



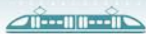
Transportøkonomisk institutt  
Stiftelsen Norsk senter for samferdselsforskning



# Risiko for brann i tunge kjøretøy i vegtunneler med høy stigning

Tor-Olav Nævestad, Alena Katharina Høye, Jenny Blom,  
Lars Even Egner

2017/2024



Tittel:	Risiko for brann i tunge kjøretøy i vegtunneler med høy stigning
Tittel engelsk:	Fire risk of heavy vehicles in high gradient road tunnels
Forfatter:	Tor-Olav Nævestad, Alena Katharina Høye, Jenny Blom, Lars Even Egner
Dato:	03.2024
TØI-rapport:	2017/2024
Antall sider:	72
ISSN elektronisk:	2535-5104
ISBN elektronisk:	978-82-480-1533-8
Finansieringskilder:	Statens vegvesen
TØIs p.nr.:	5377 – Vegtunnelbrann
Prosjektleder:	Tor-Olav Nævestad
Kvalitetsansvarlig:	Rune Elvik
Fagfelt:	Sikkerhet og resiliens
Emneord:	Vegtunneler, brann, tunge kjøretøy

## Kort sammendrag

Rapporten undersøker sammenhengen mellom høy stigningsgrad i vegtunneler og risiko for brann i tunge kjøretøy. Våre analyser viser at brannrisikoen øker mest fra en stigning på 7 prosent, og vi betrakter en maksimal stigning på 7 prosent som et «knekkpunkt». Lavere stigningsgrader medfører imidlertid også økt brannrisiko. Også lengden på bratte stigninger har sammenheng med brannrisikoen. Jo lengre en bratt stigning er, desto flere branner er det i tunnelen. Dette gjelder både for stigninger fra 5 prosent og særlig for stigninger fra 7 prosent. Undersjøiske vegtunneler har høyere risiko for kjøretøybrann enn andre tunneler. Det kan i hovedsak forklares med at de har lange og bratte stigninger, og den kraftige økningen av brannrisikoen fra 7 prosent kan forklares med at de fleste undersjøiske tunneler har stigninger som er både lange og over 7 prosent. Årsaken til brann i tunge kjøretøy i lange og bratte tunneler er først og fremst tekniske problemer (overopphetet motor). Mangelfullt vedlikehold er gjerne en underliggende årsak. Det mest relevante tiltaket for å forebygge branner i tungbiler i norske vegtunneler er at man ikke bygger lange og bratte vegtunneler, der det kan unngås. De andre mest relevante tiltakene som vi identifiserer i studien er teknologi for automatisk slukking av brann i motorrom, vedlikehold av kjøretøy, teknisk kontroll av kjøretøy, termoportaler og samvirkende ITS.

## Summary

The report examines the relationship between high gradients in road tunnels and the risk of fire in heavy vehicles. Our analyses show that the fire risk increases most from a gradient of 7 per cent, and we regard a maximum gradient of 7 per cent as a "breaking point". The length of high gradient distances is also related to the fire risk. The longer distances with a high gradient, the more fires there are in the tunnel. This applies both to gradients from 5 per cent and especially to gradients from 7 per cent. Subsea road tunnels have a higher risk of vehicle fires than other tunnels. This can mainly be explained by the fact that they have long and steep gradients. The cause of heavy vehicle fires in long and steep tunnels is primarily technical problems (overheated engine). Insufficient vehicle maintenance is often an underlying cause. The most relevant measure to prevent fires in heavy vehicles in Norwegian road tunnels is to not build long and steep road tunnels, whenever it can be avoided. The other most relevant measures that we identify in the study seem to be technology for automatically extinguishing fires in engine compartments, vehicle maintenance, technical inspections of vehicles, thermo portals and cooperative ITS.

Transportøkonomisk institutt (TØI) har opphavsrett til hele rapporten og dens enkelte deler. Innholdet kan brukes som underlagsmateriale. Når rapporten siteres eller omtales, skal TØI oppgis som kilde med navn og rapportnummer. Rapporten kan ikke endres. Ved eventuell annen bruk må forhåndssamtykke fra TØI innhentes. For øvrig gjelder [Åndsverklovens](#) bestemmelser.



# Forord

Den foreliggende rapporten om tunge kjøretøys brannrisiko i vegtunneler med høy stigning er finansiert av Statens vegvesen. Kontaktperson hos Statens vegvesen, Vegdirektoratet har vært Sverre Kjetil Rød. Vi er takknemlige for god bistand og interessante diskusjoner, blant annet i et seminar om kjøretøybranner i vegtunneler, arrangert av Statens vegvesen 11.10.2023.

Rapporten bygger videre på to tidligere rapporter som er finansiert av Statens vegvesen. Høye mfl. (2019) utviklet statistiske modeller for vegtunneler i Norge for å beregne «normale» (forventede) antall kjøretøybranner, trafikkulykker og antall havarier i norske vegtunneler, som en funksjon av en rekke tunnelegenskaper (bl.a. trafikkmengde, lengde, antall løp, fartsgrense og stigninger). Modellene til Høye mfl. (2019) var basert på data om kjøretøybranner i perioden 2008-2015. Nævestad og Blom (2023) oppdaterte dataene om kjøretøybranner i norske vegtunneler med seks år. I denne studien oppdaterer vi Høye mfls (2019) modeller, basert på data for hele perioden 2008-2021, med spesielt fokus på tunge kjøretøy i tunneler med høy stigning. Dette gir et enda bedre statistisk grunnlag for å vurdere sammenhenger.

Studien er også basert på intervjuer med 23 personer fra inn- og utland som, på ulike måter, er eksperter på kjøretøybranner i vegtunneler. Vi har intervjuet personer fra bransjeorganisasjoner, tungbilsjåførere, tungbilforsikring, ulykkesgranskning, brannvesen, Statens vegvesen, lastebilprodusenter, lastebilmekanikere, personer involvert i tungbilopplæring, og personer som er eksperter på analyse og tiltak i Europeiske tunneler som har hatt sterkt fokus på brannforebygging (St. Gotthart, Tauern, San Bernadino, Mont Blanc). Vi er svært takknemlige for alle som har latt seg intervjuet av oss i prosjektet.

Forskningsleder Tor-Olav Nævestad har vært prosjektleder og har skrevet rapporten, sammen med seniorforsker Alena Høye, forsker Jenny Blom og forsker Lars Egner. Høye har gjennomført og rapportert modellberegningene, Blom har gjennomført og rapportert intervjuer, mens Egner har gjennomført og rapportert imputeringene. Seniorforsker Rune Elvik har vært ansvarlig for kvalitets sikringen av den endelige rapporten, og administrasjonskonsulent Trude Kvalsvik har tilrettelagt rapporten for publisering.

Oslo, mars 2024  
Transportøkonomisk institutt

Bjørne Grimsrud  
Administrerende direktør

Trine Dale  
Avdelingsleder





# Innhold

## Sammendrag

### Summary

<b>1</b>	<b>Innledning.....</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrunn .....	1
1.2	Målene med studien .....	2
1.3	Tidligere forskning .....	2
<b>2</b>	<b>Metode.....</b>	<b>5</b>
2.1	Litteraturstudie .....	5
2.2	Modeller for å beregne normale antall branner.....	6
2.3	Kvalitative intervjuer.....	10
2.4	Årsaksimputering .....	11
<b>3</b>	<b>Del 1: Årsakssammenhenger .....</b>	<b>13</b>
3.1	Terskelverdier for stigning .....	13
3.2	Hva forklarer tungbilbranner i vegtunneler hvor årsaken er kategorisert som «uklar»?....	19
3.3	Hva forklarer antallet branner og tilløp i de fire mest brannutsatte undersjøiske tunnelene i 2008-2021?.....	22
<b>4</b>	<b>Del 2: Kompenserende tiltak.....</b>	<b>28</b>
4.1	Tiltak basert på analysene av risiko: Unngå å bygge lange og bratte tunneler .....	28
4.2	Tiltak basert på erfaringer fra fjelltunneler i alpeland.....	28
4.3	Nye tiltak som adresserer brannrisikomekanismer .....	32
4.4	Tiltak for å forebygge trafikkulykker som kan føre til brann .....	35
<b>5</b>	<b>Del 3: Utviklingstrekk .....</b>	<b>36</b>
5.1	Risiko for tungbilbranner i vegtunneler over tid.....	36
5.2	Endringer i risikopåvirkende faktorer over tid.....	38
5.3	Faktorer som kan påvirke risikoen for brann i fremtiden.....	40
<b>6</b>	<b>Oppsummering og diskusjon.....</b>	<b>45</b>
6.1	Hva forklarer endringer over tid? .....	45
6.2	Terskelverdier for stigning .....	45
6.3	Hvordan skal vi tolke resultatene? .....	45
6.4	Ni av ti kjøretøybranner i tunneler skyldes tekniske problemer .....	47
6.5	Tekniske problemer handler primært om motor .....	48
6.6	Brannutsatte undersjøiske vegtunneler har lange strekninger med høy stigningsgrad.....	48
6.7	Hvilke nye tiltak for å forebygge brannrisiko er mest relevante i en norsk kontekst? .....	49
6.8	Hva trenger vi mer kunnskap om? .....	50
<b>7</b>	<b>Konklusjon .....</b>	<b>53</b>
	<b>Referanser .....</b>	<b>54</b>



<b>Vedlegg.....</b>	<b>57</b>
Vedlegg 1. Brannmodeller: Deskriptiv statistikk og modellene .....	57
Vedlegg 2. Sammenheng mellom stigninger og branner: Detaljerte resultater og modellberegninger 2019 vs. 2023 .....	62
Vedlegg 3. Brannmodeller Høye mfl. (2019) vs. Njå mfl. (2022).....	65
Vedlegg 4. Tiltak i brannutsatte tunneler.....	66
Vedlegg 5. Intervjuguide .....	71

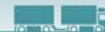
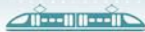
# Risiko for brann i tunge kjøretøy i vegtunneler med høy stigning

TØI rapport 2017/2024 • Forfattere: Tor-Olav Nævestad, Alena Katharina Høye, Jenny Blom, Lars Even Egner  
• Oslo 2024 • 72 sider

Rapporten undersøker sammenhengen mellom høy stigningsgrad i vegtunneler og risiko for brann i tunge kjøretøy. Det er særlig undersjøiske tunneler som har lange og bratte stigninger. Våre analyser viser at brannrisikoen i vegtunneler øker mest fra en stigning på 7 prosent, og vi betrakter en maksimal stigning på 7 prosent som et «knekkpunkt». Lavere stigningsgrader medfører imidlertid også økt brannrisiko. Også lengden på bratte stigninger har sammenheng med brannrisikoen. Jo lengre en bratt stigning er, desto flere branner er det i tunnelen. Dette gjelder både for stigninger fra 5 prosent og for stigninger fra 7 prosent. Lengde-effekten er imidlertid betydelig større for lengden på stigninger over 7 prosent. Undersjøiske vegtunneler har høyere risiko for kjøretøybrann enn andre tunneler. Det kan i hovedsak forklares med at de har lange og bratte stigninger, og den kraftige økningen av brannrisikoen fra 7 prosent kan forklares med at de fleste undersjøiske tunneler har stigninger som er både lange og over 7 prosent. De fire mest brannutsatte har nesten 5500 meter i gjennomsnitt med stigning over 7%. Det gjelder Oslofjordtunnelen, Eiksundtunnelen, Bømlafjordtunnelen og Byfjordtunnelen. Årsaken til tungbilbranner i lange og bratte tunneler er først og fremst tekniske problemer. Motoren blir svært varm når man bruker retarder nedover, og enda varmere når man kjører oppover. Retarder er et uavhengig bremsesystem, som betjenes med en hendel ved rattet, som bremser motoren nedover. Mangelfullt vedlikehold på tunge kjøretøy er gjerne en underliggende årsak til brannutvikling. Vi diskuterer ulike tiltak for å redusere risiko for brann, blant annet basert på erfaringer med tiltak i tunneler i alpeland. Vi diskuterer også hvordan nye drivstofftyper og energibærere de neste 10-20 årene kan påvirke risikoen for brann og konsekvensene av brann. Det mest relevante tiltaket for å forebygge branner i tungbiler i norske vegtunneler er at man ikke bygger lange og bratte vegtunneler, der det kan unngås. De andre mest relevante tiltakene som vi identifiserer i studien er teknologi for automatisk slukking av brann i motorrom, vedlikehold av kjøretøy, teknisk kontroll av kjøretøy, termportaler og samvirkende ITS.

## Bakgrunn

Norge er blant de landene i verden som bygger flest vegtunneler. Det er godt over 1250 vegtunneler i Norge. I et trafiksikkerhetsperspektiv kan det nevnes at vegtunneler vanligvis er minst like sikre som, eller sikrere enn, tilsvarende vegstrekninger i fri luft uten vegkryss, avkjørsler eller gang- og sykkeltrafikk. Vegtunneler fortjener likevel spesiell oppmerksomhet



fra et trafikkikkerhets- og beredskapsperspektiv, spesielt på grunn av katastrofepotensialet ved brann.

Selv om risikoen for trafikkulykker er lavere i vegtunneler enn en tilsvarende veg i dagen, er katastrofepotensialet knyttet til brann høyere. Kjøretøybrannene med katastrofepotensial i vegtunneler er gjerne knyttet til tunge kjøretøy, som ofte har drivstoff og last som kan gi grunnlag for betydelig varme- og røykutvikling. Det gjelder særlig i tunneler med høy stigningsgrad (>5%), som først og fremst er undersjøiske. Vegtunnelene med høy stigningsgrad utgjør til sammen omtrent 5% av vegtunnelene. Disse hadde 38% av brannene og tilløpene i perioden 2008-2021. Gitt tunge kjøretøys brannrisiko i vegtunneler med høy stigningsgrad, er det viktig å få kunnskap som kan brukes for å utvikle effektive tiltak for å redusere risiko for kjøretøybranner. Med tunge kjøretøy mener vi store lastebiler (dvs. over 7,5 tonn).

## Mål

Denne studien har som mål å kartlegge:

- 1) Årsakssammenhenger mellom stigning i tunneler og tungbilbranner.
- 2) Tiltak i og ved tunnelene, som kan kompensere for risikoen som er knyttet til høy stigningsgrad i tunneler, og hvilken effekt man kan forvente av tiltakene.
- 3) Endringer i løpet av perioden 2008-2021, som kan ha påvirket risikoen for tungbilbranner i tunneler med høy stigning, og undersøke hvilke endringer i løpet av de neste 10-20 årene som kan forventes å påvirke risikoen for tungbilbranner i bratte tunneler.

## Risikobegrepet

Denne studien handler om risiko for tungbilbranner i vegtunneler. Generelt kan risikobegrepet brukes på ulike måter, men i denne studien har vi en trafikkikkerhetsfaglig definisjon av risikobegrepet. Dvs. at vi definerer risiko som antall branner i forhold til et eksponeringsmål, for eksempel antall tunneler eller million kjøretøykilometer i tunnel. Risikoen og faktorer som påvirker risikoen, undersøker vi med hjelp av modellberegninger. Potensielt relevante faktorer som vi har undersøkt i modellberegninger, er bl.a. maksimal stigning, lengden på bratte stigninger, fartsgrense, antall løp, trafikkmengde og andel tunge kjøretøy.

Mens den trafikkikkerhetsfaglige risikoforståelsen handler om hvorvidt branner oppstår, definerer man risiko i en beredskapsfaglig forståelse som kombinasjonen av sannsynlighet og konsekvens. I de tilfellene hvor vi beskriver konsekvenser av brann, omtaler vi det eksplisitt som konsekvenser. Alle beskrivelser av risiko handler om antall branner.

## Metoder

Vi bruker tre metoder i studien:

- 1) **Litteraturstudie** for å identifisere studier som undersøker sammenhengen mellom kjøretøybranner i vegtunneler og høy stigningsgrad, fortrinnsvis for tunge kjøretøy. Vi vurderer om studiene sier noe om knekkpunkter, der brannrisikoen øker betraktelig, samt om det finnes studier som sier noe om tiltak for å forebygge tunge kjøretøys brannrisiko i vegtunneler med høy stigningsgrad.
- 2) **Statistiske modeller** for å beregne normale antall branner i norske vegtunneler, dvs. gjennomsnittlige antall branner i tunneler med visse egenskaper, bl.a. en viss lengde, trafikkmengde, fartsgrense mv. Modellene er basert på Negative Binomial regresjon og bygger på data for tunneler som ble åpnet før 2016 og som var åpne for trafikk i minst ett av årene 2008-2021. Analyseenheten i alle modellene er én tunnel i ett år.

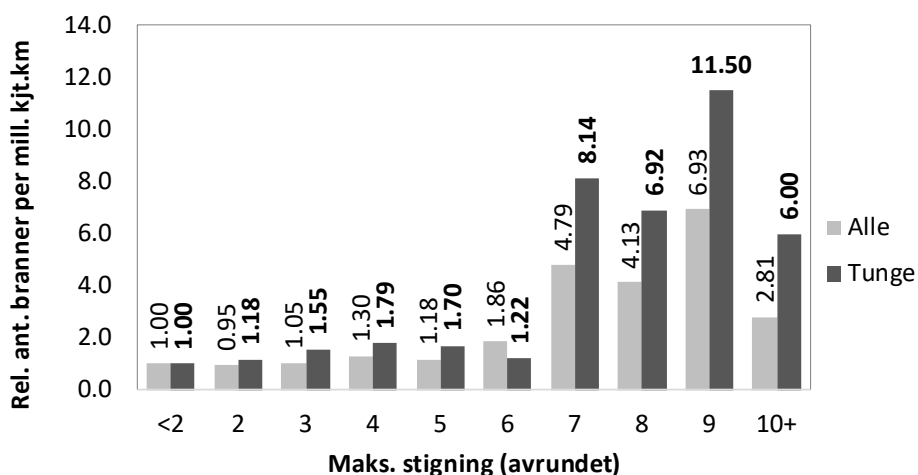


- 3) **Kvalitative intervjuer** med 23 fagpersoner for å få informasjon om sammenhenger mellom stigning og brannrisiko, årsaker til kjøretøybranner i bratte tunneler samt tiltak og utviklingstrekk. Informantene er personer fra bransjeorganisasjoner, tungbil-sjåførere, tungbilforsikring, nasjonal ulykkesgranskning, bilprodusenters ulykkesgranskning, branninspektører fra brannvesen i nærheten av brannutsatte vegtunneler, tunnelforvaltere, lastebilprodusenter, lastebilmekanikere, personer involvert i tungbilopplæring, og personer som er eksperter på analyse og tiltak i Europeiske tunneler som har hatt sterkt fokus på brannforebygging (St. Gotthart, Tauern, San Bernadino, Mont Blanc). De sistnevnte er enten tunnelforvaltere eller personer som er involvert i brannsikkerhetsarbeidet i disse tunnelene.

## Del 1: Årsakssammenhenger mellom stigning i tunneler og tungbilbranner

Tunnelsikkerhetsforskriften krever at kompensierende tiltak etableres ved en stigning på 3 prosent, og tillater ikke stigning over 5 prosent. Stigninger over 5 prosent tillates kun under visse forutsetninger, bl.a. at ingen annen løsning er geografisk mulig. Vi gjennomfører oppdaterte statistiske analyser for å undersøke om dagens kunnskapsgrunnlag gir støtte for å definere terskelverdiene for stigning i tunnelforskriften, eller om vi ser andre tydelige «knekkpunkter», dvs. stigningsgrader der risikoen for brann eller tilløp til brann øker betydelig.

Figur S.1 viser relative antall branner per mill. kjøretøykilometer for alle kjøretøy og for tunge kjøretøy i perioden 2008-2021, etter maksimal stigningsgrad i tunnelene. Relative antall branner er beregnet i forhold til «flate tunneler» hvor maks stigning er under 2 prosent. For eksempel har tunneler med en stigningsgrad på 7% 8,14 ganger så mange tungbilbranner som flate tunneler, mens tunneler med 9% stigning har 11,5 ganger så mange tungbilbranner som flate tunneler.



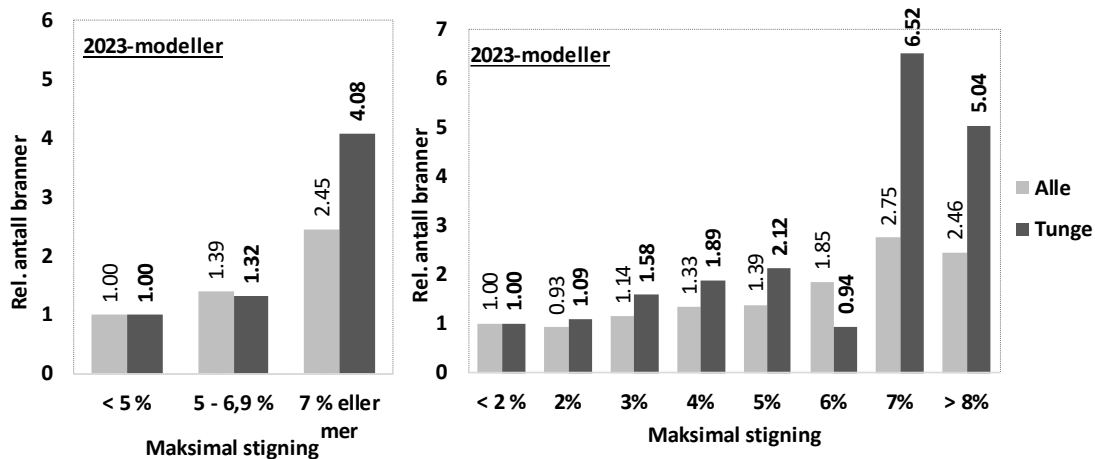
Figur S.1: Relative antall branner per million kjøretøykilometer etter maksimal stigningsgrad (maksimal stigningsgrad er avrundet; dvs. at f.eks. «2» inneholder stigninger fra 2,00 til 2,99 prosent).

Tunneler med stigning har generelt flere branner enn flate tunneler. Brannrisikoen øker mest fra en stigning på 7 prosent. Verken over eller under 7 prosent maksimalstigning kan man se noen klar sammenheng mellom stigning og brannrisiko. Dermed kan man betrakte en maksimal stigning på 7 prosent som et «knekkpunkt».



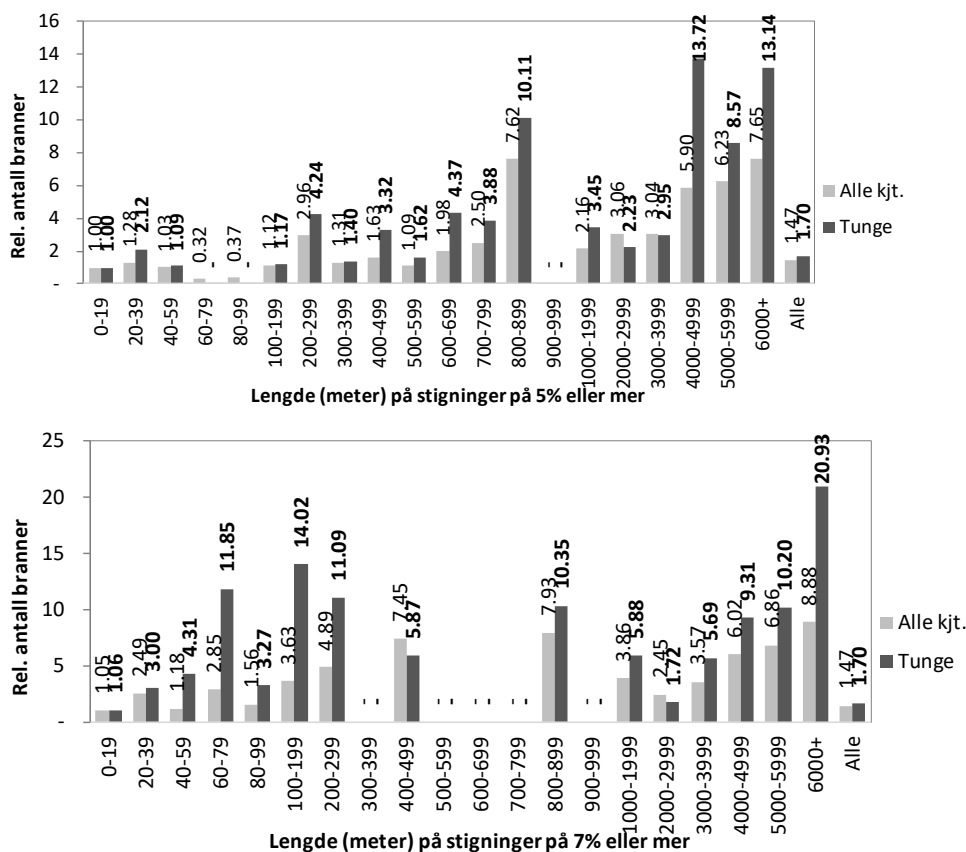
Vi har også gjennomført modellberegninger. Til forskjell fra risikoberegningene (som kun kontrollerer for kjørte km, kontrollerer modellberegningene for en rekke tunnelegenskaper; «prediktorvariabler»). Modellberegninger med dummyvariabler for maks. stigning (dvs. kun to verdier; for eksempel under og over 7% stigning) (figur S.2) viser at:

- Tunneler med en maksimal stigning på **7 prosent eller mer** har signifikant **flere branner** enn mindre bratte tunneler; dette gjelder både totalt antall branner og tunge kjøretøybranner.
- Tunneler med en maksimal stigning på **5-7 prosent** har også **flere branner** enn mindre bratte tunneler, men færre enn tunneler med en maksimal stigning på 7 prosent eller mer.
- Koeffisienten for **undersjøisk tunnel** viser at undersjøiske tunneler har signifikant **flere branner** enn andre tunneler. Dette gjelder både det totale antall branner (+70 prosent) og tunge kjøretøybranner (+33 prosent). Her er det kontrollert for hvorvidt tunnelene har en maksimal stigning på 5 eller 7 prosent eller mer.



Figur S.2: Relative antall branner i modellberegninger med dummyvariabler for maksimal stigning (forklaringer se tekst).

**Lengden på bratte stigninger.** Figur S.3 viser sammenhengen mellom lengden på bratte stigninger og relative antall branner, totalt og i tunge kjøretøy. Også lengden på bratte stigninger har sammenheng med brannrisikoen. Jo lengre en bratt stigning er, desto flere branner er det i tunnelen. Dette gjelder både for stigninger fra 5 prosent og for stigninger fra 7 prosent; lengde-effekten er imidlertid betydelig større for lengden på stigninger over 7 prosent. Tidligere forskning viser at undersjøiske tunneler er overrepresenterte i statistikken over kjøretøybranner (Nævestad og Blom 2023). At undersjøiske tunneler har flere branner enn andre tunneler, kan i hovedsak forklares med at de har lange og bratte stigninger.



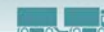
Figur S.3: Relative antall branner per million kjøretøykilometer i tunneler, etter antall meter med stigning på 5 prosent eller mer (øverst), eller 7 prosent eller mer (nederst). Relative antall branner i tunneler med null meter stigning på 5 / 7 prosent eller mer er satt lik én i begge figurene.

**Modellberegninger:** Vi har beregnet modeller hvor lengden på bratte stigninger i tunnelen er blant prediktorvariablene. Disse viser at:

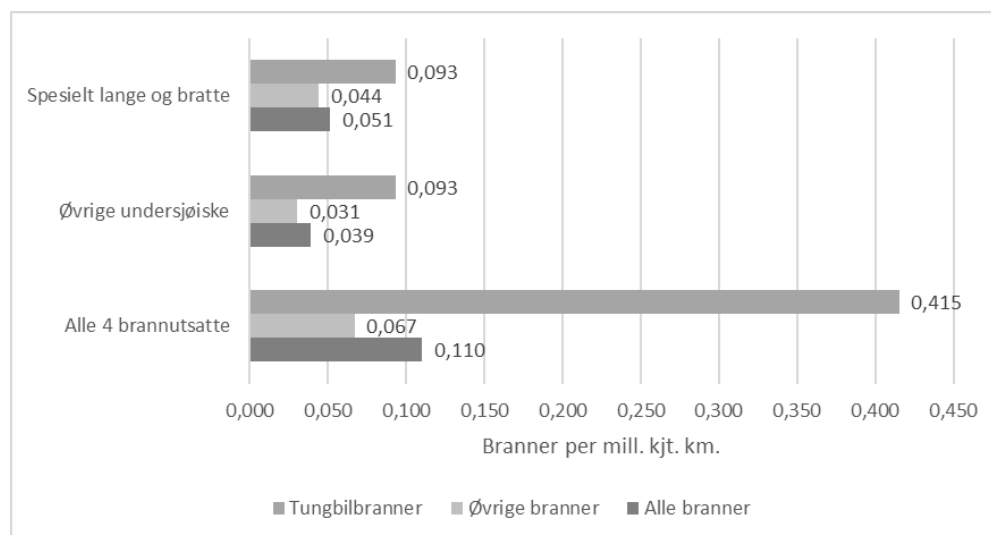
- Tunneler med **lengre bratte stigninger** har **flere branner** enn tunneler med kortere bratte stigninger.
- Sammenhengen er sterkere for **tunge kjøretøybranner** enn for alle branner, og den er statistisk signifikant i begge modellene for tunge kjøretøybranner.
- For stigninger over 5 prosent er det ingen stor forskjell mellom alle og tunge kjøretøybranner; siden resultatene gjelder relative antall, betyr det at risikoøkningen i forhold til flate tunneler er omtrent like stor for tunge og alle kjøretøybranner.
- For stigninger over 7 prosent finnes man en langt større risikoøkning for tunge kjøretøybranner enn for det totale antallet branner.

## Brannutsatte undersjøiske vegtunneler

Nævestad og Blom (2023) finner at fire undersjøiske vegtunneler har halvparten av alle brannene og tilløpene i tunneler med høy stigningsgrad (112 av 226) i perioden 2008-2021. Disse er Oslofjordtunnelen (39 branner og tilløp), Bømlafjordtunnelen (32), Byfjordtunnelen (23) og Eiksundtunnelen (17). Vi har sammenlignet noen generelle tunnelegenskaper mellom de fire mest brannutsatte tunnelene, øvrige undersjøiske tunneler og fem lange undersjøiske tunneler med stigning over 7%. De fem lange undersjøiske tunneler med stigning over 7% er valgt slik at de har lignende maksimal stigning (7-9 prosent) og lignende lengde (over 5 km) som de mest brannutsatte undersjøiske tunnelene.



Vi finner at antall tungebilbranner per mill. kjøretøykilometer er 4,5 ganger så høyt i de mest brannutsatte tunnelene som i de øvrige undersjøiske tunnelene. For det totale antall branner er forholdstallet på 2,8. For branner som ikke er tungebilbranner er forholdstallet 2,2. Det betyr at forskjellen i brannrisikoen er størst for tungebilbranner.



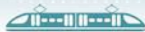
Figur S.4: Branner per mill. kjøretøykilometer i undersjøiske tunneler; de fire brannutsatte, øvrige undersjøiske (n=29) og fem lange undersjøiske med stigning over 7%, dvs. som ligner på de fire brannutsatte (stigning 7-9 prosent og tunnallengde over 5 km).

Vi har sett på faktorer som kan forklare hvorfor de fire mest brannutsatte tunnelene har høyere forekomst av branner. De mest brannutsatte tunnelene har over dobbelt så lange bratte stigninger i gjennomsnitt som de øvrige undersjøiske tunnelene, og nesten dobbelt så lange bratte stigninger i gjennomsnitt som de lange undersjøiske tunnelene med stigning over 7%. Selv om de lange undersjøiske tunnelene med stigning over 7% er omtrent like lange som de brannutsatte (6086 meter i gjennomsnitt mot 7025 meter i gjennomsnitt), har de ikke like lange strekninger med stigninger over 7% som de brannutsatte tunnelene (2871 meter i gjennomsnitt mot 5497). Lengden på den bratte stigningen ser dermed ut til å være forklaringen på den høye brannrisikoen i de mest brannutsatte tunnelene.

#### Kommentar til analysene.

Analysene av sammenhengen mellom maksimal stigningsgrad og antall branner viser et knekkpunkt ved 7 prosent maksimal stigning hvor risikoen øker betydelig for kjøretøybrann. Resultatene kan likevel ikke tolkes slik at stigningsgraden er uten betydning under (eller over) 7 prosent. Knekkpunktet på 7% skyldes nok at de undersjøiske tunnelene er blant tunnelene med en maksimal stigningsgrad på 7 prosent eller høyere, og disse har ikke bare bratte, men også svært lange stigninger. Lengden på bratt stigning har vist seg å være av stor betydning for antall branner, især over 7 prosent. Knekkpunktet man ser ved 7 prosent maksimal stigning, oppstår altså som følge av kombinasjonen av lang og bratt stigning. Her er det med andre ord en blanding av maksimal stigning og lengden på stigning som bidrar til det tilsynelatende knekkpunktet.

At man ikke ser noen tydelig sammenheng mellom maksimal stigning og branner for stigninger på 3 til 6 prosent eller over 7 prosent, kan tyde på at maksimal stigning har størst betydning for stigninger fra 7 prosent. Det kan imidlertid også skyldes tilfeldigheter i datamaterialet. Dessuten viser analysene av sammenhengen mellom lengde på bratt stigning og antall branner at det også for stigninger på 5-7 prosent er en sammenheng mellom lengde på stigningen og



antall branner. Dermed er stigningsgraden også av betydning for brannrisikoen fra fem prosent.

På denne bakgrunnen har vi ikke grunnlag for å oppgi grenseverdier for hva som er en «trygg» stigning: Risikoen øker fra ca. 3 prosent og den øker mer, jo lengre og jo brattere stigningen er.

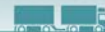
## Del 2: Kompenserende tiltak

Det andre målet med studien er å kartlegge kompenserende tiltak, dvs. tiltak i og ved tunnelene som kan kompensere for risikoen som er knyttet til høy stigningsgrad i tunneler, og hvilken effekt vi kan forvente av tiltakene. Vi fokuserer primært på tiltak som kan redusere risikoen for tunge kjøretøybranner i tunneler (dvs. tiltak som følger av det vi har funnet om stigningsgrader og lengde på stigning) og tiltak som kan redusere konsekvensene ved brann. Beskrivelsen er basert på en kombinasjon av litteraturstudie og intervjuer. Vi har ikke funnet noen vitenskapelige studier som sier noe om effekter av tiltak for å redusere risikoen for tungbilbranner i vegtunneler med høy stigningsgrad. Redegjørelsen vår for kompenserende tiltak er derfor primært basert på intervjuresultater.

Det som kan nevnes først, er at det mest relevante tiltaket for å forebygge branner i tungebiler i norske vegtunneler er at man ikke bygger lange og bratte vegtunneler, der det kan unngås. Et av hovedresultatene i studien vår er at tunnelene med lange og bratte stigninger har betydelig høyere risiko for brann. Det å redusere stigningsgraden og lengden på stigningsgraden vil derfor redusere risikoen for kjøretøybranner. Dette ble også nevnt av flere av informantene i intervjuene, særlig når de lange og bratte tunnelene er ettløpstunneler uten andre evakueringsmuligheter enn gjennom tunnelmunningene. I tillegg, er det også viktig å nevne at høy stigningsgrad påvirker trafikantenes muligheter for å evakuere tunnelene (det er mer krevende å gå lange strekninger med høy stigning til fots) og mulighetene for å effektivt få kontroll på røyken gjennom brannventilasjon.

Utgangspunktet for redegjørelsen over øvrige tiltak er, at vi finner at det først og fremst er tekniske problemer i motor som er årsak til branner. Dette gjør kjøretøyet sårbar for brann når motoren blir varm av retarderbruk nedover i tunnelen, før den blir enda varmere når man kjører oppover i tunnelen igjen. Manglende eller utilstrekkelig vedlikehold øker risikoen for tekniske problemer. Det er derfor særlig relevant å sette inn tiltak for å bedre vedlikehold av kjøretøy, og også kontroll av kjøretøy. Sistnevnte er viktig, fordi vi har inntrykk av at ombygde og modifiserte tungebiler kan ha høyere risiko for brann. Basert på intervjuene som er gjennomført i denne studien, ble teknologi for automatisk slukking av brann i motorrom omtalt som det mest relevante tiltaket for å forebygge branner i tunge kjøretøy i vegtunneler. Det viktigste argumentet for denne anbefalingen er at slik teknologi finnes i buss i dag, og det er også påbudt for anleggsmaskiner som kjører i gruver. Teknologien finnes, intervjuene indikerer at den fungerer og tunge kjøretøymotorrom er godt egnet for den.

Bakgrunnen for anbefalingen av dette tiltaket er at informantene, både i Norge og utlandet, sa at det er krevende å forebygge risikoen for brann i tunge kjøretøy. Informantene hadde mye fokus på tidlig oppdagelse og konsekvensreduering når branner inntreffer. Dette gjaldt for eksempel i tunnelene i alpeland og Oslofjordtunnelen. Konsekvensreduering kan være utfordrende i de undersjøiske vegtunnelene fordi de er lange ettløpstunneler, hvor trafikanter må evakuere gjennom tunnelmunningene, dvs. gå eller kjøre lange distanser med høy stigning. Det finnes risikoreduerende tiltak som virker relativt effektivt i alpeland, for eksempel portaler med varmescanere for tungebiler og permanente kontrollstasjoner for tungebiler. Dette er imidlertid dyrt og ressurskrevende, særlig i undersjøiske vegtunneler med lav ÅDT. Det er antakelig heller ikke like effektivt som i alpeland, fordi stigningen er inne i tunnelen, og



ikke før tunnelen. Da er det antakelig mer realistisk å satse på automatisk brannslukking i motorrommet på tunge kjøretøy. Dette er dessuten et tiltak som vil fungere i alle tunneler.

For at dette skal bli et virkningsfullt tiltak, bør det nok innføres som et nasjonalt krav. Det bør også være et eget EU-krav, siden litt under 10 % av lastebilkilometerne i Norge kjøres med utenlandske lastebiler. Vegen til å få gjennom slike EU-krav kan være lang, men det finnes eksempler på situasjoner hvor Norge har gått foran EU, innført strengere krav enn EU-regler og vært en pådriver for strengere EU-krav. Dette har for eksempel skjedd i busstransport, hvor Norge har gått foran EU og innført et eget nasjonalt krav om kollisjonssikring i fronten av busser. Norge har en sterk interesse av slukketeknologi i motorrom, siden vi er blant landene som har flest vegtunneler i verden. Ikke minst har vi også flere lange ettløps undersjøiske vegtunneler som er spesielt brannutsatte, sammenliknet med de øvrige tunnelene i Norge.

Portaler med automatisk varmescanning av tungbiler for å luke ut overopphetede tungbiler som kan ha forhøyet risiko for brann er et tiltak som har blitt implementert ved fjelltunneler i alpeland i de senere årene. Fjelltunnelene i alpeland har problematikk relatert til stigningsgrad, fordi de ligger nær toppen av fjell, og de er lokalisert på internasjonale transittveier. Dette betyr at kjøretøy som kjører gjennom tunnelene må kjøre betydelige strekninger med høy stigningsgrad opp til tunnelene, og strekninger med betydelig fall ned fra tunnelene. Forskjellen til de undersjøiske vegtunnelene i Norge er, at disse først og fremst har strekninger med høy stigningsgrad inne i tunnelene. De europeiske fjelltunnelene har strekninger med høy stigningsgrad før tunnelene, og et viktig brannforebyggingsiltak for disse er å unngå at overopphetede tungbiler kommer inn i tunnelene. I de undersjøiske vegtunnelene i Norge handler brannforebygging i større grad om å unngå at tungbiler blir overopphedet inne i tunnelene, særlig når de er på veg oppover og ut av tunnelene. Det kan derfor diskuteres hvor effektivt varmescanning utenfor undersjøiske vegtunneler er. Det ser ut til at omtrent 90% av brannene i tunge kjøretøy har tekniske problemer som årsak. Rundt halvparten av tungbilbrannene i norske vegtunneler som vi antar at har tekniske problemer som årsak (55 av 101) i perioden 2008-2021 er i tunneler som ikke har høy stigningsgrad. Her kan det være relevant med varmescanning utenfor tunnelene, fordi vi kan anta at varmeutviklingen her kan starte og måles utenfor tunnelen, og at den ikke er et resultat av fall/stigning inne i tunnelen. Ulike kriterier kan legges til grunn for å velge hvilke tunneler man skal velge ut for et slikt tiltak. Portaler med varmescanning kan være spesielt relevant utenfor tunneler som har lengre strekninger med fall/stigning før tunnelmunningene, tunneler med høy tungbil ÅDT, tunneler som har hatt mange tungbilbranner, spesielt lange tunneler osv.

Et annet tiltak som antakelig blir svært viktig i fremtiden er «Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS)», eller samvirkende ITS, som bruker trådløs teknologi for å muliggjøre sanntids kommunikasjon fra kjøretøy til kjøretøy og fra kjøretøy til infrastruktur. Moderne lastebiler har et stort antall sensorer som gir varsler dersom det er tekniske feil med lastebilen, eller dersom en eller annen komponent er overopphedet. I fremtiden kan vi tenke oss at utstyr langs vegen før tunnelen kan kommunisere med kjøretøy og fange opp slike feilmeldinger, for eksempel om overoppheting eller alvorlige motorfeil, og «luke ut» kjøretøy, slik at de ikke kan kjøre inn i tunnelene. Dette kan for eksempel skje ved at lastebilene ledes ut til en kontrollsoner, hvor de blir fulgt opp av en kontrollør. Den samvirkende ITS-teknologien er relativt moden og bruker mange komponenter som allerede finnes som standardutstyr i nye kjøretøy, for eksempel kameraer, sensorer, og antenner. En utfordring med et slikt tiltak er at det finnes mange ulike teknologier og løsninger i kjøretøy og, at man må lage et system som kan kommunisere med alle sammen. Fortsatt er det bare pilot/forskningsprosjekter som pågår på dette feltet, og det er delte meninger om hva som blir løsningen fremover.





## Del 3: Utviklingstrekk

Det tredje målet med studien er å kartlegge utviklingstrekk, dvs.: a) endringer i løpet av perioden 2008-2021 som kan ha påvirket risikoen for tungbilbranner i tunneler med høy stigning, og b) endringer i løpet av de neste 10-20 årene som kan forventes å påvirke risikoen for tungbilbranner i bratte tunneler.

Informantene nevnte særlig fire endringer i løpet av perioden 2008-2021, som kan ha påvirket risikoen for brann i tunge kjøretøy i tunneler med høy stigning:

1. Kjøretøystandarden generelt har blitt bedre (og mer brannsikker),
2. Kjøretøyenes serviceplaner og vedlikehold har blitt bedre, slik at de får utført bedre jevnlig vedlikehold (og reduserer antakelig tekniske feil som kan føre til kjøretøybrann).
3. Retarderteknologien har blitt bedre, og det reduserer antakelig sjansen for feilbremsing som kan føre til overoppheting,
4. Krav til miljøvennlig drivstoff og miljøvennlig utslippsreducerende teknologi har ført til høyere temperaturer i motor og manifold, partikkelfilter og eksosrør. Samtidig som temperaturene har økt, har imidlertid også motorene og utstyret blitt utviklet for å tåle høyere temperaturer.

Når det gjelder endringer i løpet av de neste 10-20 årene som kan forventes å påvirke risikoen for tungbilbranner i bratte tunneler, fokuserte informantene først og fremst på faktorer knyttet til kjøretøy, særlig hvilke drivlinjer som blir mer utbredt de neste 10-20 årene, og hvordan det kan påvirke risiko for kjøretøybrann og konsekvenser av brann i tunnel. Nasjonal Transportplan, EU-regulativer og klimamål legger politiske føringer for innføring av nullutslippskjøretøy. NTP beskriver at «innen 2030 skal ... 50 prosent av nye lastebiler være nullutslippskjøretøy». For tunge kjøretøy trådte et EU CO<sub>2</sub>-utslippsregulativ i kraft fra august 2019. Fra 2025 skal utslippet reduseres med 15 prosent og fra 2030 med 30 prosent i forhold til referanseperioden. Kravene gjelder i første omgang store lastebiler (>16 tonn). EUs CO<sub>2</sub>-krav til lastebiler medfører at bilprodusentene må utvikle batterielektriske eller hydrogenlastebiler for salg i Europa frem mot 2025 og 2030. Antagelsen er at minimum halvparten av reduksjonen må nås ved å selge null- eller lavutslippslastebiler.

Gitt disse trendene, blir det dermed et spørsmål om hvilken brannrisiko det utgjør at mer av lastebilparken på norske veger i fremtiden er drevet av elektriske batterier eller hydrogen, samt trekkvogner på biogass. Informanter, som er eksperter på ulike energiformer og drivlinjer, sa at en overgang fra diesel til elektriske batterier vil føre til en nedgang i risikoen for brann i lastebiler. Samtidig kan konsekvensene av en brann i el-batteriene til en lastebil i tunnel være større sammenlignet med diesel, fordi det skal ekstreme mengder med vann til for å slukke brannen. Branner i el-personbiler slukkes mest effektivt ved at de senkes i vannbad. Det vil være vanskelig å få til det samme med brennende lastebiler i tunnel. Brann i el-batterier produserer farligere gasser enn diesel, og kan derfor gjøre større skade på mennesker som evakuerer tunnelen, og det kan gjøre det svært vanskelig, hvis ikke umulig, for brannmannskap og røykdykkere å komme til brannen for å slukke den.

En av informantene mente at elkjøretøy kommer til å bli det desidert største på lastebilfronten, men at gassdrevne kjøretøy kommer til å være aktuelle i mange år fremover. Gasskjøretøy har stor brannbelastning hvis de tar fyr inne i en tunnel. En analyse av brannrelaterte problemstillinger med gassdrevne kjøretøy i innelukkede rom, konkluderte med at hvis gassen skulle akkumuleres i et innelukket rom, kan selv små utslipp føre til eksplosjon (Reitan mfl., 2016). Risikoen for brann og eksplosjon i gasskjøretøy skal være forebygget ved at kjøretøyene er utstyrt med sikkerhetsmekanismer. Ved flere ulykker har sikkerhetsmekanismer sviktet, og det er manglende kunnskap om hvordan aldring og slitasje påvirker sikkerhetsmekanismer og



lekkasje fra tank (Reitan mfl., 2016). Vi er ikke kjent med risikoen for brann i gassdrevne kjøretøy, men brannproblematikken er absolutt til stede fordi driftstemperaturen er høyere enn for et dieseldrevet kjøretøy. Konsekvensene er også potensielt betydelige, fordi gassen må «brenne ut». Vi kjenner til en kraftig brann med en gassdrevet lastebil i Merraskottunnelen i 2021. Lastebilen hadde akkurat kjørt gjennom Oslofjordtunnelen.

Hydrogendrevne lastebiler fungerer på den måten at brenselcellene er et lite kraftverk som omdanner hydrogen til elektrisk strøm. Strømmen brukes til å drive en elmotor, som sender kraft til drivhjulene. Et batteri tjener som mellomlagring for strømmen. Tungt.no skriver 28. april 2023, at ingen hydrogenlastebiler er blitt registrert i Norge siden 2021, ifølge tall fra OFV. De fire hydrogenlastebilene som finnes i Norge, ble registrert i 2019 og 2020.<sup>1</sup> Samtidig lanserte Tungt.no våren 2023 nyheten om at et tysk selskap bygger en «norgesversjon» av hydrogenlastebil, som kan bestilles fra april 2023. Denne har samme nyttelast som diesellastebiler – og en modell med inntil 1400 km rekkevidde som er spesielt tilpasset nordiske forhold. Hydrogen er veldig brannfarlig og eksplosivt og gir egne utfordringer for brannsjikkerheten. Det har et lavt tennpunkt, lav tennenergi og vide eksplosjonsgrenser. Når hydrogen lekker, vil det umiddelbart antennes og danne en jetflamme. Vi er ikke kjent med risiko for lekkasje eller brann i hydrogenkjøretøy.

## Spørsmål til fremtidig forskning

**Har de utenlandskregistrerte lastebilene blitt likere de norskregistrerte?** Tidligere rapporter indikerer eldre tungbiler med lavere standard og høyere brannrisiko blant de utenlandskregistrerte tungbilene. Informantene våre var litt delt når det kommer til kvaliteten på utenlandskregistrerte tungbiler, men en av informantene med god oversikt over tungbilsalg sa at utenlandske firmaer som kjører i Norge kjøper de samme lastebilene som de norske firmaene, med de samme spesifikasjonene. Vi kan kanskje derfor forvente likere standard enn det de ovennevnte tidligere rapportene skulle tilsi, i alle fall i betydelige segmenter av transportnæringen. Dette er noe som må undersøkes i fremtidig forskning.

**Hvor mye har tungbilsjåførers kompetanse og erfaring å si?** En faktor som kan være viktig for å forklare høyere risiko for brann i tunneler med høy stigningsgrad, er tungbilsjåførers kompetanse og erfaring. Dette har vi ikke fått undersøkt tilstrekkelig i denne rapporten, selv om intervjuene tilsier at det krever kompetanse og erfaring å kjøre tungbil på optimal måte, både ned og opp bratte og lange stigninger. Fremtidig forskning bør kartlegge erfaring, kompetanse og holdninger blant norske og utenlandske tungbilsjåførere, blant annet som grunnlag for opplæring og informasjonskampanjer. Slike kampanjer kunne også potensielt sett fokusere på betydningen av vedlikehold for å forebygge kjøretøybrann, og ikke minst også legge vekt på at sjåfører ikke skal kjøre inn i lange tunneler dersom man har feilmeldinger av ulike slag, for eksempel knyttet til overoppheting.

**Hva påvirker vedlikeholdsrutiner i transportselskap?** En av informantene sa at «Noe av det første bileierne firer på er vedlikehold», når rammebetingelsene og økonomien blir dårligere. En annen informant sa at vedkommende hadde merket seg at det «ofte er billig last som brenner». Det kan være mange årsaker til det, men en mulig bakenforliggende årsak kan være at transportbransjer med lavere inntjening og dårligere økonomi bruker mindre ressurser på vedlikehold. Kanskje har de også eldre kjøretøy med høyere risiko for teknisk feil som leder til brann, evt. også modifiserte kjøretøy med høyere brannrisiko. Disse sammenhengene mellom

---

<sup>1</sup>[https://www.tungt.no/article/view/1027013/quantron\\_bygger\\_norgesversjon\\_av\\_hydrogenlastebil\\_ka\\_n\\_bestilles\\_na](https://www.tungt.no/article/view/1027013/quantron_bygger_norgesversjon_av_hydrogenlastebil_ka_n_bestilles_na)





økonomi, vedlikehold og brann bør undersøkes i fremtidig forskning. Påvirker utfordrende rammebetingelser vedlikehold? Varierer kvaliteten på vedlikeholdet i ulike segmenter i transportsektoren, basert på økonomi? Og hvor mye har rammebetingelser å si for brannrisiko?

**Hva skal til for å innføre system for automatisk motorslukking?** Vi har, som nevnt over, særlig anbefalt systemer for automatisk motorslukking som et tiltak for å forebygge risikoen for brann i tungbiler. Vegen til å få gjennom slike EU-krav kan være lang. Det finnes imidlertid eksempler på situasjoner hvor Norge har gått foran EU, innført strengere krav enn EU regler, og vært en pådriver for strengere EU-krav. Det å kartlegge hva som skal til for å få til dette, er et viktig område for fremtidig forskning.

**Hvordan er brannrisikoen for nye energibærere og hvordan håndtere den?** Kjøretøy med el og gass som drivstoff har andre brann-, eksplosjons- og slukkingsegenskaper enn kjøretøy med fossilt brensel, noe som gir nye problemstillinger med hensyn til brannsikkerhet på veger og i tunneler. Her bør man kartlegge mulige konsekvenser for brannsikkerhet i tunneler, utvikle scenarioer for mulige hendelser og vurdere muligheter for både forebygging og håndtering av ulike hendelser. Det vil være spesielt viktig å vurdere hvorvidt økt utbredelse av nye energibærere bør føre til endringer i dagens krav til tunnelsikkerheten.

**Hvorfor har vi en sterk nedgang i ulykkesrisiko, men ikke brannrisiko?** Nævestad mfl. (2022) finner at risikoen for personskadeulykker, med tunge godsbiler involvert, har blitt redusert med 73 % fra 2007 til 2020. De viktigste årsakene til reduksjonen i risiko for trafikkulykker med tunge godsbiler ser ut til å være ny kjøretøyteknologi (elektronisk stabilitetskontroll, økt karosserisikkerhet), endring i kjøreatferd (nedgang i fart) og økning i kontroller fra Statens vegvesen og politiet. Nedgangen i risiko gjelder både for norske og utenlandsregistrerte tungbiler. I vår rapport ser vi på risiko for brann i tunge godsbiler i vegtunneler i den samme perioden (2008-2021), men vi ser ikke noen tilsvarende dramatisk reduksjon i risiko for brann som ulykker. Mekanismene som ligger til grunn for trafikkulykker og kjøretøybranner ser dermed ut til å være ulike. Det har vi også belyst i denne rapporten. Til tross for dette, er det den samme kjøretøyparken og de samme sjåførene som er involvert i hendelsene med risiko for ulykker og kjøretøybranner i perioden. Vi kan kanskje anta at tilsvarende risikoreduksjoner kan oppnås for kjøretøybrann som for trafikkulykker, dersom man sammenlikner årsaksmechanismene og tiltakene som er satt inn for å unngå trafikkulykker, med årsaksmechanismene og tiltakene som finnes for å forebygge kjøretøybrann. Kanskje viser dette at automatisk slukkesystem i motorrom er et åpenbart tiltak som burde vært satt inn, på linje med effektive tiltak for å forebygge trafikkulykker (for eksempel: ABS bremses, antiskrens). En rapport av Nævestad mfl. (2022) viser at tiltak for å få ned risikoen for trafikkulykker virker. Vi kan anta at det samme gjelder for kjøretøybranner i tunneler. Det å diskutere forskjeller og likheter mellom forebygging av trafikkulykker og kjøretøybranner med tunge kjøretøy i tunneler, og det å lære av forebygging av trafikkulykker over tid osv. synes å kunne gi et godt grunnlag for videreutviklingen av tiltak for økt brannsikkerhet i norske vegtunneler.

Selv om vi ikke har sett noen klar trend i retning lavere brannrisiko for tungbiler i norske vegtunneler, vil det være interessant å følge utviklingen over tid. Et oppdatert datagrunnlag som omfatter alle nye tunnelene, og gjerne også flere år, vil gjøre det mulig å undersøke ev. endringer i brannrisikoen over tid, f.eks. som følge av utviklinger blant utenlandske tunge kjøretøy og økende utbredelse av nye drivstofftyper. Et større datagrunnlag vil også gjøre det mulig å gjøre mer detaljerte analyser av hvordan ulike kombinasjoner av stigningslengde og stigningsgrad påvirker brannrisikoen.



# The fire risk of heavy vehicles in high gradient road tunnels

TØI Report 2017/2024 • Authors: Tor-Olav Nævestad, Alena Katharina Høye, Jenny Blom, Lars Even Egner  
• Oslo 2024 • 72 pages

The report examines the relationship between high gradients in road tunnels and the risk of fire in heavy vehicles. Especially subsea tunnels have long steep gradients. Our analyses show that the fire risk increases most from a gradient of 7 per cent, and we regard a maximum gradient of 7 per cent as a "breaking point". The length of high gradient distances is also related to the fire risk. The longer distances with a high gradient, the more fires there are in the tunnel. This applies both to gradients from 5 per cent and to gradients from 7 per cent. However, the length effect is significantly higher for the length of gradients above 7 per cent. Subsea road tunnels have a higher risk of vehicle fires than other tunnels. This can mainly be explained by the fact that they have long and steep gradients. The four most fire exposed have almost 5,500 meters in average with a gradient of more than 7%. This applies to the Oslofjord Tunnel, the Eiksund Tunnel, the Bømlafjord Tunnel and the Byfjord Tunnel. The cause of heavy vehicle fires in long and steep tunnels is primarily technical problems, primarily related to the engine. The engine becomes very hot when using the retarder downwards, and even hotter when driving uphill. The retarder is an independent braking system, operated with a lever on the steering wheel, which slows the engine downhill. Insufficient vehicle maintenance is often an underlying cause of fires. We discuss various measures to reduce the risk of fire, including experiences from measures in tunnels in alpine countries, and how new types of fuel and energy carriers in the next 10-20 years can influence the risk of fire. The most relevant measure to prevent fires in heavy vehicles in Norwegian road tunnels is to avoid building long and steep road tunnels, whenever possible. The other most relevant measures that we identify in the study seem to be technology for automatically extinguishing fires in engine compartments, vehicle maintenance, technical inspections of vehicles, thermoportals and cooperative ITS.



# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Norge er blant de landene i verden som bygger flest vegtunneler. Det er godt over 1250 vegtunneler i Norge. Vegtunneler er vanligvis minst like sikre som, eller sikrere enn, tilsvarende vegstrekninger i fri luft uten vegkryss, avkjørsler, samt gang- og sykkeltrafikk (Amundsen og Engebretsen, 2009). Vegtunneler fortjener likevel spesiell oppmerksomhet fra et trafiksikkerhets-perspektiv, blant annet på grunn av katastrofepotensialet ved brann (Mashimo, 2002; Vuilleumier mfl., 2002; Caliendo mfl., 2013).

Selv om risikoen for trafikkulykker er lavere i vegtunneler enn på vanlig trafikkert veg, er katastrofepotensialet knyttet til brann høyere (PIARC, 2008; Mashimo, 2002; Jensen mfl., 2006). Dette viser de tre katastrofebrannene i Mellom-Europa, i henholdsvis Mont Blanc tunnelen og Tauern tunnelen i 1999 og i St. Gotthart tunnelen i 2001. Disse brannene krevde til sammen 62 liv.

Kjøretøybrannene med katastrofepotensial i vegtunneler er gjerne knyttet til tunge kjøretøy, som gjerne har drivstoff og last som kan gi grunnlag for betydelig varme og røykutvikling. Med tunge kjøretøy mener vi store lastebiler (dvs. over 7,5 tonn). De alvorligste kjøretøybrannene i tunneler som vi har hatt i Norge de siste årene har også vært i tunge kjøretøy, gjerne i lange og/eller bratte tunneler, og årsakene har gjerne vært tekniske problemer, for eksempel brannene i Oslofjordtunnelen i 2011 (SHT, 2013), 2017 (SHK, 2018) og 2021 (SHK, 2022) brannene i Gudvangatunnelen i 2013, 2015 og 2019 (SHT, 2015, 2016a), Brattlitunnelen i 2013 og Skatestraumtunnelen i 2015 (SHT, 2016b). I sistnevnte brant et vogntog med 16 500 liter med drivstoff. I flere av disse hendelsene har det vært titalls trafikanter inne i tunnelene, som har måttet evakuere ut under svært krevende forhold, blant annet fordi at dette er lange ettløpstunneler. Ingen liv har heldigvis gått tapt.

Både norsk (Nævestad og Meyer, 2012, 2014; Nævestad og Blom, 2023) og internasjonal forskning (Haack, 2002; OECD, 2006) viser at tunge kjøretøy er overrepresenterte i vegtunnelbranner. Tunge kjøretøy utgjorde 14 % av trafikken på norske riksveger med tunneler, mens de var involvert i 38 % av brannene (Nævestad & Meyer, 2014). Tekniske problemer (overopphetede bremses og motor) er den hyppigste årsaken til branner og tilløp i tunge kjøretøy. Det gjelder særlig i tunneler med høy stigningsgrad, som er betydelig overrepresentert i statistikken over branner og tilløp i kjøretøy i norske vegtunneler. Det finnes 41 undersjøiske vegtunneler i Norge. Disse har høy stigningsgrad. I tillegg finnes det 24 vegtunneler som ikke er undersjøiske, men som har høy stigningsgrad (definert som stigning på over 5 %) i region vest. Vegtunnelene med høy stigningsgrad utgjør til sammen omtrent 5 % av vegtunnelene. Disse hadde 38 % av brannene og tilløpene i perioden 2008-2021 (Nævestad og Blom, 2023). Vi ser dermed at disse vegtunnelene er betydelig overrepresentert i statistikken over branner og tilløp i kjøretøy i norske vegtunneler. Noen undersjøiske vegtunneler er mer brannutsatte enn andre. Nævestad og Blom (2023) finner at fire undersjøiske vegtunneler har halvparten av alle brannene og tilløpene i tunneler med høy stigningsgrad (112 av 226) i perioden 2008-2021. Disse er Oslofjordtunnelen (39 branner og tilløp), Bømlafjordtunnelen (32), Byfjordtunnelen (23) og Eiksundtunnelen (17).

Gitt tunge kjøretøys brannrisiko i vegtunneler med høy stigningsgrad, er det viktig å utvikle effektive tiltak for å redusere risiko for kjøretøybranner. Tunnelsikkerhetsforskriften krever at kompensierende tiltak etableres ved en stigning på 3 %, og tillater ikke stigning over 5 %, med mindre ingen annen løsning er geografisk mulig. Høye mfl. (2019) fant at brannrisikoen er omtrent doblet ved maksimale stigninger på 3-6 prosent i forhold til en flat tunnel, og at brannrisikoen øker betydelig ved stigninger på 7 prosent og brattere. Studien til Høye mfl. (2019) er basert på data over branner og tilløp i norske vegtunneler i perioden 2008-2015.

Nævestad og Blom (2023) har imidlertid oppdatert statistikken over branner og tilløp i vegtunneler med seks år, slik at det foreligger statistikk for årene 2008-2021, for både tunge og lette kjøretøy. Dette gir

muligheter for oppdaterte analyser, for å undersøke i hvilken grad dagens kunnskapsgrunnlag gir støtte for Tunnelforskriftens terskelverdier (3 % og 5 %) for stigning, og om vi ser andre tydeligere «knekkpunkter» der frekvensen for brann eller tilløp til brann øker betydelig som en funksjon av stigning. I vår tidligere studie, konkluderte vi også med at vi vet for lite om årsakssammenhengene knyttet til tunge kjøretøybranner i tunneler med høy stigningsgrad, blant annet fordi det ikke foreligger gode data på årsaker (Nævestad og Blom, 2023). Et annet viktig kunnskapsbehov er knyttet til utvikling over tid. Nævestad og Blom (2023) har indikasjoner på at risikoen for kjøretøybranner kan ha blitt redusert over tid. Dette er noe som bør undersøkes nøyere, i analyser som tar hensyn til trafikkmengde og andre faktorer som påvirker risikoen for brann.

## 1.2 Målene med studien

Denne studien har tre mål, knyttet til årsakssammenhenger, tiltak og endringer over tid. Studien kartlegger:

- 1) Årsakssammenhenger mellom stigning i tunneler og tungbilbranner.
- 2) Tiltak i og ved tunnelene, som kan kompensere for risikoen som er knyttet til høy stigningsgrad i tunneler, og hvilken effekt man kan forvente av tiltakene.
- 3) Endringer i løpet av perioden 2008-2021, som kan ha påvirket risikoen for tungbilbranner i tunneler med høy stigning, og undersøke hvilke endringer i løpet av de neste 10-20 årene som kan forventes å påvirke risikoen for tungbilbranner i bratte tunneler.

**Risikobegrepet.** Denne studien handler om risiko for tungbilbranner i vegtunneler. Risikobegrepet brukes på litt ulike måter. I denne studien har vi en trafiksikkerhetsfaglig definisjon av risikobegrepet, hvor vi definerer risiko som sannsynligheten for at branner skal oppstå. Dette handler om å beregne antall branner per mill. kjøretøykilometer, for eksempel for ulike grupper av tunneler (f.eks. tunneler med ulike maksimale stigninger). Den trafiksikkerhetsfaglige forståelsen av risiko handler også om modellberegninger som predikerer antall branner per tunnel, ut fra en rekke egenskaper ved tunnelene, for eksempel stigning, fartsgrense, antall løp, trafikkmengde, andel tunge kjøretøy om tunnelen er undersøkt. Lignende analyser gjøres for å beregne faktorer som påvirker risiko for trafikkulykker, gjennom ulykkesmodeller, som er viktige styringsverktøy for veier (Elvik og Høye 2022). En beredskapsfaglig forståelse av risikobegrepet definerer risiko som kombinasjonen av sannsynlighet og konsekvens. Denne forståelsen er relevant for kjøretøybranner i tunneler, fordi branner kan utvikle seg etter at de har oppstått og få mer eller mindre alvorlige konsekvenser. Vårt hovedfokus er imidlertid forhold som påvirker sannsynligheten for brann, og det benevner vi som risiko. I de tilfellene hvor vi beskriver konsekvenser av brann, omtaler vi det eksplisitt som konsekvenser. Alle beskrivelser av risiko handler om sannsynlighet.

## 1.3 Tidligere forskning

### 1.3.1 Faktorer som påvirker risiko for brann i vegtunneler generelt

Høye, Nævestad og Ævarson mfl. (2019) utviklet statistiske modeller for vegtunneler i Norge for å beregne normale antall kjøretøybranner, personskadeulykker, antall ulykker med drepte eller hardt skadde og antall havarier, som en funksjon av en rekke tunnelegenskaper (bl.a. trafikkmengde, lengde, antall løp, fartsgrense og stigninger). Vi gjengir resultater fra denne studien og andre relevante internasjonale studier i det følgende.

**Trafikkmengde.** Internasjonal forskning viser at trafikkmengde er en sentral faktor som påvirker risikoen for kjøretøybranner i vegtunneler (OECD, 2006). I tråd med dette, finner Høye mfl. (2019) at økende trafikkmengde medfører flere branner, ulykker og havarier, men antallet øker langt mindre enn propor-

sjonalt med trafikkmengden. En økning av trafikkmengden på 10 % medfører i gjennomsnitt en økning av antall branner og ulykker på omtrent 5 %.

**Tunge kjøretøy.** En av hovedkonklusjonene til Nævestad mfl. (2016) er at tungebiler er overrepresentert i vegtunnelbranner. Den gjennomsnittlige andelen tunge kjøretøy på norske riksveger med tunneler er 14 %. Tunge kjøretøy er involvert i 40 % av brannene og branntilløpene i tunneler. Internasjonal forskning viser også at tunge kjøretøy er overrepresentert i vegtunnelbranner. Av de 42 kjøretøybrannene i St. Gotthardtunnelen i perioden 1992-1998 involverte halvparten av brannene tunge kjøretøy, mens tungebilandelen i tunnelen var på 15 % av en ÅDT på 17 000 (Haack, 2002). Njå mfl. (2022) finner at en økning av andel tunge kjøretøy på 10 % medfører en økning av antall branner i tunge kjøretøy på 5 prosent (+14 prosent i undersjøiske tunneler).

**Tunnellengde.** Høye mfl. (2019) finner ingen generell sammenheng mellom lengde og brannrisiko, men tunneler som er mellom fire og ti km lange har i gjennomsnitt omtrent tre ganger så mange branner per million kjøretøykilometer som tunneler som er under 300 meter lange. Forklaringen er trolig at de fleste undersjøiske tunnelene er i denne kategorien, og at disse er brattere. Av den grunn har de flere branner enn andre tunneler.

**Ulykker som årsaker til branner.** I henhold til «The Handbook of Tunnel Fire Safety», skyldes over 90 % (55 av 61 tilfeller) av brannene i vegtunneler trafikkulykker, særlig påkjøring bakfra (Beard mfl., 2005). Dette står i kontrast til Nævestad mfl. (2016) sin kartlegging, som fant at ulykker var årsak til omtrent 9 % av de studerte brannene og tilløpene. Den samme studien finner at ulykker i større grad var årsak til branner i lette biler enn i tunge biler.

### 1.3.2 Faktorer som påvirker risiko for tungebilbrann i bratte vegtunneler

I det følgende, nevner vi seks ulike faktorer som kan påvirke risikoen for brann i tunneler med høy stigningsgrad, som i hovedsak utgjøres av undersjøiske vegtunneler.

**1) Høy stigningsgrad og lengde med høy stigningsgrad.** Brannrisikoen stiger betydelig, både med økende stigningsgrad og med økende lengde av bratte stigninger i tunneler. Høye mfl. (2019) viser at antall branner øker til omtrent det tredobbelte når tunneler har en stigning på minst 5 prosent over en lengde på 6 km, i forhold til en ellers sammenlignbar tunnel uten stigning. For stigninger over 7 prosent øker brannrisikoen enda mer; i forhold til en tunnel uten stigning, har tunneler med en stigning over 7 prosent tre ganger så mange branner når den bratte stigningen går over 3 km, og 9,8 ganger så mange branner når den bratte stigningen går over 6 km.

**2) Tunnellengde.** En tredje faktor som tidligere har vært foreslått for å forklare høyere brannrisiko i undersjøiske vegtunneler, er tunnellengde. Undersjøiske vegtunneler er i gjennomsnitt fire ganger lengre enn norske vegtunneler generelt. Denne faktoren var imidlertid ikke signifikant i analysene til Høye mfl. (2019). Dette viser at det er stigningsgraden, og lengden på stigningsgraden, som er viktig.

**3) Trafikkmengde og andelen tunge kjøretøy.** En fjerde faktor som også må vurderes når man diskuterer høyere risiko for brann i tunneler med høy stigningsgrad, er trafikkmengde og andelen tunge kjøretøy. Vegtunneler med mye trafikk har flere branner (OECD, 2006), og tunge kjøretøy har en høyere risiko for brann i tunneler med høy stigningsgrad.. I analysene av faktorer som påvirker kjøretøybranner i vegtunneler, fant Høye mfl. (2019) at en økning i ÅDT på 10 % påvirker risiko for brann, men de fant ikke en signifikant sammenheng mellom økning i tungebilandel og risiko for brann. Dette er overraskende, siden tungebiler er overrepresenterte i branner i tunneler med høy stigningsgrad. Njå mfl. (2022) fant at en økning av andel tunge kjøretøy på 10 prosent medfører en økning av antall branner i tunge kjøretøy på 14 prosent i undersjøiske tunneler.

**4) Tungebilers bremses eller motor?** Nævestad og Blom (2023) antar at tungebiler har høyere risiko for brann i tunneler med høy stigningsgrad, på grunn av varmgang i bremses nedover og varmgang i motor oppover. Dette er antakelig årsaken til at lengden med stigning er avgjørende. I kartleggingen av kjøre-

tøybranner i vegtunneler for perioden 2012-2015, så vi nærmere på årsakene til branner og tilløp i tunneler med høy stigningsgrad som involverte tungbiler (Nævestad mfl. 2016). I årene 2012-2015 var det 63 branner og tilløp i tunneler med høy stigningsgrad i Norge. I alt 23 av disse involverte tungbiler. Da vi så nærmere på disse 23 hendelsene, så vi at 10 av hendelsene på ulike måter kunne relateres til tekniske problemer knyttet til motoren: fem var knyttet til motor, for eksempel turbo og fem var knyttet til oljesøl, oljelekkasje, annen lekkasje fra motor). Kun to av hendelsene var knyttet til hjul (bremses, hjullager, dekk). To hendelser var knyttet til annen teknisk årsak, mens ni hadde ukjent årsak.

**5) Kjøretøytype, alder og standard.** En femte faktor som kan kaste lys på brannrisikoen i tunneler med høy stigningsgrad er kjøretøytype, alder og standard. Safetec (2011) foreslår i en rapport at de utenlandske (spesielt østeuropeiske) lastebilene i Norge gjerne har to aksler, svakere motorer og at de generelt er eldre enn norske biler. Den antatt lavere tekniske standarden på europeiske lastebiler fra de nye EU-landene er også fremhevet i en OECD rapport (2006: 12) om risiko for kjøretøybrann i EU. Denne rapporten fremholder at andelen eldre lastebiler er høyere i de nyeste EU-medlemslandene i Øst-Europa. Det har også blitt påpekt at eldre europeiske, tunge kjøretøy ofte mangler motorbrems, såkalt retarder (Buvik, Amundsen & Fransplass 2012). Disse studiene er imidlertid relativt gamle, og det er behov for oppdatert kunnskap.

Kravene til de utenlandske lastebilene øker når de brukes med tung last i kupert terreng. Dette gjelder skandinavisk terreng generelt, men spesielt i (undersjøiske)tunneler med lange distanser med høy stigningsgrad. I en rapport fra 2011, påpeker Safetec at skandinaviske lastebiler er bedre tilpasset skandinaviske topografi. De er utstyrt med tre aksler, har kraftigere motorer, og bedre (retarder) bremses, noe som reduserer risikoen for at de blir overbelastet i kupert skandinavisk terreng (Safetec, 2011). På den annen side må det bemerkes, at tunge kjøretøy fra EU har en lavere maksimal belastning enn norske tunge kjøretøy, 40 mot 50 tonn (Buvik, 2012). Dette skal redusere risikoen for overbelastning i kupert terreng.

**6) Tungbiljåførers kompetanse og erfaring.** En sjettede faktor som kan være viktig for å forklare høyere risiko for brann i tunneler med høy stigningsgrad er tungbiljåførers kompetanse og erfaring. Erfaring med, og kompetanse på, det å kjøre på norske veger innebærer kanskje at man er bedre til å bruke bremsene korrekt når man kjører i nedoverbakke i vegtunneler, noe som minsker risikoen for overopphetede bremses (Nævestad og Blom 2023). Kanskje er de også bedre på å kjøre med korrekt turtall oppover.



## 2 Metode

### 2.1 Litteraturstudie

Målene med litteraturstudien har vært å:

- 1) Identifisere studier som undersøker sammenhengen mellom kjøretøybranner i vegtunneler og høy stigningsgrad, fortrinnsvis for tunge kjøretøy, for å vurdere om disse sier noe om knekkpunkter, der risikoen for brann øker betraktelig.
- 2) Identifisere studier som sier noe om tiltak for å forebygge tunge kjøretøys brannrisiko i vegtunneler med høy stigningsgrad.

#### 2.1.1 Søkestrategi og nøkkelbegreper

I vårt litteratursøk har vi brukt ord knyttet både til vegtunneler, brann, tunge kjøretøy og høy stigningsgrad og undersjøiske vegtunneler. Vi har brukt generelle stikkord siden det ikke finnes mange studier på dette, og for å minimere risikoen for å gå glipp av relevante studier.

Vi søkte i ScienceDirect, TRID-databasene, Google Scholar og Google. Kombinasjonen av nøkkelord er presentert i tabell 2.1. Vi søkte etter kombinasjoner av ordene i tabell 2.1 i nøkkelbegreper, tittel og sammendrag i de vitenskapelige databasene og også generelt.

Tabell 2.1: Kombinasjon av nøkkelbegreper som ble brukt i litteratursøk.

Emne	Nøkkelbegreper
Vegtunnelbrann	"Road tunnel fire" kombinert med "heavy vehicle", "truck", "lorry", "bus"
Undersjøiske og bratte tunneler	"Subsea tunnel", "Underwater tunnel", «Steep road tunnel», «high gradient road tunnel» kombinert med "vehicle fire», «truck», «bus»
Tiltak	«Road tunnel fire prevention», "tunnel fire prevention measures", "tunnel fire prevention" kombinert med "steep tunnel", "heavy vehicle", "subsea tunnel"

#### 2.1.2 Kriterier for å inkluderes eller ekskluderes i studien

Vi brukte fem kriterier når vi vurderte hvilke publikasjoner som skulle inkluderes:

1. Vitenskapelig publisering (vitenskapelig rapport, bokkapittel eller artikkel),
2. Utgitt etter 1995,
3. Empirisk studie som kartlegger frekvensen eller risikoen for kjøretøybranner i vegtunneler, for tunge kjøretøy i tunneler med høy stigningsgrad.
4. Empirisk studie som kartlegger effekten av tiltak for å forebygge kjøretøybranner i tunge kjøretøy i vegtunneler med høy stigningsgrad.

#### 2.1.3 Utvalg av relevante studier

Studier som oppfyller disse fem kriteriene, ble identifisert gjennom en prosess i to trinn. I det første trinnet så vi etter studier som faktisk beregnet risikoen eller brannraten for lette eller tunge kjøretøy i vegtunneler med høy stigningsgrad. Dette handlet om å sortere ut studier som ikke handlet om risiko for brann. I det andre trinnet fokuserte vi på ulike tiltak som kan være relevante for å forebygge branner i tunge kjøretøy i bratte vegtunneler. Fokus her var å sortere ut studier som ikke sier noe om effekt av tiltak, eller erfaringer med tiltak basert på empiriske data. Vi leste sammendrag og alle tekstene eller deler av dem, som resultatkapitler, for å undersøke dette. Til slutt la vi også til studier som vi hadde identifisert på andre måter enn gjennom litteratursøket og de nevnte søkeordene. Dette var studier som

vi var kjent med fra andre prosjekter, eller som vi fant ved å undersøke referanselistene i de identifiserte studiene.

## 2.2 Modeller for å beregne normale antall branner

### 2.2.1 Datagrunnlag

Den aktuelle studien er en oppdatering av studien til Høye mfl. (2019) som er basert på data over branner og tilløp i norske vegtunneler i perioden 2008-2015. Nævestad og Blom (2023) har oppdatert statistikken over branner og tilløp i vegtunneler med seks år, slik at det foreligger statistikk for årene 2008-2021, for både tunge og lette kjøretøy. Vi har her oppdatert datafilen som ligger til grunn for brannmodellene til Høye mfl. (2019). Følgende ting er oppdatert:

- Branndata er tatt med fram til 2021, fra Nævestad og Blom (2023).
- Informasjon om trafikkmengden er oppdatert med informasjon fra 2022. I den forrige datafilen hadde de fleste tunneler trafikkmengdeinformasjon fra 2017, og trafikkmengde i tidligere år ble beregnet med trendjustering. I den aktuelle datafilen har vi beregnet trafikkmengden for årene mellom 2017 og 2022 som lineær trend.
- Vi tar med informasjon om hvorvidt tunnelene er undersjøiske; undersjøisk tunnel inngår i modellene som dummyvariabel (undersjøisk / ikke undersjøisk tunnel).

Tunneler som er åpnet etter 2015 (84 tunneler), inngår ikke i analysene. For disse tunnelene foreligger ikke den detaljerte informasjonen om variablene som inngår i modellberegningene. For å vurdere hvorvidt resultatene kan være påvirket av at disse tunnelene er utelatt, har vi beregnet gjennomsnittlige antall branner per mill. kjøretøykilometer, både i tunnelene som inngår i analysene og for de nye tunnelene. Detaljerte resultater finnes i vedleggstabellen V1.6. Når man ser på branner i 2016 og senere år, har de nye tunnelene som ikke inngår i analysene, omtrent like mange branner per mill. kjøretøykilometer som tunnelene som inngår i analysene. Dette gjelder både tungbilbranner og øvrige branner, og både undersjøiske og andre tunneler, med ett unntak. De nye undersjøiske tunnelene hadde ingen tungbilbranner. Hadde vært én tungbilbrann i en av de nye undersjøiske tunnelene, hadde det også vært like mange tungbilbranner per mill. kjøretøykilometer i de nye undersjøiske tunnelene som i de undersjøiske tunnelene som inngår i analysene.

For å vurdere mulige «knekkpunkter» i sammenhengen mellom stigninger og branner (dvs. stigningsgrader hvor risikoen for brann øker betydelig), har vi undersøkt hvordan den maksimale stigningsgraden i tunnelene og lengden med bratte stigninger henger sammen med antall branner. Vi har gjort ulike typer analyser:

- **Branner per mill. kjøretøykilometer:** Her har vi beregnet antall branner per million kjøretøykilometer og sammenlignet ulike grupper av tunneler (f.eks. tunneler med ulike maksimale stigninger).
- **Modellberegninger:** Her har vi beregnet brannmodeller som predikerer antall branner per tunnel, ut fra en rekke egenskaper ved tunnelene. Relevante tunnelegenskaper som er tatt med i modellene, utenom stigning, er bl.a. fartsgrense, antall løp, trafikkmengde, andel tunge kjøretøy og hvorvidt tunnelen er undersjøisk. Dette er de samme variablene som i Høye mfl. (2019), kun undersjøisk var ikke med i 2019. Vi har beregnet separate modeller for ulike stigningsvariabler.

Alle analysene er gjort både for det totale antall branner og for antall tungbilbranner.

Deskriptiv statistikk med generell informasjon om tunnelene (bl.a. trafikkmengde, trafikkarbeid, antall branner) er vist i vedlegg 1.

## 2.2.2 Negativ binomial regresjon og statistisk signifikans

De statistiske modellene beregner normale antall branner i norske vegtunneler. Med normale antall menes gjennomsnittlige antall i tunneler med visse egenskaper, bl.a. en viss lengde, trafikkmengde, fartsgrense mv. Modellene er basert på Negative Binomial (NB) regresjon. Analyseenheter i alle modellene er én tunnel i ett år. I det følgende, beskriver vi modellformen og de enkelte prediktorvariablene, basert på Høye mfl. (2019).

Modellformen for negativ binomial (NB) er:

$$E(n) = e^{\sum_i \text{Prediktor}_i * \text{Koeff}_i}$$

$E(n)$  er det predikerte (normale) antall branner eller ulykker, prediktorene er trafikkmengden og ulike tunnelegenskaper,  $i$  er subskript for prediktorene.

**Negative binomialmodeller** tar hensyn til overspredning i dataene, dvs. at spredningen er større enn man ville forvente hvis fordelingen av antall ulykker på enkelte vegsegmenter hadde fulgt en poissonfordeling. En negativ binomialfordeling er bestemt av to parametere, gjennomsnittet og overspredningsparameteren. Overspredningsparameteren er beregnet som en variabel (istedenfor fast) parameter, dvs. at det også er definert prediktorer for overspredningsparameteren (tunnellengde og trafikkmengde), og at det beregnes koeffisienter for disse prediktorene. Dermed er det tatt hensyn til at overspredningen varierer med tunnellengden, og man unngår en rekke problemer som kan oppstå ved bruk av en fast overspredningsparameter (Geedipally mfl., 2009; Hauer, 2001; Lord & Park, 2008; Miaou & Lord, 2003).

De fleste prediktorvariablene i modellene er **dummyvariabler** (dvs. at variabelen har en verdi på enten null eller én). Fordelen med dummyvariabler er at man kan fange opp ikke-lineære sammenhenger mellom en variabel (f.eks. fartsgrenser eller brann-/ulykkesår) og antall branner eller ulykker, enn om man hadde definert én tallvariabel.

For dummyvariabler kan koeffisientene direkte brukes til å beregne endringen av den avhengige variabelen som en funksjon av prediktorvariabelen. Det relative antall branner på veger med stigning  $X$  i forhold til veger med referansestigning (flatt, dvs. under 2 %) beregnes som:

$$\text{Rel. ant. branner} = e^{\text{Koeff.}}$$

Koeff. er koeffisienten for stigning  $X$ . Hvis f.eks. koeffisienten for stigning 5 % er 0,128, betyr dette at tunneler med stigning 5 % har  $e^{0.128} = 1,128$  ganger så mange branner som veger med stigning under 2 % (hvis alt annet er likt).

**Trafikkmengden** inngår som  $\ln(\text{ÅDT})$  i modellene. Det relative antall branner i en tunnel med trafikkmengde  $X$ , i forhold til en tunnel med trafikkmengde  $Y$ , kan man beregne som en funksjon av trafikkmengdene  $X$  og  $Y$ , samt koeffisienten for  $\ln(\text{ÅDT})$ :

$$\text{Rel. ant. branner} = \frac{e^{\ln(X) * \text{Koeff}}}{e^{\ln(Y) * \text{Koeff}}}$$

I tillegg inngår andelen tunge kjøretøy som en egen prediktorvariabel i modellene.

**Statistisk signifikans:** De statistiske modellene viser for de enkelte prediktorene hvorvidt de er statistisk signifikante. Hvis et resultat for en prediktorvariabel er statistisk signifikant, betyr dette at resultatet ville vært svært usannsynlig, dersom denne prediktorvariabelen i realiteten ikke har noen effekt. Hvorvidt resultater er statistisk signifikante, avhenger både av hvor stor effekten man finner, er, og hvor stort datagrunnlaget er. Er datagrunnlaget lite, hvis det for eksempel kun er veldig få branner i en gruppe av tunneler, må effekten være veldig stor for at resultatet blir statistisk signifikant. Har man derimot et svært stort datagrunnlag (her: mange branner), vil selv en veldig liten effekt kunne bli statistisk signifikant. Når vi tolker resultater, ser vi derfor ikke bare på hvorvidt de er statistisk signifikante, men vi tar også hensyn til hvor store effektene faktisk er.

### 2.2.3 Tunnelene

Informasjon om alle tunnelene foreligger fra vegkart<sup>2</sup>. Her er det for hvert tunnellop definert hvor det ligger (fylke, veg, hovedparsell, fra meter og til meter).

Analyseenheten i modellene er én tunnel (inklusive ev. rundkjøringer i tunnelen) eller én rampe. Én tunnel kan bestå av flere tunnellop som kan ligge parallelt eller etter hverandre. Tunnellopene er i analysene her aggregert til tunnelnivå, som følgende:

- **Parallele løp (toløpstunneler)** er slått sammen. Ideelt sett hadde hvert av de parallelle løpene vært en egen analyseenhet, men det er ikke entydig definert i hvilket løp brannene har skjedd. Når lengden er forskjellig mellom de to løpene, er gjennomsnittet beregnet. ÅDT i toløpstunneler gjelder alltid begge løpene samlet. I Operatunnelen er alle løpene slått sammen, unntatt ett sekundærløp ved Bjørvika. Fosskollentunnelen som er en treløpstunnel (ett av løpene er et krabbefelt) inngår også i kategorien «toløpstunnel», og alle tre løpene er slått sammen.
- **Løp som ligger rett etter hverandre** er slått sammen (dette er noen ganger tilfelle når tunneler har blitt forlenget).
- **Løp som er knyttet sammen med rundkjøringer**, er for det meste slått sammen. Trearmede tunneler med en rundkjøring i midten hvor alle tre løpene er slått sammen, er Butunnelen og Karmøytunnelen. I Tromsø er Sentrumstangenten, Langnestunnelen og Breivik (som er knyttet sammen med rundkjøringer) derimot ikke slått sammen, fordi tunnelene har svært ulik trafikkmengde. De to rundkjøringene tilhører i analysene henholdsvis Breivik og Sentrumstangenten.
- **Ramper** inngår ikke i analysene. Ramper var egne analyseenheter i studien i 2019.

Informasjon om tunnelenes **åpningsår** er funnet i vegkart. Når informasjonen mangler i vegkart, er den funnet med hjelp av internettsøk (mest på wikipedia). Tunnelene inngår i alle analysene fra året etter åpningsåret, eller til året før stengning, dersom tunnelen ble stengt i analyseperioden. Når det ble gjort store endringer, inngår tunnelen kun fra året etter at endringene ble gjort (f.eks. etter at tunnelen ble utvidet i lengden eller når det ble bygd et nytt løp).

Tunnelenes **lengde** er beregnet ut fra vegreferansene (differanse mellom «til meter» og «fra meter»).

### 2.2.4 Data

Alle analysene er gjort på tunnelnivå, dvs. at én tunnel i ett år er én analyseenhet. For toløpstunneler er begge løpene slått sammen til én analyseenhet (dette fordi branner i mange tilfeller ikke lar seg tilordne ett av løpene). Det samme gjelder tunneler med flere løp som er knyttet sammen med en rundkjøring. Følgende tabell viser en oversikt over variablene som inngår i modellberegningene.

---

<sup>2</sup> <https://www.vegvesen.no/vegkart/>

Tabell 2.2: Oversikt over variablene som inngår i modellberegningene for tunnelbranner.

	Forklaring
<b>Avhengig variabel</b>	
▪ <b>Branner</b>	Branner og tilløp til brann.
○ <b>Brann</b>	Involverer åpen flamme.
○ <b>Tilløp til brann</b>	Røyk uten flamme (vann damp, mye eksos og lignende som ikke kunne ha utviklet seg til brann, inngår ikke i definisjonen).
<b>Eksponeeringsvariabler</b>	
▪ <b>Tunnellengde</b>	Tunnellengde i antall meter; beregnet ut fra vegreferansen i vegkart (avstand mellom første og siste meter). Tunnellengden inngår i modellene som «eksponeeringsvariabel» (Stata-terminologi), dvs. at koeffisienten settes lik én i alle modellene.
▪ <b>ÅDT</b>	Årsdøgntrafikk (ÅDT); gjennomsnittlig antall kjøretøy per døgn (omfatter alle motorkjøretøy). Prediktorvariabelen for ÅDT er i alle modellene den naturlige logaritmen av ÅDT ( $\ln(\text{ÅDT})$ ).
▪ <b>Andel lange kjøretøy</b>	Andel lange kjøretøy i prosent (kjøretøy med en lengde på 5,6 meter eller mer). Dette er det nærmeste man kommer andelen tunge kjøretøy.
<b>Prediktorvariablene</b>	
▪ <b>År</b>	Året da brannen skjedde
▪ <b>Type tunnel</b>	To- vs. ettløpstunnel (dummyvariabel).
▪ <b>Stigning</b>	<i>(kun én av stigningsvariablene per modell)</i>
○ <b>Meter med 5/7 prosent eller mer stigning</b>	Antall meter i tunnelen med stigning over henholdsvis 5 og 7 prosent (to kontinuerlige variabler, mangler for noen tunneler).
○ <b>Maks. stigning</b>	Maksimal stigning i tunnelen i prosent.
○ <b>Maks. stigning over 5/7 prosent</b>	Maksimal stigning i tunnelen er større enn eller lik (vs. mindre enn) 5% eller 7% (to dummyvariabler, definert for alle tunnelene).
○ <b>Maks stigning over 2/3/4/5/6/7/8 prosent</b>	Maks stigning i tunnelen er større enn eller lik (vs. mindre enn) 2/3/4/5/6/7/8 prosent (dummyvariabler); definert ut fra variabelen Maks. stigning.
▪ <b>Høyde</b>	Tunnelens skiltede høyde over 4,5 meter (fri høyde) eller lavere (dummyvariabel; informasjon mangler for noen tunneler).
▪ <b>Rampe i tunnel</b>	Minst én rampe (vs. ingen rampe) i tunnelen (dummyvariabel).
▪ <b>Undersjøisk tunnel</b>	Undersjøisk vs. ikke undersjøisk tunnel (dummyvariabel)

## 2.2.5 Tunnelegenskapene

Informasjon om eksponeerings- og prediktorvariablene (tabell 2.2) er for det meste hentet fra vegkart. Manglende informasjon ble så langt som mulig funnet med hjelp av Google, wikipedia eller Google Maps. Informasjon om *stigninger* er supplert av informasjon fra Statens vegvesens regioner; dette fordi det er en del feil i informasjonen om stigninger i vegkart. Informasjon om *toløpstunneler i by vs. på land* er skaffet av Vegdirektoratet. De fleste tunnelegenskapene gjelder året hvor den mest aktuelle informasjonen foreligger fra (2017 eller 2022).

## 2.2.6 Trafikkmengde

Trafikkmengden i tunnelene er oppgitt som

- ÅDT: Samlet trafikkmengde (alle motorkjøretøy)
- Andel «lange kjøretøy» (kjøretøy med en lengde på minst 5,6 meter).

**Trafikkmengde i toløpstunneler:** I toløpstunneler gjelder trafikkmengde begge løpene til sammen. Siden trafikkmengden for toløpstunneler kan være oppgitt enten per løp eller for begge løpene samlet, har alle toløpstunnelene blitt sjekket manuelt i vegkart for å sikre at den riktige trafikkmengden er brukt.

**ÅDT:** Informasjon om trafikkmengden (ÅDT) foreligger for de fleste tunnelene fra 2017 og 2022. For noen tunneler foreligger informasjon om ÅDT kun fra ett år. For tunneler hvor informasjon om ÅDT i

2017 mangler, har vi benyttet informasjon fra et tidligere år innenfor analyseperioden. For år uten informasjon om ÅDT, har vi beregnet ÅDT med hjelp av trendjustering:

- (1) For år før det første året med foreliggende ÅDT-informasjon er ÅDT beregnet ut fra en forutsetning av trafikkmengden har endret seg like mye som det totale trafikkarbeidet på norske veier. Dette er detaljert beskrevet i Høye mfl. (2019).
- (2) For tunneler hvor det foreligger ÅDT-informasjon fra to år (de fleste tunneler), er ÅDT mellom disse årene beregnet som lineær trend.
- (3) For tunneler hvor det ikke foreligger ÅDT-informasjon fra etter 2017, er ÅDT i senere år beregnet med samme trendjustering som beskrevet i punkt (1).

**Andel lange kjøretøy:** For år uten trafikkmengdeinformasjon er andel lange kjøretøy beregnet som følgende:

- (1) For år før det første og etter det siste året med foreliggende trafikkmengdeinformasjon, er andel lange kjøretøy antatt å være uendret over tid (samme prinsipp som i analysene fra 2019).
- (2) For år hvor det foreligger trafikkmengdeinformasjon fra to ulike år, er andelen lange kjøretøy mellom disse årene beregnet som lineær trend (for de aller fleste tunnelene med informasjon fra to ulike år er andelen lange kjøretøy uendret).

## 2.2.7 Branner

Informasjon om hvor mange branner det har vært i hvilke tunnellop og i hvilke år, er hentet fra Nævestad og Blom (2023) sin kartlegging av branner i norske vegtunneler i perioden 2008-2021. Denne studien finner at det var 613 kjøretøybranner og tilløp i norske vegtunneler i perioden 2008-2021. Nævestad og Blom (2023) fremhever særlig fire forhold i sin kartlegging:

- Brannene og tilløpene til brann involverer som regel ikke skade på personer eller tunnel
- Tunge kjøretøy er overrepresentert i vegtunnelbranner
- Årsakene til branner i tunge og lette kjøretøy er ulike
- Undersjøiske vegtunneler er betydelig overrepresentert i statistikken over branner og tilløp i kjøretøy i norske vegtunneler.

Branner og tilløp til brann inngår i analysene. Brann defineres som alt som involverer åpen flamme, for å minimere skjønnsutøvelsen ved hvert tilfelle. Tilløp til brann defineres som røyk uten flamme. Vi utelukker hendelser, for eksempel med røykutvikling, hvor man i ettertid skjønner at det er åpenbart at man ikke kunne fått en brann. For eksempel ved damp grunnet avkjøling av luft fra havet, damp fra en radiator som har sprunget lekk, mye eksos i en tunnel og så videre. Det er ikke skilt mellom branner og brann-tilløp fordi antallet i hver enkel kategori ville vært for liten. Begge omtales for enkelhetens skyld som «branner». Brannene er hentet inn i datafilen med hjelp av identifikasjonsnummeret for tunnellop.

## 2.3 Kvalitative intervjuer

Vi har gjennomført kvalitative dybdeintervjuer med 23 personer. Hensikten med intervjuene har vært å få innsikt i følgende temaer: 1) Årsakssammenhenger mellom stigning i tunneler og tungbilbranner, 2) Mulige kompenserende tiltak, og 3) Utviklingstrekk som kan ha bidratt til endringer i brannrisikoen i tunneler med høy stigningsgrad i perioden 2008-2021, og forventede utviklinger de neste 10-20 år. Kvalitative dybdeintervjuer er særlig egnet når det er behov for dybdekunnskap om et tema (Kvale & Brinkmann, 2015). Intervjuene har blant annet vært nyttige for å kartlegge ulike aspekter ved mekanismene som forklarer tunge kjøretøys brannrisiko i vegtunneler med høy stigningsgrad, i samspillet mellom trekk ved sjåføren og kjørestil (mye bremsing eller akselerasjon i stigning, for eksempel hvordan man kjører før man er inne i en tunnel, fart osv.), trekk ved kjøretøyet og utstyr (for eksempel kjøretøyalder, kvalitet på vedlikehold, hvorvidt noen typer kjøretøy som er mer utsatt enn andre), trekk ved veg og infrastruktur (stigningsgrad og lengde på stigning, forhold ved vegen osv. før man kommer til

tunnelen). Intervjuene har også gitt en bred oversikt over relevante tiltak og utvikling de siste 20 årene og potensielle utviklingstrekk 20 år fremover i tid.

De kvalitative intervjuene ble gjennomført høsten 2023. Majoriteten av intervjuene ble gjennomført digitalt via plattformen Microsoft Teams. Informantene fikk forespørsel om deltagelse via e-post. Informert samtykke ble innhentet i forkant av intervjuene. Det ble benyttet en semistrukturert intervjuguide, som innebærer at intervjuet struktureres rundt noen forhåndsdefinerte temaer. Guiden er veiledende, i den forstand at både spørsmål og rekkefølgen på spørsmålene tilpasses intervjusituasjonen, slik at det er mulig å følge opp nye opplysninger eller temaer som dukker opp underveis (se Vedlegg 5). Intervjuguiden inneholder spørsmål om: Årsaker til kjøretøybranner i vegtunneler. Forklaringer på utvikling i tungebilbrannene i bratte tunneler. Forskjeller mellom de fire mest brannutsatte og andre undersjøiske tunneler. Mulige kompenserende tiltak og utbredelse av disse i ulike tunneler og effekter på brannrisiko. Utvikling i kvaliteten på tunge kjøretøy over tid, med fokus på forhold som reduserer risikoen for brann. Utvikling for tungebilførere over tid, med fokus på kompetanse og erfaring mht. hvordan man skal kjøre optimalt i bratte tunneler. Tiltak i/ved tunneler som påvirker brannrisiko. Informasjon om, og erfaringer fra, vegtunneler i Europa som har avanserte målestasjoner ved tunnelinngangene som alle tunge kjøretøy må passere på veg inn i tunnelen.

### 2.3.1 Informantene

Vi har intervjuet 23 fagpersoner (inkludert gruppeintervjuer med diskusjon) som har gitt nyttig informasjon for å besvare spørsmålene i alle tre delene av prosjektet. Vi har gjennomført to digitale fokusgruppeintervjuer med til sammen fire personer. Bakgrunnen for å gjennomføre fokusgrupper, er at de har involvert flere personer fra samme organisasjoner. Informantene er personer fra bransjeorganisasjoner, tungbilsjåførere, forsikring, nasjonal ulykkesgranskning, bilprodusenters ulykkesgranskning, branninspektører fra brannvesen i nærheten av brannutsatte vegtunneler, tunnelforvaltere, lastebilprodusenter, lastebilmekanikere, personer involvert i tungbilopplæring og personer som er eksperter på analyse og tiltak i europeiske tunneler som har hatt sterkt fokus på brannforebygging (St. Gotthart, Tauern, San Bernadino, Mont Blanc). De sistnevnte er enten tunnelforvaltere eller personer som er involvert i brannsikkerhetsarbeidet i disse tunnelene.

### 2.3.2 Tematisk analyse

Vi gjennomførte en tematisk analyse av intervjuene for å identifisere 1) Årsakssammenhenger mellom stigning i tunneler og tungebilbranner, 2) Mulige kompenserende tiltak, og 3) Utviklingstrekk som kan ha bidratt til endringer i brannrisikoen i tunneler med høy stigningsgrad i perioden 2008-2021, og forventede utviklinger de neste 10-20 år. Tematisk analyse er en systematisk metode for å identifisere hovedtemaer i tekstmateriale (Braun & Clarke, 2006). I første trinn av prosessen ble intervjuene lest nøye flere ganger, og deretter kodet. Kodene ble så systematisert og ordnet i grove kategorier. I det neste trinnet ble de resulterende kategoriene gjennomgått. Noen kategorier beskrev samme overordnede begrep og ble slått sammen, og andre utmerket seg som underkategorier under en større overordnet faktor.

## 2.4 Årsaksimputering

Imputering er å estimere data der et eksisterende datasett har manglende data. Den vanligste måten å gjøre dette på er å se på sammenhenger med andre data man har. Eksempelvis, om man ønsker å estimere gjennomsnittlig dekkslitasje blant et utvalg kjøretøy, men får kun tak i dekkslitasjedata på halvparten, men reiselengde på alle, og man ser det er en sterk sammenheng mellom dekkslitasje og reiselengde, kan man imputere dekkslitasje basert på reiselengde. Dette nye tallet er som regel et mye bedre estimat enn å anta at de dekkslitasjetallene man har gjelder for alle. Dette er fordi det er veldig sjelden tilfeldig hvilke datapunkter som mangler i et datasett. Selv om imputering aldri vil være like sikkert som



faktiske data, er det i praksis ofte umulig å skaffe komplette datasett, og imputering blir et nødvendig verktøy.

Imputering er brukt i mange typer offisiell statistikk for å kompensere for manglende data. Det brukes for eksempel av WHO for å estimere antall drepte i trafikken i land uten gode tall på dette (WHO, 2019), sykkeltrafikk i gater uten sykkeltellere (Egner & Weber, 2023), og effekten av behandling på pasienter som faller ut av kliniske studier før de er ferdige (Biering mfl., 2015). Det er sterke anbefalinger om at om datasettet man har har noen form for hull, bør man ikke kaste ut svarene med hull eller lene seg på de svarene man har, men heller imputere (Graham, 2009; Schafer & Graham 2002). En av de vanligste måtene å imputere på kalles multippel imputering (Rubin, 1987), og har fordelen av at den er veldig transparent med tanke på hvor usikkert hvert estimat er.

Fordi vårt datasett inneholder flere komplette variabler, men flere mangler årsak, kan vi bruke multippel imputering til å estimere hva årsaken til hver brannhendelse er. Dette vil gi oss en prosent sannsynlighet for at en brannhendelse vil ha en eller en annen type årsak. Selv om vi teknisk sett kan liste dette opp for hver brannhendelse, velger vi ikke å gjøre dette fordi vi har litt over 600 ulike brannhendelser. I stedet for rapporterer vi samlestatistikk. Imputeringen tar utgangspunkt i datasettet som beskrives i avsnitt 2.2.7. Vi genererte også 2 nye variabler i datasettet, «vintergrad» og «daggrad». Vintergrad representerer hvor «mye vinter» det var på denne tiden av året. Dette er operasjonalisert ved å ta antall måneder fra juni måned. Jo flere måneder fra juni måned, begge veier, jo mer vinter. Daggrad representerer hvor mye dag eller natt det var på branntidspunktet, målt i timer fra klokka 2 på natta på den respektive dagen.

Variabelen «daggrad» og «vintergrad» ble laget fordi disse kunne lages basert på dataene om tidspunkt, og på bakgrunn av en antakelse om at graden av vinter og natt er relatert til forekomsten av branner. Dette gir to ekstra variabler å imputere på, noe som generelt sett gir litt bedre imputeringer. Gode imputeringsmodeller avhenger av å bruke alle tilgjengelige data til å predikere det man forsøker å imputere. Alle variabler som har en sammenheng med det man forsøker å imputere (i dette tilfellet årsak), og er til stede for datapunkter med og uten data, bør være med i imputeringsmodellen. I datasettet er tid og dato registrert for alle hendelser, både de med og uten årsak. Fordi det er sannsynlig at tid på dagen og året har en sammenheng med forekomsten av branner, inkluderte vi disse i modellen.

Årsak «uklart» ble behandlet som manglende data. Med så få branner er det umulig å finne statistiske sammenhenger med andre variabler. Vi valgte et sett med variabler som burde ha en statistisk sammenheng med årsaker. Disse var brannomfang, daggrad, lengde på tunnelen, antall personbiler involvert, antall tungbiler involvert, skadeomfang på personer, år, om tunnelen var undersjøisk eller hadde høy stigningsgrad, og vintergrad. Fordi disse variablene både hadde noen manglende verdier selv, og disse manglende verdiene var spredt utover på en ikke-systematisk måte, forholdt vi oss til imputeringsmodeller som kunne håndtere dette. Fordi variablene ikke var eksklusivt lineære (eg. antall involverte personbiler er en telle-variabel, og årsak er kategorisk), landet vi en chained equation modell (MICE). Fordi 61% av brannhendelsene manglet årsaksforklaring, som betyr manglende data på 61 %, brukte vi 61 imputeringer (som anbefalt av Wulff & Jeppesen, 2017).



## 3 Del 1: Årsakssammenhenger

I dette kapittelet fokuserer vi på det første delmålet med studien, som er å kartlegge årsakssammenhenger mellom stigning i tunneler og tungbilbranner. Vi fokuserer på følgende spørsmål i kapittelet:

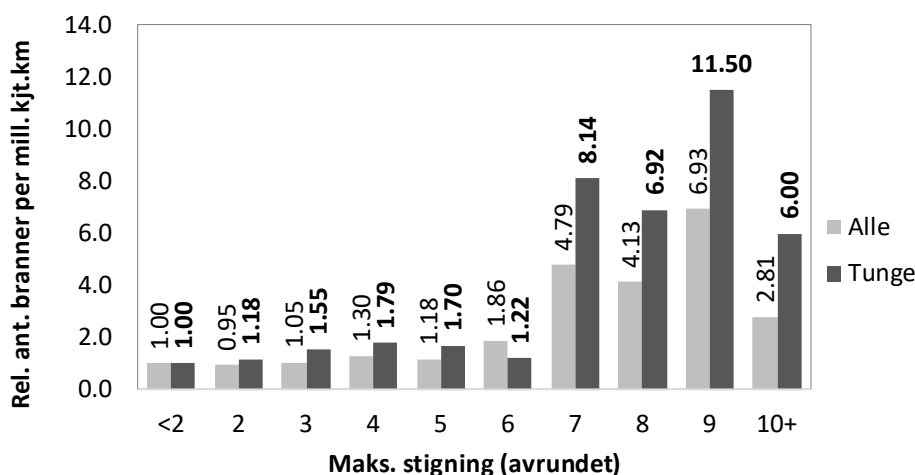
- 1a) Gir dagens kunnskapsgrunnlag støtte for terskelverdiene for stigning i tunnelforskriften? (dvs. 3% og 5%) Og 1b) Ser vi andre tydeligere «knekkpunkter» der frekvensen for brann eller tilløp til brann øker betydelig som en funksjon av stigning?
- 2) Hva forklarer tungbilbranner i vegtunneler hvor årsaken er kategorisert som «uklar»?
- 3) Hva forklarer det høye antallet branner og tilløp i de fire mest brannutsatte undersjøiske tunnelene i 2008-2021?

### 3.1 Terskelverdier for stigning

#### 3.1.1 Empirisk studie

##### *Maksimal stigningsgrad: Knekkpunkt ved 7 prosent maksimal stigning*

**Branner per mill. kjøretøykilometer:** Figur 3.1 viser relative antall branner per mill. kjøretøykilometer for alle kjøretøy og for tunge kjøretøy i 2008-2021 etter maksimal stigningsgrad i tunnelene. Relative antall branner er beregnet i forhold til «flate tunneler» hvor den maksimale stigningen er under 2 prosent. For eksempel har tunneler med en stigningsgrad på 7 prosent 8,14 ganger så mange tungbilbranner per mill. tungbilkilometer som flate tunneler, og de har 4,79 ganger så mange branner per mill. kjøretøykilometer totalt som flate tunneler.



Figur 3.1: Relative antall branner per million kjøretøykilometer etter maksimal stigningsgrad (maksimal stigningsgrad er avrundet; dvs. at f.eks. «2» inneholder stigninger fra 2,00 til 2,99 prosent).

Tunneler med en maksimal stigning mellom 3 og 6 prosent har flere branner enn flate tunneler, især flere tunge kjøretøybranner. Det er imidlertid ingen systematisk sammenheng mellom maksimal stigning og antall branner mellom 3 og 6 prosent. Dette betyr at vi ikke ser en gradvis økning i høyere og høyere risiko for kjøretøy brann for hver økning i maksimal stigning, f.eks. fra tre til fire eller fra fire til fem prosent.

Tunneler med en maksimal stigning på 7 prosent eller mer har derimot langt flere branner enn tunneler med mindre bratte stigninger. Også her er det tunge kjøretøybranner som øker mest. Det er likevel ingen klar sammenheng mellom stigningsgrad og antall branner ved stigningen over 7 prosent, f.eks. ser antall branner ut til å gå ned fra syv til åtte og fra 9 til 10 prosent stigning. Dette har antakelig sammenheng med datagrunnlaget, dvs. tunnelene i Norge. Det finnes ikke mange tunneler med stigninger over 7 prosent. Dermed vil de relative branntallene for tunneler med stigninger over 7 prosent i stor grad være påvirket av tilfeldigheter. Vi kan derfor ikke generalisere resultatene som gjelder ulike stigningsgrader over 10 prosent. For eksempel er det ingen grunn til å anta at tunneler med en maksimal stigningsgrad på 8 prosent er sikrere mht. branner enn tunneler med en maksimal stigning på 7 prosent. At tunneler med en maksimal stigning på 7 prosent eller mer har flere branner enn mindre bratte tunneler, er derimot et meget robust funn.

Hvorvidt man kan anta at maksimal stigningsgrad henger sammen med antall branner for stigninger under 7 prosent, er diskutert i følgende.

**Modellberegninger med dummyvariabler for maks. stigning:** Figur 3.2 viser resultatene fra modellberegninger hvor maksimal stigning er blant prediktorvariablene, i tillegg til en rekke andre tunnel-egenskaper, bl.a. hvorvidt tunnelene er undersjøiske. Til forskjell fra beregningene for antall branner per mill. kjøretøykilometer, kontrollerer modellberegningene for en rekke tunnelegenskaper («prediktorvariabler»). Det betyr at resultatene fra modellberegningene gjelder hvis man holder disse tunnelegenskapene konstant. Modellene kontrollerer også for antall kjøretøykilometer og tungbilandel. Dermed gjelder resultatene for «antall branner» fra modellberegninger ved uendret trafikkmengde. Hvis et resultat for eksempel viser at en type tunnel har «dobbel så mange» branner som en annen type tunnel, betyr det «dobbel så mange ved samme trafikkmengde, tungbilandel og dersom også øvrige tunnelegenskapene er like».

Vi har beregnet to modeller: én modell hvor tunneler er delt inn i tre grupper etter maksimal stigning (diagram til venstre) og én modell hvor tunnelene er delt inn i 8 grupper etter maksimal stigning (diagram til høyre).

Modellene med tre stignings-grupper (diagram til venstre i Figur 3.2) viser følgende:

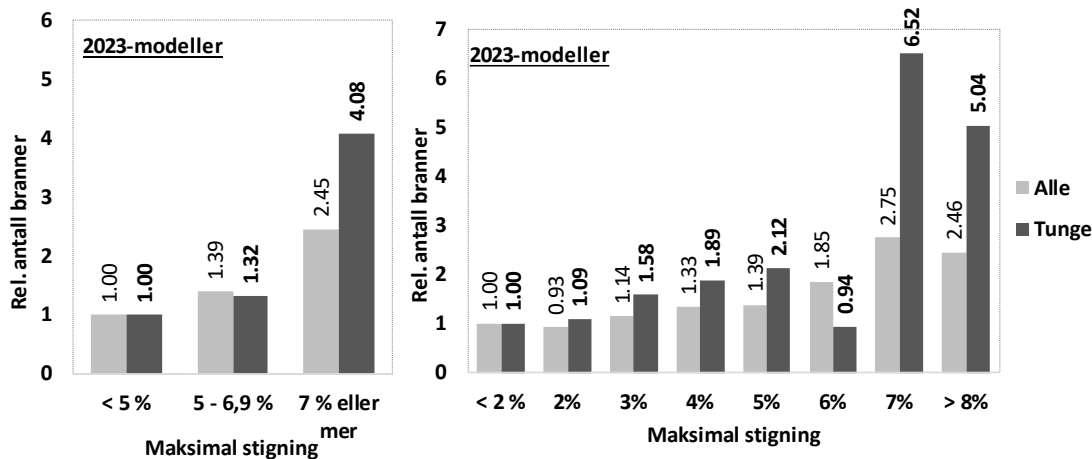
- Tunneler med en maksimal stigning på **7 prosent eller mer** har signifikant flere branner enn tunneler med maksimal stigning under 5 prosent: de har omtrent fire ganger så mange tungbilbranner og 2,45 ganger så mange branner totalt.
- Tunneler med en maksimal stigning på **5-7 prosent** har også **flere branner** enn mindre bratte tunneler, men færre enn tunneler med en maksimal stigning på 7 prosent eller mer. Forskjellen mellom tunneler med en maksimal stigning på 5-7 prosent og flate tunneler er omtrent like stor for alle og tunge kjøretøybranner, men statistisk signifikant kun for det totale antall branner. Det siste skyldes at det er få tunge kjøretøybranner i slike tunneler.

Koeffisientene for **undersjøisk tunnel** viser at undersjøiske tunneler har **flere branner** enn andre tunneler. Dette gjelder både det totale antall branner (+70 prosent, statistisk signifikant) og tunge kjøretøybranner (+33 prosent, ikke signifikant). Her er det kontrollert for hvorvidt tunnelene har en maksimal stigning på 5 eller 7 prosent eller mer. Det betyr at den maksimale stigningen i seg selv, ikke kan være hele forklaringen på den høye brannrisikoen i undersjøiske tunneler. Lengden på bratte stigninger er ikke kontrollert for i modellene, og kan følgelig være en del av forklaringen på effekten av undersjøiske (vs. andre) tunneler. Forklaringen på at undersjøiske tunneler har flere branner er, etter alt å dømme, at de har stigninger som er både lange og bratte. Det samme viser tidligere studier og andre analyser vi gjør i denne studien.

Modellene med 8 stigningsgrupper (diagram til høyre i Figur 3.2) viser omtrent det samme mønsteret som analysene for branner per mill. kjøretøykilometer. Vi har laget disse modellene for å kunne se nærmere på sammenhengen mellom ulike stigningsgrader og antall branner:

- Tunneler med stigninger mellom **3 og 6 prosent** har **flere branner** enn flate tunneler, men forskjellene er for det meste ikke store og nesten ingen av dem er statistisk signifikante. Resultatene tyder på at antall branner øker opptil en maksimal stigning på fem prosent. At det tilsynelatende er færre tungbilbranner i tunneler med en maksimal stigning på 6 prosent enn ved 5 prosent, skyldes antakelig tilfeldigheter i datagrunnlaget; det er ingen grunn til å anta at stigninger på seks prosent skulle være sikrere enn stigninger på 5 prosent.
- Tunneler med stigninger på **7-8 prosent eller mer** har signifikant **flere tunge kjøretøybranner** enn flate tunneler. Antall branner ved en maksimal stigning på over 8 prosent er noe lavere enn ved 7 prosent, noe som antakelig skyldes tilfeldigheter i datamaterialet. Tunneler med stigninger over 8 prosent har fortsatt langt flere branner enn tunneler med stigninger under 7 prosent.

At få resultater er statistisk signifikante og at ikke alle sammenhengene er helt konsistente, kan skyldes at det er relativt få branner i enkelte grupper. Er det få branner, må forskjeller være langt større for å bli statistisk signifikante enn når det er mange branner, og tilfeldigheter kan få større utslag. At ikke alle resultatene er signifikante, svekker altså ikke hovedkonklusjonene våre om at brannrisikoen øker med økende maksimal stigningsgrad, særlig for tunge kjøretøy.



Figur 3.2: Relative antall branner i modellberegninger med dummyvariabler for maksimal stigning (forklaringer se tekst).

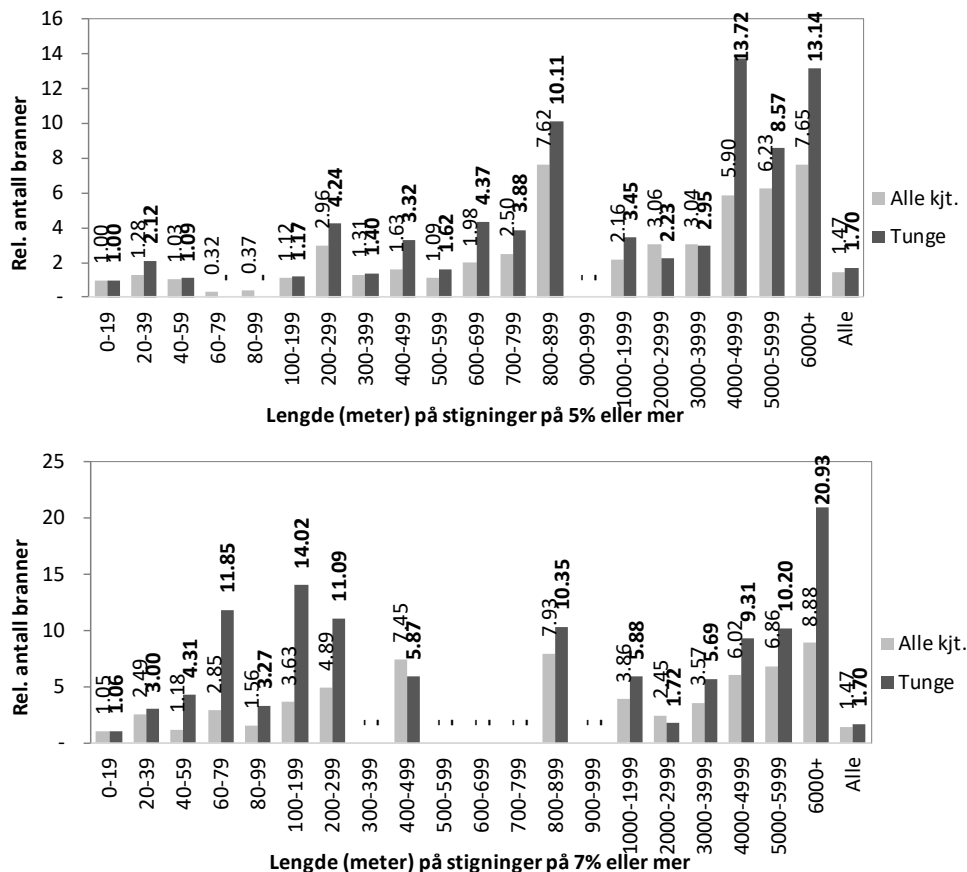
Høye mfl. (2019) presenterer også modeller hvor maksimal stigningsgrad inngår som numerisk variabel (**Feil! Fant ikke referanseilden.V1.3** i vedlegg 1). Her er det relative antall branner satt lik én for en maksimal stigning på 4 prosent (gjennomsnittet for ett- og toløpstunneler er 3,6 prosent). Figuren er basert på alle brannene, både i lette og tunge kjøretøy. Tilleggsanalyser som er gjort av Høye mfl. (2019) bekrefter at sammenhengen mellom maksimal stigningsgrad og antall branner ikke er lineær, dvs. at økningen av antall branner blir brattere, jo høyere stigningsgraden er i utgangspunktet.

**Oppsummering:** For å oppsummere, tyder resultatene for maksimal stigningsgrad på at det finnes et «**knekkpunkt**» for økende brannrisiko er ved **7 prosent**s stigning. Det er især tunge kjøretøybranner som øker ved maksimale stigninger over 7 prosent. Hvor bratte stigninger over 7 prosent er, ser ikke ut til å være av betydning, verken for tunge eller andre kjøretøybranner. Dette skyldes antakelig kjennetegn ved tunnelene i Norge, vi har ikke mange tunneler med ulike stigningsgrader over 7 prosent.

Tunneler med stigninger under 7 prosent har også flere tunge kjøretøybranner enn flate tunneler, men færre enn tunneler med stigninger over 7 prosent. For det totale antall branner er det en tendens til at brattere stigninger medfører flere branner.

### Lengden på bratte stigninger

**Branner per mill. kjøretøykilometer:** Figur 3.3 viser sammenhengen mellom lengden på bratte stigninger og relative antall branner, totalt og i tunge kjøretøy. Resultatene tyder på at det er flere branner i tunnelene med de lengste bratte stigningene (over 5 eller over 7 prosent). Sammenhengen mellom lengden på bratte stigninger og antall branner er likevel usystematisk, dvs. at antall branner ikke øker jevnt med økende stigningslengde. Dette skyldes nok datagrunnlaget vårt og at det er få tunneler og branner i noen av lengdekategoriene.



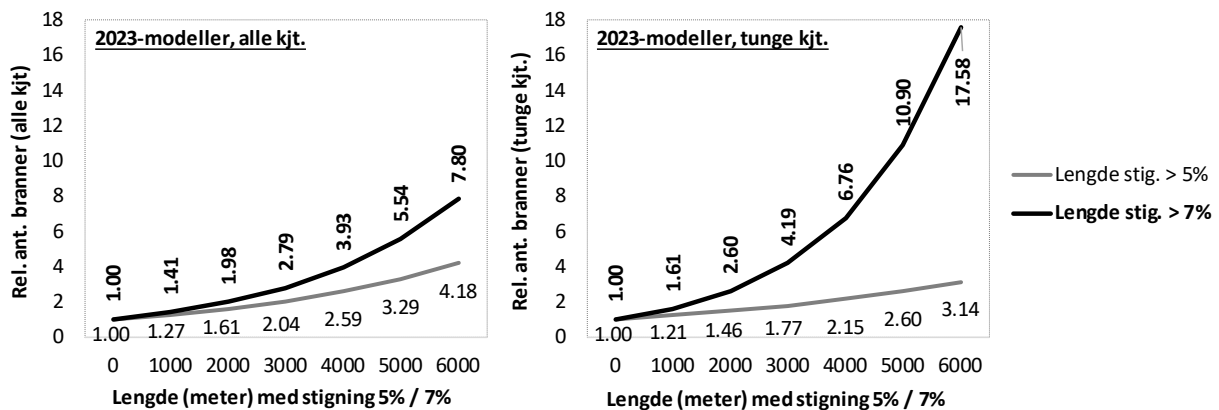
Figur 3.3: Relative antall branner per million kjøretøykilometer i tunneler etter antall meter med stigning på 5 prosent eller mer (øverst) eller 7 prosent eller mer (nederst); relative antall branner i tunneler med null meter stigning på 5 / 7 prosent eller mer er satt lik én i begge figurene.

**Modellberegninger:** Vi har beregnet modeller hvor lengden på bratte stigninger i tunnelen er blant prediktorvariablene. Forskjellen til modellene over, er at modellene over kun så på stigningsgraden, og ikke lengden på stigningsgraden. Vi har fire modeller som ser på lengden på stigningsgraden. To modeller (en for alle og en for tunge kjøretøybranner) hvor vi har regnet ut lengden på stigninger over 5 prosent i hver tunnel, og to tilsvarende modeller med lengden på stigninger over 7 prosent. Figur 3.4 viser resultatene. Alle modellene viser en klar sammenheng mellom lengden på bratte stigninger og antall branner. Antall branner er oppgitt som relative antall, hvor antall branner i tunneler med stigninger under 5 prosent er satt lik én. Kurvene som beskriver sammenhengen, er «glattet» statistisk, slik at man ikke kan benytte dem til å finne et «knekkpunkt» for en kritisk minstelengde på bratte stigninger.

Resultatene i Figur 3.4 viser følgende sammenhenger:

- Tunneler med **lengre bratte stigninger** har **flere branner** enn tunneler med kortere bratte stigninger.
- Sammenhengen er sterkere for **tunge kjøretøybranner** enn for alle branner. For tunge kjøretøybranner er effekten av økende lengde statistisk signifikant for stigninger over 7 prosent, men ikke for stigninger over 5 prosent. Det betyr at det især er stigninger over 7 prosent som øker risikoen for tunge kjøretøybranner. I modellen for alle branner er lengden på stigning statistisk signifikant fra en stigningsgrad på 5 prosent.
- For stigninger over 5 prosent er det ingen stor forskjell mellom alle og tunge kjøretøybranner; siden resultatene gjelder relative antall, betyr det at risikoøkningen i forhold til flate tunneler er omtrent like stor for tunge og alle kjøretøybranner.
- For stigninger over 7 prosent finner man en langt større risikoøkning for tunge kjøretøybranner enn for det totale antall branner.

Undersjøisk-variabelen er ikke-signifikant i begge modellene. Det betyr at «undersjøisk-effekten» som vi fant i modellene med maksimal stigningsgrad (flere branner i undersjøiske tunneler), trolig kan forklares med at undersjøiske tunnelene har lange og bratte stigninger. At man ikke finner noen effekt av undersjøisk tunnel i modellene med lengde på bratte stigninger, tyder på at det i hovedsak er de lange bratte stigningene i undersjøiske tunneler som forklarer den høye brannrisikoen.



Figur 3.4: Relative antall branner (alle kjt.: t.v.; tunge kjt.: t.h.); som funksjon av lengden med maksimal stigning over 5% / over 7%, beregnet med koeffisientene i brannmodell 1; relativt antall branner lik én i tunneler med maks. stigning under 5%.

Generelt er sammenhengen mellom lengde på bratt stigning og branner sterkere enn i 2019-modellene (Høye mfl. 2019). Dette til tross for at det i de aktuelle modellene (men ikke i 2019-modellene) er kontrollert for hvorvidt tunnelene er undersjøiske. Figur 3.4 viser at antall branner øker til omtrent det firedobbelte for alle kjøretøy når tunneler har en stigning på minst 5 prosent over en lengde på 6 km, i forhold til en ellers sammenlignbar tunnel uten stigning. For stigninger over 7 prosent øker brannrisikoen enda mer; i forhold til en tunnel uten stigning har tunneler med en stigning over 7 prosent over 6 km 7,8 ganger flere branner enn en flat tunnel. Tilsvarende forholdstall for tungebiler er 3,14 ganger økning i branner for 6 km med 5% og 17,6 ganger økning i branner for 6 km med 7% stigning. I 2019 rapporten var tilsvarende tall 2,7 og 13,7.

### 3.1.2 Litteraturstudie

Det første målet med litteraturstudien var å identifisere studier som undersøker sammenhengen mellom kjøretøybranner i vegtunneler og høy stigningsgrad, fortrinnsvis for tunge kjøretøy, for å vurdere om disse sier noe om knekkpunkter, der risikoen for brann øker betraktelig.

Vi har kun funnet én empirisk studie fra et annet land enn Norge som har undersøkt sammenhengen mellom brannrisiko og stigninger i tunneler. De mest detaljerte resultatene gir studien til Høye mfl., (2019). Resultatene fra denne studien er oppdatert med et utvidet datagrunnlag og nye analyser som beskrevet i avsnitt 3.1.1. Tabell 3.1 gir en oversikt over studiene vi har identifisert.

Tabell 3.1: Oversikt over studier som sier noe om sammenheng mellom stigningsgrad i vegtunneler og risiko for brann.

Studie og land	Metode	Hovedresultat
Casey (2020) Australia	Undersøker maksimal stigning og branner i vegtunneler.	Finner ikke sammenheng mellom maksimal stigning i tunneler og branner. Forklaringen er trolig at det kun er relativt korte bratte stigninger i tunnelene.
Høye mfl. (2019) Norge.	Utvikler modell for å beregne normalt antall branner, ulykker og havarier. Basert på branndata i Nævestad mfl. (2016).	Brannrisikoen i tunneler øker med økende lengde på bratte stigninger, især over 7 prosent, og med økende maksimal stigningsgrad. For tunge kjøretøy øker brannrisikoen allerede fra en maksimal stigning på 3-4 prosent, og brannrisikoen øker markant fra en maksimal stigningsgrad på 7 prosent eller mer
Ren mfl., (2019). Kina.	(ikke empirisk studie)	Det hevdes at det er en sammenheng mellom stigninger og branner. Dette er ikke dokumentert med konkrete resultater.
Nævestad og Blom (2023) Norge.	Kartlegging av alle branner og tilløp i vegtunneler i perioden 2008-2021 Deskriptive krysstabellanalyser.	5% av tunnelene i Norge har høy stigningsgrad (>5%) og disse har 38% av brannene og tilløpene i Norge.
Njå (2022) Norge	Regresjonsanalyser basert på poissonmodeller. Basert på branndata i Nævestad mfl. (2016).	Alle modellene viser at stigning, tunnellengde, tungbil-ÅDT og hvorvidt en tunnel er undersjøisk bidrar signifikant til kjøretøybranner i tunneler. Den viktigste prediktoren for branner i tunge kjøretøy er om tunnelen er undersjøisk.

De enkelte studiene er nærmere beskrevet i de følgende avsnittene.

**Casey (2020) sin studie fra Australia, fokuserer på maksimal stigning og branner.** Casey (2020) har undersøkt sammenhengen mellom stigningsgrad i tunneler og antall branner, men uten at det er rapportert konkrete resultater. Forfatterne oppsummerer at det ikke er funnet noen sammenheng. Tunnelene i denne studien har en maksimal stigningsgrad på 8 prosent, men det er kun korte strekninger med bratte stigninger. Nyere tunneler har bratte stigninger kun på ramper. Forfatterne antar at strekningene med bratte stigninger er for korte for å gi utslag på brannrisikoen.

**Høye mfl. (2019) sin studie fra Norge undersøker lengden på bratte stigninger og maksimal stigningsgrad og branner i tunge kjøretøy.** De finner at stigningsgraden den viktigste prediktoren for antall branner, i tillegg til trafikkmengde og tunnellengde. Brannrisikoen avhenger av både den maksimale stigningen i tunnelen og av lengden med bratt stigning. Det har ikke vært mulig å beregne virkningene av disse to variablene samtidig.

For lengden med bratt stigning viser resultatene at det i hovedsak er stigninger på 7 prosent eller mer som fører til økt brannrisiko. Dette er imidlertid ikke et «knekkpunkt». Også for mindre bratte stigninger øker brannrisikoen, men sammenhengen mellom lengden på den bratte stigningen og branner er svakere.

For maksimal stigningsgrad, uansett hvor lang strekningen med den bratteste stigningen er, viser resultatene at risikoen for branner i tunge kjøretøy begynner å øke allerede fra en stigning på 3-4 prosent. Da er brannrisikoen omtrent doblet i forhold til en helt flat tunnel. Ved brattere stigninger, er brannrisikoen omtrent uendret opptil en maksimal stigning på omtrent 6 prosent. Over 6 prosent øker brannrisikoen betydelig. I forhold til tunneler med en maksimal stigning på under 2 prosent, er det relative antall branner i tunge kjøretøy:

- 4,6 i tunneler med en maksimal stigning på 7-8 prosent.
- 10,5 i tunneler med en maksimal stigning på over 8 prosent.

Her kan man altså se to «knekkpunkter»: Stigninger på omtrent 3-6 prosent øker brannrisikoen til omtrent det dobbelte. Stigninger fra 7 prosent og brattere fører til langt større økninger av brannrisikoen.

**Ren mfl. (2019) sin studie fra Kina inneholder påstander om stigninger og brann.** Forfatterne hevder at bratte stigninger i tunneler fører til økt brannrisiko, men uten at de dokumenterer dette med konkrete resultater.

**Nævestad mfl. (2016) sin studie fra Norge har konklusjoner om stigningsgrad og stignings lengde.** Studien viser at undersjøiske vegtunneler og tunneler med stigninger på 5 prosent eller mer, har langt flere kjøretøybranner og brantilløp enn andre norske vegtunneler. Da rapporten ble skrevet, hadde Norge 33 undersjøiske vegtunneler og ytterligere 24 ikke-undersjøiske tunneler med bratte stigninger. Disse 57 bratte tunnelene utgjorde til sammen omtrent 5 prosent av vegtunnelene i Norge, og de hadde 42 prosent av brannene og brantilløpene i perioden 2008-2015.

**Njå mfl. (2022) sin studie fra Norge, fokuserer særlig på tungbilers brannrisiko i undersjøiske vegtunneler.** De undersøker hva som predikerer branner og tilløp i lastebiler i norske vegtunneler lengre enn 500 meter. Alle modellene viser at stigning, tunnellengde, tungbil ÅDT og hvorvidt en tunnel er undersjøiske bidrar signifikant til kjøretøybranner i tunneler. Den viktigste prediktoren for branner i tunge kjøretøy er om tunnelen er undersjøisk.

## 3.2 Hva forklarer tungbilbranner i vegtunneler hvor årsaken er kategorisert som «uklar»?

### 3.2.1 Årsaksimputering

Omtrent halvparten av tungbilbrannene og -tilløpene i perioden 2008-2021 har uklar årsak (Nævestad og Blom 2023). Det er viktig å ha god kunnskap om årsakene for å kunne sette inn effektive tiltak for å forebygge branner i tunge kjøretøy i tunneler. Vi har, basert på datasettet fra Nævestad og Blom (2023) over kjøretøybranner i perioden 2008-2021, benyttet imputering for å kartlegge ukjente årsaker. Imputering er en statistisk metode som brukes for å beregne manglende verdier basert på eksisterende verdier i datasett. Vi imputerte årsaker som i det originale datasettet var uklare eller manglende. Resultater er vist i tabell 3.2.

Tabell 3.2: Oversikt over fordeling av årsaker for tunnelbranner. Tall i parentes viser 95% konfidensintervall.

Årsak	Før imputering	Etter imputering
Tekniske problemer	32 %	87,2 % (82,6-91,8%)
Eneulykke	3 %	6,2 % (3,0-9,4%)
Kollisjon	4 %	6,6 % (2,9-10,4%)
Uklart/ingen data	61 %	-

Vi ser en klar overvekt av tekniske problemer som brannårsak, og at få branner og tilløp skyldes ulykker. Nesten ni av ti branner og tilløp skyldes tekniske problemer i kjøretøy, mens litt over en av ti (13%) skyldes trafikkulykker (eneulykke eller kollisjon). Dette er en klar forbedring i forhold til den kunnskapen vi hadde basert på Nævestad og Blom (2023), hvor 61% av brannene og tilløpene hadde uklar årsak eller ingen data, og hvor vi hadde kunnskap om at i alle fall litt over tre av ti kjøretøybranner hadde tekniske problemer som årsak. Nå har vi indikasjoner på, basert på statistiske analyser, at nesten ni av ti har tekniske problemer som årsak. Forebygging av kjøretøybranner handler derfor i liten grad om forebygging av ulykker, men heller om bedre vedlikehold av/standard på kjøretøyene.



Når vi imputerer alle årsaker for alle branner/tilløp i tunge kjøretøy i 2008-2021, både i bratte og ikke bratte tunneler, ser vi at 91% kan relateres til tekniske problemer (tabell 3.3), og når vi ser på alle branner tilløp i tunge kjøretøy i undersjøiske/bratte tunneler, er tekniske problemer den eneste årsaken.

Tabell 3.3: Oversikt over alle årsaker for alle branner/tilløp i tunge kjøretøy i 2008-2021, både i bratte og ikke bratte tunneler

Tungtransport	N	%
Tekniske problemer	101	91%
Eneulykker	1	1%
Kollisjon	9	8%
Uvisst	115	

Tabell 3.4: Oversikt over alle årsaker for alle branner tilløp i tunge kjøretøy i undersjøiske/bratte tunneler i perioden 2008-2021.

Tungtransport undersjøiske/bratte tunneler	Total
Tekniske problemer	46
Eneulykker	0
Kollisjon	0
Uvisst	46

### 3.2.2 Intervjuer

Vi intervjuet tre personer med tungbilverkstedfaglig kompetanse, og det er særlig deres redegjørelser vi legger vekt på når vi går dypere inn i årsaksmekanismene bak tungbilbranner i bratte vegtunneler. Vi trekker imidlertid også veksler på de andre informantenes synspunkter. Disse personene hadde kjennskap til statistikk om årsaker i de tunnelene de jobber med, erfaringer fra mange branner osv.

Informantene la hovedsakelig vekt på at branner i tunge kjøretøy har tekniske årsaker, særlig knyttet til motor og dernest til bremses. Utenlandske informanter nevnte overopphetet turbo som «eksploderer» som hovedårsak, etter at man har kjørt lenge i oppoverbakke og belastet motoren maksimalt, mens overopphetede bremses var en hovedårsak i nedoverbakke.

De norske informantene vi snakket med, som hadde tungbilverkstedfaglig kompetanse, la vekt på at lastebilsjåfører stort sett ikke bruker fotbrems når de kjører i nedoverbakke, de bruker retarder. (En av informantene nevnte at en «god sjåfør» kun bremses 1% av kjørt distanse.) Retarderen betjenes med en hendel ved rattet, og har fem trinn, som gir økende motstand. Retarderen fungerer på den måten at et oljehydraulikkssystem spyls olje mot en rotor knyttet til drivlinjen (motor, gir, mellomaksel). Dette bremses motoren nedover. Retarderen gir mulighet for mer langvarig bremsing enn de vanlige bremsene på hjulene, i tillegg til bremsing med motoren. Denne teknologien kom i 1998, men den har blitt mye, mye kraftigere med tiden, og den kraftigste er mye sterkere enn motoren i seg selv. Moderne lastebiler har hydraulisk retarder, og de sterkeste er på 450 newtonmeter. Noen lastebiler har også motorbrems, som eret spjeld på eksosen etter turboen. Ofte lukkes eksosventilene i tillegg når man bruker retarder. Motorbrems var mer utbredt før, og moderne lastebiler har gjerne retarder i stedet for motorbrems.

Retarder (og motorbrems) gir mulighet til å holde litt større fart i lange nedoverbakker. En av informantene sa at mens man i gamle dager gjerne ble liggende bak lastebiler i nedoverbakke fordi de var forsiktede med å bruke bremses, brukes hydrauliske retardere som gir så stor motstand at lastebiler kan holde like stor fart som resten av trafikken gjennom tunnelen. Dette fører imidlertid til at motoren er svært varm når man kommer til bunnen av den undersjøiske vegtunnelen, og motoren blir enda varmere når man skal kjøre opp tunnelen.



*Det er (...) det skaper varme, så driftstemperatur på motor og sånt det er helt maksimalt kan du si, hvis du ligger på en sånn retarder ned en kilometer eller to. (...) da tar du gang i bunn igjen for å bruke moment (...), så er allerede temperaturgrensen i øverste leie. (...) systemet er bygd for å takle det, men da er det 110 grader. [Når du] da kommer på med fullt moment for å kjøre oppstigningen, så blir det veldig varmt. Eksosmanifolden ligger på en 600 -650 grader. Den minste oljlekkasje da, så er det over selvantenningspunktet på oljen, og da tar det fyr. (...) det blir veldig mye varme komponenter, da spesielt turbo og eksos, manifold og røret ned til selve partikkelfilteret som jobber med ganske høye temperaturer. (...) det skal ikke veldig mye til av oljesøl eller flis for eksempel hvis det er flisbiler eller andre typer kjøretøy.*

Bruk av retarder fører til at motoren blir varm, både ned og opp tunnelen. På bakgrunn av dette, kan det se ut til at overopphetede bremses ikke er en veldig viktig årsak til kjøretøybranner i vegtunneler. Fire av informantene la dessuten vekt på at de tungbilbrannene de kjenner til knyttet til bremses er lettere å håndtere; de eskalerer ikke på samme måten som branner som starter i motoren. På bakgrunn av dette, ser det kanskje ut til at nedoverbakkene i de undersjøiske ikke nødvendigvis er et stort problem i seg selv; det er kombinasjonen med oppoverbakken som er avgjørende, for da får du for eksempel 4-5 km med belastning på motoren; først ned og så opp.

Informantene la vekt på at motorene er konstruert for å tåle høy varme, og at de motorene hvor det begynner å brenne gjerne har noen underliggende problemer på forhånd. Kjøretøybrannene starter ikke i tunnelen, de «starter» gjerne lenge før på grunn av underliggende svakheter. Dette kan være uoppdagede tekniske feil, som ikke tåler den høye belastningen det innebærer å kjøre i lange og bratte tunneler, oljesøl eller andre ting som kan ta fyr når motoren og motordeler (manifold) blir svært varm. Alt dette kan forebygges med jevnlig og godt vedlikehold.

En annen viktig årsak til tungbilbranner som ble nevnt er elektriske feil og ledninger som smelter i nærheten av eksosrør. En av informantene nevnte at han trodde at en av årsakene til at det begynner å brenne i tungbiler er at det er en strøml lekkasje, dvs. at det er en kabel med litt jordkontakt, for eksempel på grunn av en bolt som ligger feil, og så går ikke sikringen, og da blir det varmt i det området. Det kan føre til en elektrisk brann som starter i en kabelmatte. Dette er et problem som oppstår ukentlig i tungbiler. Mange ganger skyldes det en feil som en mekaniker har gjort, andre ganger skyldes det noe føreren har gjort. Ofte hender det at sjåføren trenger strøm til et eller annet inne i førerhuset og «stjeler strøm på feil måte». Det ble nevnt at sjåføren da går inn på sosiale medier og forum for å få tips og at et av de største samtaleemnene i Norge på slike medier er hvor man stjeler strøm lettest. Da kobler sjåførene seg på ulike ledninger eller systemer, og dette kan føre til overbelastning og brann.

En tredje årsak til tungbilbranner som ble nevnt, ble knyttet til «ekstrem tungtransport». Dette handler også om modifisering og tilpasning. Såkalt «ekstrem tungtransport», er gjerne ombygde lastebiler som drar for eksempel gravemaskiner. De ombygde bilene er gjerne en utfordring, fordi de bruker løsninger som ikke nødvendigvis er standard. Disse driver gjerne også med spesiell og tung transport, og havarier og branner knyttes ofte til motorproblemer (for eksempel motorskjæring). For disse kjøretøyene er hyppig og grundig service og vedlikehold essensielt.

*De bygger chassis, tre-fire aksler og en hytte. På det får du et påbygg, og påbygg er bruksområdet for kunden. Vi har en intern webside; og et stort regelverk for hvordan det skal gjøres når man bygger på chassis, det er mer eller mindre som en bibel for hvordan man skal bygge på bilen. Det handler om påbygg, [ser jeg i statistikken]. Motoren går i stykker. De har et motorproblem og motorskjæring hender fra tid og til annen. Service og vedlikehold er essensielt.*

En slik type lastebil ble også beskrevet som en maskin trailer. De har hytte og ramme, men bak hytta setter man gjerne et stort skap i rustfritt stål. Når det skjer på tungbil, så «bygger man inn varmen», som

kommer ut bak hytta, og dette kan føre til brann. Dette viser hvordan ombygde kjøretøy kan være en viktig årsak til brann basert på erfaringen til denne informanten, som jobbet med granskning av tungbilhendelser for en kjøretøyleverandør. Det ble også nevnt at kunden selv kan bestemme hvor eksosutløpet skal gå (enten midt under bilen, eller ut på høyre eller venstre side), og at de kan «velge feil», spesielt om bilen går på høy temperatur. Da får man varmekilder på steder hvor de ikke burde vært. Og det blir veldig varmt når man tester lastebilen maksimalt:

*Du får en utvikling av temperatur som tar temperaturnivået høyt. Med en motor på 600-700 hester, så er det en manifold temperatur på 600-700 grader. Varmen går ned via turboen, som slipper fra seg eksos til muffleren. Det er en høy belastning fra turboen 500 grader. Eksosen går ned til første eksospotte, med en inngangstemperatur på 400 grader. Når du kjører nedover og oppover, øker temperaturen.*

Vi spurte om det var forskjell på standarden på norske og utenlandske tungebiler, som kan ha noe å si for brannrisiko, siden dette har vært et tema i tidligere forskning (Safetec 2011). En av informantene sa at, de utenlandskregistrerte tungebilene jevnt over er de samme type kjøretøyene som de norskregistrerte, fordi de utenlandske firmaene kjøper kjøretøyene sine i Norge

*Når du ser på den flåten som kommer over grensene nå, så har de stort sett kjøpt biler fra Norge, alle sammen, bruktbiler. Det går alt vi selger der sånn, går rundt til østblokk. I Norge så er det standard med retarder. Da må man velge den bort [hvis man ikke vil ha den], men det er ingen som gjør.*

Flere informanter nevnte at branner i hjul gjerne ikke skyldes bremsing på veg nedover, men tekniske feil som gjør at bremsene henger på:

*Hvis det er brann som har startet i hjul, så kan det enten være at det har vært dårlig tørkeanlegg på trykk i systemet sånn at det fryser is i bremseklossene som blir liggende på. (...) Eller hjullager, selvfølgelig kan det være, men det er jo også noe som sjåføren kjenner ganske tidlig hvis det er endringer som er på tur her.*

En av informantene, med tungbilverkstedfaglig kompetanse, mente også at brannårsaker som bør nevnes, er «eksoslekkasje på manifold og/eller lekkasje på eksosrør mellom turbo og eksospotte. En lekkasje kan oppstå etter hard belastning og lett antenne materialer som er i den direkte retningen som det oppståtte hullet eller sprekken har laget».

Vi diskuterte også årsaker til branner med en person som hadde et forsikringsperspektiv. Vedkommende sa at brann i tunneler i liten grad er et tema. Branner skjer som regel når tungebilene står parkert. «Vold» (intendert menneskelige handlinger) er en hovedårsak.

### 3.3 Hva forklarer antallet branner og tilløp i de fire mest brannutsatte undersjøiske tunnelene i 2008-2021?

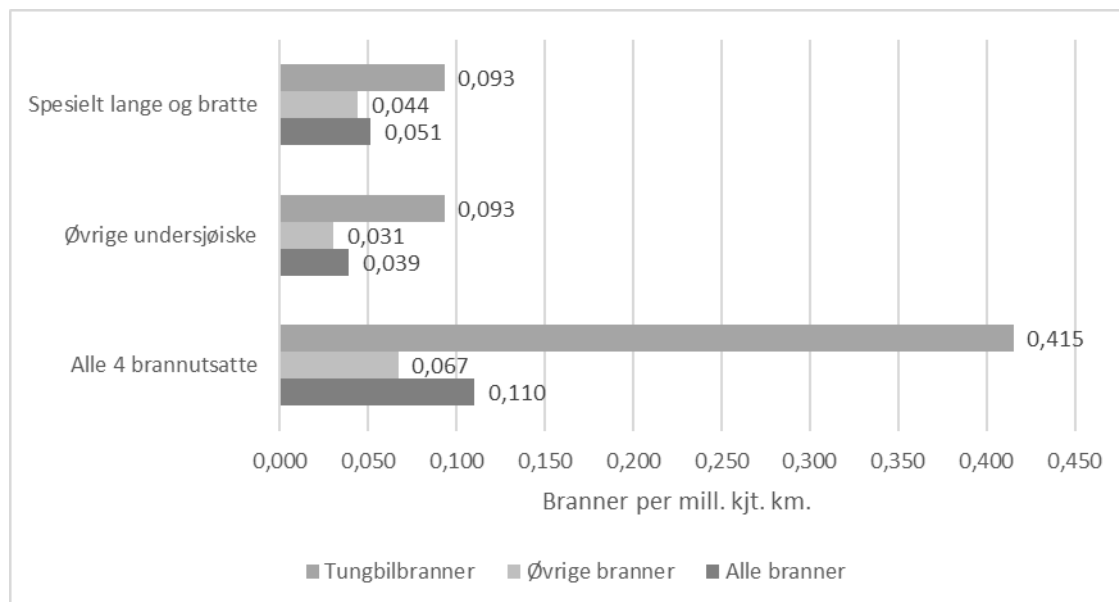
Vegtunnelene med høy stigningsgrad utgjør til sammen omtrent 5 % av vegtunnelene. Disse hadde 38 % av brannene og tilløpene i perioden 2008-2021 (Nævestad og Blom 2023). Nævestad og Blom (2023) finner i tillegg at fire undersjøiske vegtunneler har halvparten av alle brannene og tilløpene i tunneler med høy stigningsgrad (112 av 226) i perioden 2008-2021. Disse er Oslofjordtunnelen (39 branner og tilløp, Bømlafjordtunnelen (32), Byfjordtunnelen (23) og Eiksundtunnelen (17).

### 3.3.1 Deskriptiv statistikk

Basert på informasjonen om norske vegtunneler som er brukt i analysene i avsnitt 3.1.1, har vi sammenlignet noen generelle tunnelegenskaper mellom de fire mest brannutsatte tunnelene, øvrige undersjøiske tunneler og fem lange undersjøiske tunneler med stigning over 7%. De lange undersjøiske tunnelene med stigning over 7% er valgt slik at de har lignende maksimal stigning (7-9 prosent) og lignende lengde (over 5 km) som de mest brannutsatte undersjøiske. Det finnes fem slike tunneler.

**Risiko i de mest brannutsatte og andre tunneler:** Figur 3.5 viser branner per mill. kjøretøykilometer, både for alle branner, for tungbilbranner og for øvrige branner (branner i lette kjøretøy).

Antall tungbilbranner per mill. kjøretøykilometer er 4,5 ganger så høy i de mest brannutsatte tunnelene som i de øvrige undersjøiske tunnelene. For det totale antall branner er forholdstallet på 2,8. For branner som ikke er tungbilbranner er forholdstallet 2,2. Det betyr at forskjellen i brannrisikoen er størst for tungbilbranner. Også for andre branner er risikoen betydelig høyere i de fire mest brannutsatte undersjøiske tunnelene enn i øvrige undersjøiske tunnelene, selv om forskjellen er mindre.



Figur 3.5: Branner per mill. kjøretøykilometer i undersjøiske tunneler; de fire brannutsatte, øvrige undersjøiske (n=29) og fem lange undersjøiske tunneler med stigning over 7%, dvs. som ligner på de fire brannutsatte (stigning 7-9 prosent og tunnellengde over 5 km).

**Egenskaper ved de mest brannutsatte og andre tunneler:** Tabell 3.5 viser oppsummert informasjon om antall tunneler, lengde, trafikkmengde, trafikkmengde for tungbiler, stigningslengde og branner for de utvalgte tunnelene. Dette er informasjon som er tilgjengelig fra analysene i avsnitt 3.1.1. Forskjellene mellom de mest brannutsatte og de øvrige undersjøiske tunnelene er følgende:

- **Lengde:** De mest brannutsatte tunnelene er omtrent dobbelt så lange i gjennomsnitt som de øvrige undersjøiske tunnelene. De fem lange undersjøiske tunnelene med stigning over 7% er imidlertid omtrent like lange som de mest brannutsatte. Lengden er dermed lite sannsynlig som forklaring på den høyere brannrisikoen i de mest brannutsatte tunnelene.
- **Trafikkmengde:** Trafikkmengden (ÅDT) er 65 prosent høyere i de mest brannutsatte enn i de øvrige undersjøiske tunnelene. De fem lange undersjøiske tunnelene med stigning over 7% har enda lavere ÅDT. ÅDT er dermed teoretisk en potensiell forklaringsvariabel, det er imidlertid uklart hvordan høy ÅDT i seg selv kan bidra til høy brannrisiko.

- **Stigningslengde over 7 prosent:** Dette gjelder lengden (antall meter) i hver tunnel som har en stigningsgrad på 7 prosent eller brattere. Tabell 3.5 viser at de mest brannutsatte tunnelene har over dobbelt så lange bratte stigninger i gjennomsnitt som de øvrige undersjøiske tunnelene, og nesten dobbelt så lange bratte stigninger i gjennomsnitt som de lange undersjøiske tunnelene med stigning over 7%. Selv om fem lange undersjøiske tunnelene med stigning over 7% er omtrent like lange som de brannutsatte (6086 meter i gjennomsnitt mot 7025 meter i gjennomsnitt), har de ikke like lange strekninger med stigninger over 7% som de brannutsatte tunnelene (2871 meter i gjennomsnitt mot 5497). Lengden på den bratte stigningen ser dermed ut til å være forklaringen på den høye brannrisikoen i de mest brannutsatte tunnelene.
- **Tungbil-ÅDT:** Selv om andel tunge kjøretøy er omtrent lik i de mest brannutsatte og de øvrige tunnelene, ser vi at tungbil-ÅDT er over dobbelt så høy i de mest brannutsatte som i de fem lange undersjøiske tunnelene med stigning over 7%, og 57% høyere i de mest brannutsatte som i øvrige undersjøiske. Beregningene av risiko i Figur 3.5 kontrollerer imidlertid for trafikkmengde. De viser branner per million kjørte km. Dette kan altså ikke være forklaringen, selv om tungbil ÅDT påvirker antallet branner.
- **Antall løp:** De fire mest brannutsatte tunnelene er ettløpstunneler. Det samme gjelder også de fleste øvrige undersjøiske tunnelene, med to unntak (Opera- og Tromsøysundtunnelen).

Tabell 3.5: Antall tunneler, lengde, trafikkmengde, stigningslengde og branner for ulike grupper av undersjøiske tunneler.

	Antall	Lengde (m)	ÅDT	Andel tunge (%)	Tungbil ÅDT	Stigningslengde (m) (>7%)	Branner	Tungbil-branner	Per mill. kjt.km	
									Branner	Tungbil-branner
<b>Fire brannutsatte</b>										
Byfjordtunnelen	1	5 875	9 470	12,0	1136	<b>5 443</b>	22	10	0,077	0,286
Bømlafjordtunnelen	1	7 913	6 620	11,0	728	<b>4 757</b>	31	13	0,116	0,426
Eiksundtunnelen	1	7 849	2 928	7,0	205	<b>6 765</b>	17	7	0,145	0,815
Oslofjordtunnelen	1	7 261	9 089	15,0	1363	<b>5 022</b>	41	22	0,122	0,430
<b>Alle brannutsatte</b>	<b>4</b>	<b>7 225</b>	<b>7 027</b>	<b>11,3</b>	<b>794</b>	<b>5 497</b>	<b>111</b>	<b>52</b>	<b>0,110</b>	<b>0,415</b>
Øvrige undersjøiske	29	3 653	4 260	11,9	507	<b>2 095</b>	96	31	0,039	0,093
Lange undersjøiske med stigning over 7% <sup>a</sup>	5	6 086	2 356	16,3	384	<b>2 871</b>	15	4	0,051	0,093

<sup>a</sup> Tunneler med stigning 7-9 prosent og tunnellengde over 5 km; alle disse er undersjøiske, og de inngår derfor i gruppen «Øvrige undersjøiske».

### 3.3.2 Trekk ved vegen før og etter tunnel og tiltak som kan ha påvirket risiko

I det følgende presenterer vi trekk ved vegen før og etter tunnel ved de mest brannutsatte tunnelene og tiltak som kan ha påvirket risiko for brann, basert på informasjon om er tilgjengelig fra vegkart.no og Google maps (Streetview, 2022), og intervjuer med branninspektører og tunnelforvaltere.

Tabell 3.6 viser en oversikt over noen egenskaper ved vegen før og etter de fire mest brannutsatte tunnelene:

- Skilt: Tabellen viser kun skilt som strekningsmåling, fareskilt for nedoverbakke og andre skilt som ikke uansett står foran tunneler (som informasjon om tunnelnavn og -lengde); ITS-tiltak er ikke med i oversikten.
- Stigningen på de siste ca. 2 km før og etter tunnelen og annet innen ca. 5 km som f.eks. broer og andre tunneler.

Vegen før og etter tunnelene er også vist i Figur 3.6.

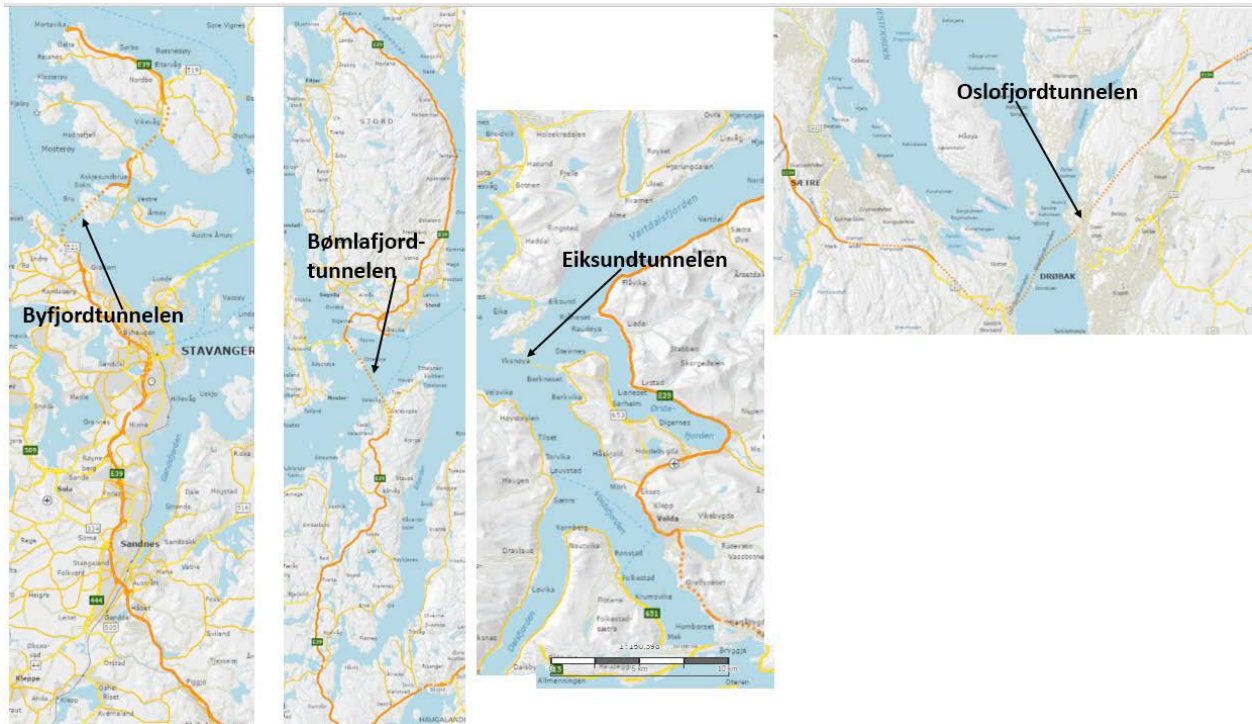
Ingen av tunnelene ligger i umiddelbar nærhet til andre bratte stigninger. Vi ser heller ikke andre faktorer ved vegene før og etter tunnelene som kan tenkes å bidra til høy brannrisiko. Det har imidlertid

blitt påpekt at mange rundkjøringer og kryss (rundt ti totalt) før tunnelnedgangen til Oslofjordtunnelen på Hurumsiden, kan føre til mange nedbremsinger og akselerasjoner før tunnelen, som i sin tur fører til at tungebiler kan kjøre inn i tunnelen med noe høy temperatur på motor og bremses. Dette har også vært et tema i ulike granskninger og rapporter som har blitt publisert om Oslofjordtunnelen.

Tabell 3.6: Egenskaper ved vegene før og etter de fire mest brannutsatte tunnelene.

		Skilt mv. (Google maps, Streetview 2022)	Stigning ca. siste 2 km; annen tunnel innen ca. 5 km
Byfjordtunnelen	Sør	Skilt «Strekningmåling»; fotoboks	0-3 prosent
	Nord	Fareskilt «Nedoverbakke» med underskilt «8% low gir» og underskilt «0,2-2,5 km»	0-3 prosent
Bømlafjordtunnelen	Sør	Fareskilt «Nedoverbakke» med underskilt «9% low gir» og underskilt «0-3 km» Fareskilt «Tidvis dårlig sikt i tunnelen» Fotoboks Kondensmåler (også en i midten av tunnelen og i nord) (vegkart.no)	0-2 prosent
	Nord	Skilt «Strekningmåling»; fotoboks Fareskilt «Nedoverbakke» med underskilt «9% low gir» og underskilt «0-2 km» Kondensmåler (vegkart.no)	0-4 prosent, ca. 1 km lang bro
Eiksundtunnelen	Øst	Skilt «Strekningmåling»	0-2 prosent Helgehorntunnelen (1,2 km, maks. stigning 0,8%)
	Vest/nord	-	5 prosent (bro), ellers 0-2 prosent Selvågtunnelen (1,1 km, maks. stigning 3,8 prosent)
Oslofjordtunnelen	Øst	Skilt «Hold avstand – min. 100m + vogntogsymbol» Fartshump, 40 km/t Fareskilt «Nedoverbakke» med underskilt «7% low gir» og underskilt «0-3 km» Skilt «Strekningmåling» Variabelt fartsgrenseskilt	0-2 prosent Frogntunnelen (1,6 km, maks. stign. 4,3%)
	Vest	Fartshump, 40 km/t Fareskilt «Nedoverbakke» med underskilt «7% low gir» og underskilt «0-2,5 km» Skilt «Strekningmåling» Variabelt fartsgrenseskilt	0-3 prosent Merraskotttunnelen (0,6 km, maks. stign. 2,7%)





Figur 3.6: De fire mest brannutsatte tunnelene og vegene før og etter (vegkart.no).

### 3.3.3 Resultater fra intervjuene

I intervjuene spurte vi hvilke kompenserende tiltak som har blitt innført i de fire mest brannutsatte tunnelene, som kan ha påvirket brannsikkerheten. Et generelt inntrykk basert på intervjuene er at verken Byfjordtunnelen, Bømlafjordtunnelen eller Eiksundtunnelen har hatt lastebilbranner som har forårsaket like stor skade, medført like lang nedetid og like alvorlige konsekvenser som brannene i Oslofjordtunnelen. Derfor har de ikke hatt like stort omfang av kompenserende tiltak som en konsekvens av brannhendelser i tunnelen (se vedlegg 4 for en oppsummering over tiltak)

Flere av informantene bemerket at det er en utfordring for brannsikkerhet i norske tunneler at det bygges ettløpstunneler, fremfor toløpstunneler med rømningsmulighet. Det krever andre branntiltak. Gode branntiltak i ettløpstunneler kan være sprinkleranlegg eller evakueringsrom.

Et kompenserende tiltak som ble nevnt av flere, er evakueringsrommene som ble bygd i Oslofjordtunnelen etter brannhendelsene i 2011. Evakueringsrommene er et unntak fra EUs direktiv om minimum tunnelsikkerhet. EU-direktivet tillater ikke evakueringsrom i tunneler, på bakgrunn av fatale hendelser med evakueringsrom ved brann i tunnel. I en brannhendelse fra 2017 i Oslofjordtunnelen, ble evakueringsrommene brukt for å søke tilflukt. Statens vegvesen konkluderte etter hendelsen i 2017 med at de sikkerhetssystemene og evakueringsrommene som ble installert etter hendelsen i 2011 fungerte bra, og at skadeomfanget på trafikantene ble beskjedne. Flere av informantene våre nevnte at «de evakueringsrommene reddet liv» i den brannen.

Erfaringer med evakueringsrom i Oslofjordtunnelen og Flekkerøytunnelen er interessant også for flere ettløpstunneler i Norge, fordi det gir mulighet for å evakuere vekk fra brann og røyk i ettløpstunneler. Siden evakueringsrom ikke er en godkjent løsning per idag (TSF § 2.3.4 Tilfluktsrom uten utgang som fører til fluktveger til det fri, skal ikke bygges), er det derfor ikke aktuelt å bygge dette i andre tunneler, men erfaring fra tunneler med evakueringsrom vil gi et svar på om dette skal bli en godkjent løsning. Det er ikke bestemt hvor lang erfaringstiden skal være.

Oslofjordtunnelen skal bygges ut til en toløps tunnel, med planlagt byggestart i 2024. To løp vil heve sikkerheten i tunnelen betydelig, og øke mulighet for selvredning og personsikkerhet. Varmeskanning på

utsiden av Oslofjordtunnelen, som kan ta ut kjøretøy som er for varme, er også noe vår informant nevnte som et godt brannreducerende tiltak. Vedkommende nevnte at det er spilt inn til prosjektet som en mulighet, men at det krever mye plass.

De vi intervjuet om Byfjordtunnelen, Bømlafjordtunnelen og Eiksundtunnelen, delte bekymringen om en potensiell tungbilbrann i de respektive tunnelene. De hadde ulike syn på hvorvidt tiltakene i tunnelene klarte å ivareta brannsikkerheten på en tilstrekkelig måte. Noen av informantene trakk frem at det kunne være flere brannsikkerhetstiltak i Bømlafjord og Eiksundtunnelen. Manglende kameraovervåking i Eiksundtunnelen ble for eksempel nevnt.



## 4 Del 2: Kompenserende tiltak

Temaet i dette kapittelet er det andre målet med studien: kompenserende tiltak. Det vil si hvilke tiltak i og ved tunnelene som kan kompensere for risikoen som er knyttet til høy stigningsgrad i tunneler, og hvilken effekt vi kan forvente av tiltakene. Vi fokuserer primært på tiltak som kan redusere risikoen for tunge kjøretøybranner i tunneler (dvs. tiltak som følger av det vi har funnet om stigningsgrader og lengde på stigning) og sekundært på tiltak som kan redusere konsekvensene ved brann. Beskrivelsen er basert på en kombinasjon av litteraturstudie og intervjuer. Vi har ikke funnet noen vitenskapelige studier som sier noe om effekter av tiltak for å redusere tungbilbranner i vegtunneler med høy stigningsgrad, dvs. som beregner hvordan risikoen for brann reduseres ved tiltak. Dette er i tråd med resultatene fra litteraturstudien av sammenhengen mellom høy stigningsgrad og risiko for tungbilbrann. De beste og mest relevante studiene vi fant her, med konkrete estimater over brannrisiko, var fra Norge. Da er det ikke overraskende at vi heller ikke fant internasjonale studier som sier noe om effekter av tiltak på brannrisiko. Redegjørelsen vår for kompenserende tiltak er derfor primært basert på intervjuresultater.

### 4.1 Tiltak basert på analysene av risiko: Unngå å bygge lange og bratte tunneler

Det mest relevante tiltaket for å forebygge branner i tungbiler i norske vegtunneler er at man ikke bygger lange og bratte vegtunneler, der det kan unngås. Et av hovedresultatene i studien vår er at tunnelene med lange og bratte stigninger har betydelig høyere risiko for brann. Det å redusere stigningsgraden og lengden på stigningsgraden vil derfor redusere risikoen for kjøretøybranner. Risikoen for brann blir høyere når den totale distansen med stigningsgrad (>5 %) blir lang (4000-6000 meter) og særlig for lange distanser med stigning over 7 %. Det er først og fremst tekniske problemer i motor som er årsak til branner, dette gjør kjøretøyet sårbart for brann når motoren blir varm av retarderbruk nedover i tunnelen, før den blir enda varmere når man kjører oppover i tunnelen igjen. Manglende vedlikehold øke risikoen for tekniske problemer som kan føre til brann. Det å ikke bygge lange og bratte tunneler (særlig undersjøiske) ble også nevnt som det mest relevante tiltaket av flere av informantene i intervjuene, særlig når de lange og bratte tunnelene er ettløpstunneler uten andre evakueringsmuligheter enn gjennom tunnelmunningene.

I drøftingen av tiltak, må vi imidlertid ta hensyn til at vi allerede har en del lange og bratte vegtunneler i Norge, og at vi skal drøfte tiltak som kan redusere risikoen for brann i disse tunnelene. Som vi har sett i redegjørelsen for tiltakene i de fire brannutsatte undersjøiske norske vegtunnelene (Vedlegg 4), finnes det en rekke ulike tiltak som kan redusere risiko for, og konsekvenser av brann. I stedet for å gå gjennom alle disse, vil vi i presentasjonen vår fokusere på to kategorier av tiltak som er nye i en norsk kontekst: 1) Erfaringer med nye tiltak fra fjelltunneler i alpeland, 2) Nye tiltak som kan adressere de spesifikke årsaksmekanismene som fremkommer i rapporten. Vi diskuterer til sist tiltak som kan forebygge trafikkulykker som kan føre til kjøretøybrann i tunneler. Trafikkulykker er imidlertid en årsak til branner som har blitt mindre viktig over tid, og vi vier ikke mye oppmerksomhet til dette.

### 4.2 Tiltak basert på erfaringer fra fjelltunneler i alpeland

Vi har intervjuet fem personer som jobber med brannsikkerhet i Gottharttunnelen, San Bernadino-tunnelen, Tauerntunnelen og Mont Blanc tunnelen. Dette er tunneler som hadde katastrofale branner rundt år 2000. Informantene la vekt på at disse brannene har skapt et sterkt fokus på brannsikkerhet, som motiverer det å sette inn ekstra brannsikkerhetstiltak. Disse tunnelene er ikke bratte, men de ligger nær toppen av fjell, og det betyr at kjøretøy som bruker dem må kjøre lange og bratte strekninger før og etter tunnelene. Det første påvirker risikoen for brann.

Vi kan bruke **Tauerntunnelen i Østerrike** som et eksempel. Tunnelen er 6 801 meter lang og har en ÅDT på over 18 000. Det første løpet ble bygget fra 1970 til 1975. Den 29. mai 1999 oppsto en alvorlig brann i tunnelen. Brannen ble forårsaket av en lastebil som fraktet brennbare, flytende materialer som tok fyr inne i tunnelen. Den intense varmen og den tykke røyken gjorde det vanskelig for redningsmannskaper å navigere og evakuere. Tolv mennesker døde og mange andre ble skadet. Hendelsene førte til en revurdering av sikkerhetstiltak i vegtunneler i Østerrike og også i mange andre land. Den fremhevet viktigheten av effektive ventilasjonssystemer, nødutganger og kommunikasjonssystemer i tunneler for å øke sikkerheten under nødsituasjoner. Fra 2006 til 2010 ble det andre løpet bygget, og siden 2011 har tunnelen ikke hatt møtende trafikk i løpene.

De siste risikoanalysene fra Tauerntunnelen viser at tekniske feil og branner som følge av havari er den vanligste årsaken til brann i tunge kjøretøy i tunnelen. Risikoanalysene viser også at risikoen for en lastebilbrann er relativt lav, men at skadene kan være svært store. Dette gjør at konsekvensreducerende tiltak er viktigere enn tiltak som skal minimere risiko for brann. Noen av de mest sentrale konsekvensreducerende tiltakene er å unngå møtende trafikk, og sørge for korte rømningsveier. Informasjon til sjåførere i tunnelen om en farlig situasjon er også svært viktig. Det er også viktig at trafikksentralen raskt oppdager situasjonen og tar grep. Nødetatene må kjenne tunnelen samt rømnings- og adkomstveiene godt.

Informanten nevnte at en pakke med tekniske, strukturelle og organisatoriske tiltak sikrer høy sikkerhetsstandard. Det gjelder strukturelle tiltak, som et løp nummer to, rømningsveier, havaribåser osv. I tillegg finnes det sikkerhetstiltak som for eksempel nødandropsnisjer, brannslukkingsnisjer, videogjenkjenning, brannledningsdetektor, automatisk deteksjon ved havari, branndeteksjon, trafikkork, kjøretøy som står stille, informasjon om saktegående sjåfør, ventilasjonssystemer, informasjon om radio og høyttalere, osv. I tillegg foreligger det organisatoriske tiltak som alarmplaner, operative øvelser med redningsmannskaper, hastighetsreduksjon, regelmessig opplæring av operativt personale, involvering av beredskapsorganisasjon i planlegging, bygging og drift og tydelige og felles retningslinjer.

**St. Gotthardtunnelen i Sveits** er et annet relevant eksempel. Gotthard-tunnelen åpnet i 1980 etter en byggetid på ti år. En kollisjonsulykke mellom to lastebiler i oktober 2001 utløste en voldsom brann, hvor 11 mennesker omkom. Gotthard-tunnelen var verdens lengste vegtunnel fra den åpnet og frem til Lærdalstunnelen åpnet i 2000. Gotthard-tunnelen har ett løp, og ligger i omkring 1100 meters høyde under St. Gotthard-passet. Tunnelen trafikkeres i gjennomsnitt av 18 000 kjøretøy per døgn. For å redusere ulykkesrisikoen må avstand til foranliggende kjøretøy være 150 meter.

Informantene fra Gotthardtunnelen la særlig vekt på tre viktige forebyggende tiltak, da vi spurte om de viktigste tiltakene de har for å redusere risiko for branner i tungebiler. Det første tiltaket er at de slipper tunge kjøretøy inn etappevis gjennom en trafikklysordning som de kaller for «tropfenzähler», for at det skal være en viss avstand mellom dem. Dette tiltaket ble innført i 2002 etter brannen i 2001, og har vist seg å være svært effektivt, sa informanten. I tillegg; for å redusere ulykkesrisikoen og konsekvenser ved brann må avstand til foranliggende kjøretøy være 150 meter. Det andre tiltaket er at det i 2009 ble bygget en tungtrafikksentral på nordsiden av Gotthardtunnelen. Der sjekkes den tekniske tilstanden til alle lastebiler som skal inn i tunnelen. Veggen opp til tunnelen på nordsiden er relativt lang og bratt. Senere, i 2022, ble det også laget en slik kontrollstasjon på sørsiden. Det tredje tiltaket er at det i 2013 og 2015 ble montert portaler for varmescanning på begge sider av tunnelen. Dette er en teknologi som skal oppdage overoppheting på lastebiler (med termiske kameraer) og filtrere ut lastebilene før de kjører inn i tunnelen.

Vi intervjuet også en informant fra **San Bernadinotunnelen i Sveits**. Dette er en 6,4 km lang, enkeltløps, alpetunnel med trafikk i begge retninger (ett kjørefelt i hver retning). Trafikkmengden er om lag 8 000 kjøretøy per dag, hvorav 8 % er tunge kjøretøy. Tunnelen hadde en brann i en buss 18. mai 2018, heldigvis uten dødsfall eller skader. Etter det ble det installert to portaler for temperaturscanning av tunge kjøretøy, i god avstand fra tunnelportalene, sør og nord for tunnelen. Noen titalls kilometer før tunnelen, i sør og mot nord, er det to kontrollsentraler for tunge kjøretøy. Politiet i kantonen

Graubünden (hvor tunnelen ligger) har stikkprøvekontroller av tunge kjøretøy, hvor teknisk tilstand sjekkes (bremsesystem, dekktilstand, lastfordeling osv.). Kjøretøy med tekniske feil får ikke fortsette og blir enten reparert på stedet eller tauet bort. Informanten nevnte også at det foreligger en rekke andre konsekvensreducerende tiltak i tunnelen. Dette er for eksempel tiltak for tidlig oppdagelse av brann og håndtering av brann (termisk deteksjon, røykdeteksjon, automatisk bildeanalyse, ventilasjon, røykavsug, etc.).

**Mont Blanc tunnelen i Frankrike** var verdens lengste vegtunnel ved åpningen i 1965 (11,6 km lang). Tunnelen utgjør en viktig passasje mellom Frankrike og Italia. Tunnelen har en ÅDT på litt over 5000. Den 24. mars 1999 tok en belgisk lastebil fyr i tunnelen, og 39 mennesker døde. Etter brannen var tunnelen stengt i tre år før den igjen kunne åpnes for trafikk. Informanten med tilknytning til Mont Blanc tunnelen la også vekt på at portaler med temperaturscanning for tunge kjøretøy er et sentralt tiltak for å redusere risikoen for tungbilbrann. Han la imidlertid vekt på at dette ikke er en veldig presis teknologi, med mange «falske positive» deteksjoner. Vedkommende sa at dette har ført til mye unødvendig bruk av tid og ressurser, som har skapt frustrasjon blant trafikanter.

#### 4.2.1 Portaler med temperaturmålinger for tunge kjøretøy

Portaler med temperaturmålinger for tunge kjøretøy er et av de unike tiltakene i fjelltunneler i alpeland. Disse har varmesensorer som måler temperaturen på tunge kjøretøy på veg inn i tunnelen («Vehicle hot spot detector»). Slike systemer skal forhindre at tunge kjøretøy som har forhøyet risiko for brann kjører inn i tunnelen. Etter portalene er det aktive skilt som automatisk filtrerer ut kjøretøy som er for varme. Disse blir ledet til en separat kontrollplass, og sjekkes umiddelbart. Vi har ikke funnet empiriske studier som har dokumentert hvordan slike systemer påvirker antall kjøretøybranner i tunneler.

Fjelltunnelene i alpeland har problematikk relatert til stigningsgrad, fordi de ligger nær toppen av fjell, og de er lokalisert på internasjonale transittveier. Dette betyr at kjøretøy som kjører gjennom tunnelene må kjøre betydelige strekninger med høy stigningsgrad opp til tunnelene, og strekninger med betydelig fall ned fra tunnelene. Forskjellen til de undersjøiske vegtunnelene i Norge er, at disse først og fremst har strekninger med høy stigningsgrad inne i tunnelene. De europeiske fjelltunnelene har strekninger med høy stigningsgrad før tunnelene, og et viktig brannforebyggingsiltak for disse er å unngå at overopphetede tungbiler kommer inn i tunnelene. I de undersjøiske vegtunnelene i Norge handler brannforebygging i større grad om å unngå at tungbiler blir overopphetet inne i tunnelene, særlig når de er på veg oppover og ut av tunnelene. Det kan derfor diskuteres hvor effektivt varmescanning utenfor undersjøiske vegtunneler er. Det ser ut til at omtrent 90% av brannene i tunge kjøretøy har tekniske problemer som årsak. Rundt halvparten av tungbilbrannene i norske vegtunneler som vi antar at har tekniske problemer som årsak (55 av 101) i perioden 2008-2021 er i tunneler som ikke har høy stigningsgrad. Her kan det være relevant med varmescanning utenfor tunnelene, fordi vi kan anta at varmeutviklingen her kan starte og måles utenfor tunnelen, og at den ikke er et resultat av fall/stigning inne i tunnelen. Ulike kriterier kan legges til grunn for å velge hvilke tunneler man skal velge ut for et slikt tiltak. Portaler med varmescanning kan være spesielt relevant utenfor tunneler som har lengre strekninger med fall/stigning før tunnelmunningene, tunneler med høy tungbil ÅDT, tunneler som har hatt mange tungbilbranner, spesielt lange tunneler osv.

Portalene med temperaturmålinger benyttes i tunneler i Sveits (for eksempel: St. Gotthard-tunnelen <sup>3</sup>) virker på følgende måte:

- Alle kjøretøy over 7,5 tonn må passere en portal hvor størrelse og temperatur måles:
  - Lasermåling av kjøretøyenes størrelse og fart
  - To infrarødkameraer (varmebilde-kameraer) måler temperaturen på ulike deler av kjøretøyet (motor, dekk, eksosanlegg, lasterom og førerhus)
  - Videokamera filmer kjøretøyet fra siden (kun Gotthard)
- Det er utviklet databaser med normalverdier for temperaturene på ulike deler av ulike typer kjøretøy; måles for høy temperatur, blir kjøretøyet stanset (Gotthard: trafikklys ved tunnelinngangen og kjøretøyet må undersøkes av en spesialisert mekaniker før det ev. får lov til å kjøre videre.

En enklere måte å måle temperatur på er varmekameraer som kan kobles til AID. Slike kameraer gir imidlertid ikke like detaljert informasjon om varmekildene, og de vil vanligvis ikke klare å oppdage varmeutvikling før det har blitt svært varmt.

Vi har ikke funnet studier som sier noe konkret om effekter på risiko for brann med slike systemer, men vi har fått statistikk fra tunnelforvalterne til noen av alpetunnelene, som sier noe om hvordan de virker. Et høyt antall «falske positive» meldinger om overopphetede kjøretøy ble nevnt som et problem i Mont Blanc tunnelen. Dette er kjøretøy som plukkes ut av systemet, men som i virkeligheten ikke utgjør noen brannrisiko. En høy andel falske alarmer krever mange kontrollressurser, tar mye tid og kan skape frustrasjon blant trafikanter. Samtidig, som poengtert av en av våre informanter, en indirekte positiv effekt av disse tiltakene er det faktum at lastebilen stanses i noen minutter, noe som potensielt reduserer risikoen for overoppheting.

San Bernardino-tunnelen i Sveits innførte portaler for varmescanning i 2021/2022.<sup>4</sup> Informanten var fornøyd med dette systemet og delte noen nøkkeltall med oss. Systemet ble implementert ved bruk av kunstig intelligens med veiledet læring. Det startet med en innledende læringsfase, som varte i omtrent seks måneder (2021/2022). Sensorene måler alle passerende kjøretøy med en hastighet på 80 km/t uten å forårsake forsinkelser. Av organisatoriske årsaker ble det besluttet kun å vurdere alarmer knyttet til tunge kjøretøy og busser. Alarmer knyttet til lette kjøretøy lagres imidlertid. De to portalene for varmescanning ble tatt i bruk i midten av juli 2022. Tunnelforvalternes erfaring så langt er meget god. Det må imidlertid nevnes at driftsprinsippet er basert på falske alarmer. I praksis må det antas at bare noen av alarmene som sendes tilsvarende virkelig farlige kjøretøy. Læring betyr at kjøretøygjenkjenningen er god og forbedres gradvis. Variasjonen mellom kjøretøy (selv tunge kjøretøy) når det gjelder tekniske løsninger er i dag er svært høy. I tillegg er det spesielle kjøretøy, som for eksempel militære kjøretøy.

En av informantene ga oss statistikk fra brannvesenet fra åpningsdatoen 14. juli 2022 til 24. oktober 2023. I løpet av den angitte perioden hadde systemet 87 alarmer, hvorav 17 var relatert til kjøretøy som faktisk viste seg å være farlige ved nærmere kontroll. Det ble også nevnt at det reelle antall alarmer var lavere enn 87, fordi systemet hadde gjentatte alarmer fra samme type kjøretøy som, på grunn av mekaniske detaljer, "lurte" systemet. En endring av alarmterskler var nødvendig for denne typen kjøretøy. Hvis man ser bort fra denne typen kjøretøy, som forårsaket 9 unngåelige alarmer, var det totalt 78 alarmer i perioden, hvorav 17 relatert til farlige kjøretøy, noe som gir en rate på 22 % reelle alarmer. Informanten mente dette var svært godt og forenlig med organiseringen av brannvesenet.

Flere av de norske informantene framholdt at portaler med temperaturmålinger, eller varmescanninger, for tunge kjøretøy kan være et positivt forebyggende tiltak for brannforebygging. En utfordring som ble

<sup>3</sup> <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/verkehr/gotthard-tunnel-fiebermessung-im-vorueberfahren/#:~:text=Die%20Testphase%20ist%20vorbei.,in%20den%20Tunnel%20fahren%20d%C3%BCrfen> .

<sup>4</sup> <https://www.youtube.com/watch?v=PyAhO78oyZg>

nevnt, er imidlertid at det krever mye plass å ta ut kjøretøy (de må ledes til en oppsamlingsplass før tunnelinngangen), i tillegg til at man må ha personell klart til å kontrollere kjøretøy som er overopphetet.

#### 4.2.2 Teknisk kontroll av tunge kjøretøy før innkjøring i tunnel

Et annet tiltak som er relativt unikt for fjelltunneler i alpeland er tekniske kontroller av tunge kjøretøy før innkjøring i tunnel. Gotthardtunnelen har for eksempel to kontrollstasjoner hvor alle lastebilers tekniske tilstand sjekkes. San Bernadinotunnelen har også slike kontrollstasjoner, men her sjekkes ikke alle kjøretøy. Ved San Bernadinotunnelen er det politiet i kantonen Graubünden (hvor tunnelen ligger), som har stikkprøvekontroller av tunge kjøretøy. Teknisk tilstand sjekkes (bremsesystem, dekktilstand, lastfordeling osv.). Kjøretøy med tekniske feil får ikke fortsette og blir enten reparert på stedet, eller tauet bort. Kontroll av alle tungbiler er imidlertid ressurskrevende. Det er ikke entydig hva som er de spesifikke mekanismene mellom slike kontroller og brannrisiko. Informantene våre, med god verkstedfaglig kompetanse, la vekt på at generelt dårlig teknisk stand gir økt risiko for brann på grunn av tekniske feil. Vi kan derfor anta at tekniske kontroller av tungbiler er et effektivt tiltak for å øke teknisk standard og redusere risiko for brann. Nævestad mfl. (2022) sin studie av hvorfor risikoen med tunge godsbiler har gått ned i perioden 2007-2020, finner at økningen i Statens vegvesens utekontroller av tunge godsbiler fra 2008 til 2020 i 2020 bidro til å forebygge 18,52 personskadeulykker med tunge godsbiler innblandet. Gitt sammenhengen mellom tekniske feil og risiko for brann, kan vi antakelig forvente at tekniske kontroller av kjøretøy også kan forebygge feil som kan føre til brann. Dette gjelder særlig i forhold til ombygde og modifiserte tungbiler, som ble nevnt som en betydelig brannrisikoutfordring.

#### 4.2.3 Trafikkregulering

Et tredje tiltak som ble nevnt av informantene knyttet til fjelltunneler i alpeland er tiltak for å håndtere trafikken og begrense konsekvensene av en brann, gjennom å ha tiltak for å sikre god avstand mellom kjøretøy. Ikke minst det å ha en gitt avstand mellom tunge kjøretøy inne i tunnelene kan være kritisk, for å unngå at evt. branner i en tungbil sprer seg til flere tungbiler.

### 4.3 Nye tiltak som adresserer brannrisikomekanismer

I det følgende avsnittet vil vi drøfte ulike nye tiltak som kan adressere de spesifikke brannrisikomekanismene som kommer frem i rapporten. Dette er tiltak som har blitt drøftet av informanter både i inn- og utland.

#### 4.3.1 Informasjon til sjåførene basert på GPS i bilene

Flere av de intervjuede nevnte at ulike former for informasjon til sjåførene kan redusere risikoen for kjøretøybrann. Dette gjelder for det første informasjon til sjåførene om at de nærmer seg en undersjøisk tunnel, med lange og bratte stigninger. En av informantene foreslo at man kan koble slike varslinger til kartsystemet i bilene, som kan gi beskjed til sjåførene.

*I dag så har vi jo kartsystemer i lastebilene så man vet hvor man er, og man bestemmer hastighet og alt sånt er gjennom GPS systemet. Man kunne kanskje lagt ut en nasjonal varselampe gjennom GPS, på at «nå kjører du inn i en tunnel, du må tenke på temperaturer og bremsing». Kunne vært en sånn oransje melding som kommer opp på kartskjermen. Det hadde muligens avverget noen branner; så er man i alle fall litt oppmerksomme. (...) Det må jo ligge i Kartverket egentlig da, i nærheten av tunnelene eventuelt som fulgte med. Du får opp i dag hastighetssoner [i GPS-systemet]. Det kan ikke være verre å legge inn varsel om ny tunnel eller tøff stigning i tunnel som kommer om. (...) de fleste bruker jo den.*

Som det fremgår av sitatet, mente denne informanten at GPS-systemet i bilen også burde gi beskjed til sjåføren for eksempel om at vedkommende må: 1) sjekke varselampene osv., 2) tenke på hvordan man kjører nedover og 3) tenke på hvordan man skal kjøre oppover i tunneler.

Denne informasjonen kan også komme på andre måter, for eksempel i variable tekstschilder utenfor tunnelen. Flere nevnte at personer som er lokalkjente har mer erfaring med å kjøre i lange og bratte tunneler, og vet i større grad hva som er optimal måte å kjøre ned og opp på. Sjåfører som ikke er lokalkjente vil ikke være i den samme situasjonen. Spesielt utenlandske tungbilsjåfører ble nevnt her, og det ble sagt at informasjonen til utenlandske sjåfører som ikke er kjent på vegnettet bør forbedres, både med tanke på språk og det som kommuniseres.

### 4.3.2 Samvirkende ITS (C-ITS) teknologi

En av informantene, som hadde meget god oversikt over tungbilteknologi, sa at en av de tingene som særlig har blitt bedre med lastebilene de siste 5-6 årene, er at sjåføren får varsel hvis det er teknisk feil med lastebilen, eller dersom en eller annen komponent er overopphetet. Da kommer det en feilkode. Vedkommende sa også at mange av disse feilkodene kan slettes av sjåføren, men han la vekt på at «det er en grunn til at disse feilkodene kommer». I forlengelsen av dette diskuterte vi i hvilken grad vi kan anta at utstyr langs vegen før tunnelen kan kommunisere med kjøretøy og fange opp slike feilmeldinger, for eksempel om overoppheting eller alvorlige motorfeil, og «luke ut» kjøretøy, slik at de ikke kan kjøre inn i tunnelene. Dette kan for eksempel skje ved at lastebilene ledes ut til en kontrollsoner, hvor de blir fulgt opp av en kontrollør.

«Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS)», eller samvirkende ITS, bruker trådløs teknologi for å muliggjøre sanntids kommunikasjon fra kjøretøy til kjøretøy og fra kjøretøy til infrastruktur. Vi kan tenke oss at denne teknologien potensielt kan fungere på denne måten i fremtiden. Den samvirkende ITS-teknologien er relativt moden og bruker mange komponenter som allerede finnes som standardutstyr i nye kjøretøy, for eksempel kameraer, sensorer, og antenner. Et samvirkende ITS system er i prinsippet en kommunikasjonsboks som bruker standard WiFi for å sende og motta meldinger (Volvo Trucks, 2023). En utfordring med et slikt tiltak er at det finnes mange ulike teknologier og løsninger i kjøretøy og, at man må lage et system som kan kommunisere med alle sammen. Det arbeides imidlertid på EU nivå for å harmonisere dette. Det har kommet et revidert ITS-direktiv 2023/2661 som beskriver videre prosesser for C-ITS og CCAM i EU. Det foreligger imidlertid ingen konkrete forordninger ennå. Fortsatt er det bare pilot/forskningsprosjekter som pågår på dette feltet, og det er delte meninger om hva som blir løsningen fremover. Det er altså noen år til samvirkende ITS vil kunne fungere på den måten vi foreslår over, og det er usikkert om vi kommer dit.

Samvirkende ITS vil også potensielt kunne bidra til å redusere konsekvenser av brann, fordi alle andre kjøretøy i nærheten kan få beskjed om at et kjøretøy brenner. I tillegg kan nødetatene og vegtrafikk-sentralen få raskere melding om brann, dersom kjøretøyet selv sender slik kommunikasjon. Samvirkende ITS vil sannsynligvis bli introdusert i tre faser (Volvo Trucks 2023). **Fase én** vil være systemer som leverer varsler. For eksempel hvis et kjøretøy opplever et saktegående kjøretøy foran, vegarbeid eller trafikkork, kan det kommunisere denne meldingen til alle andre kjøretøy på veg i dens retning. Eller andre kjøretøy kan motta advarsler om endring av kjøremønster, fartsgrenser, havari eller brann i tunnel. **Fase to** er sensorisk, hvor kjøretøy vil samle inn data fra ulike signaler og lese trafikksituasjonen. Teknologien vil da varsle sjåføren om nødvendige handlinger. **Fase tre** handler om samarbeid mellom kjøretøy. Det innebærer kontinuerlig kjøretøy-til-kjøretøy og kjøretøy-til-fotgjenger-tilkobling som muliggjør effektive advarsler og forbedrede responstider ift. potensielle ulykker og branner. Denne teknologien er innført i dag i noen kjøretøy, som mer eller mindre automatisk sender melding til nødetatene ved for eksempel ulykker. Vi er imidlertid kjent med at det er relativt mange falske alarmer knyttet til denne teknologien.



### 4.3.3 Vedlikehold av tunge kjøretøy

Informantene i Norge og utlandet pekte først og fremst på tekniske problemer, gjerne knyttet til motor, som årsaken til at det oppstår brann i tunge kjøretøy i vegtunneler. Flere av dem knyttet også dette til manglende eller dårlig vedlikehold av kjøretøyene. Det å ha gode rutiner for vedlikehold og service er derfor et viktig tiltak for å forebygge brann i tunge kjøretøy i vegtunneler. Informantene la vekt på at motorene i nyere lastebiler er konstruert for å tåle høy varme, og at de motorene som tar fyr gjerne har noen underliggende problemer på forhånd. Kjøretøybrannene starter ikke i tunnelen, de starter gjerne lenge før på grunn av underliggende svakheter. Dette kan være uoppdagede tekniske feil, som ikke tåler den høye belastningen som det innebærer å kjøre i lange og bratte tunneler, oljesøl, smuss eller andre ting som kan ta fyr når motoren og motordeler (manifold) blir svært varme. Slike risikofaktorer kan forebygges med jevnlig og godt vedlikehold. Det er usikkert hvilke tiltak som skal sikre høy(ere) standard på vedlikeholdet blant alle bileiere. Informantene mente dessuten av vedlikeholdsstandarden er god i lastebilbransjen. Det er imidlertid mulig at standarden varierer mellom ulike segmenter i bransjen. Dette setter vi opp som viktige spørsmål for fremtidig forskning.

### 4.3.4 Kontroll av kjøretøy

En av informantene med verkstedfaglig kompetanse og kompetanse fra granskninger la vekt på at tungbilbranner ofte skyldes modifikasjoner og tilpasninger av kjøretøy. En annen sa at tungbilene ofte er som en «stor legokloss», som man kan bygge ting oppå og tilpasse som man vil. Kjøretøy kan få nye bruksområder, samtidig som man kanskje har den samme gamle serviceplanen. Det å avdekke eventuelle modifikasjoner som fører til økt brannrisiko for tungbiler, kan kanskje være noe som man kan ha økt fokus på ved periodisk kjøretøykontroll av tungbiler.

### 4.3.5 Slukkesystem i motor

Busser og flere anleggsmaskiner har allerede slukkesystem i motorrommet som automatisk slukker branner og tilløp. Vi diskuterte mulighetene for å implementere dette på lastebiler i flere av intervjuene. En av informantene med god tungbilverkstedkompetanse sa at:

*(...) det som kunne vært interessant fremover, det er at det blir jobbet med et nytt slukkesystem. På busser har vi det jo allerede, men det er sikkert ikke dumt på lastebiler. Dette med automatisk slukkeanlegg. (...) det fungerer i buss (...) De er ganske innkapsla lastebilmotorer på grunn av støydemping, som er deksler både under hytta og mesteparten over. Pluss at det er lydabsorbenter på sidene, så det er nesten et lukket rom. (...) det hadde kunnet stoppet mange branner vil jeg tror. Det virker momentant på busser i alle fall. (...) du fjerner absolutt alt oksygen med den tåkedampen [i slukkesystemet] og i og med at det er såpass beskyttet og innkapslet rundt en lastebilmotor i dag, så er det litt interessant tema å prøve i alle fall.*

Vi spurte informantene hvorfor dette ikke har blitt innført allerede, og da ble det vist til at det ikke foreligger EU-regler eller nasjonale krav om dette. I tillegg så vil slik teknologi bli en merkostnad for lastebileiere; det vil gjøre at lastebilene blir litt dyrere. I Sverige er det et krav at alle maskiner og kjøretøy som går under jorden (i gruveganger) skal ha slike systemer. Det ble nevnt at dette kanskje er det enkleste forebyggende tiltaket som samfunnet kan kreve. Det er dessuten flere leverandører som leverer dette, og det er også vanlig å ettermontere slike systemer på biler som ikke har det. Konkrete hendelser fra gruver, for eksempel i Kiruna, viser også at slike systemer slukker tilløp til brann som skyldes teknisk feil.



## 4.4 Tiltak for å forebygge trafikkulykker som kan føre til brann

**Fartsgrense og fartskontroll.** Lavere fartsgrenser og fartskontroll i (bratte) stigninger kan redusere både farten og fartsforskjeller mellom tunge og lette kjøretøy. Dette kan forventes å redusere risikoen for tunge kjøretøybranner som skyldes trafikkulykker, uten at vi har funnet empiriske studier som har undersøkt dette.

Lavere fart har generelt sammenheng med redusert ulykkesrisiko og kan også tenkes å redusere risikoen for tunge kjøretøybranner, som skyldes trafikkulykker. Vi vet ikke om studier som har undersøkt hvordan fartsgrenser eller fartskontroll påvirker kjøretøybranner i tunneler.

Nedsatt fartsgrense fører som regel til lavere fart, men i tunneler, især i (bratte) nedoverbakker, kan man imidlertid ikke forvente stor grad av overholdelse av fartsgrensen, med mindre man setter inn supplerende tiltak som f.eks. strekningskontroll av fart. Strekningskontroll av fart i undersjøiske tunneler har vist seg å føre til store ulykkesreduksjoner, spesielt for de mest alvorlige ulykkene (Høye, 2014).

I tunneler med (bratte) stigninger kan redusert fart også bidra til reduserte fartsforskjeller mellom tunge og lette kjøretøy, noe som kan redusere risikoen for påkjøring bakfra, som er den mest typiske brannforårsakende ulykkestypen i tunneler (Høye mfl., 2019). Det er imidlertid urealistisk å redusere fartsgrensen så mye at alle kan kjøre i samme hastighet; farten måtte da reduseres til rundt 30 km/t, eller enda lavere i de bratteste stigningene.

**Andre fartsreduserende tiltak.** Forsterket vegoppmerking skal i hovedsak redusere risikoen for utforkjøringer og møteulykker (Høye, 2023A,B). Det kan imidlertid også ha en fartsreduserende effekt, noe som kan tenkes å redusere ulykkesrisikoen i tunneler, og dermed muligens også brannrisikoen (for branner som skyldes trafikkulykker). Det er likevel usikkert hvorvidt det vil redusere farten på tunge kjøretøy i bratte nedoverbakker.

Det finnes også ulike visuelle tiltak i tunneler som skal redusere farten i bratte nedoverbakker, som mønstre på veggen som forsterker inntrykket av nedoverbakke og fart. Bakgrunnen er at det i nedoverbakker i tunneler er vanskelig å vurdere stigningsgraden og farten, og at farten kan øke uten at det er førerens hensikt. Virkningen på fart og ulykker er imidlertid i hovedsak dokumentert i simulatorstudier, og ikke spesifikt for tunge kjøretøy i bratte nedoverbakke (f.eks. Prabhakaran mfl., 2022).

**Belysning.** Tunnelbelysning reduserer antall ulykker i tunneler, især i inngangssonen; dette kan også bidra til redusert risiko for tunge kjøretøybranner som skyldes trafikkulykker. Vi har ikke funnet studier som har undersøkt dette empirisk. I Norge skal vegtunneler generelt ha belysning når lengden er over 100 meter (over 25 meter dersom de er tilrettelagt for gang-/sykkeltrafikk (Statens vegvesen, 2022, håndbok N500)). Det er godt dokumentert at vegbelysning reduserer ulykkesrisikoen (Trafikksikkerhets-håndboken 2024). Også i tunneler har belysning vist seg å redusere ulykkesrisikoen. Dette gjelder både belysning inne i tunnelen og forsterket belysning i tunnelens inngangssone (Høye, 2023C). Belysning i tunneler kan også redusere risikoen for branner som skyldes trafikkulykker.

## 5 Del 3: Utviklingstrekk

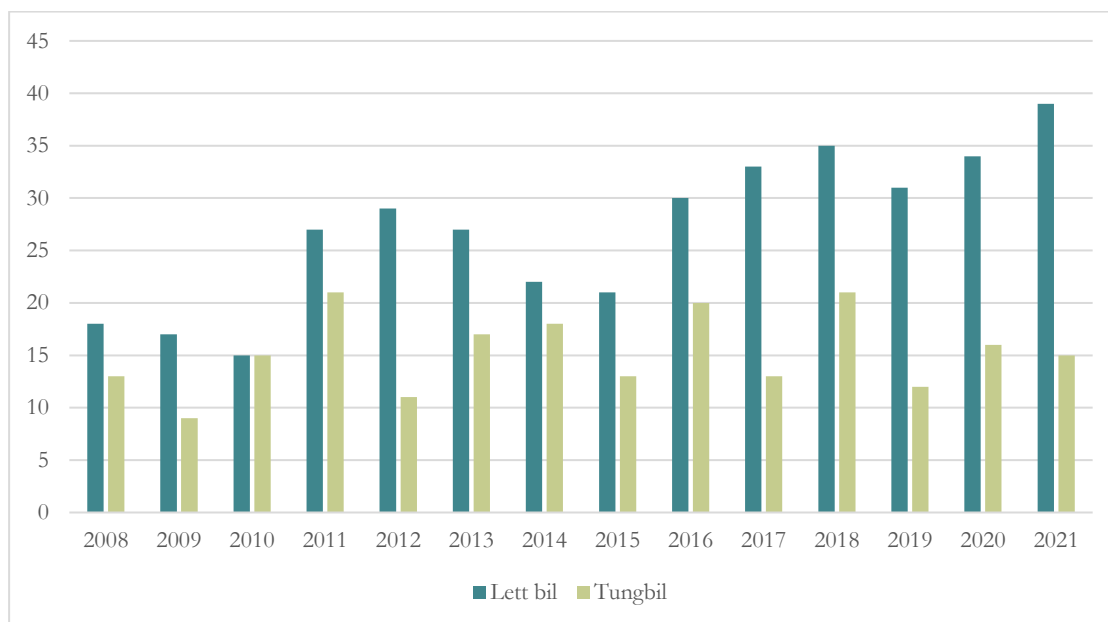
Del 3 av prosjektet handler om to spørsmål om utviklingstrekk som påvirker brannrisiko i bratte tunneler. Vi fokuserer på fire spørsmål:

- 1) Hva forklarer økningen i årlige antall tungebilbranner og -tilløp?
- 2) Hva forklarer at andelen kjøretøybranner med tungebiler i tunneler med høy stigningsgrad har gått litt ned?
- 3) Hvilke endringer i løpet av perioden 2008-2021 kan ha påvirket risikoen for tungebilbranner i tunneler med høy stigning?
- 4) Hvilke endringer i løpet av de neste 10-20 årene kan forventes å påvirke risikoen for tungebilbranner i bratte tunneler?

Først gir vi en oversikt over risikoen for tungebilbranner i norske vegtunneler i perioden 2008-2021.

### 5.1 Risiko for tungebilbranner i vegtunneler over tid

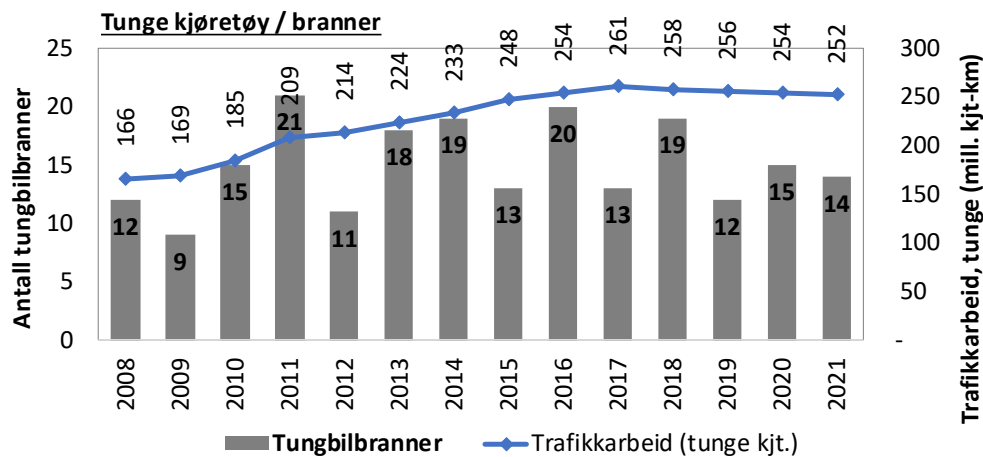
I dette avsnittet fokuserer vi på spørsmålet: hva forklarer økningen i årlige antall tungebilbranner og -tilløp? Nævestad og Blom (2023) finner at antall kjøretøybranner i vegtunneler har økt over tid i perioden 2008-2021. Figur 5.1 viser antall branner per år for tunge og lette biler i perioden 2008-2021.



Figur 5.1: Antall tungebil og lett bil involvert i branner i alle tunneler. Branner og tilløp i norske vegtunneler i perioden 2008-2021.

Figuren viser en økning i det totale antallet branner og tilløp over tid, samlet for lette og tunge biler. Figuren indikerer imidlertid en litt forskjellig utvikling for lette og tunge biler. Antallet branner i tunge kjøretøy i vegtunneler over tid har vært relativt stabilt fra 2008 til 2021: antallet har vært mellom 10 og 20 branner i året i 11 av 14 år. Gjennomsnittlig antall vegtunnelbranner i tungebiler i perioden 2008-2015 er 15, mens gjennomsnittlig antall i perioden 2016-2021 er 16. Denne økningen er liten og ubetydelig. Antallet branner i lette kjøretøy, på den annen side, har helt tydelig økt over tid.

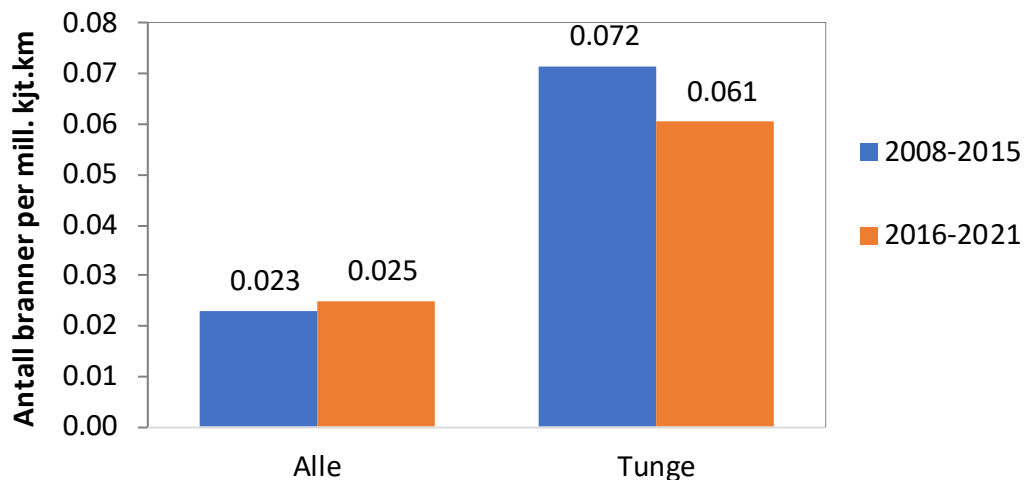
Figur 5.2 sammenligner utviklingen over tid for antall tungebilbranner og for trafikkarbeidet med tunge kjøretøy i norske vegtunneler.



Figur 5.2: Utvikling i antall tungebilbranner og trafikkarbeid med tunge kjøretøy i norske vegtunneler over tid, 2008-2021 (kun tunneler som er med i analysene beskrevet i avsnitt 3.1 i denne rapporten).<sup>5</sup>

Det er en økning i trafikkarbeidet og en tendens til nedgang i antall tungebilbranner fra 2019 til 2021. Dette tilsier at risikoen har gått ned over tid.

Figur 5.3 viser antall branner med alle kjøretøy (dvs. både lette og tunge) og kun med tunge kjøretøy i norske vegtunneler per million kjøretøy-kilometer, for periodene 2008-2015 og 2016-2021.



Figur 5.3: Antall branner med alle kjøretøy (tunge og lette) og bare tunge kjøretøy i norske vegtunneler per million kjøretøy-kilometer, for periodene 2016-2021 og 2008-2015.

<sup>5</sup> For årene etter 2015 inngår kun tunnelene som også var med i studien til Høye et al. (2019) i figuren. Etter dette er minst 94 nye tunneler åpnet, som ikke er tatt med i figuren. Disse tunnelene var det ikke mulig å ta med i de oppdaterte analysene.

Det første vi ser av figuren, er at risikoen for kjøretøybranner i tunge kjøretøy er høyere enn risikoen for kjøretøybranner i alle kjøretøy (dvs. Lette og tunge). Figuren viser også utvikling over tid, dvs. i to perioder.

Figuren viser lik risiko for alle kjøretøy i begge periodene (2008-2015 og 2016-2021). Når vi ser kun på tunge kjøretøy, ser vi en noe lavere risiko i den andre perioden. Som vi ser i Figur 5.2 over, er imidlertid tallene for tungbilbranner per år svært lave, og nedgangen er ikke stor. Det foreligger derfor ikke noe robust grunnlag for å trekke noen konklusjoner om utviklingen over tid, dvs. vi kan ikke konkludere endelig med at risikoen for tungbilbranner har gått ned. Tabell 5.4 viser risiko for branner i alle kjøretøy og i tungebiler per år. Kolonnene til høyre for alle tunneler (Ett-/toløps) viser en betydelig årlig variasjon.

Tabell 5.4: Antall branner (totalt og i tunge kjøretøy) per million kjøretøykilometer per år.

	Branner per mill. kjøretøykilometer (alle)			Branner per mill. kjøretøykilometer (tunge)		
	Ett-/toløps	Ettløps	Toløps	Ett-/toløps	Ettløps	Toløps
2008	0,021	0,029	0,006	0,072	0,105	-
2009	0,019	0,023	0,012	0,053	0,069	0,019
2010	0,018	0,023	0,010	0,081	0,100	0,046
2011	0,030	0,038	0,019	0,100	0,147	0,035
2012	0,025	0,031	0,017	0,051	0,056	0,045
2013	0,027	0,038	0,013	0,080	0,107	0,043
2014	0,024	0,030	0,015	0,081	0,095	0,062
2015	0,019	0,021	0,015	0,052	0,069	0,029
2016	0,025	0,033	0,015	0,079	0,095	0,056
2017	0,024	0,030	0,016	0,050	0,059	0,037
2018	0,027	0,033	0,018	0,074	0,097	0,039
2019	0,022	0,025	0,017	0,047	0,057	0,030
2020	0,024	0,032	0,014	0,059	0,094	-
2021	0,028	0,033	0,021	0,055	0,061	0,045
Alle år	0,024	0,030	0,015	0,066	0,085	0,036

## 5.2 Endringer i risikopåvirkende faktorer over tid

I dette avsnittet fokuserer vi på endringer i løpet av perioden 2008-2021 som kan ha påvirket risikoen for tungbilbranner i tunneler med høy stigning. Vi ser på faktorer knyttet til sjåførere, til kjøretøy og på tiltak i og ved tunnelene.

### 5.2.1 Faktorer knyttet til kjøretøy

Informantene la særlig vekt på fire ting. Den første er at kjøretøystandardene generelt har blitt bedre. Flere mente at tungbilene generelt er nyere og at kvaliteten på utstyret er bedre; bremsene er bedre og motorkvaliteten er bedre. En av informantene mente at det var mer vanlig med turbohavari før enn nå (dette er en viktig årsak til tungbilbranner som påpekes i Nævestad mfl. 2016). En annen sa at teknologien generelt har blitt bedre med nyere kjøretøybaser med mere varslinger og oppdaterte system. Dette er bedre system som gjør at kjøretøyenes motordeler kanskje tåler varme bedre.

Den andre faktoren er at kjøretøyenes serviceplaner og vedlikehold har blitt bedre, slik at de får utført bedre jevnlig vedlikehold. Dette er, som vi har sett over, tett knyttet til tekniske feil som kan føre til kjøretøybrann. En av informantene sa at:

*Vedlikeholdet er mye bedre. Rengjør motor, ikke så mye som er tilgriset. Støv kan også ta fyr. Bileierne har gullavtaler og regelmessig vedlikehold. Det kan endre seg om rammevilkår endrer seg. Noe av det første bileierne firer på er vedlikehold.*

Det ble også nevnt at det kan være forskjeller mellom norske og utenlandske bileiere på dette punktet. En annen informant mente også at PKK kontrollen, EU-kontrollen, bidrar til bedre vedlikehold av kjøretøy, fordi kontrollen blir strengere og strengere; med stadig nye krav.

Den tredje faktoren er at retarderteknologien har blitt bedre. Retarderteknologien kom i 1998, men den har blitt mye, mye kraftigere med tiden, og den kraftigste er mye sterkere enn motoren i seg selv. Moderne lastebiler har hydraulisk retarder, og de sterkeste er på 450 newtonmeter. Retarderen gir mulighet for mer langvarig bremsing enn de vanlige bremsene på hjulene, og man kan holde litt større fart i lange nedoverbakker. En av informantene sa at mens man i gamle dager gjerne ble liggende bak lastebiler i nedoverbakke fordi de var forsiktige med å bruke brems, brukes hydrauliske retardere som gir så stor motstand at lastebiler kan holde like stor fart som resten av trafikken gjennom tunnelen. Vi kan spekulere i om denne teknologien har ført til at sjåførers feilbremsing nedover i tunnel har blitt mindre viktig som risikofaktor for brann. Det å bremse riktig nedover med fotbrems, ser ut til å ha vært mer utfordrende før; konsekvensene av feilbremsing ser i alle fall ut til å ha vært større.

Den fjerde faktoren som ble nevnt er knyttet til at krav til miljøvennlig drivstoff og miljøvennlig utslippsreducerende teknologi (for eksempel partikkelfilter) har ført til høyere temperaturer i motor og manifold, partikkelfilter og eksosrør. En av informantene sa at:

*Det er nye utslippskrav til forbrenningsmotor, som gjør at du kan oppnå høyere kompresjon og høyere varme. Det er store krav til kjøling. Man må gjøre tiltak, fordi man får andre utfordringer med varme. (...) Det som en putter i motoren har også en kjøleeffekt. Nyere drivstoffer har mindre kjøleeffekt, produsentene er veldig oppmerksomme på dette.*

En annen informant sa at:

*Det er innenfor de siste ti årene hvor du har et partikkelfilter som må ha rundt en 400 grader for å fungere (...) den kassa som sitter da som en eksospotte, har en veldig, veldig høy driftstemperatur. (...) Jeg tror nok kjølesystemer og sånt, det har blitt mye bedre på grunn av det her og bedre varsling hvis det er noen feil som oppstår.*

Miljøvennlig diesel krever høyere temperaturer enn vanlig diesel og gassmotorer krever enda høyere temperatur. Samtidig som temperaturene har økt, har imidlertid også motorene og utstyret blitt utviklet for å tåle høyere temperaturer. Vi vet imidlertid ikke om det betyr at den økte risikoen knyttet til høyere temperaturer er kompensert.

## 5.2.2 Faktorer knyttet til førere

Informantene hadde ikke noen sterke formeninger om at tungbilførernes kompetanse på å kjøre i lange og bratte tunneler har endret seg over tid. En av informantene påpekte imidlertid at vedkommende opplever at sjåfører har fått mer kunnskap og bevissthet om brann i tunnel:

*[De har] stor respekt for skilte når det står "snu og kjør ut", det gjorde de ikke før. Om det er generelt (...) vet jeg ikke. De fleste vet at det brenner når vi sier at det brenner. Det er mye snakk om de som kjører forbi bomber og alt mulig. Mitt inntrykk er at folk er flinke til å evakuere tunnelen, lastebiler setter fra seg henger for å snu og komme seg ut enn å kjøre frem for å se hva som skjer også ta det derifra.*

### 5.2.3 Faktorer knyttet til tiltak i og ved tunnelene

Informantene brakte i liten grad faktorer til tiltak i og ved tunnelene da vi diskuterte faktorer som kan ha påvirket risiko for branner i tunge kjøretøy over tid. Det som noen nevnte, uten at det ble knyttet til bestemte effekter, var tiltakene som har blitt innført i Oslofjordtunnelen (se vedlegg 4).

## 5.3 Faktorer som kan påvirke risikoen for brann i fremtiden

I dette avsnittet fokuserer vi på endringer i løpet av de neste 10-20 årene som kan forventes å påvirke risikoen for tungbilbranner i bratte tunneler. Vi skriver om de faktorene som ble nevnt av informantene i intervjuene, og faktorer som er beskrevet i kilder som informantene refererte til i intervjuet. Dette avsnittet tar ikke for seg alle faktorer som kan påvirke risiko for brann i fremtiden. For eksempel skriver vi ikke utfyllende om konsekvenser av brann i lasten til kjøretøy. Vi understreker at det er betydelig usikkerhet knyttet til disse faktorene, siden det handler om hva som kan skje i fremtiden.

### 5.3.1 Faktorer knyttet til kjøretøy

Også på dette spørsmålet fokuserte informantene først og fremst på faktorer knyttet til kjøretøy, først og fremst hvilke drivlinjer som forventes å bli blir mer utbredt de neste 10-20 årene, og hvordan det kan påvirke risiko for kjøretøybrann og konsekvenser av brann i tunnel.

**Trender for drivlinjer og drivstoffkategorier.** Det finnes flere drivlinjer og drivstoffkategorier for lastebiler: 1. Diesel, 2. FAME (biodiesel), 3. HVO (biodiesel), 4. Komprimert (bio)gass (CBG), 5. Flytende (bio)gass (LBG), 6. Batterielektrisk (BEV), 7. Hydrogenelektrisk (FCEV), 8. Hybrid (HEV) og 9. Plug-in hybrid (PHEV) (Pinchasik mfl., 2021).<sup>6</sup>

Nasjonal Transportplan, EU-regulativer og klimamål legger politiske føringer for innføring av nullutslippskjøretøy. NTP beskriver at «innen 2030 skal ... 50 prosent av nye lastebiler være nullutslippskjøretøy» (NTP, 2021, s.13). For tunge biler trådte et EU CO<sub>2</sub>-utslippsregulativ (Regulativ (EU) 2019/1242) i kraft fra august 2019 (Pinchasik mfl., 2021). Fra 2025 skal utslippet reduseres med 15% og fra 2030 med 30% i forhold til referanseperioden. Kravene gjelder i første omgang store lastebiler (>16 tonn). Pinchasik mfl. (2021) skriver at «EUs CO<sub>2</sub>-krav til lastebiler medfører at bilprodusentene må utvikle batterielektriske eller hydrogenlastebiler for salg i Europa frem mot 2025 og 2030, da det ikke er tilstrekkelig å bare effektivisere diesellastebiler» (s.12). Figenbaum mfl. (2019) skriver at antagelsen er at minimum halvparten av reduksjonen må nås ved å selge null- eller lavutslippslastebiler.

Selv om EU har flere lovendringer under innføring<sup>7</sup> som skal gjøre det enklere å bygge energieffektive batterielektriske lastebiler, samt direktiv om offentlige innkjøp, som vil øke tilfanget av modeller og varianter av nullutslippskjøretøy (Pinchasik mfl., 2021), så er målene fra NTP for lastebiler for 2030 usikre fordi nullutslippsvarianter av slike kjøretøy ikke finnes i ordinær serieproduksjon enda (Figenbaum mfl., 2019). Dette gjelder lastebiler til langtransport. Hydrogen kan bli nødvendig for de lastebilene som kjører lengst og trekker tyngst last.

---

<sup>6</sup> FAME = Fatty Acid Methyl Ester/fettsyremetyler; HVO = Hydrotreated Vegetable Oil; CBG = Compressed biogas; LBG = Liquid Biogas; BEV = Battery Electric Vehicle; FCEV = Fuel Cell Electric Vehicle; HEV = Hybrid electric Vehicle; PHEV = Plug-in Hybrid Electric Vehicle.

<sup>7</sup> Forordningen om CO<sub>2</sub>-utslipp tillater at totalvekt kan overskrides med inntil 2 tonn (EUs CO<sub>2</sub>-forordning tunge biler) for å gi rom for å installere batterier uten at nyttelast går tapt. Med dagens teknologi er 2 tonn nok til batterier med et energiinnhold på inntil 300 kWh på pakkenivå. Videre er det et annet direktiv som krever at føreren får bedre sikt og som tillater at lastebilenes front kan bli inntil 90 cm lenger for å redusere dødvinklen foran til siden på bilen. Dette vil samtidig kunne gjøre lastebilene mer aerodynamiske, selv om direktivet er innført av trafiksikkerhetsårsaker.

Pinchasik mfl. (2021) gjorde en gjennomgang av lastebilprodusentenes strategier mot 2025, og det ser ut til at de aller fleste produsentene primært fokuserte på industrialisering av el-lastebiler, fremfor introduksjon av serieproduserte hydrogenlastebiler. Hydrogenlastebiler ligger lenger fram i tid. De fleste produsenter antyder markedsintroduksjon mot slutten av 2020-tallet. Det er enighet om at det er mulig å lage batterielektriske lastebiler og trekkvogner for langtransport, men hydrogen kan vise seg å bli nødvendig for de lastebilene som kjører lengst og trekker tyngst last. Hva som bestemmer hvilken transport som evt. krever hydrogen vil bero på operasjonelle forhold og utviklingen i energitettheten til batterier, kostnader for batterier og brenselceller og kostnaden for grønt hydrogen (Pinchasik mfl., 2021).

Så langt er elektrifisering av lastebiltransport fortsatt i en tidlig fase. I kjøretøyregisteret i Statens Vegvesen var det per 31.12.2020 «34 batterielektriske lastebiler, 2 ladbare hybridlastebiler, 4 hydrogen lastebiler og 3 batterielektriske trekkvogner registrert i Norge. Det er totalt 70 186 last biler, herunder 9 779 trekkbiler i Norge. Blant brukerne er: ASKO (både el-lastebiler og hydrogenlastebiler), Posten, DB Schenker og flere av de store entreprenørene» (Pinchasik mfl., 2021, s. 6).

Biogass og biodiesel er også drivstoff som anses som tiltak for reduksjon i utslipp av klimagasser. Miljødirektoratet, Statens vegvesen, Kystverket, Landbruksdirektoratet, Norges vassdrags- og energidirektorat og Enova lanserte i 2020 en analyse som heter Klimakur 2030, hvor de så på «potensialet for å redusere ikke-kvotepålagte utslipp av klimagasser og tiltak som øker opptaket og reduserer utslipp fra skog og annen arealbruk» (Miljødirektoratet, 2020). Det er beregnet to tiltak som omfatter bio-drivstoff: 1) Økt bruk av avansert flytende biodrivstoff i vegtransport (T13: -2,55 mill. tonn CO<sub>2</sub>-ekv. 2021-2030) og 2) 10% av nye trekkvogner går på biogass i 2030 (T12: -0,47 mill. tonn CO<sub>2</sub>-ekv. 2021-2030) (Pinchasik mfl., 2021). Trekkvogner utpeker seg som et særlig egnet kjøretøysegment for bruk av flytende biogass (Miljødirektoratet, 2020b). Andelen gasskjøretøy var lav i Norge i 2020 (ca. 0,1% varebiler, ca. 5% busser og ca. 0,5% lastebiler). For avansert biodrivstoff er målet en gradvis opptrapping av omsetningskravet til 10% avansert biodrivstoff i 2030 (slik at ambisjonene i Granavolden-plattformen om 40% innblanding etter dobbelttelling nås) (Miljødirektoratet, 2020a). I Hurdalplattformen (2021) vektlegges biodrivstoff mer enn tidligere, men det er uklart hva slags biodrivstoffpolitikk som får flertall i Stortinget.

**Risiko for brann og konsekvenser.** Gitt de overnevnte trendene, blir det dermed et spørsmål om hvilken brannrisiko det utgjør at mer av lastebilparken på norske veier i fremtiden er drevet av elektriske batterier eller hydrogen, samt trekkvogner på biogass.

Pinchasik mfl. (2021) vurderte at det fram mot 2025 og videre mot 2030 vil bli tilgjengelig personbiler, varebiler og lastebiler med null- og lavutslippsdrivsystemer i mye større omfang enn i dag. Det vil gi nye behov for ladeinfrastruktur for el og gass, oppstillingsplasser for lading og en mulig økning i transport av hydrogen på vegnettet. Alternative energibærere har andre brann- og eksplosjonsegenskaper enn fossilt drivstoff, og medfører nye problemstillinger med hensyn til brannsikkerhet i lukkede rom (Reitan mfl., 2016). Med andre ord er det behov for å øke kunnskapen om hvilke utfordringer kjøretøy med nye energibærere gir, hvordan de skal håndteres (Bøe, 2017), og hvilke kompensierende tiltak man bør vurdere å innføre i tunneler for å ivareta brannsikkerheten. Brann i tunneler med lastebiler er spesielt kritisk fordi de transporterer så mye energi som kan være lettantennelig.

**Elektriske batterier.** En av informantene sa at:

*Batteridrevne kjøretøy det kommer for fullt nå. Vi leverer 100 biler i året på nærdistribusjon og så fra neste år, så begynner en jo da på landtransport på regionale kjøretøy og det er ingen andre som tenker på annet strøm i dag. Så jeg tror diesel blir mer eller mindre faset ut i løpet av hvert fall 10-15 år fremover. Da er det regenererings problematikken da; du skal lade i lange nedoverbakkene, så batteriene blir varme, så det blir helt nye utfordringer.*



Informanter som er eksperter på ulike energiformer og drivlinjer sa at en overgang fra diesel til elektriske batterier vil føre til en nedgang i risikoen for brann i lastebiler. Vi spurte om det blir færre branner når diesel fases ut:

*Ja, det blir nok radikalt færre, på grunn av at du har jo ikke noen sånne hotspots rundt omkring deg i selve kjøretøyet. (...) jeg tror det er mye mindre sjanse for at det tar fyr i en el-bil enn diesel eller gassbil. Jeg tror at det vil senke statistikken betydelig.*

Hvor mye brannrisikoen reduseres er avhengig av typen batteri. Noen litiumvarianter er laget av sikrere materialer og mer stabil kjemi enn andre varianter, som gjør at de er mindre brannfarlig. Robuste batterier og brenselceller er avgjørende for at batteriene varer ut lastebilens tekniske levetid (Pinchasik mfl., 2021). Kvaliteten på et batteri kan også variere med produksjonssted og land, fordi ulike land har ulike kvalitetskrav til fasiliteter osv.

Samtidig, konsekvensene av en brann i el-batteri til en lastebil i tunnel kan være større, sammenlignet med diesel.

*Ja, du får jo ikke slukket det, det skal i alle fall ekstremt mye vann til. (...) Hvis det er en personbil, så tar man og putter den oppi en container full av vann for å få stoppet av det, men på lastebil så blir det nok en helt annen situasjon. Da må det bare være ekstremt med vannmengder for å få prøvd å kjøle ned.*

Brannbelastningen ved en brann vil blant annet variere med batteriets størrelse (kWh). Langtransport krever batterier med større kapasitet, sammenlignet med regional og lokal distribusjon. Produsenter arbeider med å utvikle batterier for langtransport fra 540 kWh til større enn 700 kWh (Pinchasik mfl., 2021). En kartlegging av brannrelaterte problemstillinger ved el- og gassdrevne kjøretøy i innelukkede rom, konkluderte med at, sammenlignet med brannrisikoen for konvensjonelle kjøretøy i innelukket rom, er det utfordrende at brann i el-kjøretøy har potensielt lang slukketid, krever høyt vannforbruk ved slukking og at det er fare for reantening etter slukking (Reitan mfl., 2016). Brann i el-batterier produserer farligere gasser enn diesel og kan derfor gjøre større skade på mennesker som evakuerer tunnelen, og det kan gjøre det svært vanskelig, hvis ikke umulig, for brannmannskap og røykdykkere å komme til brannen for å slukke den. Ved brann i batteriene til en lastebil i tunnel, hvor brannmannskap ikke kommer til, må lastebilen brenne ut inne i tunnelen, noe som kan forårsake svært stor skade på infrastrukturen og kjøretøy i tunnelen, og utgjøre en fatal hindring for mennesker som skal evakuere tunnelen. Får man kjøretøyet ut av tunnelen er det stadig fare for reantening, og kjøretøyet må plasseres et trygt sted til det har brent ut. En informant nevnte muligheten for å lage vannbasseng inni tunneler, eller i nærheten av tunneler, for å slukke tungbilbrann. Et annet mulig tiltak som ble nevnt er roboter som kan hente ut brennende kjøretøy, for eksempel elkjøretøy.

**Gasskjøretøy.** Gasskjøretøy har stor brannbelastning hvis det tar fyr inne i en tunnel. En analyse av brannrelaterte problemstillinger med gassdrevne kjøretøy i innelukkede rom konkluderte med at hvis gassen skulle akkumuleres i et innelukket rom, kan selv små utslipp føre til eksplosjon (Reitan mfl., 2016). Risikoen for brann og eksplosjon i gasskjøretøy skal være forebygget ved at kjøretøyene er utstyrt med sikkerhetsmekanismer. Ved flere ulykker har det vært ikke-fungerende sikkerhetsmekanismer, og det er manglende kunnskap om hvordan aldring og slitasje påvirker sikkerhetsmekanismer og lekkasje fra tank (Reitan mfl., 2016).

En av informantene mente at elkjøretøy kommer til å bli det desidert største på lastebilfronten, men at gassdrevne kjøretøy kommer til å være aktuelle i mange år fremover.

*(...) Metangassdrift er jo mye billigere selvfølgelig enn en elbil så lenge det er det samme som du får samme konkurransepoeng da i et anbud på den grønne linja, så med null utslipp, så kommer den til å bli med i mange år enda, da i form av LNG, altså nedkjølt gass da for å få opp og rekkevidden på samme måte som en dieselbil. Den er*

*med i alle fall i 10 år til, tenker jeg. Men det er ikke... vi snakker jo 460 hestekrefter som den kraftigste der så det er jo ikke det som ble valgt som en lang transportbil, det er mer nærdistribusjon, (...) og sånne ting.*

Vi er ikke kjent med risikoen for brann i gassdrevne kjøretøy, men brannproblematikken er absolutt til stede fordi driftstemperaturen er varmere enn for et dieseldrevet kjøretøy. Konsekvensene er også potensielt betydelige, fordi gassen må «brenne ut». Vi kjenner til en kraftig brann med en gassdrevet lastebil i Merraskottunnelen i 2021. Lastebilen hadde akkurat kjørt gjennom Oslofjordtunnelen.

*(...) Gasstemperaturen på en norsk forbrenningsmotor er mye høyere enn på en dieselmotor. Så eksosutslippet og manifolder alle komponenter som blir varmere, for det blir 100-150 grader varmere enn i en dieselmotor. Med eventuelt oljesøl og slike ting...en sånn motor kan jo antenne brann raskere enn en dieselmotor.*

Gassdrevne kjøretøy er vanlig blant busser og blant søppelbiler.

**Hydrogen.** Hydrogen «H<sub>2</sub>» er en energibærer som med hjelp av brenselceller kan produsere elektrisk energi i kjøretøyet. Hydrogen finnes ikke i fri form, men kan produseres ved splitting av hydrogenholdige stoffer som vann «H<sub>2</sub>O» og metan «CH<sub>4</sub>». Hydrogen er jordens letteste grunnstoff og med et energiinnhold som per kg er ca. 3 ganger større enn dieselolje og per kg ca 100 ganger større enn energiinnholdet i batterier. Vekt er ikke et problem for denne energibæreren. Utfordringene med hydrogen som energibærer er lagring i kjøretøyet og at hydrogen tar stor plass i gassform og blir en lagringsbar flytende væske først ved minus 252 grader Celsius. Lagring av hydrogen krever derfor enten store trykktanker eller avanserte termosbeholdere.

Norge har naturressurser i form elkraft og naturgass for produksjon av hydrogen. Det er derfor stor interesse for hydrogen som energibærer og for norsk industriutvikling relatert til hydrogen. Hydrogendrevne lastebiler fungerer på den måten at brenselcellene er et lite kraftverk som omdanner hydrogen til elektrisk strøm. Strømmen brukes til å drive en elmotor, som sender kraft til drivhjulene. Et batteri tjener som mellomlagring for strømmen.

Tungt.no skriver 28. april 2023 at ingen hydrogenlastebiler er blitt registrert i Norge siden 2021, ifølge tall fra OFV. De fire hydrogenlastebilene som finnes i Norge, ble registrert i 2019 og 2020.<sup>8</sup> Samtidig lanserte tungt.no nyheten om at Tyske Quantron bygger «norgesversjon» av hydrogenlastebil, som kunne bestilles fra april 2023. Denne har samme nyttelast som diesellastebiler – og en modell med inntil 1400 km rekkevidde som er spesielt tilpasset nordiske forhold. Vi er kjent med at et norsk transportselskap gjorde en intensjonsavtale i mai 2023 om å bestille 50 slike lastebiler, som skulle leveres i 2024.

Hydrogen er veldig brannfarlig og eksplosivt og gir egne utfordringer for brannsikkerheten. Det har et lavt tennpunkt, lav tennenergi og vide eksplosjonsgrenser. Når hydrogen lekker, vil det umiddelbart antennes og danne en jetflamme. Vi er ikke kjent med risiko for lekkasje i hydrogenkjøretøy, men slike systemer skal utstyres med en rekke sikkerhetsmekanismer som skal detektere lekkasje og iverksette tiltak.<sup>9</sup> Det er usikkerhet knyttet til brannsikkerheten til slik teknologi, når det brukes i kjøretøy, for eksempel i tunneler, og behov for mer forskning.

### 5.3.2 Faktorer knyttet til førere

Informantene hadde få innspill å komme med på dette punktet når det gjaldt førerrettede tiltak. En ting som ble nevnt er at ny kjøretøyteknologi vil kreve ny kunnskap fra trafikantene. En overgang til

---

<sup>8</sup>[https://www.tungt.no/article/view/1027013/quantron\\_bygger\\_norgesversjon\\_av\\_hydrogenlastebil\\_kan\\_bestilles\\_na](https://www.tungt.no/article/view/1027013/quantron_bygger_norgesversjon_av_hydrogenlastebil_kan_bestilles_na)

<sup>9</sup> <https://www.sfpe.org/publications/fpemagazine/fpeextra/etarchives2/fpeetissue49>

el-drevne tungbiler vil for eksempel kreve ny kunnskap om hvordan man skal bruke regenererings-teknologi for å lade mens man kjører ned lange og bratte stigninger.

En annen faktor som ble nevnt er knyttet til økonomiske rammebetingelser i godstransport og stress og tidspress. Negative økonomiske rammebetingelser kan føre til at sjåfører kjører med «høye skuldre» og kanskje holder litt høyere fart enn det de burde gjort. Da får de ikke fokusert på optimal kjøring oppover i tunneler eller nedover, og da kan man få flere branner. Det er viktig at avsender og mottaker av gods ikke bidrar til tidspress, som kan påvirke sjåførenes kjørestil negativt. Tidspress ble også knyttet til regler for kjøre- og hviletid; dvs. at man stresser for å rekke steder man skal ta hvil. Dette kan bli ekstra utfordrende dersom det er vegarbeid, dårlig vær, man skal rekke en ferge osv. Negative økonomiske rammebetingelser kan også føre til mangelfullt kjøretøyvedlikehold, som også øker risikoen for tekniske feil og brann.

### 5.3.3 Faktorer knyttet til tiltak i og ved tunnelene

En av informantene nevnte at den teknologiske utviklingen kommer til å gå fort og at man i fremtiden sannsynligvis kommer til å ha andre kameraer, termokameraer, varmeskanning, høytaleranlegg og ny teknologi for å kommunisere med kjøretøy, og ha oversikt over alle i tunnelen, mobilllogging osv. Kommunikasjonen med trafikantene vil utvikle seg voldsomt. Dette må også ta hensyn til personvern. Det er også sannsynlig at utstyr i tunnelen vil kunne snakke med kjøretøyet og at kjøretøy vil ha automatiske slukkeanlegg. Blant faktorer knyttet til tiltak i og ved tunnelene, som ble diskutert i intervjuene, er portaler for temperaturmåling, teknisk kontroll, trafikkregulering, samvirkende ITS (C-ITS) teknologi, informasjon til sjåførene gjennom variable skilt. Siden de tre første diskuteres i kapittel 4.2 og de to siste i kapittel 4.3, går vi ikke nærmere inn på dem her.

## 6 Oppsummering og diskusjon

I diskusjonen legger vi særlig vekt på å fremheve det som er ny kunnskap i rapporten, og hvordan den skiller seg ut fra tidligere forskning.

### 6.1 Hva forklarer endringer over tid?

Nævestad og Blom (2023) finner at det totale antallet kjøretøybranner i vegtunneler har økt over tid i perioden 2008-2021. De vet imidlertid ikke hva som forklarer dette, og nevner det å forklare økningen som et behov for fremtidig forskning. I denne rapporten har vi funnet at økningen i kjøretøybranner over tid kan forklares av økningen i trafikkarbeid. Utviklingen er imidlertid noe ulik for lette og tunge biler. Risikoen for tungbilbranner i tunneler har gått litt ned. Tallene for tungbilbranner er imidlertid relativt lave, og det foreligger ikke noe robust grunnlag for å trekke noen konklusjoner om utviklingen over tid, dvs. vi kan ikke konkludere endelig med at risikoen for tungbilbranner har gått ned.

### 6.2 Terskelverdier for stigning

Det som er nytt når det gjelder terskelverdier for stigning i den foreliggende studien, er at vi har oppdatert beregningene for dette med et datagrunnlag som er omtrent dobbelt så stort som det forrige (jf. Høye mfl. 2019). Det andre som er nytt, er at vi finner at sammenhengen mellom lengde på bratt stigning og branner er sterkere i modellene i den foreliggende studien enn i 2019-modellene i Høye mfl. (2019). Dette til tross for at det i de aktuelle modellene er kontrollert for hvorvidt tunnelene er undersjøiske.

Vi finner at antall branner øker til omtrent det firedobbelte for alle kjøretøy når tunneler har en stigning på minst 5 prosent over en lengde på 6 km, i forhold til en ellers sammenlignbar tunnel uten stigning. For stigninger over 7 prosent øker brannrisikoen enda mer: i forhold til en tunnel uten stigning, har tunneler med en stigning over 7 prosent over 6 km 7,8 ganger så mange branner som en flat tunnel. Tilsvarende forholdstall for tungbiler er 3,14 ganger økning i branner for 6 km med 5% og 17,6 ganger økning i branner for 6 km med 7% stigning. Denne kunnskapen om sammenhengen mellom lengde med høy stigningsgrad og brannforekomst er svært viktig, særlig fordi det ikke finnes tilsvarende studier internasjonalt.

### 6.3 Hvordan skal vi tolke resultatene?

#### 6.3.1 Hvordan skal vi tolke resultatene om terskelverdier?

Analysene av sammenhengen mellom maksimal stigningsgrad og antall branner viser et knekkpunkt ved 7 prosent maksimal stigning hvor risikoen øker betydelig for kjøretøybrann. De viser ingen klar sammenheng mellom maksimal stigningsgrad og branner verken under eller over 7 prosent, dvs. at antall branner ikke endrer seg vesentlig fra f.eks. 3 til 4 eller fra 4 til 6 prosent. Resultatene kan likevel **ikke** tolkes slik at stigningsgraden er uten betydning under (eller over) 7 prosent. Knekkpunktet på 7% skyldes nok at de undersjøiske tunnelene er blant tunnelene med en maksimal stigningsgrad på 7 prosent eller høyere, og disse har ikke bare bratte, men også svært lange stigninger. Lengden på bratt stigning har også vist seg å være av stor betydning for antall branner, især over 7 prosent. Knekkpunktet som man ser ved 7 prosent maksimal stigning, oppstår altså som følge av kombinasjonen av lang **og** bratt stigning. Her er det med andre ord en blanding av maksimal stigning og lengden på stigning som bidrar til knekkpunktet.

At man ikke ser noen tydelig sammenheng mellom maksimal stigning og branner for stigninger på 3 til 6 prosent eller over 7 prosent, kan tyde på at maksimal stigning har størst betydning for stigninger fra 7 prosent. Det kan imidlertid også skyldes tilfeldigheter i datamaterialet; bl.a. at det i flere stigningskategorier finnes få tunneler, især for stigninger over 9 prosent. Dessuten viser analysene av sammenhengen mellom lengde på bratt stigning og antall branner at det også for stigninger på 5-7 prosent er en sammenheng mellom lengde på stigningen og antall branner. Dermed er stigningsgraden også av betydning fra fem prosent.

På denne bakgrunnen har vi ikke grunnlag for å oppgi grenseverdier for hva som er en «trygg» stigning: Risikoen øker fra ca. 3 prosent og den øker mer, jo lengre og jo brattere stigningen er.

Vi har i denne studien gjort separate analyser av sammenhengen mellom maksimal stigning og lengden på bratt stigning. Ideelt sett hadde vi kombinert dette i én analyse hvor vi ser på den kombinerte effekten av stigningsgrad og lengden på stigningen. Å undersøke slike kombinerte effekter krever imidlertid et svært stort datagrunnlag hvor man har et tilstrekkelig antall tunneler og branner for flest mulig kombinasjoner av lengde og stigningsgrad. Uten et tilstrekkelig datagrunnlag risikerer man å få misvisende resultater; for eksempel kan man få resultater som tyder på at det finnes sammenhenger som faktisk kun er basert på tilfeldigheter.

### 6.3.2 Hvordan tolker vi statistisk signifikans?

De statistiske modellene viser for de enkelte prediktorene hvorvidt de er statistisk signifikante. Hvis et resultat for en prediktorvariabel er statistisk signifikant, betyr dette at resultatet ville vært svært usannsynlig, dersom denne prediktorvariabelen i realiteten ikke har noen effekt. Hvorvidt resultater er statistisk signifikante, avhenger både av hvor stor effekten man finner er, og hvor stort datagrunnlaget er. Er datagrunnlaget lite, hvis det for eksempel kun er veldig få branner i en gruppe av tunneler, må effekten være veldig stor for at resultatet blir statistisk signifikant. Har man derimot et svært stort datagrunnlag (her: mange branner), vil selv en veldig liten effekt kunne bli statistisk signifikant. Når vi tolker resultater, ser vi derfor ikke bare på hvorvidt de er statistisk signifikante, men vi tar også hensyn til hvor store effektene faktisk er. Dette kommenterer vi også i gjennomgangen av resultatene. Det må også nevnes at vi sammenlikner undergrupper av ulike tunnelgrupper (for eksempel med ulike stigningsgrader) i analysene, med fokus på risiko for branner i alle (dvs. lette og tunge) og tunge kjøretøy. Antallet branner er da ofte lite i de ulike kategoriene av stigninger, og det kan ha noe å si for om resultatene er statistisk signifikante, når man sammenlikner på tvers. Dette er et argument for å også legge vekt på signifikansberegninger for alle kjøretøy, når man vurderer effekten av stigning.

### 6.3.3 Hvor mye har datakvalitet og registreringsopplegg å si?

Det er også viktig å vurdere betydningen av feilkilder og ev. endringer i registreringsopplegg og data-tilfang som har blitt brukt over tid i våre brannkartlegginger. Dette kan også påvirke utvikling i antall branner og tilløp over tid. I hvilken grad skyldes for eksempel økningen i kjøretøybranner over tid i perioden 2008-2021 forskjeller i rapportering og datakvalitet? Kartleggingen av branner i perioden er gjort i tre omganger (Nævestad og Meyer 2012; Nævestad mfl. 2016, Nævestad og Blom 2023). Vi har komplementert data fra VTS om branner med data fra BRIS i de to siste kartleggingene. I den siste kartleggingen var det flere branner fra BRIS som ikke var i VTS dataene, noe som indikerer økt kvalitet på BRIS. Økt rapportering av branner i ulike datakilder kan potensielt forklare økning i tungbilbranner og tilløp over tid. Det er vanskelig å konkludere om hvorvidt den totale økningen i antall branner over tid kan forklares med økt kvalitet på statistikken i BRIS (dvs. økt rapportering av branner). Risiko for brann beregnes som antall branner per kjørt km. Flere rapporterte branner over tid tilsier en økning i risiko. I denne studien ser vi imidlertid at økningen i antall branner, som vi ser i Nævestad og Blom (2023), er i tråd med det man skulle forvente ut fra økningen i trafikkarbeid for lette kjøretøy og litt lavere enn forventet for tunge kjøretøy. Det tyder ikke på en betydelig «rapporteringseffekt» på grunn av økt kvalitet i BRIS statistikken, som gir utslag i høyere risiko for branner. Det vi kan konkludere med er at

dersom BRIS har blitt bedre, har vi antakelig fått en mer presis statistikk over kjøretøybranner i vegtunneler.

Antall branner rapportert fra brannvesen til TØI kan også variere noe i de tre kartleggingene vi har gjort. Rapporteringsgraden fra brannvesen var imidlertid høyest i den første kartleggingen. Dersom dette har ført til at vi har fått rapportert færre branner over tid, tilsier det en nedgang i risiko. Økningen i antall branner er imidlertid, som nevnt, i tråd med det man skulle forvente ut fra økningen i trafikkarbeid. Vi har altså to potensielle skjevheter med tilsynelatende ulik effekt. Gitt at risikoen er jevn over tid, ser det ikke ut til at de to mulige rapporteringseffektene har sterk betydning. Dette er imidlertid noe vi må være oppmerksomme på, siden rapporteringen fra brannvesen er avhengig av deres engasjement, tid og ressurser.

Hovedkilden vår for data om kjøretøybranner i vegtunneler har i alle de tre rapportene som kartlegger branner vært rapporter fra Statens vegvesens Veglogger. Dette systemet ble brukt i perioden 2008-2021. Vegloggen har generelt gode data om tunnelene som brannene og tilløpene har forekommet i, tidspunkt for brannene, antall involverte kjøretøy, hvor lenge vegtunneler har vært helt stengt osv. Vi skulle opprinnelig også inkludere data fra 2022 i den foreliggende studien, basert på det nye systemet HBT. Året 2022 er det første året med full innføring av HBT systemet. Vi har imidlertid valgt å ikke ta med data fra HBT, fordi vi opplever at dataene ikke omfatter et like bredt spekter av hendelser som Vegloggen. HBT gir færre branner og tilløp i 2022 enn Vegloggen gjorde i 2021 og 2020. Det kan skyldes at HBT er et nytt system, med nye rutiner for registrering av hendelser og endrede muligheter for å ta ut statistikk. Samtaler og intervjuer tyder på det. Vi velger derfor å ikke ta med branndataene for 2022 i denne rapporten.

#### 6.3.4 Hvor mye har det å si at 84 nye tunneler ikke er tatt med i analysene?

For 84 tunneler som ble åpnet etter 2015, hadde vi ikke tilgang til relevant informasjon, især om stigningene i tunnelene, slik at det ikke var mulig å ta disse tunnelene med i analysene.

Disse nye tunnelene hadde til sammen 13 branner, hvorav fire var tungbilbranner. Alle tungbilbrannene skjedde i ikke-undersjøiske tunneler. Når man ser på antall branner per million kjøretøykilometer, er de nye tunnelene stort sett sammenlignbare med tunnelene som inngår i analysene. Det eneste unntaket er at det ikke har vært tungbilbranner i noen av de nye undersjøiske tunnelene i 2016-2021. Hadde det bare vært én tungbilbrann i en av de nye undersjøiske tunnelene, hadde de nye undersjøiske tunnelene hatt omtrent like mange tungbilbranner per mill. kjøretøykilometer som tunnelene som inngår i analysene. Tungbilbranner i de nye undersjøiske tunnelene ville uansett ha stått for en veldig liten andel av alle tungbilbrannene i undersjøiske tunneler; i datagrunnlaget for analysene er det 83 tungbilbranner i undersjøiske tunneler. Også når man ser på antall kjøretøykilometer med tungbiler, utgjør de nye tunnelene en relativt liten andel av hele datagrunnlaget. I de nye undersjøiske tunnelene ble det kjørt 8,2 mill. tungbilkilometer, mens det i datagrunnlaget for analysene er 457,9 mill. tungbilkilometer (gjelder 2008-2021).

Dermed er mulig at resultatene, især for undersjøiske tunneler, hadde endret seg noe dersom vi kunne ha tatt med de 84 nye tunnelene i analysene. Vi antar imidlertid ikke at endringene hadde vært store, da de nye tunnelene utgjør kun en liten andel av både tungbiltrafikken og tungbilbrannene.

## 6.4 Ni av ti kjøretøybranner i tunneler skyldes tekniske problemer

I henhold til «The Handbook of Tunnel Fire Safety», skyldes over 90 % av brannene i vegtunneler trafikkulykker, særlig påkjøring bakfra (Beard mfl. 2005). Dette står i sterk kontrast til våre funn. Vi har, basert på datasettet fra Nævestad og Blom (2023) over kjøretøybranner i perioden 2008-2021, benyttet imputering for å kartlegge ukjente årsaker til branner. Resultatene viser at rundt ni av ti branner og



tilløp skyldes tekniske problemer i kjøretøy, mens rundt én av ti skyldes trafikkulykker (eneulykke eller kollisjon). Dette er en klar forbedring i forhold til den kunnskapen vi hadde basert på Nævestad og Blom (2023), hvor rundt 60% av brannene og tilløpene hadde uklar årsak eller ingen data, og hvor vi hadde indikasjoner på at i alle fall litt over tre av ti kjøretøybranner hadde tekniske problemer som årsak. Nå kan vi anta, basert på statistiske analyser at ni av ti har tekniske problemer som årsak. Dette viser at forebygging av kjøretøybranner i liten grad handler om forebygging av trafikkulykker (ikke minst fordi vi også kan anta at få ulykker utvikler seg til branner og tilløp). Betydningen av trafikkulykker som årsak til branner har dessuten gått ned over tid. Nævestad og Meyer (2012) fant at eneulykke og kollisjon var oppgitt som årsaker til branner i henholdsvis 7 % og 12 % av brannene i 2008-2011, dvs. nesten 20%. Tilsvarende tall for hele perioden 2008-2021 var 5%. Nedgangen i andelen som har ulykker som årsak skyldes at risikoen for trafikkulykker har blitt sterkt redusert. Nævestad mfl. (2022) finner at risikoen for personskadeulykker med tunge godsbiler involvert har blitt redusert med 73 % fra 2007 til 2020. Tilsvarende reduksjon i risiko for dødsulykker er på 61 %.

## 6.5 Tekniske problemer handler primært om motor

Nævestad og Blom (2023) antar at tungbiler har høyere risiko for brann i tunneler med høy stigningsgrad på grunn av varmgang i brems nedover og varmgang i motor oppover. Dette er antakelig årsaken til at lengden med stigning er avgjørende. I kartleggingen av kjøretøybranner i vegtunneler for perioden 2012-2015 så Nævestad mfl. (2016) nærmere på årsakene til branner og tilløp i tunneler med høy stigningsgrad som involverte tungbiler (Nævestad mfl. 2016). I årene 2012-2015 var det 63 branner og tilløp i tunneler med høy stigningsgrad i Norge. I alt 23 av disse involverte tungbiler. Ti av hendelsene kunne på ulike måter relateres til tekniske problemer knyttet til motoren, mens kun to av hendelsene var knyttet til hjul (brems, hjullager, dekk). Vår studie støtter denne konklusjonen. De norske informantene vi snakket med, som hadde best teknisk kompetanse, la vekt på at lastebilsjåfører stort sett ikke bruker fotbrems når de kjører i nedoverbakke, de bruker retarder. Bruk av retarder fører imidlertid til at motoren er svært varm når man kommer til bunnen av den undersjøiske vegtunnelen, og så blir motoren blir enda varmere når man skal kjøre opp tunnelen. Vår studie tyder altså på at tekniske problemer først og fremst handler om overoppheting av motor, og at det ikke er så relevant å skille mellom ulike mekanismer ned og opp tunnelen. Det er kombinasjonen av nedover- og oppoverbakken som er avgjørende, for da får du for eksempel 4-5 km med belastning på motoren; først ned og så opp. Dette forklarer hvorfor tunge kjøretøy er spesielt brannutsatte i de undersjøiske vegtunnelene.

## 6.6 Brannutsatte undersjøiske vegtunneler har lange strekninger med høy stigningsgrad

Nævestad og Blom (2023) finner at fire undersjøiske vegtunneler har halvparten av alle brannene og tilløpene i tunneler med høy stigningsgrad (112 av 226) i perioden 2008-2021. Vi har forsøkt å finne ut hvorfor disse er spesielt brannutsatte, gjennom å sammenlikne disse fire brannutsatte tunnelene med undersjøiske tunneler generelt og fem undersjøiske tunneler som er omtrent like lange som de brannutsatte og som har stigning over 7%, men som ikke har et tilsvarende høyt antall branner. Vi finner at antallet tungbilbranner per million kjøretøykilometer er 4,5 ganger så høyt i de mest brannutsatte tunnelene som i de øvrige undersjøiske tunnelene.

Vi har sett på faktorer som kan forklare hvorfor de mest brannutsatte har høyere risiko for branner. Forskjellene mellom de mest brannutsatte og de øvrige undersjøiske tunnelene gjelder særlig lengden (antall meter) med stigningsgrad på 7 prosent eller brattere. De mest brannutsatte tunnelene har over dobbelt så lange bratte stigninger i gjennomsnitt som de øvrige undersjøiske tunnelene, og nesten dobbelt så lange bratte stigninger i gjennomsnitt som de fem lange undersjøiske tunnelene med stigning over 7%. Selv om de fem lange undersjøiske tunnelene med stigning over 7% er omtrent like lange som



de brannutsatte (6086 meter i gjennomsnitt mot 7025 meter i gjennomsnitt), har de ikke like lange strekninger med stigninger over 7% som der brannutsatte tunnelene (2871 meter i gjennomsnitt mot 5497). Lengden på den bratte stigningen ser dermed ut til å være forklaringen på den høye brannrisikoen i de mest brannutsatte tunnelene.

## 6.7 Hvilke nye tiltak for å forebygge brannrisiko er mest relevante i en norsk kontekst?

**Unngå å bygge lange og bratte vegtunneler.** Det mest relevante tiltaket for å forebygge branner i tungebiler i norske vegtunneler er å ikke bygge lange og bratte vegtunneler, der det kan unngås. Et av hovedresultatene i studien vår er at tunnelene med lange og bratte stigninger har betydelig høyere risiko for brann. Det å redusere stigningsgraden og lengden på stigningsgraden vil derfor redusere risikoen for kjøretøybranner.

**Andre tiltak for eksisterende lange og bratte vegtunneler.** Vi har imidlertid en rekke lange og bratte tunneler allerede. Det er særlig relevant å sette inn tiltak for å bedre vedlikehold av kjøretøy, og også kontroll av kjøretøy, for å forebygge branner i disse. Sistnevnte er viktig, fordi vi har inntrykk av at ombygde og modifiserte tungebiler kan ha høyere risiko for brann.

Et annet tiltak som er spesielt relevant, er **teknologi for automatisk slukking av brann i motorrom**. Det viktigste argumentet for denne anbefalingen er at slik teknologi finnes i buss i dag og det er også påbudt for anleggsmaskiner som kjører i gruver. Teknologien finnes, intervjuene tyder på at den fungerer og lastebilens motorrom er godt egnet for den. Bakgrunnen for anbefalingen av dette tiltaket er at informantene både i Norge og utlandet sa at det er krevende å forebygge risikoen for brann i tungebiler. De hadde mye fokus på tidlig oppdagelse og konsekvensreduering når branner inntreffer. Dette gjaldt for eksempel i tunnelene i alpeland og Oslofjordtunnelen. Konsekvensreduering kan være utfordrende i de undersjøiske vegtunnelene i Norge, fordi de er lange ettløpstunneler, hvor trafikanter må evakuere gjennom tunnelmunningene, dvs. gå eller kjøre lange distanser med høy stigning. Det finnes risikoreduerende tiltak som virker svært effektivt, for eksempel portaler med varmescannere for tungebiler og permanente kontrollstasjoner for tungebiler, slik som flere av tunnelene i alpeland har. Dette er imidlertid dyrt og ressurskrevende, særlig i undersjøiske vegtunneler med lav ÅDT. Da er det antakelig mer realistisk å satse på automatisk brannslukking i motorrommet i lastebiler. Dette er dessuten et tiltak som vil fungere i alle tunneler.

**Portaler med automatisk varmescanning av tungebiler** for å luke ut overopphetede tungebiler som kan ha forhøyet risiko for brann er et tiltak som har blitt implementert ved fjelltunneler i alpeland i de senere årene. Fjelltunnelene i alpeland har problematikk relatert til stigningsgrad, fordi de ligger nær toppen av fjell, og de er lokalisert på internasjonale transittveier. Dette betyr at kjøretøy som kjører gjennom tunnelene må kjøre betydelige strekninger med høy stigningsgrad opp til tunnelene, og strekninger med betydelig fall ned fra tunnelene. Forskjellen til de undersjøiske vegtunnelene i Norge er, at disse først og fremst har strekninger med høy stigningsgrad inne i tunnelene. De europeiske fjelltunnelene har strekninger med høy stigningsgrad før tunnelene, og et viktig brannforebyggingsiltak for disse er å unngå at overopphetede tungebiler kommer inn i tunnelene. I de undersjøiske vegtunnelene i Norge handler brannforebygging i større grad om å unngå at tungebiler blir overopphetet inne i tunnelene, særlig når de er på veg oppover og ut av tunnelene. Det kan derfor diskuteres hvor effektivt varmescanning utenfor undersjøiske vegtunneler ville vært. Det ser ut til at omtrent 90% av brannene i tunge kjøretøy har tekniske problemer som årsak. Rundt halvparten av tungebilbrannene i norske vegtunneler som vi antar at har tekniske problemer som årsak (55 av 101) i perioden 2008-2021 er i tunneler som ikke har høy stigningsgrad. Her kan det være relevant med varmescanning utenfor tunnelene, fordi vi kan anta at varmeutviklingen her kan starte og måles utenfor tunnelen, og at den ikke er et resultat av fall/stigning inne i tunnelen. Ulike kriterier kan legges til grunn for å velge hvilke tunneler man skal velge ut for et slikt tiltak. Portaler med varmescanning kan være spesielt relevant utenfor tunneler som har lengre

strekninger med fall/stigning før tunnelmunningene, tunneler med høy tungbil-ÅDT, tunneler som har hatt mange tungbilbranner, spesielt lange tunneler osv.

**Samvirkende ITS.** Et annet tiltak som antakelig blir svært viktig i fremtiden er «Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS)», eller samvirkende ITS, som bruker trådløs teknologi for å muliggjøre sanntids kommunikasjon fra kjøretøy til kjøretøy og fra kjøretøy til infrastruktur. Moderne lastebiler har et stort antall sensorer som gir varsler dersom det er tekniske feil med lastebilen, eller dersom en eller annen komponent er overopphetet. I fremtiden kan vi tenke oss at utstyr langs vegen før tunnelen kan kommunisere med kjøretøy og fange opp slike feilmeldinger, for eksempel om overoppheting eller alvorlige motorfeil, og «luke ut» kjøretøy, slik at de ikke kan kjøre inn i tunnelene. Dette kan for eksempel skje ved at lastebilene ledes ut til en kontrollsoner, hvor de blir fulgt opp av en kontrollør. Den samvirkende ITS-teknologien er relativt moden og bruker mange komponenter som allerede finnes som standardutstyr i nye kjøretøy, for eksempel kameraer, sensorer, og antenner. En utfordring med et slikt tiltak er at det finnes mange ulike teknologier og løsninger i kjøretøy og, at man må lage et system som kan kommunisere med alle sammen. Det arbeides imidlertid på EU nivå for å harmonisere dette (jf. ITS-direktiv 2023/2661). Fortsatt er det bare pilot/forskningsprosjekter som pågår på dette feltet, og det er delte meninger om hva som blir løsningen fremover. Det er altså noen år til samvirkende ITS vil kunne fungere på den måten vi foreslår over, og det er usikkert om vi kommer dit. Samvirkende ITS vil også potensielt kunne bidra til å redusere konsekvenser av brann, fordi alle andre kjøretøy i nærheten kan få beskjed om at et kjøretøy brenner. I tillegg kan nødetatene og vegtrafikksentralen få raskere melding om brann, dersom kjøretøyet selv sender slik kommunikasjon.

## 6.8 Hva trenger vi mer kunnskap om?

**Har de utenlandskregistrerte lastebilene blitt likere de norskregistrerte?** Informantene våre var litt delte når det kommer til kvaliteten på utenlandskregistrerte tungbiler, men en av informantene med god oversikt over tungbilsalg, sa at utenlandske firmaer som kjører i Norge kjøper de samme lastebilene som de norske firmaene, med de samme spesifikasjonene. Vi kan antakelig av den grunn forvente likere standard enn det de overnevnte rapportene skulle tilsi, i alle fall i betydelige segmenter av transportnæringen. Resultatene fra Statens vegvesens tungbilkontroller indikerer heller ikke nødvendigvis at utenlandske tunge godsbiler har lavere teknisk standard (Nævestad mfl. 2016). I tillegg, har vi sett, i kartlegging av norske og utenlandske lastebilers risiko for trafikkulykker med personskader over tid, at de utenlandske har hatt den samme sterke risikonedgangen siden 2007 som de norskregistrerte har hatt (Nævestad mfl. 2022). Denne risikonedgangen tilskrives i noen grad forbedret kjøretøyteknologi. Fremtidig forskning bør undersøke om de utenlandskregistrerte lastebilene blitt likere de norskregistrerte.

**Tungbilsjåførers kompetanse og erfaring.** En faktor som kan være viktig for å forklare høyere risiko for brann i tunneler med høy stigningsgrad er tungbilsjåførers kompetanse og erfaring. Dette har vi ikke fått undersøkt tilstrekkelig i denne rapporten, selv om intervjuene tilsier at det krever kompetanse og erfaring å kjøre tungbil på optimal måte ned og opp bratte og lange stigninger. Nævestad mfl. (2022) finner at en økning i lastebilsjåførenes alder (og erfaring) kan forklare noe av lastebilers nedgang i risiko for personskadeulykker i perioden 2007-2020. Andelen lastebilsjåførere i aldersgruppen 65-74 år har for eksempel økt fra 3,8 til 19,5 prosent (Nævestad mfl. 2022). Disse endringene kan potensielt også innebære økt erfaring med å kjøre i lange og bratte tunneler over tid, akkurat som vi antar at økt erfaring kan forklare nedgang i ulykkesrisiko. Ulykkesrisikoen til lastebilførere i alderen 50-64 er nesten halvparten av ulykkesrisikoen til førere i alderen 25-34 (Nævestad mfl. 2022). Vi vet ikke om for eksempel utenlandske sjåførere med utenlandskregistrerte kjøretøy som sjelden kjører i Norge (og i slike tunneler) har tilstrekkelig erfaring med og kunnskap om hvordan man skal kjøre optimalt i slike tunneler. Norske sjåførere fra regioner i Norge med få slike tunneler kan også ha lite erfaring og kunnskap om hvordan man skal kjøre optimalt i lange og bratte tunneler.

Fremtidig forskning kan kartlegge erfaring, kompetanse og holdninger blant norske og utenlandske tungbilsjåførere, blant annet som grunnlag for opplæring og informasjonskampanjer. Slike kampanjer kunne også potensielt sett fokusere på betydningen av vedlikehold av kjøretøy for å forebygge kjøretøybrann, og ikke minst også betydningen av å ikke kjøre inn i lange tunneler dersom man har feilmeldinger av ulike slag, for eksempel knyttet til overoppheting. Flere av de intervjuede nevnte at YSK-etterutdanningen av yrkessjåførere, som skjer hvert femte år kunne være et egnet forum for viktig informasjon om brannrisiko i tunnel, forebygging og håndtering av det. De mente at det burde vært mer informasjon om ny kjøretøyteknologi i YSK, og hvordan den bør brukes for å forebygge risikoen for kjøretøybrann.

**Hva påvirker vedlikeholdsrutiner i transportselskap?** En av informantene sa at «Noe av det første bil-eierne firer på er vedlikehold», når rammebetingelsene og økonomien blir dårligere. En annen informant sa at vedkommende hadde merket seg at det «ofte er billig last som brenner». Det kan være mange årsaker til det, men en mulig bakenforliggende sammenheng kan være det at transportbransjer med lavere inntjening og dårligere økonomi bruker mindre ressurser på vedlikehold. Kanskje har de også eldre kjøretøy med høyere risiko for teknisk feil som leder til brann, evt. også modifiserte kjøretøy med høyere brannrisiko. Disse sammenhengene mellom økonomi, vedlikehold og brann bør undersøkes i fremtidig forskning. Påvirker utfordrende rammebetingelser vedlikehold? Varierer kvaliteten på vedlikeholdet i ulike segmenter i transportsektoren, basert på økonomi? Og hvor mye har rammebetingelser å si for brannrisiko?

**Hva skal til for å innføre system for automatisk motorslukking?** Det finnes eksempler på situasjoner hvor Norge har gått foran EU, innført strengere krav enn EU regler og vært en pådriver for strengere EU-krav. Dette har for eksempel skjedd i busstransport, hvor Norge har gått foran EU og innført et eget nasjonalt krav om kollisjonssikring i fronten av busser) (Nævestad mfl. 2023). Norge leder også an i en prosess for å påvirke EU-kommisjonen til å endre reglene på dette feltet.<sup>10</sup> Man kan kanskje lære av denne prosessen i et evt. arbeid for å få til krav om automatisk slukkesystem i motorrom på lastebiler. Norge har en sterk interesse av slik teknologi, siden vi blant landene i verden som bygger fleste vegtunneler og ikke minst også lange ettløps undersjøiske vegtunneler som er spesielt brannutsatte, sammenliknet med de øvrige tunnelene i Norge.

**Hvordan er brannrisikoen for nye energibærere og hvordan håndtere den?** Som vi har beskrevet tidligere i rapporten, har kjøretøy med el og gass som drivstoff andre brann- og eksplosjonsegenskaper enn kjøretøy med fossilt brensel, noe som gir nye problemstillinger med hensyn til brannsikkerhet på vegger og i tunneler (Bøe, 2009; Reitan mfl., 2016). Dette gjør at vi trenger mer kunnskap om risiko for brann og mulige konsekvenser av brann i tunneler i tungbiler med nye drivstoffformer. Branner i el- og gasskjøretøy kan kreve andre forebyggende tiltak, andre slokkemetoder, og føre til andre brannscenarier enn branner i konvensjonelle kjøretøy. Det er betydelig usikkerhet knyttet til brannrisikoen for nye energibærere og hvordan de skal håndteres, og her trengs det mer forskning.

**Hvorfor har vi en sterk nedgang i ulykkesrisiko, men ikke brannrisiko?** Nævestad mfl. (2022) finner at risikoen for personskadeulykker med tunge godsbiler involvert har blitt redusert med 73 % fra 2007 til 2020. Tilsvarende reduksjon i risiko for dødsulykker er på 61 %. De viktigste årsakene til reduksjonen i risiko for trafikkulykker med tunge godsbiler ser ut til å være ny kjøretøyteknologi (elektronisk stabilitetskontroll, økt karosserisikkerhet), endring i kjøreatferd (nedgang i fart) og økning i kontroller fra Statens vegvesen og politiet. Nedgangen i risiko gjelder både for norske og utenlandskregistrerte tungbiler. I vår rapport ser vi på risiko for brann i tunge godsbiler i vegtunneler den samme perioden (2008-2021), men vi ser ikke noen tilsvarende dramatisk reduksjon i risiko. Mekanismene som ligger til grunn for trafikkulykker og kjøretøybranner ser dermed ut til å være ulike. Det har vi også belyst i denne rapporten. Til tross for dette, er det den samme kjøretøyparken og de samme sjåførene som er involvert

<sup>10</sup> <https://www.toi.no/forskningsomrader/trafikksikkerhet/norge-i-forerisetet-pa-buss-sikkerhet-article38390-220.html>

i hendelsene med risiko for ulykker og kjøretøybranner i perioden. Vi kan kanskje anta at tilsvarende risikoreduksjoner kan oppnås for kjøretøybrann som for trafikkulykker, dersom man sammenlikner årsaksmekanismene og tiltakene som er satt inn for å unngå trafikkulykker med årsaksmekanismene og tiltakene som finnes for å forebygge kjøretøybrann. Kanskje viser dette at automatisk slukkesystem i motorrom er et åpenbart tiltak som burde vært satt inn, på linje med effektive tiltak for å forebygge trafikkulykker (for eksempel: ABS bremses, antiskrens). Rapporten til Nævestad mfl. (2022) viser at tiltak for å få ned risikoen for trafikkulykker har vært svært effektive. Risikoen for personskadeulykker med tungbil har gått dramatisk ned siden 2007. Det samme gjelder ikke risikoen for kjøretøybranner med tungebiler i tunneler.

Flere av dem vi intervjuet, for eksempel i Alpeland, mente imidlertid at det er utfordrende å redusere risikoen for kjøretøybrann. De fokuserte derfor på konsekvensreduksjon i stedet. Dette viser at forebygging og håndtering av trafikkulykker og kjøretøybranner er to ulike ting; sistnevnte handler også om beredskap (for eksempel: nødutganger, evakueringsrom, evakueringslys, slukkesystemer, tidlig deteksjon osv.). Risikosreduksjonstilnærmingen kan kanskje være viktigere i Norge enn i tunneler i Alpeland, fordi evakueringsmulighetene i de norske lange og bratte tunnelene er dårligere enn i alpelandtunnelene, som gjerne har parallelle løp og nødutganger. Sånn sett kan man kanskje si at forebygging av kjøretøybranner i tunneler Norge kan ligne på forebygging av trafikkulykker, selv om konsekvensreduksjon også er viktig i sistnevnte, for eksempel gjennom nødetatens tidlige innsats, utvikling av karosserisikkerhetstiltak osv. Det å diskutere forskjeller og likheter mellom forebygging av trafikkulykker og kjøretøybranner med tunge kjøretøy i tunneler, og det å lære av forebygging av trafikkulykker over tid osv. synes å kunne gi et godt grunnlag for videreutviklingen av tiltak for økt brannsikkerhet i norske vegtunneler.

Selv om vi ikke har sett noen klar trend i retning lavere brannrisiko for tungebiler i norske vegtunneler, vil det være interessant å følge utviklingen over tid. I den aktuelle analysen er data for 84 nye tunneler ikke tatt med, derav seks undersjøiske<sup>11</sup>, hvor to av de seks undersjøiske med lengder mellom 3,2 og 14,5 kilometer. At det ikke har vært tungbilbranner i disse tunnelene beror trolig på tilfeldigheter; de fleste av disse tunnelene er relativt nye og fire av de seks nye undersjøiske tunnelene har trafikkmengder under ÅDT 900.

Et oppdatert datagrunnlag som omfatter alle de nye tunnelene, og gjerne også noen flere år, vil gjøre det mulig å oppdatere trendanalysen, dvs. å undersøke hvorvidt brannrisikoen fortsatt er uendret. Utviklinger blant utenlandske tunge kjøretøy og økende utbredelse av nye drivstofftyper tilsier at brannrisikoen kan endre seg over tid, selv om vi ikke har sett noen slik trend i det aktuelle datagrunnlaget.

Videre vil et større datagrunnlag gjøre det mulig å gjøre mer detaljerte analyser av sammenhengen mellom lengden på stigninger og stigningsgrad. I den aktuelle studien har vi i hovedsak analysert de to faktorene hver for seg. Siden resultatene indikerer at det er samvirkeeffekten av lengde og stigningsgrad, vil mer detaljerte analyser av begge variablene kunne gi økt kunnskap om hvordan stigninger i tunneler påvirker brannrisikoen.

---

<sup>11</sup> Fjørtoftfjordtunnelen, Haramsfjordtunnelen, Hundvågtunnelen, Kvernsundtunnelen, Nogvafjordtunnelen, Ryfylketunnelen

## 7 Konklusjon

Brannrisikoen i vegtunneler øker mest fra en stigning på 7 prosent, og vi betrakter en maksimal stigning på 7 prosent som et «knekkpunkt». Også lengden på bratte stigninger har sammenheng med brannrisikoen. Jo lengre en bratt stigning er, desto flere branner er det i tunnelen. Dette gjelder både for stigninger fra 5 prosent og for stigninger fra 7 prosent. Undersjøiske vegtunneler har høyere risiko for kjøretøybrann enn andre tunneler. Det kan i hovedsak forklares med at de har lange og bratte stigninger. De fire mest brannutsatte har nesten 5500 meter i gjennomsnitt med stigning over 7%. Årsaken til tungebilbranner i lange og bratte tunneler er først og fremst tekniske problemer. Motoren blir svært varm når man bruker retarder nedover og enda varmere når man kjører oppover. Mangelfullt vedlikehold er gjerne en underliggende årsak til brannutvikling. De mest relevante tiltakene for å forebygge branner i tungebiler i norske vegtunneler synes å være teknologi for automatisk slukking av brann i motorrom, vedlikehold og teknisk kontroll.

## Referanser

- Amundsen, F.H. og A. Engebretsen (2009) Studies on Norwegian road tunnels II. An analysis on traffic accidents in road tunnels 2001-2006, Vegdirektoratet, Roads and Traffic Department, Traffic Safety Section, Rapport nr: TS4-2009
- Biering, K., Hjollund, N. H., & Frydenberg, M. (2015). Using multiple imputation to deal with missing data and attrition in longitudinal studies with repeated measures of patient-reported outcomes. *Clinical epidemiology*, 91-106.
- Buvik, H. (2012). Grensesprengende tunneler - lange og dype, går det en grense? Etatsprogrammet Moderne vegtunneler 2008-2011 Statens vegvesens rapporter Nr. 136
- Buvik H., F.H. Amundsen & H. Fransplass (2012). Strategi, trafikantsikkerhet og brannsikkerhet i vegtunneler Etatsprogrammet Moderne vegtunneler 2008-2011 Statens vegvesens rapporter Nr. 161
- Bøe, A. S. (2017). Fullskala branntest av elbil. SP Fire Research, Trondheim, Norge A, 17, 20096.
- Bøe, A. (2009). Brannsikkerhet og alternative energibærere: Gasskjøretøy i tunneler og parkeringskjellere.
- Caliendo, C. P. Ciambelli, M.L. De Guglielmo, M.G. Meo & P. Russo (2013). Simulation of fire scenarios due to different vehicle types with and without traffic in a bi-directional road tunnel, *Tunneling and underground space technology*, Vol. 37, pp. 22-36
- Casey, N. (2020). Fire incident data for Australian road tunnels. *Fire safety journal*, 111, 102909.
- Chow, W.K. & J.S.M. Li (2001). Case study: vehicle fire in a cross-harbour tunnel in Hong Kong, *Tunneling and underground space technology*, Vol. 16, pp. 23-30
- Deubelein, M., Schubert, M., Adey, B. T., Köhler, J., & Faber, M. H. (2013). Prediction of road accidents: A bayesian hierarchical approach. *Accident Analysis & Prevention*, 51, 274-291.
- Egner, L. E., & Weber, C. 2023. "Hvor, Og Hvor Mye Sykles Det I Oslo? En Estimering Basert På Imputering Av Sykkeltellerdata." 1977/2023. Transportøkonomisk Institutt. <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=76142>.
- Elvik, R. og A. Høye (2022) Verktøy for sikkerhetsstyring av veger: Ulykkesmodeller og virkningsfaktorer, TØI-rapport 1924/2022
- Figenbaum, E., Ydersbond, I., Amundsen, A., Pinchasik, D., Thorne, R., Fridstrøm, L., & Kolbenstvedt, M. (2019). 360 graders analyse av potensialet for nullutslippskjøretøy. TØI report, 1744.
- Graham, J. W. (2009). Missing data analysis: making it work in the real world. *Annual Review of Psychology*, 60(1), 549–576.
- Haack, A. (2002). Current safety issues in traffic tunnels, *Tunneling and underground space technology*, Vol. 17, pp. 117-127
- Haack, A. (1998). Fire protection in tunnels: general aspects and results of the EUREKA project, *Tunneling and underground space technology*, Vol. 13, pp. 377-381
- Hellevik, O. (1994). *Forskningsmetode i sosiologi og statsvitenskap*, Oslo: Universitetsforlaget
- Høye, A.K. (2014). Evaluering av effekt på ulykker ved bruk av streknings-ATK. TØI-Rapport 1339/2014.
- Høye, A.K., & Nævestad, T.O. (2023). Grunnlagsnotat for gjennomføring av pilot på Rv13 Lovraeidet-Rødsliane. TØI-Arbeidsdokument 51993, 10. mai 2023.



- Høye, A.K. (2023A). Forsterket kantoppmerking. Trafikksikkerhetshåndboken, kapittel 3.25.  
<https://www.tshandbok.no/del-2/3-trafikkregulering/325-forsterket-kantoppmerking/>
- Høye, A.K. (2023B). Forsterket midtoppmerking. Trafikksikkerhetshåndboken, kapittel 3.26.  
<https://www.tshandbok.no/del-2/3-trafikkregulering/326-forsterket-midtoppmerking/>
- Høye, A.K. (2023C). Tiltak i tunneler. Trafikksikkerhetshåndboken, kapittel 1.19.
- Høye, A., T.-O. Nævestad, R. Elvik (2022) Verifikasjon av beregningsmetode for ÅDT i tunneler: Metodebeskrivelse og noen foreløpige resultater, TØI-Arbeidsdokument, Oslo 18.02.2022, 5156-A Verifikasjon tunnel-ÅDT
- Høye Alena, Nævestad, T.-O. og Ævarson, G. (2019) Utvikling av modell for predikering av branner ulykker og havarier i vegtunneler, TØI rapport 1705/2019, Oslo: Transportøkonomisk institutt. Prosjekt 4605.
- Jenssen, G.D., C. Bjørkli og M. Flø (2006). Vurderinger E39 Rogfast. Trygghet, monotoni og sikkerhet i krisesituasjoner og ved normal ferdsel, SINTEF: Trondheim, Rapportnr: STF50 A06109
- Marec. M (1996). Major road tunnel projects - how far can we go?, Tunneling and underground space technology, Vol. 11, pp. 21-26
- Martens, M.H. (2005). "Human factors aspects in tunnels: tunnel user behaviour and tunnel operators", Deliverable 3.3 in the frame of the European UPTUN project with contribution from TNO (NL), RWS (NL), SINTEF (N), BRE (UK), MRSL (UK) & Maribor (Si)
- Mashimo, H. (2002). State of the road tunnel safety technology in Japan, Tunneling and underground space technology, Vol. 17, pp. 145-152
- Nussbaumer, C. og P. Nitsche (2008). Safety of road tunnels. Traffic safety in highway and expressway tunnels, Austrian Road Safety Board, Vienna
- Nævestad, I. S. Hesjevoll, F. Sagberg, I. B. Hovi, R. Elvik (2022) TØI-rapport, 1877/2022, Oslo: TØI, Tunge kjøretøys ulykkesrisiko i Norge
- Nævestad, T.O. & Blom, J. (2023). Kartlegging av kjøretøybranner i norske vegtunneler 2008-2021. TØI-Rapport 1948/2023.
- Nævestad, T.-O., K. Ranestad, B. Elvebakk, & S.F. Meyer (2016) Kartlegging av kjøretøybranner i norske vegtunneler 2008-2015, TØI-rapport 1542/2016, Oslo: Transportøkonomisk institutt
- Nævestad, T.O. & S.F. Meyer (2012) Kartlegging av kjøretøybranner i norske vegtunneler 2008-2011, TØI-rapport 1205/2012, Oslo: Transportøkonomisk institutt
- Nævestad, T.-O. & S.F. Meyer (2014) "A survey of vehicle fires in Norwegian Road tunnels 2008-2012", Tunneling and Underground Space Technology, Vol 41, pp. 104-112
- OECD (2006) OECD studies in risk management, Norway tunnel safety, OECD 2006, Paris, France
- PIARC World Road Association (1979). "Technical Committee Report on road tunnels" XVI World Road Congress Vienna, sept. 16-21 1979 PIARC World Road Association (2008). Human factors and road tunnel safety regarding users, PIARC, Frankrike
- PIARC World Road Association (2008). Human factors and road tunnel safety regarding users, PIARC, France
- Pinchasik, D., Figenbaum, E., Hovi, I. B., & Amundsen, A. H. (2021). Grønn lastebiltransport. Teknologistatus, Kostnader og Brukererfaringer, TØI-rapport 1855/2021
- Prabhakaran, P., Secadiningrat, J. R., Regan, M. A., Bennett, J., Cunningham, M., Zlojutro, A., & Dixit, V. (2022). Use of perceptual countermeasure treatments to reduce crash risks in tunnels (No. AP-R668-22).



- Reitan, N. K., Bøe, A. G., & Stensaas, J. P. (2016). Brannsikkerhet og alternative energibærere: El-og gasskjøretøy i innelukkede rom.
- Ren, R., Zhou, H., Hu, Z., He, S., & Wang, X. (2019). Statistical analysis of fire accidents in Chinese highway tunnels 2000–2016. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 83, 452-460.
- Rinalducci, E.J. D.A. Hardwick & A.N. Beare (1979). "An assessment of visibility at the entrance of long vehicular tunnel", *Human Factors*, 21 (1), pp. 107-117
- Rubin, D. B. (1987). *Multiple Imputation for Nonresponse in Surveys*. John Wiley & Sons.
- Safetec (2011). Risikoanalyse av Oslofjordtunnelen med omkjøringsveger. Hovedrapport, Dokument nr: ST-04121-4
- Schafer, J. L., & Graham, J. W. (2002). Missing data: our view of the state of the art. *Psychological Methods*, 7(2), 147–177.
- SHT (2013) Statens havarikommisjon for transport, Rapport om brann i vogntog på Rv 23, Oslofjordtunnelen, 23. juni 2011, rapport veg 2013/05.
- SHT (2015) Statens havarikommisjon for transport, Rapport om brann i vogntog på E16 i Gudvangatunnelen i Aurland, 5. august 2013, rapport veg 2015/02.
- SHT (2016a) Statens havarikommisjon for transport (2016) Rapport om bussbrann i Gudvangatunnelen på E16 i Aurland, rapport veg 2016/03.
- SHT (2016b) Statens havarikommisjon for transport, Rapport om brann i tanktilhenger i Skatestraumtunnelen i Sogn og Fjordane, 15. juli 2015, rapport veg 2016/05.
- SHK, (2018) Rapport om brann i vogntog på rv. 23 Oslofjordtunnelen 5. mai 2017 Vei rapport 2018/04, Rapport om brann i vogntog på rv. 23 Oslofjordtunnelen 5. mai 2017 | shk (havarikommisjonen.no)
- SHK (2022) Rapport om brann i vogntog på E134 i Oslofjordtunnelen 2. august 2021, Vei rapport 2022/05 <https://havarikommisjonen.no/Vei/Avgitte-rapporter/2022-05>
- Søndre Follo Brannvesen (2011). Utvidet rapport. «Brann i Oslofjordtunnelen 23.06», 24.08.2011
- Volvo Trucks (2023) Guide: Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS). [https://www.volvotrucks.com/content/dam/volvo-trucks/markets/master/home/news/insights/articles/pdfs/2019/dec/what-are-cooperative-intelligent-transport-systems/Cooperative-Intelligent-Transports-Systems-\(C-ITS\).pdf](https://www.volvotrucks.com/content/dam/volvo-trucks/markets/master/home/news/insights/articles/pdfs/2019/dec/what-are-cooperative-intelligent-transport-systems/Cooperative-Intelligent-Transports-Systems-(C-ITS).pdf)
- World Health Organization. (2019). *Global Status Report on Road Safety 2018*. World Health Organization.
- Wulff, J. N., & Jeppesen, L. E. (2017). Multiple imputation by chained equations in praxis: guidelines and review. *Electronic Journal of Business Research Methods*, 15(1), 41-56.

# Vedlegg

## Vedlegg 1. Brannmodeller: Deskriptiv statistikk og modellene

Tabell V1.1: Antall tunneler, samlet lengde og gjennomsnittlig ÅDT per år.

	Antall tunneler			Samlet lengde (km)			ÅDT (gjennomsnitt)		
	Ett-/toløps	Ettløps	Toløps	Ett-/toløps	Ettløps	Toløps	Ett-/toløps	Ettløps	Toløps
2008	957	899	58	908	862	46	4 591	2 881	31 073
2009	973	914	59	928	880	48	4 598	2 900	30 875
2010	1 002	929	73	970	909	61	4 811	2 956	28 394
2011	1 013	936	77	988	919	69	4 961	3 006	28 697
2012	1 021	943	78	996	926	70	5 046	3 060	29 034
2013	1 045	958	87	1033	960	73	5 193	3 108	28 106
2014	1 066	975	91	1063	989	75	5 306	3 141	28 457
2015	1 096	995	101	1116	1034	82	5 520	3 209	28 475
2016	1 096	995	101	1116	1034	82	5 669	3 297	29 205
2017	1 096	995	101	1116	1034	82	5 806	3 369	29 953
2018	1 096	995	101	1116	1034	82	5 696	3 356	29 359
2019	1 096	995	101	1116	1034	82	5 622	3 344	28 657
2020	1 096	995	101	1116	1034	82	5 552	3 334	27 954
2021	1 096	995	101	1116	1034	82	5 477	3 322	27 252

Tabell V1.2: Antall branner per år.

	Branner (alle)			Branner (tunge)		
	Ett-/toløps	Ettløps	Toløps	Ett-/toløps	Ettløps	Toløps
2008	28	25	3	12	12	0
2009	26	20	6	9	8	1
2010	27	21	6	15	12	3
2011	48	35	13	21	18	3
2012	41	29	12	11	7	4
2013	47	37	10	18	14	4
2014	43	31	12	19	13	6
2015	36	23	13	13	10	3
2016	49	36	13	20	14	6
2017	48	34	14	13	9	4
2018	53	38	15	19	15	4
2019	43	29	14	12	9	3
2020	47	36	11	15	15	0
2021	54	38	16	14	10	4
<b>Alle år</b>	<b>590</b>	<b>432</b>	<b>158</b>	<b>211</b>	<b>166</b>	<b>45</b>

Tabell V1.3: Tunnelene etter lengdekategori med antall tunneler, samlet lengde, trafikkmengde og trafikkarbeid og branner (aller år).

Lengde (meter)	Tunneler		Lengde		ÅDT (gjennomsnitt)	Andel av alt trafikkarbeid i tunnel	Branner (alle)		Branner (tunge)	
	Antall	Andel av tunnelene	Samlet lengde (km)	Andel			Antall	Andel	Antall	Andel
0-49	51	5%	2	0%	4765	0,1%	0	0,0%	0	0,0%
50-99	100	9%	7	1%	4272	0,6%	4	0,7%	1	0,5%
100-199	177	16%	26	2%	5848	3,0%	11	1,9%	2	0,9%
200-299	110	10%	27	2%	6085	3,1%	12	2,0%	6	2,8%
300-499	144	13%	56	5%	6494	7,0%	25	4,2%	11	5,2%
500-999	212	19%	151	13%	5757	17,6%	85	14,4%	26	12,3%
1 000-1 999	151	14%	212	19%	5133	20,4%	76	12,9%	26	12,3%
2 000-2 999	68	6%	167	15%	4154	12,9%	65	11,0%	20	9,5%
3 000-3 999	35	3%	124	11%	6778	16,9%	74	12,5%	16	7,6%
4 000-4 999	17	2%	75	7%	1946	2,8%	42	7,1%	14	6,6%
5 000-9 999	31	3%	206	18%	3547	13,6%	185	31,4%	81	38,4%
10 000-25 000	5	0,5%	68	6%	1483	2,1%	11	1,9%	8	3,8%
<b>Alle</b>	<b>1101</b>	<b>100%</b>	<b>1121</b>	<b>100%</b>	<b>5426</b>	<b>100%</b>	<b>590</b>	<b>100%</b>	<b>211</b>	<b>100%</b>

<sup>1</sup> Andel av tunnelene i de respektive lengde-kategoriene, dvs. per rad.

Tabell V1.4: Tunnelene etter stigningskategori (3 grupper etter maks. stigning) med antall tunneler, samlet lengde, trafikkmengde og trafikkarbeid og branner (aller år).

Maks. stigning	Tunneler		Lengde		ÅDT (gjennomsnitt)	Andel av alt trafikkarbeid i tunnel	Branner (alle)		Branner (tunge)	
	Antall	Andel av tunnelene	Samlet lengde (km)	Andel			Antall	Andel	Antall	Andel
Under 5 prosent	823	75%	760	70%	5840	67,2%	271	46,1%	86	40,8%
5-6,9 prosent	145	13%	131	12%	5844	19,2%	94	16,0%	29	13,7%
7+ prosent	126	12%	201	18%	2460	13,7%	223	37,9%	96	45,5%
<b>Alle</b>	<b>1094</b>	<b>100%</b>	<b>1092</b>	<b>100%</b>	<b>5451</b>	<b>100%</b>	<b>588</b>	<b>100%</b>	<b>211</b>	<b>100%</b>

Tabell V1.5: Antall tunneler, samlet tunnallengde, trafikkmengde og trafikkarbeid etter maksimal stigningsgrad (tunneler med kjent maksimal stigningsgrad).

Maks. stigning	Antall tunneler			Samlet lengde (km)			ÅDT (gjennomsnitt)			Trafikkarbeid		
	Ett-/ toløps	Ett- løps	To- løps	Ett-/ toløps	Ett- løps	To- løps	Ett-/ toløps	Ett- løps	To-løps	Ett-/ toløps	Ett- løps	To- løps
0-5 %	866	783	83	825	771	54	5 182	3 101	24 813	66 %	73 %	58 %
5-6,9 %	157	143	14	148	126	22	5 193	2 434	33 373	18 %	9 %	28 %
7 % +	107	103	4	188	176	12	2 533	1 719	23 482	16 %	18 %	14 %
<b>Alle</b>	<b>1130</b>	<b>1029</b>	<b>101</b>	<b>1161</b>	<b>1073</b>	<b>88</b>	<b>4 933</b>	<b>2 870</b>	<b>25 947</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>

<sup>1</sup>Beregnet for ett (hvilket som helst) år, ut fra trendjustert trafikkmengde for samme år i alle tunnelene som inngår i modellberegningene.

<sup>2</sup>Gjelder år 2008 for alle tunnelene (inkl. tunneler som ikke fantes i 2008).

Tabell V1.6: Oversikt over alle modellene (utvalg og nummerering av modellene iht. Høye et al. (2019)).

Modell nr.	Modell 7		Modell 8		Modell 1	
	Branner	Alle	Tunge	Alle	Tunge	Alle
Prediktor for stigning	To dummier (5%/7+%)		Syv dummier (2+%, ... 8+%)		Lengde bratt stigning	
Øvrige prediktorer	Alle unntatt kurver/ høyde		Alle unntatt kurver/ høyde		Alle	
Antall tunnelår	<b>14 695</b>	<b>14 695</b>	<b>14 648</b>	<b>14 648</b>	<b>13 523</b>	<b>13 523</b>
LR chi2(12)	620,7	264,6	640,9	268,6	651,0	268,0
Prob > chi2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Pseudo R2	<b>0,162</b>	<b>0,150</b>	<b>0,146</b>	<b>0,153</b>	<b>0,185</b>	<b>0,167</b>
Log likelihood	-1659,8	-750,4	-866,2	-746,0	-1428,6	-669,1

 Tabell V1.7: Brannmodellene 7 og 8 for alle og tungebilbranner; statistisk signifikante koeffisienter ( $p < 0,05$ ) i fet skrift.

	Modell 7 – Alle branner			Modell 7: Tunge branner			Modell 8: Alle branner			Modell 8: Tunge branner		
	Koeff.	SD	p	Koeff.	SD	p	Koeff.	SD	p	Koeff.	SD	p
Ln(ÅDT)	<b>0,792</b>	0,052	<i>0,000</i>	<b>0,882</b>	0,094	<i>0,000</i>	<b>0,770</b>	0,051	<i>0,000</i>	<b>0,867</b>	0,093	<i>0,000</i>
Andel lange kjøretøy	0,013	0,009	<i>0,157</i>	<b>0,050</b>	0,015	<i>0,001</i>	0,010	0,009	<i>0,291</i>	<b>0,044</b>	0,015	<i>0,005</i>
To løp	-0,235	0,169	<i>0,163</i>	-0,585	0,307	<i>0,057</i>	-0,197	0,169	<i>0,244</i>	<b>-0,670</b>	0,309	<i>0,030</i>
Ett løp	(ref.)			(ref.)			(ref.)			(ref.)		
Fgr. 30-50 km/t	-0,617	0,421	<i>0,143</i>	-1,177	1,016	<i>0,247</i>	-0,659	0,419	<i>0,116</i>	-1,250	1,018	<i>0,219</i>
Fgr. 60 km/t	0,103	0,201	<i>0,608</i>	-0,593	0,456	<i>0,193</i>	0,095	0,199	<i>0,632</i>	-0,637	0,456	<i>0,162</i>
Fgr. 70 km/t	0,039	0,121	<i>0,747</i>	0,080	0,199	<i>0,690</i>	0,055	0,123	<i>0,658</i>	0,063	0,205	<i>0,760</i>
Fgr. 90-110 km/t	<b>0,429</b>	0,194	<i>0,027</i>	0,449	0,359	<i>0,211</i>	<b>0,501</b>	0,201	<i>0,013</i>	0,695	0,371	<i>0,061</i>
Fgr. 80 km/t	(ref.)			(ref.)			(ref.)			(ref.)		
Rampe i tunnel	-0,006	0,213	<i>0,978</i>	0,386	0,381	<i>0,311</i>	0,001	0,209	<i>0,996</i>	0,351	0,379	<i>0,355</i>
Maks. stig. 5+ %	<b>0,328</b>	0,155	<i>0,035</i>	0,279	0,285	<i>0,327</i>						
Maks. stig. 7+ %	<b>0,570</b>	0,191	<i>0,003</i>	<b>1,127</b>	0,322	<i>0,000</i>						
Maks. stig. 0-5+ %	(ref.)			(ref.)								
Maks. stig. 2+ %							-0,076	0,168	<i>0,651</i>	0,082	0,320	<i>0,799</i>
Maks. stig. 3+ %							0,208	0,187	<i>0,265</i>	0,377	0,327	<i>0,248</i>
Maks. stig. 4+ %							0,151	0,189	<i>0,423</i>	0,178	0,323	<i>0,582</i>
Maks. stig. 5+ %							0,042	0,206	<i>0,837</i>	0,114	0,355	<i>0,748</i>
Maks. stig. 6+ %							0,288	0,268	<i>0,283</i>	-0,813	0,622	<i>0,191</i>
Maks. stig. 7+ %							0,397	0,302	<i>0,189</i>	<b>1,938</b>	0,647	<i>0,003</i>
Maks. stig. 8+ %							-0,111	0,178	<i>0,533</i>	-0,258	0,276	<i>0,349</i>
Maks. stig. 0-2 %							(ref.)					
Undersjøisk tunnel	<b>0,530</b>	0,155	<i>0,001</i>	0,290	0,244	<i>0,235</i>	<b>0,561</b>	0,155	<i>0,000</i>	0,269	0,242	<i>0,267</i>
År 2008	0,047	0,264	<i>0,859</i>	0,145	0,434	<i>0,739</i>	0,008	0,260	<i>0,976</i>	0,157	0,433	<i>0,717</i>
År 2009	-0,075	0,271	<i>0,782</i>	-0,193	0,467	<i>0,679</i>	-0,111	0,268	<i>0,680</i>	-0,187	0,466	<i>0,688</i>
År 2010	-0,049	0,265	<i>0,853</i>	0,437	0,409	<i>0,285</i>	-0,082	0,261	<i>0,754</i>	0,443	0,409	<i>0,278</i>
År 2011	0,415	0,233	<i>0,075</i>	0,544	0,389	<i>0,161</i>	0,380	0,229	<i>0,097</i>	0,558	0,388	<i>0,150</i>
År 2012	0,264	0,24	<i>0,271</i>	-0,007	0,439	<i>0,987</i>	0,240	0,236	<i>0,309</i>	-0,006	0,438	<i>0,989</i>
År 2013	0,329	0,234	<i>0,161</i>	0,312	0,400	<i>0,435</i>	0,297	0,230	<i>0,197</i>	0,328	0,399	<i>0,411</i>
År 2014	0,237	0,237	<i>0,318</i>	0,478	0,391	<i>0,221</i>	0,213	0,233	<i>0,362</i>	0,481	0,390	<i>0,217</i>
År 2015	(ref.)			(ref.)			(ref.)			(ref.)		
År 2016	0,293	0,231	<i>0,205</i>	0,430	0,387	<i>0,267</i>	0,243	0,228	<i>0,288</i>	0,438	0,386	<i>0,257</i>
År 2017	0,252	0,232	<i>0,276</i>	-0,051	0,422	<i>0,904</i>	0,223	0,228	<i>0,329</i>	-0,045	0,421	<i>0,915</i>
År 2018	0,377	0,228	<i>0,098</i>	0,353	0,392	<i>0,368</i>	0,344	0,224	<i>0,124</i>	0,360	0,392	<i>0,358</i>
År 2019	0,163	0,237	<i>0,491</i>	-0,125	0,429	<i>0,770</i>	0,116	0,235	<i>0,620</i>	-0,126	0,429	<i>0,769</i>
År 2020	0,242	0,233	<i>0,299</i>	0,077	0,411	<i>0,850</i>	0,214	0,229	<i>0,349</i>	0,096	0,410	<i>0,815</i>
År 2021	0,375	0,227	<i>0,098</i>	0,034	0,416	<i>0,935</i>	0,344	0,223	<i>0,123</i>	0,038	0,415	<i>0,928</i>
Konstant	-17,440	0,513		-19,803	0,934	<i>0,000</i>	-17,257	0,517	<i>0,000</i>	-19,862	0,952	<i>0,000</i>
Ln(lengde)	1,000			1,000			1,000			1,000		
<u>Overspredningspar.</u>												
Ln(lengde)	-0,414	0,469	<i>0,377</i>	-0,415	0,441	<i>0,348</i>	0,544	0,061	<i>0,000</i>	-0,425	0,443	<i>0,338</i>
Konstant	2,177	3,834	<i>0,570</i>	3,560	3,735	<i>0,341</i>	-6,209	.	.	3,571	3,752	<i>0,341</i>

Tabell V1.8: Brannmodell 1 for alle og tungebilbranner; statistisk signifikante koeffisienter ( $p < 0,05$ ) i fet skrift.

	Modell 1: Alle branner			Modell 1: Tunge branner		
	Koeff.	SD	p	Koeff.	SD	p
Ln(ÅDT)	<b>0,676</b>	0,058	<i>0,000</i>	<b>0,733</b>	0,102	<i>0,000</i>
Andel lange kjøretøy	0,008	0,010	<i>0,412</i>	<b>0,052</b>	0,016	<i>0,002</i>
To løp	0,339	0,194	<i>0,081</i>	0,252	0,343	<i>0,461</i>
Ett løp	(ref.)			(ref.)		
Fgr. 30-50 km/t	-0,327	0,460	<i>0,477</i>	-0,692	1,019	<i>0,497</i>
Fgr. 60 km/t	0,243	0,214	<i>0,257</i>	-0,334	0,459	<i>0,466</i>
Fgr. 70 km/t	0,184	0,126	<i>0,144</i>	0,247	0,210	<i>0,241</i>
Fgr. 90-110 km/t	0,168	0,225	<i>0,455</i>	-0,143	0,430	<i>0,739</i>
Fgr. 80 km/t	(ref.)			(ref.)		
Rampe i tunnel	0,055	0,211	<i>0,796</i>	0,338	0,363	<i>0,352</i>
Lengde stig. 5+ % (m)	<b>0,00024</b>	0,000	<i>0,000</i>	0,00019	0,000	<i>0,053</i>
Lengde stig. 7+ % (m)	0,00010	0,000	<i>0,162</i>	<b>0,00029</b>	0,000	<i>0,023</i>
Undersjøisk tunnel	0,007	0,200	<i>0,971</i>	-0,412	0,362	<i>0,255</i>
Kurve 0-149 meter	0,057	0,160	<i>0,723</i>	0,205	0,286	<i>0,475</i>
Kurve 150-299 meter	0,071	0,154	<i>0,644</i>	0,242	0,273	<i>0,376</i>
Kurve 300-599 meter	0,079	0,159	<i>0,618</i>	0,317	0,277	<i>0,252</i>
Rett strekning	0,482	0,333	<i>0,147</i>	0,640	0,562	<i>0,255</i>
Kurve 600+ meter	(ref.)			(ref.)		
Høy tunnel (>4,5 m)	<b>-0,308</b>	0,099	<i>0,002</i>	-0,387	0,170	<i>0,023</i>
År 2008	0,026	0,275	<i>0,926</i>	0,062	0,450	<i>0,890</i>
År 2009	-0,065	0,280	<i>0,815</i>	-0,190	0,475	<i>0,690</i>
År 2010	-0,020	0,274	<i>0,943</i>	0,424	0,416	<i>0,308</i>
År 2011	0,461	0,240	<i>0,054</i>	0,516	0,399	<i>0,196</i>
År 2012	0,335	0,245	<i>0,173</i>	0,022	0,445	<i>0,960</i>
År 2013	0,455	0,239	<i>0,057</i>	0,420	0,404	<i>0,298</i>
År 2014	0,247	0,247	<i>0,316</i>	0,337	0,409	<i>0,410</i>
År 2015	(ref.)			(ref.)		
År 2016	0,231	0,244	<i>0,343</i>	0,378	0,401	<i>0,346</i>
År 2017	0,189	0,246	<i>0,441</i>	-0,167	0,445	<i>0,707</i>
År 2018	0,392	0,236	<i>0,097</i>	0,327	0,402	<i>0,416</i>
År 2019	0,181	0,247	<i>0,463</i>	-0,250	0,455	<i>0,582</i>
År 2020	0,288	0,242	<i>0,232</i>	0,150	0,417	<i>0,719</i>
År 2021	<b>0,482</b>	0,233	<i>0,039</i>	-0,082	0,437	<i>0,851</i>
Konstant	-16,388	0,584	<i>0,000</i>	-18,533	1,059	<i>0,000</i>
Ln(lengde)	1,000			1,000		
<b>Overspredningspar.</b>						
Ln(lengde)	-0,944	0,698	<i>0,176</i>	-0,659	0,551	<i>0,232</i>
Konstant	5,289	5,179	<i>0,307</i>	5,124	4,617	<i>0,267</i>

Tabell V1.6: Antall branner, mill. kjøretøykilometer og branner per mill. kjøretøykilometer i undersjøiske og andre tunneler, for tunnelene i analysene (år 2021-2016) og nye tunneler som ikke er med i analysene.

		Antall branner		Mill. kjt.kilometer		Branner per mill. kjt.kilometer	
		Tunneler i analysene, 2016+	Nye tunneler, 2016+	Tunneler i analysene, 2016+	Nye tunneler, 2016+	Tunneler i analysene, 2016+	Nye tunneler, 2016+
<b>Alle branner</b>	<b>Undersjøisk</b>	88	3	1 720	78	0.051	0.038
	<b>Andre tunneler</b>	206	10	10 034	486	0.021	0.021
	<b>Alle tunneler</b>	294	13	11 754	564	0.025	0.023
<b>Tungbilbranner</b>	<b>Undersjøisk</b>	30	0	227	8	0.132	0.000*
	<b>Andre tunneler</b>	63	4	1 308	81	0.048	0.050
	<b>Alle tunneler</b>	93	4	1 535	89	0.061	0.045

\*0,123 hvis det hadde vært én tungbilbrann i en av de nye undersjøiske tunnelene.

## Vedlegg 2. Sammenheng mellom stigninger og branner: Detaljerte resultater og modellberegninger 2019 vs. 2023

### Beregningsverktøy 2019

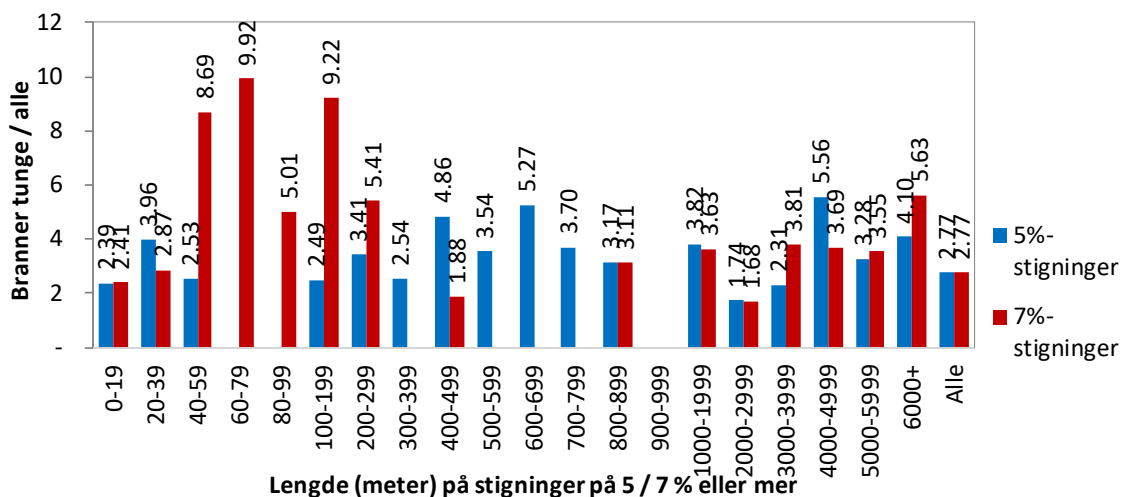
Beregningsverktøyet som er utviklet av Høye (2019), kan beregne forventet antall branner ut fra to ulike sett med variabler hvor ulike stigningsvariabler inngår:

- «Modell 1»: To variabler for stigning, antall meter med stigning 5 prosent eller mer og antall meter med stigning 7 prosent eller mer. I tillegg inngår alle øvrige variablene hvor det forelå informasjon (trafikkmengde, andel lange kjøretøy, antall løp, fartsgrense, ...), inklusive kurver i tunnelen.
- «Modell 7»: To andre variabler for stigning, som kun viser om den maksimale stigningen er over 5 prosent eller over 7 prosent. I tillegg inngår de fleste andre variablene, men ikke kurver.

Den første modellen viste seg å gi de beste resultatene, dvs. at antall predikerte branner ligger nærmest det faktiske antall for de fleste tunnelene. Den andre varianten er mindre god til å predikere antall branner, men man trenger mindre detaljert informasjon om tunnelene for å kunne bruke den.

### Lengden på bratte stigninger

**Branner per mill. kjøretøykilometer:** Figur V2.1 viser sammenhengen mellom lengden på bratte stigninger og forholdet mellom antall branner per mill. kjøretøykilometer i tunge kjøretøy og i alle kjøretøy. Her ser man ingen systematikk, dvs. at resultatene ikke tyder på at økende stigningslengde fører til en større økning av antall branner i tunge kjøretøy enn i andre kjøretøy.



Figur V2.1: Forholdet mellom branner i tunge og lette kjøretøy i tunneler etter antall meter med stigning på 5 prosent eller mer (øverst) eller 7 prosent eller mer (nederst).

**Modellberegninger:** I modellberegningene er det kontrollert for en rekke andre faktorer ved tunnelene, bl.a. trafikkmengde, fartsgrense, antall løp og hvorvidt tunnelen er undersjøisk. Figur V.2.2 viser resultatene fra modellberegningene fra 2023, både for alle branner og for branner i tunge kjøretøy. Antall branner er oppgitt som relative antall, hvor antall branner i tunneler med stigninger under 5 prosent er satt lik én. I alle modellene inngår en rekke andre tunnelegenskaper, samt hvorvidt tunnelene er undersjøiske.

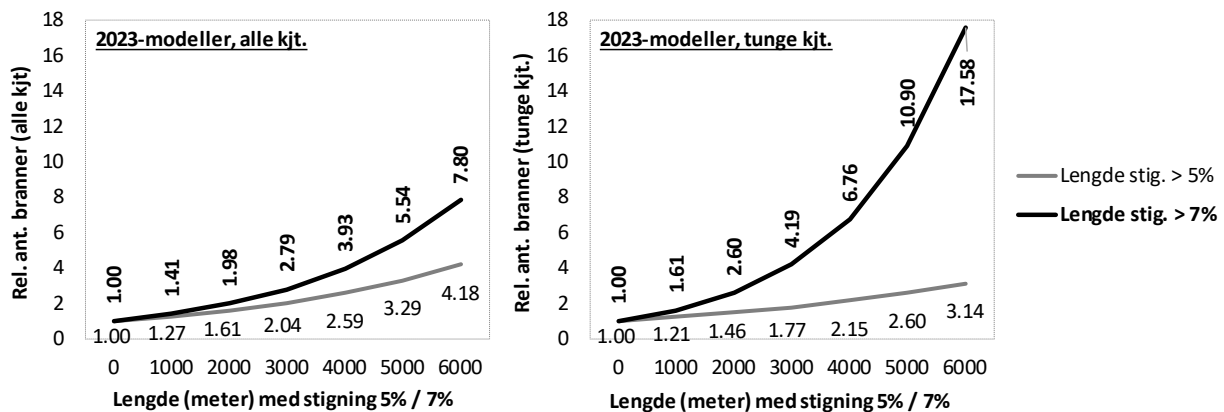


Modellene viser en klar sammenheng mellom lengden på bratte stigninger og antall branner. Sammenhengen er også statistisk signifikant for tunge kjøretøybranner, samt for alle kjøretøybranner og stigninger over 5 prosent:

- For stigninger over 5 prosent er det ingen stor forskjell mellom alle og tunge kjøretøybranner; er den bratte stigningen på 5 km, er det relative antall branner (i forhold til en flat tunnel) på 3,29 for alle branner og på 2,60 for tunge kjøretøybranner.
- For stigninger over 7 prosent er sammenhengen betydelig sterkere enn for 5 prosent-stigninger, og sammenhengen er langt sterkere for tunge kjøretøybranner enn for alle branner. Er den bratte stigningen på 5 km, er det relative antall branner (i forhold til en flat tunnel) på 5,54 for alle branner og på 10,90 for tunge kjøretøybranner.

Sammenhengen mellom lengde på bratt stigning og branner er sterkere enn i 2019-modellen. Dette til tross for at det i de aktuelle modellene er kontrollert for hvorvidt tunnelene er undersjøiske.

Undersjøisk-variabelen er imidlertid ikke-signifikant i begge modellene.



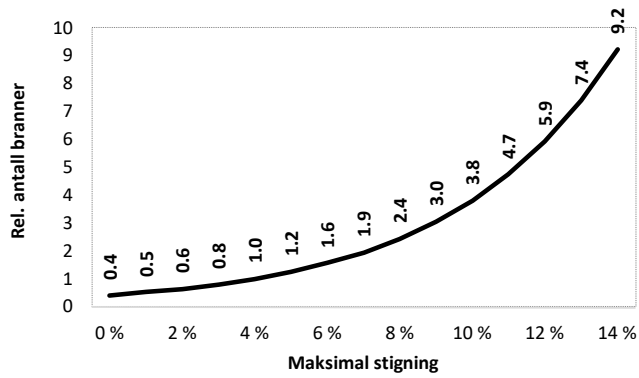
Figur V.2.2: Relative antall branner (alle kjøretøyer: t.v.; tunge kjøretøyer: t.h.); som funksjon av lengden med maksimal stigning over 5% / over 7%, beregnet med koeffisientene i brannmodell 1; relativt antall branner lik én i tunneler med maks. stigning under 5%.

### Maksimal stigningsgrad

Høye mfl. (2019) presenterer modeller hvor maksimal stigningsgrad inngår som numerisk variabel (Figur V.2.3). Her er det relative antall branner satt lik én for en maksimal stigning på 4 prosent (gjennomsnittet for ett- og toløpstunneler er 3,6 prosent). Figuren er basert på alle brannene, både i lette og tunge kjøretøyer. Tilleggsanalyser som er gjort av Høye mfl. (2019) bekrefter at sammenhengen mellom maksimal stigningsgrad og antall branner ikke er lineær, dvs. at økningen av antall branner blir brattere, jo høyere stigningsgraden er i utgangspunktet.

Vi har ikke oppdatert denne modellen da kurven som viser sammenhengen mellom maksimal stigningsgrad og branner er glattet; den gir derfor ikke svar på hvorvidt det finnes et «knekkpunkt» i sammenhengen.

## Risiko for brann i tunge kjøretøy i vegtunneler med høy stigning



Figur V.2.3 (2019): Relativt antall branner (predikerte antall) som funksjon av maksimal stigningsgrad (rel. antall branner lik én i tunneler med maks. stigning 0%).

## Vedlegg 3. Brannmodeller Høye mfl. (2019) vs. Njå mfl. (2022)

	Høye mfl., 2019	Njå mfl., 2022
<b>Data: År</b>	2008-2015	2001-2015
<b>Data: Tunnelene</b>	Alle tunneler	Tunneler over 500 meter lengde
<b>Avhengig variabel</b>	Branner / tilløp: Alle, tunge, lette kjt.	Branner / tilløp som følge av tekniske problemer i tunge kjt.
<b>Prediktorer: Stigning</b>	Modeller med ulike stigningsprediktorer: <ul style="list-style-type: none"> <li>» Maksimal stigning (numerisk)</li> <li>» Maksimal stigning (2 modeller med 2 ulike sett med dummyvariabler)</li> <li>» Lengde på bratt stigning (2 numeriske variable i samme modell; lengde på stigning over 5 / 7 prosent)</li> </ul>	2 stigningsvariabler i samme modell: <ul style="list-style-type: none"> <li>» Lengste sammenhengende stigning i samme retning («Slope upward»)</li> <li>» Nest-lengste sammenhengende stigning i samme retning («Slope downward»)</li> <li>» Maksimal stigningsgrad</li> </ul>
<b>Prediktor: Undersjøisk tunnel</b>	Ikke med Tatt med i den foreliggende rapporten.	Prediktor (dummyvariabel)
<b>Øvrige prediktorer</b>	Alle modeller: <ul style="list-style-type: none"> <li>» ÅDT</li> <li>» Andel lange kjt.</li> <li>» Lengde</li> <li>» <u>Ett- / toløps</u> (dummyvariabel)</li> <li>» <u>Rampe</u> i tunnel (dummyvariabel)</li> <li>» <u>Fartsgrense</u> (dummyvariabler)</li> <li>» <u>År</u> (dummyvariabler)</li> <li>» Stigning (se under Prediktor: Stigning)</li> </ul> Noen modeller <ul style="list-style-type: none"> <li>» <u>Kurver</u> (dummyvariabler)</li> </ul>	Alle modeller: <ul style="list-style-type: none"> <li>» ÅDT tunge kjøretøy</li> <li>» (Lengde: branner per km er avhengig variabel)</li> <li>» Stigning (se under Prediktor: Stigning; men modellene inneholder kun 1 variabel «slope»)</li> </ul> Tilleggsmodeller med interaksjonseffekter: <ul style="list-style-type: none"> <li>» Lengde * Undersjøisk</li> <li>» ÅDT (tunge) * Undersjøisk</li> </ul> Resultater for interaksjonseffektene: I begge modellene med interaksjonseffekter forsterker virkningene av de to variablene hverandre <ul style="list-style-type: none"> <li>» Tunnellengde har større effekt i undersjøiske tunneler</li> <li>» Tung-ÅDT har større effekt i undersjøiske tunneler</li> </ul>

## Vedlegg 4. Tiltak i brannutsatte tunneler

### Oslofjordtunnelen

Siden Oslofjordtunnelen åpnet i 2000 har det vært fire brannhendelser med lastebil som har ført til langvarig stenging av tunnelen. I mars 2011 ble tunnelen stengt i under ett døgn, etter en brannhendelse hvor fire personer ble kjørt til sykehus for behandling av mindre røykskader. På St Hansaften i juni 2011 oppstod det en brann i et vogntog lastet med returpapir, og brannen førte til svært omfattende tunnelskader og flere personskader. Tunnelen åpnet igjen 8.juli, men med et midlertidig forbud for tungtransport (7,5 tonn og mer). I mai 2017 oppstod det en ny lastebilbrann. Det var ingen alvorlige personskader, men to personer måtte reddes ut av tunnelen og brannen førte til store skader på tunnelen, så tunnelen ble stengt i flere uker, og det ble innført midlertidig restriksjoner for tungtransport i rushtiden. I august 2021 oppstod det også en brann i tunnelen, uten personskader, men tunnelen ble stengt i 10 dager.

To av disse hendelsene medførte direkte bruksforbud frem til tunnelforvalter fant tilfredsstillende/tilstrekkelige tiltak for gjenåpning, henholdsvis i juni 2011 og i mai 2017. Etter begge hendelsen har det blitt gjennomført en rekke tiltak i tunnelen for å bedre brannsikkerheten. Tiltak utført etter 2011 er i hovedsak direkte resultat av brannene som var i 2011. Tiltak fra 2017 og frem til i dag er en blanding av direkte resultat av brannen i 2017 og prosesser som er gjort i ettertid, tiltak etter øvelse eller forventning fra samfunnet. Vår informant vektla følgende som viktig for brannsikkerheten (i tilfeldig rekkefølge):

**Evakueringsrom og evakueringslys:** For å bedre mulighet for selvredning og personsikkerhet, ble det etter brannen i 2011 bygd 25 evakueringsrom med røyktette dører som gir evakueringsmuligheter for hver 250 meter. Evakueringsrommene er et unntak fra EUs direktiv om minimum tunnelsikkerhet, som på bakgrunn av fatale hendelser ved brann i tunnel ikke tiltaler evakueringsrom i tunneler. I hendelsen fra 2017, ble evakueringsrommene brukt for å søke tilflukt. Statens vegvesen konkluderte etter hendelsen med at de installerte sikkerhetssystemene og tilrettelagte evakueringsrommene fra etter hendelsen i 2011 bidro til at brannslukking og evakuering i 2017 fungerte, og at skadeomfanget på trafikantene ble beskjedne. Flere av informantene våre nevnte at «de evakueringsrommene reddet liv» i den brannen. I forbindelse med bygging av evakueringsrom ble det også i 2011 montert heltrukket evakueringslys gjennom tunnelens lengde. Evakueringslysene blir aktivert ved hendelser og leder personer ut av tunnelen, eller til nærmeste evakueringsrom. Det ble innført et forbedret evakueringslys etter hendelsen i 2017, samt at det ble foretatt en oppgradering av kasser i evakueringsrom med mer førstehjelp ved brannskader.

**Ventilasjon:** Etter hendelsen i 2017 ble det ventilatorer oppgradert til symmetriske 100 MW. Det ble også gjennomført en beredskapsanalyse for ny ventilasjonsstrategi. Nye vifter og utrustning av brannvesenene ga muligheten til å ventilere røyk fra brann ut korteste vei.

**Nødkommunikasjon:** For å bedre nødkommunikasjonen ble det etter brannen i 2011 forbedret kameraovervåkning og automatisk talemelding til Vegtrafikksentralen. Etter hendelsen i 2017 ble det foretatt ytterligere forbedring av radiomelding i tunnelen. På bakgrunn av øvelser i tunnelen er det også montert to nødtelefoner og flere kameraer i rømningstunnelen.

**Tiltak for å få ned fart:** Risikoreduserende tiltak etter hendelsen i 2011 innebar blant annet reduksjon av fartsgrenser til 70 km/ i hele tunnelen, innkjøringssonene på begge sider av tunnelen fikk fartsgrense 40 km/t og det ble anlagt fartshumper. Det ble innført streknings-ATK i begge nedoverbakkene i tunnelen og laget rumlefelt.

**Restriksjoner for tungbiler:** Etter hendelsen i juni 2011 ble det innført et midlertidig forbud mot alle kjøretøy over 7,5 tonn hele døgnet, og i januar 2012 ble det endret til forbud over 12 meter og farlig gods. Tunnelen åpnet igjen for alle i juni 2012, etter at tiltak var utført. Etter hendelsen i mai 2017 ble

det innført midlertidig restriksjoner for tungbiler i rushtiden. I rushtiden stengte tunnelen for kjøretøy som var mer enn 12 meter lange. Restriksjonen ble endret i oktober 2017, til vektbegrensning med forbud over 32 tonn i rushtid, i hovedsak etter møter med transportnæringen. I 2022 ble restriksjonen opphevet.

**Skilting og oppmerking med informasjon til sjåførene:** Skilting er blitt forbedret både etter hendelsene i 2011 og 2017. Etter hendelsen i 2011 ble det innført en rekke nye skilt; 1) variable fartsgrenseskilt (slik at fartsgrensen kan settes ned ved hendelser eller andre spesielle forhold), 2) ekstra skilting av «lytt til radio», 3) «low gear» -skilting som automatisk aktiveres av høye kjøretøyer, 4) «snu og kjør ut» -skilt ble etablert ved hver snunisje med ca. 1400 meters avstand (totalt seks snunisjer), som kan aktiveres fra Vegtrafikksentralen ved behov og som aktiveres automatisk når de brannstenger tunnelen) 5) ny avstandsskilting for hver kilometer og 6) bedre skilting til rømningstunnel på Hurum-siden. Etter hendelsen i 2017 er ytterligere flere skilt innført med tekst om «hold avstand» og «videoovervåket», samt at skilt med «snu og kjør ut» ble tilført tekst om «brann», i tillegg til at skilt utenfor tunnelen med informasjon om stengt tunnel, opplyser om «brann» ved brannstengt tunnel. Når Vegtrafikksentralen brannstenger tunnelen aktiveres «snu og kjør ut» - skiltene og radiomelding automatisk, og dette er for å forhindre forsinkelser og/eller menneskelig svikt. Etter 2017, ble det også etablert et testprosjekt med signallys, fremfor rødblinsk, foran portal for å hindre innkjøring, og det ble etablert infotavler før portal, og over portal (informasjon til trafikanter). Utover de overnevnte tiltakene ble det også etter hendelsene i 2011 forbedret oppmerking ved nødutgang, bedre nummerering av nødstasjoner slik at disse er synlig fra trafikkrommet, nye bommer ved tunnelportal på Hurum-siden, samt asfaltert rømningstunnel.

**Beredskap:** Etter hendelsene i 2011 og 2017 har det blitt bedre utrustning av brannvesen, som vår informant vektlegger at er et viktig tiltak i kombinasjon med fokus og samarbeid med nødetater på begge sider. Det er også gitt støtte uten direkte tilknytning til disse to hendelsene. De har gjennomført flere øvelser og det er fokus på at brannvesen skal føle seg komfortable i tunnelen og være godt kjent med oppgaver, risiko og håndtering av brann, for: «det kommer til å brenne igjen». Etter hendelsen i 2017 ble det etablert beredskapsplass på Drammen side av tunnelen, utbedret beredskapsplass på Drøbak side av tunnelen og utbedret beredskapsplass i rømningstunnelen. Det ble også utbedret tilgjengeligheten for slokkevann på Asker side i samarbeid med Asker kommune, samt gitt økonomisk støtte til lik utrustning av Asker og Bærum brann og redning IKS og Follo brannvesen for redning og slokking (flaskebanker, redningsmasker, UTV, tankbil mm.)

**Fremtidige sikkerhetsutbedringer:** Det foregår et pågående arbeid for å få flere skilt (VMS-tavler) for nærliggende veier til Oslofjordtunnelen for å sikre tidlig informasjon om stengt tunnel eller annen viktig informasjon. Oslofjordtunnelen skal også bygges ut til en toløps tunnel, med planlagt byggestart i 2024. To løp vil heve sikkerheten i tunnelen betydelig, og øke mulighet for selvredning og personsikkerhet. Varmeskanning på utsiden av Oslofjordtunnelen, som kan ta ut kjøretøy som er for varme, er også noe vår informant nevnte som et godt brannreducerende tiltak. Hen nevnte at det er spilt inn til prosjektet, men at det krever mye plass.

### Byfjordtunnelen

Byfjordtunnelen åpnet i 1992. Byfjordtunnelen har, på lik linje med Oslofjordtunnelen, kameraovervåking og hendelsesdetektering. Tunnelen har også DAB-innsnakk og talemelding fra VTS inn på radioen i kjøretøy i tunnelen. I tillegg er det nødstasjoner som inneholder to brannslukkere og telefon direkte til VTS hver 125 meter i hele tunnelen. Ved fjerning av apparat, eller at røret på telefon tas av, går det en alarm til VTS om hendelse og lokasjon. Det er godt samarbeid mellom VTS og nødetater, og de gjennomfører egne tunnelkurs i brannberedskap.

Byfjordtunnelen har restriksjoner for tungbiler og variable fartsgrenser. Tungbiler har ikke lov til å benytte forbikjøringsfelt og fartsskilter kan settes ned ved hendelser i tunnelen. Det er også fritekst-tavler ved portaler, for å informere trafikantene.

De som har beredskapen for Byfjordtunnelen, har også beredskap for andre risikotunneler, som for eksempel Mastrafjordtunnelen. Vår informant forklarte at de har hatt få hendelser med brann i tungbil, men at de frykter at det skal skje en hendelse med brann i tungbil i By- eller Mastrafjordtunnelen, fordi «det er så mye energi i de».

Det er igangsatt et pilotprosjekt mot kjøreskolelærere for førerkort klasse B i områder med risikotunneler. Målet er å øke kunnskap om riktig kjøreatferd i tunnel, for eks. hvordan man entrer tunnel, bruk av lys og kjøring i bratt stigning. De har også fokusert på opplæring av sjåførere i tungbilnæringen for å øke kunnskap om brannslukning.

Beredskapsgruppen har også hatt studieopphold i Sveits, hvor de får opplæring i brannberedskap i tunneler fra brannmannskap som har hatt erfaring med fatale hendelser i tunnel, og som besitter en unik kunnskap om brannberedskap i tunnel.

En av våre informanter nevnte at det er flere tiltak som kan være interessant for å øke brannsikkerheten i tunneler. Blant annet varmeskanner, som kan luke ut kjøretøy med for høy varme, før de entrer tunneler. Det kan være et godt forebyggende tiltak. Men etablering av varmeskannere før tunneler kan kreve mange ressurser, hvis det skal fungere best mulig, blant annet en egen brannstasjon knyttet til tunnelen.

En av informantene vektla at det er en utfordring for brannsikkerhet i norske tunneler at det bygges ettløpstunneler, fremfor toløpstunneler med rømningsmulighet. Det krever andre branntiltak. Gode branntiltak i ettløpstunneler kan være sprinkleranlegg eller evakueringsrom. De har gode erfaringer fra Sverige med sprinkleranlegg i tunneler. Erfaringer med evakueringsrom i Oslofjordtunnelen og Flekkerøy-tunnelen er interessant også for flere ettløpstunneler i Norge, fordi det gir mulighet for å evakuere vekk fra brann og røyk i ettløpstunneler. Siden evakueringsrom ikke er en godkjent løsning per i dag (TSF § 2.3.4 Tilfluktsrom uten utgang som fører til fluktveger til det fri, skal ikke bygges), er det derfor ikke aktuelt å bygge dette i Byfjordtunnelen. Erfaring fra tunneler med evakueringsrom vil gi et svar på om dette skal bli en godkjent løsning. Det er ikke bestemt hvor lang erfaringstiden skal være.

### **Bømlafjordtunnelen**

Som i Byfjordtunnelen, har brannhendelser i Bømlafjordtunnelen ført til relativt få personskader og mindre skader på tunnelen. Dette bidrar, ifølge våre informanter, til at det blir mindre fokus på sikkerhetstiltak rundt brann, for eksempel sammenliknet med Oslofjordtunnelen.

Bømlafjordtunnelen åpnet i 2000. Bømlafjordtunnelen har de siste årene gjennomgått flere oppgraderinger, som følge av tekniske krav til tunnelen:

- 1) Ventilasjonen er forbedret. Viftene er oppgradert og har fått større kapasitet. Det arbeides også med å få en beredskapsplan for å kunne snu retningen på ventilasjonen. I dag er det en forhåndsbestemt trekkretning. Med beredskapsplaner med mulighet for å snu ventilasjonen, kan røyk potensielt ventileres den korteste vei ut av tunnelen.
- 2) Kameraovervåking og radar i hele tunnelen, med speiling til 110 sentralen. Tidligere kunne beredskap bare se hvem som kjørte inn og hvem som kjørte ut av tunnelen. Med kameraovervåking i hele tunnelen, er det bedre mulighet for å detektere hvor i tunnelen hendelser oppstår, og man vil få visuell forståelse av hendelsen. Fjernes brannapparat i tunnelen vil sonen leses av med kamera. Det gjør det også mulig å se om kjøretøy stopper i slusene.
- 3) Streknings-ATK med revisjon av branndokumentasjon.
- 3) Endringer i skilting og belysning. Det er forbedret skilting av rømningsvei, med evakueringslys gjennomgående i hele tunnelen. Det er snu og kjør ut skilter ved alle snunisjer, samt variabelt farts-grenseskilt og radioskilt. Det er også friteksttavler ved portaler, for å informere trafikantene.
- 4) Tettere mellom slukkeapparat; alltid hver 125 meter.

Bømlafjordtunnelen har, som Byfjordtunnelen, nødstasjoner som inneholder to brannslukkere og telefon direkte til VTS per 125 meter i hele tunnelen. Ved fjerning av apparat, eller at røret på telefon tas av, går det en alarm til VTS om hendelse og lokasjon.

I hendelser med brann i tunnel, stenges tunnelen med bom, VTS kommuniserer på DAB-radio og skilt informerer om at det er brann, og at trafikanter må snu. Beredskap har en ATV tilgjengelig for berging. Beredskap gjennomfører beredskapsøvelser i tunnelen. En av erfaringene fra øvelsene er at publikum ikke respekterer øvelsen. Publikum kjører inn i tunnelen og ignorerer skilt og dirigering. En av informantene nevnte også andre opplæringsmuligheter. I Sverige har de hatt god erfaring med e-læringskurs i påvente av øvelse i tunnel. Kanskje er det muligheter for at Statens Vegvesen kan innføre interaktive e-læringskurs for tunnelsystemer, hvor ansatte fra Statens vegvesen, eller nødetatene, kan logge seg inn på nett og gjennomføre bolker som for eksempel går igjennom ventilasjon.

Flere av dem vi intervjuet var nysgjerrige på erfaringer med evakueringsrom i Oslofjordtunnelen. En evakuering i Bømlafjordtunnelen kan ta lang tid og kreve mye ressurser, og det kan være tenkelig med scenario hvor evakueringsrom kan redde liv. Det har også vært snakket om muligheten for å bygge toløpstunnel i Bømlafjordtunnelen, men det er veldig usikkert om det kan bli en realitet i fremtiden.

### Eiksundtunnelen

Eiksundtunnelen åpnet i 2008. Det har per dags dato ikke vært storbilbranner i tunnelen av den typen vi har sett i Oslofjordtunnelen. De vi intervjuet sa at før Eiksundtunnelen ble bygget var det få andre tunneler i området, og da tunnelen ble åpnet opplevde de ikke beredskapen som god nok. De måtte opparbeide ny kunnskap og ny kompetanse for å ha best mulig beredskap. Før tunnelen ble bygget hadde de ikke kompetanse om viktigheten av deteksjon og nødutgang. Det å innføre det nå vil bli veldig dyrt, og tunnelen har ikke høy ÅDT. Informantene informerte også om at de opplever unødvendige alarmer og kondensproblematikk, som innebærer at det kan se ut som det kommer røyk ut av tunnelen. Det er mange privatpersoner som ringer inn og melder om brann i tunnelen.

I tråd med retningslinjer, er det plassert nødstasjoner med telefonforbindelse til VTS hver 125 meter i tunnelen. VTS kan også kommuniserer med publikum i tunnelen og gi informasjon via radio. Fjernes et brannapparat fra en nødstasjon blir tunnelen automatisk stengt og brannventilasjon blir automatisk satt i gang. Skilt med «snu og kjøre ut» vises i tunnelen.

Ventilasjonen i Eiksundtunnelen er slik den stod ferdig bygget i 2008. Viftene er symmetriske, og det er mulig å snu trekkretning og regulerer hvor kraftig trekket skal være. Informantene påpekte at ventilasjonssystemet i tunnelen er omdiskutert. De vi har intervjuet med kunnskap om Eiksundtunnelen vektla at det er spesielt to mangelfulle tiltak i tunnelen:

1) Manglende kameraovervåkning i tunnelen er en stor sikkerhetsutfordring. Uten kameraovervåkning har ikke beredskap noen forutsetning for å vite hvor folk er i tunnelen, vurdere om de gjør gode valg for evakuering, ei heller hvilken retning ventilasjonen burde ha. Erfaring med anrop fra nødtelefonene i tunnelen er at de oftest melder fra på feil sted. Kameraovervåkning vil muliggjøre førsteinnsats etter plassering i tunnelen.

2) Ventilasjonen har potensielt for liten kapasitet i hendelser med storbilbrann. Brannventilasjonen i Eiksundtunnelen er beregnet for 20 MW brann, noe som tilsvarer en lett lastebil/minibuss. 20 MW var dimensjonerende den gang tunnelen ble bygd. Gitt en situasjon hvor man støtter seg på ventilasjonsanlegget, og det skal gjennomføres en innsats fra én side, uansett brannsted, kan det teoretisk sett oppstå en brannsituasjon hvor brannmannskapet ikke har mulighet for å utføre en innsats. Oppstår det en skorsteinseffekt i tunnelen, er det ikke sikkert at viftene klarer å motvirke denne effekten, fordi det er så bratt. Tverrsnittet i tunnelen endrer seg, som også påvirker ventilasjonen. To av informantene vi intervjuet vektla at en oppgradering av ventilasjonssystemet til å håndtere flere MW hadde økt sikkerheten i tunnelen. En annen informantene vektla at, for å kunne gjøre en sikker innsats i tunnelen, må innsats gjøres fra undersiden av skadestedet. Større branner som vogntog på 100 - 250 MW vil være



vanskelig å ventilere med langsgående ventilasjon, og termisk oppdrift bør avgjøre innsatsen, ikke hvem som eier hendelsen av brannvesenet. På grunn av dette bør førsteinnsats gjøres etter plassering i tunnelen, og det krever kameraovervåkning. Samme informant poengterte også at for høy hastighet på røykfronten ved evakuering kan være farlig. Vindmåler som gir hastigheten i de forskjellige tverrsnittene kunne vært et effektivt tiltak.

Kommunen har hatt dialog om å oppdatere hele sambandet og forbedre vifteløsning og se på mulighetene for å evakuere til en ny, tilstøtende evakueringstunnel. Det er også behov for å renovere pumpe-systemene tilknyttet tunnelen fordi de pumper inn sjøvann og ikke ferskvann, og det tærer på systemet. En av informantene poengterer at det er viktig å skille mellom vannforsyning i henhold til Tunnelsikkerhetsforskriften Vedlegg I pkt. 2.11. og utpumping av vann. Det vil alltid være saltvann som skal pumpes ut fra en undersjøisk tunnel. Det er dessverre valgt en dårlig løsning i Eiksundtunnelen, med mulighet for å ta ut vann fra pumpeledning fem plasser i tunnelen. Dette er ikke vannforsyning som beskrevet i Tunnelsikkerhetsforskriften. Vannforsyning i hht. forskrift skal ha uttak for hver 250 meter, og da være med ferskvann.

De vi intervjuet var svært positive til at Statens vegvesen og fylkeskommunen har vært initiativtagere til å arrangere kurs i brannberedskap. De har testet ulike scenario med bilbrann i tunnel. De får alle trent i trygge omgivelser. Ellers nevnte informantene at det kan være interessant å se på muligheter med IR-kamera som kan detektere varme i kjøretøy.

## Vedlegg 5. Intervjuguide

**1) Litt om deg selv.** Hva du jobber med og hvor.

**2) Erfaringer med tungbilbranner og årsaker.**

-Etter din erfaring, hva er det som oftest er årsaken til tungbilbranner?

-Og blant tekniske årsaker: er forhold knyttet til motor (for eksempel turbo), eller hjul bremses viktigst?

-Hva er mekanismene som gjør at det blir så varmt at det blir mye røyk og eller flammer?

-Hvor viktig er trekk sjåføren og kjørestil osv? (mye bremsing eller akselerasjon i stigning, for eksempel hvordan man kjører før man er inne i en tunnel, fart osv.)

-Hvor viktig er trekk ved kjøretøyet og utstyr? Kjøretøyalder for eksempel, kvalitet på vedlikehold. Er det noen typer kjøretøy som er mer utsatt enn andre?

-Hvor viktig er trekk ved veg og infrastruktur? Stigning osv. (Noen tanker om stigningsgrad og lengde på stigning? Forhold ved vegen osv. før man kommer inn i tunneler, for eksempel mange rundkjøringer før vestlige inngangen til Oslofjordtunnelen fører til mye nedbremsing og varme bremses før man kommer inn.)

**3) Tiltak: Hvilke tiltak i og ved tunnelene kan kompensere for risikoen som er knyttet til høy stigningsgrad i tunneler?**

-Sjåføren—opplæring og kunnskap

-Kjøretøy og utstyr

-Veg og infrastruktur: lavere stigning

-infrarødt kamera. deteksjon av varmgang i kjøretøy og samvirkende ITS (C-ITS) teknologi.

-Redusere fartsgrense og/eller fartskontroll

-Informasjonsskilt osv., skilting som oppfordrer til riktig brems bruk.

-forsterket vegoppmerking, forbikjøringsfelt og nødspor, Stopp før tunnel.

-tekniske kjøretøykontroller ved tunneler eller ev. grenseoverganger i nærheten av tunnelene,

-begrensninger på antall kjøretøy som maksimalt kan kjøre inn i tunnelen.

**4) Forklaring av trender:** Nævestad og Blom (2023) finner indikasjoner på at andel kjøretøybranner med tungebiler i tunneler med høy stigningsgrad har gått litt ned i den siste perioden de studerer (2016-2021), sammenliknet med perioden fra den forrige kartleggingen (2008-2015).

- **Kjenner du deg igjen i vårt funn? (Er dette noe du har inntrykk av?)**

-**Hva tenker du har påvirket risikoen for tungbilbranner i tunneler siden 2008?**

a) kjøretøytekniske endringer (tungebilene er nyere og har høyere standard, bedre bremses, motor etc.),

b) spesifikke tiltak i og ved de bratte tunnelene (informasjon til førere, fartsdempende tiltak etc.),

Risiko for brann i tunge kjøretøy i vegtunneler med høy stigning

- c) eller andre faktorer som f.eks. endringer i førerpopulasjonen (eldre og mer erfarne førere, som har bedre kunnskap om hvordan man skal kjøre i bratte tunneler),
- d) økte politikontroller eller lignende.
- e) Andre ting?

**Og Hvilke endringer i løpet av de neste 10-20 årene kan forventes å påvirke risikoen for tungbilbranner i bratte tunneler?**



TØI er et anvendt forskningsinstitutt som mottar basisbevilgning fra Norges forskningsråd og gjennomfører forsknings- og utredningsoppdrag for næringsliv og offentlige etater. TØI ble opprettet i 1964 og er organisert som uavhengig stiftelse.

TØI utvikler og formidler kunnskap om samferdsel med vitenskapelig kvalitet og praktisk anvendelse. Instituttet har et tverrfaglig miljø med rundt 90 høyt spesialiserte forskere.

Instituttet driver forskningsformidling gjennom TØI-rapporter, artikler i vitenskapelige tidsskrifter, bøker, seminarer, samt innlegg og intervjuer i media. TØI-rapportene er gratis tilgjengelige på instituttets hjemmeside [www.toi.no](http://www.toi.no).

TØI er partner i CIENS Forskningscenter for miljø og samfunn, lokalisert i Forskningsparken nær Universitetet i Oslo (se [www.ciens.no](http://www.ciens.no)). Instituttet deltar aktivt i internasjonalt forskningssamarbeid, med særlig vekt på EUs rammeprogrammer.

TØI dekker alle transportmidler og temaområder innen samferdsel, inkludert trafiksikkerhet, kollektivtransport, klima og miljø, reiseliv, reisevaner og reiseetterspørsel, arealplanlegging, ITS, offentlige beslutningsprosesser, næringslivets transportbehov og generell transportøkonomi.

Transportøkonomisk institutt krever opphavsrett til egne arbeider og legger vekt på å opptre uavhengig av oppdragsgiverne i alle faglige analyser og vurderinger.

**Postadresse:**

Transportøkonomisk institutt  
Gautstadalléen 21  
0349 Oslo  
Norge

E-post: [toi@toi.no](mailto:toi@toi.no)

**Kontoradresse:**

Forskningsparken  
Gautstadalléen 21

Hjemmeside: [www.toi.no](http://www.toi.no)

