikkarbeid", (ÅDTxlengde), noe som ikke er begrunnet.

Sammenlikningen nevnt over (referansetunnel med 10 km tunnel, ÅDT=50.000) gjelder altså hovedløpet i Rogfast-tunnelen, men når en inkluderer krysset, og inkluderer trafikken fra/til Kvitsøy (og benytter begge løp). Merk at en i tillegg til normal bruk (trafikk i begge løp) også vil se på avvikssituasjon, dvs. toveis trafikk i ett løp, og i **Figur 11** er også inntegnet "referansepunkter" for avvikssituasjonen, både med en T9,5 og T10,5 tunnel. Med nåværende løsning på T10,5 kan øvre "trafikkarbeid" for en slik tunnel fastsettes ved ÅDT = 8000 og lengde 10 km, dvs "trafikkarbeid" 80.000. Med en lengde på 27 km setter det klar begrensning på mengde trafikk (ÅDT) for en slik tunnel.



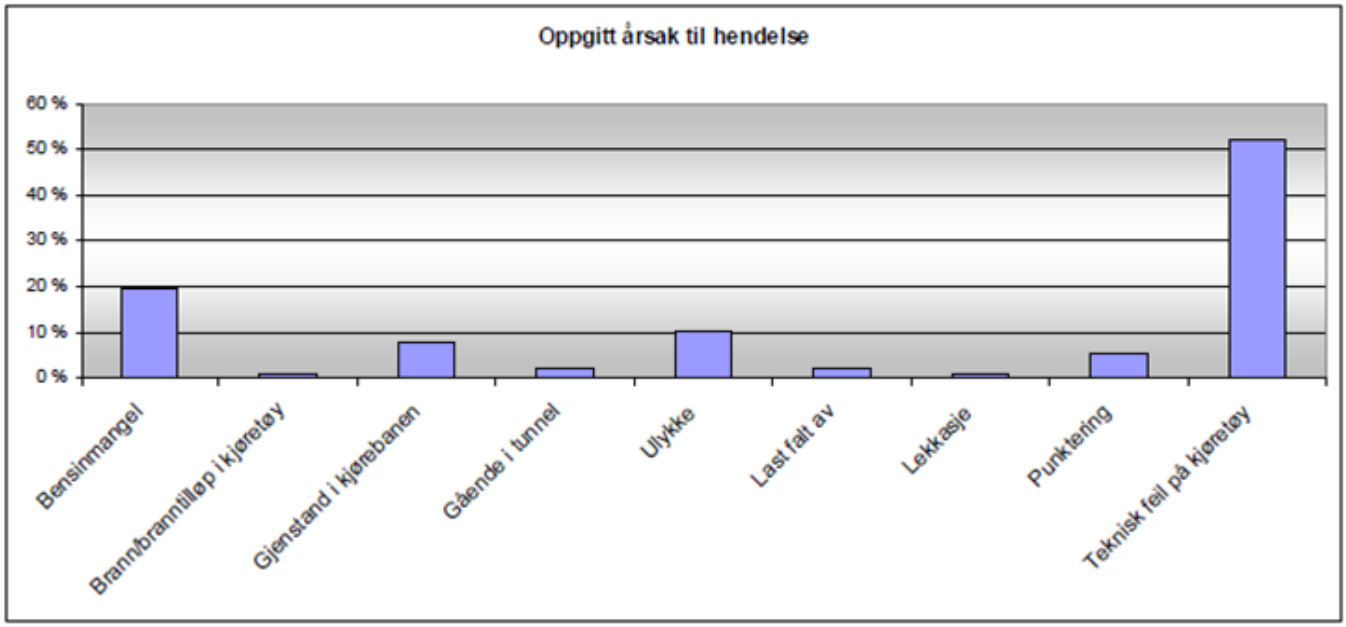
Figur 11 Tunnelklasser (Figur 4.4 i HB021) med inntegnet data for referansetunneler.
(For klasse B kan tunnelprofil T8,5 benyttes for ÅDT < 1.500, forutsatt at sikkerheten er ivaretatt).

3.4 Datagrunnlag og kvantifisering

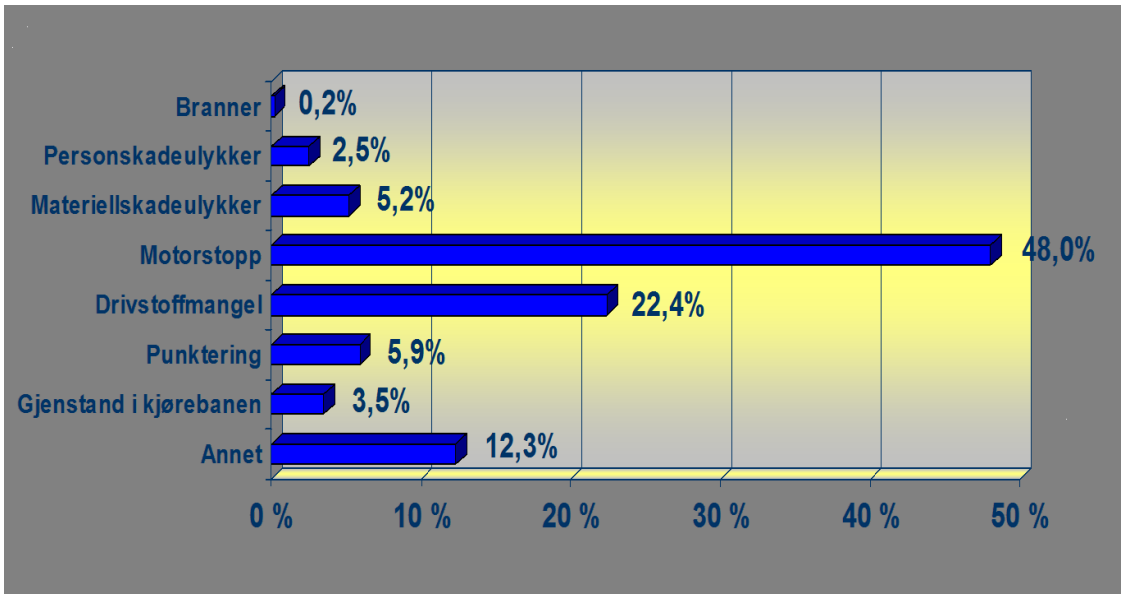
Dette avsnittet sammenfatter en del data om ulykkesårsaker og ulykkesfrekvenser i tunneler.

3.4.1 Ulykkesårsaker i tunneler

Figurene under er hentet fra rapporter fra vegvesenet om tunnelulykker og viser fordeling av årsaker til hendelser/ulykker.



Figur 12 Årsak til hendelser i tunnel (Amundsen og Engebretsen – Rapport 05/2005, Veg og trafikkavd., SVV), [16]



Figur 13 Oversikt over ulykkesårsaker i tunneler, Norge (SVV 2007), [17]

3.4.2 Tunnelbranner

Tabell 5 viser en oversikt over de mest alvorlige tunnelbrannkatastrofene i Europa.

Tabell 5 Estimert energiinnhold og maks branneffekt i tunnelbranner med tyngre kjøretøy, basert på [19] og ÅDT er basert på tunnelenes offisielle hjemmesider.

Ulykke (år)	ÅDT i tunnel	Kjøretøy i ulykke	Estimert brandenergi [GJ]	Estimert maks varmeeffekt [MW]
Eurotunnel (2008)	(togtunnel; frakter lastebiler)	10 lastebiler	2200	370
Mont Blanc (1999)	Nær 5.000 (1/3 tungtrafikk)	14 lastebiler, 9 biler	5000-7000	380
Tauern (1999)	17.000, (25% tungtrafikk)	16 lastebiler, 24 biler	4000-4500	300-400
St Gottard (2001)	19.000 i år 2000. Begrensninger etter brann	13 lastebiler, 10 biler	1400-2700	Mer enn 100

Tabell 6 Dimensjonerende verdier på branneffekt for tunnelbranner i henhold til PIARCs retningslinjer.

Type kjøretøy	MW
Bil	5
Varebil	10
Buss	20
Tyngre kjøretøy	100-150
Tankbil m/drivstoff	>200

De største brannene i Norge de senere år er brannen i Gudvangatunnelen (2013), Oslofjordtunnelen (2011), Seljestadtunnelen (2000) og bussbrannen i Ekebergtunnelen (1996). Heldigvis var det ingen som omkom i disse brannene. Vegdirektoratets interne rapport (Amundsen et.al., 2001), [15], og (Amundsen et.al., 2005), [16] gir en oversikt over inntrufne branner i henholdsvis norske vegtunneler og norske undersjøiske tunneler.

Tabell 6 over viser dimensjonerende verdier på branneffekt for tunnelbranner i henhold til PIARCs retningslinjer. Varmeeffekten fra brann i en type kjøretøy vil variere innenfor et område avhengig av bl.a. type og mengde brennbart materiale. Bussbrannen i Ekebergtunnelen ble vurdert å være 35 MW, altså større enn PIARCs retningslinjer.

Store kjøretøy er involvert i nesten alle de store brannkatastrofene som har inntruffet internasjonalt, spesielt i forbindelse med startbrannen. Det er store variasjoner hvor mange kjøretøy som er involvert, alt fra 1 til 127 kjøretøy (inklusive personbiler) (Ingason et.al., 1997), [18].

3.4.3 Trafikkulykker i norske tunneler

Statens vegvesen Vegdirektoratet har publisert flere rapporter om trafikkulykker i tunneler og i mange tilfeller er det sett separat på undersjøiske tunneler. En rapport ble publisert i slutten av 2008 og omfatter registrerte tunnelulykker i perioden 2001 – 2006, se [17]. Undersøkelsen baserer seg på data fra 797 tunneler på riksveger, med en total lengde på ca. 778,5 km. Det er totalt registrert ulykker i 250 av tunnelene i denne perioden. Tar vi med de siste 50 meterne av veg i dagen før tunnelportalen er det registrert tunnelrelaterte ulykker i 299 av tunnelene. I de 926 personskadeulykkene som inngår i analysen er det rapportert om 1428 drepte eller skadde personer. Av disse er 739 av ulykkene skjedd i selve tunnelen og resten de siste 50 meterne før tunnelportalen. I de 739 ulykkene i tunnelen er det registrert 1130 skadde eller drepte.

Tabellen nedenfor er hentet fra ovennevnte rapport og viser at 97,5 % av ulykkene i undersjøiske tunneler skjer i den såkalte midtsonen som gjelder fra 150 meter etter innkjøring i tunnel til 150 meter før utkjøring av tunnel.

Tabell 7 Oversikt over ulykkestyper i undersjøiske tunneler fordelt på tunnelsoner, [17]

Undersjøiske tunneler (Tunneler 500 meter og lengre)						
Ulykkestype	**Sone 1**	**Sone 2**	**Sone 3**	**Sone 4**	**Inne i tunnel**	**Tunnel samt sone 1**
Andre uhell	0% (0%)	33,3% (33,3%)	0% (0%)	2,5% (2,5%)	4,3% (4,3%)	4,2% (4,2%)
Samme kjøreretning	50% (50%)	0% (0%)	0% (0%)	27,5% (27,5%)	23,9% (23,9%)	25% (25%)
Møtende kjøreretning	0% (0%)	0% (0%)	0% (0%)	27,5% (27,5%)	23,9% (23,9%)	22,9% (22,9%)
Kryssing og avsving	50% (50%)	33,3% (33,3%)	0% (0%)	0% (0%)	2,2% (2,2%)	4,2% (4,2%)
Fotgjengere involvert	0% (0%)	0% (0%)	0% (0%)	0% (0%)	0% (0%)	0% (0%)
Singel utforkjøring	0% (0%)	33,3% (33,3%)	100% (100%)	42,5% (42,5%)	45,7% (45,7%)	43,8% (43,8%)
Sum ulykker	**2 (2)**	**3 (3)**	**3 (3)**	**40 (40)**	**46 (46)**	**48 (48)**

Antall ulykker gjelder både to ett-løps og to-løps undersjøiske tunneler. Antall ulykker i dagsonene rett foran tunnelportalen og i de første 150 meter i hver ende av tunnelen er for lite til en kategorisering. Tabellen viser imidlertid klart at singelulykker (trafikkulykker uten motpart) er den overveiende type ulykker som skjer i midtsonen. Deretter følger uhell mellom kjøretøyer i samme retning (ulykker med møtende kjøreretning skal i prinsippet ikke skje ved normal trafikksituasjon i en to-løps tunnel). Det er ikke

innenfor dette prosjektet mulig å gå mer detaljert inn i en ytterligere fininndeling av enkeltulykkene. Foreløpige litteratursøk har også vist at datagrunnlaget for en slik fininndeling er vanskelig tilgjengelig.

Tabellen nedenfor viser fordelingen på de ulike tunnelsonene for alle typer tunneler som inngikk i undersøkelsen fra 2008. Tabellen indikerer at i undersjøiske tunneler skjer det flere singelulykker enn gjennomsnittlig for alle tunneler og det skjer færre påkjøring bakfra ulykker i undersjøiske tunneler enn gjennomsnittlig i alle tunneler. Litteraturen indikerer at lange og bratte stigninger kan være en årsak til flere singelulykker i undersjøiske tunneler enn det som er gjennomsnittet forøvrig.

Tabell 8 Oversikt over ulykkestyper i alle tunneler fordelt på tunnelsoner, [17]

	Alle tunneler (Tunneler 500 meter og lengre)						
Ulykkestype	**Sone 1**	**Sone 2**	**Sone 3**	**Sone 4**	**Inne i tunnel**	**Tunnel samt sone 1**	**Alle riksveger**
Andre uhell	5,3% (5,7%)	3,5% (5,6%)	3,2% (3,9%)	5% (4,6%)	4,2% (4,6%)	4,4% (4,8%)	4,1 %
Samme kjøreretning	44,4% (39,1%)	37,8% (42,2%)	42,2% (41,2%)	44,7% (45,3%)	42,5% (44%)	42,9% (43,4%)	24,4 %
Møtende kjøreretning	15% (17,2%)	14% (10%)	15% (12,7%)	16,3% (15,7%)	15,4% (14,3%)	15,3% (14,7%)	14,8 %
Kryssing og avsving	2,7% (3,4%)	2,3% (1,1%)	0% (0%)	1,3% (1,4%)	1,2% (1,1%)	1,5% (1,4%)	18,4 %
Fotgjengere involvert	2,1% (1,1%)	1,7% (2,2%)	1,1% (0%)	0,3% (0,3%)	0,8% (0,5%)	1,1% (0,6%)	6,1 %
Singel utforkjøring	30,5% (33,3%)	40,7% (38,9%)	38,5% (42,2%)	32,4% (32,8%)	35,9% (35,5%)	34,8% (35,2%)	32,3 %
Sum ulykker	**187 (87)**	**172 (90)**	**187 (102)**	**380 (369)**	**739 (561)**	**926 (648)**	

Merk at det her ikke er foretatt noen detaljert gjennomgang av ulykkesdata. Det er imidlertid i løpet av siste to år utgitt tapporter med ulykkesdata; SVV har rapport, Temanalyse om dødsulykker i tunnel, [84], og TØI har utarbeidet en rapport med kartlegging av kjøretøybranner i norske tunneler, [85].

Rapporten til TØI, [85] viser at vi i årene 2008-2011 har hatt 135 branner og branntilløp i norske vegtunneler. Undersjøiske tunneler står for 60 av disse, noe som tilsier en meget høy overrepresentasjon Rapporten [84] viser bl.a. at av 38 dødsulykker (2005-2012) i indre sone av tunneler har 13 vært i undersjøiske tunneler, (herav 7 på strekning med helning 8 % eller brattere)..

Når det gjelder frekvens av branner vil det være meget store variasjoner. Ofte vil ulykkesfrekvensen ligge i området 0,05-0,2 per million kjøretøykm. [17] angir 0,12 for alle tunneler over 500 m (inkl. sone 1).

Tabell 9 viser ulykkesfordelingen (med hensyn til alvorlighetsgrad) i en del tunneler på Vestlandet. Fra SVV er det også mottatt en figur som viser ulykkesfrekvens for samme tunneler. Grasdal kommer på topp med ca. 0,25, og også Byfjordtunnelen kommer høyt, (frekvens i underkant av 0,2). Den lengste tunnelen, Lærdal har frekvens ca. 0,05.

Videre er det av interesse å se på Oslofjordtunnelen som er en undersjøisk tunnel med relativ stor stigning. Den er dimensjonert for ÅDT på inntil 7500, og gjennomsnitt for 2000-2010 er ÅDT=5500, se [20]. Fra 2000 til 2010 er det registrert sju trafikkulykker, (0,05 ulykke per million kjøretøykm, men alvorlighetsgraden på disse har vært relativt høy). Det har vært:

- 2 ulykker som resulterte i dødsfall
- 8 lettere skadd
- 4 påkjøringer bakfra
- 2 utforkjøringsulykker
- 1 møteulykke.

(i tillegg hendelser uten personskade). Oslofjordtunnelen har vært stengt 435 ganger de siste tre år som følge av uforutsette hendelser. Stengningene har stort sett vært relatert til motorstopp, løse gjenstander i vegbanen og havarier.

Tabell 9 Registrerte ulykker i tunneler med lengde over 3 km- Region Vest 2000-2007. (Kilde: Vegdatabanken, Statens vegvesen)

Tunnel	Lengde m	Under-sjøisk t.	Ulykker 2000-2007	Lettere skadd	Alvorlig skadde	Svært alvorlig	Døds-ulykke
Byfjord	5 875	X	7	3	2		2
Lærdal	24 510		4	1		2	1
Røldal	4 657		3	2			1
Naustdal	5 960		2	1			1
Gudvanga	11 428		5	3	2		
Flenja	5 053		2		2		
Åkrafjord	7 400		2	1	1		
Oppljos	4 537		1		1		
Folgefonn	11 180		2	2			
Bømlafjord	7 931	X	2	2			
Vallavik	7 510		2	2			
Fodnes	6 604		2	2			
Mastrafjord	4 424	X	2	2			
Grasdal	3 720		2	2			
Frudal	6 758		1	1			
Høyanger	7 584		0				
Fjærland	6 397		0				
Eikefet	4 910		0				
Masfjord	4 110		0				
Haukeli	5 682		0				
Bogs	3 842		0				
Sum	**150072**		**39**	**24**	**8**	**2**	**5**

Oslofjordtunnelen har hatt elleve større og mindre branner de siste tre årene (fram til 2012), hvorav åtte i tungbiler. Brannene skyldes som regel varmgang i bremsene og motorhavari/motorbranner. Et så vidt stort antall kan dels skyldes stor trafikk, men det er anført at en har erfaring med at brannene i stor grad gjelder utenlandske sjåfører, uten erfaring med store stigninger (varmgang i motor/bremser). I tilsvarende tunneler på Vestlandet, kan det muligens antas at utenlandske sjåfører har mer kunnskap og oppnådd noe erfaring med slike stigninger på fjelloverganger.

4 Grov risikoanalyse

I dette kapitlet presenteres resultatet av en grov risikoanalyse. Det gis en totaloversikt over alle ulykkeshendelser, med vurdering av frekvens- og konsekvens-kategorier. Hendelsene settes inn i risikomatrise.

4.1 Sannsynlighets- og konsekvens-kategorier

Veileder [2] angir forslag til sannsynlighets- og konsekvenskategorier. Disse er gjengitt under.

Sannsynlighetskategorier, [2]:

- Svært ofte (minst en gang pr år)
- Ofte (en gang per 2 til 10 år)
- Sjelden (en gang per 11-100 år)
- Svært sjelden (en gang per 101 til 1000 år)
- Ekstremt sjelden (sjeldnere enn hvert 1000 år)

Forslag til konsekvenskategorier i [2]:

- Lettere skadd
- Hardt skadd
- 1-4 drepte
- 5-20 drepte
- Mer enn 20 drepte.

Dette gir følgende risikomatrise; se figur under. Her er også inntegnet rødt, oransje, gult og grønt område i samsvar med [2]. Risiko knyttet til de utvalgte uønskede hendelser settes inn i denne risikomatrisen. Tilsvarende matrise kan settes opp for andre typer konsekvenser (for eksempel utilgjengelighet av tunnel).

	LL: Lettere skadde	L: Hardt Skadde	M: 1-4 drepte	H: 5-20 drepte	HH: >20 drepte
HH: Svært ofte, (minst en gang per år)					
H: Ofte, (en gang per 2 -10 år)					
M: Sjelden, (en gang per 11 - 100 år)					
L: Svært sjelden, (en gang per 101 - 1000 år)					
LL: Ekstremt sjelden, (sjeldnere enn hvert 1000 år)					

Tiltak vurderes ikke nærmere | Tiltak bør vurderes | Tiltak skal vurderes | Tiltak nødvendig

Figur 14 Risikomatrise med hensyn til tap av liv/helse

4.2 Kategorier av uønskede hendelser

Veilederen [2] angir i alt fem kategorier uønskede hendelser (se Tabell 3 i [2]). Vi innfører følgende seks kategorier (som avviker noe fra veilederen):

1. Rene trafikkulykker (som ikke utvikler seg til brann), bl.a.:
2. Brann- og eksplosjonsulykker, (inklusiv de som har utviklet seg fra trafikkulykker)
3. Utslipp/Lekkasje av farlige stoffer / giftige gasser (FG ulykker)
4. Oversvømmelse, (vanninntrenging / flom)
5. Ras
6. Stenging p.g.a. teknisk svikt

Dette bør være en utfyllende liste, slik at enhver ulykke vil tilhøre en og bare en av disse ulykkes-kategoriene. ROS analysen [1] studerer noen eksempler på hendelser innen disse kategoriene.

Merk at hver av disse seks ulykkestypene kan detaljeres/kategoriseres ut fra *lokalitet* (sted i tunnel), f.eks.: Inngangssone (innen 200 m fra inngang); både i hovedløpet og i arm til Kvitsøy, stigningsparti, lavt punkt inne i tunnel og kryss inne i tunnel

Dette er viktige spesifiseringer, bl.a. da det kan ha stor betydning for beredskap og konsekvens av ulykken. Også *tid* (på døgnet, i året) har betydning, da dette kan gi ulik trafikk i tunnelen. Antall eksponerte avhenger m.a.o. av tidspunkt (rushtid eller ikke.)

Både lokalitet og tidspunkt vurderes når en vurderer variasjon i konsekvenser (fra "beste" til "verste" utfall). Videre vil sted og tid spesifiseres når en foretar grundigere analyse av spesifikke scenarier (Kapittel 6).

4.3 Totalgjennomgang av ulykkeshendelser, tunnel

ROS analyse skal vurdere *alle* uønskede hendelser i tunnel. Disse kan grovt sett grupperes som angitt over. Merk at ROS-analysen [1] presenterte en liste av hendelser, som under er gruppert etter kategoriseringen gitt i avsnittet over. Ni av disse hendelsene ble i [1] inkludert i ROS for videre vurdering. Disse er merket med **fet** skrift under. *Liste over hendelser brukt i [1]:*

1. Rene trafikkulykker (som ikke utvikler seg til brann):
    1. Møteulykke
    2. **Feilkjøring (**feil løp, feil fil)
    3. **Påkjørsel bakfra**
    4. **Påkjørsel i kryss**
    5. Påkjørsel av objekt i vegbanen
    6. **Teknisk havari av kjøretøy**
    7. Sammenstøt med tunnelvegg.

2. Brann- og eksplosjonsulykker (inklusiv de som har utviklet seg fra trafikkulykker)
    - **Brann i personbil (5 MW)**
    - **Brann i buss (30 MW)**
    - **Brann i tungt kjøretøy med høy brannlast (100 MW)**
    - Brann i tungt kjøretøy uten farlig gods (20 MW)
    - Brann i installasjoner.

3. Utslipp/Lekkasje av farlige stoffer / giftige gasser
   8. Gasslekkasje fra tungt kjøretøy
   9. Lekkasje av farlig væske fra tungt kjøretøy
   10. Lekkasje av oksiderende stoffer
   11. Lekkasje av korrosive stoffer.

4. Oversvømmelse, (vanninntrenging / flom)
   12. Oversvømmelse/flom.
   13. Vanninntrenging via tunnelvegger..

5. Ras
   - Ras som følge av geologiske forhold.

6. (Stenging p.g.a.) teknisk svikt
   - Strømbrudd
   - Svikt i kommunikasjons- eller overvåkingssystem.

I tillegg var "Tilsiktede handlinger" på lista i [1], men dette diskuteres ikke i denne rapporten, (etter avtale med SVV).

ROS-analysen [1] dekker dermed godt de rene trafikkulykker, og siden disse heller ikke er av de mest alvorlige, vil de her kun gis en forholdsvis grov vurdering.

Viktige brannscenarier blir mer utførlig analysert i Kapittel 8. Nå gis kun vurdering av generiske hendelser (20, 100 og 300 MW branner), svarende til de mer detaljerte scenarier i dette kapittel.

De øvrige hendelser nevnt i [1] blir vurdert under, og enkelte nye er lagt til.

Tabell 10 beskriver årsaker til de enkelte ulykkestyper. En del årsaker kan opplagt plasseres flere steder. Årsaker kan være både menneskelige feil (feil løp, for stor fart, …), teknisk svikt (strømbrudd, …), vær/føre (snø, ising, dogg), naturkatastrofe (jordskjelv, ekstremvær, …), og vil også til dels fremgå av ulykkes-klassifiseringen.

Rene påkjørsler (av gående) er ikke tatt med, (aktuelt som konsekvens av motorstopp eller lignende). Ellers må en være oppmerksom på at det spesielt i en lang tunnel som Rogfast er fare for flere samtidige ulykker; enten som uavhengige hendelser, eller som følgehendelser. For eksempel kødannelse etter en ulykke, (se pkt. 1.2 i tabellen under), kan lede til påkjørsel bakfra (evt. kollisjon ved filbytte). Et alvorlig scenario oppstår hvis det blir brann ved en slik påkjørsel langt bak i køen, og bilene foran ikke har mulighet til å kjøre framover.

Etterfølgende tabeller gir vurderinger av hendelsene i forhold til personskade / tap av liv, og gjelder for normaltrafikk. Vurderingene er gjort i en tverrfaglig gruppe fra SINTEF/COWI, og baserer seg på tilgjengelige erfaringstall, for tunnel uten spesielle tiltak.

Tabell 11 presenterer noen risikovurderinger av de samme hendelser. Det gis estimert frekvens av hver av de 6 ulykkestyper, og videre gis sannsynlighetskategori for hver enkelthendelse. For både frekvens og konsekvens benyttes terminologien: LL (meget lav), L (lav), M (middels), H (høy) og HH (meget høy). For ulykkeskategoriene 1-5 svarer disse til de fem kategoriene gitt i **Figur 14**.

Frekvens estimeres som totalfrekvens for hele tunnelsystemet. Merk at konsekvens (for eksempel for branner) naturligvis er sterkt avhengig av plassering av brann, samt tid på døgnet. Derfor gis en vurdering både av "beste" "typisk" og "verste" konsekvens. Her antas at "beste" svarer til 10 % av alle ulykkeshendelser av denne type, mens "verste" svarer til de 10 % med mest alvorlig utfall. For eksempel ”verste” konsekvens har m.a.o. en frekvens som svarer til 1/10 av frekvens for ”typisk” konsekvens; (man går ”ned” en frekvensklasse).

Brannscenarier behandles nøyere i Kapittel 8 (opp til 300 MW branner). Når det gjelder fare for store ulykker, føyer vi til at fare oversvømmelse må vurderes spesielt. Andre ulykker som er alvorlige med hensyn til stengning av tunnel er eksplosjon eller alvorlig brann som skader vann- og frostsikring (typisk farlig gods ulykke).

En kan utføre tilsvarende vurderinger for avvikssituasjon (toveis trafikk i ett løp) for ulykkeskategoriene 1-3, se **Tabell 12**. Med hastighetsbegrensninger, og evt. annen trafikkregulering (redusert trafikkmengde) antas små endringer i sannsynlighet (frekvens), dvs. samme klasse som for normalsituasjonen. Merk likevel at en her har mulighet for møteulykke (kategori 1.8) i tillegg til de en har for normalsituasjonen. NB: Ulykkesfrekvensen her angis ut fra frekvens *når vi har avvikssituasjon*. Andel av tiden vi har avvikssituasjon vurderes separat.

Når det gjelder konsekvensene av kategori 3 ulykker for avvikssituasjonen vil disse ofte være om lag dobbelt så høy som for normalsituasjonen, men ofte ligge innenfor samme klasse. For antente utslipp er konsekvensene likevel plassert en klasse høyere.

Tabell 10 Uønskede hendelser og årsaker

Nr	Uønsket hendelse		Årsaker
	Kategori	Spesifikasjon	
1. Trafikkulykke			
1.1	Trafikkulykke	Kollisjon, kryss	Brudd på trafikkregler, høy fart, osv
1.2	Trafikkulykke	Påkjøring bakfra	Bil stoppet (punktering, bensinmangel, teknisk feil). Kødannelse etter ulykke.
1.3	Trafikkulykke	Påkjøring, objekt i veibane	Last fra kjøretøy. Objekt fra tunnel.
1.4	Trafikkulykke	Feilkjøring, feltskifte	Filskifte pga saktegående kjøretøy (oppover). Påkjørsel av kantstein. Kjører feil tunnelløp.
1.5	Trafikkulykke	Teknisk havari, kjøretøy	Varmgang motor (opp), bremser (ned), punktering.
1.6	Trafikkulykke	Sammenstøt m. tunnelvegg	Sovne av ved ratt. Dugging. Glatt føre.
1.7	Trafikkulykke	Kjøretøyvelt	Påkjørsel av kantsten, veggelem. eller annet kj.tøy.
1.8	Trafikkulykke	Møteulykke (Toveis trafikk, ett løp)	Feilkjøring. Sovne av ved ratt. Dugging. Glatt føre.
2. Brann/eksplosjon (ikke farlig gods transport)			
2.1	Brann	Kjøretøy, ≤ 20 MW	Trafikkulykke. personbil, tungt kjøretøy (uten FG), buss, (evt. spredning). Overopphetet motor (oppover). Overopphetet bremser (nedover).
2.2	Brann	Kjøretøy, 20-100 MW	
2.3	Brann	Kjøretøy, 300 MW (dvs > 100 MW)	
2.4	Eksplosjon	Propan i campingvogn	Kollisjon
2.5	Brann	Installasjoner	Elektrisk feil
3. Farlig gods /utslipp farlige stoffer			
3.1	Utslipp gass	Giftig/-eksplosjonsfarlig gass	Teknisk svikt gasslagring kjøretøy, kollisjon
3.2	Utslipp væske	Lekkasje brannfarlig væske uten antennelse	Teknisk svikt kjøretøy, kollisjon
3.3	Utslipp farlige stoffer	Lekkasje korrosive/-oksiderende stoffer	Trafikkulykke
3.4	Eksplosjon	Eksplosjon farlig gods (gass, væske, stoff)	Trafikkulykke
3.5	Antennelse	Antennelse av brannfarlig væske fra tungt kjøretøy	Trafikkulykke
4. Vanninntrenging/oversvømmelse			
4.1	Over-svømmelse	Regnskyll; via tunnelportal eller ventilasjonstårn	Ekstrem regnhendelse som overgår rampesumpens kapasitet. Ekstremnedbør.
4.2	Over-svømmelse	Hav/sjø; via tunnelportal eller ventilasjonstårn	Ekstremt høyvann og storm. Øket havnivå (klimaendring)
4.3	Vanninn-trenging	Gjennom bergvegg	Brann/ekspl. som medfører kollaps av sikring eller tunnelforing ved svakhetssone; (evt. FG ulykke). Overbelastning utenfra og/eller feil på utførelse.
5. Ras			
5.1	Ras	Ras fra tunneltak/vegg	Brann eller eksplosjon som medfører kollaps av sikring eller tunnelforing ved svakhetssone. Jordskjelv. Menneskelig feil i utføring.
6. Teknisk svikt			
6.1	Teknisk svikt	Strømbrudd; svikt pumpe, brannventilasjon.	Brann, trafikkulykke.
6.2	Teknisk svikt	Svikt i kommunikasjons- og overvåkingssystem	Datafeil.

Tabell 11 Risikovurdering, ulike scenarier, normalsituasjonen: Konsekvens med hensyn til skadde/omkomne. Forkortelsene for sannsynlighet og konsekvens er forklart i Figur 14.

	Uønsket hendelse		Sannsyn-lighet	Konsekvens			Kommentar
Nr	Kateg.	Spesifikasjon		Beste	Typisk	Verste	
1	Trafikkulykke		HH				
1.1		Kollisjon, kryss	H	LL	L	M	
1.2		Påkjøring bakfra	HH	LL	L	M	
1.3		Påkjøring, objekt i veibane	H	LL	LL	M	
1.4		Feilkjøring, feltskifte	M	LL	L	M	
1.5		Teknisk havari, kjøretøy	HH	LL	LL	M	
1.6		Sammenstøt med tunnelvegg	M	LL	L	M	
1.7		Kjøretøyvelt	M	LL	L	M	Ett kjøretøy er involvert
2	Brann		HH				
2.1		Kjøretøy, ≤ 20 MW	HH	LL	LL	M	
2.2		Kjøretøy, 20-100 MW	H	LL	L	H	HH ved frekvens L
2.3		Kjøretøy, >100 MW	L	L	M	HH	
2.4		Eksplosjon (camp.v.)	LL	LL	L	M	
2.5		Installasjoner	M	LL	LL	M	
3	Farlig gods/ Utslipp farlige stoffer		M				
3.1		Lekkasje giftig/-ekspl.farlig gass	LL	LL	L	M	Ikke antennelse
3.2		Lekkasje av brannfarlig væske	L	LL	LL	LL	Ikke antennelse
3.3		Lekkasje av farlige stoffer	LL	LL	L	M	Bl.a. korrosive/oksiderende
3.4		Eksplosjon f. gods (gass, væske, stoff)	LL	L	M	H	Potensiale for HH (verste konsekvens)
3.5		Antennelse av brannf. væske fra tungt kj.t.	LL	LL	M	H	Potensialet for HH (verste konsekvens)
4	Vanninntrenging/Oversvømmelse						
4.1		Oversvømmelse/regn	M	LL	L	M	
4.2		Oversvøm fra hav/sjø	LL	LL	L	H	Via portal eller vent.tårn
4.3		Vanninntrenging gjennom bergvegg	LL	LL	LL	M	Evt. som følge av brann/eksplosjon.
5	Ras		M				
5.1		Ras i tunnel	M	LL	L	M	
6	Teknisk svikt		M				
6.1		Strømbrudd, pumpe	M	LL	LL	LL	
6.2		Kommunikasjon- og overvåkingssystem	L	LL	LL	LL	

Tabell 12 Risikovurdering, avvikssituasjonen (ulykkeskategoriene 1-3): konsekvenser med hensyn til skadde/omkomne. Forkortelsene for sannsynlighet og konsekvens er forklart i Figur 14.

	Uønsket hendelse		Sann-synligh	Konsekvens			Kommentar
Nr	Kateg.	Spesifikasjon		Beste	Typisk	Verste	
1	Trafikkulykke		HH				
1.1		Kollisjon, kryss	H	LL	L	M	
1.2		Påkjøring bakfra	HH	LL	L	M	
1.3		Påkjøring, objekt i veibane	H	LL	LL	M	
1.4		Feilkjøring, feltskifte	M	LL	L	M	Evt. skifte mellom en- og toveis trafikk gir økning i frekvens.
1.5		Teknisk havari, kjøretøy	HH	LL	L	M	
1.6		Sammenstøt med tunnelvegg	M	LL	L	M	
1.7		Kjøretøyvelt	M	LL	L	M	Ett kjøretøy er involvert.
1.8		Møteulykke	M/H	LL	L/M	M	Ny hendelse i forhold til normalsituasjonen. Betydning også for brann
2	Brann (uten FG)		HH				
2.1		Kjøretøy, ≤ 20 MW	HH	LL	LL	M	
2.2		Kjøretøy, 20-100 MW	H	L	M	H	HH ved frekvens L
2.3		Kjøretøy, > 100 MW	L	M	H	HH	
2.4		Eksplosjon (camp.v.)	LL	LL	L	M	
2.5		Installasjoner	M	LL	L	M	
3	Farlig gods/farlige stoffer		M				
3.1		Lekkasje giftig/-ekspl.farlig gass	LL	L	L	M	Ikke antennelse
3.2		Lekkasje av brann-farlig væske	L	LL	LL	LL	Ikke antennelse
3.3		Lekkasje av farlige stoffer	LL	LL	L	M	Bl.a. korrosive og oksiderende
3.4		Eksplosjon FG, (gass, væske, stoff)	LL	L	H	HH	
3.5		Antennelse av brannf. væske fra tungt kj.t.	LL	L	H	HH	

Alle hendelser for normalsituasjonen er satt inn i risikomatrisen, for total vurdering av tunnelen med hensyn til personskade/tap av liv; se **Figur 15** under. **Figur 16** gir risikomatrise, innsatt "verste konsekvens". Merk at frekvens her endres en "klasse" i forhold til frekvens for "typisk konsekvens".

Ikke i noen av disse tabeller er det hendelser som havner i rød sone. Imidlertid handler en del i oransje. Det dreier seg om en del trafikkulykker: kollisjon, påkjøring bakfra teknisk havari og påkjøring objekt; videre brannscenariene for kjøretøy (inklusiv verste konsekvens for store branner). Trafikksikkerhetstiltak og tiltak for å redusere brannrisiko bør derfor være sentrale. En rekke slike tiltak diskuteres i Kap.6. I gul sone finnes også en rekke hendelser, også fra øvrige kategorier, (farlig gods, oversvømmelse, ras, teknisk svikt). Også disse må derfor vies oppmerksomhet. Det bemerkes at det i store brann- og eksplosjonsulykker (2.3, 3.3 og 3.4) er potensiale for konsekvensen HH. For hendelse 2.3 er sannsynligheten kanskje klasse L, for de andre er den LL.

	LL: Lettere skadde	L: Hardt Skadde	M: 1-4 drepte	H: 5-20 drepte	HH: >20 drepte
HH: Svært ofte, (minst en gang per år)	1.5; 2.1;	1.2;			
H: Ofte, (en gang per 2 -10 år)	1.3;	1.1; 2.2			
M: Sjelden, (en gang per 11 - 100 år)	2.5; 6.1	1.4; 1.6; 1.7; 4.1; 5.1;			
L: Svært sjelden, (en gang per 101 - 1000 år)	3.2; 6.2	4.2;	2.3;		
LL: Ekstremt sjelden, (sjeldnere enn hvert 1000 år)	4.3;	2.4; 3.1; 3.3; 4.2;	3.4; 3.5;		

Tiltak vurderes ikke nærmere | Tiltak bør vurderes | Tiltak skal vurderes | Tiltak nødvendig

Figur 15 Risikomatrise, innsatt uønskede hendelser, normalsituasjon, typisk konsekvens

	LL: Lettere skadde	L: Hardt Skadde	M: 1-4 drepte	H: 5-20 drepte	HH: >20 drepte
HH: Svært ofte, (minst en gang per år)					
H: Ofte, (en gang per 2 -10 år)			1.2; 1.5; 2.1		
M: Sjelden, (en gang per 11 - 100 år)			1.1; 1.3	2.2	
L: Svært sjelden, (en gang per 101 - 1000 år)	6.1		1.4; 1.6; 1.7; 2.5; 4.1; 5.1		
LL: Ekstremt sjelden, (sjeldnere enn hvert 1000 år)	3.2; 6.2		2.4; 3.1; 3.3; 4.3	3.4; 3.5; 4.2	2.3

Tiltak vurderes ikke nærmere | Tiltak bør vurderes | Tiltak skal vurderes | Tiltak nødvendig

Figur 16 Risikomatrise, innsatt uønskede hendelser, normalsituasjon, verste konsekvens

For øvrig påpekes det at risikobidragene i disse risikomatriser referer til *total* risiko (per år) knyttet til all trafikk i hele tunnelen, og gir altså ikke risiko ved gjennomkjøring eller risiko per kjørte km. Det betyr at lange tunneler og tuneller med høy trafikk automatisk får relativt høye verdier (tenderer til å få hendelser i rødt område). Verdien er at risikomatrisen er først og fremst å peke ut de største ”risikoelementene”, men bør neppe være avgjørende som akseptkriterium for tunnelen.

4.4 Vurdering av hendelser som gir utilgjengelighet av tunnel

Tabell 13 gir vurderinger med hensyn til hendelser som gir utilgjengelighet av tunnel; (evt. ett løp). Utilgjengelighet kan skyldes teknisk svikt og større ulykker (brann, oversvømmelse, ras, osv.).

Hendelsene med typisk og verste konsekvens er satt inn i risikomatrisene i henholdsvis **Figur 17** og **Figur 18**. Merk at konsekvens angis her som varighet av "nedetid". For frekvens gjelder samme kategorier som i foregående risikomatriser.

Tabell 13 Uønskede hendelser: Konsekvens for stenging av tunnel (ett/to løp).

	Uønsket hendelse		Sannsyn-lighet	Konsekvens			Kommentar
Nr	Kateg.	Spesifikasjon		Beste	Typisk	Verste	
Trafikk/brann-ulykker			HH				
1	Trafikk-ulykke	Personskade, tungt kjøretøy involvert	HH	LL	LL	L	Oftest ett løp.
2	Brann/ Ekspl.	Brann, evt farlig gods-ulykke.	HH	LL	L	H	Oftest ett løp.
Vanninntrenging/ras			L				
4.1 4.2	Over-svøm. via innløp el. vent.tårn	Regn/hav/sjø	L	M	H	HH	Oftest begge løp Varighet forlenges v/ hav/saltvann.
4.3	Vanninn-trenging	Via bergvegg	LL	M	H	HH	Evt. som følge av FG ulykke
5.1	Ras		L	H	HH	HH	Oftest begge løp.
Tekniske svikt			M				
6.1	Tekn. Svikt	Strømbrudd	M	LL	LL	L	Oftest begge løp.
6.2	Tekn. Svikt	Svikt i kommunik. og overvåkings-system	L	LL	L	M	Oftest begge løp.

	LL: ≤2 timer	L: ≤1 dag	M: ≤1 uke	H: ≤1 mnd	HH: >1 mnd
HH: Svært ofte, (minst en gang per år)	1;	2;			
H: Ofte, (en gang per 2 -10 år)					
M: Sjelden, (en gang per 11 - 100 år)	6.1;				
L: Svært sjelden, (en gang per 101 - 1000 år)		6.2;		4.1; 4.2;	5.1;
LL: Ekstremt sjelden, (sjeldnere enn hvert 1000 år)				4.3;	

Tiltak vurderes ikke nærmere | Tiltak bør vurderes | Tiltak skal vurderes | Tiltak nødvendig

Figur 17 Risikomatrise, innsatt hendelser som gir stenging av tunnel, typiske konsekvens

	LL: ≤2 timer	L: ≤1 dag	M: ≤1 uke	H: ≤1 mnd	HH: >1 mnd
HH: Svært ofte, (minst en gang per år)		1;		2;	
H: Ofte, (en gang per 2 -10 år)					
M: Sjelden, (en gang per 11 - 100 år)		6.1;			
L: Svært sjelden, (en gang per 101 - 1000 år)			6.2;		4.1; 4.2; 5.1;
LL: Ekstremt sjelden, (sjeldnere enn hvert 1000 år)					4.3;

Tiltak vurderes ikke nærmere | Tiltak bør vurderes | Tiltak skal vurderes | Tiltak nødvendig

Figur 18 Risikomatrise, innsatt hendelser som gir stenging av tunnel, verste konsekvens

Verste konsekvens av hendelse 2, brann evt. farlig godsulykke, havner i rød sone. Konsekvensen av en slik hendelse kan medføre nedetid i over én måned. Øvrige hendelser ligger i gul/oransje sone og tiltak bør vurderes. Mht. lange nedetider kan fergeberedskap være et (kompenserende) tiltak.

Videre i rapporten er det brannscenarier som er hovedfokus. Andre ulykkesscenarier som ras, oversvømmelse (tunnelmunning eller ventilasjonstårn) er ikke vurdert nærmere ut over vurderingene som er gjort i den grove risikoanalysen i dette kapitlet. Slike hendelser kan imidlertid føre til langvarig nedetid i tunnelen hvis de inntreffer. Vi anbefaler at utredninger utføres for at en også i planleggingsfasen sikre seg mot slike scenarier.

5 Tiltak

Dette kapitlet gir en oversikt over viktige problemstillinger og aktuelle tiltak for å bedre sikkerheten i tunnelen.

I utgangspunktet er Rogfast-tunnelen planlagt med en standard i henhold til HB021, og med en del tiltak ut over dette. Det er imidlertid forhold som kan medfører behov for tiltak (utover den definerte basistunnel):

1. Tunnellengde (ca. 27 km + sidearm)
2. Tunnel med stigning opp til vel 5 % i hovedløp og 7 % i sidearm.
3. Tunneldybde (maks 390 m.u.h.)
4. Lengdeprofil (W-profil), kan muligens vanskeliggjøre røykkontroll i forb. med brann.
5. Utforming med kryssløsning
6. Behov for å håndtere avvikssituasjoner (toveis trafikk i ett løp)
7. Responstider ved ulykker opp til 30-45 min fram til tunnelåpning.

Ut fra disse forhold og basert på den grove risikoanalysen presentert i foregående kapittel har en identifisert en del viktige problemstillinger og aktuelle tiltak for å oppnå en sikker tunnel. I **Tabell 14** gis en oversikt over de sentrale tiltak/problemstillinger som vil vurderes i etterfølgende kapitler:

1. Tunnelutforming, (inkl. kryssløsning)
2. Tunnelventilasjon, (spesielt styring av ventilasjon ifm brann)
3. Mekanisk og elektrisk (M&E) utstyr
4. Trafikksikkerhet (normalsituasjonen)
5. Håndtering av avvikssituasjoner, (to-løpstrafikk i ett løp)
6. Beredskap og styring.

Tabell 14 Tiltak/valg som vil vurderes i denne rapporten

Tiltak/valg	Påvirker	Begrunnelse, (regelverk), kommentar
1. Tunnelutforming:		
Arm til Kvitsøy: 1. Ett løp T10,5 2. To løp, (2xT9,5). 3. To løp begge med tovegstrafikk, evt. fire løp.	Sikkerhet (ulykkesfrekvens, evakuering)	1. Ved ett løp, to tiltak: a) "romlestripe" og b) rømningsvei. (Vedtatt øket til T9,5) 2. To løp er påkrevet hvis tunnelen defineres som kategori F tunnel. Kan fravikes ved verifikasjon av risiko. (Hvis dette tiltak iverksettes antas at ett ventilasjonstårn kan utgå av prosjektet.) 3. Forhindre mulighet for røykspredning mellom hovedløp via kryss.
Krabbefelt oppover når helning ≥ 5 % og kjørelengde ≥ 5 km	Kapasitet og sikkerhet (trafikkulykkesfrekvens forbikjøring, evakuering)	Gjelder stigning til både Arsvågen og Harestad. Gir større kapasitet og risikoreduksjon både i normalsituasjon og ved avvikssituasjon når sydgående løp er stengt for trafikk. (I første versjon av rapport gjaldt tiltaket stigning ≥ 7 %)
Krabbefelt også nedover når helning ≥ 5 % og kjørelengde ≥ 5 km	Sikkerhet (trafikkulykkesfrekvens forbikjøring, evakuering)	I normalsituasjon benyttes ikke krabbefeltet. Det kan imidlertid gi en liten risikoreduksjon i normalsituasjonen, idet krabbefeltet kan virke som nødfelt. I avvikssituasjonen, hvor det nordgående løp er stengt for trafikk gir krabbefeltet større kapasitet og risikoreduksjon. Tunnelsikkerhetsforskriften tillater ikke å redusere antall felt i helning, noe som medfører at en i så fall må ha tre felt i hele tunnelen.
Skulder, øke bredde til 2, 0 m	Sikkerhet (evakuering, e.g. for handicappede); plass for installasjoner	Ekstratiltak ifm lang tunnel med stor stigning (EU direktiv). (vedtatt øket på høyre side i hovedløp)
Øke frihøyden til 5,0 m		Vil gi noe større tverrsnitt, dvs. større uttynning av røyk i forbindelse med brann.
Gangbare tverrforbindelser, øke frekvens til 1 per 125m	Sikkerhet (evakuering, reaksjonstid ved brann)	Ekstratiltak ifm lang tunnel med stor stigning; (nå vedtatt innført)
Kjørbare tverrforbindelser (for avvikssituasjoner)	Risikoreduksjon i avvikssituasjoner	Jfr. Figur 19. - Bør ha overtrykk i tverrforbindelse, (røykspredning)
Kryssløsning	Sikkerhet, brannventilasjon	Både rundkjøring og trompet-kryss (to-plans evt. tre plans) har fordeler og ulemper
Bergrom, plassering	Ulykkesfrekvens, bryte monotoni	Ekstratiltak for lang tunnel (HB021 kap 3.11.3) estetikk, opplevd trygghet og trafikksikkerhet. Ses i sammenheng med belysningstiltak for visuell føring (referanser for helning/-stigning, sikker avstand og økt attraktivitet, (reduksjon av ubehag/angst)). (Nå vedtatt innført)

Tiltak/valg	Påvirker	Begrunnelse, (regelverk), kommentar
1. Tunnelventilasjon:		
Partikkelrensing	for ventilasjon, sikt og opplevd risiko.	
2. Mekanisk og elektrisk (M&E) utstyr:		
Automatiske slokkeanlegg (deluge/sprinkler/vanntåke)	Redusere sannsynlighet for at branner utvikler seg til storbranner (lange respons/-innsatstider for flere branner)	Negativt: kostnader, behov for funksjonstesting/vedlikehold. Kan påvirke sikt?
3. *Trafikksikkerhet:*		
Tiltak for sikker avstand • LED lys • Variable skilt (VMS) • Dynamiske informasjonstavler	Sikker avstand, (ulykkesfrekvens)	Ekstratiltak for lang tunnel (HB021 kap. 3.11.3) estetikk, opplevd trygghet og trafikksikkerhet. Variable skilt kan også brukes til å gi generell trafikantinformasjon som kan være viktig både ved ordinær og ekstraordinær trafikksituasjon.
Hastighetsbegrensninger: • Streknings ATK • Ved avvikssit., VMS • Tunge kjøretøy	Ulykkesfrekvens	Betydning også for frekvens av branner
Forbikjøringsbegrensninger for tungtransport (års/døgnvariasjon)	Ulykkesfrekvens	Betydning også for frekvens av branner
4. Håndtering av avvikssituasjonen:		
Fartsreduksjon	Ulykkesfrekvens	
Trafikkbegrensning	Ulykkesfrekvens	
Utnytte kjørbare tverrslag		
5. *Beredskap og styring:*		
Oppstillingsplass: Beredskapskjøretøy (helikopter) ifm ulykker; Evt. farlig gods regulering	Sikkerhet (ulykkesfrekvens med FG involvert; framkommelighet beredskap).	Også relevant i forbindelse med to-vegs trafikk i ett løp.
Ny brann (rednings) tjeneste nær tunnelutgang (for eksempel ved Randaberg)	Redusert responstid	Vurderes i samarbeid med B&R tjeneste
Egen vegtrafikksentral for denne og andre tunneler i området		Vurderes i samarbeid med B&R tjeneste
Fergeberedskap		Mulig stenging av tunnel i lengre perioder

I tillegg refereres til generelle tiltak, bl.a. for å redusere sannsynlighet og konsekvens for ulike brann-scenarier:

- Tiltak for å unngå kø:
    - Innfartskontroll ved for høy trafikk.
    - Hurtig deteksjon av kollisjoner (og sted) og regulering av trafikken mot ulykkesstedet, slik at sekundære kollisjoner mot biler i køen unngås, f.eks. ved redusert hastighet og advarsel på VMS-skilt.

- Tiltak for å sikre rask evakuering, slik at personer nedstrøms kan nå i sikkerhet før de blir utsatt for skadelig påvirkning fra røyken:
    - Rask oppdagelse av brannen. Effektive branndetektorer.
    - Effektiv kommunikasjon til bilister om at de skal gå til det andre tunnelrøret: Høyttalere, VMS-skilt, radiokommunikasjon etc.
    - Redusere avstander mellom tverrforbindelser.
    - Stor (tilstrekkelig) bredde av dører til tverrtunneler, slik at kø her unngås.
    - Tiltak for å hindre at personer, som flykter til annet tunnelløp blir overkjørt. F.eks. lukke venstre felt for trafikk og/eller redusere hastighet og sette advarsel på VMS-skilte om at det kan være personer på veien.

- Tiltak for å redusere omfang av brannen/røyken
    - Fortynning via ventilasjon (høy hastighet gir bedre fortynning, men flytter røyken hurtigere fram, så flere kan bli utsatt for røyk, kanskje også mer næring til brannen, og risikere å ødelegge den termiske sjiktning av røyken).
    - Sprinkler / vanntåkeanlegg.

6 Kvalitative vurderinger

I dette kapitlet presenteres ulike vurderinger av hovedproblemstillinger og av forslag til tiltak:

- Tunnelutforming,
- Tunnelventilasjon
- M & E utstyr
- Trafikksikkerhet
- Håndtering av avvikssituasjoner
- Beredskap og styring

Vurderingene er i hovedsak kvalitative. Merk at en del kvalitative vurderinger også foretas i forbindelse med gjennomgang av brannscenariene (Kapittel 8).

6.1 Tunnelutforming

Tiltak med hensyn til tunnelutforming som går ut over basis-tunnelen diskuteres under.

6.1.1 Tunnelutforming Kvitsøy

En sentral beslutning som må tas er tunneltverrsnitt og antall løp i armen til Kvitsøy. Nå er ett løp, T9,5, ellers utstyrt som klasse B, spesifisert for denne armen. Ulike alternativ vurderes:

1. Samme utforming med rømningstunnel vurdert. Rømningsvei (rømningstunnel eller nødgalleri) vil øke sikkerheten vesentlig.
2. To løp, T9,5 (med envegstrafikk). Gevinst for sikkerhet (trafikkullykker, evakuering brann). Høyere kostnad, men ventilasjonstårn på Kvitsøy antas å utgå.
3. To løp, T9,5 (med toveis trafikk), knyttet til hvert sitt hovedløp. Gevinst for sikkerhet, evakuering brann. Forhindrer mulighet for spredning av røyk fra ett hovedløp til det andre. Noe negativt: Fletting etter utkjøring ved Kvitsøy; tungvint for trafikanter fra til Kvitsøy, hvis ett hovedløp stengt. Høyere kostnad, men ventilasjonstårn på Kvitsøy antas å utgå.
4. Mulig alternativ med fire løp. Som Alternativ 3 forhindrer det mulighet for lekkasje av røyk mellom de to hovedløp.

Generelle vurderinger:

- Både for ett løp og den ordinære to-løps løsningen kan en reise den prinsipielle innvending at de muliggjør lekkasje av røyk fra et løp i hovedtunnelen til det andre løpet, når det er brann i/nær krysset. Dette er betenkelig da det ”andre” løpet skal fungere som rømningsveg. Men selv om to løp (med envegstrafikk i hvert av løpene), representerer en signifikant risikoreduksjon for trafikantene i Kvitsøy-armen, vil dette tiltaket – pga den lave trafikken der – bety lite for den totale risiko i tunnelsystemet.
- Hvis en vil utelukke muligheten for lekkasje av brannrøyk mellom de to hovedløp i krysset, står en igjen med to løsninger. En kan ha to løp, som er koplet til hvert sitt hovedløp, (slik at begge løp til Kvitsøy har toveis trafikk). Evt. kan en ha fire løp til Kvitsøy, noen som vurderes som lite aktuelt. Begge disse to løsningene er litt problematiske mht fletting av trafikken ut/inn av tunnelen på Kvitsøy, og er kostnadskrevende.

- Totalt er vurderingen – at ved å benytte styring av røyk via ventilasjonssystemet og bruk av brannporter i krysset (dvs to barrierer) – bør kunne håndtere problemet med mulig røyklekkasje. Dermed fremstår tiltaket med ett løp å gi tilstrekkelig sikkerhet, når det bygge inn noe mer sikkerhet med T10,5, (bl.a. med henvisning til stor stigning). Ytterligere verifikasjon av at ventilasjon og brannporter klarer denne oppgaven med å forhindre røyklekkasje bør iverksettes. Det er også en forutsetning for valg av ett løp at trafikken til Kvitsøy ikke øker dramatisk, (for eksempel som følge av at det blir turistmål).

Ved bruk av brannporter må en sikre at en har redundant system for stengning av portene, inklusive muligheten for mekanisk stengning. En må hindre at en feil (fellesfeil) medfører svikt i både ventilasjonsanlegg og stengning av brannporter (som svikt i strømtilførsel). I porten bør det være en dør som trafikanter kan benytte for å unngå å bli innestengt på feil side av porten.

En grundig diskusjon av håndtering av brannventilasjon ved ulike scenarier gis under.

6.1.2 Krabbefelt i hovedtunnel

Krabbefelt i stigning som er lik eller overstiger 5 %; også nedover; (samkjør med flettestrekning ved utgang av tunnel). Ikke vurdert for arm til Kvitsøy!

Krabbefelt er altså ikke krav ifølge HB 021, men følgende argument for krabbefelt anføres:

- EU-direktiv sier at stigning ikke skal overstige 5 % "unless not geographically possible"; (og tiltak ved stigning over 3 %).
- Redusert trafikkulykkesfrekvens og økt fremkommeligheten ved redning og evakuering. Har betydning spesielt ifm motorstopp i stigning, og ved avvikling av toveis trafikk i ett løp (hvis krabbefelt både oppover og nedover). Merk også at større tverrsnitt gir seinere røykfylling.
- Risiko knyttet til lange stigninger/fall med 5 % (jfr. [48]).

6.1.3 Skulderbredde

Skulder på høyre side økes til 2,0 m (i stedet for 1,0 m). Bredden på skulderen må vurderes ut fra plassbehov for installasjoner, generell sikkerhet og handicapvennlighet ved evakuering jfr. EU Direktivet. 1 m er for lite for å få plass til installasjoner.

Argumenter for å øke skulderbredden i hovedtunnel fra 1,00 m til 2,00 m i høyre side. Venstre side beholdes med min. 1,00 m. Hovedtunnel er klasse F med 2 løp (T 9,5) som utgangspunkt, jfr. tverrsnitt i Håndbok 021 (2010). Skulder er i henhold til Håndbok 021 fastsatt til 1,00 m og kjørefelt 3,50 m. Det forslås anvendt betongkantstein (rullekantstein) i henhold til avsnitt 4.5.6 i Håndbok 021, alternativt skulder i samme nivå som kjørefelter og asfaltert.

Skulderbredden påvirker både sikkerheten og kapasiteten av tunnelen.

Internasjonale anbefalinger [13] angir en minimum sikkerhetsavstand til kjørende trafikk på 1,00 m fra faste gjenstander som autovern eller bruk av SOS stasjoner, som plasseres/innebygges i tunnelens vegger. Likeledes anbefales en samlet minste avstand mellom tunnelvegg og kjørefelt på 1,80 m uten reduksjon av kapasiteten og til bruk som sikker fluktveg.

Kapasiteten i tunnelen er blant annet avhengig av bredden av kjørefeltet samt avstanden til faste gjenstander. I henhold til PIARC [13] og Highway Capacity Manual [14] er den optimale avstand til tunnelveggen > 1,80 m, idet 0,60 m reduserer kapasiteten med 5 % og avstanden 0,00 m (uten skulder) reduserer den samlede avstand opp til 25 %.

Ved å øke skulderbredden fra 1,00 m til 2,00 m på høyre side av tunnel oppnås, etter vår vurdering, følgende fordeler:

- Forbedret sikkerhetsmessige forhold ved åpning og bruk av nødstasjoner ved kjørende trafikk
- Forbedret forhold under brann (øket tverrsnitt gunstig i forhold til røykutvikling)
- Forbedret handicapvennlighet i forbindelse med evakuering
- Forbedret plass til drifts – og vedlikeholdsarbeider generelt
- Forbedret forhold ved havari eller annen form for midlertidig stopp utenfor havarinisjer, (personbil kan parkere kortvarig langs tunnelvegg)
- Psykologisk effekt ved forbedret komfort for bilister, (opplevelsen av trygghet blir større jo større avstand det er til faste gjenstander)
- Ingen reduksjon av kapasiteten (bredde > 1,80 m)
- Kan evt. benyttes til forbedret plass til plassering og innbygging av tunnelinstallasjoner.

Denne løsningen oppfyller slik minimumsanbefalingene fra PIARC og følger den generelle internasjonale tendens med brede skuldre i nye moderne vegtunneler.

6.1.4 Frihøyde

Frihøyde på tunnel økes til 5,00 m isteden for 4,80 m. Dette anses fremtidsrettet. Gir mulighet for fremtidige installasjoner, og større kjøretøy i fremtid. Internasjonal utvikling går i retning av større kjøretøyhøyde.

6.1.5 Gangbare tverrforbindelser

Gangbare tverrforbindelser mellom tunnelløp (nødutgang). Minimumsavstand ifølge HB021 er 250 m. Vårt forslag: 125 m (evt. variasjoner; avhengig av stigningsgraden).

Argument: med ganghastighet 0,2 m/s i røyk og 100 MW brann går en 35-120 m før udyktiggjøring (skjer etter 3-10 min). Scenario med mange eksponerte illustrerer dette (jfr. kap. 8.3).

6.1.6 Kjørbare tverrforbindelser

Kjørbare tverrforbindelser til bruk for avvikssituasjoner [1)] trafikk-ulykker (bl.a. brann/redningstjeneste) og [2)] vedlikehold/vegarbeid, (dvs. toveis trafikk i ett løp for deler av tunnelen). Forslaget: Dimensjon på 2xT5,5 (med ett kjørefelt). Foreløpig forslag plassering ved ulike antall kjørbare tverrforbindelser:

Tabell 15 Plassering av kjørbare tverrforbindelser

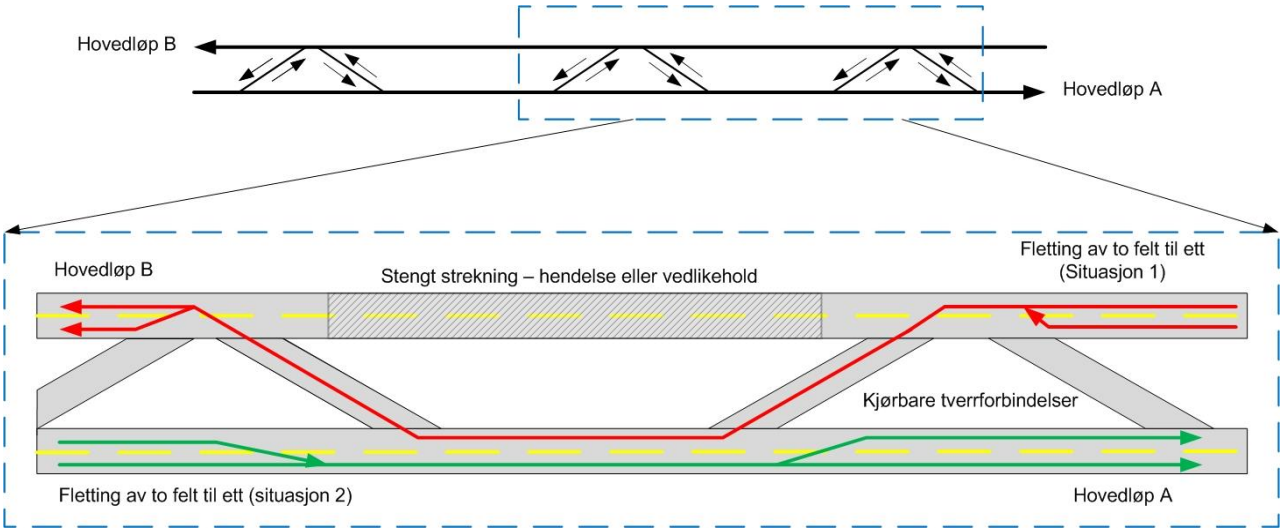
6 tverr-forbindelser	5 tverr-forbindelser	4 tverr-forbindelser	3 tverr-forbindelser (ved sjakt)	2 tverr-forbindelser
4,500	6,000	6.000	4.100	
8,500	11.000	11.000		10.000
12.000	16.000	16.000	14.700	
16.000	20.000	22.000		20.000
20.000	23.000		23.250	
23.000				

Forslag med 3 tverrslag som er plassert ved sjakter har den fordel at tverrforbindelser enten kan trykksettes eller røyk kan suges ut slik at røykspredning til sikre tunnelløp unngås.

Forslag med 2, 4, 5 eller 6 tverrslag kan, jfr Figur 33 anvendes slik at ett tverrslag beliggende mellom sjakter (st 4.100-14.700) kan anvendes sammen med ett tverrslag beliggende mellom Kvitsøy og Kråka sjakter (st 14.700-23.500).

Kjørbare tverrforbindelser kan benyttes både ved planlagt vedlikehold og ved hendelser. Prinsippet er vist på Figur 19. Kjørbare tverrforbindelser vil forenkle trafikkavviklingen ved planlagte avvik og redusere risikoen ved tilfeldige avvik/ulykker ved å korte ned strekningen det er nødvendig å benytte til 2-veis trafikk i ett løp. Fletting av trafikk skal primært ikke skje i tunnelen, men det vurderes at dette ved implementering av spesielle tiltak som varsling, hastighetsreduksjon, LED-lys mv kan tillates i spesielle situasjoner hvor det ikke er tid til eller hensiktsmessig å flette trafikken utenfor tunnelen.

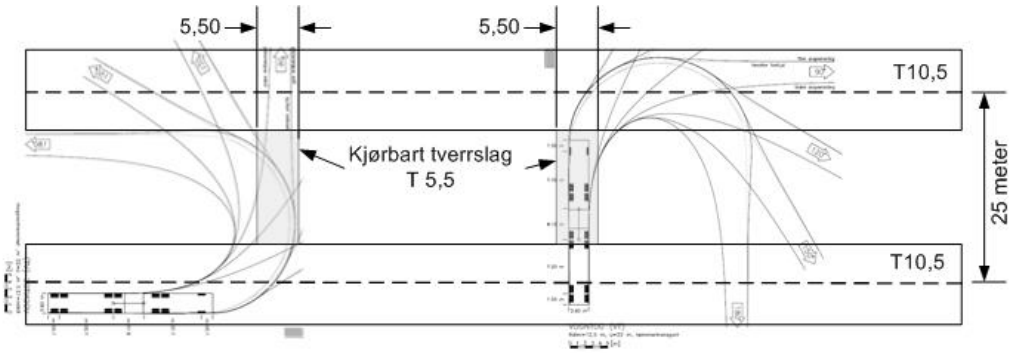
Mellom de to hovedløpene bygges det parvis tverrforbindelser som er kjørbare. Disse tverrforbindelsene må kunne trafikkeres i begge retninger (en retning i gangen) for å oppnå nødvendig fleksibilitet mht. trafikkreguleringen. Tverrprofilen og vinkelen mellom hovedløp og tverrforbindelser må være slik at det tillater vogntog/semitrailere å benytte tverrforbindelsene i begge retninger, dvs. fungere som et vanlig reversibelt felt. Denne trafikkreguleringen kan brukes når det er liten trafikk i tunnelen. Ordningen vil kreve en del utstyr i tunnelen så som fjernstyrt fullautomatiske bommer, brannporter, dynamiske informasjonstavler og kjørefeltsignal aktivert fra styringssystemet for å få til fletting av to felt til ett før trafikken føres over i det andre løpet (situasjon 1 på figuren) og fletting av to felt til ett felt før strekningen hvor det er toveis trafikk (situasjon 2 på figuren). Det må også av sikkerhetsmessige årsaker kunne vurderes å sette ned fartsgrensen på strekningen med to-vegs trafikk for eksempel til 60 km/t, for å redusere konsekvenser ved påkjørsel bakfra; (dette må veies mot faren for øket frekvens av slike ulykker).



Figur 19 Prinsipp for trafikkdirigering gjennom kjørbare tverrforbindelser

De kjørbare tverrforbindelsene kan også anlegges vinkelrett på tunnelløpene. Figuren nedenfor viser kjøretøysporene for et vogntog i forhold til et profil på T 5,5 på de kjørbare tverrslagene. For å få et vogntog gjennom tverrslaget, må profilet på tverrslagene økes vesentlig og det må kontrolleres med dynamiske kjøretøyspor at hjørneavrundinger utformes på en slik måte at vogntoget kommer gjennom. En vesentlig ulempe med denne løsningen i forhold til de skrå tverrslagene er at den krever en meget lav hastighet på trafikkstrømmene.

Den skråstilte plasseringen av kjørbare tverrforbindelser vil kunne brukes av lette kjøretøyer til å snu, men tunge kjøretøyer vil ha problemer og for vogntog og semitrailere vil det trolig ikke være mulig. Dette må også endelig kontrolleres gjennom konstruksjon av geometri og dynamiske kjøretøyspor.



Figur 20 Vogntog gjennom tverrslag.

6.1.7 Kryssløsningen

Trafikanter som kommer nedover vegarmen fra Kvitsøy vil etter å ha kjørt over ca 4 km på en strekning med godt fall og monotone omgivelser kunne oppleve å komme opp i høye hastigheter uten at de selv er klar

over det. I åpent terreng kan en bilfører relatere sin egen hastighet til vegens omgivelser, men en del av de samme mulighetene til å relatere hastigheten til omgivelsene forsvinner i en monoton tunnel. Det er derfor meget viktig å gjennomføre tiltak som både hjelper bilføreren til å "oppdage" sin egen hastighet og å varsle om at kurvaturen inn mot krysset har en horisontalgeometri som ikke tåler den samme hastigheten som trafikanten har hatt ned fra Kvitsøy. I begge de alternativene som foreligger for kryssløsning vil bilføreren måtte redusere hastigheten vesentlig for å kunne holde horisontalkurvaturen uten å kjøre i bergveggen. Følgende hastighetsvarslende og kurveinformasjons tiltak kan være aktuelle å vurdere og gjennomføre dersom hastighet i kurvene inn mot krysset med E39 viser seg å være et problem:

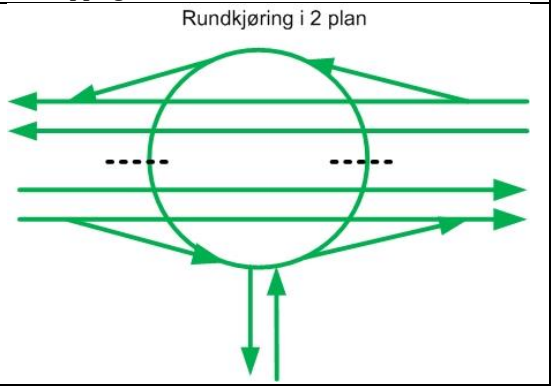
- Varsling til bilføreren om kjøretøyets hastighet ved hjelp av radar og VMS
- Visning av anbefalt hastighet gjennom kurven inn mot E39
- Rumlefelt/rumlestriper
- Hindermarkeringer – statisk ved hjelp av faste skilt eller dynamisk ved hjelp av LED lys eller tilsvarende
- Spesiell belysning – endring i luminansnivå

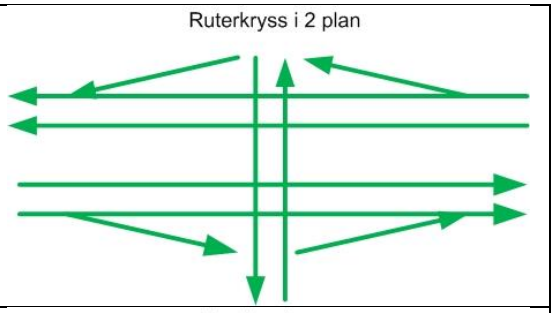
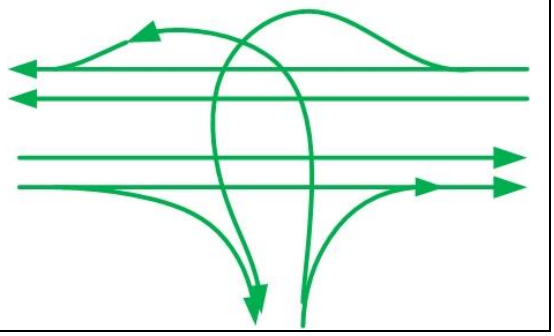
På og avkjøringsrampene bør også bli gjenstand for spesiell oppmerksomhet mht. trafikksikkerhet. Påkjøringsrampen må dimensjoneres for å kunne avvikle største time 20 år etter åpning slik at den ikke blir for kort både mht. vekslingsstrekning og oppnåelse av den hastigheten som gjennomgående trafikk på E39 har gjennom krysset.

Tilsvarende må avkjøringsrampen være lang nok til at kjøretøyene som skal svinge av til Kvitsøy rekker å svinge av og bremse ned til avkjøringsrampens kurvatur etter avsvinging fra E39. Figur 27 viser et eksempel på hvordan bergrommet har fått en spesiell utforming og belysning for å informere/varsle avsvingende trafikanter om avkjøringsrampen.

Tre prinsipper for kryssløsning

Krysset mellom E 39 og vegarm til Kvitsøy kan utformes etter 3 ulike prinsipper (jfr. Figur 21).

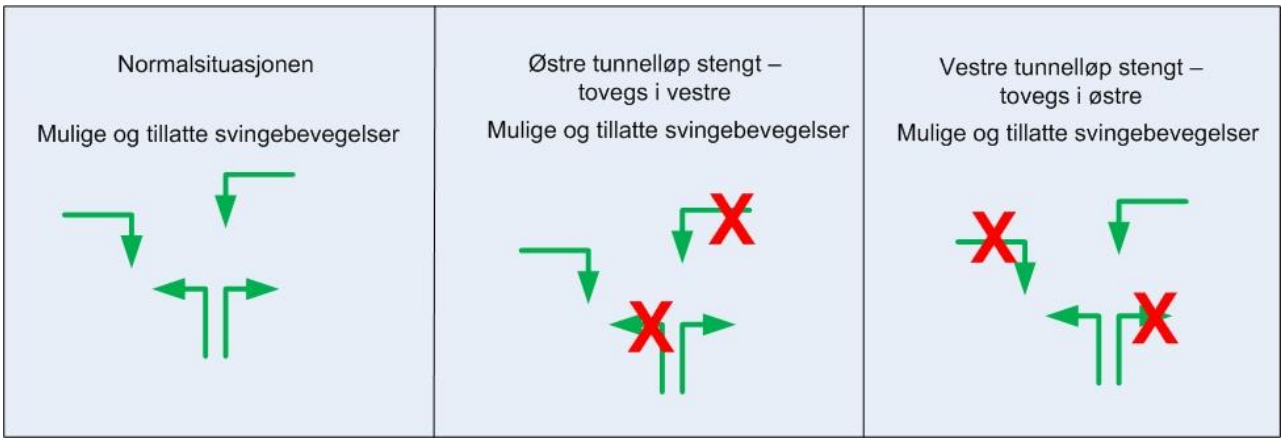
Type kryss	Prinsippfigur
<u>2 plans kryss (rundkjøring)</u> All trafikk som kommer av E 39 eller som skal på E 39 kjører gjennom en rundkjøring som ligger over E 39. Ved normal drift er kryssløsningen meget fleksibel mht. alle svingebevegelser og alle snumuligheter for trafikk fra Kvitsøy og trafikk på E 39 i begge retninger.	

<u>2 plans kryss (ruterkryss)</u> Kryssløsningen har de samme kvalitetene som rundkjøringen mht. fleksibilitet med unntak av snumuligheter for trafikk fra Kvitsøy, men vil muligens ha litt høyere risiko enn rundkjøringen mht. trafikkuhell (lav alvorlighetsgrad pga. lave hastigheter)	
<u>3-plans kryss</u> Kryssløsningen vil ikke ha de samme snumulighetene som de to andre løsningene. Løsningen vil ha minst konfliktpunkter av de tre løsningene og således den beste mht. trafikksikkerhet.	

Figur 21 Tre prinsipper for kryssløsning E39 og vegarm til Kvitsøy

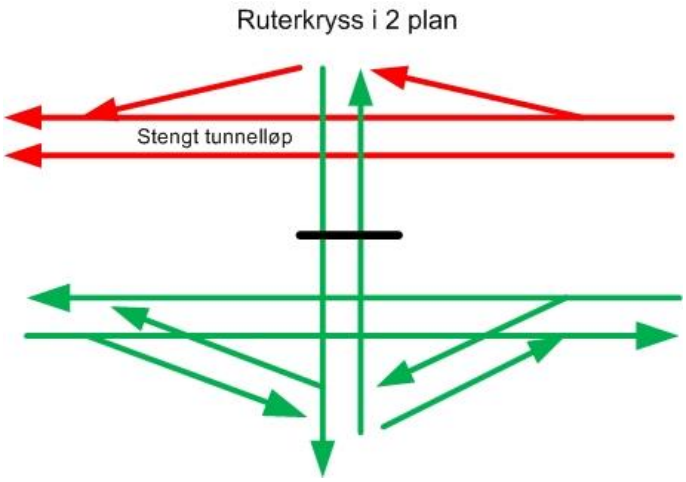
Trafikkavvikling i kryss når ett løp stenges

Dersom ett løp stenges og det reguleres toveis trafikk i det andre løpet vil dette bety restriksjoner på svingemuligheter i krysset E39 og arm til Kvitsøy, se **Figur 22**.



Figur 22: Mulige og tillatte svingebevegelser

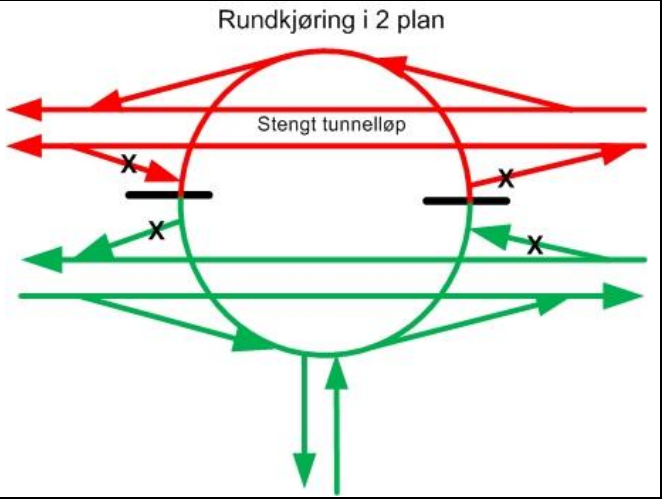
Dersom alle ramper gjøres bred nok til toveis trafikk er det fysisk mulig med alle svingebevegelser dersom ett av tunnelløpene stenges. Vi vil imidlertid fraråde en slik løsning fordi det vil skapes meget farlige situasjoner med kryssing av motgående trafikkstrømmer og fletting under vanskelig siktforhold og store hastighetsforskjeller på trafikkstrømmer, jfr. **Figur 23**.

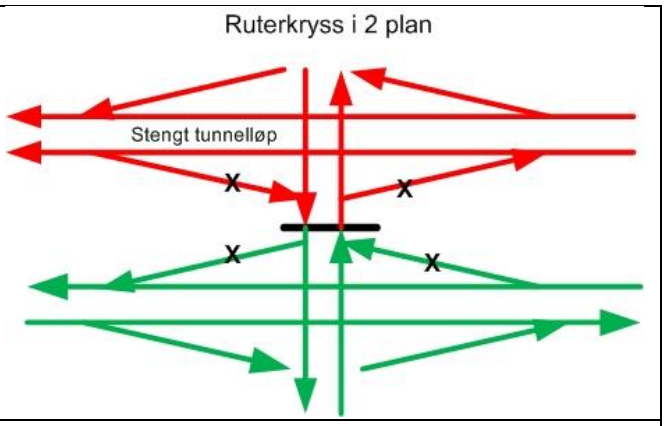
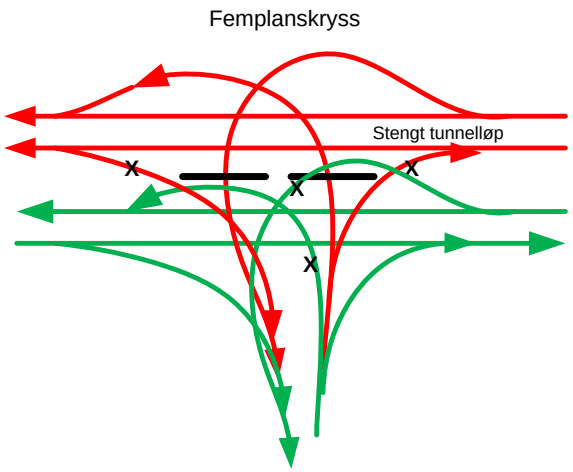


Figur 23 Tovegs trafikk på ramper som normalt er envegskjørt

En annen løsning er at krysset bygges slik at krysset kan fungere tilfredsstillende selv om ett av løpene er stengt. Det vil medføre flere ramper og trolig større avstand mellom tunnelløpene for å få til en tilfredsstillende geometrisk utforming av kryssene. De rampene som ikke brukes i en normal situasjon må være sperret (helst fysisk) for å unngå at trafikanter kjører feil og kommer inn i feil tunnelløp, dvs. kjøring mot to felt i motsatt retning.

Figur 24 nedenfor viser prinsippløsningene for kryssene dersom de alltid skal fungere. Ramper som bør stenges fysisk ved normal drift er merket med et kryss. Ruterkrysset ser ut til å være den løsningen som har minst konflikter og overraskelsesmomenter for vante trafikanter dersom ett løp stenges.

Type kryss	**Prinsippfigur**
<u>Rundkjøring i 2 plan</u> I en situasjon hvor ett løp er stengt må halve rundkjøringen kunne avvikle tovegstrafikk. Prinsippet gjelder også om det er det andre løpet som er stengt. Alternativt kan rundkjøringen benyttes som i normalsituasjon dersom de fire rampene fra det stengte tunnelløpet stenges med brannporter.	

Ruter-kryss i 2 plan Prinsippet er det samme om det er det andre løpet som er stengt.	
Fem-plan kryss For å tillatte alle svingebevegelser dersom ett løp skal stenges må det bygges et kryss i 5 plan dersom alle ramper skal kunne gå konfliktfritt. Dette vil trolig kreve ganske stor avstand mellom tunnelløpene.	

Figur 24 Prinsippløsningene for kryssene dersom de alltid skal fungere. Ramper som bør stenges ved normal drift er merket med et kryss.

6.1.8 Bergrom / estetisk utforming / belysning og bryting av monotoni

Kjøring i lange tunneler kan føre til økt trøtthet, uoppmerksomhet og angst. Ulykker i midtsonen av tunnel på grunn av søvnighet og uoppmerksomhet har ofte høy alvorlighetsgrad.

Soner med utvidet tverrsnitt og spesiell effektbelysning har dokumentert positiv effekt på trafikantenes årvåkenhet og reduksjon av monotoni og angst. Dette er basert på studier fra noen av verdens lengste vegtunneler (Lærdalstunnelen 24.5 km og Qinling 2x18.2 km) og erfaringer fra den europeiske St.Gotthard tunnelen med lengde 16.9 km [35],[39], [41], [42] og [43].

Variasjon i tunnelrommet for å bedre sikkerheten

Sjåfører er normalt mer oppmerksom i tunnel blant annet fordi en ikke blir distrahert av vakker utsikt eller aktiviteter langs vegen. Lange vegtunneler kan imidlertid by på utfordringer for mange bilførere. For noen førere kan det å kjøre igjennom en lang tunnel med et visuelt monotont miljø virke søvndyssende, ved at man ikke får den visuelle stimulansen man er vant til å få i dagsonene.

Under simulatorforsøk med tiltak for å bryte opp monotoni i forprosjekt til Lærdalstunnelen (24.5km) sovnet en av forsøkspersonene bak rattet i det mørkeste og mest monotone

tunnelalternativet med belysning i henhold til datidens standard. Flere andre begynte å vingle i vegbanen i siste halvdel av tunnelen på grunn av trøtthet [35], [36]. Rytmisk flikker i panser og frontrute fra overhengende belysningsarmaturer vil også kunne virke søvndyssende, hvis flikkerfrekvensen matcher hjertets hvilerytme (ca 70 slag i minuttet). Ved hypnose er rytmisk visuell stimulering et sentralt virkemiddel for å få personen inn i en transelignende tilstand.

Andre bilførere kan oppleve tunneler som skremmende. Disse vil ikke oppleve den samme utfordringen i forhold til å holde seg fokusert og konsentrert, men kan derimot få et høyt spenningsnivå i kroppen som gir utslag i stress og angst. Slik stress og angst kan føre til plutselig brå manøvrering, oppbremsing eller panikkartet rømning av tunnelen i høy hastighet. Den vanligste reaksjonen er imidlertid at førere med angst stivner til, griper hardere om rattet og får en ”frys” reaksjon der de senker hastigheten, [35],[36],[37].

Både atferden til søvnige førere og engstelige førere kan øke ulykkesrisikoen i tunnel ved at sannsynligheten for påkjøring bakfra, påkjøring av tunnelvegg øker med søvnige førere og sannsynlighet for påkjøring bakfra og feltskifteulykker ved brå manøvrering, nedbremsing eller ved store avvik i hastighetsnivå. Påkjøring bakfra ulykker gir som regel bare materiellskade, men i flere av de store katastrofebrannene i St. Gotthard og Tauern tunnelen har påkjøring bakfra vært en del av ulykkesbildet.

Omfattende forskning blant annet i regi av Statens vegvesen, SINTEF og i utlandet har identifisert at viktige problemer trafikantene opplever med tunneler som kan føre til farlig atferd:

- Mangel på dagslys
- Mangel på synlige rømningsmuligheter
- Mangel på frisk luft
- Mangel på landemerker
- Mangel på variasjon
- Mangel på hastighets/distanse referanser
- Mangel på referanser til bratthet/helning

For en nærmere drøfting av denne forskningen og omfanget av problemet, se [27].

Det er hovedsakelig tre virkemidler man kan benytte for å motvirke monotoni og tunnelangst:

- God synskomfort (belysning, interiør, kledning vegger/tak)
- Informasjon om totallengde og fremdriftsmarkering
- Variasjon i tunnelrommet

I henhold til [4], HB 021 kapitel 3 bør en i lange tunneler:

- Variere tverrsnittet gjennom tunnelen, for å bidra til å
- bryte den rommessige monotonien trafikantene blir utsatt
- for
- Bryte monotonien ved å skape variasjon ved hjelp av lys
- Belyse havarinisjer og snunisjer særskilt (punkt 10.3.3).
- Dele lengre tunneler inni flere sekvenser.
- Utforme tunnelen slik at reisen blir en sammenhengende og positiv opplevelse

- Utforme tunnelen slik at kontinuiteten i reiseopplevelsen opprettholdes
- Utforme tunnelen slik at det gir den vegfarende mulighet til å lokalisere seg i forhold til hoved fenomenene i det landskapet tunnelen går gjennom

Figur 25 Bergrom med kunstnerisk belysning for økt sikkerhet, trygghet og reduksjon av monotoni i Lærdalstunnelen (foto Dagfinn Moe)

Figur 26 Bergrom med kunstnerisk belysning hver 4 km for økt sikkerhet, trygghet, attraktivitet og reduksjon av monotoni i Qinling tunnelen (foto Gunnar D. Jenssen)

Figur 27. Planfritt kryss med bergrom og kunstnerisk belysning, Stockholmsringen

Variasjon i tunnelrommet og plassering av bergrom

Variasjon i tunnelrommet for kan skapes ved effektbelysning og utvidelse av tverrsnitt. Det er dette grepet som er benyttet i to av verdens lengste vegtunneler, Lærdalstunnelen [38] og Qinling Zhognan tunellen i Kina. I begge tilfeller deler tre bergrom med effektbelysning pr. tunnelløp tunnelen opp i fire sekvenser. Den positive effekten av disse tiltakene på trafikantenes opplevelse og atferd er dokumentert i simulatorforsøk [38],[39],[40], men er foreløpig ikke bekreftet ved ulykkesanalyse. Ulykkesfrekvens og oversikt over ulykkestyper for Lærdalstunnelen 1999-2012 indikerer at bergrom med effektbelysning har positiv effekt på sikker kjøreatferd.

Reduksjon i ulykkesfrekvens for den 16 km lange St.Gotthard tunnelen er påvist etter at ekstra lys i annenhver havarinisje ble montert. Ulykkesfrekvensen i midtsonen ble da straks redusert til et normalt nivå sammenlignet med midtsonen for kortere tunneler [27], [42].

Fordeler ved variasjon i tunnelrommet er å:

- øke trafikksikkerheten i tunnelene ved å forhindre at bilførerne sovner bak rattet
- motvirke tunnelangst
- gi sjåførene en følelse av trygghet
- øke bilistenes komfortfølelse og tunnelens attraktivitet
- bryte opp lengdefølelsen
- gi kjøreturen et preg av opplevelse
- inntrykk av luftighet og romslighet og bryte opp følelsen av tunnelens lengde
- ha en identitetsskapende effekt
- øke orienterbarhet i normalsituasjonen og ved hendelser

Viktige hensyn å ta ved plassering av bergrom er:

- effekt av plassering på monotoni
- effekt av plassering på trygghet/angst
- tunnelprofilen

- inndeling i relativt like lange seksjoner
- geologi
- avstand til parallell tunnel
- konflikt med andre installasjoner

Rogfastunnelen har en W profil der krysset til Kvitsøy utgjør et naturlig midtpunkt til tross for at det er noe forskjøvet i forhold til geografisk midtpunkt. Gjennom diskusjon i et brukerpanel av trafikanter med moderat til sterk angst for tunneler er det framkommet at det viktig at lengden mellom bergrom med effektbelysning ikke blir for lang. Slike avbrudd gir noe å se fram til og et betryggende pusterom i en lang tunnel slik at kjøreatferden normaliseres. 4 km avstand mellom bergrom gir ca 3 minutt mellom hvert tiltak og 6 km mellom bergrom gir ca 5 minutt mellom tiltak ved 80 km/t.

Basert på faglige vurderinger og erfaringer fra simulatorforsøk og praktisk implementering i Lærdalstunnelen (verdens lengste ettløpstunnel og Qinling tunnelen i Kina (verdens lengste toløpstunnel) anbefaler vi at monotonien brytes ca. hver 4 – 6 km. Plassering og utforming av tverrsnittene bør vurderes nærmere ut i fra hva som er bergteknisk mulig når mer detaljert informasjon om bergkvalitet på de aktuelle plasseringer foreligger. Foreløpig er det pekt ut følgende forslag:

- Bergrom ved profil 8.000
- Bergrom som en del av kryssløsningen med arm fra Kvitsøy, profil 14.500
- Bergrom sør for lavbrekk ved profil 18.000
- Bergrom i den lengste stigningen ved profil ca 22.500. Dette bergrommet vil også kunne ha en sikkerhetsfremmende effekt ved at det legges omtrent midtvegs i den lange bratte stigningen.

Selve utforming av bergrom og effektbelysning, må sees i sammenheng med
- tunnelprofil på de aktuelle plasseringene (vertikal og horisontalkurvatur)
- trafikkregulering
- hvilken hastighet trafikantene beveger seg igjennom rommet (tunnelen)

Det er viktig at tiltaket har en utstrekning som gjør at reisen igjennom blir lang nok til å oppfatte omgivelsene, uten at man føler behov for å senke farten eller at tiltaket distraherer. Nærmere analyse av bergrom, effektbelysning, utforming av disse og kvalitetssikring av tiltak i kjøresimulator foreligger som en opsjon til ROS analysen.

Anbefalt lengde er 200 m, bredde 25 m og høyde ca 12 m.

6.1.9 Portalområdet

Utforming av portalområdet kan ha betydning for vanninntrenging i tunnelen. Konsekvensene av oversvømmelse kan være omfattende. I forrige versjon av rapporten ble følgende tiltak foreslått vurdert for å redusere faren for oversvømmelser i tunnelen:

- Drenasjesystem for området rundt tunnelportalene for regnvann og kombinasjoner av regnvann og pumpesvikt med sannsynlighet en gang hvert 100 år (muligens en hvert 1000 år), avhengig av hvor mye som blir ødelagt dersom regnvann strømmer ned i tunnelen, forbi dreneringen ved portalene ikke håndterer oppgaven.

- Diker kan være et nødvendig tiltak for å beskytte mot oversvømmelse pga springflo og bølger.

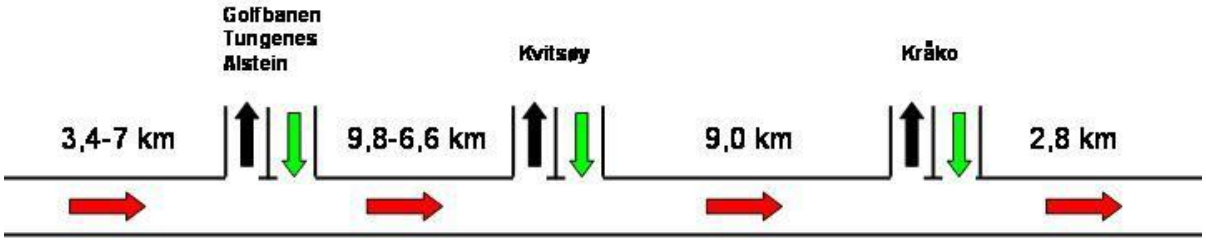
Imidlertid er det nå besluttet at portalen skal bygges med høybrekk.

Se ellers om portalbygningen i Avsnitt 6.6.2.

6.2 Tunnelventilasjon

6.2.1 Generelt om ventilasjon i Rogfast

Tunnelventilasjonen prosjekteres av SVV. Rogfast planlegges med langsgående ventilasjon. Ventilasjonsanlegget består av tre ventilasjonssjakter plassert mellom sørgående- og nordgående løp som vist i figuren under (etter siste opplysninger er disse i avstand 7,5, 14,5 og 19,5 km fra Harestad). I ventilasjonssjaktene trekkes frisk luft inn i tunnelen og røyk trekkes ut gjennom sjakten. I tunnelløpene (inkl. i tunnelen til Kvitsøy) er det i tillegg vifter under tunnelhvelvingen, plassert i grupper med jevne mellomrom.



Figur 28 Prinsippskisse for ventilasjon av nordgående løp (SVV, 2007), dvs avstander ikke oppdatert.**

Ventilasjon i normalsituasjonen styres i samme retning som trafikken i begge løp i hovedtunnelen. Ved brann skal det i prinsippet være røykfri sone nedstrøms et ventilasjonstårn, idet røyk trekkes ut gjennom sjakten.

I Kvitsøytunnelen vil normal ventilasjonsretning være mot Kvitsøy dersom denne utformes med ett løp, og samsvarer med kjøreretningen dersom det velges to løp.

Ved brann nær kryssløsningen styres ventilasjonen (retning, hastighet, bruk av overtrykk og mottrykk) etter hvor brannen inntreffer.

Det forutsettes at ventilasjonssystemet utføres med følgende redundans:

- Det installeres ekstra impulsvifter i tunnelen slik at funksjonen kan beholdes hvis alle vifter i en brannsone blir utslått.
- Det installeres reservekapasitet for avtrekks- og friskluftsvifter i alle ventilasjonsstasjoner.

Ventilasjon ved brannhendelser
Røykventilasjon vil være gunstig i de fleste branner fordi det vil kunne gjøre det mulig å kontrollere retningen på røykutviklingen fra en brann i en tunnel. I tillegg vil ventilasjonen tynne ut den giftige røykgassen og gjøre røyken mindre farlig.

Normalt er det rikelig med luft i tunnelen til å underholde forbrenning i enkelte kjøretøyer. Stor ventilasjonshastighet vil ofte virke nedkjølende, og for mindre branner kan det medføre at brannen blir redusert. Kraftig tunnelventilasjon vil kunne redusere sannsynligheten for overtenning av et kjøretøy fordi de vil ha en dempende effekt på brannen. Dette gjelder spesielt branner som brenner på utsiden av brenselet som for eksempel en væskedamsbrann (viser resultater fra prosjektet "Brann på sjø" [28]). Unntak er brann i last hvor for lite oksygen lokalt i lasten begrenser brannraten og hvor økt ventilasjonshastighet vil øke oksygentilførselen i lasten og dermed brannraten. Brann i last med trepaller er et slikt eksempel.

Økt lufthastighet vil gjøre røyken mindre farlig, noe som tilsier at det er viktig å sette på viftene tidlig. Viftene vil imidlertid ødelegge en eventuell termisk sjiktning av røyken ved at luftmassene blir omrørt når viftene settes på, med det resultat at en får røyk i hele tunneltverrsnittet nedstrøms. Hvorvidt det blir sjiktning av røykgasslaget, hvilken utbredelse den har og hvor lang tid sjiktningen vil kunne vare, er avhengig av en rekke forhold som det er svært vanskelig å kontrollere i virkelige branner. Noen branner gir klar røyksjiktning og andre gjør det ikke. Tunneloverflatene kjøler normalt røyken raskt ned, noe som medfører at sjiktningen reduseres, spesielt når en kommer et stykke bort fra brannen. Vi anslår at i de aller fleste branner i tunnel vil det ikke oppstå stabil sjiktning, slik at det ikke er mulig å evakuere under et røyksjikt over lengre avstand (i størrelsesorden 100 m i begge retninger dersom trekken er tilnærmet lik null).

Økt lufthastighet betyr også at røyken sprer seg hurtigere i kjøreretningen. Hvis det er langsom kø i tunnelen kan det bety at biler blir hurtigere innhentet av røyken. Hvis det er stillestående kø blir personene nedstrøms brannen hurtigere eksponert, slik at det blir vanskeligere å nå sikkerhet i det andre løp.

I tunneler med helning, er det viktig at ventilasjonsanlegget er dimensjonert for eventuelt å motvirke oppdriftskreftene (skorsteinseffekten) fra brannen. Dersom brannen er større enn dimensjonerende brann for ventilasjonsanlegget vil brannens oppdriftskrefter kunne overstyre planlagt trekkretning. Det er størst fare for dette ved brann i nedoverbakke med ventilasjonsretning som kjøreretning. En kan da risikere at trekkretningen i tunnelen snur i løpet av brannforløpet.

Tunnelens lengdeprofil (W-profil) kan muligens vanskeliggjøre røykkontroll. Normalt i jevnt stigende eller i V-lengdeprofil, vil det ved brann alltid være ventilasjon enten i form av termisk oppdrift og/eller ved ventilasjon. Dersom ventilasjonen overvinner den termiske oppdriften, vil ventilasjonen bestemme retningen, alternativt er det brannen som bestemmer retningen. For W- lengdeprofil kan høybrekket virke som en omvendt vannlås. Dersom de termiske oppdriftskreftene overvinner ventilasjonen, vil det bli tilnærmet ingen ventilasjon. Dersom brannen ligger i røyksonen kan den selvkveles og det vil oppstå en svært giftig røykplugg. Brannen kan også begynne å oscillere pga. vekslende tilgang på luft, tilhørende trykkvariasjoner. For lange tunneler med stor stigning, kan det det termiske trykket fra brannen bli flere hundre Pa. Et trykk som må overvinnes dersom man ventilerer mot oppdriftstrykket. Slike trykk kan gi utfordringer for å åpne og å lukke f.eks. slagdører.

Ved store branner vil trykket som forårsakes av brannen i en slik lang tunnel være ukjent. Dette kan føre til at røyken i lange perioder tar andre veier enn tenkt. Ved brann varmes røyken og iht ideell gass lov [Trykk(P)=Tetthet(ρ)*Gasskonstant(R)*Temperatur(T)] og tettheten endres omvendt proporsjonalt med temperaturen (Kelvin). Volumekspansjonen følger endringene i tettheten. I åpen atmosfære vil trykket igjennom brannsonen være tilnærmet konstant gitt av atmosfæretrykket. Det er kun hastighetskomponentene drevet av termisk oppdrift som gir små trykkforskjeller (typisk mindre enn 100 Pa) som er neglisjerbare i forhold til atmosfæretrykket. For brann i et helt lukket rom vil ikke gass kunne ekspandere og tettheten vil være konstant. Brannen kan vedvare så lenge det er oksygen. Trykket vil da øke proporsjonalt med temperaturen (Kelvin). En lang tunnel vil være en tilstand mellom åpen atmosfære og et delvis lukket rom. Dersom branngassene i tunnelen skal kunne ekspandere og utjevne trykket slik som i åpen atmosfære, må de

skyve luften i tunnelrøret ut mot atmosfæren. Trykket som bygges opp i og omkring brannen vil være avhengig av vekstraten på brannen og kraften den trenger for å skyve luft ut av tunnelen. For store branner, kan dette bli betydelige trykk og langt mer enn f.eks. 100 Pa. Dersom man ønsker å bestemme dette trykket med CFD beregninger, krever det beregninger med kompressibel luft. For lange tunneler vil dette bli svært krevende regnestykker og langt overgå vanlige ventilasjonsberegninger med inkompressibel strømning. I praksis blir ikke slike regnestykker utført. Trykket kan bestemmes ut fra enklere betraktinger av kompressibel termisk ekspansjon i rørstrømning.

Det bemerkes at langsgående ventilasjon kan innebære et problem hvis det er kø nedstrøms en brann, enten fordi det er for høy trafikk eller fordi det først skjer en kollisjon, som stanser trafikken, og det deretter oppstår en brann oppstrøms for denne kollisjonen, f.eks. fordi en lastbil kjører inn i biler som har stanset. Dette medfører, at et stort antal bilister blir udsat for røg. Ved toveis trafikk i et løp vil bilister i den ene retning bli utsatt for røyk ifm brann.

Under vurderes brannscenarier i kryss ift trafikk i Kvitsøy-arm. Merk at brannscenarier i kryss også vurderes i kapittel 6.

6.2.2 Alternativ med ett løp i Kvitsøy tunnelen

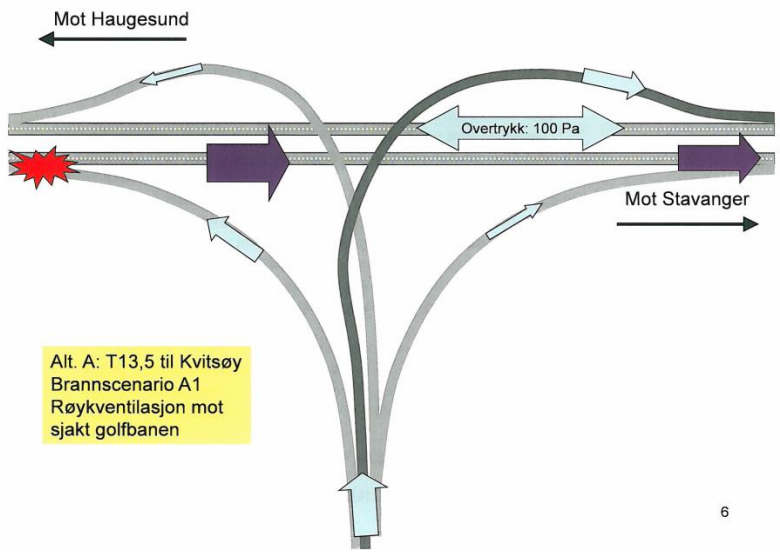
Beskrivelse av ventilasjonen dersom tunnelen til Kvitsøy har *ett løp* (toveis trafikk):

- Brann i hovedtunnel med enveis trafikk i to løp (jfr. Figur 29):

I løp med brann ventileres røyken i kjøreretningen med hastighet 3,5 m/s. Kjøretøy nedstrøms brannen kjører ut før de eksponeres av røyk, med mindre det er langsom eller stillestående kø. Røyken tas ut ved ventilasjonssjakt nedstrøms brannen, med mindre ventilasjonen svikter eller brannen er større enn dimensjonerende brann.

I det andre løpet etableres et overtrykk på minst 100 Pa som sikrer at røyk ikke trenger inn, selv om dører i nødutgangene åpnes av evakuerende personer og redningspersonell. Også tverrtunneler trykksettes.

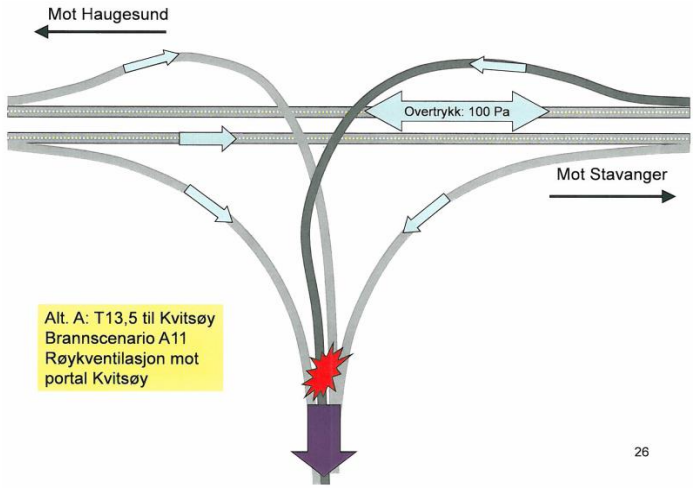
I tunnelen mot Kvitsøy styres ventilasjonsretningen mot krysset, slik at alle i Kvitsøytunnelen og rampene til og fra hovedtunnelen beskyttes mot røyk.



Figur 29 **Prinsippskisse av ventilasjonen ved brann i sørgående hovedløp mellom sjakt Kvitsøy nord og rampe av til Kvitsøy. Røykventilasjon mot golfbanen. (SVV, 2011-10-28).**

- Brann i tunnel mot Kvitsøy (jfr. Figur 30):

Ventilasjonsretning opp mot Kvitsøy. Slik beskyttes alle i hovedtunnelen og i rampene til og fra denne samt kjøretøy mellom brannstedet og rampene mot røykeksponering. Mellom brannstedet og Kvitsøy vil det være røyk. Kjøretøy på vei opp kan kjøre ut, med mindre det er langsom eller stillestående kø. Kjøretøy på vei mot hovedtunnel vil bli fanget av røyk. For folk nedstrøms brann i kjøreretning er det dermed ingen røykfri evakueringsveg.



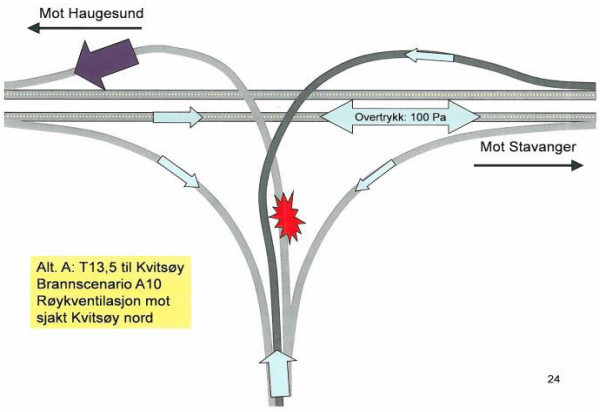
Figur 30 **Prinsippskisse av ventilasjonen ved brann i arm til Kvitsøy. Røykventilasjon mot portal Kvitsøy. (SVV, 2011-10-28).**

- Brann i ramper mellom hovedtunnel og tunnel til Kvitsøy

Ventilasjonen går i kjøreretningen i rampene.

Brann i rampe fra Kvitsøy (jfr. Figur 31):
Ventilasjon fra rampen mot hovedtunnelen, hvor ventilasjonen styres i kjøreretningen. Kjøretøy i hovedtunnelen oppstrøms flettingen skal stanses slik at de beskyttes mot røyk. Kjøretøy nedstrøms kjører ut, med mindre det er langsom eller stillestående kø.

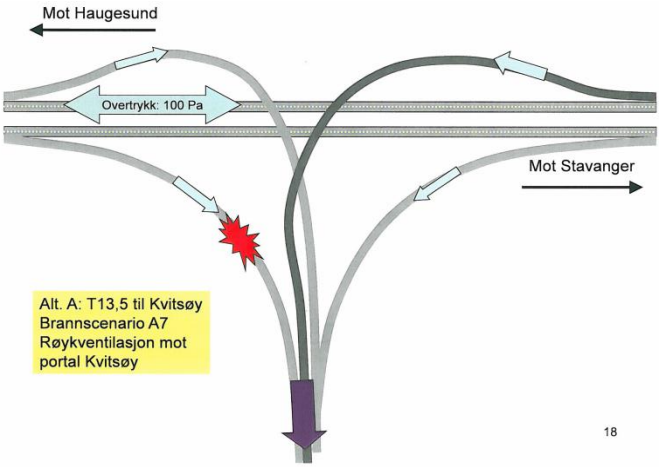
I det andre løpet i hovedtunnelen opprettes et overtrykk på minst 100 Pa, som sikrer mot røykinntrengning. I tunnel mot Kvitsøy og de andre rampene styres ventilasjonen slik at det ikke kommer røyk hit.



Figur 31 Prinsippskisse av ventilasjonen ved brann i rampe mot nord. Røykventilasjon mot sjakt Kvitsøy nord. (SVV, 2011-10-28).

Brann i rampe til Kvitsøy (jfr. Figur 32):
I tunnelen mot Kvitsøy styres ventilasjonen mot portalen. Røyk kommer derfor i hele tunnelen opp til portalen. Kjøretøy på vei opp kan kjøre ut, med mindre det er langsom eller stillestående kø. Kjøretøy på vei mot hovedtunnel vil bli fanget av røyk.

Ventilasjonen vil hindre at røyk kommer i hovedtunnelen og de andre rampene.

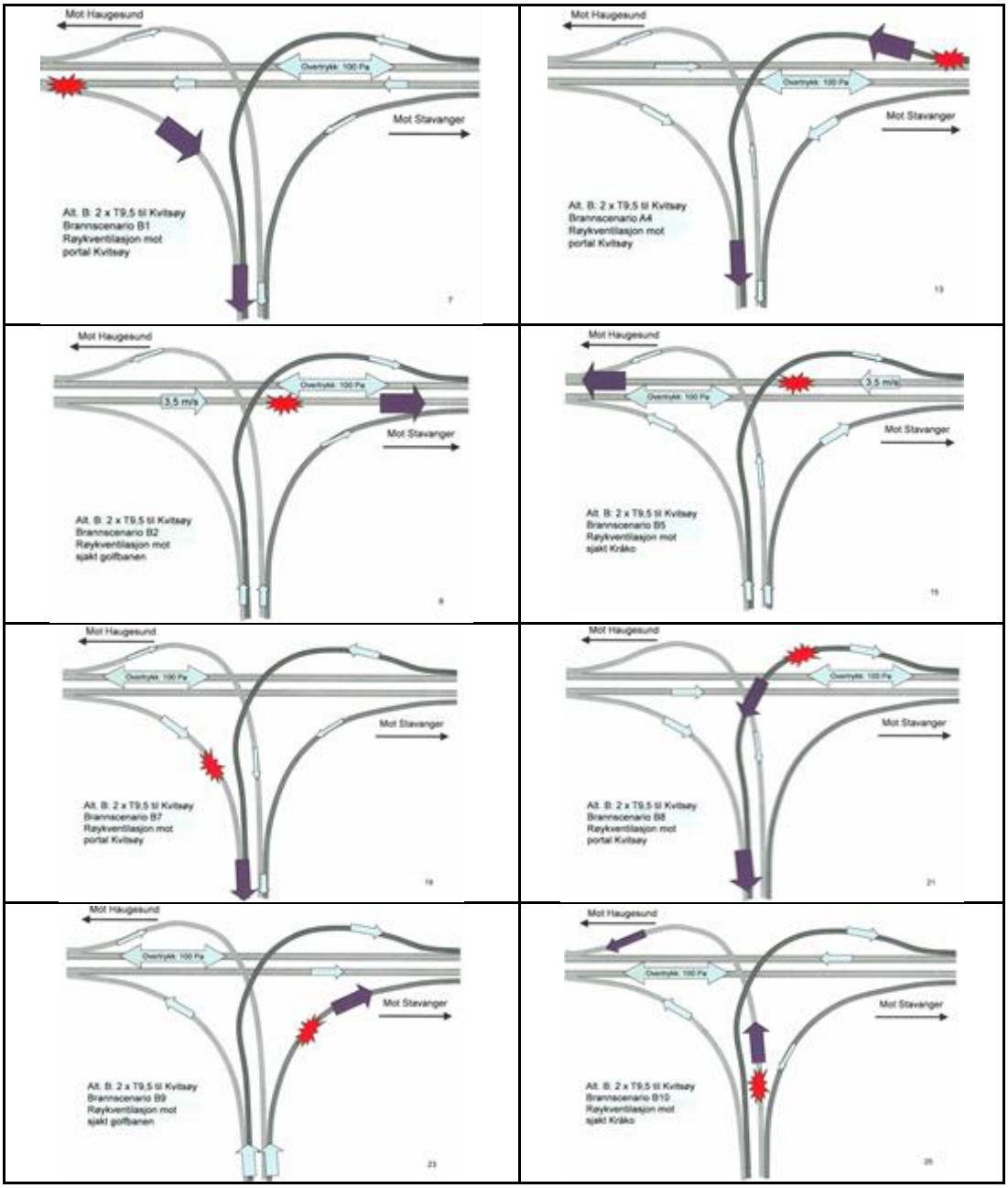


Figur 32 Prinsippskisse av ventilasjonen ved brann i rampe fra nord (eller sør). Røykventilasjon mot portal Kvitsøy. (SVV, 2011-10-28).

6.2.3 Alternativ med to løp i Kvitsøy tunnelen

Figur under viser ventilasjonsprinsipp for løsning med to løp til Kvitsøy. En vurderer disse ifm brann i avvikssituasjoner (toveis trafikk i ett løp).

Tabell 16 Ventilasjonsprinsipp, to løp til Kvitsøy.



Velges to tunnelløp til Kvitsøy kan ventilasjonssjakten ved Kvitsøy sløyfes, da Kvitsøytunnelen fungerer som "sjakt". Dette har likevel uheldige konsekvenser for trafikanter fra Kvitsøy.

.

6.2.4 Avvikssituasjonen

Det er sett på følgende avvikssituasjoner:

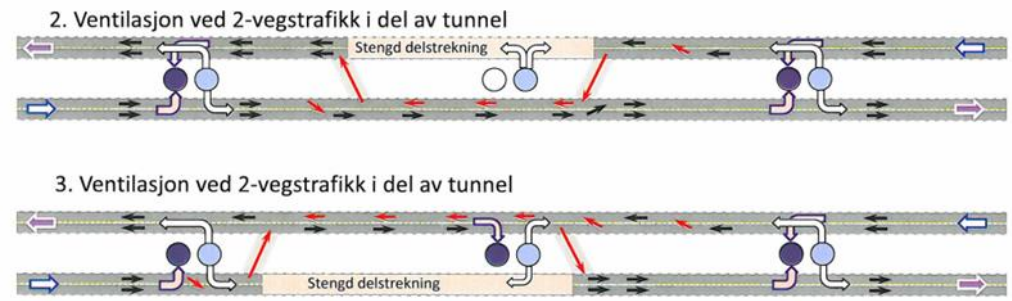
- Brann i hovedtunnel, toveis trafikk i ett løp i hele tunnelen:

I løp med trafikk og brann styres ventilasjonen i den retningen som er mest gunstig i forhold til antall eksponerte. Det kan i mange tilfeller være gunstig å kjøre røyken gjennom tunnelen til Kvitsøy som har lav trafikktetthet. Vending av røyken kan imidlertid ta tid, og trafikanter i motsatt retning kan eksponeres for røyk. Evakuering skjer via tverrforbindelse; dvs argument for redusert avstand på disse.

I det andre løpet holdes et overtrykk på minst 100 Pa, som sikrer at personer som evakuerer til dette løpet kommer i sikkerhet. Det betyr at ventilasjonen må virke her, selv om det ikke er trafikk i tunnelløpet.

- Brann i hovedtunnel, toveis trafikk i ett løp på en del-strekning:

Her ventileres tunnelen på samme måte som ved enveis trafikk i hele tunnelen. Ved brann på stykket med toveis trafikk vil kjøretøy som kjører mot ventilasjonsretningen, nedstrøms brannen bli fanget i røyken, og må evakuere seg selv til annet tunnelløp via tverrforbindelse. Trafikken fra det andre løpet inn på toveisstykket på stoppes umiddelbart. Alle andre vil bli beskyttet av ventilasjonen eller kunne kjøre ut med mindre det er langsom eller stillestående kø, ventilasjonen svikter eller brannen er større enn dimensjonerende brann. Risiko for at røyk kan føres til sikre tunnelrør bør vurderes.



Figur 33 **Ventilasjonsprinsipp ved avvikssituasjon er med toveis trafikk i del av tunnel (SVV, 2011-11-09)**

6.2.5 Kryssløsning og generelle kommentarer til ventilasjonsanlegget

Ut fra tilgjengelig dokumentasjon er det vanskelig å vurdere ventilasjonssystemets pålitelighet og effekt uten å foreta ytterligere analyser. Det er SVV som utformer ventilasjonsløsningene. Vi ønsker imidlertid å komme med noen kommentarer til ventilasjonssystemet generelt og til kryssløsningen spesielt.

Ventilasjonssystemet generelt:
Ventilasjonen synes å være et komplekst system og det kan være en utfordring å få til et pålitelig, raskt fungerende ventilasjonsanlegg ut fra følgende faktorer:

- Samvirke mellom røykens ekspansjon, termiske oppdriftskrefter, stempelkraft fra kjøretøy og ventilasjonens trekkraft. Spesielt vil det å styre røyken i en evt. rundkjøring være svært utfordrende.
- Brannventilasjonen skal i følge SVV [30] være forhåndsprogrammert for hver enkelt del av tunnelen. VTS må vite hvilken del av tunnelen brannen er for å trykke på riktig knapp som styrer ventilasjonen. Verdifull tid kan gå tapt når en skal lokalisere brannen. Rask handling krever at en har et pålitelig system for lokalisering av brannen. Dersom en ikke har kontroll med hvilken retning passasjerene evakuerer, kan påsetting av vifter/endring av ventilasjonsretning et stykke ut i brannforløpet medføre at passasjerer som i utgangspunktet går i sikre soner får røykstrømmen i sin evakueringsretning. Dette er spesielt kritisk når endring av ventilasjonsretningen utsettes i tid. Når røyken har fått høy konsentrasjon må det unngås at den sendes over personer i sikrere soner. Ventilasjonsretningen vil i følge SVV [30] være den samme ved brann som ved normal trafikk i to løp. Unnatak er brann i rampene til Kvitsøytunnelen, hvor ventilasjonsretningen er bestemt ut fra hvor brannen oppstår [29].
- Faren for spredning av røyk fra det ene hovedløpet til det andre via rampene. Det antas at ventilasjonsanlegget alene ikke gir en pålitelig nok løsning, men at det i tillegg må benyttes fysiske barrierer som brannporter.
- Mulighet for spredning fra ene hovedløp til andre via portal foreligger også. Kan motvirkes ved å vende ventilasjonsretning i sikre løp, slik at den går i samme retning i begge løp. Evt. kan en bygge skillemur mellom kjørebanene utenfor tunnelmunningen. En annen betenkelighet er belastningen en feil beslutning med hensyn til styring av ventilasjonen vil ha på personen som må ta de riktige valgene ved en brann. Hvilke knapper som skal aktiveres er avhengig av hvor brannen er lokalisert. Det vil være forskjellige knapper avhengig av hvilket løp brannen oppstår (sørgående, nordgående eller Tunnel til Kvitsøy) og om brannen er før eller etter krysset. I tillegg vil ventilasjonen variere etter hvilken rampe brannen starter. Brannens plassering må derfor være stedsbestemt før brannventilasjonen aktiveres. Det vil derfor være mange knapper en operatør av ventilasjonsanlegget skal forholde seg til.
- Tunnelen er svært lang og det kan være stor forskjell på mengde luft i tunnelløpet foran og bak brannen avhengig av hvor den er lokalisert. Dersom brannen oppstår i første lavbrekk i nordgående løp vil røyken kunne stige opp mot portalen ved Harestad dersom en ikke har tatt hensyn til behovet for økt ventilasjonskraft som trengs for å presse ut luften foran røyken pga tunnelens lengde. Sannsynligheten for at ventilasjonen ikke fungerer som planlagt vil derfor kunne være større for basistunnelen enn for referansetunnelen som er kortere.

6.3 Mekanisk og elektrisk utstyr

Først gis en gjennomgang av behov for redundans i mekanisk og elektrisk (M&E) utstyr. Deretter gis en vurdering av automatisk slokkeanlegg.

6.3.1 Redundans i Mekaniske og elektriske systemer

Strømforsyning
Strømforsyningen foreslås sikret via en felles høyspentkabel for begge løp med mating fra alle tre portalene (aggregat på Kvitsøy). Det må bygges traforom i begge løp og system for automatisk omkopling for å hindre at deler av tunnelen blir mørklagt som følge av brann eller eksplosjon i et traforom.

Nødstrømsanlegget utformes i henhold til kraven i HB 021 og vil som minimum omfatte UPS-anlegg i hver transformatorstasjon og et generatoranlegg ved en av portalbygningene (Kvitsøy) som minimum. Forsyning

av tunnelen fra generatoranlegget skjer gjennom høyspenningsanlegget, enten produsert direkte eller via en step-up transformator.

Generatorens kapasitet skal minst svare til den totale UPS-belastning. Generatoren skal også kunne drive et antall pumper og vifter.

Styre- og overvåkningsanlegg
Styre- og overvåkningsanlegget består av en eller flere uavhengige servere, som ved deres oppkobling sikrer at alle innsamlede data og betjening av de tilsluttede installasjoner alltid er mulig. Serverne skal være back-up for hverandre. Serverne skal plasseres i uavhengige rom og må ikke tilsluttes nettverket gjennom felles komponenter. Back-up forbindelsen skal om mulig etableres i en forbindelse som er uavhengig av installasjonene i tunnelen.

I betjeningsrom som er særlig viktige for å opprettholde driften av tunnelen kan det installeres to uavhengige betjeningsplasser som kobles opp mot hver sin server. Det skal være mulig for brukeren selv at velge hvilken server der skal kobles opp mot.

Ved fordeling av inn- og utganger på flere moduler kan der sikres øket tilgjengelighet til enhetene. Kommunikasjonsporter mellom PLC og inn- og utgangsmoduler kan dubleres.

Valg av komponenter med særlig lav feilhyppighet kan øke tilgjengeligheten til data.

Alle PLS-er (Programmerbar logisk styring) tilsluttes Styre- og overvåkningsanlegget ved det dedikerte nettverk. Nettverket bygges redundant for å øke sikkerheten.

Kommunikasjonsnettverk
Nettverket kan oppbygges som et ringnett. Hvis det er særlig store krav til sikkerhet kan det etableres to uavhengige nettverk i tunnelen og IDUene tilsluttes skiftevis til den ene eller den anden ring.

Pumpesystem
EU direktiv pkt. 2.6.1 angir at hvis det transporteres FG, skal pumpesystem prosjektetres og vedlikeholdes slik at det forhindrer spredning av brann og farlig væske på langs av tunnelen og til det andre løpet.

Tunnelen anbefales få to redundante pumpesystem. På grunnlag av tunnelens store dyp er systemene oppdelt i trinn med en foreløpig løftehøyde på 80 m. Hvert trinn inneholder pumpestasjon og buffermagasin. Oppsamling av lekkasjevann og over-/vaskevann skjer i to separate rørsystem som med gravitasjon ledes til en felles pumpegrop der de pumpes ut av tunnelen i en felles trykkledning.

Redundans/reservekapasitet i pumpesystemet skapes ved at:

- Hver pumpestasjon inneholder et magasin som foreløpig rommer 36 timers innlekkasje.
- Doble rørsystem gjør at en seksjon kan frakoples og vannet pumpes over i det andre systemet.
- Ved et utslipp i tunnelen finnes mulighet for å samle overvannet i en buffertank og stenge utløpet mod pumpegropen slik at lekkasjevannet kan pumpes normalt uten innblanding av forurenset vann. Buffertanken har et volum tilsvarende en tankbil og tømmes manuelt.

Slokkevann
Slokkevannsystemet består av en gjennomgående vannledning med trykkvann og tilsluttet hydranter, som forsynes fra et slokkevannreservoar. Hvis reservoaret ikke kan bli plassert på tilstrekkelig høyde over hydrantene installeres brannpumpe.

Redundans/reservekapasitet i slokkevannsystemet skapes ved:
- Eventuelle brannpumper med 100 % reserve kapasitet.
- Slokkevannreservoar vil ha vann til minimum en times brannslokking.

6.3.2 Aktive slokkeanlegg (Fixed Fire Fighting Systems, FFFS)

"Water-mist" system (vanntåkesystemer) og "deluge" system (vannkaskadesystemer), heretter kalt FFFS, er et tiltak som kan begrense brannutvikling og gi bedre muligheter for evakuering.

Generelt har FFFS til hensikt å:
1. begrense brannutviklingen,
2. redusere eller helt forhindre en brann i å spre seg til andre kjøretøy,
3. forbedre forholdene for selvredning,
4. opprettholde muligheten for en effektiv brannslukning/innsats,
5. beskytte tunnelkonstruksjonen, og
6. begrense miljømessig forurensing.

Det er siden de første diskusjoner i internasjonal regi omkring bruk av FFFS-systemer startet i 1983 blitt utført mange studier, betraktninger og vurderinger som belyser fordeler og ulemper ved slike systemer i drift. De samlede konklusjoner fra PIARC (2007, Ref. [22]) og (2008, Ref. [23]) har vært, at det ikke anbefales å installere slike systemer i vegtunneler pga. en rekke negative effekter som systemene forårsaker innen områder som personsikkerhet, brannslukking og beredskapsinnsats.

Positive og negative sider tilknyttet FFFS ble også nylig presentert på konferansen Fire Protection and Safety inTunnels (Tarada 2011, Ref. [24]). Fordelene Tarada nevner er at FFFS hindrer små branner i å spre seg i og mellom kjøretøy. Det medfører at systemet:

- beskytter trafikanter
- hindrer lengre stenging av tunnel
- reduserer skade på tunnelkonstruksjon og installasjoner
- reduserer behov for lokalisering av brannmannskap nær tunnelportal

Ulempene som nevnes er:
- kostnader knyttet til installasjon, vedlikehold og utskifting
- utløser behov for andre kostbare system (deteksjon, styring)
- forverrer raskt siktforhold
- ødelegger lagdeling av røyken
- kan føre til forsinket aktivering av sikkerhetssystem (redusert nytte)

EU Direktivet 2004/54/EC av 24.april 2004 behandler ikke emnet, siden FFFS ikke inngår i betraktninger for minimumssikkerhet i vegtunneler. Håndbok 021 behandler heller ikke emnet. Det er i enkelte land installert FFFS systemer i et meget begrenset antall vegtunneler (PIARC 2007, Ref. [22]). Australia og Japan benytter FFFS som standard i vegtunneler med stor trafikk i kombinasjon med kameraovervåkning

med hendelsesdeteksjon. I Europa finnes det ytterst begrenset bruk av FFFS. Men et betydelig utviklingsarbeid er gjort av Trafikkverket i Sverige i forbindelse med bruk av FFFS i Stockholm. Systemet synes å ha fungert godt under de forhold som gjelder der. I Norge er det i én veitunnel ved Bergen installert et aktivt slokkeanlegg på forsøksbasis. PIARC (2008, Ref. [23]) konkluderer med at ”hvis installering av et FFFS system finner sted, så skal et slikt system aldri aktiveres før alle trafikanter er evakuert fra tunnelen eller det løp, hvor brannen pågår.” Det kreves altså svært høy pålitelighet av systemet, slik at det ikke utløses ved en feil. PIARC (2008) anbefaler tilsvarende, ”at det før en eventuell installering av FFFS system i tunnel minimum skal foretas:

- En mulighetsstudie (feasability study).
- En sikkerhetsanalyse (safety risk analysis) i henhold til EU Direktivet 2004.
- En kost-nytte analyse (cost – benefit analysis) med levetidskostnader for FFFS inkludert.

Kritikken mot FFFS i internasjonale fora dreier seg videre om at brannmyndigheter, beredskapsfolk og leger ikke vil ha aktive slokkeanlegg i tilfelle brann, fordi vann i flere tilfelle kan forverre skadeomfang, herunder skader på åndedrett for trafikanter og redningstjeneste, også i forbindelse med kjemikalieutslipp. FFFS presser bl.a. røyken nedover, hvor trafikantene er.

PIARCs kritikk mot FFFS er basert på små branner som gir røyksikt eller sikt nok til å evakuere. Ved store kritiske branner er situasjonen en annen. Da vil det ikke være røyksjikt og det vil heller ikke være sikt i røyken. Og slik vil branner som er livstruende være. Ved dødelig giftighet er sikten under 1 m. Under slike forhold, vil FFFS nesten alltid kun gi positivt bidrag, ved brannen dempes og røykgassene avkjøles. Når brannen reduseres, reduseres giftigheten og etter hvert vil også sikten bedres.

Aktive slokkeanlegg er rørsystem, som er vanskelig og dyrt å vedlikeholde sett i forhold til virkningen. Levetiden er ytterst diskutabel sett i forhold til investeringen. Hvordan man skal funksjonsteste et FFFS-system hvert kvartal i driftsperioder, er en annen utfordring som nevnes. Særlig for høytrafikkerte tunneler der samfunnskostnaden og ulempene ved stenging er store, vil nødvendig funksjonstesting skape utfordringer.

Det synes imidlertid som det internasjonalt er noe uenighet omkring hvor skadelig og dødelig røyken er når den faller ned som følge av at aktive slokkeanlegg slås på. At det blir dårligere sikt er det ingen tvil om. Enkelte rapporterer at de ved fullskalaforsøk har stått tett inntil brannen og at strålingsvarmen umiddelbart blir redusert til et tålelig nivå etter igangsatt FFFS av typen vanntåke, og at det er lett å puste (forsøk med brann i trepaller). Brannventilasjon og røykens giftighet er imidlertid viktige faktorer i dette bildet, som avgjør om det er levelig etter at FFSS er slått på. Dårlig sikt krever god visuell, auditiv og eventuelt taktile holdepunkter som kan veilede trafikanter til nødutganger, hvis man er fanget i røyken.

Konklusjonen er at det er avdekket mange ulemper med installasjon, bruk, vedlikehold og fornying av FFFS, allikevel er det eneste tilgjengelige systemet som effektivt kan redusere virkning av en storbrann og redde liv i en tunnel der forventet responstid er relativt lang og mulighet for brannslukking og assistert redning er minimale. Skal slike anlegg installeres må en ha god plan for hvilke senarioer som skal bekjempes. Det kan være spesielt nyttig i tunneler med tett trafikk og stor grad av kødannelse. Tiltak for å hindre kødannelse vil være et alternativt, effektivt tiltak.

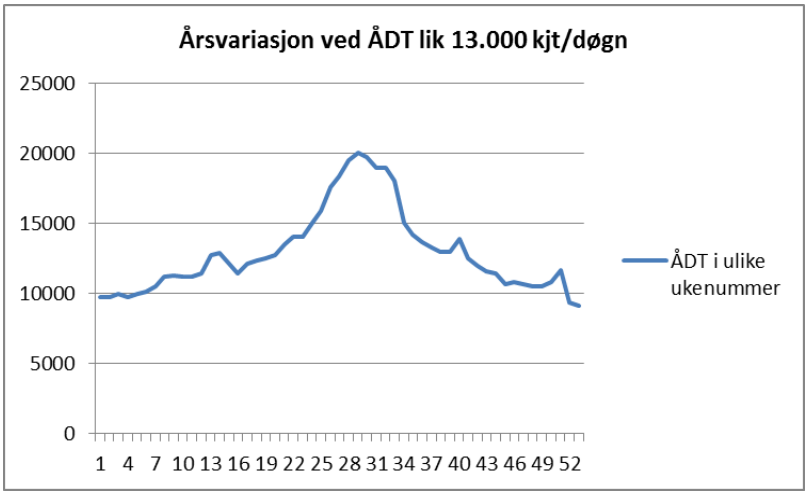
6.4 Trafikksikkerhetstiltak, Normalsituasjonen

6.4.1 Dimensjonerende trafikk

Både for normalsituasjonen og ved avvik vil det aktuelle trafikkvolumet være avgjørende både for sannsynlighet for og konsekvens ved uønskede hendelser. Innledningsvis gjøres det derfor en analyse av trafikkvariasjoner som vil ha betydning både ved normalsituasjonen og ved avvik.

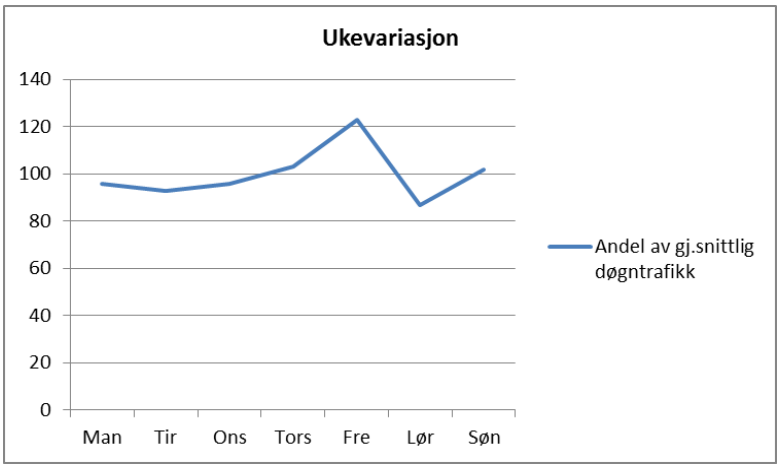
Gjennomsnittlig årsdøgntrafikk (ÅDT) er oppgitt til 13.000 kjt/døgn 20 år etter åpning. Håndbok 281 beskriver ulike kategorier veger og Rogfast kan karakteriseres som en Hovedveg utenfor tettbygd strøk (M5). Det er små forskjeller på M5 og M6 (Transportårer med stor sommertrafikk), men i dette tilfellet er det valgt å bruke M5 mht. variasjonsmønster.

Figur 34 viser hvordan trafikken varierer over året basert på en ÅDT på 13.000 kjt/døgn. Figuren viser at trafikken varierer mye over året og i perioden fra og med siste uke i mai og til og med første uke i oktober er døgntrafikken mer enn 13.000 kjt/døgn med et maksimum midt i juli på ca. 20.000 kjt/døgn. Fra midten av juni til slutten av august ligger trafikken over 15.000 kjt/døgn.



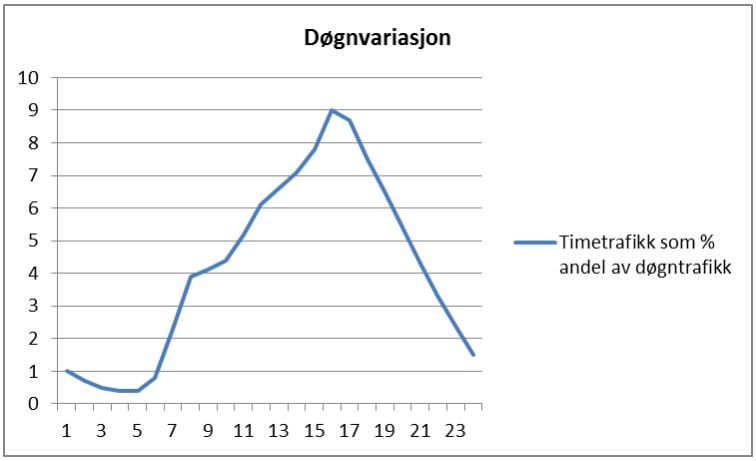
Figur 34: Årsvariasjon ved ÅDT lik 13.000 kjt/døgn for hovedveger utenfor tettbygde strøk

Figur 35 viser hvordan trafikken i tunnelen vil variere med ukedag. Fredag og søndag ligger trafikken litt over gjennomsnittet, mens de andre ukedagene ligger den litt under gjennomsnittet. Fredag er den dagen som har høyest trafikk og den ligger 23 % over gjennomsnittet for hele uken.



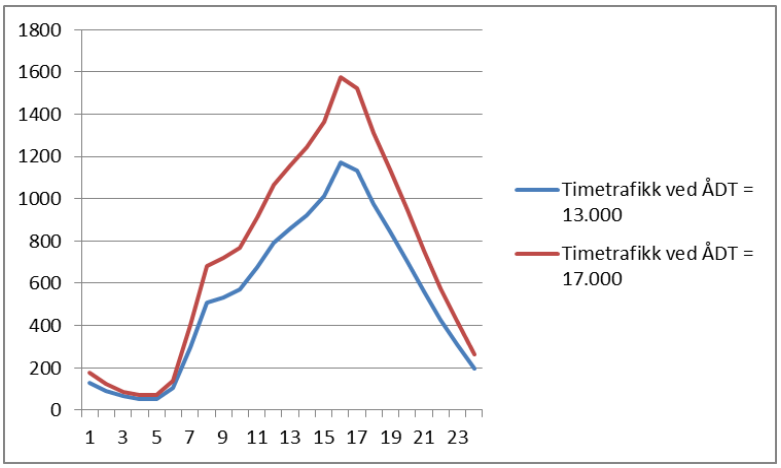
Figur 35: Ukevariasjon for hovedveger utenfor tettbygd strøk

Figur 36 viser hvordan trafikken varierer over døgnet. Den største timen opptrer mellom klokken 15 og 16 og timetrafikken utgjør da 9 % av døgntrafikken.



Figur 36: Døgnvariasjon for hovedveger utenfor tettbygd strøk

Figur 37 viser hvordan timetrafikken (sum begge retninger varierer) varierer over døgnet når ÅDT er hhv. 13.000 kjt/døgnet (gjennomsnitt over hele året) og når ÅDT er 17.500 kjt/døgnet (inntreffer i minst 8 uker om sommeren). Det er ikke tatt hensyn til ukevariasjon i kurvene, dvs. en forenkling med at alle dager er like.



Figur 37: Timetrafikk over døgnet (begge retninger) for ÅDT lik 13.000 og 17.500 kjt/døgn

Minste timetrafikk vil opptre i årets siste uke (uke 53), på lørdag og mellom klokken 03 – 05. Da vil den statistisk beregnede trafikkstrømmen (sum begge veger) være ca. 30 kjt/time. Den største timetrafikken vil opptre i uke 30 (siste uke i juni), på fredag og mellom klokken 15 og 16. Da vil den statistisk beregnede trafikkstrømmen (sum begge retninger) være ca. 1.800 kjt/time.

Oppsummering*: Variasjonskurvene og de beregningene som er gjort viser at de trafikale konsekvensene av en hendelse vil være veldig avhengig av når på året, hvilken ukedag og når på døgnet den inntreffer. Forholdet mellom minste og største time er 1:60.*

6.4.2 Risikoreduserende tiltak

Det finnes flere tiltak som kan redusere risikoen i en normal trafikkavviklingssituasjon. Av de viktigste og mest relevante risikoreduserende tiltak for Rogfast tunnelen kan nevnes:

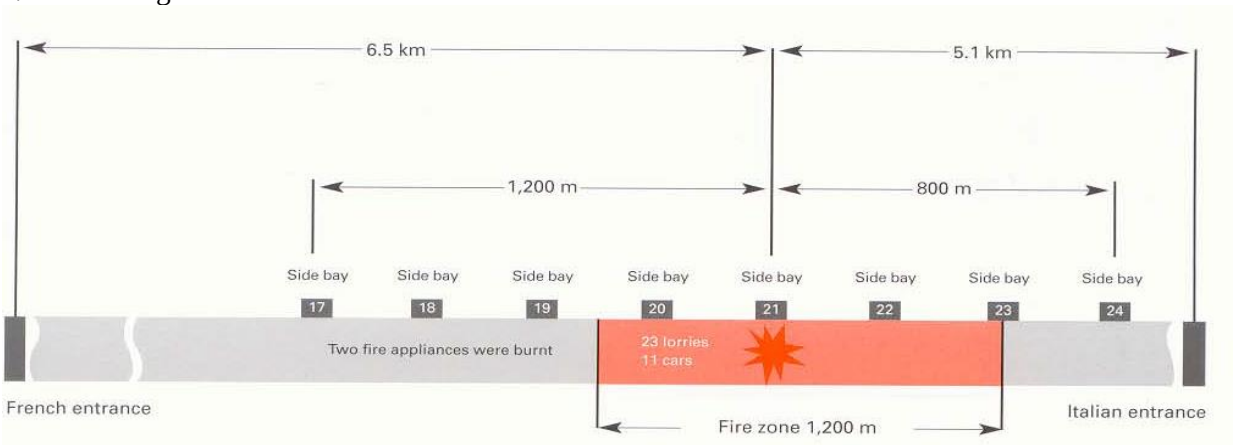
- Å få kjøretøy til å holde en tilfredsstillende innbyrdes sikkerhetsavstand
- Hastighetsbegrensninger
- Forbikjøringsbegrensninger for tungtransport
- Begrensninger på transport av farlig gods
- Tilfartskontroll
- Eventuelle restriksjoner på tyngre kjøretøy
- Utforming av kryssområdet E39 og vegarm Kvitsøy (Avsnitt 6.1)
- Estetisk utforming /bergrom / belysning og tiltak som bryter monotonien (Avsnitt 6.1)

6.4.3 Tiltak for å få kjøretøy til å holde avstand

Det er i henhold til HB 021 vegtunneler ingen krav til tiltak som sikrer at kjøretøy holder sikker avstand til forankjørende kjøretøy. Rogfast er en lang tunnel med bratt stigning og fall der slike tiltak kan øke sikkerheten (færre påkjøring bakfra ulykker) og minske risiko for spredning av brann.

Influensområdet for en brann på 100 MW eller mer er betydelig både nedstrøms og oppstrøms for brannen. Vi vet fra Mont Blanc ulykken at alle de fleste døde ble funnet innenfor en strekning på 1.2 km (figur 3). Fullskala forsøk med brann på 100MW fra Runehamartunnelen i EU prosjektet UPTuN viser at kjøretøy bør

ha en minsteavstand på 100 m for å hindre at brannen sprer seg fra kjøretøy til kjøretøy i en situasjon med kødannelse og trafikkstans.



Figur 38 Illustrasjon av influensområde ved brann I Mont Blanc tunnelen (Kilde: Münchener RE Group)

Tiltak for å holde avstand er også viktig for å hindre påkjøring-bakfra ulykker i tunnel. Påkjøring-bakfra er den mest frekvente ulykkestypen. Sekundæreffekten av slike ulykker kan være brann i tyngre kjøretøyer slik det er dokumentert blant annet fra storulykkene i Tauern og St Gotthard tunnelene. For å hindre at mindre ulykker utvikler seg til store ulykker er det viktig med tiltak som sikrer at det holdes sikker avstand mellom kjøretøyene.

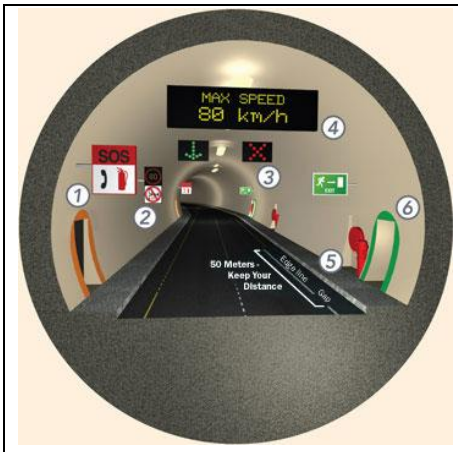
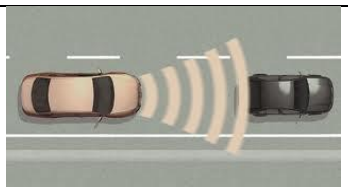
Når det gjelder tiltak for å sikre avstand mellom kjøretøyer kan en skille mellom følgende grupper:

- ITS applikasjoner
- Faste skilt
- Vegmerking og LED lys

ITS applikasjoner

Det er hovedsakelig 3 typer ITS applikasjoner på markedet som påvirker sikker avstand:

a) Variable skilt (Variable Message Signes VMS)
b) I-bilen-informasjon
c) Automatisk avstandsholder

		
Variabelt skilt over kjørefelt	I-bilen-informasjon	Automatisk avstandsholder

Figur 39. Ulike ITS applikasjoner for førerpåvirkning mht. sikker avstand

Variable skilt

I dag gis informasjon til trafikanter i tunnel hovedsakelig på faste skilt, dynamiske og variable informasjonstavler (VMS), vegmerking og via radio. Variable skilt er en ITS teknologi med gode referanser fra ulike anvendelser i vegtrafikken. Mont Blanc tunnelen har et velfungerende system for sikker avstand basert på en kombinasjon av variable skilt og LED-lys. Variable skilt kan eventuelt kombineres med detektorer som registrerer avstanden mellom to kjøretøyer og varsle føreren av det bakerste kjøretøyet om at avstandene er for kort (selektiv VMS).

I-bilen informasjon og automatisk avstandsholder

Det blir mer og mer vanlig med formidling av sikkerhetsinfo direkte på display i bilen som presenteres visuelt eller ledsaget av alarm eller stemmeaktiverte advarsler. I tillegg er cruisekontroll systemer videreutviklet til førerstøtte der kjøretøyet automatisk holder sikker avstand og hastighet. Forsøk med slike system for områdespesifikk ytre kontroll for eksempel i tunneler pågår i regi av EU. Slike system har imidlertid ikke nådd et tilstrekkelig modningsnivå ennå.

Faste skilt

Faste skilt kan varsle bilførerne med jevne mellomrom om at de skal holde avstand til forankjørende kjøretøy og det kan også brukes til å markere en ønsket sikkerhetsavstand mellom to kjøretøyer. Informasjonen blir meget statisk og har ikke den samme fleksibilitet og effekt som VMS og andre ITS applikasjoner mht. å håndtere trafikksituasjoner uten det normale.

Vegmerking og LED lys

Vegmerking i form av striper på tvers av kjøreretningen eller som en rekke malte vinkler (omvendt V form) en skal holde mellom seg og kjøretøyet foran, er brukt som tiltak for sikker avstand på motorveg i en rekke land.

Figur 40. Oppmerking i kjørebanen

Et eksempel på bruk av LED lys for å markere avstander er vist i Figur 41. Gule LED-lys med et blått lys hver 150 meter gir trafikantene et holdepunkt for sikker avstand til forankjørende. Trafikantene gis info gjennom en folder som deles ut i bomstasjonen ved portal om å holde et blått lys mellom egen bil og forankjørende. Variable skilt brukes hver km gjennom tunnelen for å minne trafikantene om sikker avstand og anbefalt hastighet.

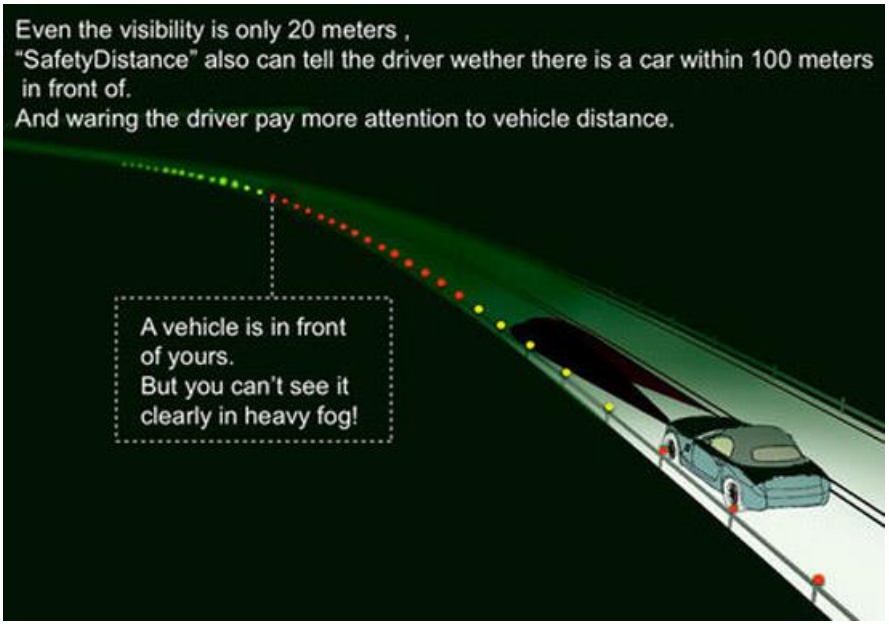
Hvite LED lys plassert lavt på vegskulderen med blå avstandslys slik de er brukt i MontBlanc er en alternativ løsning som bør vurderes nærmere. Det gir i tillegg positiv effekt på optisk føring, vegens videre forløp og opplevelse av horisontal og vertikalkurvatur.

Figur 41. LED-lys som virkemiddel for sikker avstand i tunnel (Foto: Gunnar D. Jenssen)

Opplevelse av horisontal og vertikalkurvatur er viktig for fartstilpasning og noe trafikantene vanligvis har problemer med i tunnel der slike referanser mangler. LED lys på vegskulderen har dokumentert positiv effekt på opplevelse av trygghet og attraktivitet uten at det fører til økt hastighet (SINTEF rapport F04900, 2004).

Figur 42. LED lys gir god informasjon om veiens videre forløp (horisontal/vertikal kurvatur Skansentunnelen Trondheim åpnet for trafikk 2010 (foto: Gunnar D. Jenssen)

LED lys er også brukt med hell som referanse for sikker avstand på motorveg i tåke. Effektstudier med slike lys pågår på E6 ved Hamar, men uten funksjonalitet for sikker avstand.



Figur 43. LED lys for sikker avstand i tåke

Oppsummering
Oversikt over alternative tiltak for å få kjøretøy til å holde sikker avstand med hensyn til fare for påkjøring bakfra og spredning av brann er listet opp i tabell nedenfor. Dette er kjente tiltak som er på markedet eller antas å være på markedet innen tunnelen åpner.

Tabell 17 Alternative tiltak for sikker avstand mellom kjøretøy

Tiltak for sikker avstand					
	Alternativ	**Imple-mentert**	**Bør implementeres**	**Kostnad**	**Kommentar**
ITS apps	Variable skilt (VMS)	Nei	Ja, i kombinasjon med LED lys		I henhold til ”best practice”
	I-bilen-informasjon	Økende bruk	Bør integreres med VTS	Belastes hovedsakelig bileier	Integrasjon med VTS. Forventes å være på markedet i 2020
	Automatisk avstands-holder	Økende bruk. På markedet siden 1990	Bør integreres med VTS Områdespesifikk Overstyrende i tunnel	Belastes hovedsakelig bileier	Områdespesifikk variant er under utvikling
Skilt ”Avstand”	Inne i og utenfor tunnel	Nei	Nei	Ca. 5.000 kr. pr skilt	VMS mer fleksibelt ved avvikssituasjoner
Veg-merking	Striper på tvers av vegbanen	Nei	Nei	Lav	Bedre med LED lys som har dokumentert effekt (Mont Blanc)
LED lys	Blå/gule lys på vegg	Nei	Ja, i kombinasjon med VMS	Antatt drift og lav investerings-kostnad	Plassering på skulder bør vurderes. Eventuelt i kombinasjon med hvite ledelys i stedet for gule

6.4.4 Hastighetsbegrensninger

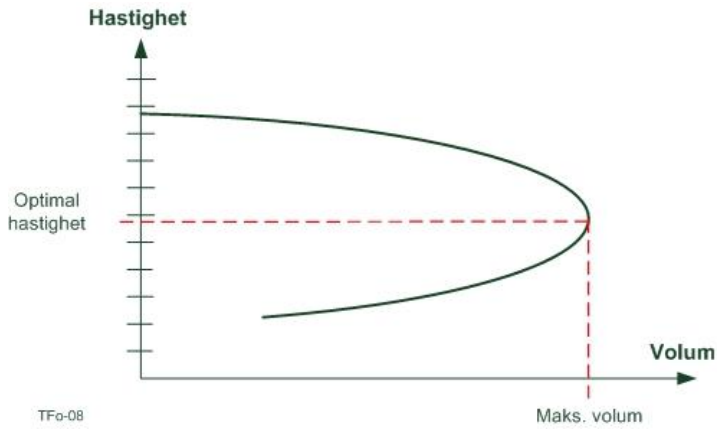
Hastighetsbegrensninger kan benyttes i en normalsituasjon for å håndtere situasjoner som ikke kan kalles en avvikssituasjon. Eksempel på en slik situasjon kan være spesielle og gjentagende topper i trafikkvolum pga. ekstraordinære trafikkskapende forhold. Hensikten med å bruke hastighetsbegrensninger kan både være å øke kapasiteten gjennom tunnelen og å redusere sannsynligheten for og konsekvensen av trafikkulykker. Hastighetsbegrensningene gjennomføres ved bruk av variable hastighetsskilt (VMS). Hastigheten bør kontrolleres enten gjennom punkt- eller strekningsovervåking slik at respekten for variable fartsgrenser opprettholdes.

6.4.5 Tilfartskontroll

Tilfartskontroll betyr å begrense trafikken i tunnelen slik at forholdet mellom volum og kapasitet alltid er på den sikre siden av 1,0.

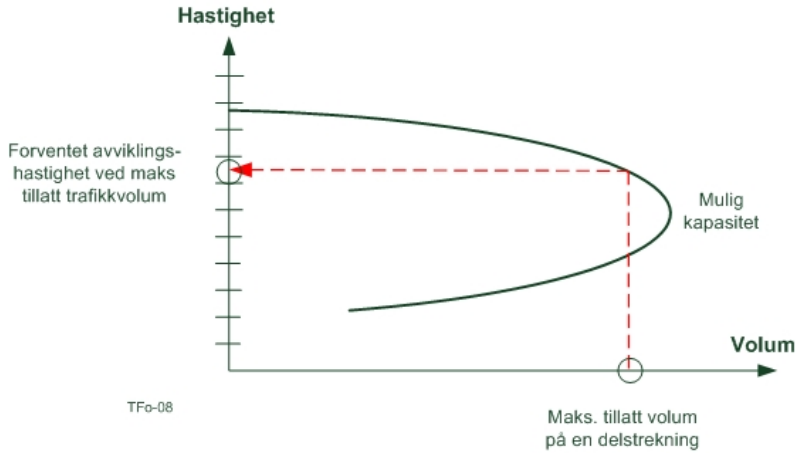
Figur 44 nedenfor er forenklet i forhold til den kurven som kan beregnes på grunnlag av virkelige registreringer av forholdet volum – hastighet på kjøretøyer i en trafikkstrøm, og viser bare prinsippet for hvordan hastigheten endrer seg med trafikkvolumet. Ved et lite trafikkvolum vil trafikantene ikke ha behov

for å tilpasse seg andre trafikanter og vil gjerne velge en hastighet rundt den tillatte (skiltet) hastighet. De fleste trafikantene vil derfor befinne seg til oppe til venstre på den øvre del av kurven (lite trafikk – høy hastighet). Trafikkavviklingen vil være stabil. Etter hvert som volumet øker vil hastigheten synke. Dette skyldes at alle trafikanter etter hvert vil måtte tilpasse seg at de blir flere og flere trafikanter på denne samme strekningen. Dette vil bl.a. påvirke den hastigheten som trafikantene vil velge å holde. Flere kjøretøyer innenfor den samme vegstrekningen og tidsperioden betyr mindre sikkerhetsavstander mellom kjøretøyene som igjen blir kompensert med lavere hastighet.



Figur 44: Forenklet volum – hastighetskurve

Etter hvert som volumet øker, vil en nærme seg vendepunktet på kurven, dvs. det punktet hvor trafikken ligger i grensen mellom å være stabil og ustabil. Vendepunktet representerer altså det punktet hvor en har maksimal utnyttelse av den aktuelle vegstrekningen og hvor hastigheten på trafikken er optimal mht. å få mest mulig trafikk gjennom en strekning over en gitt tid. De registreringene som er gjort i veldig mange ulike situasjoner, viser at den optimale hastigheten ligger et sted i området 55 - 65 km/t. Dersom volumet øker utover det maksimale, vil trafikkavviklingen bli ustabil, hastigheten vil gå ned og volumet vil reduseres fordi det er færre kjøretøyer som kan avvikles over en strekning over en gitt tid. For å sikre en stabil avvikling med mulighet for høy utnyttelse av vegkapasiteten og en minimalisering av utslipp, bør derfor trafikkavviklingen styres slik at den alltid ligger på den øverste delen av volum - hastighetskurven. Dette kalles tilfartskontroll.



Figur 45: Prinsipp for tilfartskontroll

Prinsippet med tilfartskontroll er veldig forenklet sagt en styring av tilfartene til tunnelen på en slik måte at trafikkavviklingen på alle delstrekningene på tunnelen ligger på den øvre delen av volum – hastighetskurven og i en sikker avstand fra kurvens vendepunkt, dvs. i det området hvor en alltid er sikret en stabil og effektiv trafikkavvikling. Tilfartskontrollen kan gjennomføres ved å signalregulere tilfartene til tunnelen. Dette krever oppstillingsplasser ved begge tunnelåpningene (eventuelt før tunnelåpningene dersom det ikke er plass ved tunnelåpningene). Tilfartskontroll kan være aktuelt i de tilfellene et tunnelløp har redusert kapasitet eller er stengt pga. av hendelse. Kapasiteten for tunnelen under gitte trafikkforhold er beskrevet i kap. 6.5.2.

6.4.6 Eventuelle restriksjoner på farlig gods transport

Hendelser som involverer kjøretøy som transporterer farlig gods kan få helt andre utfall og konsekvenser dersom de skjer i en tunnel i forhold til åpent terreng. Derfor kan det være et aktuelt tiltak å legge begrensninger på transport av farlig gods gjennom tunnelen ved spesielle dager med spesiell stor trafikk i tunnelen. Slike begrensninger krever informasjon om kjøretøyene og det godset de transporterer.

Farlig gods er definert i ADR avtalen (The European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road; Den europeiske avtale om internasjonal vegtransport av farlig gods), [32]. Varer som er omfattet av ADR avtalen er klassifisert i følgende klasser:

Klasse 1	Eksplosive stoffer og gjenstander
Klasse 2	Gasser
Klasse 3	Brannfarlige væsker
Klasse 4.1	Brannfarlige, faste stoffer, selvreaktive stoffer og faste eksplosivstoffer som er gjort ufølsomme
Klasse 4.2	Selvantennende stoffer
Klasse 4.3	Stoffer som utvikler brennbare gasser i kontakt med vann
Klasse 5.1	Oksiderende stoffer
Klasse 5.2	Organiske proksider
Klasse 6.1	Giftige stoffer
Klasse 6.2	Infeksjonsfremmende stoffer
Klasse 7	Radioaktivt materiale
Klasse 8	Etsende stoffer
Klasse 9	Forskjellige farlige stoffer og gjenstander

Det er DSB som fører tilsyn med at bestemmelsene i ADR forskriften overholdes. DSB, SVV og politi (og tollvesen) kan kontrollere transport av FG på vei (§30 i [32]). Normalt utfører kontroll av kjøretøy og last av FG av SVV. Politiet blir varslet ved alvorlige brudd på kjøretøyforskriften [31].

Generelt må det fremskaffes oversikt over ulike typer FG som forventes fraktet i Rogfast. Antall kjøretøy som antas (delvis) å benytte hydrogen som drivstoff må også kartlegges.

Kapittel 1.9 i [32] beskriver transportrestriksjoner for FG, og Avsnitt 1.9.5 omhandler begrensninger på transport av FG i vegtunneler. Vegtunnelen skal da tilordnes en av tunnelkategoriene A, B, C, D eller E, der

- Tunnelkategori A har ingen begrensninger for transport av FG,
- Tunnelkategori B har begrensninger for FG som kan lede til meget store eksplosjoner
- Tunnelkategori C har begrensninger for FG som kan lede til meget store eller store eksplosjoner eller et stort giftig utslipp

- Tunnelkategori D har begrensninger for FG som kan lede til meget store eller store eksplosjoner, et stort giftig utslipp eller kraftig brann
- Tunnelkategori E gir begrensninger for all FG, med helt spesifikke unntak.

For hver av kategoriene A-E er det spesifisert hvilke klasser og mengde FG som er forbudt (jfr. klassene 1-9 referert over). Merk at vegtunnelen kan tilordnes mer enn en tunnelkategori, for eksempel basert på tid på døgnet, ukedag osv. I prinsippet kan altså tunnelen være angitt som tunnelkategori C for tidspunkt på døgnet med relativt høy trafikk, men kategori A resten av døgnet. Ved evt. innføring av begrensninger må dette bekjentgjøres og varsles ved skilting.

Det som er relevant ved utformingen av selve tunnelen er for det første brannmotstand (mot større branner) og motstandsdyktighet mot eksplosjoner, og videre at avløpsrør er konstruert og vedlikeholdes for å hindre at brannfarlige og giftige væsker sprer seg inne i løp eller mellom løp (se Avsnitt 2.6.1 i tunnelsikkerhetsforskriften, [32]). Disse forhold forutsettes det tatt hensyn til i prosjektering av tunnelen. Et mulig problem her (som i andre tunneler) er mulighet for spredning av giftig gass (gasslekkasje).
Videre bør det være gode evakueringsmuligheter i tilfelle det inntreffer en FG ulykke. Dette legges det opp til ved å foreslå redusert avstand mellom nødutganger (gangbare tverrforbindelser). Øket vegskulder har også en slik positiv effekt.

Så uansett om Rogfast blir en tunnel med god innebygd sikkerhet kan det bli aktuelt å innføre restriksjoner på visse typer FG. Ofte vil en i slike tilfelle beregne risiko knyttet til alternative ruter og sammenlikne med risiko ved gjennomkjøring i Rogfast. Nå er det i Rogfast meget lange/vanskelige omkjøringsmuligheter, som også medfører betydelig risiko, slik at det her anses mest aktuelt å begrense transport av FG til tider av døgnet med lav trafikk, begrense antall samtidige FG transporter i tunnelen, begrense minimumsavstanden mellom FG transporter, evt. stenge ett løp mens FG transporten foregår gjennom tunnelen. Et alternativ kan også være midlertidig nedsatt fartsgrense mens FG transporten går gjennom tunnelen. (Når det gjelder gasstransport kan en naturligvis tenke seg gassledning som alternativ til transport gjennom Rogfast, og på sikt er dette et alternativ som kan vurderes.)

Med den relativt lave ÅDT (med lav trafikk om natt) bør en derfor kunne få tilfredsstillende risiko ved slike administrative tiltak; dvs. i en viss grad skille FG og ordinær trafikk, (f.eks. legge spesielt problematiske FG transport til natt). Den presise utforming av disse tiltak bør bygge på innsamling av data over "profilen" av FG transport i tunnelen, og dedisert risikoanalyse for FG.

Det vises videre til tunnelsikkerhetsforskriften [21], avsnitt 3.7 om transport av FG:

1. Der skal på basis av en risikoanalyse fastlegges regler og krav til transport av FG i tunnelen
2. Der skal oppstilles passende skilting før tunnel for å håndheve reglene ved tunnelinnkjørselen, og tidligere, slik at sjåfører får mulighet til å velge alternative ruter
3. Der skal vurderes driftsmessige tiltak for å redusere risikoen ved enkelte eller alle kjøretøyer med FG, slik som forhåndsvarsling eller kolonnekjøring med eskorte i av følgebiler.

På denne bakgrunn bør det utføres en særskilt studie for å fastlegge spesifikke krav for transport av FG, samt hvilke tiltak som i denne forbindelse bør etabler i selve tunnelen og utenfor tunnelområdet. En slik studie vil også kunne danne bakgrunn for ytterligere myndighetstiltak ved evt. valg av alternative ruter for farlig gods.

OECD og PIARC har i perioden 1997 – 2000 gjennomført et studie av risikoen ved transport av farlig gods og mulige rasjonelle restriksjoner av transport av farlig gods, jfr. Swiss Federal Roads Office, Tunnel Task Force: Final Report, 23 May 2000. Studien har resultert i to moduler: QRA (kvantitative risikoanalyser) og

DSM (modell til sammenligning og beslutningsstøtte). Begge moduler kan anvendes i forbindelse med risikoanalyse av transport av farlig gods, både på rute gjennom tunnel og på alternative ruter uten om tunnel.

Det arbeides nå med flere forskningsprosjekter og piloter med såkalt intelligent gods. Det vil si at godset bærer med seg informasjon om hva det inneholder, hvor det kommer fra og hvor det skal. Denne informasjonen kan kommuniseres med vegkantutstyr og en vegtrafikksentral kan styre trafikken ned på det individuelle kjøretøynivå mht. om kjøretøyet skal gis adgang til tunnelen eller ikke. Et slikt styringssystem ble demonstrert i EU-prosjektet Smartfreight i Trondheim i 2010. Inntil slike løsninger er videreutviklet og implementert må det finnes andre løsninger på hvordan en skal skaffe seg informasjon om hva slags gods som ønskes transport gjennom tunnelen. Det ligger imidlertid utenfor dette prosjektet å beskrive slike løsninger, men det finnes løsninger som innenfor ferjetrafikken som kan være relevante.
Se ellers avsnitt under om oppstillingsplass utenfor tunnel.

6.4.7 Eventuelle restriksjoner og forbikjøringsbegrensninger på tyngre kjøretøy

Eventuelle restriksjoner på tyngre kjøretøy kan være begrenset til måned, uke, dag og tid på døgnet. Det kan for eksempel være aktuelt å forby tunge kjøretøyer å bruke tunnelen på ukedager og tidspunkt på dagen hvor de høyeste trafikkvolumene opptrer. En slik begrensning vil kunne ha en trafikksikkerhetsmessig effekt ved at sannsynligheten, og muligens også konsekvensene, ved et trafikkuhell minimaliseres. Det vil også kunne ha en positiv effekt mht. avvikling av trafikken. I forbindelse med stenging av et løp (avvikssituasjonen) kan en også tenke seg kombinasjonen av toveis trafikk i ett løp og restriksjoner for tunge kjøretøyer. Ut i fra en samfunnsøkonomisk betraktning bør slike kombinasjoner bare benyttes ved kortvarige stenginger. E39 er en viktig åre for godstransport og det bør veie tungt ved vurderinger i tilknytning til innføring av restriksjoner for tyngre kjøretøyer.

Forbikjøring av ett tungt kjøretøy med annet tungt kjøretøy kan i lange og bratte stigninger skape trafikkfarlige situasjoner og irritasjon for andre trafikanter. En ser ofte at slike situasjoner krever veldig lange forbikjøringsstrekninger og dette forsterkes ytterligere i stigninger. Et generelt tiltak for å redusere risikoen og ulempene for andre trafikanter er å innføre forbikjøringsforbud for tunge kjøretøy i lange stigninger. Slikt forbikjøringsforbud kan være knyttet til trafikkvolumene slik at dersom trafikkvolumet i et tunnelløp overskrider et visst volum innføres det automatisk forbikjøringsforbud for tunge kjøretøy.

6.5 Avvikssituasjoner

6.5.1 Innledning

ROS analysen skiller mellom to typer avvikssituasjoner

a) planlagte avvik
b) tilfeldige (stokastiske) avvik

Planlagte avvik er knyttet til vegarbeid og vedlikeholdsarbeid i tunnelen. Tilfeldige avvik er knyttet til trafikkulykker og andre tilfeldige og uforutsigbare hendelser, eksempelvis tapt gods som krever stenging av et løp.

Planlagte avvik tilknyttet vegarbeid og vedlikehold kan legges til tider av døgnet med lav trafikkbelastning (kveld/natt). Hvis en kan anta at ventilasjonskonseptet inklusive brannporter er egnet for toveis trafikk, vil

slike avvik først og fremst påvirke trafikkavvikling og ikke sikkerhet med de forventede trafikkbelastningene. Dette bør verifiseres i en annen analyse.

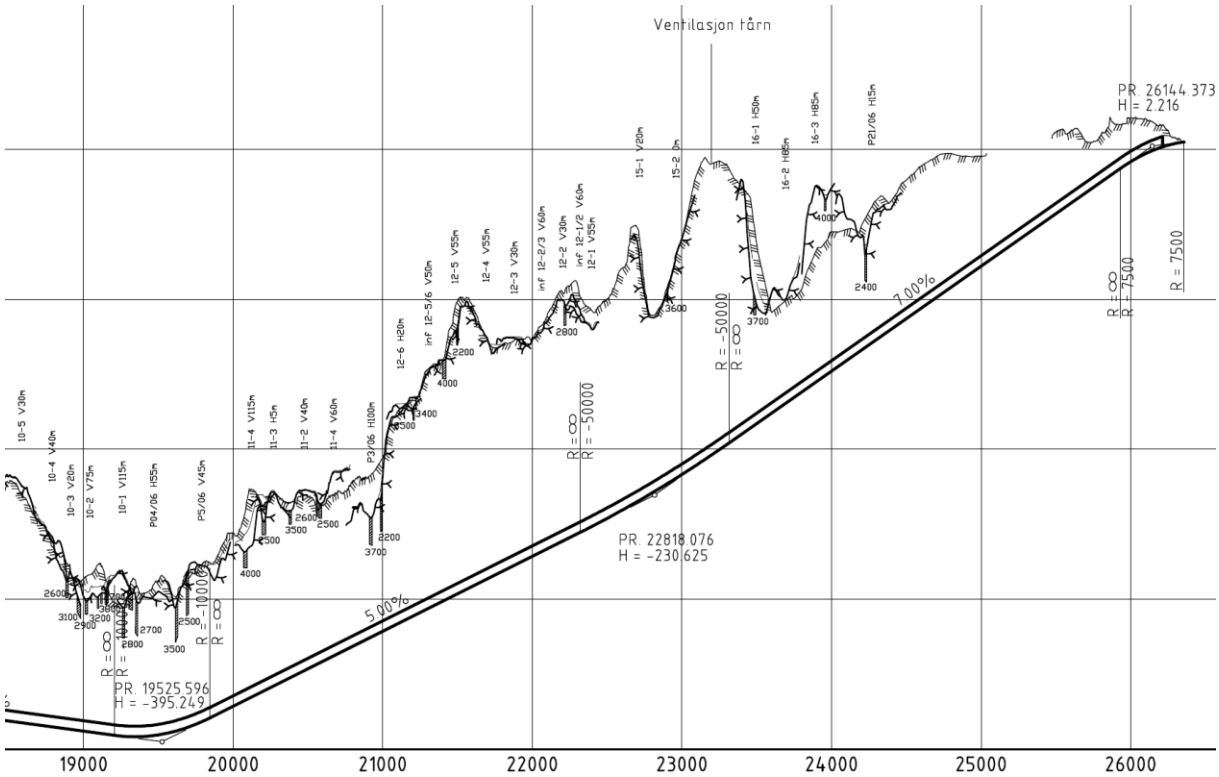
Planlagt vedlikehold som omfatter vedlikehold av kjørebanen, tunnelkonstruksjonen og tunnelutstyret vil gjerne bli utført om natten hvor timetrafikken gjerne ligger under 1 % av ÅDT i perioden mellom kl. 00 og 06. For Rogfast betyr det at timetrafikken om natten vil ligge under 130 kjt/time. Med en retningsfordeling på 33/67 vil det si 85 – 90 kjt/time i største retning. Dette skulle ikke skape noen avviklingsproblemer selv om det var en stor andel tunge kjøretøyer. Trafikken kan ledes gjennom tverrforbindelsene forbi den strekningen som vedlikeholdes eller ett løp kan stenges gjennom hele tunnelen. Trafikken ledes til/fra det aktuelle tunnelløpet umiddelbart før eller etter utløpene.

Tilfeldige avvik tilknyttet trafikkulykker og andre hendelser (stans i kjørefelt, last som har falt av kjøretøy, nedfall fra tak, vann i vegbanen osv.) utgjør økt risiko. Slike avvik kan inntreffe på tidspunkt med maksimal trafikkbelastning (dagtid/rush). Simuleringer av trafikkavvikling i slike avvikssituasjoner kan enkelt simuleres for å studere avviklingskonsekvenser og sikkerhetseffekter.

Det vil være avhengig av hvilken type hendelse som skjer og når den skjer mht. om trafikken skal dirigeres til å gå i ett løp i tillegg til hvor raskt en slik omdirigering kan skje. En hendelse som stopp pga. drivstoffmangel vil ikke betinge dirigering til ett løp, mens en hendelse som en mindre brann eller omfattende kollisjon vil fort lede til ett-løps trafikkavvikling eller helt eller delvis stengning av tunnel ved alvorlig brann og katastrofe. Trafikken kan ledes gjennom tverrforbindelsene forbi den strekningen hvor hendelsen har inntruffet eller ett løp kan stenges gjennom hele tunnelen. Trafikken ledes til/fra det aktuelle tunnelløpet umiddelbart før eller etter utløpene. Prosessen med en slik omdirigering må planlegges i detalj før en kan si noe om hvor hurtig en slik trafikkregulering kan skje og på hvilken måte (ulike former for styringssystemer og skilter/signaler/trafikant-informasjon).

6.5.2 Hvor mye trafikk kan avvikles i ett løp?

Den kritiske strekningen for trafikkavviklingen og mulig kapasitet vil være den strekningen som har høyest og lengst stigning, dvs. stigningen fra laveste punkt i tunnelen til tunnelportalen på Bokn. Denne strekningen er på ca. 6 km (regnet fra Profil 19731 til Profil 25644) og deler av strekningen har 5 % stigning og deler har 7 % stigning. Av forenklingshensyn er det regnet gjennomsnittlig 6 %.



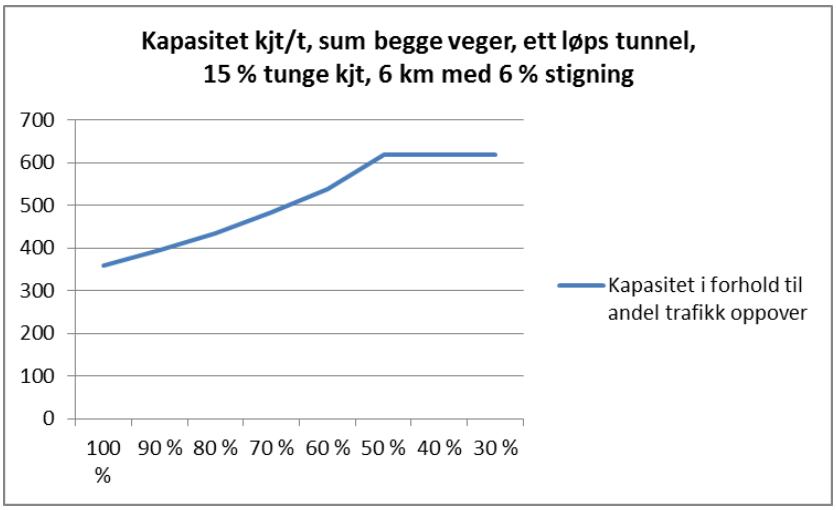
Figur 46: Lengdeprofil over kritisk strekning mht. kapasitet

Kapasitetsberegningen er gjennomført iht. Håndbok 159 Kapasitet på vegstrekninger. Hensikten med kapasitetsberegningen er å se på når det vil være mulig å kjøre toveis trafikk i ett løp. Dette kan skje ved hendelser som krever at ett tunnelløp må stenges.

Figur 47 viser kapasiteten avhengig av hvor stor del av trafikken som kjører oppover. Tungtrafikken er meget utslagsgivende mht. kapasiteten og ved en så lang strekning som det er snakk om her vil reduksjonsfaktoren for de tunge kjøretøyene redusere kapasiteten på det tunnelløpet som har to-vegs trafikk med mer enn 70 %.

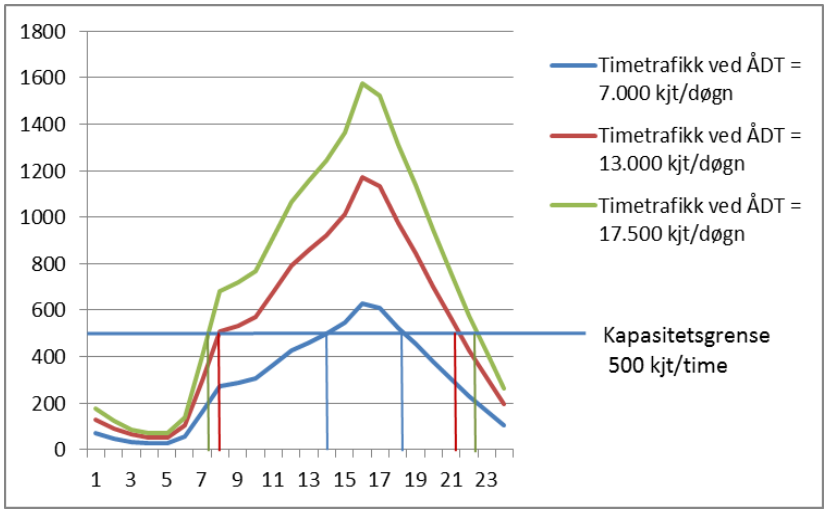
Det vil trolig ikke opptre en mer ugunstig retningsfordeling enn 70/30, dvs. at kapasiteten vil ligge i underkant av 500kjt/time. Dersom en regner 50/50 fordeling vil kapasiteten ligge i overkant av 600 kjt/time som også vil være den maksimale kapasiteten gitt 15 % tunge kjøretøyer. Ved en andel tunge kjøretøy på 10 % vil de tilsvarende tallene være 630 kjt/time for en retningsfordeling på 70/30 og i overkant av 800 kjt/time ved 50/50. Dette illustrerer hvilken effekt andelen tunge kjøretøyer har på kapasiteten i denne lange stigningen.

For å tilby trafikantene et tilfredsstillende avviklingsnivå inne i tunnelen ved toveis trafikk i ett løp bør belastningsgraden (volum/kapasitet) helst ligge under 0,85. Over dette vil trafikkstrømmene gjerne bli ustabile med fare for kødannelser og i verste fall omfattende stopp/kjør avvikling. Det vil si at dersom trafikken er under 430 kjøretøy/time ved retningsfordeling 70/30 eller under 530 kjøretøy/time ved retningsfordeling ved 50/50 kan ett tunnelløp avvikle toveis trafikk uten spesielle problemer.



Figur 47: Teoretisk kapasitet på ett løps tunnel med toveis trafikk

Figur 48 viser hvordan muligheten for å dirigere toveis trafikk i ett tunnelløp varierer med ÅDT. Kapasiteten for ett løp er i figuren forenklet til 500 kjøretøy/time (15 % tunge kjøretøyer og 70/30 retningsfordeling).



Figur 48: Tider på døgnet med mulighet for toveis trafikk

I de kurvene som er vist er det ikke tatt hensyn til års og ukevariasjon. Det vil si at kurvene ikke er 100 % representative, men må mer benyttes som en indikasjon på hvilke perioder på døgnet det for eksempel kan være muligheter til å utføre vedlikehold i ett løp som er stengt for all trafikk. Kurvene for ÅDT = 7.000 kjøretøy/døgn og 13.000 kjøretøy/døgn vil være riktig for slutten av mai og begynnelsen av september. For perioden juni – august vil mulighetene for å dirigere all trafikk i ett løp være mindre enn det figuren viser og for perioden september – mai vil muligheten være større enn det figuren viser.

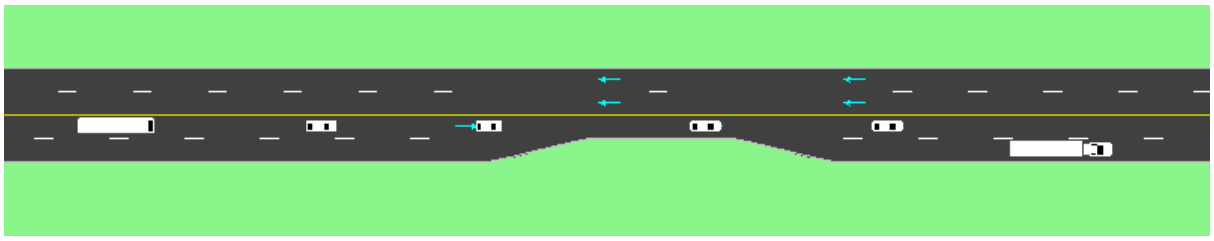
- For ÅDT = 7.000 kjøretøy/døgn (åpningsåret) vil det stort sett være mulig å avvikle all trafikk i ett løp hele døgnet med unntak av perioden 14 – 18. I denne perioden vil det være ca. 200 kjøretøy som

ikke vil kunne kjøre gjennom tunnelen. Med en retningsfordeling på 50/50 vil det behov for et kømagasin på 100 kjøretøy på hver side av tunnelen.

- For ÅDT = 17.500 kjøretøy/døgn (sommermånedene 20 år etter åpning) vil det være mulig å avvikle all trafikk i ett løp i perioden 22 – 08. Stenging av ett tunnelløp mellom kl. 15 og 16 og et kapasitetstak på 500 kjøretøy/time vil i verste fall kunne bety at mer enn 1000 kjøretøy ikke får kjøre gjennom tunnelen. Med retningsfordeling på 50/50 tilsvarer dette minst 3 km kø på begge sider av tunnelen.

6.5.3 Trafikkavvikling ved tilfeldige og ikke planlagte hendelser

Det vil kunne inntreffe hendelser som gjør at ett av to felt i et tunnelløp blir midlertidig sperret på en kort strekning. Eksempler på slike hendelser er motorstopp pga. drivstoffmangel, punkteringer, last som faller av kjøretøy, deler av kjøretøy som blir liggende i kjørebanen, gummibaner på dekk etc. Ved slike hendelser vil trafikken i to felt måtte flette til ett felt. I de fleste tilfellene vil slik fletting kunne gå uten særlige problemer, men ved store trafikkstrømmer i lange stigninger vil det kunne bli dårlig avvikling, køer og i verste fall full stopp i trafikkstrømmen.

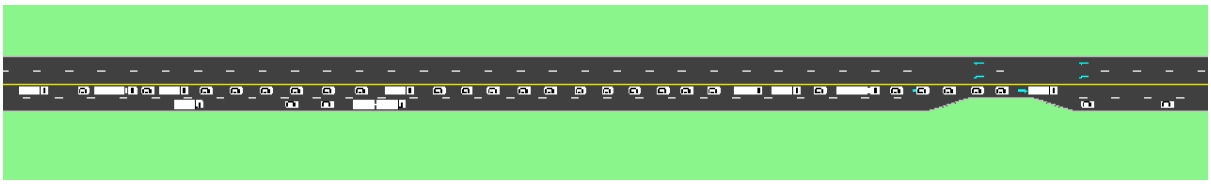


Figur 49: Innsnevring over en kortere strekning (skjermdump fra SimTraffic)

Trafikksituasjonen med en begrenset innsnevring er simulert i SimTraffic. Simuleringen viser at dersom innsnevringen skjer på en strekning med fall eller ingen stigning vil det kunne oppstå kortvarige kødannelser og reduserte hastigheter når trafikkvolumet er 1.500 kjøretøy/time. Trafikkstrømmer med denne størrelsen vil kunne opptre 20 år etter åpning (ÅDT = 13.000 kjøretøy/time), på en fredag i juli og med en retningsfordeling på 70/30. Sannsynligheten for at en hendelse som medfører en innsnevring fra to til ett felt skal forårsake trafikkavviklingsproblemer er dermed meget liten.

For å simulere lange stigninger er kapasiteten på strekningen etter innsnevringen redusert fra 1900 kjøretøy/time til 1000 kjøretøy/time pr. kjørefelt. Det er ikke mulig å beregne en eksakt kapasitet på det ene feltet som er åpent, så kapasiteten på 1000 kjøretøy/felt er mer ment som et eksempel for å simulere hva som skjer.

Simuleringen viser at en trafikkstrøm på 1500 kjøretøy/time vil kunne skape noen avviklingsproblemer dersom en hendelse medfører en innsnevring fra ett til to felt i en lang stigning. Simuleringene viste, jfr. Figur 50, at den begrensede innsnevringen kunne medføre køer og korte stopp. Køen med saktegående og stillestående kjøretøyer kunne bli opp mot 25 – 30 kjøretøyer. Dette er en situasjon som vil kunne oppstå dersom hendelsen skjer på en fredag i juli mellom kl. 15 og 16 hvilket tilsier at risikoen er relativt liten. Det ble gjort en tilsvarende simulering for en timetrafikk på 1300 kjt/time og denne simuleringen viste ikke de tilsvarende problemene. Trafikken ble avviklet uten køer og forsinkelser.



Figur 50: Redusert kapasitet pga. stigning - innsnevring over en kortere strekning (skjermdump fra SimTraffic)

Oppsummering:

- I åpningsåret kan en regne med at ett tunnelløp kan avvikle all trafikk i begge retninger i de aller fleste tilfellene det er aktuelt å stenge et løp pga. en hendelse eller vedlikehold.

- 20 år etter åpning eller når ÅDT kommer opp i 13.000 kjøretøy/døgn vil det være mulig å avvikle all trafikk i begge retninger i ett løp om natten dersom det er behov for å stenge ett av løpene. Midt på dagen, og spesielt i sommerhalvåret, vil det teoretisk sett ikke være nok kapasitet i ett løp til å kunne stenge den andre løpet uten at det oppstår vesentlige forsinkelser og køer på begge sider av tunnelen.

- Dersom det skjer en hendelse som betyr en kortvarig stenging av et kjørefelt over en kort strekning har simulering av slike situasjoner vist at det ikke vil oppstå vesentlige problemer med trafikkavviklingen, spesielt dersom dette skjer på en strekning med fall eller meget liten stigning. Enhver uventet reduksjon av hastighet og fortetting av trafikken/oppbygging av kø kan imidlertid representere et trafikksikkerhetsproblem.

6.5.4 Planlagte avvik

Hyppighet av vask av tunnelvegger, utstyr og vegbane er avhengig av flere forhold som trafikkmengde, dekktyper, bruk av piggdekk og andel tungtrafikk. Som det angis i tidligere ROS-analyse [1] bør vedlikehold kunne utføres om natten. Dette kan gjøres ved å stenge det ene løpet.

Stengning av et felt for vedlikehold med trafikk i det andre feltet er mulig i forhold til å avvikle trafikken uten kødannelser, men det vil være en risiko for påkjørsel av de som utfører arbeidet. Det kan også medføre redusert fremkommelighet for redningstjenesten dersom utstyr blokkerer det avstengte feltet. Tunnelutforming (for eksempel plassering av lysarmatur) har betydning for mulighet til vedlikehold med stenging av ett felt.

6.5.5 Hyppighet av ikke planlagte avvik

Nedetider og stengingsrutiner varierer mye avhengig av type tunnel, trafikkmengde type hendelse og redningsetatenes og vegvesenets responstid. I toløps/flerfeltstunneler er det vanlig å stenge det kjørefeltet bilen eller objektet er stanset i (kjørefeltsignal) i følge SVV. For Rogfast er dette gjennomførbart i forhold til trafikkavviklingsmessige forhold (det vil ikke bli kø som følge av trafikkmengden) (jfr. kap. 6.5.3). En stenging har så store trafikale og samfunnsmessige kostnader at hele tunnelløp bare stenges ved alvorlige ulykker og brann.

Ikke planlagte avvikssituasjoner (se også Kapittel 3) kan oppstå som resultat av følgende uønskede hendelser:

- Ulykkeshendelser
  - Trafikkulykke
  - Brann/eksplosjon
- Svikt teknisk utstyr
- "Naturhendelser"
  - Oversvømmelse
  - Vanninntrenging
  - Ras

Trafikkulykker og branner vil være de de hyppigste ikke-planlagte avvikssituasjonene (flere ganger pr år), mens tekniske svikt og "naturhendelser" antas å skje sjelden.

Vegdirektoratets programverktøy TUSI er brukt til å beregne antall kjøretøystopp (i forrige versjon av rapport), og dette tall er ikke oppdatert nå. Videre er det nå antall personskadeulykker og brann i tunnelen anslått ved bruk av TRANSIT (se Kapitel 7). Resultatene er angitt i tabellen under. I beregningene er basert på trafikktall (ÅDT 13 000 og ÅDT 900 for henholdsvis hovedtunnelen og Kvitsøy-tunnelen, 15 % tungtrafikk) og geografiske data for tunnelen.

Uønskede hendelser	Antall per år	
Kjøretøystopp:	1495	Ikke oppdatert (uten bidrag fra kryss)
Trafikkulykke med personskade:	5,7	
Brann i lett kjøretøy:	3,9	
Brann i tungt kjøretøy:	5.1	
Sum brann i kjøretøy:	9.0	

Anslår at trafikkulykke med personskade og branntilløp trolig medfører toveis trafikk. Stengning pga ulykker / brann, ca. 5 – 6 per år indikerer er indikasjon på hvor ofte det er behov for å stenge ett løp.

Nedetid ved brann vil være svært avhengig av størrelsen på brannen/branntilløpet. Basert på Amundsens rapport [15] og opplysninger fra leder for VTS i Midt-Norge antas gjennomsnittlig nedetid ved branntilløp i motorrom (hyppigste hendelse) å være 1 time.

Nedetid ved større branner der en får skade på tunnelinstallasjoner og tunnelkonstruksjon kan føre til svært lange nedetider med spennvidde fra uker, måneder til år. Dette viser erfaringer fra inntrufne branner:

a) OSLOFJORDTUNNELEN (Brann i vogntog 23.06.2011). Nedetid 2 uker for personbiler
Brannen er estimert til å ha vært på ca 50 MW. Brannen førte til omfattende skader. Der det har vært stor brannbelastning med høy energi ved brannstedet gir det utslag i [26]:

- Store avskallinger på fem betongelementer (på høyre side fra Hurum), helt inn til første armering.
- Spor av smeltede avstandsholdere for armering.
- Elementfuger er smeltet og det er synlige mindre skader på membran langs fuge.
- Telefonkiosk er utbrent og dør må skiftes.
- Kabelbru og bruoppheng er ødelagt og må skiftes ut i ca 500 meters lengde.
- Fugemasse på en dilitasjonsfuge var smeltet.
- Store skader på asfaltdekke i ca 30 meters lengde
- Innvendig belyste skilt var ødelagte i nærheten av brannstedet

Det ble imidlertid ikke observert skader på:

- Sprøytebetong, bortsett fra en reparasjon etter kjerneboring for ettersikring som var falt ut (kun i et meget lite område maks Ø15cm)
- PE skum bak hvelv/ sprøytebetong.
- Vifter i taket (mer enn 500m til nærmeste fra brannsted)

Anskaffelse av ferdigproduserte betongelement skjedde raskt da en fikk omdirigert betongelementer som var bestilt til en annen tunnel.

Oslofjordtunnelen var i en periode stengt for tungtrafikk etter brannen. Risikoanalyse foreligger, og relevante tiltak er iverksatt. Bl.a. er det innført evakueringsrom per 500 m og et ledesystem for effektiv evakuering.

b) FOLLOTUNNELEN (Brann i Vogntog 10.05.2009). Nedetid 5 uker
Omfattende skade på betongelementer. Nedetiden hadde blitt vesentlig lengre om ferdigproduserte betongelementer til en annen tunnel med samme profil ikke hadde blitt omdirigert.

c) MONT BLANC Tunnelen, 1999 (Brann i 14 vogntog og 9 personbiler) Nedetid 2 år, 39 drepte
Tapt inntekt for tunneleier 203 mill. euro. Reparasjonskostnad 189 mill. euro, Totalt 252.5 mill. Euro (Samfunnsøkonomiske kostnader ikke medtatt.)

d) TAUERN tunnelen, 1999, (Brann i 16 vogntog og 24 personbiler) Nedetid 6 måneder, 12 drepte
Tapt inntekt for tunneleier 20m euro. Reparasjonskostnad 8.5 mill. euro. Totalt 28.5 mill. euro (Samfunnsøkonomiske kostnader ikke medtatt.)

Svikt i teknisk utstyr og "naturhendelser" forventes å opptre sjelden (cf. Kapittel 3):

Uønskede hendelser	Hyppighet
Svikt teknisk utsyr (som gir stenging):	Sjelden (en gang per 11 til 100 år)
Oversvømmelse:	Svært sjelden (en gang per 101 til 1000 år)
Vanninntrenging:	Ekstremt sjelden (sjeldnere enn en gang per 1000 år)
Ras:	Svært sjelden (en gang per 101 til 1001 år)

Ras og vanninntrenging vil kunne gi nedetider fra flere dager til flere måneder. Ras kan i verste fall gi nedetid på inntil et år. Oversvømmelse fra havet kan gi nedetid på mange måneder, kanskje år. Øvrige ulykker gir nedetid fra få timer til få dager.

6.6 Beredskap og styring

6.6.1 Effektivisering av rømning og redning

Generelt
Trafikantatferd ved brann og tiltak for effektiv evakuering er grundig drøftet i en tidligere fase av Rogfast prosjektet [27].

Deteksjon
For å unngå sekundærulykker er det viktig at trafikanter på veg inn i tunnelen, varsles slik at de unngår å komme inn i influensområdet. Systemer for videoanalyse (AID), infrarøde kamera, varmesensorer o.l. er

kritisk for tidlig detektering av hendelser, brann samt stedfesting slik at tid tilgjengelig for informering og selvevakuering blir optimal.

Atferd og tid til selvevakuering
Atferden til trafikanter innenfor influensområdet kan også være avgjørende for omfanget av en ulykke eller eskalering til storulykke. De siste 10-15 år har vi fått økt viten om hvilken atferd vi kan forvente av norske trafikanter ved hendelser i tunnel. Resultat fra spørreundersøkelser viser at ca 80 prosent ville snu bilen og kjøre ut igjen dersom de fikk rødt lys i tunnel. Mellom 4-14 prosent ville stanse og vente, mens en prosent ville kjøre videre. Ved brann eller ulykke vil de fleste trafikanter trolig kjøre nært opp til hindringen Statens vegvesen (1992). Havarilommer, snunisjer eller åpne bergrom, kan bidra til at det vil være lettere å snu i en ettløps tunnel. Ved en toløps løsning kan det medføre risiko både ved å snu mot trafikkretningen eller å kjøre trafikken over i det parallell løpet. Vanligvis må da det parallelle løpet først tømmes for trafikk, men andre trafikkreguleringsvarianter kan fungere forsvarlig, slik det er skissert for kjørbare tverrforbindelser i denne rapporten.

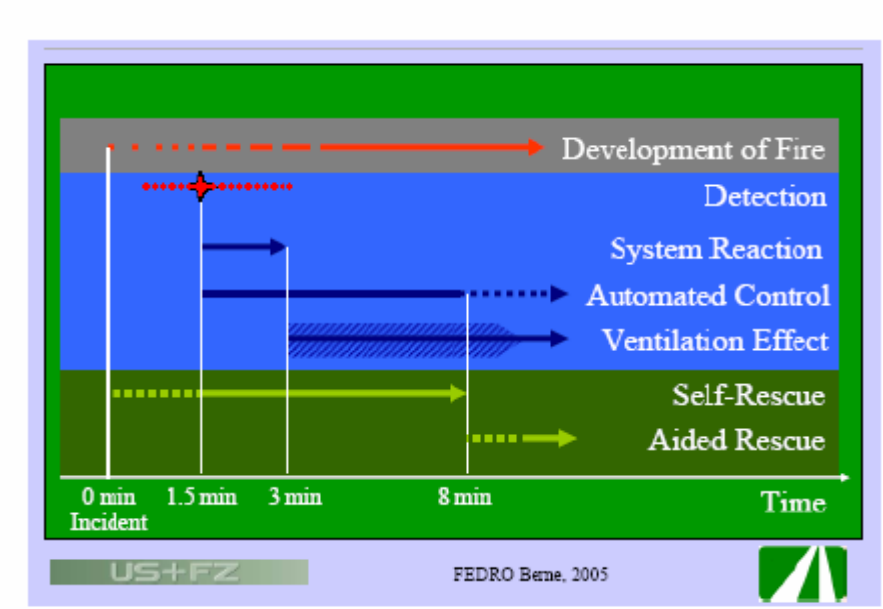
Erfaringer fra simulatorforsøk innen Human Response i EU prosjektet UPTuN viser at av de norske bil- og vogntogførerne som ble fanget nedstrøms i røyken var det bare 20 % som stoppet og ble sittende i kjøretøyet i sikker avstand ved røykfylt tunnel på grunn av brann i vogntog i en virtuell blåkopi av Frøyatunnelen(undersjøisk, toveis trafikk). 17 % stoppet rett ved brannen og ble sittende i bilen. 10 % passerte i forbi brannstedet når det var mulig (ved havarilomme). 5 % kolliderte med vogntoget som brant. Ellers prøvde førere å snu i tunnelløpet eller rygge. Å snu eller rygge var problematisk, særlig etter hvert som sikten ble dårligere. Lignende observasjoner ble registrert i parallelle forsøk i kjøresimulator ved TNO. Dette stemmer med observasjoner og rapporter fra brann i Oslofjordtunnelen (26.07.2011).

Forsøkene i UPTUN (2006) viser at de fleste trafikanter bruker alt for lang tid før de forstår alvoret i situasjonen. På videoopptak fra forsøket ser man at flere trafikanter går ut av kjøretøyet, nærmer seg brannen og stopper opp for å se på. Ikke før flammene blusser voldsomt opp trekker de seg tilbake. Tid fra en brann oppstår til evakuering bør skje, selv med god ventilasjon er knapp, slik som illustrert iFigur 51.

Den tilgjengelige tiden fra deteksjon til en er fanget i røyken og har behov for assistert redning er meget viktig.

Fullskala forsøk i Beneluxtunnelen med øvelsesrøyk i regi av TNO og RWS viste at

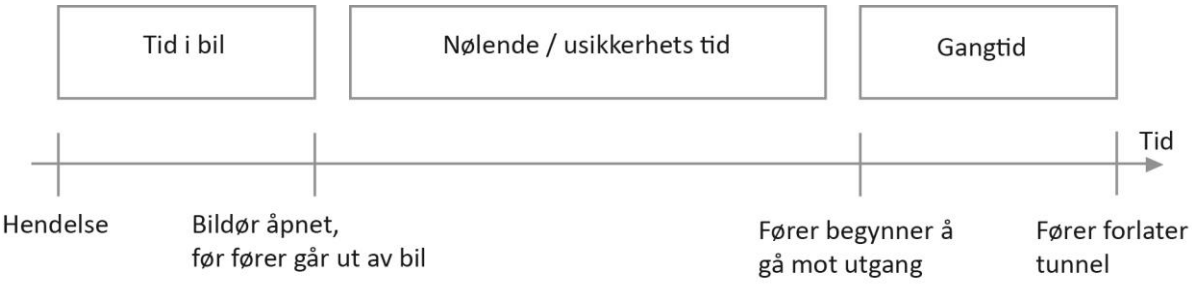
- Hvis andre ikke reagerer, så venter trafikantene i kjøretøyene
- Hvis de evakuerer, kan det hende at de kommer tilbake
- Informasjon om ganghastighet (0,2 m/s) fra gjeldende retningslinjer stemmer ikke. Folk tar med bagasje, venter på andre i gruppen/familie. Noen har bevegelseshemning. Snittet lå på 1,37 m/s, men med stor variasjon.



Figur 51. Tidslinje for effekt av ventilasjon, selvevakuering og assistert redning ved brann (UPTun/Fedro [46]).

Basert på disse observasjonene i eksperimentelle studier og analyser av virkelige tunnelbranner ble modellen nedenfor utviklet.

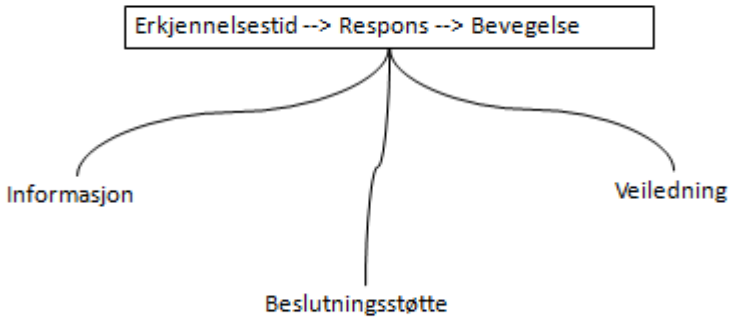
Ut fra modellen og erfaringer i virkelige hendelser er det viktig å sette inn tiltak som kan redusere tid brukt i fase 1: tid i bil og 2: usikkerhetstiden.



Figur 52. Tre stadier i trafikanters evakueringsatferd basert på observert atferd (Kilde: Jenssen 2007)

Skilting

For å redusere tid brukt i de to første fasene (tid i bil og usikkerhetstid) er det viktig med tiltak som sikrer at trafikantene får informasjon, beslutningstøtte (se Figur 53). Når trafikanten har erkjent faren og behovet for å forlate bilen er det viktig med god veiledning til nærmeste rømningsvei (se Figur 54) er det viktig med visuelle, auditive og eventuelt taktile (følbare ved berøring) virkemidler.



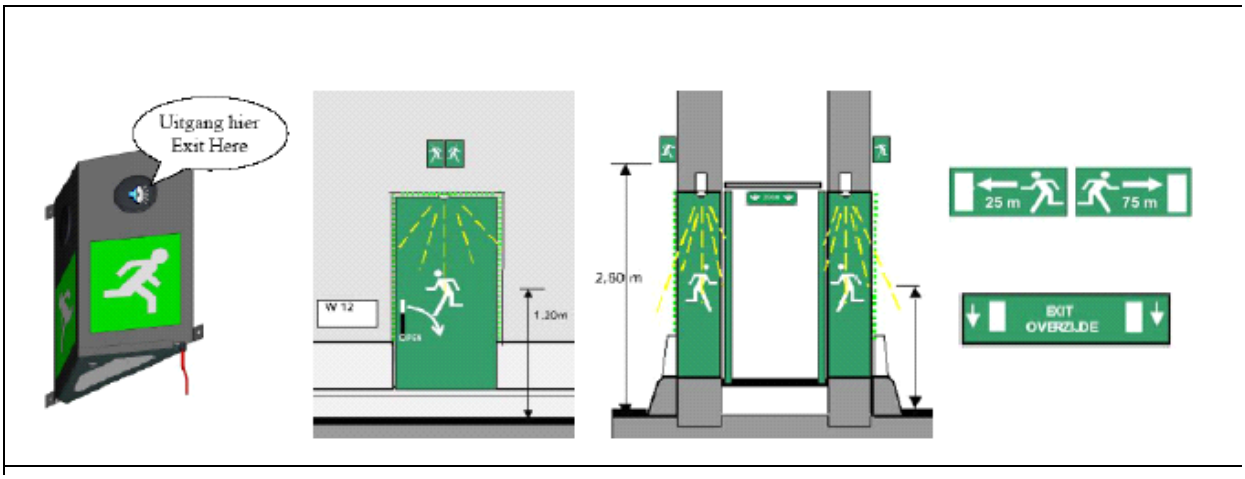
Figur 53. Viktige tiltak for å effektivisere evakuering (Kilde: Jenssen 2007)

I dag gis informasjon til trafikanter hovedsakelig på faste skilt, vegmerking og via i radiofrekvenser. Rømningsveier og nødutganger er vanskelige på finne for trafikanter som er fanget i røyken nedstrøms for brann.

I EU prosjektet UPTuN ble det utprøvd flere varianter av tiltak for å effektivisere evakuering under dårlige siktforhold. En kombinasjon av visuelle og auditive tiltak viste seg å fungere godt. Det var merking av rømningsvei med skilt, merking av rømningsdører med farge og lys (grønt)og beslutningstøtte i for av gjentatte meldinger over høyttaler plassert ved rømmingsdørene med tilsigelsen ”utgang her”.

Det ble imidlertid observert noen problemer med å identifisere retning på lyd fra høyttalere på grunn av støy og tunnelrommets utfordrende akustikk. `Det er nå på markedet høytalerløsninger som er bedre egnet for tunnelmiljø med god retningsbestemt veiledning.

Taktile ledesnor med blinkende LED lys plassert med jevne mellomrom fungerte også tilfredsstillende Dette er en løsning utviklet for bruk i gruvedrift som ennå ikke er tilstrekkelig tilpasset bruk i tunnel.



Figur 54. Eksempler på evakueringskilt, høytalere og markering av rømningsdører fra forsøk i UPTuN (2005).

Sounding boards
Innenfor gruvedrift er det positive erfaringer med såkalte lydbord (sounding boards), hvor underlaget en går på gir en annen lyd utenfor nødrom og nødutganger. Selv i tett røyk vil en kunne oppfatte en endring i underlaget. Kunnskap om at slik endring indikerer nødutganger gir nær 100 % effektiv evakuering til nødrom og nødutganger for de som famler seg fram i røyk.

Ledelys
Hva som er korteste vei til trygt område i en brann i Rogfasttunnelen vil i stor grad være situasjonsbestemt. Merking og skilting må derfor være av en slik art at en ikke leder trafikanter i feil retning. Det finnes avanserte systemer med ledelys som kan slås av og på, og blinke i rett retning avhengig av situasjonen. Det kreves vedlikehold (renhold) for at et slikt system skal kunne fungere optimalt.

For øvrig viser vi til at det pågår et prosjekt i regi av NORDFOU for å optimalisere og standardisere tiltak som for eksempel skilting og merking av rømningsveier i vegtunneler.

6.6.2 Portalbygningene

Portalbygninger inneholder, på mange tunneler, i tillegg til ulike teknisk utstyr, tunnelinstallasjoner og service-fasiliteter en rekke funksjoner direkte knyttet til tunnelens driftsmessige og sikkerhetsmessige forhold. Portalbygninger bør etableres så nær tunnelen som mulig av så vel tekniske som sikkerhetsmesse årsaker.

Portalbygningen tjener blant annet følgende supplerende sikkerhetsmessige funksjoner:

- Serviceforhold for hurtig utrykning og innsats av driftsfolk ved akutte tekniske og sikkerhetsmessige alarmer gjennom styringssystemet i hele tunnelområdet. Et hurtig døgnbemannet utrykningsteam bør være en del av tunnelberedskapen i driftsfasen. Typiske arbeidsoppgaver er eksempelvis assistanse ved havari og motorstopp, oppsamling av tapt gods i tunnelen, utbedring av mindre feil på mekaniske og elektriske installasjoner som har innflytelse på tunnelsikkerheten og assistanse ved uhell. En slik vaktbiltjeneste kan også begrunnes ut fra antall (forventede kjøretøystopp (se Avsnitt 6.5.5).
- Lager av reservedeler og komponenter til bruk for hurtig reparasjon og utskiftning av vitale komponenter i sikkerhetssystemer. Viktige deler bør reparatører ha med seg i bilen.
- Bygningen inneholder som minimum kontor med komplett overvåkingssystem for styringssystem, ITV, IDS, ITS og diverse vedlikeholdssystemer til bruk i den daglige drift.
- Backup system (alternativ hovedsystemet) til styringssystem og trafikkstyring tett på tunnelen (og ulykkesstedet) fungerer og er til rådighet for beredskapstjenesten og politi mv. i tilfelle av større uhell og katastrofer.
- Bygninger, utstyr og øvrige sikkerhetsmessige fasiliteter benyttes til periodevis trening av driftspersonale og personale ved beredskapstjenesten i forbindelse med oppbygning og vedlikehold av kompetanse i bruk av blant annet tunnelens sikkerhetsutstyr
- Byggene benyttes også ved fysiske beredskapsøvelser, jfr. Vedlegg II, pkt. 5 i ”Forskrift om minimum sikkerhetskrav til visse vegtunneler (tunnelsikkerhetsforskriften) samt EU Direktivet.

Der bør om mulig etableres direkte adgang til tunnelen fra portalbygningen.

Foto: PLC systemer plassert i Teknikkbygg.

Foto: Kontrollrom i portalbygning. Monitorering og styring av daglig tunneldrift og vegsikkerhet.

Foto: Kontrollrom i portalbygning. Monitorering og styring av trafikkavviklingen ved døgnbemanning.

6.6.3 Beredskapsbehov i forbindelse med drift og vedlikehold

Som utgangspunkt vil Statens vegvesen få det administrative ansvar og det overordnede koordinerende ansvar i forbindelse med driften av Rogfasttunnelen herunder forhold omkring etablering og opprettholdelse av et nødvendig beredskap til overholdelse av det fastlagte sikkerhetsnivå fra planleggingsfasen til prosjekteringsfasen, over fra konstruksjonsfasen til driftsfasen.

Det er behov for beredskap i forbindelse med drift - og vedlikeholdsarbeider og ved større fremtidige reparasjonsarbeider og utskiftninger av installasjoner.

Normal drifts – og vedlikeholdssituasjon
Det å opprettholde et høyt sikkerhetsnivå krever korrekt forebyggende systematisk vedlikehold av samtlige sikkerhetsfunksjoner i tunnelen. På den bakgrunn skal det bygges en organisasjon som effektivt kan ivareta service og funksjonskontroll samt løpende drifts – og vedlikeholdsoppgaver i en normal driftssituasjon som omfatter alt teknisk sikkerhetsutstyr og øvrige konstruksjoner.

Forebyggende drifts – og vedlikehold utføres erfaringsmessig best som planlagte periodisk arbeid, typisk 4 ganger om året. For Rogfasttunnelen vil slikt arbeid best kunne plasseres i perioder med lav trafikk, dvs. fra sent om kvelden til tidlig morgen (kl. 20.00 til kl. 5.00 eksempelvis).

Trafikkavviklingen skjer i disse perioder som toveis trafikk med helt eller delvis lukking av et løp og bruk av kjørbare tverrforbindelser i størst mulig utstrekning. På bakgrunn av tunnelens lengde og geometri antas disse perioder å ha en erfaringsmessig varighet på minst 2 x 5 arbeidsdager, jfr. referanse til bl.a. danske og andre europeiske tunneler på TERN vegnettet samt PIARC publikasjon [45].
Beredskap i forbindelse med typiske drifts – og vedlikeholdsperioder er stort sett som ved en normal trafikksituasjon. Ved hjelp av ITV og styre- og overvåkingssystemet overvåkes tunnelen av driftsmannskapet når dette arbeidet pågår. Dette fordi omfattende toveis trafikk oppstår i ett løp, men med redusert hastighet samt iverksatt høyt informasjonsnivå til trafikantene gjennom bruk av trafikledelsessystemet (ITS).

I tillegg er det løpende drifts – og vedlikeholdsarbeidet av typisk mindre varighet som 2 – 4 timer eller mindre som kommer fra informasjon og alarmer gjennom styre- og overvåkingssystemet. Slikt arbeid skal, hvis de er kategorisert som tekniske alarmer med innflytelse på sikkerheten, normalt håndteres innen kort tid, dvs. samme døgn som de er registrert. Alle andre tekniske alarmer kan utbedres snarest mulig/ved leilighet eller utsettes til de periodevise drifts – og vedlikeholdsperioder.

Beredskap ved løpende drifts – og vedlikeholdsarbeider av kortere varighet skjer typisk ved bruk en utrykningsenhet (eventuelt tilkalt 24 timer i døgnet). Utrykningsenheten kan på kort varsel (maks. 15 minutter) kjøre ned i tunnelen og utbedre de tekniske problemer eller varsle kontrollrommet om nødvendige trafikkrestriksjoner og beskjeder, som skal utføres ved hjelp av ITS og trafikkledersystemene på bakgrunn av den tekniske alarm. Arbeidene utføres normalt ved sperring av et kjørefelt (høyre tunnelside) eller helt sperring av et løp (venstre tunnelside) omkring arbeidsstedet. De kjørbare tverrslagene kan også anvendes, hvis det vurderes nødvendig.

Hyppigheten av arbeider er gjerne daglige foreteelser. I henhold til erfaringer fra andre norske, danske og europeiske vegtunneler må det antas for Rogfasttunnelen at det er behov for 1-2 slike utrykningsenheter med 24 timers standby /døgnvakt som utgangspunkt stasjonert i umiddelbar nærhet til tunnelen.

Foto: Typisk drift og vedlikeholdsarbeid i tunnel. Reparasjon av asfalt.

Foto: Typisk drifts – og vedlikeholdsarbeider. Tunnelvask.

Større reparasjoner og utskiftninger

Erfaringsmessig skjer der først større reparasjoner av tunnelens hovedkonstruksjoner etter 20 – 25 år i bruk. Disse reparasjonene kan alltid planlegges i god tid, hvis det er implementert et effektivt ettersyns- / inspeksjonssystem. Trafikkavviklingen vil kunne skje som toveis trafikk i ett løp ved stengning av deler eller et helt løp over uker eller i verste fall måneder, avhengig av reparasjonens omfang. De kjørbare tverrforbindelsene kan her effektivt benyttes til å minimere de trafikale påvirkninger på tunnelens sikkerhet ved disse arbeider, samt en forbedring av fremkommeligheten når arbeidene pågår.

Utskiftning av elektriske og mekaniske komponenter i tunnelen skjer erfaringsmessig løpende, og begynner 5 – 10 år etter åpningen. I forbindelse med implementering og varsling fra et moderne styre- og overvåkingssystem og et effektivt inspeksjonssystem kan den tunnelansvarlige ved en etterfølgende fornuftig planlegging begrense varigheten av disse utskiftningene. De kan foretas enten som serieutskiftninger gjennom hele tunnelen eller i seksjoner av tunnelen.

Beredskapsforhold i forbindelse med reparasjon av tunnelens konstruksjoner og utskiftninger av vitale mekaniske og elektriske installasjoner av lengre varighet skal planlegges omhyggelig av Statens vegvesen i samspill med regionvegkontoret, redningstjenester og politi. Det må forventes skjerpet beredskapsforhold i disse perioder.

Andre typiske driftsscenarier
Erfaringer fra mange andre vegtunneler i drift i så vel Norge og Danmark som i andre europeiske land indikerer at de fleste typiske hendelser i en normal driftssituasjon uten alvorlige personskader er:

- Motorstopp / Havari
- Tapt gods på kjørebanen
- Teknisk svikt i vitale mekaniske – og elektriske installasjoner på komponentnivå
- Mindre uhell ved påkjørsel bakfra
- Påkjørsel i fjellvegg /tunnelvegg (alene uhell)
- Mindre brann i en personbil (< 5 MW)

Samtlige hendelser vil i det daglige kunne håndteres av den normale beredskapen som er tilknyttet Rogfasttunnelen. Alle hendelser detekteres og registreres hurtig gjennom IDS, ITV og styre- og overvåkingssystemene meget effektivt i løpet av ca. 30 – 60 sekunder. Personalet i kontrollrommet kan i etterkant vurdere behovet for innsats i løpet av få minutter og om nødvendig foreta nødvendige trafikale omlegginger.

De nevnte scenarier forekommer ganske hyppig på dag/ukebasis og utgjør ikke noen vesentlig sikkerhetsmessig risiko, idet både beredskap- og driftspersonale er grundig trent for å håndtere slike hendelser i kombinasjon med de effektive monitorering- og informasjons systemer, som er til rådighet.

Alle typiske driftsscenarier beskrives i de utarbeidede beredskapsplaner med etterfølgende prosedyrer og instrukser for samtlige deltagere i innsatsen inklusivt myndigheter.

Inspeksjoner
Tunnelinspeksjoner for en så vidt komplisert tunnel som Rogfast skjer best ved implementering og bruk av et samlet effektivt inspeksjonssystem, som hele tiden kan opplyse om tilstanden av vitale sikkerhetsmessige konstruksjoner, komponenter og utstyr.

Følgende inspeksjoner utføres typisk jevnlig:

- Rutineinspeksjoner/ettersyn av driftspersonale fra bil; (hyppighet 1 til 2 gange om uken)
- Vedlikeholdsinspeksjoner / ettersyn i forbindelse med periodiske drifts – og vedlikeholdsarbeider (hyppighet 4 gange årlig) til sjekk og kontroll av funksjonsdyktighet
- Generalettersyn (visuelt ettersyn av hele tunnelen mellom 1- 5 år avhengig av tilstand, det vil si alle konstruksjonselementer samt alle mekaniske og elektriske komponenter for registrering av bl.a. tilstand, forventet levetid, økonomi ved reparasjon/utskiftning)
- Særettersyn (utføres når generalettersyn ikke er tilstrekkelig for å bestemme bl.a. tilstand, omfang av skader, årsaker og økonomi)

Som idégrunnlag for oppbygning av et inspeksjonssystem henvises blant annet til beskrivelser i ”Håndbok 269, Sikkerhetsforvaltning av Vegtunneler, Retningslinjer, Statens vegvesen”.

De nevnte rutinemessige/regelmessige inspeksjoner utføres best av de tilknyttede ”driftsteams” ved å kjøre gjennom tunnelen i begge løp inklusive armen til Kvitsøy gjerne 2 ganger ukentlig for registrering av usedvanlige hendelser eller plutselig oppståtte skader og mangler.

Vedlikeholdsettersyn utføres best av det personale, som er tilknyttet drifts – og vedlikeholdsarbeidene.

Generalettersyn kan utføres av Statens vegvesen / Regionskontorets personale. Særettersyn utføres typisk av spesialister innenfor det felt ettersynet omhandler.

Foto: Utførelse av særettersyn av spesialister

Beredskapsplaner
For anlegg og drift av tunnelen skal det utarbeides beredskapsplaner, som i prinsippet er en avtale mellom tunnelens eier (her Statens vegvesen) og de redningstjenester, som benyttes i forbindelse med innsatser ved uhell, brann og katastrofer i tunnelområdet.

Gjennom beredskapsplaner beskrives ansvarsfordelingen for minimum Forvaltningsmyndighet, Tunnelforvalter og Sikkerhetsforvalter (se Tunnelsikkerhetsforskriften og Håndbok 269) samt politi, brann- og redningstjenesten og sykehus, når det oppstår uønskede hendelser i tunnelen.

Beredskapsplaner består i hovedsaken av fem deler:

- En beskrivelse av tunnelen, utstyr i tunnelen, fremrykningsveger, redningsveger, adgangsforhold, alternative omkjøringer for trafikk og disponibelt innsatsutstyr
- En risiko – og sikkerhetsanalyse
- En beskrivelse av viktige scenarier med innsatsplaner, prosedyrer og instrukser for hver innsatsenhet
- En beskrivelse av beredskapsøvelser
- En beskrivelse av forholdene vedrørende trening og undervisning av mannskap hos tunnelberedskapen.

Beredskapsplaner utarbeides på et tidlig tidspunkt under planleggingen av tunnelen og revideres løpende etter behov. Det er viktig at en beredskapsplan er enkelt å anvende, og at det jevnlig avholdes øvelser og trening av innsatsstyrker.

I en beredskapsplan skal det også vurderes hvordan transport av farlig gods skal håndteres, og om det skal innføres restriksjoner for denne type av transporter.

Denne ROS analysen inkluderer ikke utarbeidelse av beredskapsplaner for Rogfasttunnelen.

For mere informasjon om beredskapsplaner etc. henvises til EU Direktivet 2004, Tunnelsikkerhets-forskriften 2007, samt Håndbok 269.

6.6.4 Ulykkesberedskap

Som en del av sikkerhetskonseptet skal Rogfasttunnelen blant annet planlegges og prosjekteres slik at mekaniske og tekniske installasjoner og sikkerhetsutstyr til overvåkning blir seksjonert for å sikre at en katastrofesituasjon kun medfører partiell ødeleggelse av belysningsanlegg, nødtelefonanlegg, ventilasjonsanlegg, strømforsyning, trafikkreguleringssystemer og brannslukningsanlegg.

Generelt må sikkerhetsmessige tiltak i tunnelen etableres slik at 1) personer som er innblandet i uønskede hendelser er i stand til å redde seg selv, 2) gjøre det mulig for trafikantene å yte øyeblikkelig innsats for å forebygge mer omfattende konsekvenser, 3) sikre en effektiv innsats fra redningstjenestene, 4) beskytte miljøet mest mulig og 5) minimere materielle skader, jfr. EU Direktivet av 29. april 2004.

For øvrige forhold omkring ansvar, rolle og oppgavefordeling mellom Statens vegvesen, regionvegkontoret, redningstjenester, entreprenører og andre som skal utføre arbeider i tunnelen henvises til:

- Tunnelsikkerhetsforskriften av 15 Mai 2007, Samferdselsdepartementet
- Håndbok 269, Sikkerhetsforvaltning av vegtunneler, Retningslinjer, Statens vegvesen.

Når det gjelder beredskap ved katastrofesituasjoner og andre uønskede hendelser tenker en blant annet på scenarier som:

- Brann og eksplosjonsulykker
- Utslipp og lekkasje av farlige stoffer / giftige gasser
- Oversvømmelse (vanninntrengning / flom)
- Ras
- Møteulykker
- Velt.

Det samlede forløp i en ulykke (med brann som eksempel) er:

- Deteksjon
- Instrukser fra VTS til bilistene, evt. om evakuering til annet tunnelløp, (må ivareta evt. konflikter med trafikken her; da tunnelen er 25 km lang, kan det gå lang tid før alle biler er kjørt ut av det andre tunnelløp).
- Brann- og redningstjeneste kommer til brannstedet avhengig av plassering av brannen.
- Evakuering av personer, som ikke kan kjøre ut i egne biler.

Til tunnelen skal tilknyttes en beredskap bestående av myndigheter som politi, brann- og redningstjeneste. Statens vegvesen inngår avtaler med de involverte myndigheter i forbindelse med trafikkproblemer både i den normal driftssituasjon og ved avvikssituasjoner.

Prosedyrer og instrukser
For å sikre en hurtig og effektiv innsats ved katastrofer og andre uønskede hendelser, skal det utarbeides utrykningsinstrukser for i det minste politi og brann- og redningstjenesten. Instruksene skal inneholde fastlagte prosedyrer for innsatsområder, adgangsforhold, fremrykningsveger, redningsveger mv. i forhold til uhellets omfang og plassering i tunnelen.

Politi og brann- og redningstjenesten fastsetter vanligvis selv sine optimale krav til utrykningstider (responstider) i forbindelse med uhell, brann og katastrofer. Det er normalt, at byggherren/eier (her Statens vegvesen) drøfter med de involverte parter omkring mulige realistiske responstider.

Som minimum utarbeides prosedyrer for håndtering av scenarier som trafikkuhell, havari, brann, utslipp av farlige stoffer og transport av farlig gods gjennom tunnelen.

Beredskapsøvelser
Tunnelforvalteren og redningstjenestene skal, i samarbeid med sikkerhetskontrolløren, jevnlig arrangere felles øvelser for de som blir involvert i egen etat og redningstjenestene (i henhold til HB 269). Dette for å utprøve og eventuelt forbedre de utarbeidede instrukser og prosedyrer, funksjonsteste og anvende de tekniske installasjoner og teste hvorvidt kommunikasjonen mellom de involverte parter i nødberedskapen forløper tilfredsstillende i forbindelse med katastrofer og andre uønskede hendelser.

I henhold til EU Direktivet av 29. april 2004 (bilag II, pkt. 5a) og Tunnelsikkerhetsforskriften (pkt. 5) skal det avholdes en naturlig fullskala øvelse i tunnelen minst hvert fjerde år, som er så realistisk som mulig. I perioder mellom disse øvelser kan det avholdes skrivebords – og computersimulerings-øvelser etter behov. Krav til opplæring, trening og øvelser er grundigere beskrevet i Håndbok 269, kapitel 16.

Alle øvelser skal i etterkant evalueres av tunnelens driftsledelse, sikkerhetsledelse og redningstjenestene i fellesskap. Der udarbeides en rapport med eventuelle forslag til forbedring av instrukser og prosedyrer, tekniske installasjoner og fremtidige ønskelige øvelsesscenarier.

Foto: Beredskapsøvelse i vegtunnel. Fullskala øvelse.

Foto: Beredskapsøvelse og trening av personale. Fullskala.

6.6.5 Tiltak for redusert responstid

Tiltak for å redusere responstiden ved innsats
Til informasjon opplyses at responstiden f.eks. i Danmark av det politiske system som utgangspunkt er satt til 10 minutter for veitunneler. Beredskapsmyndigheter setter selv krav til responstider under normale forhold (forhandling mellom vegmyndighet og beredskapsetater). Disse følger normalt disse 10 minutter. Andre europeiske land vi kan sammenligne oss med bruker også 10 minutter som utgangspunkt. Men det er i Norge ikke fastsatt generelle responstider for tunneler.

Responstiden defineres som: Tiden fra alarm går til innsats begynner i tunnel (og ikke tiden fra uhellet inntreffer).

Foto: Mont Blanc Tunnelen (F/I): Innebygget 24 timers bemannet brannstasjon midt i tunnel med spesialbygget slukningskjøretøy

Rogfast får relativt lange responstider (Avsnitt 2.2). Følgende forslag er defor foreslått vurdert

- Ny brann (rednings)tjeneste ved en tunnelmunning
- Egen vegtrafikksentral for (undersjøiske) tunneler i området

Følgende argumenter og tiltak anføres:

- Som utgangspunkt skal beredskapen etableres så tett som mulig på tunnelportal og ha fri tilkjørsel til tunnelramper og tunnelløp kort tid etter at tunnelstengning er iverksatt. (Eksempelvis, for Elb Tunnel, Hamburg er beredskap etablert over tunnelportal med separate tilkjørselsforhold med døgnovervåkning, 24 timer hele året. I danske vegtunneler ligger Politi og Beredskap i kort avstand til tunnelramper.)
- Alternativ kan beredskap etableres inne i selve tunnelen som ved Mont Blanc Tunnelen (F/I) med 24 timers mannskap klar til innsats 365 dager i året. Se fotos.
- Etablering av et effektivt trafikreguleringsanlegg med moderne ITS utstyr i hele tunnelområdet til forbedring av tilkjøringsforhold for beredskap og for tømming av tunnelløp hurtigst mulig, og samtidig gi bilister nødvendig informasjon om trafikksituasjonen.

6.6.6 Oppstillingsplass og fergeberedskap

Det er flere scenarier som medfører behov for oppstillingsplasser foran tunnelåpningen. De viktigste vil være:

- Trafikken skal enveis-reguleres i kolonner i ett løp som et alternativ til toveis trafikk i ett løp. Merk at det kan være kritisk med kolonnekjøring med blandet trafikk, i det tunge kjøretøy kan risikere å kjøre meget langsomt opp 5 % stigningen i tunnel, noe som kan skape lang kø. Dette er et argument for at tunge kjøretøy og kjøretøy med farlig gods forbys i kolonnekjøring med alminnelig trafikk.
- Det foretas tilfartsregulering av trafikk, pga. manglende kapasitet når ett løp er stengt, og det er toveis trafikk i det andre løpet.
- Det innføres restriksjoner på tunge kjøretøyer slik at tunge kjøretøyer må vente utenfor tunnelen i periodene med restriksjoner. Behovet for oppstillingsplasser kan reduseres ved å installere informasjonssystemer som varsler førere av tunge kjøretøyer mens de enda har mulighet til å snu før tunnelen.
- Det skal innføres begrensninger i antall tunge kjøretøyer med farlig gods (FG) som får være samtidig i tunnelen, slik at ett eller flere kjøretøyer må vente. Behovet for oppstillingsplasser kan reduseres ved å installere informasjonssystemer som varsler førere av kjøretøyer med farlig gods mens de enda har mulighet til å snu før tunnelen. Kontroller, spesielt av FG kjøretøy vil også kreve plass.
- Det er skjedd en ulykke som betinger oppstillingsplass for utrykningskjøretøyer i dagsonen ved tunnelåpningen. Landingsplass/oppstillingsplass for rednings/ambulansehelikopter krever også areal.
- I tilfelle ulykke kunne det også være behov for oppstillingsplass til den alminnelige trafikk, men en må her anta at dette vil skje i på vegen idet tunnelen lukkes, samt at det må legges til rette for at kjøretøyene kan snu. I dette tilfelle kan behovet for oppstillingsplasser også reduseres ved å installere informasjonssystemer som varsler førere av kjøretøyer, mens de enda har mulighet til å snu før tunnelen.

I noen av scenarioene vil det være behov for separate oppstillingsplasser, mens i andre scenarioer vil det være mulig å bruke deler av vegen til oppstilling. Et eksempel på det siste vil være at ved kolonnekjøring vil det ene av de to feltene som går inn mot tunnelen kunne brukes til oppstilling uten at dette skaper noen problemer mht. fremkommelighet for utrykningskjøretøyer med mindre slik kolonnekjøring skjer i dimensjonerende time og strekningen med 2 + 2 felt er for kort til å være kømagasin for kolonnekjøringen. Dersom kolonnekjøringen skjer i dimensjonerende time 20 år etter åpningstid vil følgende kølengder kunne oppstå:

- Med en dimensjonerende timetrafikk på 1.800 kjt/time og retningsfordeling på 60/40 vil det være en etterspørsel på kapasitet i største retning på 1.800 x 0,6 = 1.080 kjt/time.
- Dersom en antar en trafikkregulering som går ut på 5 minutter grønt i en retning – tømming av siste bil i kolonnen på 20 minutter – 5 minutter grønt i motsatt retning – 20 minutter tømming av siste bil i kolonnen, vil dette gi et omløp på 50 minutter. Med en tidsluke på 3 sekunder mellom kjøretøyene vil en i løpet av 5 minutter kunne avvikle 100 kjøretøyer. Fra siste bil i en retning får kjøre til første bil i samme retning får kjøre vil det gå 20 + 5 + 20 minutter. I løpet av disse 45 minuttene vil det ankomme 1.080 x ¾ = 810 kjøretøyer hvilket er ca. 700 kjt. mer enn det som kunne avvikles på et omløp. Dersom grønntiden er 25 minutter vil det kunne avvikles 500 kjt på denne tiden (egentlig mindre fordi en ikke kan regne samme effektive avvikling over en så lang periode). Fra siste bil i en retning får kjøre til første bil i samme retning får kjøre vil det gå 20 + 25 + 20 minutter. I løpet av disse 65 minuttene vil det ankomme 1.080 x 1,08 = 1.166 kjøretøyer hvilket er ca. 670 kjt. mer enn det som kunne avvikles på et omløp. Det vil si at det fort vil bygge seg opp køer på mange kilometer uavhengig av lengden på grønntiden. Det vil ikke hjelpe noe særlig å avvikle trafikken i begge felt i tunnelen, fordi det vil være avviklingen av køen som er oppstilt utenfor tunnelen i ett felt som dimensjonerer avviklingen. En kan også tenke seg at en har en litt kortere grønntid i minste retning, men en vil allikevel ikke kunne forhindre en relativt rask oppbygging av køer på begge sider av tunnelen.

Denne forenklede kapasitetsbetraktningen viser følgende:

- En-veis trafikk i et løp som alternativ til toveis trafikk i ett løp bør unngås. Det bør finnes løsninger som tillater toveis trafikk i ett løp, spesielt på tider av døgnet med stor trafikk
- Det bør være gode snumuligheter for trafikantene, både ved tunnelåpningene og andre steder ved tilfartene til tunnelene. Disse snumulighetene bør bare åpnes når det virkelig er behov for det slik at snuingen kun skjer ved spesielle situasjoner og under kontrollerte forhold.

Behovet for oppstillingsplass for tunge kjøretøyer er foreløpig grovt anslått til oppstillingsplass for 10 vogntog. I noen tilfeller vil det kunne oppstå behov for flere plasser, men da må en kunne ta i bruk det ene feltet av de to som går inn mot tunnelåpningen. Med oppstillingsplass til et så lite antall tunge kjøretøyer er det viktig at det etableres rutiner og systemer som gjør det mulig å omdirigere/stoppe tunge kjøretøyer før de kommer frem til tunnelåpningen. Dette kan skje gjennom informasjonssystemer og tilrettelegging av snuplasser for tunge kjøretøyer inn mot tunnelåpningen. Oppstillingsplass til 10 vogntog vil fort kunne kreve nærmere 2 mål inkludert manøvreringsareal inn/til oppstillingsplassen. På Kvitsøy ansees det tilstrekkelig å ha oppstillingsmuligheter til 2 – 3 vogntog (0,5 mål).

Med hensyn til oppstillingsplass for lette kjøretøyer vil det være meget plasskrevende og etablere oppstillingsplasser for disse. Ved store trafikkstrømmer og alvorlige hendelser vil det fort bygge seg opp køer på mange hundre meter, i verste fall flere kilometer. Det er derfor like viktig å etablere gode informasjonssystemer som kan stoppe og/eller omdirigere trafikken. Det bør etableres snuplasser på veg inn mot tunnelåpningen, f.eks. hver 500 meter, slik at en lettere får avviklet lange køer som måtte bygge seg opp ved hendelser som enten stenger ett tunnelløp eller som forårsaker redusert kapasitet.

Det vurderes på bakgrunn av diskusjon i avsnitt foran og driftserfaringer fra eksisterende vegtunneler, at det ikke er noe umiddelbart grunnlag for å opprettholde beredskapsfergeleier i forbindelse med drifts – og vedlikeholdssituasjonen samt ved større reparasjons – og utskiftningsarbeider i fremtiden. Det anbefales allikevel at fergeleier vedlikeholdes, og at et visst fergeberedskap opprettholdes for å møte behovet ved større ulykker (brann, oversvømmelse,…).

Ved en effektiv planlegging og utnyttelse av de trafikale muligheter, som stilles til rådighet slik som kjørbare tverrslag, etablering av et moderne trafikkledelsessystem, moderne overvåkningssystemer i form av styresystem, ITV (Intern tv) og IDS (Hendelsesdetekteringssystem), andre sikkerhetsmessige tiltak som blant annet nedsatt hastighet ved toveis trafikk i tunnel, forbikjøringsforbud, bergrom og LED belysning på tunnelvegg i forbindelse med Rogfast, vurderes det at trafikken vil kunne avvikles på en sikker og hensiktsmessig måte i forbindelse med drifts – og vedlikeholdsarbeider samt større fremtidige arbeider.

Det vurderes også at stengning av hele tunnelen i forbindelse med drifts – og vedlikeholdelsesarbeider, inkl. større reparasjonsarbeider og utskiftninger av vitale komponenter kun vil forekomme med en minimal hyppighet og ytterst sjeldent ha en varighet utover ganske få timer. Deretter vil trafikken kunne avvikles i det minste i det andre løp eller i større deler av hele tunnelen ved effektiv bruk av kjørbare tverrforbindelser. En total stengning over et eller flere døgn i forbindelse med drifts – og vedlikeholdsarbeider anses ikke å være et realistisk scenario.

6.7 Sammendrag av kvalitative vurderinger og tiltak

Her presenteres en del viktige sammenfatninger av kvalitative diskusjoner foran.

Antall løp til Kvitsøy
Løsning med T10,5 med ”rumlefelt” vil redusere ulykkesfrekvensen. Betydelig effekt av separat evakueringsveg (evakueringstunnel eller nødgalleri) for spesielle brannscenarier. På grunn av meget lav trafikk (ÅDT = 900) i denne armen vil total risikoeffekt bli beskjeden, men gir betydelig bedret sikkerhet for personer eksponert av brann. Betydelig effekt av to løp, (2xT9,5) for spesielle scenarier. Betydelig kostnad, men ventilasjonstårn på Kvitsøy antas å utgå.

Hvis en ikke aksepterer mulighet for røyklekkasje fra ett hovedløp til det andre står en igjen med to opsjoner, enten to løp til Kvitsøy, koblet opp mot hvert sitt hovedløp, slik at begge løp har toveis trafikk, evt. fire løp i armen til Kvitsøy. Begge får en noe komplisert fletting ved utløp til Kvitsøy. Fire løp anses her uaktuelt.

Ved plassering av havarinisje tvers ovenfor hverandre kan dette benyttes som snumulighet.

Krabbefelt
Krabbefelt i stigning som er lik eller overstiger 5 % vil ha betydning spesielt ifm motorstopp i stigning, og ved avvikling av toveis trafikk i ett løp (krabbefelt oppover og nedover). Større tverrsnitt gir seinere røykfylling.

Øking skulderbredden fra 1,00 m til 2,00 m i høyre side av tunnel gir følgende fordeler:

- Forbedret sikkerhetsmessige forhold ved åpning og bruk av nødstasjoner ved kjørende trafikk
- Forbedret forhold under brann (røykutvikling)
- Forbedret handicapvennlighet i forbindelse med evakuering

- Forbedret plass til drifts – og vedlikeholdsarbeider generelt
- Forbedret forhold ved havari eller annen form for midlertidig stopp utenfor havarinisjer, (personbil kan parkere kortvarig langs tunnelvegg)
- Psykologisk effekt ved forbedret komfort for bilister, (opplevelsen av trygghet blir større jo større avstand det er til faste gjenstander)
- Ingen reduksjon av kapasiteten (bredde > 1,80 m)
- Kan evt. benyttes til forbedret plass til plassering og innbygging av tunnelinstallasjoner.

Frihøyde
Foreslår å øke frihøyden på tunnelen fra 4,80 m til 5,00 m. Gir mulighet for fremtidige installasjoner, og større kjøretøy i fremtid. Dette har ingen/begrenset sikkerhetsgevinst.

Gangbare tverrforbindelser
Gangbare tverrforbindelser mellom tunnelløp (nødutgang). Her forslås avstand 125 m istedenfor 250 m (evt. variasjoner; avhengig av stigning). Vurderes å gi signifikant bedret sikkerhet i alvorlige brannscenarier (e.g. med buss). Vurderes også kvantitativt.

Innføring av kjørbare tverrforbindelser gir sikkerhetsgevinst. Foreslått antall fra 3-5 (dvs. ca. hver 5-6. km til ca hver 3-4. km). Tverrprofilen og vinkelen mellom hovedløp og tverrforbindelser må være slik at det tillater vogntog/semitrailere å benytte tverrforbindelsene i begge retninger, dvs. fungere som et vanlig reversibelt felt. Denne trafikkreguleringen kan brukes når det ikke er for stor trafikk i tunnelen. Ordningen vil kreve en del utstyr i tunnelen: fjernstyrt fullautomatiske bommer, brannporter, dynamiske informasjonstavler og kjørefeltsignal aktivert fra styringssystemet for å få til fletting av to felt til ett. Det må også være mulig å sette ned fartsgrensen på strekninger med to-vegs trafikk. Det skal dokumenteres at ventilasjonen virker ifm brann.

Utform av kryss er en utfordring i forhold til å hindre røykspredning mellom tunnelløpene. Tre kryssløsninger er vurdert.
De to toplansalternativene (som rundkjøring og ruterkryss) og treplanskrysset er relativt like mht. risiko for ulykker ved av- og påkjøringsrampene, men rundkjøring og ruterkryss vil medføre en risiko for ulykker selv om alvorlighetsgraden ved ulykkene vil være lav pga. lave hastigheter. Viktigste ulempe for rundkjøring og ruterkryss er at det synes å medføre større utfordringer for røykkontroll ved brann i kryssområdet.

Ved en normal trafikksituasjon vil en rundkjøring bety en vesentlig forbedring mht. snumulighet for trafikanter som av en eller annen årsak må eller ønsker å snu i tunnelen. Også for utrykningskjøretøy vil dette kunne bety en vesentlig forbedring mht. tilgjengelighet til et ulykkessted.

I en situasjon hvor ett løp stenges og krysset skal fungere slik at alle svingebevegelser tillates har treplanskrysset en ulempe ved at det må utvides til femplanskryss. Ruterløsningen synes å være den løsningen som i en slik situasjon gir mest logisk kjøremønster for trafikantene. Med rundkjøring må toveis trafikk foregå i halve rundkjøringen.

Følgende tiltak kan være aktuelle å gjennomføre ift biler som kommer fra Kvitsøy mot kryss:

- Varsling til bilføreren om kjøretøyets hastighet ved hjelp av radar og VMS
- Visning av anbefalt hastighet gjennom kurven inn mot E39
- Rumlefelt/rumlestriper
- Hindermarkeringer – statisk ved hjelp av faste skilt eller dynamisk ved hjelp av LED lys eller tilsvarende
- Spesiell belysning – endring i luminansnivå.

Bergrom
Kjøring i lange tunneler kan føre til økt trøtthet, uoppmerksomhet og angst. Ulykker på grunn av søvnighet og uoppmerksomhet har ofte høy alvorlighetsgrad. Bergrom bør i henhold til HB 021 kap. 3.11.3 bygges i lange tunneler

Forslaget her er at en har

- Bergrom ved profil 8.000
- Bergrom som en del av kryssløsningen med arm fra Kvitsøy, profil 14.500
- Bergrom nord for lavbrekk ved profil 18.000
- Bergrom i den lengste stigningen ved profil ca 22.500. Dette bergrommet vil også kunne ha en sikkerhetsfremmende effekt ved at det legges omtrent midtvegs i den lange bratte stigningen.

Bergrom i krysset og utforming av dette bør vies spesiell oppmerksomhet. Anbefalt lengde på bergrommene er 200 m, bredde 25 m og høyde ca 12 m (basert på tidligere erfaring).

Portalområdet
Utforming av portalområdet kan ha betydning for vanninntrenging i tunnelen, og tiltak bør vurderes for å redusere faren for oversvømmelser i tunnelen:

- Utarbeides drenasjesystem for området rundt tunnelportalene for regnvann og kombinasjoner av regnvann og pumpesvikt med sannsynlighet en gang hvert 100 år (muligens en hvert 1000 år).
- Diker kan være et tiltak for å beskytte mot oversvømmelse pga springflo og bølger.

Ventilasjonssystem
Et godt fungerende ventilasjonsanlegg installeres ut fra en rekke faktorer:

- Samvirke mellom ventilasjonens trekkraft og naturlig trekkretning, rampenes påvirkning, trekk fra trafikken, brannens oppdriftskrefter. Spesielt kan det å styre røyken i krysset være utfordrende.
- Verdifull tid kan gå tapt når en skal lokalisere brannen og bestemme ventilasjonsretning. Rask handling krever at en har et pålitelig system for lokalisering av brannen. Dersom en ikke har kontroll med hvilken retning passasjerene evakuerer, kan start av vifter/endring av ventilasjonsretning et stykke ut i brannforløpet medføre at passasjerer som i utgangspunktet går i sikre soner får røykstrømmen i sin evakueringsretning. Dette er spesielt kritisk når endring av ventilasjonsretningen utsettes i tid. Når røyken har fått høy konsentrasjon må det unngås at den sendes over personer er i sikrere soner.
- Det foreligger en fare for spredning av røyk fra det ene hovedløpet til det andre via rampene. Det antas at ventilasjonsanlegget alene ikke gir en pålitelig nok løsning, men at det i tillegg må benyttes fysiske barrierer som brannporter.
- Mulighet for spredning av røyk fra det ene hovedløpet til det andre via tverrforbindelser i avvikssituasjon med toveis trafikk i et løp av tunnelen.
- Mulighet for spredning fra ene hovedløp til andre via portal foreligger også. Kan motvirkes ved å vende ventilasjonsretning i sikre løp, slik at den går i samme retning i begge løp. Evt. kan en bygge skillemur mellom kjørebanene utenfor tunnelmunningen.
- Det foreligger også vurderinger om at tunnelens W-profil kan representere en utfordring for ventilasjonssystemet; (høybrekk virker som en omvendt vannlås).

Det forutsettes at ventilasjonssystemet utføres med følgende redundans/reservekapasitet:

- Det installeres ekstra impulsvifter slik at funksjonen kan beholdes hvis alle vifter i en brannsone blir utslått
- Det installeres redundante avtrekks- og friskluftsvifter i alle ventilasjonsstasjoner.

Trykk- og sugekrefter, sammen med brann og ventilasjon, må utredes for å vurdere tilgjengelighet av tverrforbindelsene under evakuering.

Aktive slokkeanlegg har både klare ulemper og fordeler, men ut fra eksisterende erfaring anbefales det ikke benyttet i Rogfast.
Fordelene er at dette hindrer små branner i å spre seg i og mellom kjøretøy. Det medfører at systemet:

- beskytter trafikanter
- redusere sannsynlighet for storbrann
- hindrer lengre stenging av tunnel
- reduserer skade på tunnelkonstruksjon og installasjoner
- reduserer behov for lokalisering av brannmannskap nær tunnelportal

Ulempene er:

- kostnader knyttet til installasjon, vedlikehold og utskifting
- utløser behov for andre kostbare system (deteksjon, styring)
- forverrer raskt siktforhold
- ødelegger lagdeling av røyken ved små branner
- kan føre til forsinket aktivering av sikkerhetssystem (redusert nytte)

Redundans/reservekapasitet for mekaniske/elektriske installasjoner
Avgjørende å sikre redundans/reservekapasitet i sentrale mekaniske og elektriske systemer som**:**

- Strømforsyning
- Pumpesystem
- Slokkevann
- Vifter
- Styre- og overvåkningsanlegg
- Kommunikasjonsnettverk

En rekke trafikksikkerhetstiltak bør implementeres. Disse foreslås å velges blant følgende, som tilhører de viktigste og mest relevante risikoreduserende tiltak i dette tilfellet:

- Å få kjøretøy til å holde en tilfredsstillende innbyrdes sikkerhetsavstand
- Hastighetsbegrensninger
- Forbikjøringsbegrensninger for tungtransport
- Estetisk utforming /bergrom / belysning og tiltak som bryter monotonien
- Begrensninger på transport av farlig gods
- Tilfartskontroll
- Eventuelle restriksjoner på tyngre kjøretøy
- Utforming av kryssområdet E39 x vegarm Kvitsøy

Ulike tiltak for sikker avstand mellom kjøretøy (se også Tabell 17):

- ITS applikasjoner: variable skilt (VMS), I-bil-informasjon, automatisk avstandsmåler
- Faste skilt inne i og utenfor tunnel
- Vegmerking og LED lys.

Hastighetsbegrensninger kan benyttes. Hensikten kan både være å øke kapasiteten gjennom tunnelen og å redusere sannsynligheten for og konsekvensen av trafikkulykker, i situasjoner som ikke kan kalles en avvikssituasjon. Hastighetsbegrensningene gjennomføres ved bruk av variable hastighetsskilt (VMS).

Tilfartskontroll
Hensikten med tilfartskontroll er å styre tilfartene til tunnelen på en slik måte at en sikrer en stabil og effektiv trafikkavvikling på alle delstrekningene på tunnelen. Tilfartskontrollen kan gjennomføres ved å signalregulere tilfartene til tunnelen. Dette krever oppstillingsplasser ved begge tunnelåpningene (eventuelt før tunnelåpningene dersom det ikke er plass ved tunnelåpningene). Tilfartskontroll kan være aktuelt i de tilfellene et tunnelløp har redusert kapasitet eller er stengt pga. av hendelse.

Begrensninger farlig gods
Det er aktuelt å legge begrensninger på transport av farlig gods gjennom en så vidt lang tunnel og med sterk stigning. De mest naturlige begrensninger er å begrense tid på døgnet, antall samtidige transporter i tunnelen, angi minimumsavstanden mellom slike transporter og i spesielle tilfeller foreta stenging av ett løp mens transporten foregår gjennom tunnelen.

Risikomessig er det neppe avgjørende hvilke av disse tiltak en velger. Det settes opp passende skilting før tunnel og ved tunnelinnkjørsel, slik at trafikanter får mulighet for å velge alternative ruter.

Begrensninger kan kreve informasjon om kjøretøyene og det godset de transporterer. Det arbeides nå med flere forskningsprosjekter og piloter med såkalt intelligent gods. Det vil si at godset bærer med seg informasjon om hva det inneholder, hvor det kommer fra og hvor det skal.

En særskilt studie foreslås gjennomført for å fastlegge spesifikke krav for transport av farlig gods, samt hvilke ytterligere tiltak, der i denne forbindelse bør etabler i selve tunnelen og utenfor tunnelområdet. En slik studie vil også kunne danne bakgrunn for ytterligere myndighetstiltak ved evt. valg av tvangsruter og alternative ruter for farlig gods.

Restriksjoner og forbikjøringsbegrensninger for tunge kjøretøy
Eventuelle restriksjoner på tyngre kjøretøy kan være begrenset til måned, uke, dag og tid på døgnet, hvor de høyeste trafikkvolumene opptrer. En slik begrensning vil kunne ha en trafikksikkerhetsmessig effekt ved at sannsynligheten, og muligens også konsekvensene, ved et trafikkuhell minimaliseres. Det vil også kunne ha en positiv effekt mht. avvikling av trafikken. I forbindelse med stenging av et løp kan en tenke seg kombinasjonen av toveis trafikk i ett løp og restriksjoner for tunge kjøretøyer.

Forbikjøring av ett tungt kjøretøy med annet tungt kjøretøy kan skape trafikkfarlige situasjoner og irritasjon for andre trafikanter. Forbikjøringsforbud kan være knyttet til trafikkvolumene slik at forbudet trer i kraft dersom trafikkvolumet overskrider et visst volum.

Trafikkavvikling ett løp:

- I åpningsåret kan en regne med at ett tunnelløp kan avvikle all trafikk i begge retninger i de aller fleste tilfellene det er aktuelt å stenge et løp pga. en hendelse eller vedlikehold.
- 20 år etter åpning eller når ÅDT kommer opp i 13.000 kjt/døgn vil det være mulig å avvikle all trafikk i begge retninger i ett løp om natten dersom det er behov for å stenge ett av løpene. Midt på dagen, og spesielt i sommerhalvåret, vil det teoretisk sett ikke være nok kapasitet i ett løp til å kunne stenge den andre løpet uten at det oppstår vesentlige forsinkelser og køer på begge sider av tunnelen.
- Dersom det skjer en hendelse som betyr en kortvarig stenging av et kjørefelt over en kort strekning har simulering av slike situasjoner vist at det ikke vil oppstå vesentlige problemer med trafikkavviklingen, spesielt dersom dette skjer på en strekning med fall eller meget liten stigning. Enhver uventet reduksjon av hastighet og fortetting av trafikken/oppbygging av kø kan imidlertid representere et trafikksikkerhetsproblem.

Branndeteksjon, varsling og kommunikasjon.
Tunnelen må utstyres med moderne branndeteksjons- og brannslokkingssystem. Gunstig med både brannslanger og pulverapparat. Pulverapparat har begrenset varighet, men kan i noen tilfeller være raskere å få frem til brannstedet. Videre, bør det være informasjonssystemer(høyttalere, radio, …).

Oppstillingsplass
Det er flere scenarier som medfører behov for oppstillingsplasser foran tunnelåpningen. Oppstillingsplass bør ha som mål å dekke beredskapskjøretøy, samt ventende farlig gods kjøretøy, og en del tunge kjøretøy ved ikke-planlagt stenging av ett eller to løp. Det er anslått at 2 mål ved utløp av hovedtunnelen, vil dekke disse behov. Plass for redningshelikopter (SeaKing) kommer i tillegg. Når det gjelder ambulansehelikopter bør det vurderes å legge til rette for at kjørebane utenfor tunnelmunning kan benyttes, (må sørge for at det ikke er master og lignende som hindrer dette). På Kvitsøy bør 0,5 mål holde.

En-veis trafikk i et løp som alternativ til toveis trafikk i ett løp bør unngås fordi det vil kunne bygge seg opp køer på mange kilometer Det bør finnes løsninger som tillater toveis trafikk i ett løp, spesielt på tider av døgnet med stor trafikk.

Det bør være gode snumuligheter for trafikantene, både ved tunnelåpningene og andre steder ved tilfartene til tunnelene. Disse snumulighetene bør bare åpnes når det virkelig er behov for det slik at snuingen kun skjer ved spesielle situasjoner og under kontrollerte forhold.

Fergeberedskap
Det vurderes at det ikke er noe umiddelbart grunnlag for å opprettholde beredskap for ferger i forbindelse med drifts – og vedlikeholdssituasjonen, samt ved større fremtidige reparasjons – og utskiftningsarbeider.

Behov for fergeberedskap antas derfor primært å oppstå i forbindelse med større ulykke (brann, oversvømmelse), som krever stenging av ett løp, evt. begge løp (oversvømmelse) over lang tid. Dette kan ikke utelukkes, og det anbefales derfor at fergeleier vedlikeholdes, og at et visst fergeberedskap opprettholdes.

7 TRANSIT-beregninger

Risikoen er her bestemt kvantitativt ved bruk av risikoanalysemodellen TRANSIT [72]. Beregningene for tunnelanlegget er gjennomført for tre individuelle situasjoner:

- Ulykker (personskadeulykker)
- Brann
- Transport av farlig gods

Risikoen er summert over disse typer ulykker og presentert som årlig risiko samt rater for

- Dødsfall
- Ulykker
- Branner

Dessuten illustreres risikoens fordeling i tunnelsystemet, og ratene vises separat for

- Hovedtunnelen
- Arm til Kvitsøy og ramper

Risikoøkning ved avkjørsel fra hovedtunnelen og innfletningen fra armen til hovedtunnelen er medregnet i risikotallene for hovedtunnelen.

Risikoen er beregnet for en ”basistunnel” som svarer til projektet, som det foreligger på nåværende tidspunkt. Dessuten er en rekke varianter beregnet.

7.1 Utførte beregninger

Beregningsprogrammet TRANSIT benyttes for å estimere frekvenser for trafikkulykker, branner og dødsfall, samt risikoen uttrykt som forventet antall omkomne og sårede i trafikkulykker, brann og farlig godsulykker. Beregnet for normalsituasjon og avvikssituasjon (toveis trafikk i ett løp).

Beregninger er også utført for å estimere effekten av noen tiltak:

- 125 m mellom nødutganger i hovedløpet
- krabbefelt i stigning til Arsvågen og Harestad (hele stigning og siste halvdel av stigning)
- alarm for å gi varsle om evakuering
- to løp med enveis trafikk i armen til Kvitsøy
- 5 % stigning i arm til Kvitsøy

For å få frem risikoen knyttet til stigninger/fall er det utført beregninger av Rogfast basis- og referansetunnel uten stigning/fall.

Det er videre utført sensitivitetsberegninger for Rogfast basistunnel:

- ÅDT 17000, Andel tyngre kjøretøy: 15 %
- ÅDT 17000, Andel tyngre kjøretøy: 25 %
- ÅDT 13000, Andel tyngre kjøretøy: 25 %
- Ulike fraksjoner med farlig gods
- Varierende antall timer med trafikk-kork

Tabellen under gir oversikt over ulike beregninger som er foretatt.

Tabell 18 Oversikt over TRANSIT beregninger

Beregninger:
A. Basistunnel
1. Basistunnel med arm til Kvitsøy (ett løp og tovegstrafikk) ○ Udformning og udstyr som angitt i Tabell 1, Tabell 2 og Tabell 3. Fartsgrense: 80 km/t i Kvitsøy-armen og 90 km/t i hovedtunnelen, 10 køtimer per år.
2. Som beregning 1, men med alternativ for arm til Kvitsøy med to løp og envegstrafikk
3. Som beregning 1, men avstand mellem nødutganger endres fra 250 m til 125 m
4. om beregning 1, men med krabbefelt: a. i stigning til Arsvågen b. i sidste halvdel av stigning til Arsvågen c. i stigning til Harestad d. i sidste halvdel av stigning til Harestad
5. Tovegstrafikk i ett løp. Fartsgrense: 80 km/t ○ Utformning og utstyr som angitt i Tabell 1-Tabell 3.
B. Referansetunnel
6. Referansetunnel. Lengdeprofil i V-form: dvs. 5 km med 5 % fall og 5 km med 5 % stigning a. Envegstrafikk. ÅDT 50000 b. Tovegstrafikk i ett løp. ÅDT: 4000 og 8000 (jfr. Tabell 4). Fartsgrense: 80 km/t
7. Basis og referansetunnel uten stigning.
C. Sensitivitet og nye tiltak
8. Basistunnel, men med a. ÅDT 17000, Andel tunge kjøretøy: 15 % b. ÅDT 17000, Andel tunge kjøretøy: 25 % c. ÅDT 13000, Andel tunge kjøretøy: 25 % d. Forskjellige andeler av farlig gods (5 %, 15 %) e. Variasjon av tid med kø i tunnelen (50 timer, 300 timer i hovedtunnel)
9. Basistunnel men med. ○ Nytt tiltak: Alarm (varsling om evakuering)
10. Kvitsøyarmen med 5 % stigning

Det bemerkes, att på grund av en feil i kommunikasjonen er forutsetning for armen til Kvitsøy et tverrsnitt T10,5 i stedet for T9,5.

7.2 Sammenfatning av resultater

Under er angitt de beregnede dødsfallsrater for de forskjellige beregninger. Ikke alle dødsfallsrater kan uten videre sammenlignes, for eksempel: dødsfallsraten reduseres ved Kvitsøyarmen med 5 % stigning, men den samlede risiko stiger, da den reduserte stigning nødvendiggjør en lengre tunnel.

Tabell 19 Hovedresultater av beregningene. Dødsfallsrater for det samlede tunnelanlegg (Rogfast med arm til Kvitsøy og ramper) for de gjennomførte beregninger. Dødsfallsrater fra beregninger av (hypotetiske) referansetunneler er markert med rødt.

Beregninger:		Dødsfallsrate per milliard kjt-km
Basistunnel		
1.	Basistunnel med arm til Kvitsøy (et løp og tovegstrafikk)	5.09
2.	Som beregning 1, men med alternativ for arm til Kvitsøy med to løp og envegstrafikk	5.04
3.	Basistunnel, som beregning 1, afstand mellem nødudgange reduseret til 125 m	5.01
4.	Basistunnel som beregning 1, men med krabbefelt:	
	a. i stigning til Arsvågen	4.78
	b. i sidste halvdel av stigning til Arsvågen	4.94
	c. i stigning til Harestad	4.84
	d. i sidste halvdel av stigning til Harestad	4.97
5.	Basistunnel. Tovegstrafikk i et løp. Fartsgrense: 80 km/t	12.28
Referansetunnel		
6.	Referansetunnel. Lengdeprofil i V-form: 5 km: 5 % fall +5 km:5 % stigning	
	a. Envegstrafikk. ÅDT 50000, fartsgrense 90 km/t	13.71
	b1 Tovegstrafikk i et løp. ÅDT 8000, fartsgrense: 80 km/t	9.21
	b2 Tovegstrafikk i et løp. ÅDT 4000, fartsgrense: 80 km/t	8.45
7.	Basis og referansetunnel uten stigning, envegstrafikk, ÅDT 50000	8.98
Sensitivitet og nye tiltak		
8.	Basistunnel.	
	a. ÅDT 17000, Andel tunge kjøretøy: 15 %	5.11
	b. ÅDT 17000, Andel tunge kjøretøy: 25 %	5.16
	c. ÅDT 13000, Andel tunge kjøretøy: 25 %	5.13
	d1 Andel av farlig gods 5 %	5.11
	d2 Andel av farlig gods 15 %	5.21
	e1 Kø i (hoved) tunnelen 50 timer om året	5.10
	e2 Kø i (hoved) tunnelen 300 timer om året	5.15
9.	Basistunnel, som beregning 1, med alarm (varsling om evakuering)	4.96
10.	Kvitsøyarmen med 5 % stigning	5.08

7.3 Rogfast hovedalternativ

Som basisberegning utregnes risikotallene svarende til opplysningene i kapitel 2. Disse opplysninger svarer til prosjektets nåværende tilstand, og beskrives slik:

Beregning 1. Basistunnel med arm til Kvitsøy (ett løp og tovegstrafikk)
Utformning og utstyr som angitt i Tabell 1-Tabell 3 . *Fartsgrense: 80 km/t i Kvitsøy-armen og 90 km/t i hovedtunnelen, 10 køtimer per år.*

Med utgangspunkt i disse antakelser vedrørende tunnelutformning og trafikk er den årlige risiko beregnet med analyseprogrammet og resultatene er oppsummert i Tabell 20. I appendiks C er de særlige forhold ved risikoen for tunge kjøretøy på lange bratte stigninger og fall diskutert. Disse særlige forhold er innarbeidet i risikotallene. Resultatene er splittet på hovedtunnel og armen til Kvitsøy i Tabell 21 og Tabell 22.

Tabell 20 Beregning 1: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg.

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.6346	9.686	5.747	
Brann lette kt.	0.0031	0.046	3.908	
Brann tunge kt.	0.0130	0.198	5.085	
Farlig gods	0.0037	0.011	0.002	
Total	0.6543	9.941	14.742	
Trafikk	128.48		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.045		Per Million kt-km	
Branrrate	0.070		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	5.09		Per Milliard kt-km	

Hendelser som fører til drepte og andre personskader er tydelig dominert av ”almindelige” trafikkulykker, dvs. kollisjon mm. Branner er dominert av brann i tunge kjøretøy.

Tabell 21 Beregning 1: Personrisiki, antall branner og ulykker i hovedtunnelen.

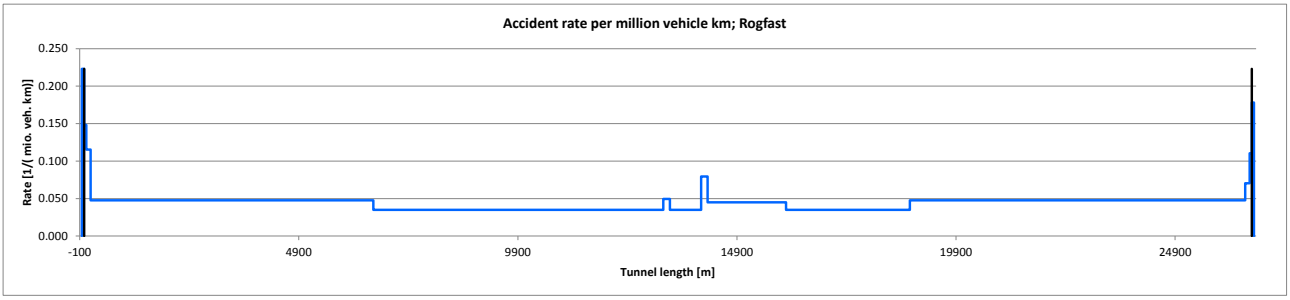
	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.6239	9.474	5.608	
Brann lette kt.	0.0029	0.043	3.832	
Brann tunge kt.	0.0117	0.178	4.943	
Farlig gods	0.0037	0.011	0.002	
Total	0.6421	9.706	14.385	
Trafikk	126.93		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.044		Per Million kt-km	
Brannrate	0.069		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	5.06		Per Milliard kt-km	

Tabell 22 Beregning 1: Personrisiki og antall branner og ulykker i Armen til Kvitsøy samt rampene.

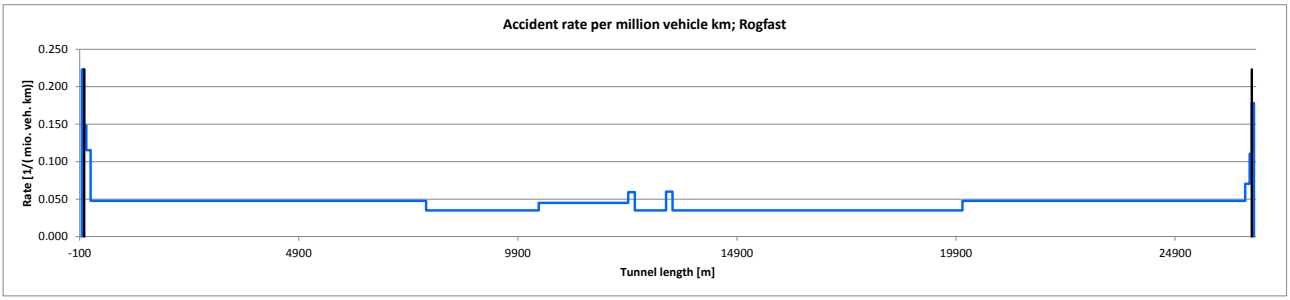
	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.0107	0.211	0.139	
Brann lette kt.	0.0002	0.003	0.076	
Brann tunge kt.	0.0013	0.020	0.142	
Farlig gods	0.0000	0.000	0.000	
Total	0.0122	0.235	0.357	
Trafikk	1.55		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.090		Per Million kt-km	
Brannrate	0.141		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	7.86		Per Milliard kt-km	

Armen til Kvitsøy har en noe større dødsfallsrate, ulykkesrate og brannrate. Bidraget til den samlede risiko i tunnelsystemet er likevel så beskjedent at innflytelsen på det samlede resultat kun er marginal.

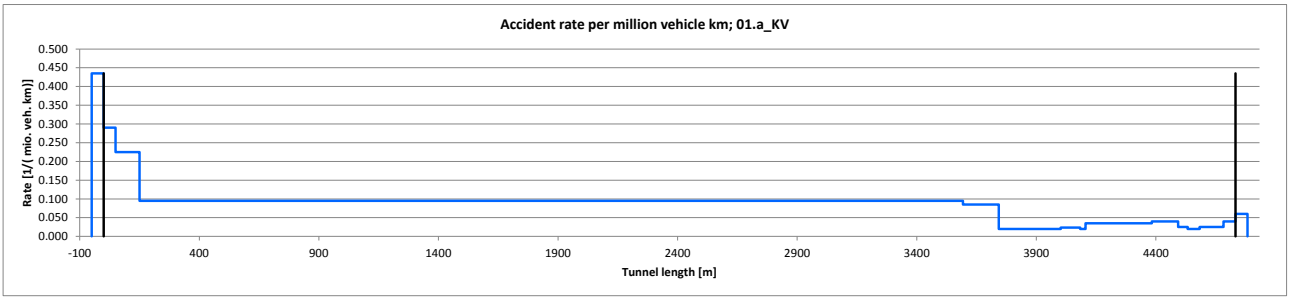
Fordeling av risikoen i tunnelanlegget illustreres av figurene Figur 55–Figur 66, som viser ulykkesrate, dødsfallsrate og brannrate i de to retninger for hovedtunnelen og armen til Kvitsøy (inkl. rampe 03 og 04). Figurene inneholder likevel ikke det særlige tillegg til risikoen for tunge kjøretøy på lange bratte stigninger og fall.



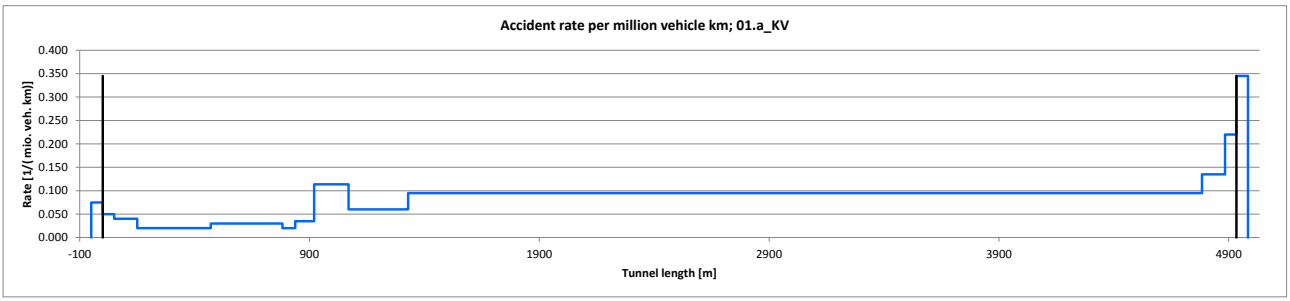
Figur 55 Hovedtunnel i Nordlig retning Ulykkesraten langs tunnelens lengdeakse. (Lokal profileringsnummerering med Pr = 0 ved sydportalen)



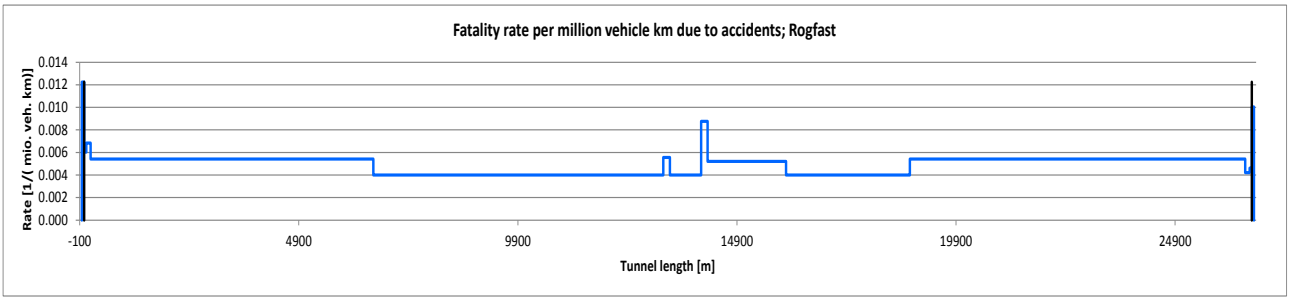
Figur 56 Hovedtunnel i Sydlig retning Ulykkesraten langs tunnelens lengdeakse. (Lokal profileringsnummerering med Pr = 0 ved nordportalen)



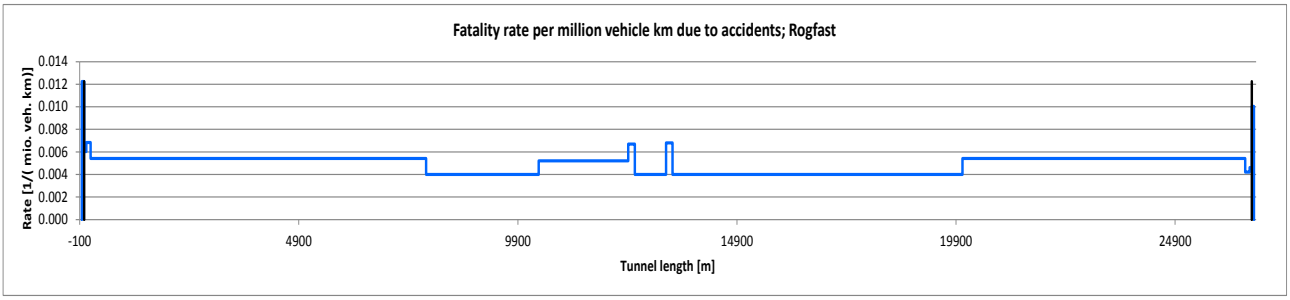
Figur 57 Arm til Kvitsøy samt rampe 04i østlig retning (fra Kvitsøy)Ulykkesraten langs tun-nelens lengdeakse. (Lokal profileringsnummerering med Pr = 0 ved Kvitsøyportalen)



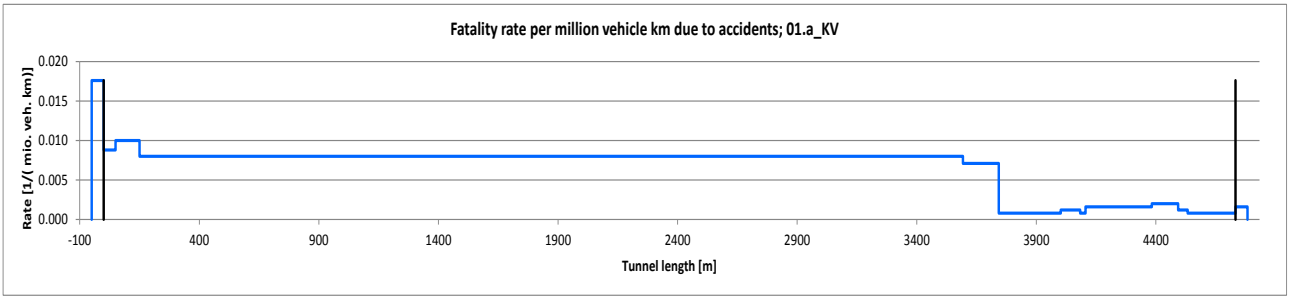
Figur 58 Arm til Kvitsøy samt rampe 03 i vestlig retning (mod Kvitsøy)Ulykkesraten langs tun-nelens lengdeakse. (Lokal profileringsnummerering med Pr = 150 ved start av afkjørselsrampe)



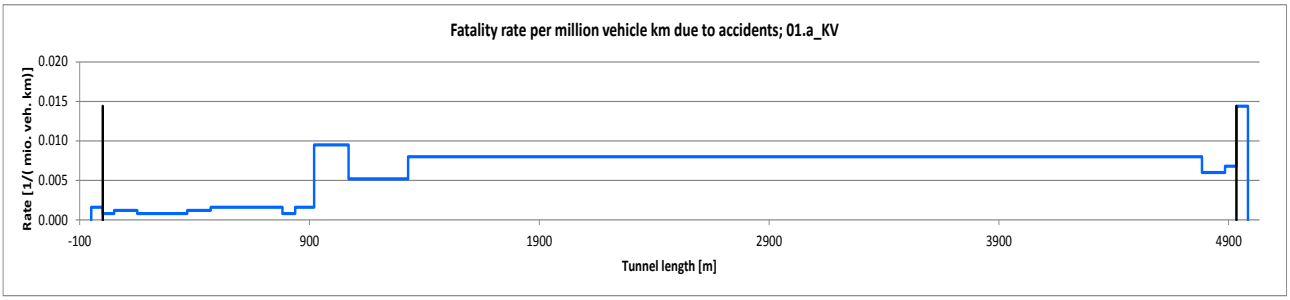
Figur 59 Hovedtunnel i Nordlig retning Dødsfallsraten langs tunnelens lengdeakse. (Lokal profileringsnummerering med Pr = 0 ved sydportalen)



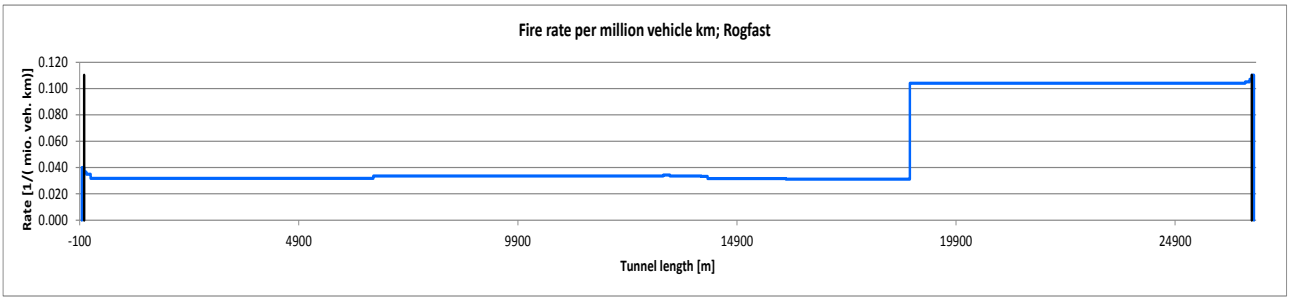
Figur 60 Hovedtunnel i Sydlig retning Dødsfallsraten langs tunnelens lengdeakse. (Lokal profileringsnummerering med Pr = 0 ved nordportalen)



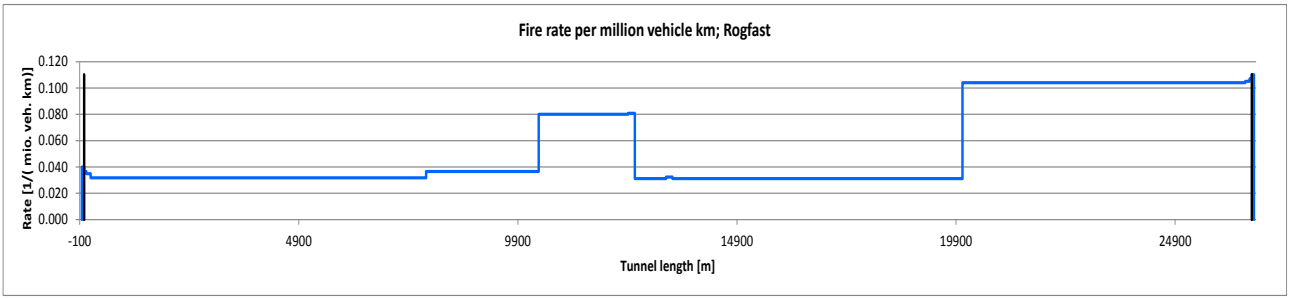
Figur 61 Arm til Kvitsøy samt rampe 04i østlig retning (fra Kvitsøy) Dødsfallsraten langs tun-nelens lengdeakse. (Lokal profileringsnummerering med Pr = 0 ved Kvitsøyportalen)



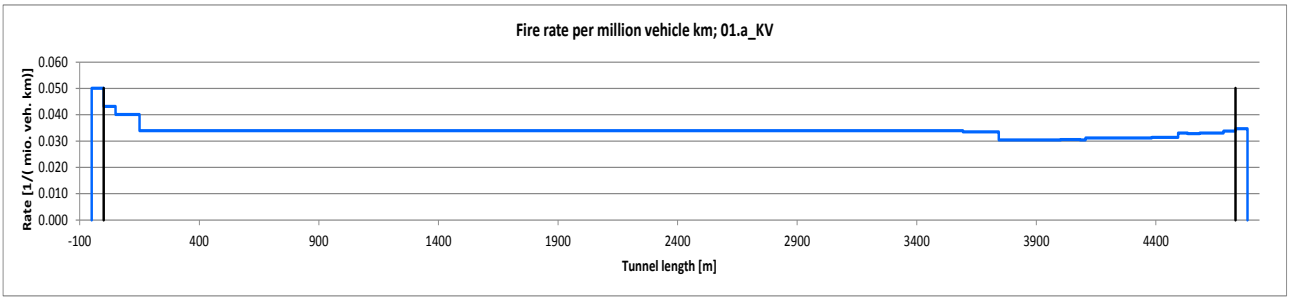
Figur 62 Arm til Kvitsøy samt rampe 03 i vestlig retning (mod Kvitsøy) Dødsfallsraten langs tunnelens lengdeakse. (Lokal profileringsnummerering med Pr = 150 ved start av avkjørselsrampe)



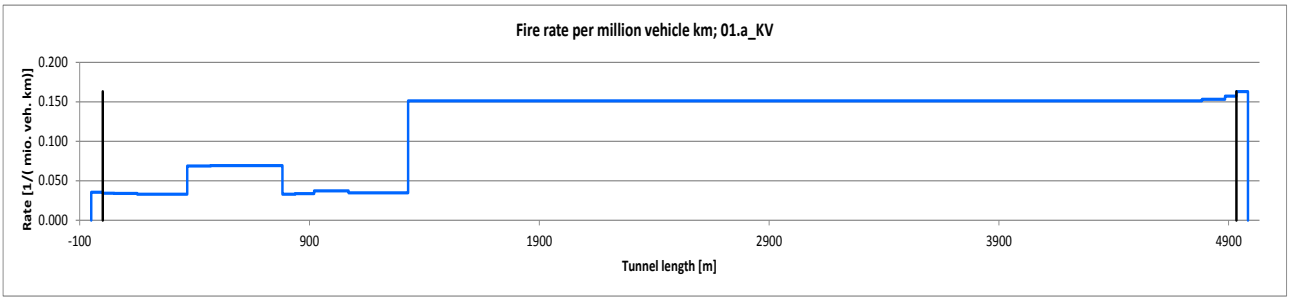
Figur 63 Hovedtunnel i Nordlig retning Brannfallsraten langs tunnelens lengdeakse. (Lokal profileringsnummerering med Pr = 0 ved sydportalen)



Figur 64 Hovedtunnel i Sydlig retning Brannraten langs tunnelens lengdeakse. (Lokal profileringsnummerering med Pr = 0 ved nordportalen)



Figur 65 Arm til Kvitsøy samt rampe 04i østlig retning (fra Kvitsøy) Brannraten langs tunnelens lengdeakse. (Lokal profileringsnummerering med Pr = 0 ved Kvitsøyportalen).



Figur 66 Arm til Kvitsøy samt rampe 03 i vestlig retning (mod Kvitsøy) Brannraten langs tunnelens lengdeakse. (Lokal profileringsnummerering med Pr = 150 ved start av avkjørselsrampe)

Samlet sett er dødsfallsraten omtrent på nivå av gjennomsnittsrisikoen i form av dødsfallsrate for alle norske veger (pr 2003- 2013). Ut fra dette forekommer det at tunnelens risiko er i ALARP området, hvor man skal overveie ytterligere tiltak når en også ta hensyn til tiltakenes kostnadseffektivitet.

Vurderingene av projektvarianter og tiltak i den resterende del av dette kapitel kan brukes i sammenheng med ALARP vurderinger.

7.4 Varianter av hovedalternativet

7.4.1 Toløpstunnel til Kvitsøy

Som alternativ kan armen til Kvitsøy bygges med to løp og envegstrafikk:

***Beregning 2**. Som beregning 1, med alternativ for arm til Kvitsøy med to løp og envegstrafikk*

Utformingen av rampene antas stort sett uendret, og tunnelløpene i armen utformes som 2 x T7.5 med samme utforming som i rampene. Nedenfor vises risikoen i det samlede anlegg og i armen (risikoen i hovedtunnelen er uendret i forhold til systemberegning 1).

Tabell 23 Beregning 2: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (arm til Kvitsøy med to løp).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.6289	9.568	5.671	
Brann lette kt.	0.0029	0.044	3.906	
Brann tunge kt.	0.0120	0.183	5.081	
Farlig gods	0.0037	0.011	0.002	
Total	0.6475	9.807	14.660	
Trafikk	128.48		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.044		Per Million kt-km	
Brannrate	0.070		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	5.04		Per Milliard kt-km	

Tabell 24 Beregning 2: Personrisiki og antall branner og ulykker i Armen til Kvitsøy (med to løp) samt rampene.

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.0050	0.094	0.064	
Brann lette kt.	0.0001	0.001	0.074	
Brann tunge kt.	0.0004	0.006	0.138	
Farlig gods	0.0000	0.000	0.000	
Total	0.0054	0.101	0.275	
Trafikk	1.55		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.041		Per Million kt-km	
Brannrate	0.137		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	3.47		Per Milliard kt-km	

Dette tiltak medfører en betydelig reduksjon av risikoen i armen til Kvitsøy (en halvering av dødsfallsraten målt i rater per kjøretøykilometer). Samlet sett er risikoreduksjonen i hele tunnelsystemet likevel under 1 %. Reduksjonen skyldes, at antall trafikkulykker i Kvitsøyarmen ca. halveres; brannraten reduseres kun ubetydlig.

7.4.2 Avstand mellom nødutganger 125 m

Som risikoreduserende tiltak kan avstanden mellom nødutgangene reduseres til 125 m i hovedtunnelen.

Beregning 3. *Basistunnel, som beregning 1, men avstand mellom nødutganger endres fra 250 m til 125 m.*

Denne variasjon påvirker kun hovedtunnelen. Nedenfor vises den samlede risiko i tunnelanlegget.

Tabell 25 Beregning 3: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (125 m mellom nødutganger).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.6346	9.686	5.747	
Brann lette kt.	0.0015	0.022	3.908	
Brann tunge kt.	0.0063	0.097	5.085	
Farlig gods	0.0017	0.005	0.002	
Total	0.6440	9.809	14.742	
Trafikk	128.48		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.045		Per Million kt-km	
Brannrate	0.070		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	5.01		Per Milliard kt-km	

Nødutgangene har en god virkning, og det ses, at konsekvensene av branner omtrent halveres med den kortere avstand mellom nødutganger. Da risikoen imidlertid domineres av ulykker og konsekvensene av disse, er den samlede virkning kun meget svakt redusert.

7.4.3 Krabbefelt

Som alternativ kan det innføres krabbefelt i hovedtunnelen:

Beregning 4. *Basistunnel som beregning 1, men med krabbefelt:*

a. i stigning til Arsvågen
b. i sidste halvdel av stigning til Arsvågen
c. i stigning til Harestad
d. i sidste halvdel av stigning til Harestad

Denne variasjon påvirker kun risikoen i hovedtunnelen. Krabbefelter er ikke direkte modellert i TRANSIT. Det antas i det følgende at krabbefelter kan redusere risikoen for ulykker med ca. 20% på strekninger med over 5% stigning. I det følgende vises den samlede risiko ved disse fire variasjoner

Krabbefelt i stigning til Arsvågen

Tabell 26 Beregning 4a: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (Krabbefelt i stigning til Arsvågen).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.5946	9.047	5.425	
Brann lette kt.	0.0031	0.046	3.900	
Brann tunge kt.	0.0129	0.197	5.074	
Farlig gods	0.0037	0.011	0.002	
Total	0.6142	9.301	14.400	
Trafikk	128.48		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.042		Per Million kt-km	
Brannrate	0.070		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	4.78		Per Milliard kt-km	

Krabbefelt i siste halvdel av stigning til Arsvågen

Tabell 27 Beregning 4b: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (Krabbefelt i siste halvdel av stigning til Arsvågen).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.6146	9.366	5.586	
Brann lette kt.	0.0031	0.046	3.904	
Brann tunge kt.	0.0129	0.197	5.079	
Farlig gods	0.0037	0.011	0.002	
Total	0.6342	9.621	14.571	
Trafikk	128.48		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.043		Per Million kt-km	
Brannrate	0.070		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	4.94		Per Milliard kt-km	

Krabbefelt i stigning til Harestad

Tabell 28 Beregning 4c: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (Krabbefelt i stigning til Harestad).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.6029	9.196	5.499	
Brann lette kt.	0.0031	0.046	3.902	
Brann tunge kt.	0.0129	0.197	5.076	
Farlig gods	0.0037	0.011	0.002	
Total	0.6225	9.450	14.479	
Trafikk	128.48		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.043		Per Million kt-km	
Brannrate	0.070		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	4.84		Per Milliard kt-km	

Krabbefelt i siste halvdel av stigning til Harestad

Tabell 29 Beregning 4d: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (Krabbefelt i siste halvdel av stigning til Harestad).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.6187	9.441	5.623	
Brann lette kt.	0.0031	0.046	3.905	
Brann tunge kt.	0.0129	0.197	5.081	
Farlig gods	0.0037	0.011	0.002	
Total	0.6384	9.695	14.611	
Trafikk	128.48		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.044		Per Million kt-km	
Brannrate	0.070		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	4.97		Per Milliard kt-km	

Vurdering av krabbefelt
Det ses, at risikoen kan reduseres med ca. 10 % i den samlede tunnel, hvis det er krabbefelt i begge stigninger.

7.4.4 Hovedtunnel med ett løp

Det undersøkes likedan hva risikoen er, hvis al trafikk gjennomføres i ett løp med tovegstrafikk (og fartsgrensen samtidig settes til 80 km/t). Dette kan vise risiko i avvikssituasjonen. Likevel vil trafikken i avvikssituasjonen i de fleste tilfelle være vesentlig mindre end gjennomsnittstrafikken. I modellen er det forutsatt, at det er utganger per 250 m svarende til, at tverrtunnelene kan anvendes.

***Beregning 5**. Basistunnel. Tovegstrafikk i et løp. Fartsgrense: 80 km/t*
Utformning og utstyr som angitt i Tabell 1-Tabell 3*, men med bruk av kun ett løp.*

Denne variasjon påvirker naturligvis kun risikoen i hovedtunnelen. I det følgende vises den samlede risiko ved denne variasjon.

Tabell 30 Beregning 5: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (hovedløp med ett løp og tovegstrafikk).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	1.3326	24.688	16.046	
Brann lette kt.	0.0430	0.416	4.157	
Brann tunge kt.	0.1998	1.781	5.483	
Farlig gods	0.0023	0.007	0.002	
Total	1.5778	26.893	25.687	
Trafikk	128.48		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.125		Per Million kt-km	
Brannrate	0.075		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	12.28		Per Milliard kt-km	

Det ses ved sammenligning med, at på tross av den reduserte fart så økes risikoen merkbart – både for ulykker og for branner. Det ses også at brann her er årsak till 16 % av de drepte, mot kun 3 % for basistunnelen.

7.5 Referansetunneler

Som sammenlikningsgrunnlag beregnes såkalte referansetunneler. Disse tunneler har en geometri i overensstemmelse med normene. Referansetunnelenes geometri er dog ikke avpasset til de aktuelle topografiske forhold og kan derfor ikke bygges i praksis. Referansetunnelene gjelder hovedtunnelen og vurderes i tre varianter.

***Beregning 6**. Referansetunnel. 10 km lang, Lengdeprofil i V-form: dvs. 5 km med 5 % fall og 5 km med 5 % stigning*

a. Envegstrafikk. ÅDT 50000

b. Tovegstrafikk i et løp. ÅDT: 4000 og 8000 (jfr. Tabell 4*). Fartsgrense: 80 km/t*

***Beregning 7**. Basis og referansetunnel uten stigning.*

7.5.1 Referansetunnel med V-formet lengdeprofil

Referansetunnel med V-formet lengdeprofil, envegstrafikk og ÅDT 50000

Tabell 31 Referansetunnel, beregning 6a: Personrisiki og antall branner og ulykker i hovedtunnelen med 2 løp L = 10km, V profil og ÅDT 50000 kt/d.

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	2.4423	38.130	23.315	
Brann lette kt.	0.0108	0.092	5.901	
Brann tunge kt.	0.0440	0.379	14.466	
Farlig gods	0.0301	0.090	0.003	
Total	2.5272	38.691	43.685	
Trafikk	184.33		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.126		Per Million kt-km	
Brannrate	0.110		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	13.71		Per Milliard kt-km	

Da trafikkvolumet (ÅDT og trafikk i kt-km per år) og tunnelens lengde ikke er de samme i referansetunnelen som i beregningene av de aktuelle tunnelalternativer, kan de beregnede årlige risikotall ikke sammenlignes med de øvrige beregnede tall. Det ses dog, at dødsfallsraten i denne referansetunnel er betydelig høyere enn i de tidligere beregnede aktuelle tunnelalternativer. Ulykkesraten og brannraten er også høyere i referansetunnelen.

De høye rater for dødsfall og ulykker skyldes den meget høye ÅDT i relasjon til tunnelgeometri og fart.

Referansetunnel med V-formet lengdeprofil, tovegstrafikk og ÅDT 8000.

Tabell 32 Referansetunnel, beregning 6b: Personrisiki og antall branner og ulykker i hovedtunnelen med 1 løp tovegstrafikk, L = 10km, V profil og ÅDT 8000 kt/d, fartsgrense 80 km/t.

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.2030	4.083	2.668	
Brann lette kt.	0.0138	0.143	1.398	
Brann tunge kt.	0.0543	0.571	1.210	
Farlig gods	0.0005	0.002	0.000	
Total	0.2715	4.799	5.276	
Trafikk	29.49		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.090		Per Million kt-km	
Brannrate	0.088		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	9.21		Per Milliard kt-km	

Den samme bemerkning om sammenlignbarhet som ovenfor nevnt for beregningen av ÅDT= 50000 gjelder også for beregningen av referansetunnelen med ÅDT 8000 og L = 10 km. Dødsfallsraten er høyere end de beregnede tunnelalternativer. Sammenlignet med den foregående referansetunnel er dødsfallsraten høyere på grund av tovegstrafikk – den lavere fartsgrense kan ikke kompensere for dette risikoøkende trekk ved tunnelen.

Referansetunnel med V-formet lengdeprofil, tovegstrafikk og ÅDT 4000.

Tabell 33 Referansetunnel, beregning 6c: Personrisiki og antall branner og ulykker i hovedtunnelen med 1 løp tovegstrafikk, L = 10 km, V profil og ÅDT 4000 kt/d, fartsgrense 80 km/t.

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.1015	2.042	1.334	
Brann lette kt.	0.0047	0.071	0.699	
Brann tunge kt.	0.0184	0.286	0.605	
Farlig gods	0.0000	0.000	0.000	
Total	0.1245	2.399	2.638	
Trafikk	14.75		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.090		Per Million kt-km	
Brannrate	0.088		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	8.45		Per Milliard kt-km	

Sammenlignet med beregningen med ÅDT = 8000 kan det ses, at dødsfallsraten reduseres let ved den reduserte trafikkmengde. Dette skyldes, at i tilfelle av brann vil færre personer bli påvirket.

7.5.2 Referansetunnel helt uten stigning

Referansetunnel med envegstrafikk og ÅDT 50000

Tabell 34 Referansetunnel, beregning 7: Personrisiki og antall branner og ulykker i hovedtunnelen med 2 løp, L = 10 km, uten stigning og ÅDT 50000 kt/d.

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	1.6197	25.300	15.440	
Brann lette kt.	0.0058	0.047	4.414	
Brann tunge kt.	0.0104	0.086	1.751	
Farlig gods	0.0195	0.058	0.003	
Total	1.6553	25.492	21.608	
Trafikk	184.33		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.084		Per Million kt-km	
Brannrate	0.033		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	8.98		Per Milliard kt-km	

Ved sammenligning av referansetunnelen uten stigning og referansetunnelen med 5 % stigning fremgår det, at stigningen på 5 % forårsager en økning av dødsfallsrisikoen på ca. 50 %. Dette er i overensstemmelse med modellene i [72] og [81].

7.6 Sensitivitet og nye tiltak

Det er dessuten ønsket å undersøke noen variasjon og nye tiltak som er rapportert i avsnittene herunder.

Beregning 8. Basistunnel.

a. ÅDT 17000, Andel tunge kjøretøy: 15 %
b. ÅDT 17000, Andel tunge kjøretøy: 25 %
c. ÅDT 13000, Andel tunge kjøretøy: 25 %
d. Forskellige andele av farlig gods (5 %, 15 %)
e. Variasjon av tid med kø i tunnelen (50 timer, 300 timer i hovedtunnel)

Beregning 9. Basistunnel.

- *Nyt tiltak: Alarm (varsling om evakuering)*

Beregning 10. Kvitsøyarmen med 5 % stigning

7.6.1 Øket trafikk i hovedtunnelen

Tunnelanlegget beregnes med øket trafikk i hovedtunnelen: ÅDT 17000, Andel tunge kjøretøy: 15 %. Denne variasjon påvirker kun hovedtunnelen. Nedenfor vises den samlede risiko i tunnelanlegget.

Tabell 35 Beregning 8a: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (ÅDT 17000, Andel tunge kjøretøy: 15 %).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.8265	12.601	7.472	
Brann lette kt.	0.0039	0.060	5.087	
Brann tunge kt.	0.0201	0.252	6.606	
Farlig gods	0.0062	0.019	0.003	
Total	0.8568	12.931	19.168	
Trafikk	167.53		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.045		Per Million kt-km	
Brannrate	0.070		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	5.11		Per Milliard kt-km	

Frekvensene av hendelser per år er naturligvis avhengig av trafikkmengden. Det ses tillige, at der er en lille stigning i dødsfallsraten sammenlignet med beregningene med ÅDT=13000, hvilken skyldes at flere personer kan bli utsat for påvirkning i forbindelse med branner.

7.6.2 Øket trafikk og høyere tungtrafikkandel i hovedtunnelen

Tunnelanlegget beregnes med øket trafikk og høyere tungtrafikkandel i hovedtunnelen: ÅDT 17000, Andel tunge kjøretøy: 25 %. Denne variasjon påvirker kun hovedtunnelen. Nedenfor vises den samlede risiko i tunnelanlegget.

Tabell 36 Beregning 8b: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (ÅDT 17000, Andel tunge kjøretøy: 25 %).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.8188	12.404	7.373	
Brann lette kt.	0.0034	0.052	4.478	
Brann tunge kt.	0.0321	0.430	11.446	
Farlig gods	0.0103	0.031	0.004	
Total	0.8647	12.917	23.301	
Trafikk	167.53		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.044		Per Million kt-km	
Brannrate	0.095		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	5.16		Per Milliard kt-km	

Det ses ved sammenligning med den tilsvarende beregning med 15 % tungtrafikkandel, at øket tungtrafikkandel giver sig utslag i høyere brannrater og større konsekvenser av branner. Derved blir også dødsfallsraten lidt høyere end ved beregningen med 15 % tungtrafikkandel.

7.6.3 Øket tungtrafikkandel i hovedtunnelen

Tunnelanlegget beregnes med høyere tungtrafikkandel i hovedtunnelen: ÅDT 13000, Andel tunge kjøretøy: 25 %. Denne variasjon påvirker kun hovedtunnelen. Nedenfor vises den samlede risiko i tunnelanlegget.

Tabell 37 Beregning 8c: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (ÅDT 13000, Andel tunge kjøretøy: 25 %).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.6287	9.535	5.671	
Brann lette kt.	0.0027	0.041	3.437	
Brann tunge kt.	0.0218	0.335	8.801	
Farlig gods	0.0061	0.018	0.003	
Total	0.6593	9.929	17.912	
Trafikk	128.48		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.044		Per Million kt-km	
Brannrate	0.095		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	5.13		Per Milliard kt-km	

Det ses, at den økede tungtrafikkandel giver sig utslag i større konsekvenser av branner. Dette resulterer i en let stigning i dødsfallsraten.

7.6.4 Øket andel av farlig gods

Farlig gods-andel 5 %
Nedenfor vises den samlede risiko i tunnelanlegget med øket andel av farlig gods.

Tabell 38 Beregning 8d1: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (Farlig gods andel 5 %).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.6346	9.686	5.747	
Brann lette kt.	0.0031	0.046	3.908	
Brann tunge kt.	0.0130	0.198	5.085	
Farlig gods	0.0061	0.018	0.003	
Total	0.6567	9.948	14.743	
Trafikk	128.48		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.045		Per Million kt-km	
Brannrate	0.070		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	5.11		Per Milliard kt-km	

Det ses, at hyppigheter og konsekvenser av hendelser med farlig gods stiger. Da bidraget til den samlede risiko fra farlig gods hendelser er ret lav, er betydningen for den samlede risiko beskeden, selvom andelen av farlig gods transporter skulle stige fra 3 % til 5 %.

Farlig gods-andel 15 %
Nedenfor vises den samlede risiko i tunnelanlegget med øket andel av farlig gods.

Tabell 39 Beregning 8d2: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (Farlig gods andel 15 %).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.6346	9.686	5.747	
Brann lette kt.	0.0031	0.046	3.908	
Brann tunge kt.	0.0130	0.198	5.085	
Farlig gods	0.0183	0.055	0.010	
Total	0.6689	9.984	14.750	
Trafikk	128.48		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.045		Per Million kt-km	
Brannrate	0.070		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	5.21		Per Milliard kt-km	

Hvis andelen av farlig gods transporter skulle stige til 15 % (en ganske ekstrem andel) ville det kunne få en betydning, som kan ses på den samlede risiko.

7.6.5 Øket risiko for kø

50 timer kø i hovedtunnelen
Tunnelens risiko beregnes for 50 timer kø per år. Denne variasjon påvirker kun hovedtunnelen. Nedenfor vises den samlede risiko i tunnelanlegget.

Tabell 40 Beregning 8e1: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (50 timer kø i hovedtunnelen).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.6346	9.686	5.747	
Brann lette kt.	0.0032	0.048	3.908	
Brann tunge kt.	0.0134	0.204	5.085	
Farlig gods	0.0042	0.012	0.002	
Total	0.6552	9.950	14.742	
Trafikk	128.48		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.0447		Per Million kt-km	
Brannrate	0.070		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	5.10		Per Milliard kt-km	

300 timer kø i hovedtunnelen
Tunnelens risiko beregnes for 300 timer kø per år. Denne variasjon påvirker kun hovedtunnelen. Nedenfor vises den samlede risiko i tunnelanlegget.

Tabell 41 Beregning 8e2: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (300 timer kø i tunnelen).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.6346	9.686	5.747	
Brann lette kt.	0.0038	0.057	3.908	
Brann tunge kt.	0.0158	0.243	5.085	
Farlig gods	0.0072	0.022	0.002	
Total	0.6614	10.007	14.742	
Trafikk	128.48		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.045		Per Million kt-km	
Brannrate	0.070		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	5.15		Per Milliard kt-km	

Det ses, at på tross av det nokså ekstreme kø-omfang (i forhold til ÅDT og tunnelens tverrsnitt), så er innflytelsen på den samlede risiko ganske beskjeden.

7.6.6 Alarm (varsling om evakuering)

Nedenfor estimeres samlede risiko i tunnelanlegget, under forutsetning av, at der innføres et alarmanlegg, der varsler om evakuering.

Der antas i alle beregninger med overvåkning, at trafikantene alarmeres over radio. Der er i TRANSIT ikke nogen direkte modell for videregående evakueringsvarsel. Virkningen av høyttaleranlegg og lignende må diskuteres nærmere, før risikoen kan estimeres. Hvis høyttaleranleggene ikke har nogen virkning i forhold til den normale alarmering, gjelder resultatene som beskrevet i **Tabell 20**. Hvis virkningen svarer til en halvering av avstanden til nødutgangene i hovedtunnelen svarer resultatene til dem som er vist i **Tabell 25**. Hvis virkningen (som et ekstremtilfelle) svarer til at gangavstanden reduseres til en fjerdedel, er resultatene som vist i **Tabell 42**.

Tabell 42 Beregning 9: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (med ekstremt effektiv alarm/ varsling om evakuering).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.6346	9.686	5.747	
Brann lette kt.	0.0005	0.007	3.908	
Brann tunge kt.	0.0023	0.035	5.085	
Farlig gods	0.0004	0.001	0.002	
Total	0.6377	9.728	14.742	
Trafikk	128.48		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.045		Per Million kt-km	
Brannrate	0.070		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	4.96		Per Milliard kt-km	

Virkningen av evakueringsvarsling må ytterligere diskuteres. Det ses, at en videregående alarm eventuelt kan føre til en reduksjon i konsekvensene. Alarm anlegget sikrer, at de fleste kan nå en nødutgang og komme i sikkerhet i forbindelse med en brann. For armen til Kvitsøy er alarm mindre effektivt, da der her ikke er nogen nødutganger å gå til.

7.6.7 Kvitsøyarmen med 5% stigning

Ved reduksjon av stigningen på Kvitsøy armen fra 7 % til 5 % forlenges tunnelarmens lengde med ca. 1.5 km. Nedenfor vises risikoen i det samlede anlegg og i armen (risikoen i hovedtunnelen er uendret i forhold til systemberegning 1).

Tabell 43 Beregning 10: Personrisiki og antall branner og ulykker i det samlede anlegg (arm til Kvitsøy med 5 % stigning).

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.6361	9.706	5.763	
Brann lette kt.	0.0031	0.046	3.902	
Brann tunge kt.	0.0125	0.190	5.029	
Farlig gods	0.0037	0.011	0.002	
Total	0.6553	9.953	14.696	
Trafikk	128.92		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.045		Per Million kt-km	
Brannrate	0.069		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	5.08		Per Milliard kt-km	

Tabell 44 Beregning 10: Personrisiki og antall branner og ulykker i Armen til Kvitsøy (med 5 % stigning over en lengde på 5 km) samt rampene.

	Antall drepte / år	Antall sårede / år	Antall hendelser / år	
Ulykker	0.0122	0.232	0.155	
Brann lette kt.	0.0002	0.003	0.070	
Brann tunge kt.	0.0008	0.012	0.086	
Farlig gods	0.0000	0.000	0.000	
Total	0.0132	0.247	0.312	
Trafikk	1.99		Million kt-km/år	
Ulykkesrate	0.078		Per Million kt-km	
Brannrate	0.079		Per Million kt-km	
Dødsfallsrate	6.64		Per Milliard kt-km	

Sammenlignet med resultatene for Kvitsøyarmen med 7 % stigning (se Tabell 22) kan det ses, at dette tiltak medfører en reduksjon av risikoen i rampen målt i rater (reduksjon fra 7.86 dødsfall per milliard kt-km til 6.64 dødsfall per milliard kt-km), mens de årlige risiki stiger fra 0.0122 dødsfall per år til 0.0132 dødsfall per år.

Samlet er risikoen marginalt steget i årlig risiko mens der er en ytterst liten reduksjon i dødsfallsrate. Det synes derfor ikke å være en effektiv sikkerhetsforanstaltning å redusere armens helning

8. Konsekvensanalyser av brannscenarier.

I dette kapitlet utføres relativt detaljerte konsekvensberegninger for en del utvalgte brannscenarier. Dette utføres både for hovedløp med trafikk i begge løp, for avvikssituasjonen (toveis trafikk i ett løp) og for Kvitsøy- armen. Det foretas også kvantitative sammenlikninger av Rogfast basisløsning og referansetunnelen. Formålet er ikke å anslå total risiko, men å vurdere tunnelen og effekt av tiltak med hensyn til sårbarhet mot mer alvorlige brannscenarier.Beregningene er i hovedsak ikke oppdatert ut fra nye basistunnel, men dette er vurdert å ikke ha signifikant betydning på resultatene.

Det utføres evakueringsberegninger for å sikre at det bl.a. ikke blir kø/oppstuving foran nødutganger. Det utføres beregninger for å estimere konsekvensene (tid til udyktiggjøring) av ulike brannforløp. Vurderingene vil bl.a. inkludere scenarioer med to samtidige hendelser og inkluderer buss i scenarier.

Det er foretatt visse sensitivitetsbetraktninger mht aktuelle parametere (inkl. ÅDT).

8.1 Valg av brannscenarier, tunnel

Ulykker der en har spesifisert lokalitet/sted og eksponering/trafikk, evt. andre forhold, vil vi omtale som et scenario. De scenarioer som analyseres - for å få et bilde av risiko og effekt av tiltak - bør dekke alle viktige kombinasjoner av *lokalitet* og *tid*. En foreslår å skille mellom:

Sted (inne i tunnel):

- Arm/utløp Arsvågen
- Arm/utløp Harestad
- Dypeste pkt.
- Kryss (rampe)
- Stigning
- Arm til Kvitsøy

Eksponering/trafikk:

- Normal-trafikk
- Rushtrafikk
- m/buss(er)

Videre kan de seks hendelseskategoriene nevnt over detaljeres ytterligere:

Brann- og eksplosjonsulykker (inklusiv de som har utviklet seg fra trafikkulykker) kan også inndeles etter:

- Brann, 20 MW
- Brann, 100 MW
- Brann, 300 MW
- Eksplosjon

En del ulykker med begrenset konsekvens, anses tilstrekkelig behandlet i [1]. Vi vil derfor her vie spesiell oppmerksomhet til ulykker der det foreligger potensialet for store/alvorlige konsekvenser. I lista over brannulykker gitt under, tar vi derfor ikke med de rene trafikkulykker; men disse kommer alle med som mulige ”initierende hendelser” for brann/eksplosjonsulykker. Videre vil vi ikke vurdere mindre branner, som har beskjeden konsekvens, men heller se på flere varianter av større branner.

Ut fra dette er fire scenarioer for normalsituasjonen i hovedtunnelen spesifisert, **Tabell 45**. Det tas utgangspunkt én basisløsning på utforming av tunnel.

Disse scenarier fokuserer på store branner på 100 MW (scenario 3) og 300 MW (Scenario 1 og 4). Videre dekker ett scenario 20 MW (scenario 2). Fire ulike plasseringer er dekket: Dypeste punkt i arm mot Arsvågen og punkt nær portalen ved Harestad. I ett av scenariene antas høy trafikk/mange eksponerte, og scenario 4 blir da et ”worst case” scenario. I de øvrige tre scenarioer antas ”normal” trafikk.

Tabell 45 Spesifisering av scenarioer som er vurdert i hovedtunnelen med enveis trafikk (normalsituasjonen)

Nr	Brannlast (maksimal varmeeffekt)	Sted	Trafikk; eksponering
1	300 MW	Nær portalen ved Harestad; trafikk i retning Arsvågen.	Normal
2	20 MW	Tunnelens dypeste punkt (ca 19 km fra Harestad) i tunnelløp med trafikk mot Arsvågen, (cf. scenario 1)	Normal
3	100 MW (utviklingstid 5 min, varighet 1 t)	Tunnelens dypeste punkt (ca 19 km fra Harestad) i tunnelløp med trafikk mot Arsvågen	Normal
4	300 MW	Tunnelens dypeste punkt (ca 19 km fra Harestad) i tunnelløp med trafikk mot Arsvågen, (cf. scenario 1)	Høy

I tillegg er tre scenarier analysert i armen til Kvitsøy; et nær krysset mot hovedløpet i tunnelen i løpet med trafikk mot Kvitsøy, et midt i tunnelløpet og ved utgangen mot Kvitsøy. Scenariene er sammenlignet med scenarier med tilsvarende lokalisering i referansetunnelen.

Tabell 46 Spesifisering av scenarioer som er vurdert i armen til Kvitsøy.

Nr	Brannlast (maksimal varmeeffekt)	Sted	Trafikk; eksponering
K1	100 MW	500 m fra krysset	Normal, 4 % av ÅDT
K2	300 MW	Midt i tunnelen	Høy, 13 % av ÅDT
K3	20 MW	500 m fra Kvitsøy	Normal, 4 % av ÅDT

I scenarier for *avvikssituasjon* (vedlikehold) antas toveis trafikk i ett tunnelløp for hele hovedtunnel. To scenarier blir vurdert med skiltet fartsgrense 80 km/t.

Tabell 47 Spesifisering av scenarier avvikssituasjoner i hovedtunnelen med toveis trafikk i ett løp

Nr	Brannlast (maksimal varmeeffekt)	Sted	Trafikk; eksponering
A1	100 MW	Midt i tunnelen	Normal
A2	20 MW	Midt i tunnelen	Normal

Totalt gir dette 9 scenarioer for driftsperioden i tunnelen.

8.2 Inngangsdata og antakelser i brannberegninger

Konsekvensberegningene av brannscenariene er basert på en rekke antakelser. Branner er komplekse prosesser og det er nødvendig å gjøre antakelser og forenklinger for å beskrive konsekvensene. Relevansen av antakelsene er diskutert, spesielt der antakelsene får uheldig utslag i forhold til sammenligningen mellom referanse- og basistunnel.

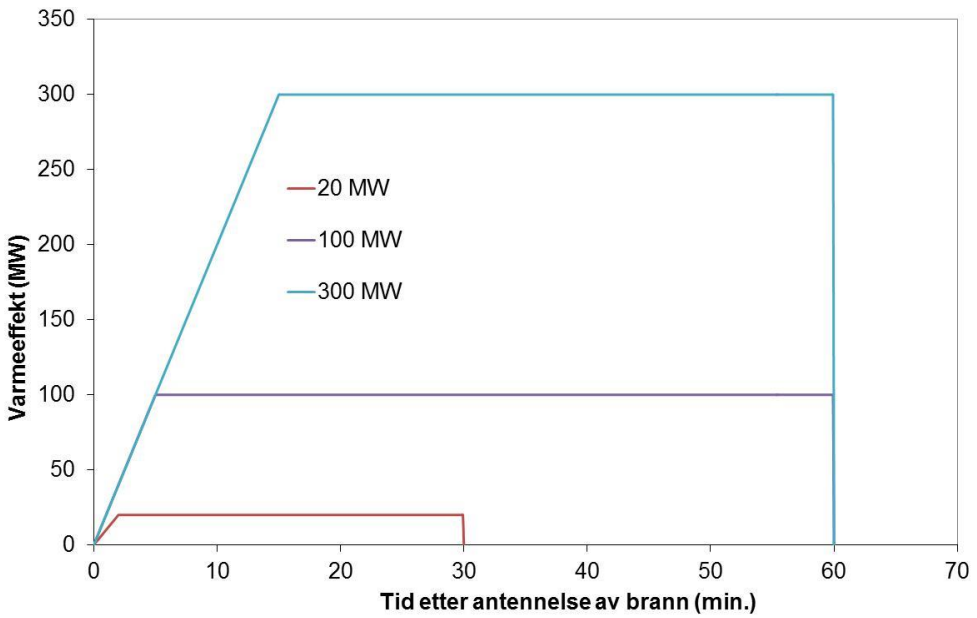
Brannutvikling
Antakelser:

- Det er antatt en rask brannutvikling (jfr. **Figur 67**).
- Branner på 20MW antas å ha varighet 30 minutter og brannene på 100 MW og 300 MW varer 1 time
- Følgende brannvekst er benyttet opp til maksimal varmeeffekt Q_{maks} er nådd:
    - Hvis $Q_{maks} \leq 30$ MW antas brannveksten å være 10 MW/min.
    - Hvis $Q_{maks} > 30$ MW antas brannveksten å være 20 MW/min.

- Beregningsmodellene for brannsimuleringene og udyktiggjøring av personer på grunn av redusert sikt, temperatur (konvektiv varme), varmestråling og giftige gasser dokumentert i Rädningsverkets rapport " Rädningsinsatser i vägtunnlar" (Ingason et.al., 2005). Viktige branntekniske parametre er gitt i Vedlegg B.
- Branneffekten antas ikke å bli påvirket av ventilasjonsforholdene.

Brannutviklingshastigheten har stor betydning for hvor raskt situasjonen blir kritisk for personer som eksponeres av brannen. Er brannutviklingen langsom vil en ha lengre tid til evakuering. For sammenligningen mellom referanse- og basistunnel vil dette og de øvrige antakelsene over ha liten betydning.

Den antatte brannvekst er foreslått i UPTUN (2006). På grunn av at slokkefasen av brannen i de aller fleste tilfeller ikke vil få nevneverdig betydning for resultatene, har vi antatt at brannen etter vekstfasen holder konstant rate til den er utbrent, slik som vist i **Figur 67**.



Figur 67 Antatt brannforløp for henholdsvis branner på 20, 100 og 300 MW.

Kurvene vist i **Figur 67** representerer en teoretisk (dimensjonerende) brannutvikling i følge ovennevnte karakteristikker. Den virkelige brannutvikling vil være noe forskjellig, spesielt i siste fase av brannen, hvor brannintensiteten vil være lavere. Brannen kan ha en noe høyere maksimalverdi enn her angitt i den mest intense fasen av brannen.

Tabell 48 Forutsetninger og antagelser i beregningene.

Parameter	Symbol	Verdi	Enhet
Starttemperatur i tunnel:	T_o	10	°C
Strålingstap:	Fr	30,0	%
Gjennomsnittlig brennverdi av det brennbare i kjøretøyet:	ΔH_c	30000	kJ/kg
Varmetapskoeffisient (konvektiv varmeovergang.):	h_c	0,030	kW/m2 °C
Andel CO pr kg brensel ved forbrenning:	Y_{co}	0,15	kg/kg
Andel sot pr kg brensel ved forbrenning:	Y_s	0,1	kg/kg
Tunneltverrsnitt:	A_t	53,6 (T9,5) 60,4 (T10,5)	m^2
Gjennomsnittlig forsert ventilasjonshastighet:	u_f	3,5 og 4,5	m/s
Gjennomsnittlig naturlig ventilasjonshastighet:	u_n	1	”

Røykspredning

Antakelser:

- Når brannventilasjonen aktiveres vil en eventuell sjiktning bryte sammen, røyken blandes med luft og omrøres og den vil dekke hele tunneltverrsnittet nedstrøms brannen.
- Røyken spres med relativ høy hastighet under tunneltaket nær brannen og den vil avta med avstanden fra brannen når temperaturen avtar. Det er rimelig å anta at røyken spres raskere enn personer greier å evakuere for branner på 20 MW og høyere.
- Røyken spres i én retning, dvs. i initial trekk/ventilasjonsretning.
- Røyken beveger seg med samme hastighet som ventilasjonshastigheten.
- Bortsett fra temperaturen, vil tilstanden i røyken være lik i hele tunnellengden nedstrøms brannen. Temperaturen vil avta med avstanden fra brannen.

Tidlig i et virkelig brannforløp vil røyken kunne sjikte seg under tunneltaket i tunnelen nært brannen. Når røyken avkjøles et stykke fra brannen vil denne sjiktningen bryte sammen, slik at hele tunneltverrsnittet blir fylt av røyk. Dette skjer vanligvis i en avstand tilsvarende 10-20 tunneldiameteren fra brannen (Bergquist et.al, 2001). Dette skulle indikere at sjiktningen i Rogfast-tunnelen, som har en tunneldiameter på ca 10-11 m, vil bryte sammen om lag 100-220 m fra brannstedet, avhengig av brannens intensitet. Ved store branner vil det bli høyere turbulens og mer omrøring, slik at sjiktning nedstrøms brannen blir mer eller mindre borte. Dette viser tester i Runhamartunnelen utført i Uptun-prosjektet.

Brannventilasjon

I beregningene er det antatt at brannventilasjonen oppnår fastlagt ventilasjonshastighet umiddelbart. Det er antatt en rask brannutvikling.

Ved en reell brann som oppstår på dagen vil det være en medvind på 3-4 m/s på grunn av trafikken i tunnelen. På natta noe mindre. Ved brann vil brannventilasjonsnivået bli regulert automatisk til et fast nivå på 3,5 m/s inn mot brannen inntil brannvesenet eventuelt bestiller større eller mindre trekk [30]. Dersom ventilasjonsretningen endres ved brann i forhold til normalsituasjon (brann i ramper), må en påregne mange

minutter (minimum 5-10 min) på å bremse hastigheten, snu retningen og oppnå planlagt ventilasjonshastighet.

Eksponering
Antakelser:

- Røyken tas ut ved ventilasjonssjaktene, når ventilasjonsanlegg fungerer og brann mindre enn dimensjonerende.
  Plassering av ventilasjonstårn som angitt foran.
- Ved brann i dypeste punkt er antatt at røyk tas ut i ventilasjonssjakt 4 km fra brannen (ca 4,3 km[3] fra portalen ved Arsvågen).
- *Når ventilasjonsanlegget ikke fungerer som planlagt i hovedtunnel:*
  - Enveis trafikk: 50 % av kjøretøyene oppstrøms brannen blir røykeksponert.
  - Toveis trafikk: 50 % av kjøretøyene oppstrøms brannen og kjøretøy nedstrøms brannen med kjøreretning mot brannen.
- *Stillestående kø:*
  - 90 % av kjøretøyene nedstrøms brannen blir røykeksponert.
- *Brannen er større enn dimensjonerende brann:*
  - Ventilasjonsanlegget greier ikke å styre røyken i ønsket retning.
  - 50 % av kjøretøyene oppstrøms brannen blir eksponert.

Antakelsene knyttet til hvor mange som eksponeres ved ikke fungerende ventilasjonsanlegg, stillestående kø eller brann større enn dimensjonerende brann er grove, konservative anslag. En brann større enn dimensjonerende brann vil ha størst konsekvenser i nedoverbakke (50 % av Rogfasttunnelen). Ved stigning vil en ha redusert behov for viftekapasitet. Antakelsen er derfor mest konservativ for Rogfasttunnelen.

Antall kjøretøy i og lengde på køen vil avhenge av kjørehastighet og om køen oppstår før eller etter brannstart. Ved beregning av scenarier med kø er selve køen ikke modellert. Av forenklingshensyn er her regnet at 90 % av kjøretøy nedstrøms brannen fram til neste ventilasjonstårn eksponeres ved enveis trafikk, ut fra en hastighet inn i tunnelen på 90 km/t. Dette kan gi en undervurdering av konsekvensene for både basistunnel og referansetunnel. Relativt til referansetunnelen blir konsekvensene i basistunnelen ikke undervurdert.

Dersom kødannelsen er langt fra brannstedet vil tiltak som varsler om brann kunne medføre at personer starter evakuering før de eksponeres for røyk. Flere vil kunne varsles og starte tidlig evakuering i en lang tunnel og antakelsene er derfor mest konservative for Rogfast. Referansetunnelen har imidlertid en høyere ÅDT, dvs. flere eksponerte og mer konservativt for referansetunnelen i så måte. I Lærdalstunnelen er det for eksempel etablert stengepunkt med stopplys og bommer for seksjonsvis stengning hver 1500 meter i tunnelen for å unngå kø inn mot et ulykkes- og brannsted.

Antakelser ved brann i tunnel til Kvitsøy er gitt i vedlegg B (kap.0).

Antall personer i kjøretøy og valg av nødutgang
Antakelser:

- Gjennomsnittlig antall personer pr kjøretøy: 1,5
- Gjennomsnittlig antall personer pr buss: 20
- Personer evakuerer til nærmeste nødutgang

[3] Gitt at 5% stihning gir 1.3 km lengre tunnel.

En buss har typisk 70 passasjerplasser, men her er det antatt at gjennomsnittlig antall passasjerer er langt lavere. Resultatene ville ha blitt mer dramatisk med flere busspassasjerer.
I beregningene er bidraget fra buss basert på en gjennomsnittlig plassering av bussen. Ved uheldig plassering midt mellom nødutgangene vil alle i bussen kunne omkomme, mens ingen vil omkomme dersom bussen står rett utenfor en nødutgang.

Det er liten fare for kø foran nødutgangene. Dersom en full buss (70 personer) stanser nær en nødutgang og alle er kommer ut av bussen før de starter evakueringen gjennom nødutgangen, vil det ta om lag ett minutt å få alle igjennom døren (dørbredde 1,2 m).
Det er antatt at personer velger nærmeste nødutgang. Personer nær brannen velger nok den nærmeste oppstrøms brannen, men dette har ingen betydning for sammenligningen.

Evakuering
Antakelser:

- Personer nær brannen vil starte evakueringen umiddelbart (innen 1 minutt) da varmestrålingen og den raske brannutviklingen vil oppleves som en trussel for de som ser brannen. Øvrige personer som kan eksponeres av røyk starter først å evakuere når de er fanget av røyken.
- Ganghastighet i røyk: 0,2 m/s.

Antakelsene er konservative. Med varslingstiltak i en lang tunnel vil flere kunne starte å evakuere før de fanges av røyk og vil da ha en langt høyere ganghastighet enn 0,2 m/s. Rogfasttunnelen er lengre enn referansetunnelen og antakelsen er derfor mest konservativ for Rogfasttunnelen.

Ganghastighet i tunneler med stigning/fall er ikke tidligere vurdert. Det er stor forskjell på ganghastighet i røyk og uten. Ved større branner slik som i Oslofjordtunnelen i juni 2011 blir sikten fort nær null og da famler man seg fram i en ganghastighet på ca. 0,2 m/s. Ganghastighet i god sikt avhenger av:

- Hvor tett folk går
- Funksjonshemming
- Alder (barn, eldre)
- Forsinkelse på grunn av bindinger til gruppe (familie, reisefølge osv.)
- Bagasje (f.eks. ved brann i buss Ålesundtunnelen begynte bussjåføren å levere ut bagasje til passasjerene som evakuerte til fots)

Anbefalinger fra UPTUN går på å bruke 1,37 m/s i god sikt og 0,2 m/s i dårlig sikt (vi springer ved 7.0 m/s). Ganghastigheten vil avta opp bakke med høy stigning og øke ned bakke. I røyk vil stigningsforhold ha minimal betydning i og med at den allerede er svært lav (0,2 m/s).

Varmen fra brannen vil være en trussel nær brannen, for personer som ikke greier å forflytte seg bort fra brannen (for eksempel sitter fastklemt i en bil etc). Varmestrålingen fra brannen vil være omtrent lik både oppstrøms og nedstrøms brannen, men vil avta raskt med avstanden fra brannen. Ved en brann på 20 MW vil varmestrålingen være en trussel innenfor en avstand på om lag 40-60 m fra brannen.

Spredning
Spredning er ikke inkludert i beregningene.

Brannspredning påvirkes av størrelsen på brannen (strålingsintensiteten og lengden på flammene), avstanden til og mengde brennbart materiale, dvs. avstanden til andre kjøretøy og antall kjøretøy brannen kan spres til. I tillegg kan brannen spres til eventuelle kabler og annen brennbar utrusning i tunnelen.

Sannsynligheten for spredning fra en brann i tyngre kjøretøy eller buss er større enn spredning fra en personbil. Det vil være størst sannsynlighet for spredning ved stillestående kø og ved høy timetrafikk.

8.3 Estimering av konsekvens ift brannscenarier i hovedløp, normalsituasjon (to løp)

Rogfast basisløsning og referansetunnel er definert i Kapittel 2. Når det gjelder basisløsningen er det antatt tre brannsjakter.

Brannscenarier som er vurdert er angitt i **Tabell 45**. Beregningene gis i Vedlegg B (kap. 0). Under gis oppsummering av viktigste resultater.

Antall som ikke lykkes i å evakuere (konsekvens)
I tunneler med to løp og enveis trafikk vil kjøretøy nedstrøms brannen kjøre ut av tunnelen før de blir eksponert av røyk og kjøretøy oppstrøms brannen vil ikke påvirkes av røyken bortsett fra følgende tre tilfeller:

1. Ventilasjonsanlegget fungerer ikke som planlagt
2. Ved stillestående kø
3. Brannen er større enn dimensjonerende brann

Varmen fra brannen vil i tillegg være en trussel nær brannen, for personer som ikke greier å forflytte seg bort fra brannen (for eksempel sitter fastklemt i en bil etc). Varmestrålingen fra brannen vil være omtrent lik både oppstrøms og nedstrøms brannen, men vil avta raskt med avstanden fra brannen. Varmestrålingen vil kun være en trussel innenfor en avstand på om lag 40-60 m fra brannstedet for en brannbelastning på 20 MW.

I beregningene har vi antatt en rask brannutvikling (jfr. **Figur 67**). Varmeeffekten på 20 MW, 100 MW og 300 MW nås etter henholdsvis 2, 5 og 15minutter. Mange brannforløp vil ha en langsommere utvikling. Erfaring viser imidlertid at mange ikke vil starte evakueringen før brannen oppfattes som truende. Ved en langsom brannutvikling vil muligheten for å snu eller passere brannen og komme seg bort fra røyken være større.

1. Ventilasjonsanlegget fungerer ikke som planlagt

Dersom ventilasjonsanlegget ikke virker, vil personer "oppstrøms" brannen kunne bli eksponert. I tillegg vil personer som oppholder seg i røyken bli udyktiggjort raskere. Det er antatt at personer i kjøretøy som blir fanget av røyken forsøker å evakuere til fots. Sannsynligheten for vellykket evakuering, dvs. at personer forflytter seg til nødutgangene før tålegrensen nås er avhengig av avstanden mellom nødutgangene. **Tabell 49** viser hvor mange personer som vil mislykkes i å evakuere til nødutgangene. Antakelser som beregningene er basert på er også angitt i vedlegg B. Det er antatt at 50 % av kjøretøyene oppstrøms brannen blir eksponert.

2. Stillestående kø

Ved stillestående kø – som for eksempel kan skyldes at det er en annen trafikkulykke nedstrøms brannen - vil kjøretøy nedstrøms brannen bli eksponert. **Tabell 49** viser hvor mange personer som vil mislykkes i å evakuere til nødutgangene dersom det er stillestående kø. Det er antatt at 90 % av kjøretøyene som befinner seg nedstrøms brannen, mellom brannen og neste ventilasjonstårn, ved brannstart blir eksponert av røyk.

3. Brannen er større enn dimensjonerende brann

Dersom det oppstår en brann som er større enn dimensjonerende brann, er det vanskelig å forutsi nøyaktig hvilke konsekvenser dette vil ha. En må forvente at ventilasjonsanlegget ikke greier å opprettholde full røykkontroll. Konsekvensen kan være at røykfronten vil kunne gå begge veier ved at noe røyk også vil bevege seg "oppstrøms" brannen i et visst område. Hvor stort område dette vil gjelde er avhengig av en rekke faktorer. En annen effekt er at røykfronten først har retning som forventet, men at den snur lenger ut i brannforløpet og går motsatt vei.

Brannen er større enn dimensjonerende brann i scenario 4 og 6. Ventil[4]asjonsanlegget greier nødvendig vis ikke å styre røyken i ønsket retning og personer oppstrøms brannen kan også bli eksponert. **Tabell 49** viser hvor mange personer som vil mislykkes i å evakuere til nødutgangene. Det er antatt at 50 % av kjøretøyene oppstrøms brannen blir eksponert.

Hovedresultater når antall som ikke lykkes i å evakuere av disse tre årsaker er for hvert scenario oppsummert i tabell under.

Tabell 49 Mislykket evakuering, basis- og referansetunnel, [antall personer]. Personer som ikke klarer å evakuere fordi de f.eks. sitter fastklemt i start brannkjøretøyet er ikke inkludert i tabellen.

	Basistunnel				Referansetunnel			
Sccenario nr:	Sc. 1	Sc. 2	Sc. 3	Sc. 4	R-Sc. 1	R-Sc. 2	R-Sc. 3	R-Sc. 4
	300 MW	20 MW	100 MW	300 MW	300 MW	20 MW	100 MW	300 MW
Ventilasjon fungerer, ikke kø:								
1a) buss ikke involvert	3,4	0	0	27,9	13,1	0	0	216,1
1b) buss involvert	9,7	0	0	34,3	19,4	0	0	222,4
Feil ved ventilasjon (sannsynlighet 0,02):					**Feil ved ventilasjon (sannsynlighet 0,005):**			
1a) buss ikke involvert	7,4	2,0	34,8	236,6	28,4	3,9	69,0	469,0
1b) buss involvert	21,1	2,7	48,5	250,3	42,1	4,6	82,7	482,7
Stillestående kø, fungerende ventilasjon (3,5 m/s) (sannsynlighet 0,01):								
1a) buss ikke involvert	9,0	0	3,6	34,8	47,7	0	8,7	83,6
1b) buss involvert	15,1	0	7,9	40,9	53,8	0	13,0	89,6

.

Ved stillestående kø, svikt i ventilasjon eller brann større enn dimensjonerende brann sier vi at vi har en eskalerende hendelse. Sannsynligheter for eskalering som benyttes i sammenlikningen av konsekvens (uttrykt ved antall omkomne) er følgende:

- Gjennomgående settes en sannsynlighet på 0,02 (2 %) og 0,005 (0,5 %) for at ventilasjonen svikter i henholdsvis basis- og referansetunnelen. Med svikt menes at ventilasjonsanlegget ikke fungerer som forutsatt med hensyn til ventilasjonshastighet, -retning og tid før planlagt hastighet nås. Årsaker kan være strømstans, svikt/utkopling av vifter, svikt i styringssystemet eller operatørfeil på VTS. Sannsynligheten for svikt er antatt å være høyere i Rogfasttunnelen på grunn av anleggets kompleksitet (ofte må mange komponenter virke), og muligheten for operatørfeil på VTS (trykker

[4] Tabellen er oppdatert med beregninger gjort I forbindelse med tilleggsoppdrag for 5% stigning.

på feil knapp). Relativt pessimistiske verdier er valgt, da ventilasjonsanlegget ikke er nærmere analysert.

- Sannsynlighet settes for at en har stillestående kø, (slik at biler nedstrøms brann ikke bare kan kjøre rett ut) settes til 0,01 (1 %). Dette kan inntreffe ved "dobbelthendelse", dvs. en kollisjon som gir kø og i tillegg en kollisjon mot et kjøretøy i køen som gir brann.

Endelig, antas at for scenarier med 300 MW branner vil brannen være større enn dimensjonerende brann, mens dette ikke er tilfelle for de øvrige scenarier. Ved å kombinere disse sannsynligheter med resultatene i **Tabell 49** fås konsekvensen (i form av forventet antall omkomne), gitt brannscenariet. Samtidig antas at busser involvert i 5 % av tilfellene (se **Tabell 49**).

Merk at disse valgte prosenttallene har relativt lite å si for sammenlikningen, da de relative forhold mellom konsekvenstallene for Rogfast basistunnel og referansetunnel er relativt konstante.

Resultatene er oppsummert i **Tabell 50** under, som viser forventet antall omkomne i de ulike scenarier for henholdsvis Rogfast basis og referansetunnel. Vi ser at i de aktuelle scenarier vil referansetunnelen komme høyere ut enn Rogfast basistunnel. Unntak er scenario 2 (20 MW) som er det mest sannsynlige, men her er forventet antall omkomne lave.

Tabell 50 Konsekvenser for ulike scenarier (gitt brann)

Tunnel	Scenario 1 300 MW	Scenario 2 20 MW	Scenario 3 100 MW	Scenario 4 300 MW
Rogfast, basis	4,0	0,04	0,7	33
Referansetunnel	14,1	0,02	0,4	219

Merk at tilsvarende beregninger er gjort når en reduserer avstand mellom gangbare tverrforbindelser til 125 m (i beregningene over er antatt 250 m), se Vedlegg B. Dette viser en signifikant forbedring ved å øke hyppighet av tverrforbindelser.

8.4 Estimering av konsekvens i hovedløp, avvikssituasjon (toveis trafikk i ett løp)

8.4.1 Toveis trafikk i ett løp

I tidligere rapport [55] ble referansetunnelen i dette tilfelle gitt ved:

- ÅDT = 4.000.
- Lenge 10 km.
- Profil T9,5.
- Vertikalkurvatur: 5 km helning på 5 % og 5 km stigning på 5 %.
- Skiltet hastighet 80 km/t.

Denne betegnes referansetunnel R1. Bakgrunnen for her å sette ÅDT=4.000 for referansetunnelen er at med lengde 10 km vil en ikke akseptere T9,5 (tunnelkl. B) hvis ÅDT overstiger 4.000 (se Figur 4.4 i HB021). Gjelder altså ved permanent bruk av kun ett løp.

Når profilen utvides til T10,5 (på hvert løp), kan en operere med en referansetunnel med ÅDT = 8.000 (svarende til kl. C for en 10 km tunnel). Denne er angitt som referanse-tunnel R2. Dette vil åpenbart gjøre det noe lettere å spesifisere en løsning med akseptabel risiko også for avvikssituasjonen.

I avvikssituasjonen har en følgende "basisløsning" for Rogfast hovedløp:

- ÅDT = 13.000; (det antas at dette inkluderer trafikk i hovedløp fra/til Kvitsøy)
- Lengde, ca. 27 km
- Angitt profil med stigning opp til ca 5 %
- Profil: T10,5
- Skiltet hastighet: 80 km/t.

Altså er det spesifikasjoner som i normalsituasjonen med unntak av profil som nå er T10,5 istedenfor 2XT10,5, (og lavere skiltet hastighet).

Metodikken for sammenlikning av Rogfast basisløsning og referansetunnelen blir nøyaktig som beskrevet over. Da ÅDT=13.000 i 27 km klart vil overstiger "eksponeringen" i en referansetunnel på ÅDT=4.000 og lengde 10 km, er det åpenbart – uten å foreta beregninger - at basisløsningen her ikke blir "akseptabel" ut fra en sammenlikning med referansetunnelen; (hvis en ser på permanent bruk av kun ett løp). Åpenbart må en i tillegg til fartsbegrensninger legge begrensninger på trafikken; spesielt ved å begrense avvikssituasjonen til tider av døgnet med lav trafikk, evt. begrense adkomst av tyngre kjøretøy. Hvis en aksepterer at antall kjøretøykm (ÅDTxlengde) "definerer" kjøretøyklasse, vil ett løp på T10,5 kunne være akseptabelt for 8.000x10=80.000 kjøretøykm, (cf. **Figur 11**), og en kunne argumentere for at en slik tunnel med lengde 27 km kan benyttes opp til ÅDT = 80.000/27 ≈ 3.000. En slik beregning kan være til en viss støte når en vil fastsette akseptabel trafikk i avvikssituasjonen. Ellers er det også foretatt sammenliknende konsekvensberegninger for basis- og referansetunnel, uten at en bør legge for mye i disse.

Ved toveis trafikk i ett løp vil kjøretøy nedstrøms brannen som ikke greier å kjøre ut av tunnelen bli omhyllet av røyk. Hvorvidt disse trafikantene kommer seg i sikkerhet via en nødutgang er svært avhengig av brannens størrelse og tid før evakuering starter. Trafikanter i samme situasjon i armen til Kvitsøy må evakuere ut gjennom tunnelløpet og har derfor langt mindre mulighet til å overleve en kraftig brann.

Ved kraftige branner (>100 MW) kan personer som blir omhyllet av røyk bli udyktiggjort, slik at de ikke kan evakuere ved egen hjelp, i løpet av om lag 3-10 minutter. Realistisk evakueringslengde til fots innenfor denne tiden er 36-120 meter (0,2 m/s ganghastighet). Dersom trafikantene ikke starter å forflytte seg før de er "fanget" i røyken vil mange ikke nå frem til nødutgangene. Ved slike alvorlige branner vil det være avgjørende å ha tiltak som minimerer deteksjons-, beslutnings- og reaksjonstiden til trafikantene.

Ved en brann på 20 MW vil tiden til udyktiggjøring av personer omhyllet av røyk være svært avhengig av lufthastigheten ventilasjonsanlegget gir. Uten ventilasjon vil udyktiggjøring kunne skje i løpet av 10 minutter, men med lufthastighet på 3,5 m/s kan det være mulig å overleve. Tid før udyktiggjøring avhenger av en rekke faktorer som bl.a. hva som brenner og tunnelutforming. Forutsetningene som er lagt til grunn for disse beregningsresultatene finnes i vedlegg B.

Tabell 51 Mislykket evakuering, avvikksituasjon, basis- og referansetunnel, [antall personer]. Personer som ikke klarer å evakuere fordi de f.eks. sitter fastklemt i start brannkjøretøyet er ikke inkluderet i tabellen.

	Basistunnel		Referanse-tunnel R1		Referanse-tunnel R2	
Scenario nr:	Sc. A1	Sc A2	R1-Sc. A1	R1-Sc A2	R1-Sc. A1	R1-Sc A2
	100 MW	20 MW	100 MW	20 MW	100 MW	20 MW
Fungerende ventilasjon (sannsynlighet 0,02):						
1a) buss ikke involvert	19,2	0,0	3,1	0,0	6,3	0,0
1b) buss involvert	23,5	0,0	7,4	0,0	10,6	0,0
Feil ved ventilasjon (sannsynlighet 0,005)::						
Mislykket evakuering [antall personer]:						
1a) buss ikke involvert	48,8	1,7	7,9	0,3	15,9	0,5
1b) buss involvert	66,8	2,4	25,9	1,0	33,9	1,3

Alle scenarier har også sannsynlighet for at ventilasjon svikter lik 0,02 (2 %) og 0,005 (0,5 %) for henholdsvis basis- og referansetunnelen. Buss antas involvert i 5 % av tilfellene. Beregninger er vist i vedlegg B.

Resultatene er oppsummert i tabell under, som viser forventet antall omkomne i de ulike scenarier for henholdsvis Rogfast basis og referansetunnel. Vi ser at i begge aktuelle scenarier vil Rogfast basistunnel komme ut adskillig dårligere enn referansetunnelen.

Tabell 52 Konsekvenser for ulike scenarier (gitt brann)

Tunnel	Scenario A1	Scenario A2
Rogfast, basis	20	0,03
Referanse-tunnel R1	3,3	0,001
Referanse-tunnel R2	6,6	0,003

Merk at tilsvarende beregninger er gjort når en reduserer avstand mellom gangbare tverrforbindelser til 125 m (i beregningene over er antatt 250 m), se Vedlegg B. Disse viser en signifikant forbedring ved å øke hyppighet av tverrforbindelser.

8.4.2 Enveis trafikk i *deler* av tunnelen – Kvalitativ vurdering

Enveis trafikk i deler av tunnelen, brann i del med toveis trafikk
På strekningen mellom to ventilasjonstårn hvor toveis trafikk foregår vil det være stor usikkerhet om en greier å sikre at naboløpet er røykfritt ved brann. Ved brann på stykket med toveis trafikk vil kjøretøy som kjører mot ventilasjonsretningen, nedstrøms brannen bli fanget i røyken. Det er derfor mange forhold som skal fungere for at de andre trafikantene vil bli beskyttet av ventilasjonen eller kunne kjøre ut. Trafikken fra det andre løpet inn på toveisstykket må stoppes umiddelbart, noe som kan være en stor utfordring. Ved vedlikehold kan ventilasjonsviftene bli slått av pga arbeidsmiljømessige årsaker (ikke jobbe i trekk). Det kan

derfor ta tid å få riktig overtrykk og trekkhastighet for å styre røyken som planlagt. Ved langsom eller stillestående kø, ventilasjonen svikter eller brannen er større enn dimensjonerende brann vil nødvendigvis ikke ventilasjonen beskytte trafikantene. Det er derfor stor fare for at trafikanter må evakuere forbi et ventilasjonstårn før de kommer til sikrere soner. Ved brann større en dimensjonerende brann er heller ikke disse sonene sikre. Når tunnelen ved hjelp av bergrom deles i 4 soner (etter 8 km, 14,5 km, 18 km og 22,5 km) vil det kunne være like mange eksponerte på denne strekningen som vist i brannscenariene for toveis trafikk i hele hovedtunnelen, men trafikantene har mistet muligheten til å evakuere til naboløpet.

Dersom brannen er større enn dimensjonerende brann kan fortsatt slusene mellom nord- og sørgående løp ha effekt. Så lenge det er strømtilførsel vil det være overtrykk i det løpet som har frisk luft. Det er imidlertid stor usikkerhet knyttet til hvor store lokale trykkoppbygginger en stor brann vil medføre og om overtrykket vil være tilstrekkelig til å forhindre røykspredning mellom løpene via de kjørbare tverrforbindelsene.

Enveis trafikk i deler av tunnelen, brann i del med enveis trafikk
Ved brann i del med enveis trafikk i andre soner enn der toveis trafikken pågår, vil kjøretøy nedstrøms brannen kjøre ut av tunnelen før de eksponeres av røyk dersom det ikke er langsom eller stillestående kø. Ventilasjonen skal beskytte kjøretøy oppstrøms brannen. Dersom ventilasjonen fungerer som planlagt vil en ha mulighet til å evakuere over til et røykfritt naboløp. Dersom ventilasjonen ikke fungerer eller brannen er større enn dimensjonerende brann vil røyk kunne spres til naboløp.

Konklusjon
Forskjell i brannfrekvens er relativt liten mellom løsning med toveis trafikk i hele løpet og deler av løpet. "Blandet" løsning har ulempen ved øket kompleksitet (utfordringer ved håndtering av brannscenarier). Toveis trafikk i hele løpet, med full evakueringsmulighet til røykfritt naboløp, har derfor en fordel framfor toveis trafikk i deler av tunnelen. Det er imidlertid fordeler ved å ha to løp i hvert fall i stigninger (framfor å ha kun ett løp for hele tunnelen), både sikkerhetsmessig og mhp trafikkavvikling. Velges en "blandet" løsning med bruk av kjørbare tverrforbindelser er det av stor betydning at robuste tiltak iverksettes for å minimalisere muligheten for røyklekkasje fra ett tunnelløp til det andre, for å unngå at rømningsveien fylles med røyk.

Sikkerhetsmessig vil det være den beste løsningen å ha kolonnekjøring med kun trafikk i en retning, med ventilasjon med kjøreretning og evakueringsmulighet til røykfritt naboløp. Krav til oppstillingsplasser ved portalene gjør imidlertid at dette er et lite realistisk alternativ, bortsett fra i perioder med lav trafikk.

8.5 Estimering av konsekvens ift brannscenarier i Kvitsøy arm

I kap. 8.5.1 foretas en kvalitativ sammenligning av referansetunnel og basistunnel inkl. kryss. Sammenligningen er gjort for å vurdere hvordan kryssløsningen slår ut på risikoen sammenlignet med en tunnel uten kryss, men med høyere ÅDT.

I kap. 8.5.2 er konsekvenser av tre brannscenarier (jfr. **Tabell 46**) i referansetunnel og basistunnel sammenlignet for å se effekt av at Kvitsøy-tunnelen har ett eller to løp, og for å få frem forskjellen mellom de to tunnelene ved branner nær portalene til Kvitsøy og midt i tunnelen. Effekt av kryssløsningen i basistunnelen er vurdert kvalitativt.

8.5.1 Kvalitativ vurdering av brannscenarier i Kvitsøy-arm

Sammenlikning gis her med følgende:

Referansetunnel:

- ÅDT: 1500
- Fartsgrense: 80 km/t
- Profil: T8,5
- Stigning: 7 % i 3,5 km frå Kvitsøy, 1 % 0,5 km før hovedtunnel.
- Lengde: 4 km (Kvitsøy alt B03 (2011-11-04))
- Andel tyngre kjøretøy: 15 %

Basistunnel:

- ÅDT: 900
- Kryssløsning i enden av tunnelen
- Øvrig utforming som referansetunnel

Her gjøres en kvalitativ sammenligning av referansetunnelen og basistunnelen med spesifikasjoner som angitt over. De to tunnelene har lik utforming, men basistunnelen har også kryssløsningen i enden av tunnelen. Referansetunnelen har på sin side en høyere ÅDT.

For å finne ut hvordan sikkerheten i basistunnelen er i forhold til referansetunnelen vurderes konsekvensene av en brann på 100 MW på fire ulike steder; 1) nær portal (500 m ifra) ved Kvitsøy, 2) midt i tunnelen, 3) nær den andre portalen (500 m ifra) for referansetunnelen og i krysset for basistunnelen og 4) utenfor tunnel.

1. Brann nær portal ved Kvitsøy:
   Referansetunnelen har høyere ÅDT, som medfører flere eksponerte og omkomme.

2. Brann midt i tunnelen:
   Referansetunnelen har høyere ÅDT, som medfører flere eksponerte og omkomme.

3. Brann nær portalen for referansetunnelen og i krysset for basistunnelen:
   En brann 500 m portalen i referansetunnelen vil kunne gi omkomne selv når ventilasjonssystemet fungerer, selv om det ikke er langsom eller stillestående kø og selv om brannen er mindre enn dim. brann. Eksempel 1 i vedlegg (kap.0) viser beregningsresultater.

   Brann i en av rampene i basistunnelen skal med et fungerende ventilasjonsanlegg, ikke medføre at kjøretøy i rampene blir eksponert av røyk (jfr. ventilasjonsbeskrivelsen). Kryssløsningen har imidlertid et mer komplekst ventilasjonssystem og sannsynligheten for at anlegget virker og har effekt som planlagt er mindre enn for referansetunnelen. Eksempel 2 i vedlegg B viser konsekvenser gitt brann.

4. Brann utenfor tunnelen (dvs. i dagsone for referansetunnelen og i hovedløpet for basistunnelen):
   En brann i det fri vil ikke ha konsekvenser for referansetunnelen.
   For basistunnelen vil kjøretøy fra Kvitsøy møte røyk ved påkjøring til hovedløpet med brann (dvs i rampe fra Kvitsøy mot Stavanger ved brann i sørgående hovedløp og i rampe fra Kvitsøy mot Haugesund ved brann i nordgående hovedløp), dersom brannen er oppstrøms innfletting fra Kvitsøy og røyk har nådd dit, før brannen er detektert og trafikk fra Kvitsøy er stoppet. Om brannen er

nedstrøms innfletting vil kjøretøy fra Kvitsøy være beskyttet på samme måte som bilister i hovedløpet. Om brannen er langt oppstrøms vil kjøretøy fra Kvitsøy kjøre ut av hovedløpet foran røyken.

Dersom ventilasjonen ikke fungerer vil røyk trekke opp i ramper mot Kvitsøy. En brann i sørgående hovedløp nær rampen opp til Kvitsøy vil med ventilasjon som ikke fungerer, gi røykspredning i denne rampen dersom trekkretningen går mot Kvitsøy (motsatt av hva som er planlagt) vil røyk trekkes opp i Kvitsøy armen. Kjøretøy fra rampen fra nordgående løp til Kvitsøy vil møte røyken der rampene flettes i oppstigningen til Kvitsøy (jfr. kvantitative beregninger i eksempel 3 vedlegg B, kap.0).

Konklusjon
Basistunnelen kommer bedre ut enn referansetunnelen for brannscenarier lokalisert i tunnelen eller rampene, fordi referansetunnelen har høyere ÅDT. Basistunnelen vil imidlertid påvirkes av brannscenarier i hovedløpet, mens referansetunnelen ikke påvirkes av branner utenfor tunnelen.

8.5.2 Kvantitativ vurdering av brannscenarier i Kvitsøy-arm

For å sammenligne effekten av at tunnelen til Kvitsøy har ett eller to løp, og få frem forskjellen på branner nær portalen til Kvitsøy og midt i tunnelen, er kryssløsningen i basistunnelen utelatt.

Tre scenarier er analysert; et nær innløpet på Kvitsøy, et midt i tunnelløpet og et nær krysset ved hovedtunnelen. Scenariene i referansetunnelen er sammenlignet med tilsvarende scenarier i basistunnelen og de to alternative utformingene. Brannene har følgende lokalisering:

- Scenario K1: 100 MW brann, 500 m fra krysset (for Alt. 2: i løpet med trafikk fra Kvitsøy), timetrafikk på 4 % av ÅDT
- Scenario K2: 300 MW brann, midt i tunnelen (for Alt. 2: i løpet med trafikk fra Kvitsøy), timetrafikk på 13 % av ÅDT
- Scenario K3: 20 MW brann, 500 m fra Kvitsøy (for Alt 2: i løpet med trafikk mot Kvitsøy), timetrafikk på 4 % av ÅDT

Beregningene er nærmere beskrevet i vedlegg B. Tabellen under viser antall personer som forventes å bli udyktiggjort i referansetunnelen og basistunnelen (uten kryss) med ett løp (T8,5) og tre alternativer: Alt. 1: T10,5, Alt. 2: T10,5 med evakueringsveg og Alt. 3: to løp (2xT9,5).

Alt. 3 med to løp (2 x T9,5) og enveis trafikk er klart den sikreste løsningen, men T10,5 med separat evakueringsveg kommer også meget gunstig ut. Som det framkommer av tabellene under er forventet antall som blir udyktiggjort ved brann langt lavere enn for en løsning med ett løp. Alt 1. er noe bedre enn basistunnelen.

Tabell 53 **Antall personer som forventes å bli udyktiggjort i referansetunnel og basistunnel i scenario K1-K3. Personer som ikke klarer å evakuere fordi de f.eks. sitter fastklemt i start brannkjøretøyet er ikke inkludert i tabellen.**

	Referansetunnel (T8,5)			Basistunnel (T8,5)		
	K1 100 MW	K2 300 MW	K3 20 MW	K1 100 MW	K2 300 MW	K3 20 MW
Fungerende ventilasjonssystem (3,5 m/s), ingen kø						
• Buss ikke involvert	4,2	21,9	0, men mulig helseskade	2,55	13,2	0, men mulig helseskade
• Buss involver	22,7	40,4	0, men mulig helseskade	21	31,7	0, men mulig helseskade
Feil ved ventilasjon (sannsynlighet 0,005):				**Feil ved ventilasjon (sannsynlighet 0,02):**		
• Buss ikke involvert	6,8	21,9	2,55	4,05	13,2	1,5
• Buss involver	25,3	40,4	21,05	22,55	31,7	20,5
Stillestående kø						
• Buss ikke involvert	4,5	27,9	0, men mulig helseskade	NA	16,8	NA
• Buss involver	23,0	46,4	0, men mulig helseskade	NA	35,3	NA

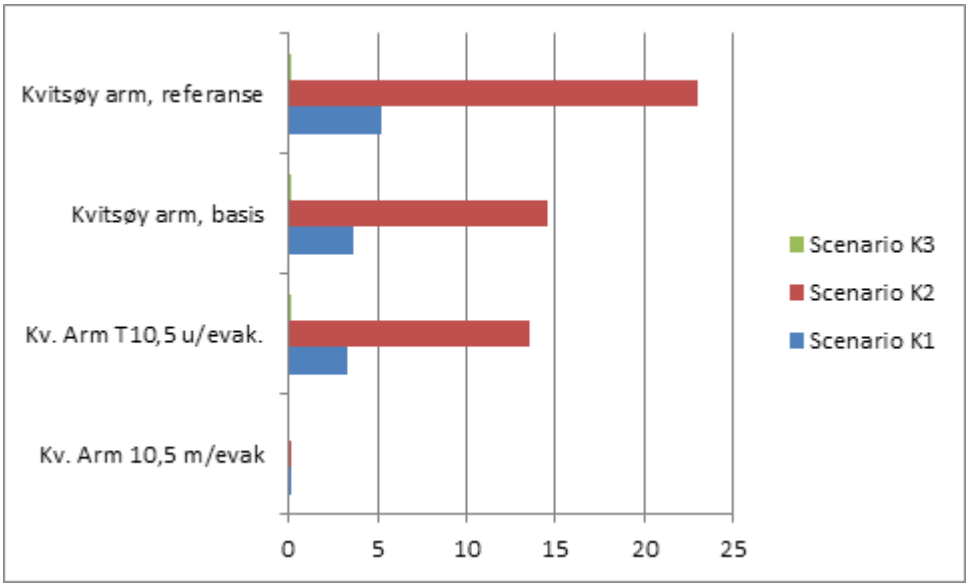
Tabell 54 **Antall personer som forventes å bli udyktiggjort i de alternative løsningene i scenario K1-K3. Personer som ikke klarer å evakuere fordi de f.eks. sitter fastklemt i start brannkjøretøyet er ikke inkludert i tabellen.**

Alt. 1 (T10,5):			
	K1 100 MW	K2 300 MW	K3 20 MW
Fungerende ventilasjonssystem (3,5 m/s), ingen kø:			
• Buss ikke involvert	2,4	12,54	0, men mulig helseskade
• Buss involver	20	30,1	0, men mulig helseskade
Dersom ventilasjonen ikke virker:			
• Buss ikke involvert	3,84	12,54	1,42
• Buss involver	21,42	30,1	19,5
Stillestående kø:			
• Buss ikke involvert	NA	16,0	NA
• Buss involver	NA	33,54	NA
Alt. 1 (T10,5) med separat evakueringsveg (med henholdsvis 250m og 125 m mellom nødutgangene):			
Fungerende ventilasjonssystem (3,5 m/s), ingen kø:			
• Buss ikke involvert	0,6 (250 m) 0 (125 m)	4,1(250 m) 0 (125 m)	0, men mulig helseskade
• Buss involver	4,6 (250 m) 0 (125 m)	9,9 (250 m) 0 (125 m)	0, men mulig helseskade
Dersom ventilasjonen ikke virker:			
• Buss ikke involvert	2,7 (250 m) 1,6 (125m)	8,9 (250 m) 5,3 (125 m)	0,1 (250 m) 0, men mulig helseskade (125 m)
• Buss involver	15,3 (250 m) 9,1 (125 m)	21,4 (250 m) 12,8 (125 m)	0,8 (250 m) 0, men mulig helseskade (125 m)
Stillestående kø:			
• Buss ikke involvert	NA	5,2 (250 m) 0 (125)	NA
• Buss involver	NA	11,0 (250 m) 0 (125 m)	NA
Alt. 3 (2 x T9,5):			
Fungerende ventilasjonssystem (3,5 m/s), ingen kø:			
• Buss ikke involvert	0	7,5 (250 m) 4,5 (125 m)	0
• Buss involver	0	20,6 (250 m) 12,3 (125 m)	0
Dersom ventilasjonen ikke virker:			
• Buss ikke involvert	1,1 (250 m) 0,6 (125 m)	7,5 (250 m) 4,5 (125 m)	0,1 (250 m) 0 (125 m)
• Buss involver	14,2 (250 m) 8,5(125 m)	20,6 (250m) 12,3 (125 m)	0,8 (250 m) 0 (12 5m)
Stillestående kø:			
• Buss ikke involvert	0 (250 m) 0 (125 m)	1,0 (250 m) 0 (125 m)	0
• Buss involver	4,4 (250 m) 0 (125 m)	7,2 (250 m) 0 (125 m)	0

Resultatene i foregående tabeller er sammenfattet under på samme måte som for vurderingene av hovedløpet. Kvitsøy-arm komme relativt bra ut av sammenlikning. Oppsummering gis under.

Tabell 28 Konsekvenser for ulike scenarier (gitt brann) for Kvitsøy-arm.

Tunnel	Scenario K1 100 MW	Scenario K2 300 MW	Scenario K3 20 MW
Referansetunnel	5,2	23	0,02
Kvitsøy-arm, basis	3,6	14,6	0,05
Kvitsøy-arm 10,5 uten evakuer.	3,3	13,6	0,01
Kvitsøy arm m/evak., 125 m	0,04	0,11	0



Figur 68 Konsekvenser for ulike scenarier (gitt brann) for Kvitsøy-arm (grafisk fremstilling av tabellen over).

De kvantitative resultatene kan underbygges ved en rekke kvalitative vurderinger:

Fordeler med to løp framfor ett løp til Kvitsøy:

- Færre eksponerte

Ett løp og toveis trafikk medfører langt flere eksponerte ved brann. Kjøretøy nedstrøms brannen i felt med kjøreretning mot brannen vil bli eksponert. Med to løp vil ingen kjøretøy være nedstrøms brannen (utenom ved stillestående kø, ikke fungerende ventilasjonsanlegg eller brann større enn dimensjonerende brann)

- Betydelig bedre rømningsmuligheter

Med ett løp har personer som er fanget av røyken ingen rømningsmulighet ut over rømning i lengderetning av tunnelen, dvs. kjøretøy nedstrøms brannen i felt mot brannen har ingen rømningsmulighet, ut over at snu, noe som er svært vanskelig.

Med to løp benyttes naboløpet som evakueringstunnel ved brann. Med ett løp må en evakuere i tunnelløpet til Kvitsøy eller til hovedløpet. Forventet antall omkomne er langt høyere med ett løp (jfr. beregninger).

- Mindre konsekvenser dersom ventilasjonsanlegget ikke fungerer som planlagt (sjekkes ved scenariegjennomganger).

Ventilasjonsprinsippet er basert på at ventilasjonsretning, overtrykk (hvor) styres ut fra hvor brannen oppstår. Konsekvensene ved svikt blir mindre med to løp, da personer har mulighet til å evakuere over til naboløpet. Røykspredning fra hovedtunnelen kan imidlertid, dersom ventilasjonsanlegget ikke fungerer, i verste fall skje til begge løp i Kvitsøy tunnelen.

Fordeler med fire løp til Kvitsøy:

- Ingen risiko for røykspredning mellom løpene i hovedtunnelen.

I en toløps tunnel til Kvitsøy vil hvert løp deles i to ramper; én til hver av hovedløpene til henholdsvis Haugesund og Stavanger. Røyk kan dermed spres til begge løp i Kvitsøy tunnelen og til begge hovedløpene og en har ingen røykfri rømningsvei i verken Kvitsøy tunnelen eller hovedtunnelen. Dette unngås med 4 løp til Kvitsøy.

Et tunnelsystem utføres normalt med samme standard i hele anlegget (iflg. SVV). En rampe (de definerer hele av-/påkjøringsstrekningen fra hovedløp til Kvitsøy som rampe) skal dermed ha samme sikkerhetsutforming som hovedløpet selv om trafikktettheten er mindre.

Mulig tiltak med to løp: Brannporter i rampene mellom hovedtunnel og Kvitsøy tunnel, nær hovedløpet.

Ulemper med brannporter:

- Må ha tiltak for å hindre kollisjoner i brannport og som følge av at trafikken stopper opp foran porten. Brannportene skal plasseres helt nede ved hovedtunnelen, så kjøretøy i hovedtunnelen vil ha mulighet til å fortsette ut hovedtunnelen, så disse trenger ikke å stoppe. For trafikken i Kvitsøytunnelen kan en bom installeres der de to løpene fortsatt er parallelle og hvor der er mulighet for at etablere en kjørbar tverrforbindelse, som vil gi mulighet for å snu i de tilfeller hvor brannportene lukkes og bom går ned. Denne muligheten må undersøkes nærmere.
- Tiden det tar før lukking er mulig. Kan få uønsket brannspredning før porter lukkes. Dette bør undersøkes nærmere.
- Påliteligheten av porten og konsekvenser dersom den ikke lukker som planlagt. Det er mest kritisk at portene fungerer dersom ventilasjonen ikke fungerer etter hensikten. Skyldes svikt i ventilasjonen brudd på strømtilførselen kan en også ha mistet strømtilførselen brannportene (fellesfeil). Her er redundant strømforsyning essensielt.

Utfordring i alle løsningene (ett, to og fire løp): *Rømningsvei for personer i rampene.*

Dersom hovedtunnelen får rømningsveier pr. 125 m foreslås dette også gjelde for rampene. Denne avstanden mellom nødutganger anbefales for øvrig også for Kvitsøytunnelen dersom ett løp med evakueringsvei eller to løp velges.

Mulige tiltak:

- Evakueringstunnel langs rampene (må dimensjoneres for å tåle kollisjon mot vegg). Hvis evakueringstunnelen etableres på innside av kurven minskes risiko for kollisjon. Evakueringstunnelen må føres frem til tunnelen går over til to løp.
- Tverrforbindelser over til naboramper eller hovedløp (avhengig av avstander). Det må være mulighet å evakuere til det hovedløpet som er røykfritt. Det er behov for å komme over eller under et røykfylt hovedløp.

Konklusjon:
Brann i en av rampene i basistunnelen, 500 m fra hovedløpet, vil ha mindre konsekvenser enn brann i referansetunnelen tilsvarende avstand fra portalen. Antall eksponerte vil være lavere pga lavere ÅDT og at trafikken er fordelt på fire ramper (jfr eksempel under). Merk at en da ikke har regnet med innsats fra redningstjenesten som vil ha kortere innsatstid.

Inntreffer imidlertid brannen nærmere portalen har personer i referansetunnelen mulighet til å evakuere ut i friluft. Personer i basistunnelen må evakuere til hovedløp og videre over til "røykfritt" løp.

Den største forskjellen på basistunnelen og referansetunnelen er konsekvensene ved brann rett utenfor tunnelene, dvs. i det fri for referansetunnelen og i hovedløpet for basistunnelen. For referansetunnelen vil ikke dette ha betydning, men for basistunnelen kan dette ha betydning som vist i eksemplene i kap. 8.5.1.

De kvantitative beregningene for de aktuelle scenarier viser imidlertid at gitt en brann, vil sikkerheten i basistunnelen inkl. kryss være bedre enn referansetunnelen. Hovedgrunnen er at trafikktettheten er langt høyere i referansetunnelen. Sannsynligheten for at ventilasjonen fungerer som forventet i basistunnelen er imidlertid mindre. Er brannen større enn dimensjonerende brann har en ikke kontroll med hvor røyken spres. En fare er spredning mellom hovedløpene via rampene.

De planlagte ventilasjonsprinsipper dersom to løp velges i Kvitsøytunnelen er også kompleks og styres etter hvor brannen inntreffer. To løp vil imidlertid være en stor fordel fordi personer kan evakuere over til naboløpet (jfr. beregninger over).

Merknad.
Dette kapitlet har ikke som formål å beregne total risiko for de ulike elementer av (eller den totale) tunnel, men kun å se på risiko i forhold til (alvorlige) brannscenarier, som anses som det mest kritiske for en tunnel av standard til Rogfast. Hvis en sammenlikner dødsfallrate pr kjøretøykm er den i samme størrelsesorden for kjøring i hovedtunnel og Kvitsøy (se Tabell 21, Tabell 22 som gir vel 50% større rate i armen til Kvitsøy). Total risiko ved gjennomkjøring av hovedtunnel er derfor klart større enn ved kjøring i Kvitsøy armen. Kjøring Stavanger-Kvitsøy er mindre risikofylt enn kjøring Stavanger-Arsvågen, pga den kortere avstand. At tilsvarende gjelder når vi ser på totalrisiko knyttet til henholdsvis hovedløp og Kvitsøy-arm er jo også klart belyst i Tabell 21- Tabell 22 i Avsnitt 7.3.

8.6 Detaljert analyse av brannscenarier – Konklusjoner

Risiko i hovedløp, normalsituasjon (to løp):
En brann større enn dimensjonerende brann kan ha katastrofale følger med svært mange omkomne. Alvorlig situasjon vil også oppstå om ventilasjonen ikke fungerer eller ved langsom eller stillestående kø. Forventet antall omkomne i de ulike scenariene som er vurdert er imidlertid 2-3 ganger høyere i referansetunnelen enn Rogfast basistunnel. Dette gir altså ikke grunnlag for å kreve ytterligere tiltak for Rogfast for normalsituasjonen ut fra en sammenligning mellom basis- og referansetunnel. Konsekvensene ved disse scenariene er imidlertid så alvorlige både for basis- og referansetunnelen at tiltak bør vurderes, selv om sannsynligheten for scenariene er lav og antakelser beregningene er konservative. Hovedutfordringen dersom ventilasjonen svikter eller ved branner større enn hva ventilasjonsanlegget er dimensjonert for, er at en ikke har kontroll med hvor røyken går og personer "oppstrøms" brannen kan bli eksponert. Kortere avstand mellom nødutgangene, større kapasitet på ventilasjonsanlegg og kommunikasjonssystem for tidlig varsel til trafikantene er tiltak som vil være effektive. Sannsynligheten for stillestående kø reduseres med krabbefelt og bredere skulder. Men reduseres avstanden mellom nødutgangene fra 250 m til 125 m bedres sikkerheten betydelig. Antall omkomne reduseres med 40 % ved scenariene hvor ventilasjonen feiler og de

øvrige scenariene forventes ingen omkomne (jfr.Tabell 70). Risikovurderingen i Kap 3. indikerer også at vi bør søke risikoreduksjon for en del ulykkestyper.

Merk at kryssløsningen vil gi et ekstra risikobidrag til basistunnelen, som ikke er inkludert i estimatene. Risikoen er svært avhengig av om ventilasjonsanlegget greier å styre røyken i ønsket retning raskt nok, samt at trafikkstyringstiltak hindrer kjøretøy å kjøre inn i røyk fra rampene. Kryssløsningen kan bidra til røykspredning mellom hovedløpene via rampene, som medfører at rømningsveien for trafikantene i hovedtunnelen fylles med røyk. Dersom brann oppstår i rampene fra Kvitsøy til sørgående eller nordgående hovedløp vil ventilasjonen styre røyken til henholdsvis sørgående og nordgående hovedløp (jfr Figur 31). En risikerer at kjøretøy i hovedløpet kjører inn i røyken før de greier å stoppe. Fare for kollisjon i tunnelvegg er stor, samt påkjørsel bakfra når flere kjøretøy kjører inn i røyken. Kollisjoner kan medføre at flere sitter fastklemt og ikke greier å evakuere til nødutgangene.

Risiko i hovedløp, avvikssituasjon (ett løp hele tunnel):
En brann i en avvikssituasjon hvor trafikken kjøres i et løp (toveis trafikk) vil være langt alvorligere enn normalsituasjonen med enveis trafikk i to løp. Rogfast basistunnel kommer langt dårligere ut enn referansetunnelen når forventet antall omkomne i brannscenarier sammenlignes. Tiltak er nødvendig. Reduseres avstanden mellom nødutgangene fra 250 m til 125 m bedres sikkerheten betydelig.

Risiko i hovedløp, avvikssituasjon (ett løp deler av tunnel) - Kvalitativ vurdering:
Å redusere strekningen med toveis trafikk er en fordel mht konsekvensene ved brann. Det betinger imidlertid det kan vises at en røykspredning via tverrforbindelser innen kontroll av røyk er etablert etter branndeteksjon er ufarlig, og at ventilasjonssystemet er pålitelig og sikrer at tunnelløpet uten brann er røykfritt både i sonen med enveis trafikk og sonene toveis trafikk. Dersom det er usikkerhet om dette vil det være bedre å benytte ett løp og ha tilgang på et røykfritt naboløp til evakuering.

Kolonnekjøring med enveis trafikk i ett løp vil være den klart sikreste måten å avvikle trafikken ved avvikssituasjoner, men dette men anses uaktuelt grunnet behov for oppstillingsplasser.

Risiko i Kvitsøy-tunnel med kryssløsning:
Referansetunnelen har høyere ÅDT og forventet antall omkomne, gitt brann er høyere i scenariene i referansetunnelen enn i basistunnelen inkl. kryss. Sannsynligheten for at ventilasjonsanlegget fungerer som planlagt er mindre i basistunnelen.

To løp til Kvitsøy vil gi en langt bedre sikkerhet for de berørte, da evakuering kan skje over til naboløp. Det er også nødvendig med evakueringsmuligheter i rampene da disse skal ha samme sikkerhet som det øvrige tunnelsystem. Ett løp til Kvitsøy med separat rømningsveg gir også god sikkerhet for de berørte og langt bedre enn kun ett løp.

Sensitivitet
Det er foretatt noen enkle sensitivitetsberegninger med hensyn til ÅDT og andel tyngre kjøretøy, se Vedlegg B. Se også Kapittel 7.

8.7 Gasstransport i tunnel

Her gjengis hovedresultater fra en rapport utarbeidet av SP Fire Research om gasstransport i Rogfast tunnelen, og som i sin helhet er gjengitt i Vedlegg D. I denne rapporten ser en på mulige konsekvenser som kan oppstå ved transport av stoffer som kan forårsake eksplosjon. Den drøfter ikke hvor ofte ulykker og

lekkasje av gass vil skje, men under vil det inkluderes noen vurderinger også av dette. Vedlegg D presenterer ulike scenarier basert på enkle modeller for spredning av gass i tunnel.

Det gis først noe bakgrunnsinformasjon om LPG og gasspredning, deretter diskuteres ulike scenarier, og til slutt presenteres noen oppsummerende vurderinger.

8.7.1 Egenskaper til LPG

LPG eller *liquified petroleum gas* består hovedsakelig av propan (C_3H_8), men kan også inneholde små mengder av propylen, butan, iso-butan og metan. I Norge er LPG ensbetydende med 95% propan og 5% butan. I de videre vurderingene er det derfor kun propan som blir vurdert. Ved normalt trykk og romtemperatur vil propan forekomme som gass. Propan er fargeløs og luktfri (men vil være tilsatt lukt) og er 1,55 ganger så tung som luft. En propanlekkasje vil likevel være lett synlig fordi flytende propan fordamper momentant i luft og etterlater en tåkelignende gassky, (vanndamp i luften kondenserer og blir til dråper). (Ved store utslipp kan fordampningen ta noe tid, og gass kan renne langs vegbanen før den fordamper.) Propan kondenserer til væske ved 8 bar og 20 °C. Når flytende propan fordamper til gass, blir 1 liter væske til ca. 270 liter gass ved normalt trykk og temperatur. Propan er eksplosiv i luft når konsentrasjonen ligger mellom 2,1 – 9,5 vol. %. Nedre grense påvirkes lite av trykk, mens øvre grense utvides ved høyere trykk. Slike høye trykk inne i en tunnel vil imidlertid kun forekomme ved en eksplosjon. Brennbarhetsgrensene utvides ved en høyere temperatur, men temperaturen skal bli nokså høy før dette har noen stor innvirkning.

8.7.2 Gassspredning

Når væske fordamper til gass skjer det en kraftig volumøkning (270x) som fører til et overtrykk rundt utslippsstedet. Gasskyen vil da trekkes mot områder med lavere trykk og slik spre seg utover i begge retninger av tunnelen.

En stor tankbil kan frakte med seg 24 tonn LPG, noe som tilsvarer ca. 13 000 m^3 propangass. Dersom man fordeler 13 000 m^3 propangass likt utover tunnelen (tverrsnitt 60 m^2) vil det dekke hele tunnelens volum over en distanse på ca. 215 meter. I dette tenkte eksemplet er konsentrasjonen 100 % propan. Dersom man tynner ut konsentrasjonen til nedre brennbarhetsgrense (2,1 %) dekker gassen over 10 km.[5] En propantank har med andre ord potensiale til å forårsake skader over en lang strekning om all gassen eksploderer.

Prinsipper for gasspredning
Propan vil spre seg i tunnelen basert på fire prinsipper:

1. Volumekspansjon: Et ukontrollert utslipp fra en LPG tank vil i de fleste tilfeller innebære at flytende propan lekker ut. Dersom store mengder flytende propan lekker ut vil dette altså føre til en kraftig trykkøkning, og gasskyen vil ekspandere mot nærmeste portal.
2. Diffusjon: Gass fra et område med høy konsentrasjon vil bevege seg mot et område med lavere konsentrasjon
3. Adveksjon: Gass forflyttes som følge av ventilasjonen.
4. Tyngdekraften: Gasser tyngre enn luft vil bevege seg mot laveste punkt og eventuelt nedover i tunnelen, mens gasser lettere enn luft vil bevege seg mot henget og oppover i tunnelen. Propan er tyngre enn luft og vil da trekke nedover i tunnelen.

[5] 1,26 kubikkmeter propangass per 1 meter tunnel tilsvarer en konsentrasjon som er lik nedre brennbarhetsgrense.

Disse fire mekanismene vil være tilstede i ulik grad. Man kan se for seg flere scenarioer der betydningen av disse har ulik grad av involvering.

i. Ventilasjon ikke igangsatt og få biler i tunnelen.
ii. Ventilasjon på maksimal effekt, 3,5 m/s.

I tilfelle *i.* vil det være minimalt med trekk i tunnelen og gassen vil i første omgang spre seg hovedsakelig på grunn av volumekspansjon, etter hvert vil diffusjon og tyngdekraften spille en viktigere rolle. I tilfelle *ii.* ved maksimal ventilasjon vil all luft blandes såpass godt og raskt at både diffusjon og tyngdekraften vil spille en minimal rolle. I hvor stor grad volumekspansjon bidrar kommer an på hvor store utslipp det er snakk om. Hvilke scenarioer som kan oppstå påvirkes hovedsakelig av to parametere: Utslippets størrelse og viftekapasiteten.

Utslippsrater
Størrelsen på et gassutslipp bestemmes av flere faktorer, blant annet hullstørrelsen, trykket på tanken og høyden på hullet. Som vist i Vedlegg D kan relativt små mengder væske resultere i svært store mengder gass. Som eksempel på at slike store utslipp kan forekomme, kan det nevnes en hendelse fra Italia i 2009, der en LPG tank på et tog fikk en flenge på ca. 100 cm^2 (2cm x 43cm). Dette var en 45 tonns tank (volummessig større enn hva man finner på norske veier) med 15 bar trykk, og den ble tømt i løpet av 300 sekunder, med en utslippsrate på over 320 kg/s flytende propan. Dette tilsvarer ca. 173 kubikkmeter med gass pr. sekund.

8.7.3 Scenarier

En kan skille mellom scenarier for eksplosjon og brann.

Eksplosjon
En eksplosjon er en prosess som framtvinger en plutselig og kraftig trykkbølge, og kan inndeles i to underkategorier: *deflagrasjon* og *detonasjon*.

- *Deflagrasjon* er en forbrenning eller reaksjonsbølge som propagerer med en hastighet mindre enn lydhastigheten (340 m/s).
- *Detonasjon* betyr at reaksjonsbølgen propagerer med en hastighet større enn lydhastigheten. På grunn av den svært raske reaksjonen, fører disse eksplosjonene til en svært kraftig trykkbølge som fører til omfattende interaksjoner med nærliggende objekter.
- *BLEVE (Boiling liquid expanding vapor explosion*) er en eksplosjon som følge av at en beholder med brennbar væske og gass blir utsatt for en kraftig varmepåføring som får væsken til å koke. Dette gjør at trykket inne i tanken øker. Tanken er utstyrt med sikkerhetsventiler som avlaster det økte trykket. Etter hvert som væskenivået i tanken synker, vil veggene i tankene bli varmere og varmere som til slutt kan føre til at tanken revner med den konsekvens at store mengder gass og væske blir frigjort. Væsken vil bråkoke som fører til en effektiv blanding med luft etterfulgt av en kraftig eksplosjonsartet forbrenning i form av en kraftig ildkule.

Brann
I tillegg til gassutslipp som kan gi eksplosjoner er det en mulighet at det oppstår en jetbrann eller en væskedamsbrann.

- *Jetbrann* inntreffer når trykksatt gass/væske som brenner der utslippet er. Hvis det er væske omtales det ofte som spraybrann.

- *Væskedamsbrann* inntreffer når væske samler seg i en dam og brenner. Om det er store arealer som brenner kan dette gi høye varmelaster.

Disse scenarioene kan ha en stor lokal ødeleggelse i nærhet av tanken, tilsvarende andre store branner, men i det etterfølgende er det kun gassutslipp som kan gi eksplosjoner som blir behandlet ettersom konsekvensene er langt større. Merk likevel at også mindre branner kan lede til f.eks. BLEVE som gir massive gassutslipp.

Scenario 1a – Stort utslipp og vifter ikke slått på
Ved store utslipp forflytter denne gasskyen seg relativt raskt. Dersom vi antar lekkasje gjennom et 100 cm^2 stort hull og at utslippsraten er konstant, vil tanken være tømt på litt over 2 minutter og gasskyen vil ekspandere med ca. 0,8 m/s i begge retninger. Med en slik forenklet fremstilling betyr det at i løpet av denne perioden har gasskyen beveget seg i overkant av 100 meter i hver retning dersom man ikke tar hensyn til høydeforskjeller og ventilasjon. Det innebærer at hvis viftene ikke har blitt slått på umiddelbart risikerer man at en utstrekning på 215 meter er fullstendig fylt med propangass.[6] Denne gasskonsentrasjonen er imidlertid ikke eksplosiv, da den ligger langt over øvre brennbarhetsgrense. Men på endene av gasskyen vil det alltid være områder med lavere konsentrasjon og muligheten for deflagrasjon er til stede.

I dette tenkte tilfellet skjer altså det mest kritiske med tanke på eksplosjon etter at tanken er tømt, for da vil propanen blandes mer og mer med luft slik at det flere steder kan oppstå konsentrasjoner som ligger innenfor eksplosjonsgrensene. Etter at tanken er tømt og gasskyen har spredt seg utover pga. volumekspansjon vil andre mekanismer spille en viktigere rolle. Diffusjon og helling på tunnelen vil fra dette punktet bestemme hvordan gasskyen vil bevege seg. Uten CFD (*computational fluid dynamics*) beregninger er det veldig vanskelig å forutsi nøyaktig hvordan ting vil utarte seg, men det er godt mulig at store gassmengder vil samles opp i de nedre delene av tunnelen siden propan er tyngre enn luft. Diffusjon vil uansett bidra til å fortynne propankonsentrasjonen, men dette er noe som vil ta lang tid. Dette vil føre til at det tar lang tid før hele tunnelen er sikker. Som påvist over har en 24 tonns propantank nok gass til at en distanse på ca. 10 km vil kunne ha eksplosiv luft-propan blanding om gassen fortynnes likt.

Scenario 1b – Stort utslipp og vifter slått på etter 2 minutter
Dersom viftene slås på etter at noen varsler eller det oppdages av veitrafikksentralen (VTS) ved hjelp av kameraer, er det ikke urimelig å anta at det kan ta minst 2 minutter (og for slike lange tunneler kanskje 10 minutter) før ventilasjonen virker med full effekt. Dersom man for enkelhets skyld antar at denne gasskyen blir værende som et 215 meter langt segment som skyves ut av tunnelen med en hastighet på 3,5 m/s tilsvarende ventilasjonshastigheten, vil det ta ca. 45 minutter å få ventilert ut all gassen, dersom vi antar at gassen må skyves maksimal lengde mellom utluftingstårn (ca. 9km). Dette er en veldig forenkling, for en stor del av luften vil blandes med propanen.

Et litt mer reelt eksempel, der en viss mengde frisk luft erstatter samme mengde blandet luft hvert sekund, er diskutert i Vedlegg D. Her vil det selv med svært kraftig ventilasjon (3,5 m/s) ta ca. 5 minutter før de nærmeste 215 meterne har en gasskonsentrasjon under nedre eksplosjonsgrense. For mindre kraftig ventilasjon (1 m/s) kan dette ta opp mot 17 minutt etter at viftene er skrudd på. Faren er imidlertid ikke over, for gasskyen har bare flyttet seg litt lenger nedover i tunnelen. Dette relativt enkle eksemplet viser at ved store utslippet vil det ta lang tid før hele tunnelen er trygg, selv med kraftig ventilasjon.

Scenario 2 – Mellomstore utslipp og vifter på
For mellomstore utslipp, i størrelsesorden fra 1 m^3/s til 10 m^3/s (3,7 – 37 liter væske/s) har ikke gassekspansjon noe særlig betydning, og gasskyen vil dermed ikke bevege seg så mye fra utslippsstedet. Derfor ser vi bort ifra denne effekten for dette scenarioet, og kan dermed se på et mindre volum. I dette

[6] Det er rasjonelt å anta at konsentrasjonen ikke er helt 100%, men at den ligger godt over 9,5% (nedre eksplosjonsgrense) er rimelig å anta.

tilfellet vil ventilasjonen være hovedbidragsyter til uttynning av gasskyen. Det antas at viftene starter en liten stund etter gassutslippet, og f ra viftene starter er både utslippsraten og ventilasjonen konstant og konsentrasjonen av gass er ved hvert tidspunkt antatt uniform i volumet med gass (Vedlegg D).

Dersom utslippet ikke er så stort kan et slikt utslipp vare ganske lenge, og så lenge det både er et gassutslipp tilstede og ventilasjon er påskrudd vil gasskonentrasjonen etter en viss tid innstille seg i en likevektssituasjon.

Styrken på ventilasjonen har en stor betydning for hvilken likevekt systemet innstiller seg på; se beregninger gjengitt i Vedlegg D. Med ventilasjon på 210 m^3/s som tilsvarer ca. 3,5 m/s i tunnelløp med 60 m^2 tverrsnitt, vil f.eks. et gassutslipp på 4,5 m^3/s gi en likevektskonsentrasjon på 2,1%, (og hvis gassutslippet øker til 10 m^3/s vil likevektskonsentrasjonen øke til 4,8%). Det kommer derfor tydelig fram at også mellomstore utslipp kan resultere i en eksplosiv gassblanding, selv om viftene blåser med maksimal effekt. Denne likevekten vil holde seg stabil så lenge det er et kontinuerlig utslipp fra tanken. Først når lekkasjen er tettet eller tanken er tom vil gasskonsentrasjonen kunne fortynnes videre.

Som vist tidligere er det potensielt opptil 13 000 m^3 gass i de største beholderne. Det betyr at et utslipp på 4,5 m^3/s vil vare i ca. 45 minutt. 4,5 m^3/s gass tilsvarer et utslipp på ca. 16,5 liter flytende propan per sekund. Tiden før en likevekt innstiller seg i umiddelbar nærhet av tanken er svært kort siden volumet er så lite. Resten av tunnelen vil også oppnå denne likevekten dersom utslippet varer lenge nok, og som eksemplet viser vil det ta ca. 45 minutter før tanken er tom. Dersom det er 9 km til neste ventilasjonstårn, betyr det at etter 45 minutter er fortsatt all gassen som er sluppet ut fortsatt i tunnelen. Dette fordi den første gassblandingen som ble fanget opp av ventilasjonen bruker ca. 45minutter på å nå fram til første ventilasjonstårn. Dette betyr at store deler av tunnelen vil ha en konsentrasjon i nærheten av likevektskonsentrasjonen.

På grunn av stigningsforholdet i tunnelen, er det svært sannsynlig at det i enkelte områder kan samle seg opp mer gass enn i andre områder slik at det flere steder i tunnelen kan være gasskonsentrasjoner som er eksplosive. Nøyaktig hvordan gassen vil oppføre seg ved slike stigninger er svært vanskelig å forutsi basert på enkle regneoperasjoner.

Scenario 3 – små utslipp.
Utslipp mindre enn 4,5 m^3/s vil resultere i en likevektskonsentrasjon som ligger nedenfor nedre brennbarhetsgrenser dersom ventilasjonen er 3,5 m/s eller høyere. Dersom ventilasjonen av en eller annen grunn ikke skulle fungere, er selv små utslipp kritiske. Små utslipp vil spre seg utover via diffusjon, en prosess som skjer langsomt. Dette gjør at konsentrasjonen rundt utslippsstedet har tid til å bygge seg opp, slik at konsentrasjonen for et visst område vil ligge innenfor eksplosjonsgrensene.

Scenario 4 – BLEVE
En BLEVE er nok det mest dramatiske som kan skje inne i en tunnel, og helt klart det scenarioet som vil gi mest alvorlige konsekvenser. For at dette skal kunne skje, må man få en kraftig oppvarming av tanken over en lengre periode. En slik oppvarming kan kunne komme fra en brann like i nærheten av tanken. I en tunnel kan en slik situasjon teoretisk oppstå dersom et LPG-kjøretøy kolliderer med et kjøretøy som resulterer i en brann, enten i LPG kjøretøyet eller i det andre. Det er svært sjelden slike tilfeller skjer, men det har likevel skjedd nok ganger til at en ikke skal avskrive slike hendelser fullstendig. Slike hendelser er mer sannsynlig i tunneler med trafikk i to retninger, enn med kun én retning, som er tilfelle her.

8.7.4 Diskusjon

E39 Rogfast tunnelen er planlagt som en lang og dyp tunnel, og kommer til å ha en W-form med helning på ca. 5 % ned fra hver side. Scenarioene beskrevet over tar utgangspunkt i flate tunneler da det finnes veldig lite tidligere arbeid som har tatt for seg dype tunneler. Lavbrekk som benyttes ved undersjøiske tunneler kan føre til at propangass som er tyngre enn luft blir drevet av tyngdekraften nedover i tunnelen.

Av de scenarioene vi har gått igjennom ser vi at en lekkasje fra et LPG-kjøretøy i en tunnel kan få alvorlige konsekvenser dersom det finnes en tennkilde i tunnelen. I verst tenkelige tilfelle kan man få en situasjon der 10 km av tunnelen har en eksplosiv propan-luft blanding. Det sier seg selv at tunnelen kan få skader over en lang strekning dersom gassen da antennes.

Vi har sett at selv med maksimal effekt på ventilasjonen er det fullt mulig at det kan oppstå kritiske tilfeller. Dersom ventilasjonen fungerer slik den skal (3,5 m/s), som er det mest sannsynlige, vil gassutslipp over 4,5 m^3/s med stor sannsynlighet resultere i at store deler av tunnelen vil ha propankonsentrasjoner som ligger innenfor eksplosjonsområdet. Det vil også kunne ta lang tid (flere timer) med utlufting før tunnelen er trygg dersom utslippet skjer langt fra et utluftingstårn.

Likevektskonsentrasjonen for et utslipp mindre enn 4,5 m^3/s ved 3,5 m/s ventilasjon vil etter den enkle modellen beskrevet i Vedlegg D ikke komme over nedre brennbarhetsgrenser. Det er imidlertid viktig å være klar over at denne modellen ikke tar hensyn til stigning i tunnelen. Det er usikkert hvor mye disse lange stigningene vil påvirke utluftingen av et eventuelt utslipp. Det er ikke utenkelig at en større mengde propan vil bli fanget i nedre del av tunnelen. Utgangspunktet for vurderingene i Vedlegg D er at helning ikke vil gjøre situasjonen noe bedre i noen av de beskrevne scenarioene. Dersom mer innsikt i denne problemstillingen ønskes, anbefales at det utføres en omfattende CFD-simulering som tar høyde for alle faktorer som ikke er tatt hensyn til her.

Konklusjonen i rapporten, som er gjengitt i Vedlegg D, er at en lekkasje i et LPG-kjøretøy har et stort skadepotensiale, selv med en ventilasjonseffekt på 3,5 m/s. Dersom ventilasjonen av en eller annen grunn ikke skulle fungere når det skjer et utslipp, medfører dette en kritisk situasjon uavhengig av størrelsen på utslippet.

Det synes klart at den type hendelser som er diskutert over, har meget liten sannsynlighet. - Som vist i Tabellene 21-22 vil det ifølge TRANSIT – beregninger være en sannsynlighet på 0,002 pr år for en farlig gods (FG) ulykke i Rogfast; dvs 1 ulykke per 500 år. Hvis en eksempelvis sier at 1 av 10 FG ulykke representerer gassutslipp av angitte type, er det altså snakk om én slik hendelse pr 5000 år. Det vil være mange tennkilder til stede, (bl.a. bilene i tunnelen), slik at dette da også blir estimatet for hyppigheten av gasseksplosjoner (ved lekkasje i LPG-kjøretøy). Dette er et konservativt og meget grovt anslag[7], og vil naturligvis også avhenge sterkt av omfanget av slike transporter. Bak det nevnte tallet i Tabellene 21-22 ligger en antakelse om at 0,45 % av trafikken er FG transport, (3% av de 15% transport med tyngre kjøretøy). Det må altså foretas en grundig evaluering av forventet transport med ulike typer FG i tunnelen.

[7] Til sammenlikning kan nevnes at i en analyse av farlig gods i Strømsåstunnelen og Bragernestunnelen, basert på TUSI data, ble hyppigheten av FG hendelser med katastrofepotensiale (>5 omkomne) estimert til 1 per 7500 år i Strømsåstunnelen og en per 30 000 per år i Bragernestunnelen; samtidig ble hyppighet av propaneksplosjon i begge tunneler anslått til å være mellom 10^{-7} og 10^{-6} pr år; se [86]. - Separat FG analyse basert på tunnelkarakteristika og aktuelle trafikkdata bør gjennomføres også for Rogfast.

Til tross for den lave sannsynligheten kan risikoen for en slik ulykke neppe anses akseptabel. Ved store utslipp vil konsekvensen kunne bli katastrofal. Vurderingen er at det uansett bør innføres restriksjoner på denne type gasstransport. Det anbefales å gjennomføre følgende tiltak

- Totalforby slik trafikk når det det er tovegstrafikk i ett løp (avvikssituasjonen)
- Kun å tillate slik trafikk på visse tider av døgnet (med lav trafikk); og at tunnelen da holdes stengt for annen trafikk, (i hvert fall i det aktuelle løp).

Det bør videre foretas beregninger av potensiell skade som kan påføres selve tunnelen i forbindelse med en slik eksplosjon. Ut fra dette bør totalforbud vurderes for kjøretøy med transportert gassmengde som overstiger en viss mengde. Også hvis volumet av slik gasstransport forventes å bli betydelig større enn i de angitte TRANSIT-beregninger, bør totalforbud vurderes; (dvs. en må vurdere alternativ transport av gassen, evt. gassledning).

Det bør nevnes at skadepotensialet også er stort ved andre typer FG ulykker enn ved propantransporten diskutert over. Den transporten er likevel ganske spesiell ved at når en slik lekkasje/eksplosjon først har inntruffet, har en lite effektive risikoreduserende tiltak. Videre har en liten/ingen erfaring med slike ulykker i denne tunneltypen, og det vil derfor være usikkerhet med hensyn til hvordan en slik hendelse vil forløpe. Det kan oppstå problemer omkring trykk pga brann, som kan skape problemer med ventilasjon; evt gjøre tverrforbindelser utilgjengelige ved at man ikke kan åpne dører, eller det skapes store strømningshastigheter.

9. Diskusjon og vurderinger av tiltak

Dette kapitlet sammenfatter foregående analyser, ved å resymere dels kvalitative vurderinger og kvantitative resultater, som leder fram til en del forslag til risikoreduserende tiltak. Først diskuteres kort ulike kilder til usikkerhet.

9.1 Usikkerhet

De ulike kilder til usikkerhet blir kort diskutert.

9.1.1 Modellusikkerhet

En rekke kvantitative resultater bygger på ulike antakelser og forutsetninger, med betydelig usikkerhet

TRANSIT
TRANSIT er benyttet for risikoberegninger. Den er tilpasset bruk i vegtunneler, og baserer seg på en rekke forutsetninger og grunndata, som er dokumentert i [47], [72] og [57].

Scenarieberegninger
Det er gjennomført detaljerte kvantitative beregninger for utvalgte brannscenarier. Resultatene er presentert som forventet antall omkomne. Resultatene er basert på en rekke antakelser uten at usikkerheten i antakelsene er vurdert kun "beste estimat". Antakelser går bl.a. på røykutvikling, personoppførsel (ganghastighet) og biologiske data ("tid til udyktiggjøring").

9.1.2 Datausikkerhet

Usikkerhet i ulykkesstatistikk
Det foreligger svært lite aktuell ulykkesstatistikk for denne type lange, dype undersjøiske tunneler. Dette påvirker gyldighet av alle de kvantifiseringer som er gjennomført, og vil gjelde enhver kvantitativ risikoanalyse. Når det gjelder TRANSIT beregningene vises til de grunndata og modifikasjonsmodeller som er beskrevet i [47] og [72].

Usikkerhet knyttet til framtidig trafikk
Det er utført sensitivitetsanalyser for å undersøke hvordan endringer i ÅDT, andel tyngre kjøretøy og andel farlig gods påvirker risikoen. I scenarioberegningene er det i tillegg sett på to ulike timetrafikkmengder. Dersom trafikkmønsteret vil avvike i vesentlig grad fra de antakelser beregningene baseres på vil dette påvirke risikoen. Det kan være etablering av industri som medfører større andel tyngre kjøretøy i hovedløp og armen til Kvitsøy, større andel busstrafikk (pendler- og turisttrafikk)på Kvitsøy etc., En analyse av fremtidig trafikkmengde og –type er ikke en del av denne analysen. Vi anbefaler at en slik analyse utføres.

Grov risikoanalyse
I den grove risikoanalysen er det i tillegg til "typiske" konsekvenser av uønskede hendelser, som er en standard tilnærming, også inkludert både "verste" og "beste" konsekvenser. Dette skal gi beslutningstakere et bedre informasjonsunderlag av risikobildet. Men alle vurderinger er primært gjort "etter beste skjønn" og medfører derfor betydelig usikkerhet.

9.2 Kvalitative vurderinger av tiltak

Tabellen under gir en oppsummering av kvalitative vurderinger spesielt i kapitel 6. Vi viser spesielt til oppsummeringen av de kvalitative tiltak i Avsnitt 6.7, samt **Tabell 14**. Merk at det også i Analyse av brannscenariene (Kapittel 8) gis en rekke kvalitative vurderinger.

Når det gjelder "Nytte av tiltak" (siste kolonne i tabellen under) er den vurdert i forhold til den samlede tunnel, (noe som gjør at tiltak rettet mot Kvitsøy armen med mye mindre trafikk ikke kan gi høy score). Her er kun gitt en grov klassifisering: H (høy), M (middels), L (lav), eller vurdert som uaktuelt tiltak (-). Kostnad for implementering av tiltak er ikke vurdert i denne tabellen.

Det bemerkes at vedlikehold og sikkerhetsstyring under drift er essensielt for å ha kontroll med risikoen.

Tabell 55 Oversikt over kvalitative vurderinger

Tema/tiltak	Beskrivelse og vurdering av nytte/effekt	Nytte av tiltak
1. Tunnelutforming		
Utvide Kvitsøy arm fra T9,5 til T10,5, pluss evakueringsveg	Inkluderer en meter midtfelt med romlestripe. Ved plassering av havarinisje tvers ovenfor hverandre kan dette benyttes som snumulighet. Synes mest aktuelle tiltak mot Kvitsøy armen. Stor stigning og behov før røykfri evakuering kan begrunne løsningen, og kan være viktig for Kvitsøy trafikken isolert.	L
To evt. fire løp, Kvitsøy-arm	To løp i arm til Kvitsøy (2xT9,5). Risikoen vurderes noe lavere enn løsningen med ett løp T10,5 pluss rømningsveg. Men effekten av tiltaket for *totalrisikoen* for tunnelsystemet blir svært beskjeden, og det har derfor lav nytte/kost. Risikogevinsten ved 4 løp framfor 2 er vurdert å være beskjeden.	L
Krabbefelt oppover	Krabbefelt på lange strekninger med stigning $\geq$ 5%. Øker kapasitet og trafikksikkerhet, spesielt hvis kjøretøy får motorstopp i oppoverbakke. Vil gjøre det enklere og sikrere å regulere to-vegs trafikk i ett løp når det annet løp er stengt for trafikk. Krabbefelt vil gi større mulighet for å utføre vedlikehold i tunnelen uten å stenge tunnelløpet helt. Ved krabbefelt vil det være mindre behov for å stenge et løp.	M
Krabbefelt også nedover	Krabbefelt når det er lang stigning/helning med $\geq$ 5%. Gir liten risikoreduksjon i normalsituasjonen, ved at krabbefeltet kan virke som nødfelt. I avvikssituasjonen, hvor et løp er stengt for trafikk gir krabbefeltet større kapasitet og risikoreduksjon. Kun liten effekt for totalrisiko.	L

Tema/tiltak	Beskrivelse og vurdering av nytte/effekt	Nytte av tiltak
Skulderbredde	Øke høyre skulderbredde til 2,0 m, (der det ikke er krabbefelt). Det forslås anvendt betongkantstein (rullekantstein), alternativt skulder i samme nivå som kjørefelter og asfaltert. Vil gi sikkerhetsgevinst (nødstopp, handicapvennlighet ved evakuering).	M (nå vedtatt)
Frihøyden	Øke frihøyden fra 4,8 m til 5,0 m. Dette har begrenset/ingen sikkerhetsgevinst.	L
Frekvens gangbare tverrforbindelse	Øke frekvens av gangbare tverrforbindelse til 1 per 125m. Gir signifikant risikoforbedring ved storulykker. (Nå vedtatt der det er stigning 5 %).	H
Kjørbare tverrforbindelser	3-5 kjørbare tverrforbindelser (for avvikssituasjoner). Utformes slik at de tillater vogntog/semitrailer å benytte disse, T5,5, men ingen snumulighet for disse; (se Figur 19). Nyttig med snumulighet for personbiler under ulykker, samt for trafikkavvikling.	H (nå vedtatt)
Kryssløsning	Toplans ruterkryss og rundkjøring har ulike fordeler/ulemper. Rundkjøring er mer fleksibel, med snumuligheter i normalsituasjonen. I avvikssituasjonen er begge løsninger noe problematiske, trafikkmessig. Sikker styring av ventilasjon ved brann (i kombinasjon med brannporter) må dokumenteres. Det må avklares hvordan brannporter stenger etter at brann oppstår (må unngå at for eksempel kjøretøy kan sperre for lukking).	-
Bergrom	Fire bergrom i hvert løp ved hhv st. ca 8.000, 14.500 (kryss), ca 18.000 og ca 22.500. Foreslått dimensjon: lengde 200 m, bredde 15-25 m og høyde 12 m. Dette er viktigste tiltak for å unngå monotoni og opplevd risiko, og må dermed antas også å påvirke ulykkesfrekvens. Ses også i sammenheng med belysningstiltak for visuell føring, sikker avstand og reduksjon av ubehag/angst.	H (nå vedtatt)
2. Tunnelventilasjon		
Styring av ventilasjon ifm brann	Dette vil by på utfordringer, spesielt hvis brann inntreffer i/nær kryss. Pålitelighet og kapasitet (og at styring tar tid) er viktig for flere brannscenarier.	H
Redundans/reserve-kapasitet vifter	Aktuelt tiltak: • Det installeres ekstra impulsvifter i tunnelen slik at funksjonen kan beholdes hvis alle vifter i en brannsone blir utslått • Det installeres redundante avtrekks- og friskluftsvifter i alle ventilasjonsstasjoner.	H
Partikkelrensing	Ut fra nåværende erfaringer vurderes dette som lite aktuelt	-
3. Mekaniske og elektriske installasjoner		
Automatiske slokkean-legg (deluge/sprinkler-/vanntåke)	Dette tiltak har både klare fordeler og ulemper. Det er gunstig med hensyn på å minske sannsynlighet for storbrann. Negativt er kostnader og betydelig behov for funksjonstesting/vedlikehold. Ut fra gjeldende erfaringer vurderes dette totalt til å være lite aktuelt.	-

Tema/tiltak	Beskrivelse og vurdering av nytte/effekt	Nytte av tiltak
Redundans/reserve-kapasitet	Essensielt å sikre redundans av sentrale mekaniske og elektriske installasjoner: • Strømforsyning • Pumpesystem • Slokkevann • Styre og overvåkingsanlegg; kommunikasjonsnettverk	H
4. *Trafikksikkerhets-tiltak*		
Sikker avstand	Høy effekt med (egnet kombinasjon av): • LED-lys • Variable skilt (VMS) • Dynamiske informasjonstavler	H
Feltregulering	Anbefaler Kjørefeltsignaler	H
Hastighets-begrensninger	Vurderer høy effekt av • Strekningsvis automatisk fartskontroll • Ved avvikssituasjon VMS • Tunge kjøretøy	H
Forbikjørings-begrensninger	Effekt for for tungtransport (års/døgnvariasjon)	L
Begrensninger, transport av farlig gods (FG)	Bør baseres på trafikktelling av omfang/type FG i tunnelen. Mest aktuelle tiltak vurderes å være • Transport av FG legges til perioder med lav trafikk. • Kun ett FG kjøretøy (av visse typer) av gangen tillates. • Spesielle FG transporter kan foretas om natten, slik at ett løp av tunnelen stenges for annen trafikk • Forbud for (visse typer) FG ved tovegstrafikk i ett løp • Evt. totalforbud visse typer FG (gass)transport	M
Kryss	Tiltak for trafikk i bratt nedfart (høy fart) fra Kvitsøy ned mot kryss; trafikkregulering ramper.	L
Skilting/varsling utenfor tunnel	Spesielt viktig og varsle om stenging av hele tunnel eller (deler av) ett løp. Dette må kombineres med snumuligheter foran tunnel (siste kryss før tunnelmunning bør være rundkjøring; helst også snumuligheter før dette). Mulighet for å fjerne midtrabatt for snu-mulighet rett foran portaler.	H
5. *Avvikssituasjoner*		
Bruk av ett løp hele tunnel	Øker risiko ift bruk av begge tunnelløp. Har likevel det andre løpet som evakueringsveg. Bruk av ett løp bør planlegges kun for deler av døgnet med lav trafikk. God varsling til trafikanter på veg til tunnel når kun ett løp er i drift.	-
Bruk av ett løp deler av tunnel	Har i hovedsak også her tunnelløp (uten brann) som evakueringsveg. Er i større grad avhengig at røyk og trafikkregulering virker etter planen, (slik at røyk ikke spres inn i andre løp). Til tross for kompleksitet har denne klare fordeler, spesielt hvis en kan opprettholde trafikk i begge løp i stigningene.	-

Tema/tiltak	Beskrivelse og vurdering av nytte/effekt	Nytte av tiltak
6. Beredskap og styring		
Portalbygningen	En rekke sikkerhetsmessige funksjoner må ivaretas, bl.a. styringssystem.	-
Oppstillingsplass utenfor tunnel	Det er behov for oppstillingsplass for beredskapskjøretøy og helikopter ifm ulykker; evt. farlig gods kjøretøy ved restriksjoner på disse. Kan ikke påregne tilstrekkelig plass ved to-vegs trafikk i ett løp. Ved slike hendelser eller midlertidig stengning, (ulykker og lignende) bør det ordnes med snumulighet foran tunnel, samt varsling på forhånd. Det er vurdert at oppstillingsplass for ca. 10 tunge kjøretøy (ved Arsvågen og Randaberg) bør dekke de vesentlige behov ved avvikssituasjoner for kjøretøy som ikke får snudd. Med manøvreringsmuligheter skulle dette innebære et behov for anslagsvis 2 mål (i tillegg til helikopterlanding). Vesentlig mindre på Kvitsøy (0,5 mål). Antas også dekker evt behov for FG-kjøretøy.	H
Brann/rednings tjeneste	Ny brann (rednings) tjeneste nær tunnelutløp (ved Randaberg). bør diskuteres nærmere med B&R etat.	M
Vegtrafikksentral	Egen vegtrafikksentral for denne og andre (undersjøiske) tunneler bør vurderes videre.	L
Fergeberedskap	Vurdert lav sannsynlighet for langvarig stenging. Men pga lite omkjøringsmuligheter er det grunn til å vedlikeholde fergeleierog beredskap for fergetransport mot langvarig stenging.	M

9.3 Noen kvantitative resultater mht effekt av tiltak

I første versjon av rapporten, [55] ble det foretatt en meget grov vurdering av effekt av en del tiltak, dels basert på hvordan risikoen fordelte seg over tunnelen. Som erstatning av dette gir vi nå et resyme av noen hovedresultater fra Kap. 7. Her er det fem tiltak som vurderes, og sammenliknes opp mot nåværende basisløsning:

- Krabbefelt i stigningene mot Arsvågen og Harestad kommer ut som det mest effektive tiltaket for å redusere risikoen; (og er etter dette langt mer effektivt enn anslått i [55]).
- Alarm (varsling om evakuering) kommer ut som nr 2 (2.5% reduksjon i antall omkomne pr år).
- Redusere avstand mellom nødutganger til 125 m er anslått å gi 1.5% reduksjon.
- To løp i arm til Kvitsøy er anslått å gi ca. 1% reduksjon i totalrisiko. Siden risikoen armen til Kvitsøy kun utgjør 1-2 % av totalen (Kap 7) er dette en betydelig reduksjon, og adskillig større enn anslaget i [55].
- Redusert stigning i Kvitsøyarmen til 5 % synes ikke å ha positiv effekt

Det bemerkes, at resultatene i tabellen er for normalsituasjonen. I avvikssituasjonen vil risikoreduksjonen være relativt større for tiltak 3 – 10.

Tabell 56 Risikoberegninger av ulike løsninger/tiltak (Bruk av TRANSIT, cf. Kap. 7))

Beregning	Risiko (omkomne/år)	Endring ift basisløsning
1. Basisløsning	0.6543	-
2. Som 1, men arm til Kvitsøy med to løp og envegstrafikk	0.6475	- 1 %
3. Som 1, men avstand mellom nødutganger 125 m (istf 250)	0.6440	- 1.5 %
4a. Som 1, men krabbefelt i stigningen til Arsvågen	0.6142	- 6 %
4b. Som 1, men krabbefelt i siste halvdel av stigningen til Arsvågen	0.6342	- 3 %
4c. Som 1, men krabbefelt i stigningen til Harestad	0.6225	- 5 %
4d. Som 1, men krabbefelt i siste halvdel av stigningen til Harestad	0.6384	- 2.5 %
9. Som 1, med alarm (varsling om evakuering)	0.6377	- 2.5 %
10. Som 1, men Kvitsøyarmen med 5% stigning	0.6553	+ 0.1 %

9.4 Effekt av sentrale tiltak

Tabell 55 foran ga utelukkende kvalitative vurderinger av de aktuelle tiltak som er vurdert for Rogfast. Dette ble i Tabell 56 supplert med en del kvanitative resultater. Under gis en sammenfatning av ulike type vurderinger gjort for noen sentrale tiltak knyttet til tunnelutforming. Vurderingene gjelder:

- Effekt for personskaderisiko ifm alvorlige brannscenarier (primært storulykker); i stor grad relatert til evakuering, som vurdert i kapittel 6 (**fet)** eller rene kvalitative betraktninger.
- Opplevd risiko
- Reduksjon i totalrisiko (målt som skadde/omkomne per år), som vurdert i kapittel 3 (**fet)** eller rent kvalitativt, uavhengig av resultat i dette kapittel.
- Redusert nedetid/stenging av tunnel (helt eller delvis)
- Kostnad (kvalitativ vurdering)

I **Tabell 57** gir kolonnen "Nytte, totalrisiko" (omkomne), "Nytte, Brannscenarier" (storulykke) og "Nytte, Opplevd risiko" tall fra 1-10 for å antyde effekt, der 10 indikerer meget stor effekt, mens 1 indikerer mulig effekt. I kolonne "Nytte, Nedetid" er gitt kryss for de tiltak som har effekt for redusert stengetid (ett eller to løp)..

Kolonnen "Nytte Totalrisiko" kan dels basere seg på Tabell 56 (**fet** skrift). Her var det spesielt krabbefelt som kom ut positivt. Øvrige tall er grove kvalitative anslag.

For "Nytte, brannscenarier", har en benyttet resultat/vurderinger fra Kapittel 8. Her var det spesielt gangbare tverrforbindelser per 125 m som ble vurdert positivt for en del brannscenarier som

Tabell 57 Oversikt: Vurderinger av nytte og kost av tiltak angående tunnelutforming.

Tiltak	Nytte, total-risiko (omkomne)	Nytte, Brann-scenarier	Nytte, Opplevd risiko	Nytte, Nedetid	Kostnad
Ett løp T10,5, Kvitsøy + Evakueringsveg	2	2	2	-	M
To løp Kvitsøy	**3**	3	2	X	HH
Krabbefelt, 5%, (kun oppover)	**10**	3	2	X	H
Øke skulderbredde til 2 m	4	2	3	X	H
Gangbare tverr-forbindelser per 125 m	**4**	6	3	-	M
Bergrom	2	1	6	-	M
Kjørbare tverrforbin-delser	3	1	2	X	M

Når det gjelder valg av hvilke av disse sentrale tiltak angånde tunnelutforming som skal gjennomføres, er det som en ser en rekke forhold som må vurderes. Et første spørsmål en kan stille seg er om risiko for Rogfast basistunnel (uten ytterligere tiltak) skal anses akseptabel, noe det ikke kan gis et entydig svar på, da det ikke er spesifisert noe risikoakseptkriterium. Og selv om tunnelen har en høy standard, skal det vurderes om ytterligere tiltak kan anses kostnadseffektive.

Vi ser at **Tabell 57** peker ut krabbefelt som det kanskje viktigste tiltak (størst nytte totalrisiko). I den øvrige prioritering bør nok også kostnad trekkes inn i vurderingene

Som konklusjon anbefales alle av disse tiltak som er rettet mot hovedtunnelen. Videre kan utvidelse til T10,5 for armen til Kvitsøy anbefales. To løp til Kvitsøy (evt. egen rømningsvei) vurderes lite kostnadseffektivt.

Som det vil fremgå av Tabell 55 er det en rekke øvrige tiltak (trafikktiltak, beredskapstitak osv) som anbefales. Her nevnes også at TRANSIT beregningene viser at alarm (varsling om evakuering) synes være et kostnadseffektivt tiltak. Her listes kort de viktigste av disse tiltak som forslås implementert, (se Kapittel 6):

- Tunnelventilasjon
  - Styring av ventilasjon ifm brann. Det anbefales at det i byggeplanfasen underlegges tredjeparts kontroll/verifikasjon av ventilasjonsberegninger.
  - Dimensjonering av vifter for branner foreslått satt til 200 MW slik at sannsynlighet for å overstige viftekapasitet blir mindre og sannsynligheten for å styre røyk i riktig retning blir større også for store branner; dette er også tiltak mot evt. problem relatert til W-profilen.
  - Redundans/reservekapasitet av vifter

- Mekaniske og elektriske installasjoner
    - Redundans/reservekapasitet (strømforsyning, pumpesystem, slokkevann, styre/overvåkingsanlegg)
- Trafikksikkerhetstiltak
    - Sikker avstand (LED-lys, VMS, dynamiske informasjonstavler)
    - Feltregulering
    - Hastighetsbegrensninger
    - Begrensninger, transport FG
    - Skilting/varsling utenfor tunnel
    - Varsling om evakuering
- Beredskap og styring
    - Oppstillingsplas utenfor tunnel
    - Brann/redningstjeneste nær tunnelutløp
    - Fergeberedskap

10. Risiko for tredje part, anleggsperioden

ROS-analyse for anleggsperioden vil dekke risiko for 3. person. Eksempler på farer er: anleggstrafikk på lokale veier, sprengning ved tunnelutløp og avrenning fra deponi (miljøskade).

Tabellen under presenterer risikovurdering ulykkeshendelser i anleggsperioden. I denne rapporten vurderes kun skade på personer; da miljøskade antas dekket av særskilt analyse. Følgende ulykkeshendelser i anleggsperioden (tredjepart) er dermed vurdert:

- Trafikkulykke: Anleggstrafikk på lokale veier evt. nær tunnelutløp
- Eksplosjon/brann i forbindelse med sprengningsarbeid; evt. berøre industriområde.
- Ras fra massedeponi; berører skipstrafikk

Tabell 58 ROS analyse anleggsperiode. Angir vurderinger av frekvens og "typisk" konsekvens.

	Uønsket hendelse		**Sannsyn-lighet**	**Konse-kvens**	**Kommentar**
Nr	**Kateg.**	**Spesifikasjon**			
7.1	Trafikkulykke	Lokale veier Anleggstrafikk, Tunnelutløp	H	L	
7.2	Eksplosjon / brann	Sprengningsarbeid, tunnelutløp	M	M	
7.3	Ras	Massedeponi	L	LL	Pluss materiell skade

11. Referanser

SVVs håndbøker har fra sommeren 2014 fått ny nummerering; referanselisten under viser til gammel nummerering.

[1]. ROS-analyse Norconsult, 2006.
[2]. Veileder for risikoanalyse av vegtunneler (Revidert), Veg-og trafikkavdelingen, TS 2007:11, SVV 2007.
[3]. Konsekvensutredning E39 Rogfast, SVV 2010.
[4]. HB021, Håndbok 021, Normal N500 Vegtunneler, SVV 2010.
[5]. HB269, Håndbok 269. Sikkerhetsforvaltning av vegtunneler. Retningslinjer, Del 1, SVV 2007.
[6]. HB163, Håndbok 163. Vann- og frostsikring i tunneler, SVV 2006.
[7]. HB159, Håndbok 159. Kapasitet på vegstrekninger, SVV 1990.
[8]. E39 Rogfast – Reguleringsplaner og tekniske planer. Forprosjekt COWI, Oktober 2011.
[9]. Salusjarvi, M. (1981) Speed limit experiments on public roads in Finland Technical Research Centre of Finland, Esbo, Finland
[10]. Statens vegvesen, www.vegvesen.no/Vegprosjekter/e39rogfast (06-09-2011)
[11]. Statens vegvesen, E39 Rogfast, Tunnelventilasjon (05-06-2007)
[12]. Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council on "Minimum Safety Requirements for Tunnels in the Trans-European Road Network", Brussels 29 April 2004.
[13]. Cross Section Geometry in Unidirectional Road Tunnels, World Road Association (PIARC), Technical Committee on Road Tunnels, Paris 2001.
[14]. Highway Capacity Manual, Special Report 209, Transportation Research Board (TRB), January 1995
[15]. Amundsen, F.H., Engebretsen, A. og Ranes, G.: Bilbranner, alvorlige trafikkulykker og andre hendelser i norske vegtunneler – erfaringsinnhenting fra vegkontorene og vegtrafikksentralene i 1997 og 2001, Rapportnr. TTS 13/01, Vegdirektoratet, 2001.
[16]. Amundsen, F.H., Roald, P.O., Engebretsen, A. og Ragnøy, A.: Trafikkulykker i undersjøiske vegtunneler. Vegdirektoratet, 2005.
[17]. Trafkkulykker i vegtunneler 2. En analyse av trafikkulykker i vegtunneler på riksvegnettet for perioden 2001-2006. Trafikksikkerhetsseksjonen 2008-12-18.
[18]. Ingason, H., Bergqvist, A., Lönnermark, A., Frantzich, H., og Hasselrot, K.: Rädningsinsatser i vägtunnlar, ISBN 91-7253-256-4, Räddningsverket, Avdelningen för stöd till räddningsinsatser, Karlstad, 2005.
[19]. Lönnermark, A. (2005): On the Characteristics of Fires in Tunnels, Doctoral Thesis, Department of Fire Safety Engineering, Lund institute of Technology, Lund University.
[20]. Risikoanalyse av Oslofjordtunnelen med omkjøringsveger. SVV Hovedrapport Dok. nr.: ST-04121-4
[21]. FOR 2007-05-15 nr 517: Forskrift om minimum sikkerhetskrav til visse vegtunneler (tunnelsikkerhetsforskriften TSF), 2007.
[22]. Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels, World Road Association PIARC, 2007.
[23]. Road Tunnels: An assessment of Fixed Fire Fighting Systems, World Road Association PIARC, 2008.
[24]. Fire Protection and Safety in Tunnels, Tarada 2011
[25]. Bergqvist, A., Frantzich, H., Hasselrot, K. Og Ingason, H.,: Rädningsinsatser i vägtunnlar, SRV rapport P21-391/01, Räddningsverket, 2001.
[26]. Informasjon fra Torbjørn Tollefsen, brannvernleder,drift, Statens vegvesen Region Øst.
[27]. Vurdering av trygghet, monotoni og sikkerhet i krisesituasjoner og ved normal ferdsel. GunnarD:Jenssen, Cato Bjørkli og Marianne Flø (2006). SINTEF rapport SFT50A06109.
[28]. Opstad, K., Guénette, C.: Fire on the Sea Surface, Ignitiability and Sustainability under various Environmental Conditions. Paper at IAFSS Sixth International Symposium on Fire Safety Science in Poitiers, France, 1999.
[29]. Statens vegvesen, Prinsippskisser Kryss Kvitsøy.pdf, tilsendt via e-post 2011-10-28.
[30]. Statens vegvesen, Informasjon om ventilasjonsanlegg sendt via e-post 2012-01-09

[31]. Forskrift om tekniske krav og godkjenning av kjøretøy, deler og utstyr (kjøretøyforskriften), FOR-1994-10-04-918.
[32]. The European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road (**ADR**) DSB2011.
[33]. Highway design and traffic Safety Engineering Handbook Lamm, R. Psarios, B. Mailaender, T. Eds. McGraw Hill 1999.
[34]. Bauer et. Al, (2004). Safety Effects of Narrow Lanes and Shoulder-Use Lanes to Increase Capacity of Urban Freeways. Transportation Research records pp71-80
[35]. Jenssen Gunnar D. (1998**).** Vurdering av spesielle tiltak i Lærdalstunnelen: Tiltak for positive opplevelse , trafikksikkerhet og redukjson av monotoni Fase 2 Utprøving av fysiske og interiørmessige tiltak i kjøresimulator. SINTEF rapport STF22 A99550, Trondheim.
[36]. Jenssen Gunnar D. (1999**).**Evaluation of interior design in the world's longest road tunnel First International Conference: Long Road and Rail Tunnels. Basel
[37]. McKenna (1990), gjengitt i Lauvland G. (1990). Opplevd sikkerhet /reell ulykkesfrekvens i tunneler. Arkitektoniske løsninger. Human Factors Solutions, Oslo
[38]. Kvaale J. and Lotsberg G. (2001). Measures against Monotony in the 24.5km long laerdal tunnel in Norway. Strait Crossings 2001. Krokeborg (ed.) Swetz Zeitlinger. Publ.Lisse ISBN 9026518455
[39]. Gunnar D. Jenssen, Terje Moen, Marianne Flø, Trine M Stene, Kristian Sakshaug, Terje Giæver, Kenneth Sørensen, Thomas Engen. (2006). Light design for rock caverns and tunnel. The Qinling Zhongnan Mountains Overlong Super Highway Tunnel. (STF50 A06084)
[40]. Gunnar. D. Jenssen (2003)."The Effects of Tunnel Design Characteristics on Driving Behaviour and Traffic Safety"(UPTUN contribution).
[41]. Christensen, P.M., Sartre, S.S., Saetre, A.M. & Beckman, J.H. (1993). *Tunnelangst. En deskriptiv tversnitsundersøgelse av de psykologiske aspekter ved ferdsel i tunneler* [Tunnelfear. A descriptive investigation of the psychological aspects of driving in tunnels]. *Nordisk Psykologi, 45*, 305-310
[42]. Statens vegvesen Sogn og Fjordane (1995). E16 Auland-Lærdal. Konsekvensananalyse for tunnelen
[43]. Jenssen G. D. og Giæver T. (1997) Vurdering av spesielle tiltak i Lærdalstunnelen. Opplevelse av trygghet og monotoni. SINTEF Rapport STF22F99550
[44]. Lamm, Ruediger (1999). Highway Design and Traffic Safety Engineering Handbook, kap 24, McGraw-Hill Professional Publishing.
[45]. Good Practice for the Operation and Maintenance of Road Tunnels, PIARC 2004, Paris.
[46]. UPTun project / Fedro: http://international.fhwa.dot.gov/uts/uts_eu06_02.cfm.
[47]. Matrisk GmbH and HOJ Consulting GmbH Dr. Matthias Schubert (2012). Etatsprogrammet Moderne vegtunneler 2008-2011. Utvikling av risikoanalysemodell TRANSIT for vegtunneler. Statens vegvesen.
[48]. Etatsprogrammet Moderne vegtunneler 2008-2011. Hovedrapport. SVV rapport Nr. 127. Vegdirektoratet, juni 2012, http://www.vegvesen.no.
[49]. Etatsprogrammet Moderne vegtunneler 2008-2011. Grensesprengende tunneler – lange og dype, går det en grense? SVV rapport Nr. 136, http://www.vegvesen.no
[50]. Etatsprogrammet moderne vegtunneler, 2008-2011. Strategi trafikkantsikkerhet og brannsikkerhet i vegtunneler. SVV rapport Nr. 161. Vegdirektoratet, august 2012.
[51]. Risikovurdering av tung trafik i E39 Rogfast. Statens vegvesen Region vest. Hoj Consulting, rapport nr H-NO-171, 2013.
[52]. Fire and smoke control in road tunnels. Committee on road tunnels C5. PIARC, 1999.
[53]. Risikovurderinger i vegtrafikken HB271.
[54]. Nasjonal transportplan 2010-2019. Samferdselsdepartementet. Stortingsmelding nr. 16 (2008-2009).
[55]. *E-39 Rogfast. ROS Analyse, tunnel*. SINTEF rapport A22149/RAP-201; SINTEF, COWI; SVV, 2012.
[56]. Henrik Bjelland, Terje Aven, *Treatment of uncertainty in risk assessments in the Rogfast road tunnel project*. Safety Science 55 (2013), pp 34-44.
[57]. Risikoberegninger for Rogfast. Bidrag til risikoanalyse. Statens vegvesen tregion vest. Hoj Consulting, rapport nr H-NO-187, 2014.

[58]. STRAKS-registreringer for E39 Rennfast (Byfjord- og Mastrafjordtunnelen) og E39 Bømlafjordtunnelen (udateret, 2012)
[59]. Reguleringsplan prosjekt E39 Rogfast, Parsell Tunnel Randaberg, Kvitsøy og Bokn, Statens vegvesen Prosjektavdelingen Dato 14 september 2012.
[60]. E39 Rogfast Tunnelventilasjon og luftkvalitet Statens vegvesens rapportar. Nr. 138, Region vest Ressursavdelinga Prosjekteringsseksjonen 28.6.2012
[61]. E39 Rogfast, KU/kommunedelplaner, Risiko- og sårbarhetsanalyse Rapport, Region vest, Strategistaben, Dato: 2006-12-20).
[62]. Beredskabsanalyse E39 Rogfast, Statens vegvesen Region vest Prosjektavdelingen 2012.
[63]. Vurdering av stigningsforhold i E39 Rogfast, 2012/139948-006. Notat, Statens vegvesen, Tor Geir Espedal (2013)
[64]. Tegningsgrundlag, Statens vegvesen, COWI E39 Rogfast
B201 Plan og profil 1100 – 15000, foreløpig 20120216
B212 Plan og profil Veg 13000, E39, Profil 15000 – 27730, 06.06.2014
C216 Plan og profil Veg 13000, E39, Profil 17750 – 21500, 06.06.2014
C217 Plan og profil Veg 13000, E39, Profil 21500 – 25250, 06.06.2014
C218 Plan og profil Veg 13000, E39, Profil 24500 - 27730, 06.06.2014
D201 Plan 569 – 4550, foreløpig 20120216
D202 Profil 569 – 4631.586, foreløpig 20110916
F201 Normalprofil Hovedtunnel, 14-09-2012
F202 Profiler Hovedtunnel, 14-09-2012
F211 Normalprofil, Kvitsøy tunnel,
[65]. HB111 Håndbok 111Håndbok 111 Standard for drift og vedlikehold av veger og gater, SVV 2012
[66]. HB271 Håndbok 271 Risikovurderinger i vegtrafikken, Statens vegvesen februar. 2007.
[67]. HB 140 Håndbok 140. Konsekvensanalyser, Statens vegvesen juni 2006.
[68]. Forskrift av 1. Desember 2006 nr 1331 om transport av farlig gods på veg og jernbane med veiledning
[69]. Veiledning til NS 3901Risikoanalyse av brann i byggverk, 1. Udg. Mai 1998 samt Risikoanalyse av brann i vegtunneler, , NBR Norges byggstandardiseringsråd, januar 2000.
[70]. NS 5814 Norsk Standard. Krav till risikoanalyser. Norges standardiseringsforbund, 1991.
[71]. R510 / HB163 Vann og Frostsikring i tunneler, 2006
[72]. Development of a best practice methodology for risk assessment in road tunnels.Matrisk GmbH and HOJ Consulting GmbH. Research project ASTRA 2009/001 at request of Federal Road Office (FEDRO) and Norwegian Public Roads Administration (NPRA), November 2011.
[73]. Trafikkulykker i undersjøiske vegtunneler. Rapport Veg- og trafikkavdelingen, 5/2005.
[74]. TØI rapport 1205/2012, Kartlegging av kjøretøybranner i norske vegtunneler 2008-2011 Tor-Olav Nævestad Sunniva Frislid Meyer Oslo, april 2012.
[75]. Amundsen, F. H. Og Ranes G. Trafikkulykker i vegtunneler, TTS 9 1997.
[76]. Bilbranner, alvorlige trafikkulykker og andre hendelser i norske vegtunneler. TTS7 2001.
[77]. Amundsen, F. H. Og Melvær, P. Data om tunneler på riks- og fylkesveger 1996/97. Rapport TTS 6 1997.
[78]. Statistiske data fra IRTAD (www.irtad.org) OECD/IRTAD International Road Traffic and Accident Database.
[79]. Statistiske data vedrørende uheldsfrekevnser og uheldstyper (www.ssb.no/vtu).
[80]. OECD/GD(97) 153, Road Transport Research, Road Safety Principles and models: Review of Descriptive, Predictive, Risk and Accident Consequence Models,1997.
[81]. Road Grade and Safety, Ezra Hauer Dept. Of Civ. Eng. Univ. of Toronto, 2001.
[82]. JCSS Joint Committee of Structural Safety: Risk Assessment in Engineering; Principles, System Representation & Risk Criteria June, 2008.

[83]. ATR: ATR for Rogfast (Kunde: Statens vegvesen Region vest; COWI-SINTEF), HOJ Consulting, Projekt nr. NO-040, Aktivitet nr.: 01, Rev. 2, 28/4/14.
[84]. Temaanalyse om dødsulykker. UAG 2005-2012. Statens vegvesens rapporter, Nr. 267. 2013
[85]. Kartlegging av kjøretøybranner i norske vegtunneler 2008-2011, TØI rapport 1205/2012.
[86]. Risikovurdering av farlig gods i Strømsåstunnelen og Bragernestunnelen. Statens vegvesen, Buskerud. SINTEF rapport STF50 A06015, 2006.

Vedlegg A: Seksjonering av tunnelene

Hovedtunnelen er oppdelt i seksjoner som beskrevet i Tabell 59. Dessuten modelleres tverrsnittet som T10,5 med 2 x 3.50 m brede kjørefelt (se avsnitt 2.2).

Armen til Kvitsøy modelleres som vist i Tabell 60. armen er tverrsnitt T9,5 med motgående trafikk. (For varianten med 5 % stigning, se Tabell 66.)

Endelig modelleres de fire ramper 01, 02, 03 og 04 som vist i Tabell 61 - Tabell 64, disse ramper har tverrsnitt T7.5 med ett kjørefelt.

Tabell 59 Geometriske data og andre Nøkkeldata for Rogfast hovedtunnel. Kjøreretning Nordgående 1→18, sydgående 18 → 1.

	Navn						Nordgående		Sydgående	
		Pr. Nr.	L	H-radius	Hastig-het	ÅDT 2040	Gradient	Felt	Gradient	Felt
			(m)	(m)	(km/t)	kt/dag	%		%	
	Sydportal	1080								
1			50	5000	90	13000	-5.15	2	5.15	2
		1130								
2			100	5000	90	13000	-5.15	2	5.15	2
		1230								
3			370	5000	90	13000	-5.15	2	5.15	2
		1600								
4			6082	10000	90	13000	-5.15	2	5.15	2
		7682								
5			3818	10000	90	13000	1.00	2	-1.00	2
		11500								
6			2800	2000	90	13000	1.00	2	-1.00	2
	Rampe 02/03 S-ende	14300								
7			150	2700	90	13000	1.00	2	-1.00	2
	Rampe 02/03 N-ende	14450								
8			711	2700	90	13000	1.00	2	-1.00	2
	Rampe 01/04 S-ende	15161								
9			150	2700	90	13000	-4.50	2	4.50	2
	Rampe 01/04 N-ende	15311								
10			1789	2700	90	13000	-4.50	2	4.50	2
		17100								
11			254	20000	90	13000	-4.50	2	4.50	2
		17354								
12			2571	20000	90	13000	-1.35	2	1.35	2
	Dybdepunkt	19925								
13			1775	20000	90	13000	5.09	2	-5.09	2
		21700								
14			1596	5000	90	13000	5.09	2	-5.09	2
		23296								
15			3054	Inf	90	13000	5.09	2	-5.09	2
		26350								
16			1230	4000	90	13000	5.09	2	-5.09	2
		27580								
17			100	4000	90	13000	5.09	2	-5.09	2
		27680								
18			50	4000	90	13000	5.09	2	-5.09	2
	Nordportal	27730								
	I alt		**26650**							

Tabell 60 Geometriske data og andre Nøkkeldata for armen til Kvitsøy. Kjøreretning Vestgående mot Kvitsøy 1→10, Østgående fra Kvitsøy 10 → 1.

	Navn						Vestgående		Østgående	
		Pr. Nr.	L	H-radius	Hastig-het	ÅDT 2040	Gradient	Felt	Gradient	Felt
			(m)	(m)	(km/t)	kt/dag	%		%	
	Snitpunkt til Rampe	569								
1		650	81	Inf	80	450	1.00	1	-1.00	1
2		800	150	Inf	80	450	1.00	1	-1.00	1
3	Ramper 01 og 02	909	109	600	80	450	1.00	1	-1.00	1
4	Ramper 01 og 02	1059	150	600	80	900	1.00	1	-1.00	1
5		1374	315	600	80	900	7.00	1	-7.00	1
6		2415	1041	600	80	900	7.00	1	-7.00	1
7		3600	1185	600	80	900	7.00	1	-7.00	1
8		4502	902	1000	80	900	7.00	1	-7.00	1
9		4602	100	1000	80	900	7.00	1	-7.00	1
10	Kvitsøy portal	4652	50	1000	80	900	7.00	1	-7.00	1
	I alt		**4083**							

Rampe 01

Tabell 61 Geometriske data og andre Nøkkeldata for Rampe 01. Kjøreretning Vestgående mot Kvitsøy 1→3.

	Navn						Vestgående	
		Pr. Nr.	L	H-radius	Hastig-het	ÅDT 2040	Gradient	Felt
			(m)	(m)	(km/t)	kt/dag	%	
	Afgrening fra H-tun.	70						
1		196	126	1000	50*	150**	1.00	1
2		474	278	300	50*	150**	6.50	1
3	Snitpunkt til K-arm	525	51	300	50*	150**	1.00	1
	I alt		**455**					

* beregnet som 60 km/t ** kun en retning, Profilnumre er ikke i overensstemmelse med tegning D203, profil nr. 525 svarer til profilnr. 909 i armen til Kvitsøy.

Rampe 02

Tabell 62 Geometriske data og andre Nøkkeldata for Rampe 02. Kjøreretning Østgående fra Kvitsøy 1→4.

	Navn								Østgående	
		Pr. Nr.	L	H-radius	Hastig-het	ÅDT 2040			Gradient	Felt
			(m)	(m)	(km/t)	kt/dag			%	
	Snitpunkt til K-arm	70								
1		125	55	604	50*	300**			-1.40	1
2		168	43	300	50*	300**			-1.40	1
3		446	278	300	50*	300**			-6.50	1
4		550	104	300	50*	300**			-1.00	1
5	Indfletn til H-tun	637	87	2716	50*	300**			-1.00	1
	I alt		**567**							

* beregnet som 60 km/t ** kun en retning, Profilnumre er ikke i overensstemmelse med tegning D203, profil nr. 70 svarer til profilnr. 909 i armen til Kvitsøy.

Rampe 03

Tabell 63 Geometriske data og andre Nøkkeldata for Rampe 03. Kjøreretning Vestgående mot Kvitsøy 1→5.

	Navn						Vestgående	
		Pr. Nr.	L	H-radius	Hastig-het	ÅDT 2040	Gradient	Felt
			(m)	(m)	(km/t)	kt/dag	%	
	Afgrening fra H-tun.	50						
1		268	218	400	50*	300**	1.00	1
2		370	102	400	50*	300**	4.00	1
3		670	300	125	50*	300**	4.00	1
4		682	12	125	50*	300**	4.00	1
5	Snitpunkt til K-arm	750	68	Inf	50*	300**	1.00	1
	I alt		**700**					

* beregnet som 60 km/t ** kun en retning, Profilnumre er ikke i overensstemmelse med tegning D203, profil nr. 750 svarer til profilnr. 569 i armen til Kvitsøy.

Rampe 04

Tabell 64 Geometriske data og andre Nøkkeldata for Rampe 04. Kjøreretning Østgående fra Kvitsøy 1→4.

	Navn								Østgående	
		Pr. Nr.	L	H-radius	Hastig-het	ÅDT 2040			Gradient	Felt
			(m)	(m)	(km/t)	kt/dag			%	
	Snitpunkt til K-arm	400								
1	.	423	23	Inf	50*	150**			-1.07	1
2		700	277	107	50*	150**			-4.65	1
3		810	110	65	50*	150**			-4.65	1
4	Indfletn til H-tun	850	40	100	50*	150**			1.00	1
	I alt		**450**							

* beregnet som 60 km/t ** kun en retning, Profilnumre er ikke i overensstemmelse med tegning D203, profil nr. 400 svarer til profilnr. 569 i armen til Kvitsøy.

Referansetunneler

Referansetunnelerne modelleres med en forenklet geometri og er 10 km lange. ÅDT fastsettes iflg. beskrivelsen i avsnitt 7.5:

Tabell 65 Geometriske data og andre Nøkkeldata for Referansetunnel, Beregning 6a. I Beregning 6b1 er ÅDT = 8000 kt/d, 1 felt i hver retning (tovegstrafikk), og 80 km/t. I Beregning 6b2 er ÅDT = 4000 kt/d, ellers som beregning(7 er tunnelen helt uten gradient (0 %).

	Navn						Nordgående		Sydgående	
		Pr. Nr.	L	H-radius	Hastig-het	ÅDT 2040	Gradient	Felt	Gradient	Felt
			(m)	(m)	(km/t)	kt/dag	%		%	
	Sydportal	0								
1		50	50	10000	90	50000	-5.00	2	5.00	2
2		150	100	10000	90	50000	-5.00	2	5.00	2
3		5000	4850	10000	90	50000	-5.00	2	5.00	2
4		9850	4850	10000	90	50000	5.00	2	-5.00	2
5		9950	100	10000	90	50000	5.00	2	-5.00	2
6	Nordportal	10000	50	10000	90	50000	5.00	2	-5.00	2
	I alt		**10000**							

Arm til Kvitsøy med maksimal 5 %

Som et alternativ (Beregning 20 (10)) vurderes en arm til Kvitsøy med en maksimalt 5 % stigning. Da dybdepunktet ligger fast må tunnelen nødvendigvis bli lengre. Det forutsettes denne seksjonering av tunnelen, se Tabell 66.

Tabell 66 Geometriske data og andre Nøkkeldata for armen til Kvitsøy. Kjøreretning Vestgående mot Kvitsøy 1→10, Østgående fra Kvitsøy 10 → 1.

	Navn						Vestgående		Østgående	
		Pr. Nr.	L	H-radius	Hastig-het	ÅDT 2040	Gradient	Felt	Gradient	Felt
			(m)	(m)	(km/t)	kt/dag	%		%	
	Snitpunkt til Rampe	569								
1		650	81	Inf	80	450	1.00	1	-1.00	1
2		800	150	Inf	80	450	1.00	1	-1.00	1
3	Ramper 01 og 02	909	109	600	80	450	1.00	1	-1.00	1
4	Ramper 01 og 02	1059	150	600	80	900	1.00	1	-1.00	1
5		1374	315	600	80	900	7.00	1	-7.00	1
6		2415	1041	600	80	900	7.00	1	-7.00	1
7		3600	1185	600	80	900	7.00	1	-7.00	1
8		5939	2339	1000	80	900	7.00	1	-7.00	1
9		6039	100	1000	80	900	7.00	1	-7.00	1
10	Kvitsøy portal	6089	50	1000	80	900	7.00	1	-7.00	1
	I alt		**5520**							

Tid til udyktiggjøring - Beregningsresultater

Branneffekten, tverrsnittsarealet av tunnelen, ventilasjonshastigheten og tiden personer oppholder seg i røyken, er faktorer som har stor betydning for hvilke konsekvenser en brann vil få.

Sikten vil reduseres raskt i nedstrøms brannen i alle brannscenariene. Den bedres med økende ventilasjonshastighet og økende tunneltverrsnitt.

Tiden det tar før personer som oppholder seg i røyken blir udyktiggjort, er vist I tabellen under. Med udyktiggjøring menes at personer ikke greier å forflytte seg ved egen hjelp.

Tabell 67 Tid til udyktiggjøring som følge av giftighet for branner på 20, 50, 100 og 300 MW i tunneler med profil T8,5, T9,5 og T10,5.

Varme-effekt	Brannens varighet	Maks. ventilasjons-hastighet [m/s]	T8,5 [min]	T9,5 [min]	T10,5 [min]
20 MW	0,5 time	1	9	10	12
		3,5	Mulig helseskade, men kan overleve	Mulig helseskade, men kan overleve	Mulig helseskade, men kan overleve
		4,5	Mulig helseskade, men kan overleve	Mulig helseskade, men kan overleve	Mulig helseskade, men kan overleve
50 MW	1 time	1	2,5-3	3	3,5
		3,5	15	17	20
		4,5	21	23	27
100 MW	1 time	1	2,5-3	3	3
		3,5	7	8	9
		4,5	9,5	10,5	12
300 MW	1 time	1	2,5-3	3	3
		3,5	6,5	7	7,5
		4,5	7,5-8	8	9

Tiden til udyktiggjøring ved en brann på 100 MW og 300 MW er liten i tabellen over. Dette skyldes at udyktiggjøring skjer før brannen er fullt utviklet. Ved utviklet brann vil tiden til udyktiggjøring ved en 300 MW brann være i størrelsesorden 1/3 av tiden ved en brann på 100 MW.

Betydningen ventilasjonshastigheten og størrelsen på tverrsnittsarealet i tunnelen har på tiden personer kan oppholde seg i røyken er her oppsummert.

- Ventilasjonshastighet
  - For en brann på 20 MW vil ventilasjon kunne bety at en kan overleve i røyken. Uten ventilasjon vil tid til udyktiggjøring for de som oppholder seg i røyken kunne skje etter 1-12 minutter.
  - Tid til udyktiggjøring øker med økende ventilasjonshastighet for alle brannene, men forskjellen i tid blir mindre med økende alvorlighetsgrad på brannen. Uten ventilasjon er tid

til udyktiggjøring beregnet til 3 minutter, og 10-12 minutter med en ventilasjonshastighet på 4,5 m/s når brannen er 100 MW.
  - Foruten å fortynne røykgassene har ventilasjonen en svært viktig betydning i forhold til å ha kontroll med hvor røyken spres.
- Tunneltverrsnittsareal
  - Tid til udyktiggjøring øker med størrelsen på tunnelens tverrsnittsareal. Ved en 50 MW brann vil en ha 3-4 minutter mer til rådighet i T10,5 sammenlignet med T9,5 med ventilasjonshastighet på 3,5-4,5 m/s. Forskjellen blir mindre med økende alvorlighetsgrad på brannen, fordi kritisk fase oppstår raskt og før brannen er fullt utviklet.

Hovedtunnel – normalsituasjon (enveis trafikk i to løp)

Tabell 68 Inngangsdata for beregning av antall eksponerte i de ulike brannscenariene med enveis trafikk.

	Basistunnel			Referansetunnel		
Scenarienr:	Sc. 1	Sc. 2 og 3	Sc. 4	R-Sc.1	R-Sc. 2 og R-Sc. 3	R-Sc. 4
ÅDT	13000	13000	13000	50000	50000	50000
Timetrafikk [% av ÅDT]:	4	4	17	4	4	17
Hastighet [km/t]:	90	90	90	90	90	90
Tunnellengde [m]:	26000	26000	26000	10000	10000	10000
Tid før bom stenger [min]:	3	3	3	3	3	3
Lengde fra portal A(innløp) [m]:	300	19000	19000	300	7500	7500
Lengde fra portal B (utløp) [m]:	25700	7000	7000	9700	2500	2500
Andel kjøretøy i tunnelløpet med brann:	0,5	0,5	0,8	0,5	0,5	0,8
Andel kjøretøy i tunnelløpet uten brann:	0,5	0,5	0,2	0,5	0,5	0,2
Ventilasjonsretning med kjøreretning						
Gjennomsnittlig antall personer pr kjøretøy:	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Antall personer i buss:	20	20	20	20	20	20

Tabell 69 Resultater fra eksponeringsberegninger for scenarier med enveis trafikk.

	Basistunnel			Referansetunnel		
Scenario nr:	Sc. 1	Sc. 2 og Sc. 3	Sc. 4	R-Sc.1	R-Sc. 2 og R-Sc. 3	R-Sc. 4
Antall sekunder mellom hvert kjøretøy som kjører inn i tunnelløpet:	13,8	13,8	2,0	3,6	3,6	0,5
Normal kjøretid i tunnelen [min]:	17,3	17,3	17,3	6,7	6,7	6,7
Maksimalt antall biler i tunnelløpet ved brannstart:	75,1	75,1	510,8	111,1	111,1	755,6
Antall biler som kjører inn i tunnelen før bom stenger:	13,0	13,0	88,4	50,0	50,0	340,0
Andel kjøretøy som passerer brannen og kjører ut av tunnelen:	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Antall kjøretøy oppstrøms brannen etter at tunnel er stengt:	13,8	65,1	443,0	53,2	129,2	878,3
Andel kjøretøy som snur og kjører ut:	0	0	0	0	0	0
Antall kjøretøy oppstrøms brannen:	13,8	65,1	443,0	53,2	129,2	878,3

Tabell 70 **Inngangsdata og resultater av beregninger av antall personer som mislykkes i å evakuere dersom ventilasjonsanlegget feiler, det er stillestående kø eller brannen er større enn dimensjonerende brann. Beregningene er utført for scenariene i basistunnelen og tilsvarende scenarier i referansetunnelen. Personer som ikke klarer å evakuere fordi de f.eks. sitter fastklemt i start brannkjøretøyet er ikke inkludert i tabellen.**

	Basistunnel				Referansetunnel			
Sccenario nr:	Sc. 1	Sc. 2	Sc. 3	Sc. 4	R-Sc. 1	R-Sc. 2	R-Sc. 3	R-Sc. 4
	300 MW	20 MW	100 MW	300 MW	300 MW	20 MW	100 MW	300 MW
Feil ved ventilasjon:								
Tid til udyktiggjøring [min]:	3	10	3	3	3	10	3	3
Mulig evakueringslengde [m]:	36	120	36	36	36	120	36	36
Totalt antall kjøretøy "oppstrøms" brannen:	13,8	65,1	65,1	443	53,2	129,2	129,2	878,3
Totalt antall kjøretøy "oppstrøms" brannen til neste sjakt:								
Andel kjøretøy "oppstrøms" brannen som eksponeres:	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Mislykket evakuering [antall personer]:								
1a) avstand mellom nødutganger er 250 m, buss ikke involvert	7,4	2,0	34,8	236,6	28,4	3,9	69,0	469,0
1b) avstand mellom nødutganger er 250 m, buss involvert	21,1	2,7	48,5	250,3	42,1	4,6	82,7	482,7
2a) avstand mellom nødutganger er 125 m, buss ikke involvert	4,4	0,0	20,7	140,9	16,9	0,0	41,1	279,3
2b) avstand mellom nødutganger er 125 m, buss involvert	12,6	0,0	28,9	149,0	25,1	0,0	49,2	287,5
Stillestående kø, fungerende ventilasjon (3,5 m/s):								
Tid til udyktiggjøring [min]:	7	-	8	7	7	-	8	7
Mulig evakueringslengde [m]:	84	-	96	84	84	-	96	84
Totalt antall kjøretøy nedstrøms brannen:	74,2	20,2	20,2	137,5	107,8	27,8	27,8	188,9
Totalt antall kjøretøy nedstrøms brannen til neste sjakt:	20,2	20,2	11,6	78,6				
Andel kjøretøy nedstrøms brannen som eksponeres:	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Mislykket evakuering [antall personer]:								
1a) avstand mellom nødutganger er 250 m, buss	9,0	0,0	3,6	34,8	47,7	0,0	8,7	83,6

ikke involvert								
1b) avstand mellom nødutganger er 250 m, buss involvert	15,1	0,0	7,9	40,9	53,8	0,0	13,0	89,6
2a) avstand mellom nødutganger er 125 m, buss ikke involvert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2b) avstand mellom nødutganger er 125 m, buss involvert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Brann større enn dimensjonerende brann:								
Tid til udyktiggjøring [min]:	7			7	7			7
Mulig evakueringslengde [m]:	84			84	84			84
Totalt antall kjøretøy "oppstrøms" brannen:	13,8			443,0	53,2			878,3
Totalt antall kjøretøy "oppstrøms" brannen til neste ventilasjonstårn:	13,8			113,6				
Andel kjøretøy "oppstrøms" brannen som eksponeres:	0,5			0,5	0,5			0,5
Mislykket evakuering [antall personer]:								
1a) avstand mellom nødutganger er 250 m, buss ikke involvert	3,4			27,9	13,1			216,1
1b) avstand mellom nødutganger er 250 m, buss involvert	9,7			34,3	19,4			222,4
2a) avstand mellom nødutganger er 125 m, buss ikke involvert	0,0			0,0	0,0			0,0
2b) avstand mellom nødutganger er 125 m, buss involvert	0,0			0,0	0,0			0,0

Avvikssituasjoner i hovedtunnel

Basistunnel
Basistunnelen er ca 26 km og har kurvatur som angitt i Figur 4. All trafikk går i ett løp, dvs. toveis trafikk. Øvrige spesifikasjoner er gitt i Tabell 71.

Referansetunneler
Referansetunnelene har vertikalkurvatur som en V; 5 km helning på 5 % og 5 km på 5 %. Det er to referansetunneler:

1) Referansetunnel 1:
   - ÅDT: 4 000 (ÅDT-grense for å gå fra tunnelklasse B (T 9,5) til C, jfr HB 021 fig 4.4)
   - T9,5
2) Referansetunnel 2:
   - ÅDT: 8 000 (ÅDT-grense for å gå fra tunnelklasse C (T10,5) til D, jfr HB 021 fig 4.4)
   - T10,5

Brannscenarier
Det er foretatt beregninger for to brannscenarier (scenario A1og A2) i basistunnelen. Begge scenariene er med toveis trafikk i ett tunnelløp i hele hovedtunnelen. Skiltet fartsgrense er 80 km/t.

Eksponering, toveis trafikk i hovedtunnel

Tabell 71 Inngangsdata for beregning av antall eksponerte i de ulike brannscenariene med toveis trafikk.

Hendelse:	Basistunnel, Sc. A1 og A2	Referanse-tunnel 1	Referanse-tunnel 2
ÅDT	13000	4000	8000
Timetrafikk [% av ÅDT]	4	4	4
Hastighet [km/t]	80	80	80
Tunnellengde [m]:	26000	10000	10000
Tid før bom stenger [min]	3	3	3
Lengde fra portal A(innløp) [m]:	13000	5000	5000
Lengde fra portal B (utløp) [m]:	13000	5000	5000
Andel kjøretøy fra A-B (mot ventilasjonsretn)	0,5	0,5	0,5
Andel kjøretøy fra B-A (med vent.retn)	0,5	0,5	0,5
Ventilasjonsretning	Fra A til B	Fra A til B	Fra A til B

Tabell 72 Eksponeringsberegningsresultater for scenarier med toveis trafikk.

	Basistunnel, Sc. A1 og A2	Referanse-tunnel 1	Referanse-tunnel 2
Antall sekunder mellom hvert kjøretøy som kjører inn i tunnelen:	6,9	22,5	11,3
Normal kjøretid i tunnelen [min]:	19,5	7,5	7,5
Maksimalt antall biler i tunnelen ved brannstart:	169,0	20,0	40,0
Antall biler som kjører inn i tunnelen før bom stenger:	26,0	8,0	16,0
Totalt antall kj.t nedstøms brannen (i felt mot vent.retn når bom er aktivert)	55,3	9,0	18,0
Totalt antall kj.t oppstrøms brannen (i felt i vent.retn når bom er aktivert)	55,3	9,0	18,0

Konsekvenser ved brann i hovedtunnel med toveis trafikk

Tabell 73 Inngangsdata og resultater av beregninger av antall personer som mislykkes i å evakuere dersom ventilasjonsanlegget fungerer som planlagt eller ikke. Beregningene er utført for to scenarier i basistunnelen og tilsvarende scenarier i referansetunnelen. Personer som ikke klarer å evakuere fordi de f.eks. sitter fastklemt i start brannkjøretøyet er ikke inkludert i tabellen.

	Basistunnel		Referanse-tunnel 1		Referanse-tunnel 2	
Scenario nr:	Sc. A1	Sc A2	R1-Sc. A1	R1-Sc A2	R1-Sc. A1	R1-Sc A2
	100 MW	20 MW	100 MW	20 MW	100 MW	20 MW
Fungerende ventilasjon (3,5 m/s):						
Tid til udyktiggjøring [min]:	8	-	8	-	8	-
Mulig evakueringslengde [m]:	96	-	96	-	96	-
Totalt antall kjøretøy nedstrøms brannen (i felt mot vent.retn når bom er aktivert):	55,3	55,3	9	9	18	18
Andel kjøretøy nedstrøms brannen som eksponeres:	1	1	1	1	1	1
Mislykket evakuering [antall personer]:						
1a) avstand mellom nødutganger er 250 m, buss ikke involvert	19,2	0,0	3,1	0,0	6,3	0,0
1b) avstand mellom nødutganger er 250 m, buss involvert	23,5	0,0	7,4	0,0	10,6	0,0
2a) avstand mellom nødutganger er 125 m, buss ikke involvert	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2b) avstand mellom	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

nødutganger er 125 m, buss involvert						
Feil ved ventilasjon:						
Tid til udyktiggjøring [min]:	3	10	3	10	3	10
Mulig evakueringslengde [m]:	36	120	36	120	36	120
Totalt antall kjøretøy "oppstrøms" (i felt i vent.retn når bom er aktivert):	55,3	55,3	9,0	9,0	18,0	18,0
Andel kjøretøy "oppstrøms" brannen som eksponeres i tillegg til de nedstrøms brannen:	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Mislykket evakuering [antall personer]:						
1a) avstand mellom nødutganger er 250 m, buss ikke involvert	48,8	1,7	7,9	0,3	15,9	0,5
1b) avstand mellom nødutganger er 250 m, buss involvert	66,8	2,4	25,9	1,0	33,9	1,3
2a) avstand mellom nødutganger er 125 m, buss ikke involvert	17,6	0,0	2,9	0,0	5,7	0,0
2b) avstand mellom nødutganger er 125 m, buss involvert	25,7	0,0	11,0	0,0	13,9	0,0

Tunnel til Kvitsøy

Branner i kryssløsning
I kap.8.5.1 gis en kvalitativ sammenligning av referansetunnel og basistunnel inkl. kryss for Kvitsøytunnelen. I nevnte rapportkapittel er det gjort henvisninger til følgende tre eksempler som her er nærmere beskrevet:

1. Brann 500 m fra portal (lengst borte fra Kvitsøy) i referansetunnel
2. Brann i rampe fra Kvitsøy mot Haugesund i basistunnel
3. Brann utenfor basistunnel i hovedløp mellom sjakt Kvitsøy nord og rampe av til Kvitsøy

Eksempel 1; Brann 500 m fra portal (lengst borte fra Kvitsøy) i referansetunnel
Antakelser:

- Timetrafikk 13 % av ÅDT
- Lik trafikkmengde i begge kjøreretninger
- Brannsted 3500 m fra portal ved Kvitsøy
- Ventilasjon mot Kvitsøy (antar fast ventilasjonsretning i overenstemmelse med norsk praksis)
- Tid før bom stenges ved portaler 3 min
- Ingen kjøretøy nedstrøms brannen med kjøreretning mot brannen kjører ut av tunnelen
- Evakuering starter når kjøretøy er fanget i røyk

Tabell 74 angir hvor mange som forventes å omkomme i en 100 MW brann i Kvitsøytunnelen (referansetunnel). Antakelsen om at ingen starter evakuering til fots før kjøretøy er fanget av røyk er konservativ. Personer som starter tidlig å evakuere har mulighet til å komme ut av tunnelen før de fanges av røyk.

Dersom ventilasjonen ikke fungerer og trekkhastigheten er 1 m/s, vil ingen nedstrøms brannen kunne evakuere til fots uten at de blir varslet om brann før de kommer fram til køen som følge av brannen.

Ventilasjonen fungerer:

- Tid til udyktiggjøring med fungerende ventilasjon (3,5 m/s) i T8,5 og 100 MW brann: 7 min
- Evakueringslengde i røyk (0,2 m/s): 84 m
- Evakueringslengde uten røyk (1,37 m/s): 575 m

Ventilasjonen svikter:

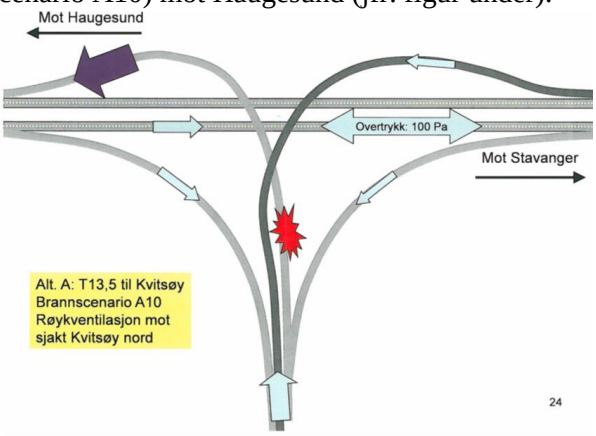
- Tid til udyktiggjøring uten ventilasjon (1 m/s) i T8,5 og 100 MW brann: 3 min
- Evakueringslengde i røyk (0,2 m/s): 36 m
- Evakueringslengde uten røyk (1,37 m/s): 246 m

Tabell 74 Mislykket evakuering i referansetunnel ved brann 500 m fra portal. Personer som ikke klarer å evakuere fordi de for eksempel sitter fastklemt i kjøretøyet som brenner er ikke inkludert i tabellen.

Antall udyktiggjorte personer:	
• Buss ikke involvert	13,6
• Buss involvert	32,2

Eksempel 2; Brann i rampe fra Kvitsøy mot Haugesund i basistunnel

Brann i rampe fra Kvitsøy (Scenario A10) mot Haugesund (jfr. figur under).



Figur 69 Prinsippskisse av ventilasjon ved brann i rampe på mot nord. Røykventilasjon mot sjakt i Kvitsøy nord (SVV, 2011-10-28)

Kjøretøy i nordgående hovedløp vil møte røyk ved rampen fra Kvitsøy, dersom de ikke blir stanset. Dersom ventilasjonen ikke fungerer som planlagt i rampen med brann, slik at røyken ikke blåses mot hovedløp, men mot Kvitsøy:

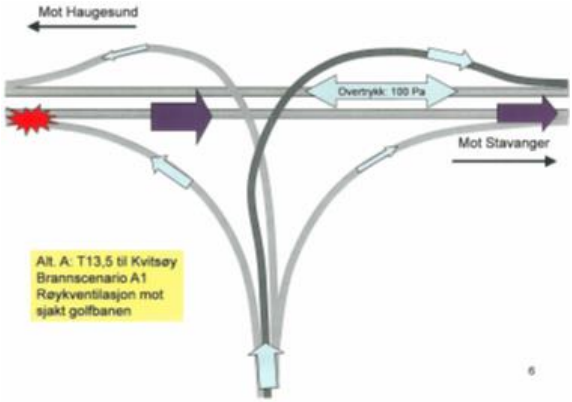
- Kjøretøy i rampe med brann mellom brannen og hovedtunnel kjører ut i hovedtunnel.
- Kjøretøy i rampe fra Kvitsøy til Stavanger ved branntidspunkt kjører ut i hovedtunnel.
- Antall røykeksponerte kjøretøy fra Kvitsøy nedstrøms brannen (dvs mellom brannen og Kvitsøy): 5,5
- Kjøretøy fra rampen fra hovedløp fra Haugesund og Stavanger vil møte røyk ved innflettingen. Dersom ventilasjonen fungerer i disse rampen vil ikke disse bli eksponert med mindre de kjører inn i røykfronten.

Stillestående kø vurderes som ikke aktuelt da gjennomsnittlig antall kjøretøy nedstøms brannen i rampen vil være 1,65 kjøretøy.

Beregningene er basert på følgende antakelser:

- timetrafikk 13 % av ÅDT
- rampelengde 750 m
- lik trafikktettheten i alle fire ramper
- tid før bom stenger ved portaler 3 min
- brannen oppstår nærflettepunkt for Kvitsøytunnelen
- lik fordeling av trafikk i alle ramper

Eksempel 3; Brann i rampe fra Kvitsøy mot Haugesund i basistunnel
Brann i hovedløp mellom sjakt Kvitsøy nord og rampe av til Kvitsøy (jfr. Figur under).



Figur 70 Prinsippskisse av ventilasjon ved brann mellom sjakt Kvitsøy nord og rampe av til Kvitsøy. Røykventilasjon mot golfbane. (SVV, 2011-10-28)

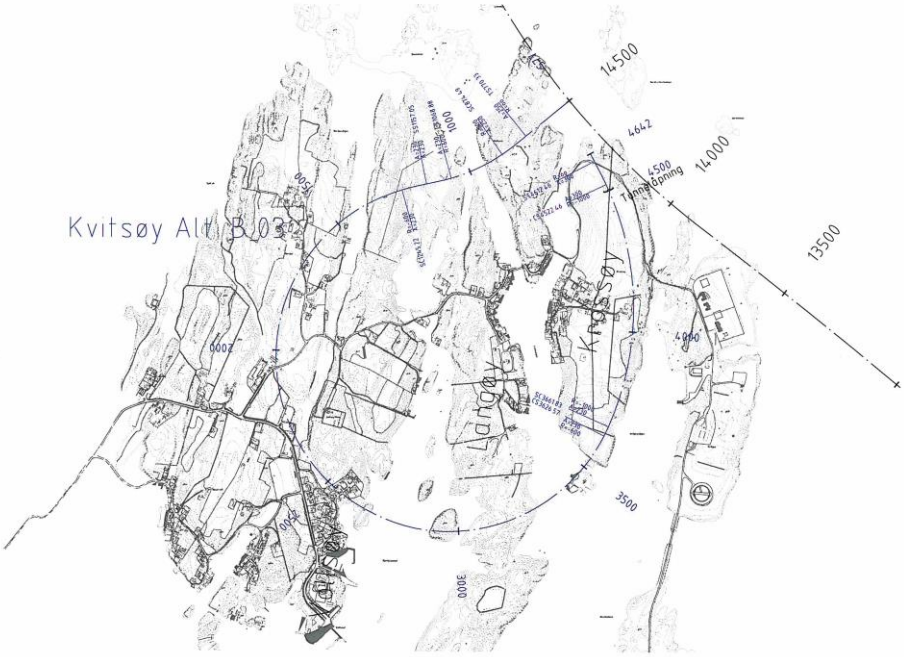
Trafikk i rampen fra Kvitsøy mot Stavanger vil møte røyk ved innfletting i hovedløp om de ikke blir stanset. Dersom ventilasjonen ikke fungerer i rampen fra sørgående løp (hvor brannen er) til Kvitsøy og trekkretningen går mot Kvitsøy (motsatt av hva som er planlagt) vil røyk trekkes opp i Kvitsøy armen.
Tid før røyk når flettepunkt i Kvitsøyarmen: 3,5-8,5 min
Kjøretøy fra Kvitsøy vil ha passert punktet før røykfronten når fram.
Antall kjøretøy fra Stavanger til Kvitsøy som kan møte røykfronten:

- 5,4 kjøretøy (trekkhastighet 3,5 m/s)
- 2,9 kjøretøy (trekkhastighet 1,5 m/s)

Dersom ventilasjonen fungerer i rampen fra nordgående løp til Kvitsøy (hvor kjøretøyene befinner seg) vil ikke disse bli eksponert med mindre de kjører inn i røykfronten.

Beregningene er basert på følgende antakelser:

- timetrafikk 13 % av ÅDT
- rampelengde 750m
- brann ved avkjøring til rampe
- trekkhastighet i rampe 1,5-3,5 m/s
- lik trafikktettheten i alle fire ramper
- tid før bom stenger ved portaler 3 min



Figur 71 Linjeføringer for tunnelen til Kvitsøy.

Brannscenarier

Tre scenarier er analysert; et nær innløpet på Kvitsøy, et midt i tunnelløpet og et nær krysset ved hovedtunnelen. Scenariene i referansetunnelen er sammenlignet med tilsvarende scenarier i basistunnelen og de to alternative utformingene. Brannene har følgende lokalisering:

- Scenario K1: 100 MW brann, 500 m fra krysset (for Alt. 2: i løpet med trafikk fra Kvitsøy), timetrafikk på 4 % av ÅDT
- Scenario K2: 300 MW brann, midt i tunnelen (for Alt. 2: i løpet med trafikk fra Kvitsøy), timetrafikk på 13 % av ÅDT
- Scenario K3: 20 MW brann, 500 m fra Kvitsøy (for Alt 2: i løpet med trafikk mot Kvitsøy), timetrafikk på 4 % av ÅDT

I denne sammenligningen er ikke kryssløsningen inkludert i basistunnelen. Hensikten med vurderingene er primært å få frem forskjellen på branner nær portalen til Kvitsøy og midt i tunnelen, samt forskjellen på ett og to løp til Kvitsøy.

Eksponering og konsekvenser ved brann
I dette kapitlet beskrives hvilke konsekvenser de ulike brannscenariene har på trafikanter i tunnelen til Kvitsøy. Tabellen viser inngangsdata beregningene av antall kjøretøy som kan eksponeres av røyk i brannscenariene. Videre vises antall personer som forventes å bli udyktiggjort i de tre scenariene i referansetunnelen, basistunnelen og de to alternative løsningene. Delkapitlene under viser antakelsene som beregningene er basert på.

Merk at:

- I vår sammenligning er udyktiggjøring av personer som sitter fastklemt eller av annen grunn ikke greier å forflytte seg fra området hvor varmestrålingen er en trussel ikke tatt med. Antall personer dette gjelder vil være tilnærmet lik i de ulike tunnelløsningene, men to løp vil være mest gunstig i tillegg til at en økning i tverrsnittsareal bedrer forholdene for de som forflytter seg bort fra brannen.
- Eventuelle konsekvenser for kjøretøy i hovedløpet ikke er vurdert i disse scenariene.
- Kryssløsningen er ikke inkludert i disse beregningene.

Tabell 75 Inngangsdata for beregning av antall eksponerte i de tre scenariene med toveis trafikk.

Scenario:	K1	K2	K3
ÅDT:	900 (ref.tunnel: 1500)	900 (ref.tunnel: 1500)	900 (ref.tunnel: 1500)
Timetrafikk [% av ÅDT]:	4	13	4
Hastighet [km/t]:	80	80	80
Tunnellengde [m]:	4000	4000	4000
Tid før bom stenger [min]:	3	3	3
Lengde fra kryss (A) [m]:	500	2000	3500
Lengde fra Kvitsøy (B) [m]:	3500	2000	500
Andel kjøretøy fra B-A (mot ventilasjonsretn):	0,5	0,8	0,5
Andel kjøretøy fra A-B (med vent.retn):	0,5	0,2	0,5
Ventilasjonsretning tunnel med ett løp:	Fra A til B	Fra A til B	Fra A til B
Ventilasjonsretning alt. 2 med to løp (med kjøreretning):	Fra B til A	Fra B til A	Fra A til B

Referansetunnel og basistunnel
Scenario K1 (100 MW):
Antakelser:

- Alle kjøretøy nedstrøms brannen eksponeres av røyk.
- Alle personer i kjøretøy som eksponeres av røyk starter evakuering til fots
- Ingen personer som eksponeres av røyk greier å evakuere til fots til røykfritt område (dvs. til Kvitsøy eller røykfritt hovedløp) før de blir udyktiggjort.
- Dersom ventilasjonen ikke fungerer som planlagt:
    - Ventilasjonshastighet: 1 m/s

    - Kjøretøy "oppstrøms" og "nedstrøms" brannen eksponeres av røyk i felt med kjøreretning mot brannen
- Dersom det er stillestående kø eksponeres 90 % av de som er nedstrøms brannen ved brannstart.
- I basistunnelen er det maksimalt 3,6 kjøretøy i tunnelen når bommer er stengt og stillestående kø ansees ikke som aktuell problemstilling.

Scenario K2 (300 MW):
Antakelser:

- Brannen er større enn dimensjonerende brann og alle "oppstrøms" og "nedstrøms" brannen eksponeres av røyk både når ventilasjonen virker som forventet og ikke.
- Alle personer i kjøretøy som eksponeres av røyk starter evakuering til fots
- Ingen personer som eksponeres av røyk greier å evakuere til fots til røykfritt område (dvs. til Kvitsøy eller røykfritt hovedløp) før de blir udyktiggjort.
- Dersom det er stillestående kø eksponeres 90 % av alle som er i tunnelen ved brannstart og de som kommer til før bom stenger.

Scenario K3 (20 MW):
Antakelser:

- Alle kjøretøy nedstrøms brannen eksponeres av røyk.
- Alle personer i kjøretøy som eksponeres av røyk starter evakuering til fots.
- Dersom ventilasjonen fungerer som planlagt (min 3,5 m/s) vil ikke personer bli udyktiggjort i løpet av den halve timen brannen vedvarer, men personene kan få helseskader.
- Dersom ventilasjonen ikke fungerer som planlagt:
    - Ventilasjonshastighet: 1 m/s
    - Naturlig trekkretning antas å være mot Kvitsøy og personer nedstrøms brannen eksponeres av røyk
    - Ingen personer som eksponeres av røyk greier å evakuere til fots til røykfritt område (dvs. til Kvitsøy) før de blir udyktiggjort. Maksimal evakueringslengde på 9 minutter er 120 m (0,2 m/s).
- I basistunnelen er det maksimalt 3,6 kjøretøy i tunnelen når bommer er stengt og stillestående kø ansees ikke som aktuell problemstilling.

Alterativ 1; ett løp T10,5
Antakelser:

- Samme antakelser for scenario K1 og K2 i alternativ løsning med T10,5 som for basistunnel bortsett fra at 5 % av kjøretøy som kan eksponeres for røyk passerer brannen eller snur (dvs. 5 % færre som udyktiggjøres).
- Tid før udyktiggjøring blir lengre med T10,5, men lengden en må evakuere er så lang at personer som eksponeres av røyk vil bli udyktiggjort når de evakuerer til fots. I scenario K3 antas også at 5 % færre blir udyktiggjort.

Alterativ 2; to løp T9,5
Scenario K1 (100 MW) og K3 (20 MW):
Antakelser:

- Alle kjøretøy nedstrøms brannen kjører ut før de eksponeres av røyk, bortsett fra ved langsom eller stillestående kø.
- Ingen personer oppstrøms brannen eksponeres av røyk, bortsett fra ved ikke fungerende ventilasjon.
- Dersom ventilasjonen ikke fungerer som planlagt:

  - Ventilasjonshastighet: 1 m/s
  - Kjøretøy "oppstrøms" brannen eksponeres av røyk
- Dersom det er stillestående kø eksponeres 90 % av de som er nedstrøms brannen ved brannstart.
- Alle personer i kjøretøy som eksponeres av røyk starter evakuering til fots.
- Dersom ventilasjonen fungerer som planlagt (min 3,5 m/s) vil ikke personer ved 20 MW brann bli udyktiggjort i løpet av den halve timen brannen vedvarer, men personene kan få helseskader.

Scenario K2 (300 MW):
Antakelser:

- Alle kjøretøy nedstrøms brannen kjører ut før de eksponeres av røyk, bortsett fra ved langsom eller stillestående kø.
- Dersom det er stillestående kø eksponeres 90 % av de som er nedstrøms brannen ved brannstart.
- Brannen er større enn dimensjonerende brann og kjøretøy "oppstrøms" brannen eksponeres av røyk både når ventilasjonen virker som forventet og ikke.
- Alle personer i kjøretøy som eksponeres av røyk starter evakuering til fots.

Dersom ventilasjonsanlegget ikke fungerer eller brann er større enn dimensjonerende brann vil en ikke ha kontroll med hvordan røyken spres. Det er en fare for at personer oppstrøms og nedstrøms brannen kan eksponeres, men mest sannsynlig vil trekkretningen være mot Kvitsøy.

Sensitivitetsberegninger

Sensitivitetsberegninger er utført for å undersøke hvordan risikoen endres med høyere trafikkmengde og høyere andel tungtrafikk (se også Vedlegg A).
Tabellen under viser hvor mange som mislykkes i å evakuere til nødutgangene med ÅDT på 17000. Scenariene, inngangsdata og antakelsene som beregningene er basert på er de samme som er benyttet i kap. 8.3 for estimering av risiko i hovedløp, normalsituasjon (to løp) bortsett fra en høyere ÅDT på 17000.

Tabell 76 Mislykket evakuering, basistunnel med ÅDT 17000, [antall personer]. Personer som ikke klarer å evakuere fordi de f.eks. sitter fastklemt i start brannkjøretøyet er ikke inkludert i tabellen.

Scenario nr:	Sc. 1	Sc. 2	Sc. 3	Sc. 4
	300 MW	20 MW	100 MW	300 MW
Ventilasjon fungerer, ikke kø:				
1a) buss ikke involvert	4,5	0	0	37,1
1b) buss involvert	10,8	0	0	38,1
Feil ved ventilasjon (sannsynlighet 0,02):				
1a) buss ikke involvert	9,7	2,6	45,5	309,3
1b) buss involvert	23,4	3,3	59,2	323,1
Stillestående kø, fungerende ventilasjon (3,5 m/s) (sannsynlighet 0,01):				
1a) buss ikke involvert	11,7	0	3,6	45,5
1b) buss involvert	17,8	0	37,9	51,6

Resultatene er oppsummert i **Tabell 77** under, som viser forventet antall omkomne i de ulike scenarier for henholdsvis Rogfast basis med 1) ÅDT på 13000 og 15 % tyngre kjøretøy og 2) ÅDT på 17000 og 25 % tyngre kjøretøy.

Tabell 77 Konsekvenser for ulike scenarier (gitt brann)

Tunnel	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4
Rogfast, basis: ÅDT: 13000 Andel tyngre kj.t.: 15 %	4,3	0,0	0,8	33,7
Rogfast, basis: ÅDT: 17000 Andel tyngre kj.t.: 25 %	5,5	0,1	1,0	43,9

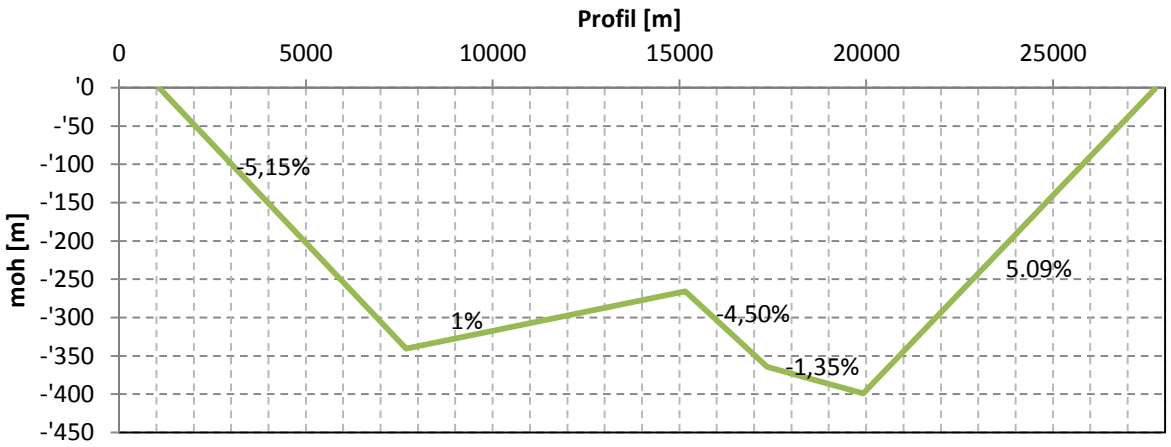
Vedlegg C: Risiko for tunge kjøretøy på lange strekninger med store gradienter

Innledning

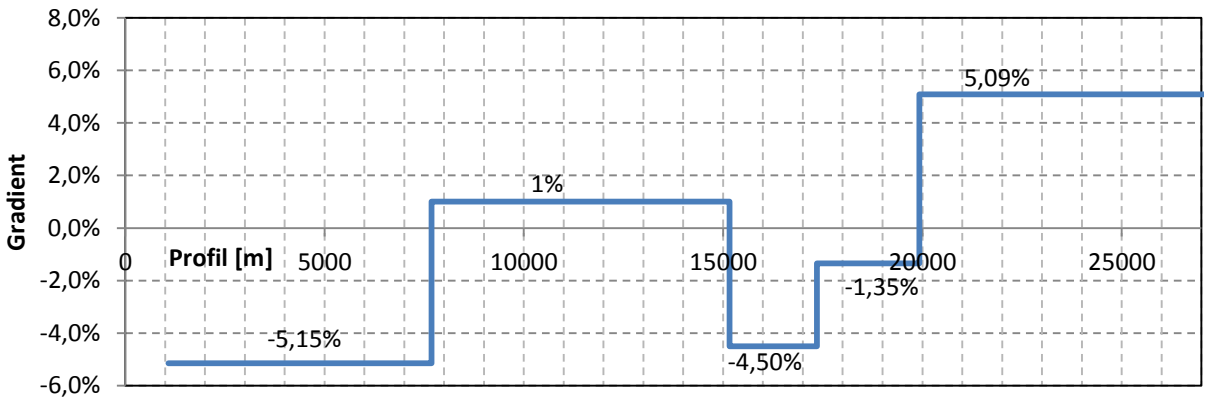
Dette appendiks gir sammendrag av de særlige faktorer som er et resultat avmodelleringen av risikotillegg for tunge kjøretøy på lange strekninger med store gradienter. Modellen er opstilt i sammenheng med risikoanalysen av Rogfast i 2013, [51].

Rogfast hovedtunnel

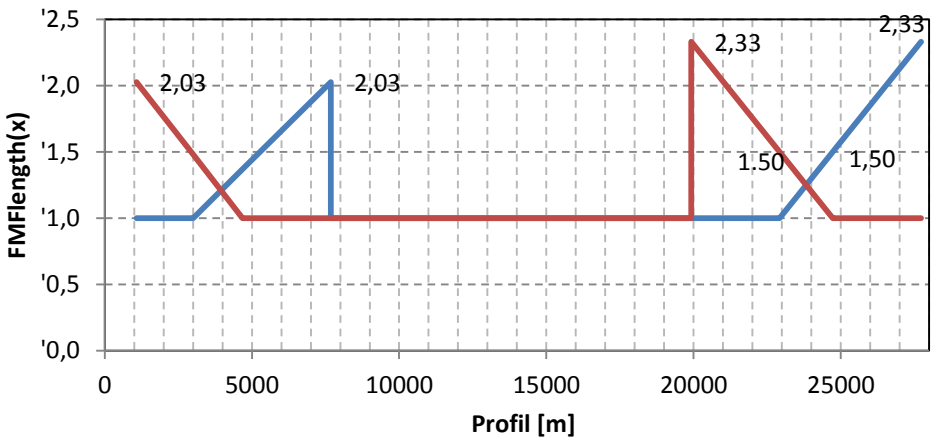
I det følgende eksemplificeres, hvordan de ovenfor opstillede faktorer kan anvendes på det modificerede lengdeprofil for Rogfast. Lengdeprofil og stigningsgrad vises forenklet i Figur 72og Figur 73.



Figur 72 Forenklet lengdeprofil for Rogfast



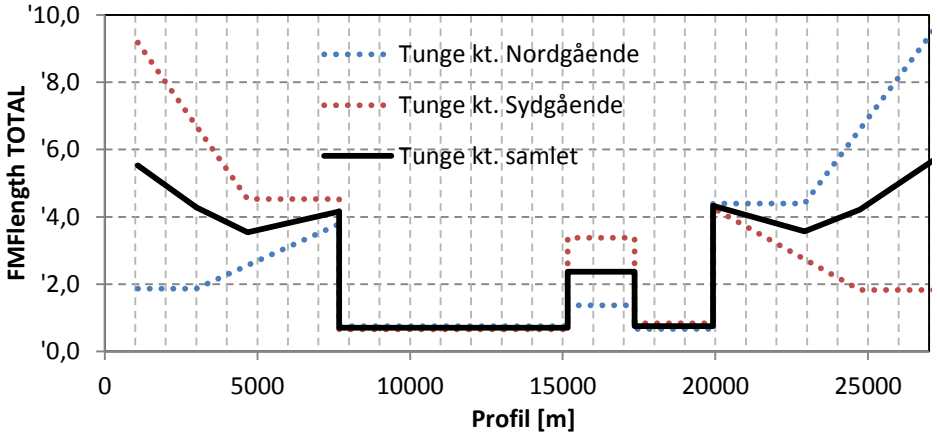
Figur 73 Stigningsgrader for Rogfast. Negative gradienter er fall i norgående retning, positive gradienter er stigning i nordgående retning.



Figur 74 Momentan brannmodifikasjonsfaktor for tunge kjøretøy avhengig av kjørelengde (Fire Frequency Modification Factor, $FMF_{length}(x)$) anvendt for Rogfast.

Den samlede gradientavhengige brannmodifikasjonsfaktor for hele tunnelen er 1.36 for 15 % andel tungtrafikk. Hvis man ser på tungtrafikken alene er den samlede faktor for tunnelen 2.52.

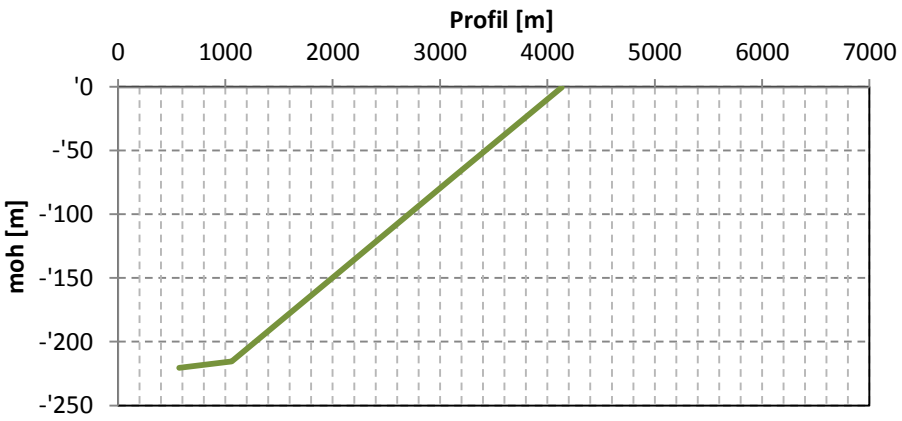
I forhold til modellen beskrevet i [72] svarer dette til en økning av brannfrekvensen med 5.2 %, (som stammer fra en økning av frekvensen av branner i tunge kjøretøy på 95.5 % (faktor 1.955).



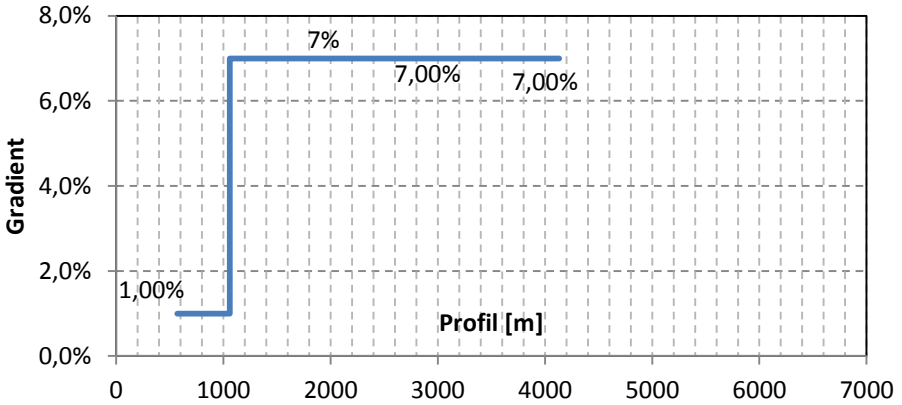
Figur 75 Samlet gradientavhengig brannmodifikasjonsfaktor for tunge kjøretøy langs tunnelens lengdeprofil.

Arm til Kvitsøy

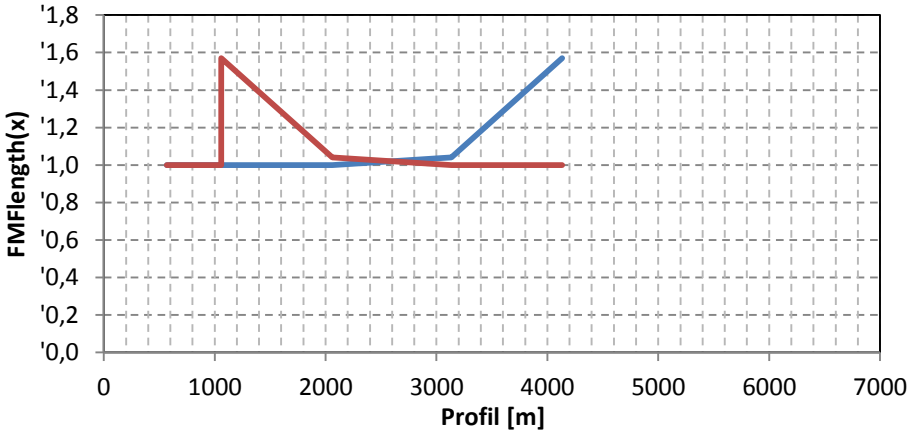
Tilsvarende kan det bestemmes hvilken betydning den 3.1 km lange 7 % stigning/fall har for brannfrekvensen i armen til Kvitsøy.



Figur 76 Forenklet lengdeprofil for Arm til Kvitsøy



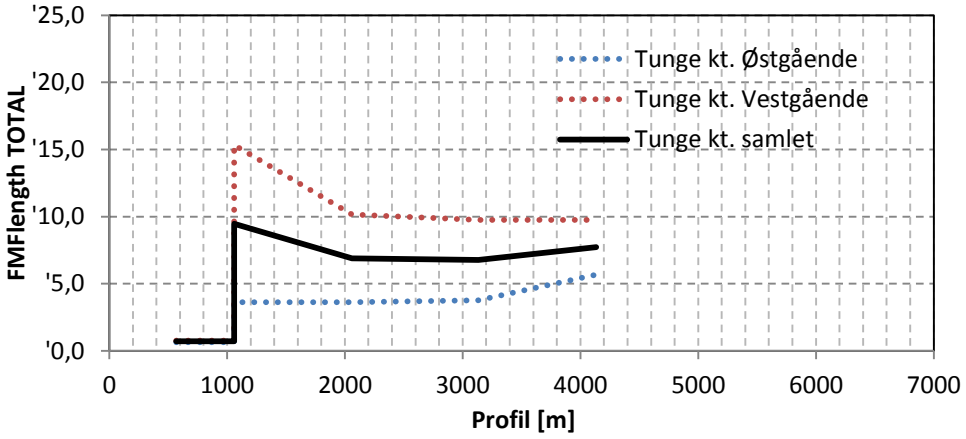
Figur 77 Stigningsgrader for Arm til Kvitsøy Positive gradienter er stigning mod Kvitsøy.



Figur 78 Momentan brannmodifikasjonsfaktor for tunge kjøretøy avhengig av kjørelengde (Fire Frequency Modification Factor, $FMF_{length}(x)$) anvendt for Arm til Kvitsøy.

Den samlede gradientavhengige brannmodifikasjonsfaktor for hele tunnelen er 2.70 for 15 % andel tungtrafikk. Hvis man ser på tungtrafikken alene er den samlede faktor for tunnelen 6.48.

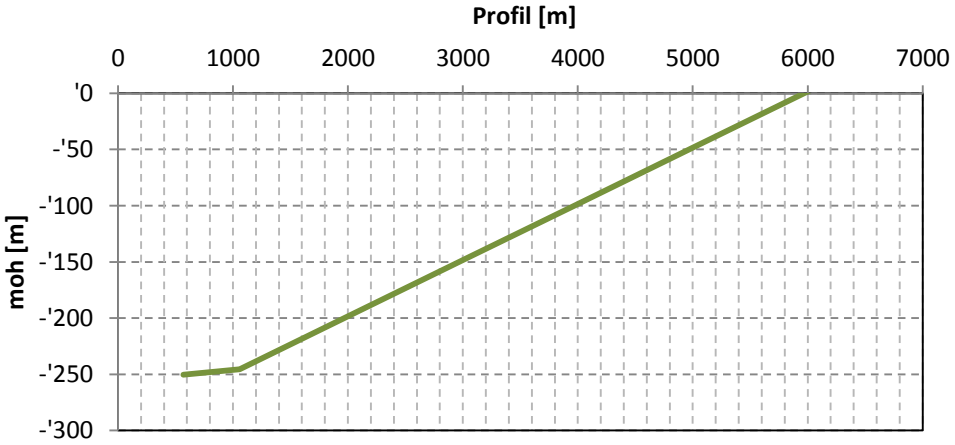
I forhold til modellen beskrevet i [72] svarer dette til en økning av brannfrekvensen med 26.8 %, (som stammer fra en økning av frekvensen av branner i tunge kjøretøy på 203 % (faktor 3.03).



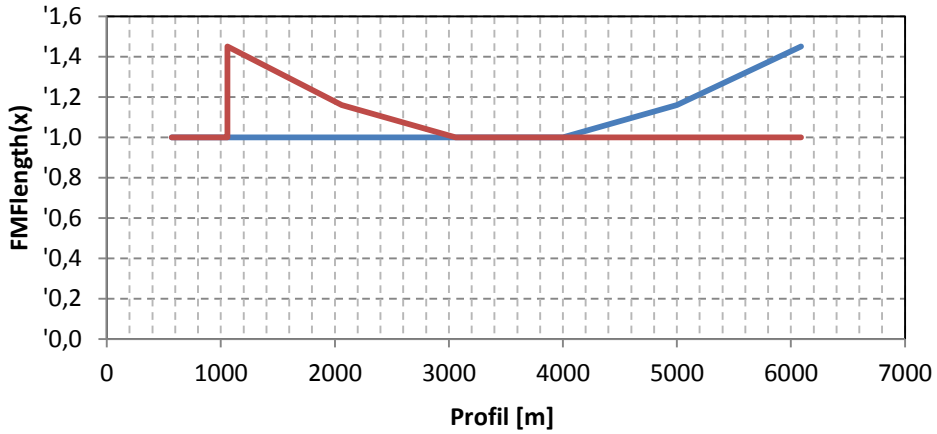
Figur 79 Samlet gradientavhengig brannmodifikasjonsfaktor for tunge kjøretøy langs lengdeprofilet for armen til Kvitsøy.

Arm til Kvitsøy med maksimalt 5 %

For den alternative utformning av armen til Kvitsøy kan det tilsvarende som ovenfor bestemmes hvilken betydning den 5.0 km lange 5 % stigning/fall har for brannfrekvensen i armen til Kvitsøy.



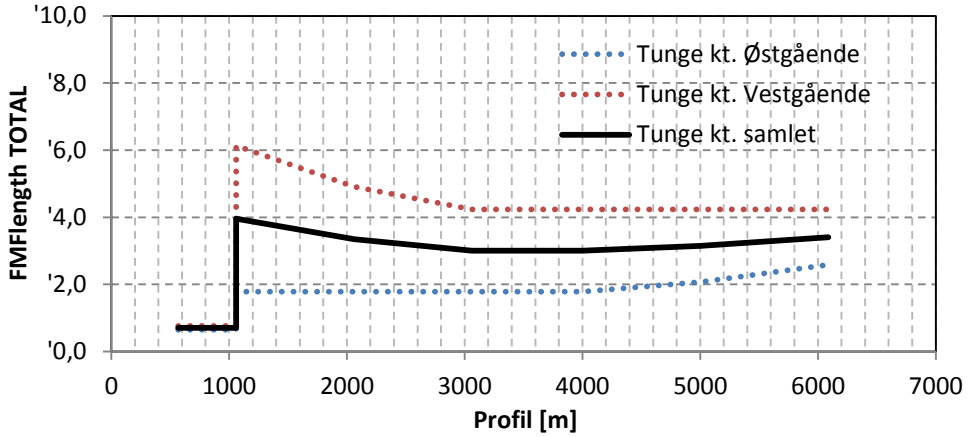
Figur 80 Forenklet lengdeprofil for Arm til Kvitsøy (5 % stigning)



Figur 81 Momentan brannmodifikasjonsfaktor for tunge kjøretøy avhengig av kjørelengde (Fire Frequency Modification Factor, FMFlength(x)) anvendt for Arm til Kvitsøy (5% stigning)

Den samlede gradientavhengige brannmodifikasjonsfaktor for hele tunnelen er 1.68 for 15 % andel tungtrafikk. Hvis man ser på tungtrafikken alene er den samlede faktor for tunnelen 3.01.

I forhold til modellen beskrevet i [72] svarer dette til en økning av brannfrekvensen med 10.4 %, (som stammer fra en økning av frekvensen av branner i tunge kjøretøy på 98 % (faktor 1.98).



Figur 82 Samlet gradientavhengig brannmodifikasjonsfaktor for tunge kjøretøy langs lengdeprofilet for armen til Kvitsøy.

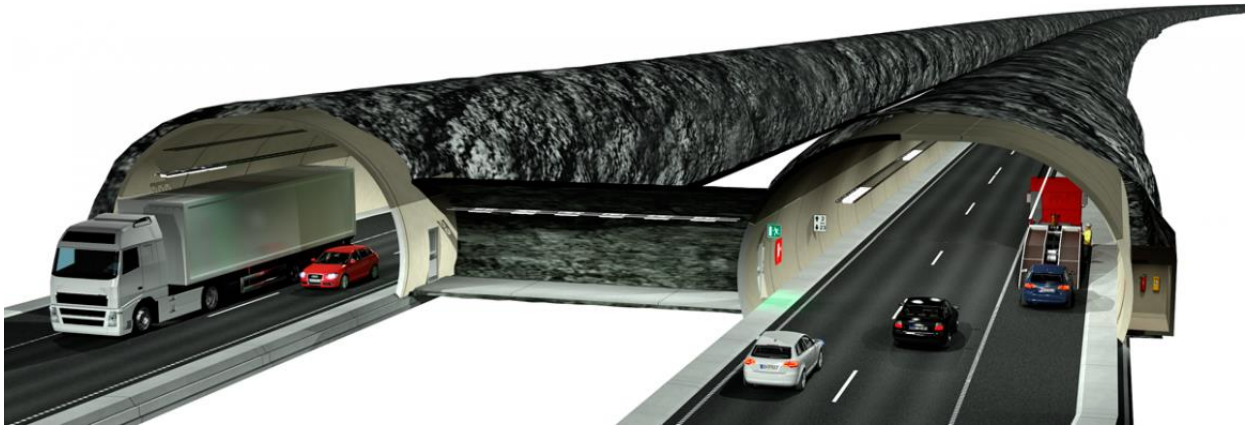
Vedlegg D: Gasstransport

På de etterfølgende sider gjengis rapporten "Gasstransport i tunnel – E39 Rogfast" utarbeidet av SP Fire Research.

Gasstransport i tunnel – E39 Rogfast

Andreas Gagnat Bøe, Kristian Hox

SP Fire Research AS



SPFR-rapport SPFR F20058-01

Gasstransport i tunnel – E39 Rogfast

VERSJON	DATO
[Manager]	2014-10-20

FORFATTERE
Andreas Gagnat Bøe, Kristian Hox

OPPDRAGSGIVERE	OPPGRADSGIVERS REF.
Statens vegvesen, COWI	Tor Geir Espedal, Vidar Østerbø

PROSJEKTNR.	ANTALLSIDER OG VEDLEGG:
20058	217 + 0 vedlegg

NØKKELORD:

LPG
Tunnel
Eksplosjon
Brann

SAMMENDRAG

Denne rapporten tar for seg mulige scenarioer og konsekvenser lekkasjer fra transport av LPG vil gi i E39 Rogfast tunnelen.

Rapporten konkluderer med at en lekkasje i et LPG-kjøretøy har et stort skadepotensiale, selv med en ventilasjonseffekt på 3,5 m/s.

UTARBEIDET AV	SIGNATUR
Andreas Gagnat Bøe	
KONTROLLERT AV	SIGNATUR
Ragnar Wighus	
GODKJENT AV	SIGNATUR
Are W. Brandt	

RAPPORTNR	GRADERING	GRADERING DENNE SIDE
SPFR F20058-01.	Fortrolig	Fortrolig

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
1	20.10.2014	Første versjon

Innholdsfortegnelse

Innholdsfortegnelse **3**

1 Innledning **4**

2 Bakgrunnsinformasjon **4**

2.1 Tunnelen 4

2.2 LPG 5

2.3 Aktuelle scenarioer 5

2.3.1 Eksplosjon 5

2.3.2 Brann 6

3 Vurdering **6**

3.1 Scenario 1a – Stort utslipp og vifter ikke slått på 8

3.2 Scenario 1b –Stort utslipp og vifter slått på etter 2 minutter 9

3.3 Scenario 2 – Mellomstore utslipp og vifter på 11

3.4 Scenario 3 – små utslipp 14

3.5 Scenario 4 – BLEVE 14

3.6 Helning 14

4 Diskusjon **14**

5 Konklusjon **15**

6 Referanser **15**

1 Innledning

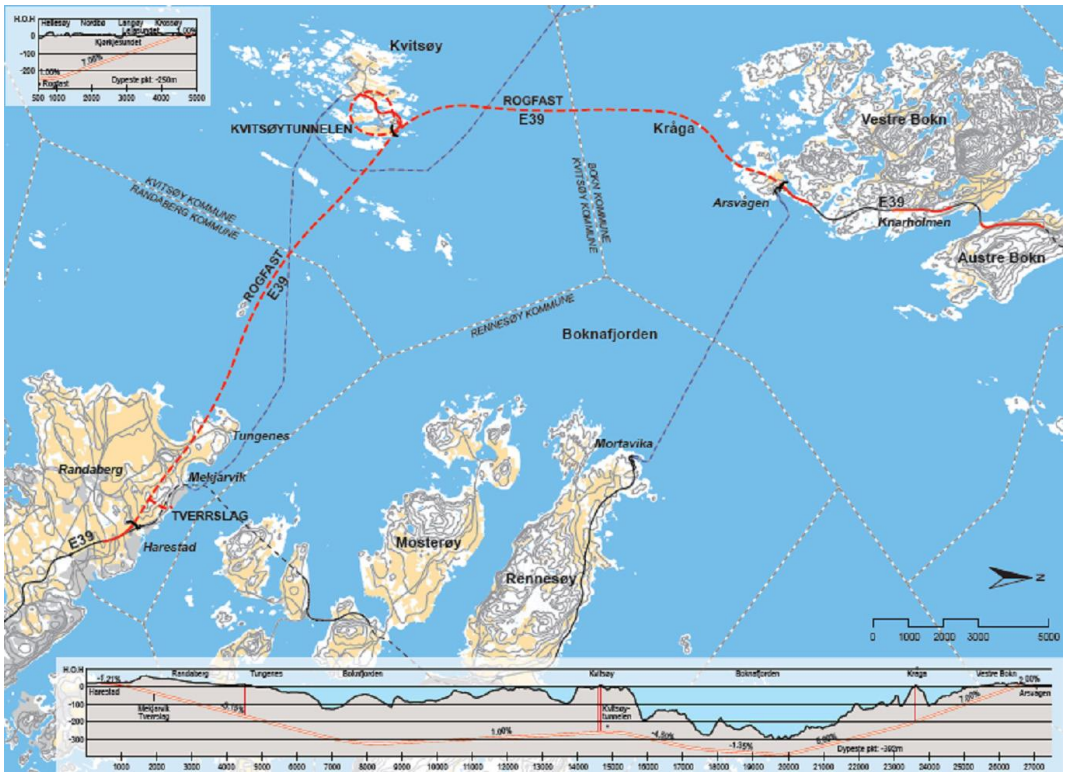
Grunnlaget for prosjektet ligger i Statens vegvesens håndbok *N500 Vegtunneler* [1]. Der står det følgende: *Alle vanlige tunneler med liten trafikk kan som regel holdes åpne for transport av farlig gods. For tunneler i bystrøk, undersjøiske tunneler og i lengre betongtunneler (senketunneler, tunneler direkte under bygninger etc.) bør det foretas særlige vurderinger. Gjennom slike analyser skal det foretas en beregning og sammenligning av risikoen for personskader og materielle skader ved kjøring gjennom tunnel og på alternativ rute.* Denne rapporten skal se på mulige konsekvenser som kan oppstå ved transport av stoffer som kan forårsake en eksplosjon.

Risiko med tanke på hvor ofte ulykker og lekkasjer av gass vil skje, og hvilken sannsynlighet som er akseptabel er ikke drøftet i denne rapporten. Rapporten presenterer ulike scenarioer basert på enkle modeller for spredning av gass i tunnel. Beregningene er bygget på flere antagelser og er en forenkling av virkeligheten. Dersom en mer omfattende analyse er ønsket, som blant annet inkluderer stigningen i tunnelen må dette skje via en omfattende CFD-simulering. Vi mener likevel at disse beregningene gir en god oversikt over hvilke situasjoner som kan oppstå og omfanget av disse.

2 Bakgrunnsinformasjon

2.1 Tunnelen

E39 Rogfast starter ved Harestad og går under Boknafjorden og ender opp i Arsvågen. Tunnelen er toløps og vil bli ca. 27 km lang og være på 390 meter under havet på det dypeste. I hovedtunnelen kommer det til å være ca. 5 % stigning opp mot endene. I tillegg skal det bli en avgreining med enkelt arm opp til Kvitsøy med en stigning på 7 %. En oversikt over tunnelen finnes i Figur 83 [2].



Figur 83 Rogfasttunnelens omfang og dybdeprofil. Bilde hentet fra [2].

Hovedtunnelen får to løp der hvert av løpene har tverrsnitt T10,5, dvs. et areal på 60,40 m^2. Ettersom det er en to-løps tunnel styres ventilasjonsretningen i samme retning som trafikken naturlig uten bruk av vifter ved normaldrift. I tillegg installeres det vifter for brannventilasjon som gir vindhastighet på 3,5 m/s. Det er planlagt 3 ventilasjonstårn med kapasitet på minst 300 m^3/s [2,3].

2.2 LPG

LPG eller *liquified petroleum gas* består hovedsakelig av propan (C_3H_8), men kan også inneholde små mengder av propylen, butan, iso-butan og metan. I Norge er det minimum 95% propan i LPG.

I Norge er LPG ensbetydende med 95% propan og 5% butan, fordi denne blandingen har kuldeegenskaper som gjør den godt egnet til bruk i vårt klima.

I de videre vurderingene er det derfor kun propan som blir vurdert. Ved normalt trykk og romtemperatur vil propan forekomme som gass. Propan er fargeløs og luktfri[8] og er 1,55 ganger så tung som luft. En propanlekkasje vil likevel være lett synlig fordi flytende propan fordamper momentant i luft (kokepunkt -42°C) og etterlater en tåkelignende gassky(vanndamp i luften kondenserer og blir til dråper). Propan kondenserer til væske ved 8 bar og 20 °C. Når flytende propan fordamper til gass, blir 1 liter væske til ca. 270 liter gass ved normalt trykk og temperatur. Propan er eksplosiv i luft når konsentrasjonen ligger mellom 2,1 – 9,5 vol. %. Nedre grense påvirkes lite av trykk, mens øvre grense utvides ved høyere trykk. Slike høye trykk inne i en tunnel vil imidlertid kun forekomme ved en eksplosjon. Brennbarhetsgrensene utvides ved en høyere temperatur, men temperaturen skal bli nokså høy før dette har noen stor innvirkning. Fordampingsvarmen er ca. 418kJ/kg (vann har 2500 kJ/kg).

Propan fraktes blant annet i store tankvogner som har en kapasitet på opptil 24 tonn. Dette tilsvarer ca. 13 000 m^3 propangass etter fordampning.

$$\left(24\,000\ kg\ (væske) \cdot 2\,\frac{liter\ (væske)}{kg\ (væske)} \cdot \frac{270\ liter(gass)}{1\ liter(væske)} \approx 13\,000\ m^3 gass\right)$$

2.3 Aktuelle scenarioer

2.3.1 Eksplosjon

En eksplosjon er en prosess som framtvinger en plutselig og kraftig trykkbølge, og kan inndeles i to underkategorier: *deflagrasjon* og *detonasjon*.

Deflagrasjon

En deflagrasjon er en forbrenning eller reaksjonsbølge som propagerer med en hastighet mindre enn lydhastigheten (340 m/s).

Detonasjon

Ved en detonasjon propagerer reaksjonsbølgen med en hastighet større enn lydhastigheten. På grunn av den svært raske reaksjonen, fører disse eksplosjonene til en svært kraftig trykkbølge som fører til omfattende interaksjoner med nærliggende objekter.

BLEVE (Boiling liquid expanding vapor explosion)

[8] Vanligvis tilsettes en liten mengde av luktestoffet etylmerkaptan, som gjør at propan kan luktes ved 0,25 vol. %.

En BLEVE er en eksplosjon som følge av at en beholder med brennbar væske og gass blir utsatt for en kraftig varmepåføring som får væsken til å koke. Dette gjør at trykket inne i tanken øker. Tanken er utstyrt med sikkerhetsventiler som avlaster det økte trykket. Etter hvert som væskenivået i tanken synker, vil veggene i tankene bli varmere og varmere som til slutt kan føre til at tanken revner med den konsekvens at store mengder gass og væske blir frigjort. Væsken vil bråkoke som fører til en effektiv blanding med luft etterfulgt av en kraftig eksplosjonsartet forbrenning i form av en kraftig ildkule.

2.3.2 Brann

Jetbrann

Trykksatt gass/væske som brenner der utslippet er. Om det er væske omtales det ofte som spraybrann.

Væskedamsbrann

Væske som samler seg i en dam og brenner. Om det er store arealer som brenner kan dette gi høye varmelaster.

3 Vurdering

En stor tankbil kan frakte med seg 24 tonn LPG, noe som tilsvarer ca. 13 000 m^3 propangass. Dersom man fordeler 13 000 m^3 propangass likt utover tunnelen (tverrsnitt 60 m^2) vil det dekke hele tunnelens volum over en distanse på ca. 215 meter. I dette tenkte eksemplet er konsentrasjonen 100 % propan. Dersom man tynner ut konsentrasjonen til nedre brennbarhetsgrense (2,1 %) dekker gassen over 10 km.[9] En propantank har med andre ord potensiale til å forårsake svært omfattende skader om all gassen eksploderer. Propan vil spre seg i tunnelen basert på fire prinsipper:

5. Volumekspansjon: Et ukontrollert utslipp fra en LPG tank vil i de fleste tilfeller innebære at flytende propan lekker ut. Som nevnt over vil en liter flytende propan fordampe til ca. 270 liter propangass. Dersom store mengder flytende propan lekker ut vil dette føre til en kraftig trykkøkning. Gasskyen vil da ekspandere mot områder med lavere trykk, og vil slik spre seg utover i tunnelen.

6. Diffusjon: Gass fra et område med høy konsentrasjon vil bevege seg mot et område med lavere konsentrasjon, og kan beskrives av Ficks' lov:

$$J = -D\frac{\Delta c}{\Delta x} \tag{1}$$

   Der J er diffusjonsfluksen, D er diffusjonskonstanten, c er konsentrasjonen av propan og x er posisjonen langs tunnelen. Jo større konsentrasjonsforskjeller, desto større blir forflytningen av gass.

7. Adveksjon: Gass forflyttes som følge av ventilasjonen.

[9] 1,26 kubikkmeter propangass per 1 meter tunnel tilsvarer en konsentrasjon som er lik nedre brennbarhetsgrense.

8. Tyngdekraften: Gasser tyngre enn luft vil bevege seg mot bakken og eventuelt nedover i tunnelen, mens gasser lettere enn luft vil bevege seg mot taket og oppover i tunnelen. Propan er tyngre enn luft og vil da trekke nedover i tunnelen.

Disse fire mekanismene vil være tilstede i ulik grad. Man kan se for seg flere scenarioer der betydningen av disse har ulik grad av involvering.

iii. Ventilasjon ikke igangsatt og få biler i tunnelen.

iv. Ventilasjon på maksimal effekt, 3,5 m/s.

I tilfelle *i* vil det være minimalt med trekk i tunnelen og gassen vil i første omgang spre seg hovedsakelig på grunn av volumekspansjon, etter hvert vil diffusjon og tyngdekraften spille en viktigere rolle. I tilfelle *ii* ved maksimal ventilasjon vil all luft blandes såpass godt og raskt at både diffusjon og tyngdekraften vil spille en minimal rolle. I hvor stor grad volumekspansjon bidrar kommer an på hvor store utslipp det er snakk om. Dette skal vi imidlertid se nærmere på i kapittel 3.1-3.3. Hvilke scenarioer som kan oppstå påvirkes hovedsakelig av to parametere: Utslippets størrelse og viftekapasiteten.

Utslippsrater

«Hvor store utslipp kan oppstå og hvilke parametere påvirker dette?»

Størrelsen på et gassutslipp bestemmes av flere faktorer, blant annet hullstørrelsen, trykket på tanken og høyden på hullet. Dersom hullet oppstår under væskenivået, vil utslippet være flytende propan som vil fordampe til gass idet det forlater tanken siden kokepunktet til propan er på -42 °C. Dersom hullet oppstår over væskenivået vil kun gass lekke ut. Det mest alvorlige tilfellet er hvis hullet oppstår under væskenivået. Utslippsraten for en slik situasjon kan da bestemmes av ligning (2):

$$Q = \rho_L A_h c_D \cdot \sqrt{\frac{2(P - P_A)}{\rho_L} + 2gh_L} \qquad (2)$$

Der Q utslippsrate kg/s, ρ_L er tettheten til flytende propan, A_H er arealet av hullet, c_D er en konstant (0,65), P er trykk i tanken, P_A er omgivelsestrykk, g er gravitasjonskonstanten og h_L er væskehøyden over hullet.

Dersom vi antar 8 bar trykk og et hull 1 meter under væskenivået får vi utslippsrater som angitt i Tabell 78.

Tabell 78 Utslippsrater i tunnel med T10,5 profil.

Areal på hull (cm^2)	4	10	25	50	100	150	200
Utslipp væske (kg/s)	7	17	43	86	171	257	343
Tilsvarer gassmengde (m^3/s)	3,7	9,3	23	46	93	139	185
Gassekspansjon (m/s)	0,03	0,08	0,19	0,4	0,8	1,2	1,5

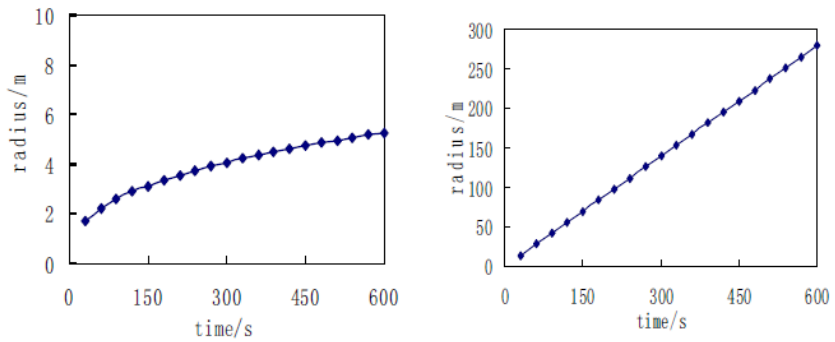
Som vist i tabellen kommer det fram at selv relativt små mengder væske resulterer i svært store mengder gass. For å understreke at slike store utslipp kan forekomme, kan det nevnes et eksempel fra Italia i 2009, der en LPG tank på et tog fikk en flenge på ca. 100 cm^2 (2cm x 43cm). Dette var en 45 tonns tank med 15 bar trykk (altså større enn hva man finner på veiene) og den ble tømt i løpet av 300 sekund, med en utslippsrate på over 320 kg/s flytende propan. Dette tilsvarer ca. 173 kubikkmeter med gass pr. sekund [5].

Gassekspansjon
Når væske fordamper til gass skjer det en kraftig volumøkning (270x) som fører til et kraftig overtrykk rundt utslippsstedet. Gasskyen vil på grunnlag av dette trekkes mot områder med lavere trykk og slik spre seg utover i begge retninger av tunnelen. Hastigheten på hvor raskt denne gasskyen ekspanderer kan man regne ut ved ligning (3).

$$Gassekspansjon\ (m/s) = \frac{Volum\ tilført\ (m^3/s)}{2 \cdot Tunneltverrsnitt\ (m^2)} \qquad (3)$$

Dette er en konservativ ligning fordi den antar at all væska fordamper til gass straks den forlater tanken. Dette er nok riktig for små utslipp, men ikke nødvendigvis riktig for større utslipp. For store utslipp vil en del av væska samles opp i en væskedam, som sprer seg utover samtidig som den fordamper.

Brannscenarioer
I tillegg til gassutslipp som kan gi eksplosjoner er det en mulighet at det oppstår en jetbrann eller en væskedamsbrann. For at det skal oppstå en væskedamsbrann krever det veldig store utslipp lavt på tanken og tidlig antennelse ettersom væsken vil fordampe forholdsvis raskt. En jetbrann vil være en flamme som står ut fra den trykksatte tanken. Det kan være en spraybrann om det er væske som blir presset ut eller en jetbrann om det er gass. En jetbrann kan også oppstå i etterkant av en eksplosjon om det fortsatt er gass/væske igjen i tanken. Disse scenarioene kan ha en stor lokal ødeleggelse i nærhet av tanken, tilsvarende andre store branner, men videre er det kun gassutslipp som kan gi eksplosjoner som blir behandlet videre i rapporten ettersom konsekvensene er langt større. Dette kommer klart fram i Figur 84.



Figur 84 **Dødelighetsradius for jetbrann (høyre) og eksplosjon(venstre). Figur hentet fra [4].**

3.1 Scenario 1a – Stort utslipp og vifter ikke slått på.

I Tabell 78 finner vi verdier for hastigheten på gassekspansjonen for ulike utslipp, og ved store utslipp forflytter denne gasskyen seg relativt raskt. Dersom vi antar et 100 cm^2 stort hull og at utslippsraten er konstant, vil tanken være tømt på litt over 2 minutter og gasskyen vil ekspandere med ca. 0,8 m/s i begge retninger. Dvs. at i løpet av denne perioden har gasskyen beveget seg i overkant av 100 meter i hver retning dersom man ikke tar hensyn til høydeforskjeller og ventilasjon. Det innebærer at hvis viftene ikke har blitt slått på umiddelbart risikerer man at en utstrekning på 215 meter er fullstendig fylt

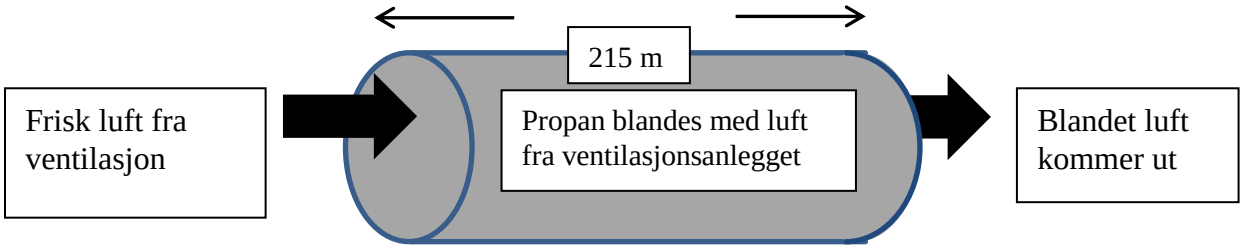
med propangass.[10] Denne gasskonsentrasjonen er imidlertid ikke eksplosiv, da den ligger langt over øvre brennbarhetsgrense. Men på endene av gasskyen vil det alltid være områder med lavere konsentrasjon og muligheten for deflagrasjon er tilstede.
I dette tenkte tilfellet skjer altså det mest kritiske med tanke på eksplosjon etter tanken er tømt, for da vil propanen blandes mer og mer med luft slik at det flere steder kan oppstå konsentrasjoner som ligger innenfor eksplosjonsgrensene. Etter at tanken er tømt og gasskyen har spredt seg utover pga. volumekspansjon vil andre mekanismer spille en viktigere rolle. Diffusjon og helling på tunnelen vil fra dette punktet bestemme hvordan gasskyen vil bevege seg. Uten CFD beregninger er det veldig vanskelig å forutsi nøyaktig hvordan ting vil utarte seg, men det er godt mulig at store gassmengder vil samles opp i de nedre delene av tunnelen siden propan er tyngre enn luft. Diffusjon vil uansett bidra til å fortynne propankonsentrasjonen, men dette er noe som vil ta lang tid. Dette vil føre til at det tar lang tid før hele tunnelen er sikker. Som vist tidligere har en 24 tonns propantank nok gass til at en distanse på ca. 10 km vil kunne ha eksplosiv luft-propan blanding om gassen fortynnes likt.

3.2 Scenario 1b –Stort utslipp og vifter slått på etter 2 minutter

Dersom viftene slås på etter at noen varsler eller det oppdages av veitrafikksentralen (VTS) ved hjelp av kameraer, er det ikke urimelig å anta at det kan ta minst 2 minutter før ventilasjonen virker med full effekt. Dersom man for enkelhets skyld antar at denne gasskyen blir værende som et 215 meter langt segment som skyves ut av tunnelen med en hastighet på 3,5 m/s tilsvarende ventilasjonshastigheten, vil det ta ca. 45 minutter å få ventilert ut all gassen, dersom vi antar at gassen må skyves maksimal lengde mellom utluftingstårn (ca. 9km).

$$tid = \frac{lengde\ (m)}{hastighet\ (m/s)} = \frac{9000\ m}{3{,}5\ m/s} = 2571\ s\ \approx 45\ min \qquad (4)$$

Dette er en veldig forenkling, for en stor del av luften vil blandes med propanen.
Dersom vi ser på et litt mer reelt eksempel, der en viss mengde frisk luft erstatter samme mengde blandet luft hvert sekund. Konsentrasjonen av gass i dette systemet kan beskrives ved en eksponentialfunksjon, gitt i ligning (5).

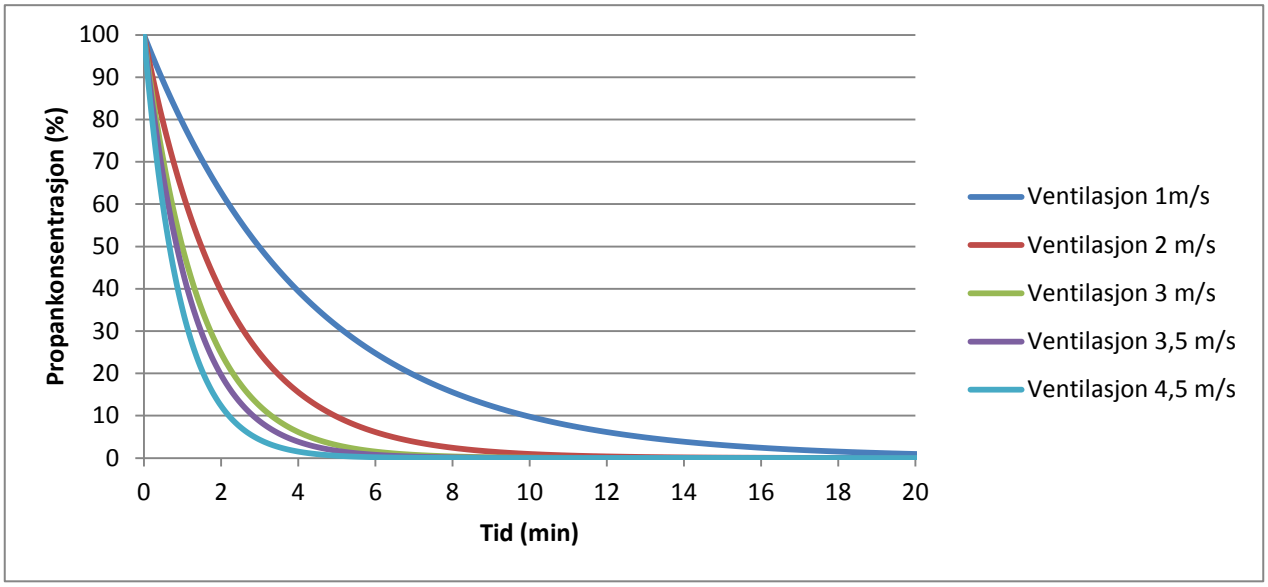


$$C(t) = C_0 e^{-\frac{Ft}{V}} \qquad (5)$$

Der $C(t)$ er konsentrasjonen etter tiden t, C_0 er startkonsentrasjonen, F[11] er ventilasjonen (m^3/s), t er tid og V er volumet vi ser på. Det er videre antatt at miksingen skjer umiddelbart slik at konsentrasjonsendringen skjer likt over hele volumet.

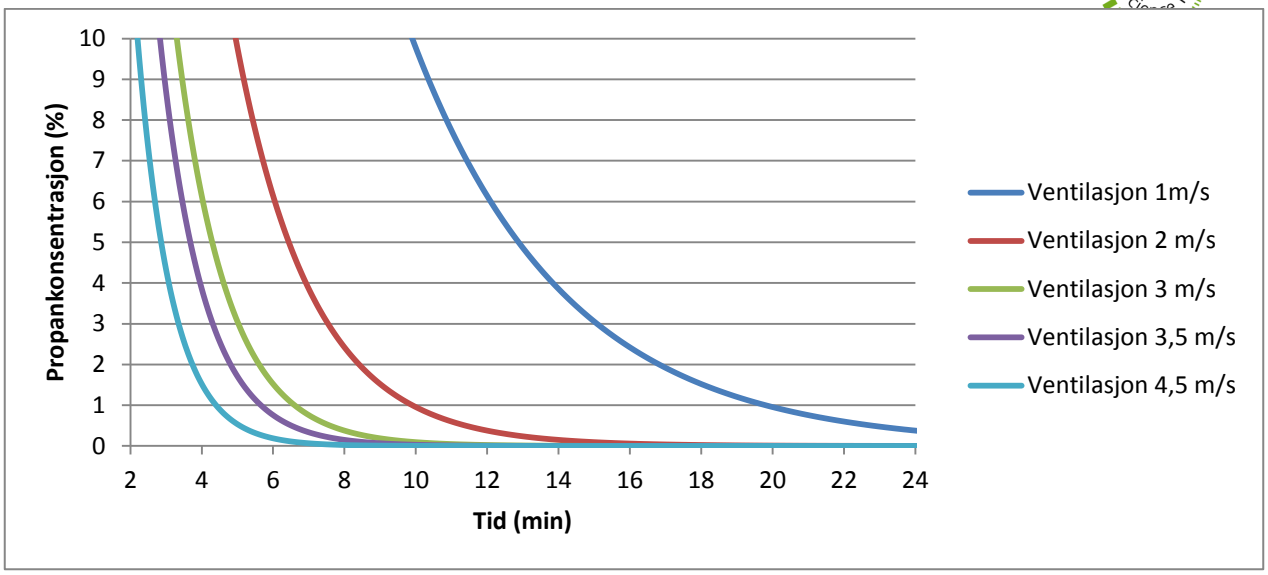
[10] Det er rasjonelt å anta at konsentrasjonen ikke er helt 100%, men at den ligger godt over 9,5% (nedre eksplosjonsgrense) er rimelig å anta.

Fra Figur 85 og Figur 86 ser en at selv med svært kraftig ventilasjon (3,5 m/s) tar det ca. 5 minutter før de nærmeste 215 meterne har en gasskonsentrasjon under nedre eksplosjonsgrense. For mindre kraftig ventilasjon (1 m/s) kan dette ta opp mot 17 minutt etter at viftene er skrudd på. Faren er imidlertid ikke over, for gasskyen har bare flyttet seg litt lenger nedover i tunnelen. Dette relativt enkle eksemplet viser at ved store utslippet vil det ta lang tid før hele tunnelen er trygg, selv med kraftig ventilasjon.



Figur 85 **Uttynning av propankonsentrasjonen for en 215 meter lang tunnelstrekning fylt med gass.**

[11] Ventilasjonsmengden F (m^3/s) bestemmes av vindhastigheten (m/s) og tverrsnitt på tunnelen (m^2).

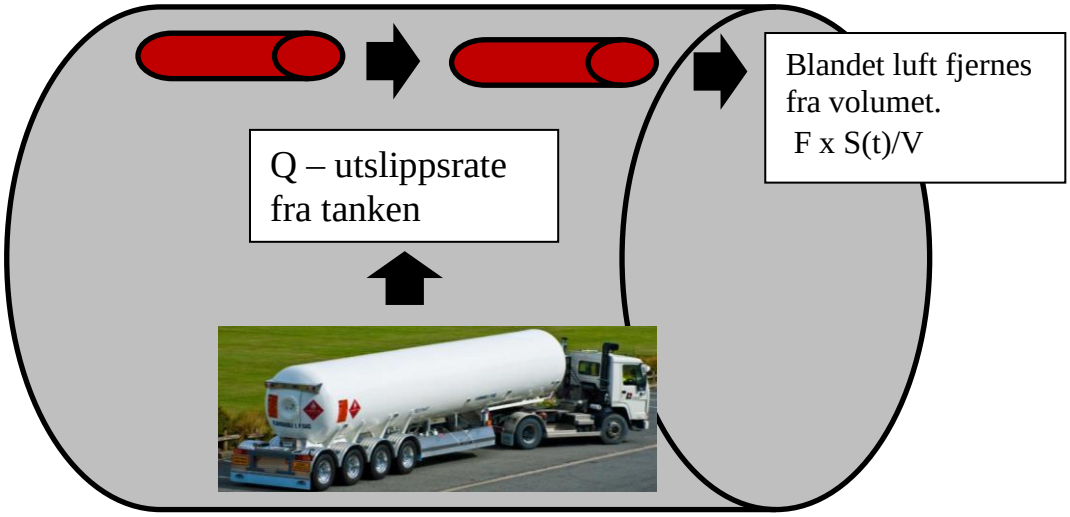


Figur 86 **Uttynning av propankonsentrasjonen for en 215 meter lang tunnelstrekning fylt med gass. Konsentrasjonen er her i det eksplosive området (2,1-9,5%).**

3.3 Scenario 2 – Mellomstore utslipp og vifter på

I dette eksemplet skal vi se på følgene av mellomstore utslipp, i størrelsesorden fra 1 m^3/s til 10 m^3/s (3,7 – 37 liter væske/s). Fra Tabell 78 ser en at for slike størrelsesordener har ikke gassekspansjon noe særlig betydning, og gasskyen vil dermed ikke bevege seg så mye fra utslippsstedet. Derfor ser vi bort ifra denne effekten for dette scenarioet, og kan dermed se på et mindre volum. I dette tilfellet vil ventilasjonen være hovedbidragsyter til uttynning av gasskyen.

Eksempel: *Q* er kontinuerlig gassutslipp fra en beholder [m^3/s], mens *F* er ventilasjon [m^3/s].Vi ser altså på et system der vi tilfører *Q* gass og bytter ut *F* mengde luft fra volumet *V*. I dette eksemplet ser vi bort ifra diffusjon og tyngdekraft.



Mengden gass, *S(t)*, i dette tunnelvolumet beskrives av ligningen under.

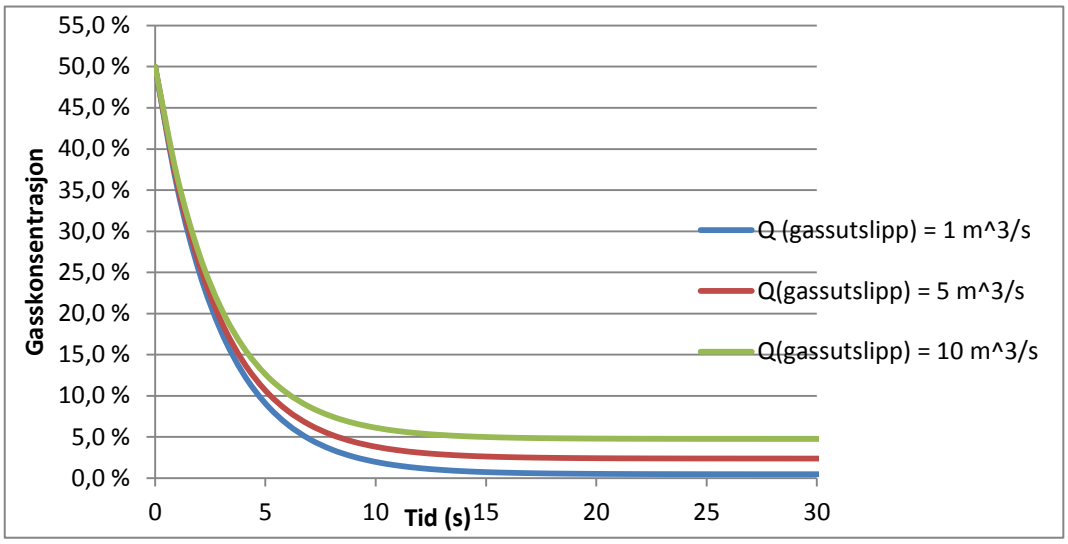
$$S(t) = \frac{QV}{F} + \left(S_0 - \frac{QV}{F}\right) \cdot e^{-\frac{Ft}{V}} \tag{6}$$

Konsentrasjonen av gassen i volumet blir da:

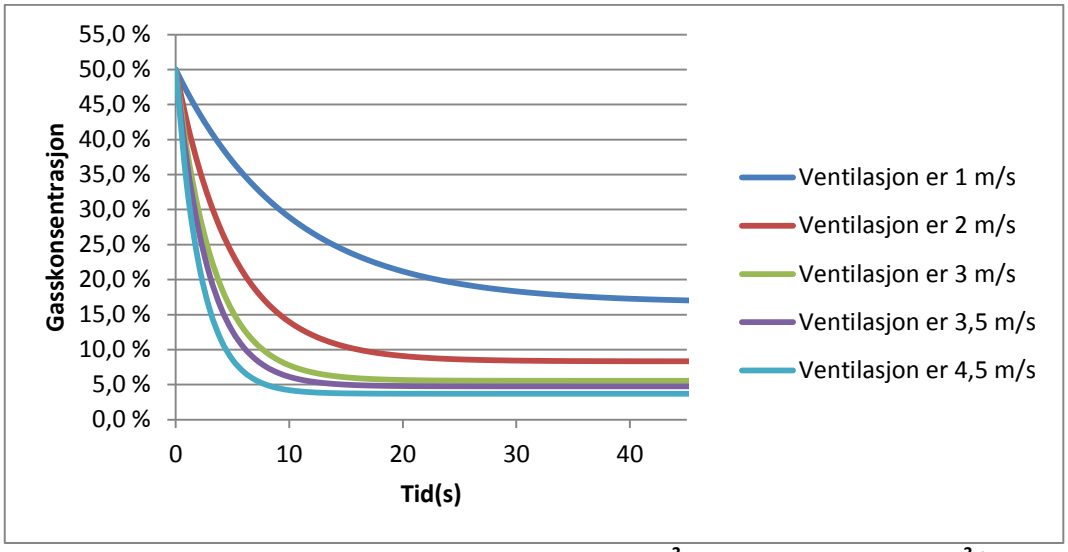
$$C(t) = \frac{S(t)}{V} = \frac{Q}{F} + \left(C_0 - \frac{Q}{F}\right) \cdot e^{-\frac{Ft}{V}} \tag{7}$$

Her er det antatt at viftene starter en liten stund etter gassutslippet slik at volumet *V* er fylt med en viss mengde gass S_0, slik at startkonsentrasjonen da blir C_0. Fra viftene starter (*t*=0) er både utslippsraten og ventilasjonen konstant og konsentrasjonen av gass er antatt uniform i hele volumet *V*.

Dersom utslippet ikke er så stort kan et slikt utslipp vare ganske lenge, og så lenge det både er et gassutslipp tilstede og ventilasjon er påskrudd vil det etter en viss tid innstille seg en likevekt. Likevekten bestemmes ut fra ligning (7) sine to ledd. Det første leddet $\frac{Q}{F}$ avgjør hvilken gasskonsentrasjon likevekten innstiller seg på, altså sluttkonsentrasjonen, mens det andre leddet $\left(C_0 - \frac{Q}{F}\right) \cdot e^{-\frac{Ft}{V}}$ avgjør hvor lang tid det tar før denne likevekten innstiller seg. I Figur 87 og Figur 88 er det en framstilling som viser effekten av ulike verdier av *Q* (gassutslipp) og *F* (ventilasjon), og man ser at likevekten innstiller seg svært raskt etter at ventilasjonen er skrudd på.



Figur 87 **Gasskonsentrasjon i et volum på 600 m^3 og ventilasjonen *F* er lik 210 m^3/s som tilsvarer 3,5 m/s i en tunnel med T10,5 profil med varierende gassutslipp *Q*.**



Figur 88 **Gasskonsentrasjon i et volum på 600 m^3 og gassutslipp på 10 m^3/s med varierende ventilasjonshastighet i en tunnel med T10,5 profil.**

Fra Figur 88 ser man at styrken på ventilasjonen har en stor betydning for hvilken likevekt systemet innstiller seg på. Dette kommer også tydelig fram fra Tabell 79 der likevektskonsentrasjonen for ulike *Q* og *F* er gjengitt. 210 m^3/s tilsvarer ca. 3,5 m/s ventilasjon gjennom et 60 m^2 tverrsnitt tunnelløp, som er antatt til å være maksimal effekt på viftene. Her kommer det tydelig fram at også mellomstore utslipp kan resultere i en eksplosiv gassblanding, selv om viftene blåser med maksimal effekt. Denne likevekten vil holde seg stabil så lenge det er et kontinuerlig utslipp fra tanken. Først når lekkasjen er tettet eller tanken er tom vil gasskonsentrasjonen kunne fortynnes videre.

Tabell 79 **Likevektskonsentrasjon av gass med hensyn på ventilasjon og gassutslipp i tunnel med T10,5 profil**

F (ventilasjon)		Q (gassutslipp m^3/s)				
m/s	m^3/s	1	2	4,5	7	10
1,0	60	1,7 %	3,3 %	7,5 %	11,7 %	16,7 %
2,0	120	0,8 %	1,7 %	3,8 %	5,8 %	8,3 %
3,0	180	0,6 %	1,1 %	2,5 %	3,9 %	5,6 %
3,5	210	0,5 %	1,0 %	2,1 %	3,3 %	4,8 %
4,5	270	0,4 %	0,7 %	1,7 %	2,6 %	3,7 %
10,0	600	0,2 %	0,3 %	0,8 %	1,2 %	1,7 %

Som vist tidligere er det potensielt opptil 13 000 m^3 gass i de største beholderne. Det betyr at et utslipp på 4,5 m^3/s vil vare i ca. 45 minutt. 4,5 m^3/s gass tilsvarer et utslipp på ca. 16,5 liter flytende propan per sekund. Fra Figur 87 ser vi at tiden før en likevekt innstiller seg like i nærheten av tanken går svært fort siden volumet er så lite. Resten av tunnelen vil også oppnå denne likevekten dersom utslippet varer lenge nok, og som eksemplet over viser vil det ta ca. 45 minutter før tanken er tom. Dersom det er 9 km til neste ventilasjonstårn, betyr det at etter 45 minutter er fortsatt all gassen som er sluppet ut

fortsatt i tunnelen. Dette fordi den første gassblandingen som ble fanget opp av ventilasjonen bruker ca. 45minutter på å nå fram til første ventilasjonstårn. Dette betyr at store deler av tunnelen vil ha en konsentrasjon i nærheten av likevektskonsentrasjonen.

På grunn av tunnelens utforming, med mye bratt stigning, er det svært sannsynlig at det i enkelte områder kan samle seg opp mer gass enn i andre områder slik at det flere steder i tunnelen kan være gasskonsentrasjoner som er eksplosive. Nøyaktig hvordan gassen vil oppføre seg ved slike stigninger er svært vanskelig å forutsi basert på enkle regneoperasjoner.

3.4 Scenario 3 – små utslipp.

Fra Tabell 79 ser en at utslipp mindre enn 4,5 m^3/s vil resultere i en likevektskonsentrasjon som ligger nedenfor nedre brennbarhetsgrenser dersom ventilasjonen er 3,5 m/s eller høyere. Dersom ventilasjonen av en eller annen grunn ikke skulle fungere, er selv små utslipp kritiske. Små utslipp vil spre seg utover via diffusjon, en prosess som skjer langsomt. Dette gjør at konsentrasjonen rundt utslippsstedet har tid til å bygge seg opp, slik at konsentrasjonen for et visst område vil ligge innenfor eksplosjonsgrensene.

3.5 Scenario 4 – BLEVE

En BLEVE er nok det mest dramatiske som kan skje inne i en tunnel, og helt klart det scenarioet som vil gi mest alvorlige konsekvenser. For at dette skal kunne skje, må man få en kraftig oppvarming av tanken over en lengre periode. En slik oppvarming kan kunne komme fra en kraftig brann like i nærheten av tanken. I en tunnel kan en slik situasjon teoretisk oppstå dersom et LPG-kjøretøy kolliderer med et kjøretøy som resulterer i en brann, enten i LPG kjøretøyet eller i det andre. Det er svært sjelden slike tilfeller skjer, men det har likevel skjedd nok ganger til at en ikke skal avskrive slike hendelser fullstendig. Slike hendelser er mer sannsynlig i tunneler med trafikk i to retninger, enn med kun én retning, som er tilfelle her.

3.6 Helning

E39 Rogfast tunnelen kommer til å bli verdens lengste og dypeste undersjøiske tunnel når den står ferdig. Den kommer til å ha en W-form med bratte helninger på ca. 5 % ned fra hver side. Scenarioene beskrevet over tar utgangspunkt i flate tunneler da det finnes veldig lite tidligere arbeid som har tatt for seg dype tunneler. Dype tunneler kan føre til at propangass som er tyngre enn luft blir drevet av tyngdekraften nedover i tunnelen. CFD-modeller kan gi bedre bilder på fordelingen av gass og ta med usikkerhetsmomenter som helning på en bedre måte. Utgangspunktet i denne rapporten er at helning ikke vil gjøre situasjonen noe bedre i noen av de scenarioene beskrevet i denne rapporten.

4 Diskusjon

Av de scenarioene vi har gått igjennom ser vi at en lekkasje fra et LPG-kjøretøy i en tunnel kan få alvorlige konsekvenser dersom det finnes en tennkilde i tunnelen. I verst tenkelige tilfelle kan man få en situasjon der 10 km av tunnelen har en eksplosiv propan-luft blanding. Det sier seg selv at tunnelen kan få omfattende skader dersom gassen da antennes.

Vi har sett at selv med maksimal effekt på ventilasjonen er det fullt mulig at det kan oppstå kritiske tilfeller. Dersom ventilasjonen fungerer slik den skal (3,5 m/s), som er det mest sannsynlige, vil gassutslipp over 4,5 m^3/s med stor sannsynlighet resultere i at store deler av tunnelen vil ha propankonsentrasjoner som ligger innenfor eksplosjonsområdet. Det vil også kunne ta lang tid (flere timer) med utlufting før tunnelen er trygg dersom utslippet skjer langt fra et utluftingstårn.

Likevektskonsentrasjonen for et utslipp mindre enn 4,5 m^3/s ved 3,5 m/s ventilasjon vil etter vår enkle modell ikke komme over nedre brennbarhetsgrenser. Det er imidlertid viktig å være klar over at denne modellen ikke tar hensyn til stigning i tunnelen. Det er usikkert hvor mye disse lange stigningene vil påvirke utluftingen av et eventuelt utslipp. Det er ikke utenkelig at en større mengde propan vil bli fanget i nedre del av tunnelen, men det blir bare spekulasjoner. Dersom mer innsikt i denne problemstillingen ønskes, anbefaler vi å få gjort en omfattende CFD-simulering som tar høyde for alle faktorer som ikke er tatt hensyn til her.

Dersom ventilasjonen av en eller annen grunn ikke skulle fungere idet det skjer et utslipp er dette kritisk uavhengig av hvor lite det er.

5 Konklusjon

Vår konklusjon er at en lekkasje i et LPG-kjøretøy har et stort skadepotensiale, selv med en ventilasjonseffekt på 3,5 m/s.

6 Referanser

1. Håndbok N500 Vegtunneler. Staten vegvesen; 2014.

2. Hokstad PR, Mostue BA, Jenssen GD, Foss T, Høj NP, Boye C, et al. SINTEF F26316 E-39 Rogfast. Revidert ROS Analyse, tunnel. 2014 Sep.

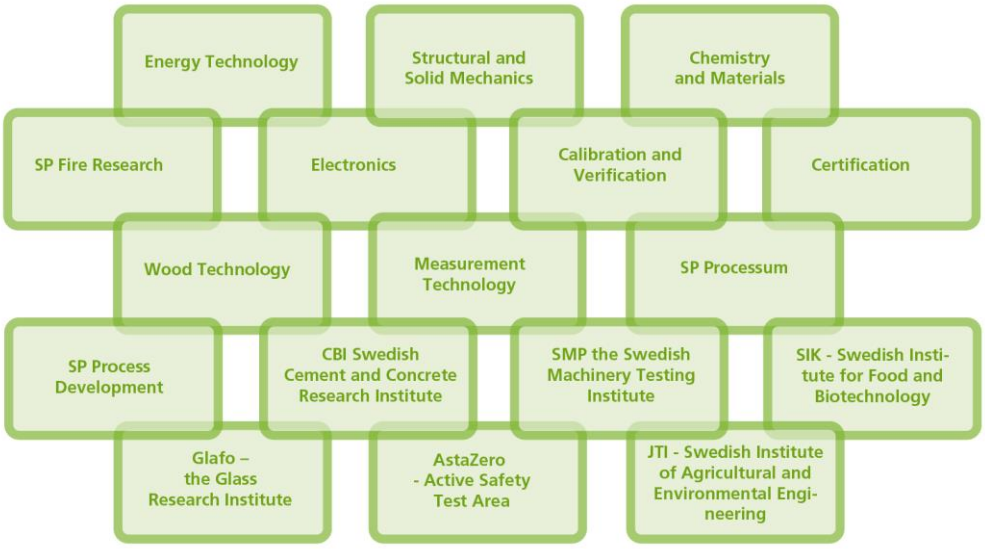
3. Østerbø V. E39 Rogfast epost korrespondanse. 2014.

4. Zhang Y, He C, Fang Y, Sun X. Study on quantitative risk assessment of LPG transportation in road tunnel. Adv Mater Res. 2011;255-260:4105–9.

5. Brambilla S, Totaro R, Manca D. Simulation of the LPG release, dispersion, and explosion in Viareggio railway accident. Milano, Italy: Politecnico di Milano;

SP Technical Research Institute of Sweden

Our work is concentrated on innovation and the development of value-adding technology. Using Sweden's most extensive and advanced resources for technical evaluation, measurement technology, research and development, we make an important contribution to the competitiveness and sustainable development of industry. Research is carried out in close conjunction with universities and institutes of technology, to the benefit of a customer base of about 10000 organisations, ranging from start-up companies developing new technologies or new ideas to international groups.



SPFR-rapport SPFR F20058-01
ISBN