



Statens vegvesen
Norwegian Public Roads
Administration

Tunnelbrann, VR studie av evakuering og tiltak

Prosjekt eier

Prosjektgruppe

Harald Buvik
Anine Kalmo Larsen
Espen Ødegård
Per Einar Pedersli
Kjetil Sverre Rød

Prosjekt team

Gunnar Deinboll Jenssen
Jo Skjermo
Kristen Opstad
Daniel Nilsson
Håkan Frantzich



Gunnar Deinboll Jenssen, PhD
Seniorforsker
SINTEF Community



Prosjekt team



Examples of past and ongoing SINTEF tunnel projects

• Long Tunnels

- **Taiwan** 20 km Double deck tunnel (RBB,CECI)
- **Norway** The worlds longest tunnel 24km single tube– Lærdal (NPRA)
- **Norway** Gudvanga 11 km single tube , Post fire investigation (National Acc. Inv. Bureau)
- **China** The worlds longest twin tube tunnel 18.2km - Zhongnansan (QZM Ltd / Shaanxi Com. Bureau)
- **S- Korea** State of the art: Safety in Long Tunnels (Transport Ministry)
- **Chile** Chuquicamata access tunnel (Codelco / Skava))

• Sub Sea

- **Norway** Rogfast 26 km subsea tunnel design & risk analysis (NPRA, Norconsult)
- **Norway**, Oslofjord, 7.3km, single tube tunnel. Post fire investigation (NPRA, Safetec)
- **S-Korea** Sub sea tunnel (confidential)
- **Denmark** Fehmarn belt 17 km submerged twin tube, Road/Rail (Femern AS)

• City Tunnels

- **Sweden** Stockholm ring (Sub to Traficon)
- **Norway** Oslo submerged 6km twin tube tunnel- Bjørvika (NPRA)
- **Norway** Trondheim, LED lights in tunnels (NPRA)

• Evacuation, - Strategies & Safety measures

- **Norway** Self recue in tunnels,- use of rescue rooms (NPRA)
- **Norway**, Evacuation strategies in tunnels (NPRA)
- **Norway**, Tunnel Emergency loudspeaker messages (NPRA)
- **USA** Emergency Exit Signs and Marking Systems for Highway Tunnels (Texas Transportation –NHCRP project)
- **Europe**, Move D3 Comparative studies of tunnel risk analysis (European Commission, D'Appolonia)
- **Europe** UPTUN - Upgrading Tunnel Safety in Existing Tunnels (European Commission)

• Safety and Health of Underground Workplaces "Earthscrapers"

- **Singapore**, Psychological aspects of long-term work underground & Fire safety (Nanyang Technological Univ.)

Hva har vi gjort?

1 Studert bruk av sikre rom

- Vegtunneler / Tunnel i byggefase
- Gruvedrift / Underjordiske bygg
- Skyskrapere / Earthscrapers

2 Studert ledesystem fram til sikre rom

- Hvordan sikre at folk finner fram til de?

3 Studie av opphold i sikre rom

- Design og innredning (pågår)
- Opplevd trygghet (pågår)



Simulering

Virtual Reality studier - oppdrag

Singapore

- 2015-19 VR lab, metodikk og 3D modeller, Singapore (VR-gå)

Trygt Vegarbeid

- 2018-19 Flaimtrainer-Trygt vegarbeid VR-(slukke)
- 2018-19 Opplæring –Trygt vegarbeid (VR-kjøre)

Statens Vegvesen

- 2018 Simulering av selvredning (VR-gå)
- 2019 simulering av opphold redningsrom (VR-gå)
- 2019 0-visjon i tunnel- Evacsound (VR-gå)
- 2019 effekt av tunnelsikkerhetskampanje (VR-gå)
- 2019 Simulering av sikkerhetstiltak i E39 Rogfast (VR –Kjøre)

Trygg Trafikk - 2019 Barn og sykling (VR-sykle)



Kjøresimulator studier - oppdrag

- VALIDAD
- Immortal
- Claresco
- Stardust
- Wisecar
- Uptun
- Helsedirektoratet / Transportstyrelsen
- Lærdalstunnelen
- Qinling Zhognansan
- Frøyatunnelen
- Stockholmsringen



SELVREDNING I VEGTUNNEL



Foto: Monica Blikås



Sikkerhetstiltak og problemstillinger

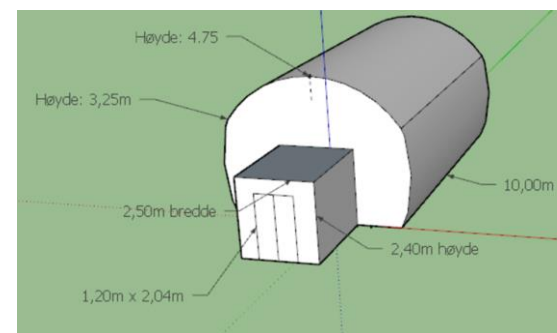
- Håndboka (N 500) har følgende krav: ÅDT > 8000 utløser krav om nødutganger som i de aller fleste tilfeller medfører at to løp må bygges, til en langt høyere kostnad enn ett løp.
- Her kan sikre rom være et alternativ. Avstanden mellom rommene påvirker selvfølgelig kostnaden, men det vil uansett være adskillig rimeligere enn å bygge nytt løp. Kostnaden for rommene har vi brukbar oversikt over.



Sikre rom i berget



På størrelse med en snunisje på tvers av tunnelaksen

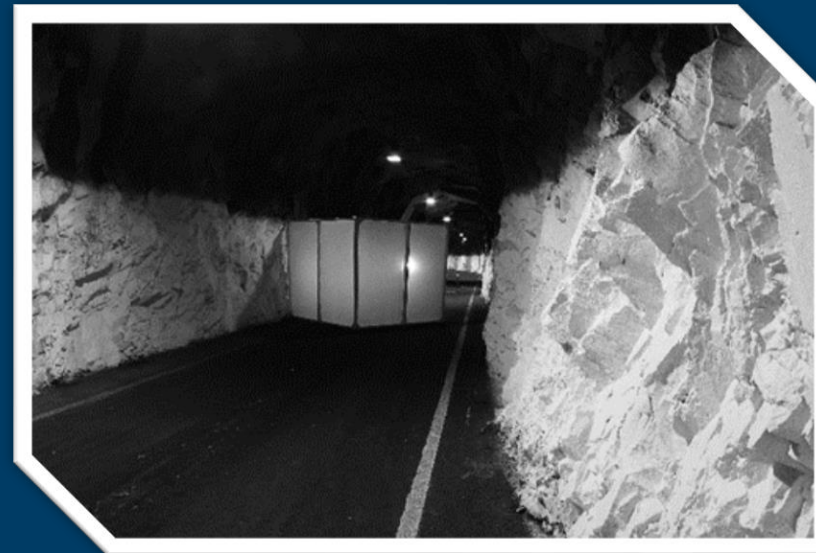
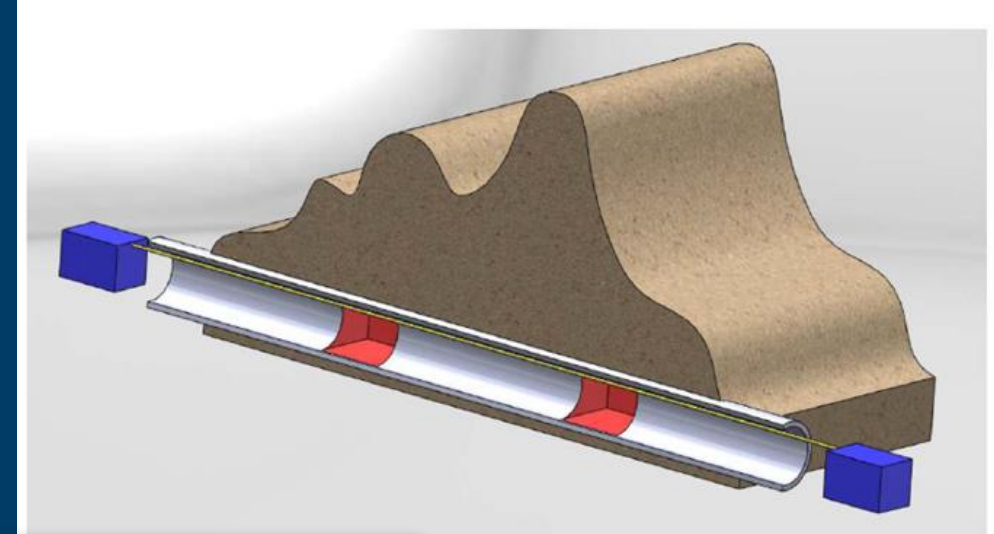


Sikkert midlertidig oppholdsted

Sluse med overtrykk hindrer røyk å sive inn

Hvordan etablere sikre rom i eksisterende tunneler?

- Alt 1: Installere prefabrikkerte containerrom
- Alt 2: Lage sikre rom i berget



Bakgrunn

Seks -sju alvorlige branntilfeller i Norske vegtunneler sist 7 år

Figur 1. Seks store og alvorlige tunnelbranner som påvirker sikkerhetsnivået i tunnelene



Oslofjordtunnelen Mars 2011



Oslofjordtunnelen Juni 2011



Gudvangatunnelen August 2013



Skatestraumtunnelen Juli 2015



Gudvangatunnelen August 2015



Oslofjordtunnelen Mai 2017



Fjærland 25 Mai 2017
Responstid 25 min

16000 liter
bensin

Tid til
evakuering
2 min

Et vogntog i brann
Uten last
Evakueringstid
2 timer

To førere reddet livet i
redningsrom
Ca 200m til redningsrom
Kunne ikke gått 5 m til

Skatestraum (2015)

I løpet av 2 min, stod halve tunnelen, - en strekning på 1 km i brann



Hvordan ivareta selvredning

Vi kan ikke vinne tid, men sikre at vi har tid til å komme i sikkerhet

Verden i endring! Nye energibærere - Brann i litiumbatteri utløser *Hydrogen Fluorider*

Hydrogen Fluorider er:

- Svært giftig
- Kan gjøre deg blind
- Skade lungene
- Selv i små doser!
- Brann i El-biler har blusset opp 4-5 timer etter at brannvesenet har slukket brannen



Unngå å tape tid !



Når sekundene teller



Hvordan ivareta selvredning

Verden i endring – Nye energibærere



Hvordan ivareta selvredning

Verden i endring – Nye energibærere



Selvredning → Lange avstander

One-family house
Office building
Industrial building
Short tunnel 250 m



Medium length tunnel 1'000 m

> 1'000 m long tunnel

Gotthard Base Tunnel with 58 km length

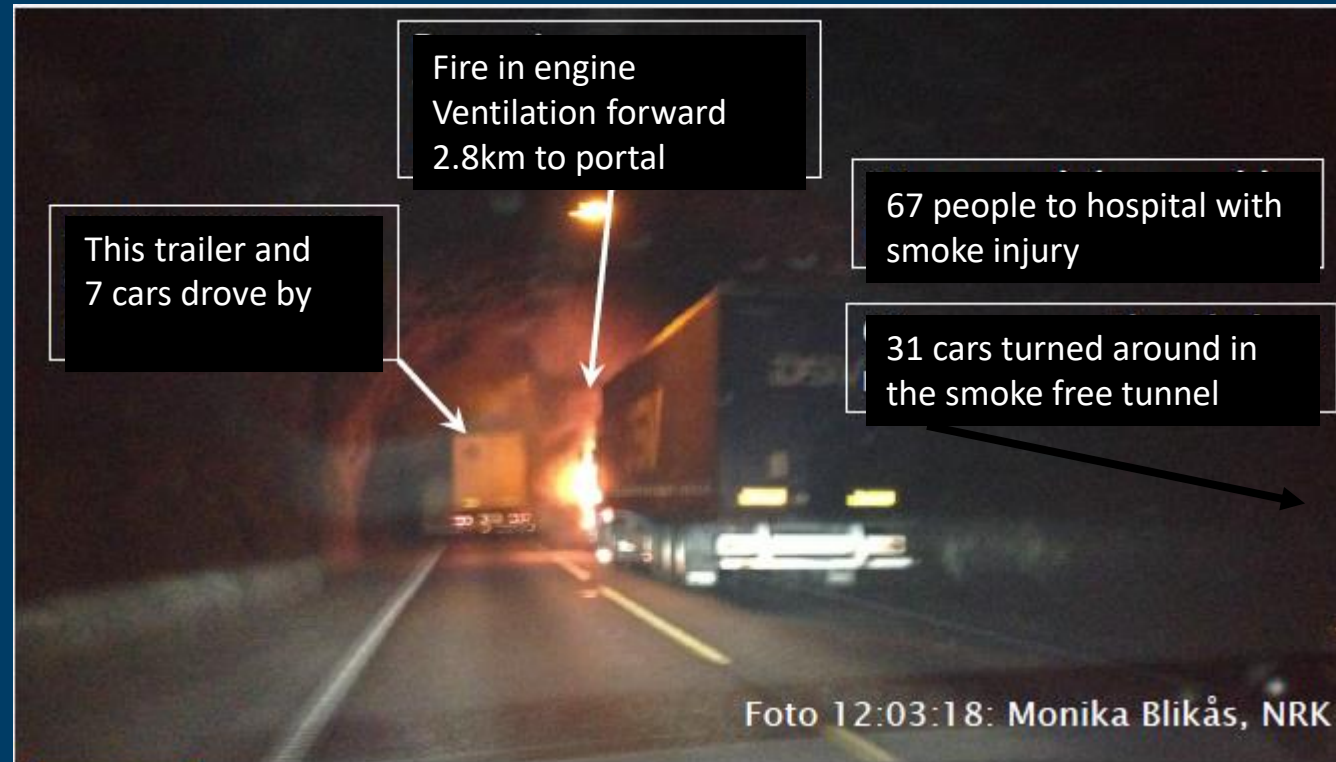
Brenner Base Tunnel with 64 km length



Myte

Bilister søker ut
samme vei de kom inn

Gudvanga fire,- Aug 5th 2013



Gudvanga 2013

Trafikantene snublet sakte fram i en grøft, slo hodet i skilt og alt som stakk ut og følte seg fram langs bergveggen, men gikk likevel rett på forlatte kjøretøy. Flere prøvde å snu kjøretøyet i røyken, men ga opp etter å ha kollidert med hverandre eller bergveggen

leve?



Bilde: Statens Havarikommisjon

MOVEMENT SPEED AND EXIT CHOICE IN SMOKE-FILLED RAIL TUNNELS

FRIDOLF, K., RONCHI, E., NILSSON, D., FRANTZICH, H. (2012)



*A participant walking
with an upright posture,
with hands in a normal
position
alongside the body*



*A participant walking
with a crouched posture*



*A participant walking with the
hands in front of the body*



*A participant walking with
both hands on the tunnel wall*

Kan vi regne med å bli reddet ut?



Hordaland 16. september 2006
Masfjordtunnelen:
4 km lang og 9% stigning

Brannfolkene var på sauesanking

Utrykningsleder i Matre, Kjell Talle, slakter beredskapen i kommunen etter at han med fare for eget liv måtte kjøre inn i Masfjordtunnelen og redde en trailersjåfør.

Av: Hanne Jensen

Utrykningsleder Kjell Talle, var selv på ferie da en personbil tok fyr og en trailersjåfør ble sittende fast inne i den røykfylte tunnelen.

Han rykket likevel ut fordi brannmannskapene var på sauesanking da tunnelbrannen skjedde.

- Hadde uheldet skjedd lenger nede i tunnelen, på Matre-siden, kunne brannen fort ha blitt en katastrofe, sier Talle til nordhordland.no.

Det var stor helgeuttfart fredag, og hadde det begynt å brenne lenger nede i tunnelen kunne mange mennesker blitt sittende fast i tunnelen da det brant.

- Brannen og røykutviklingen ville utløst panikk og kaos. Heldigvis tok bilen fyr i nærheten av tunnelutgangen slik at folk raskt kunne løpe ut av tunnelen, sier Talle.

Han hadde ikke røykdykkerutstyr da han kjørte



Foto: Bengt Bjørnhaugen
En bil begynte å brenne inne i Masfjordtunnelen på E39. Ingen ble drept (15.09.2006).



Fakta: Ofte har brann og redning lang responstid og det kan være vanskelig å nå fram til brannen



Fakta: Kun ved 1 av 20 større branner i buss og vogntog greier brannvesenet å slukke brannen om de ikke når fram innen 10 min

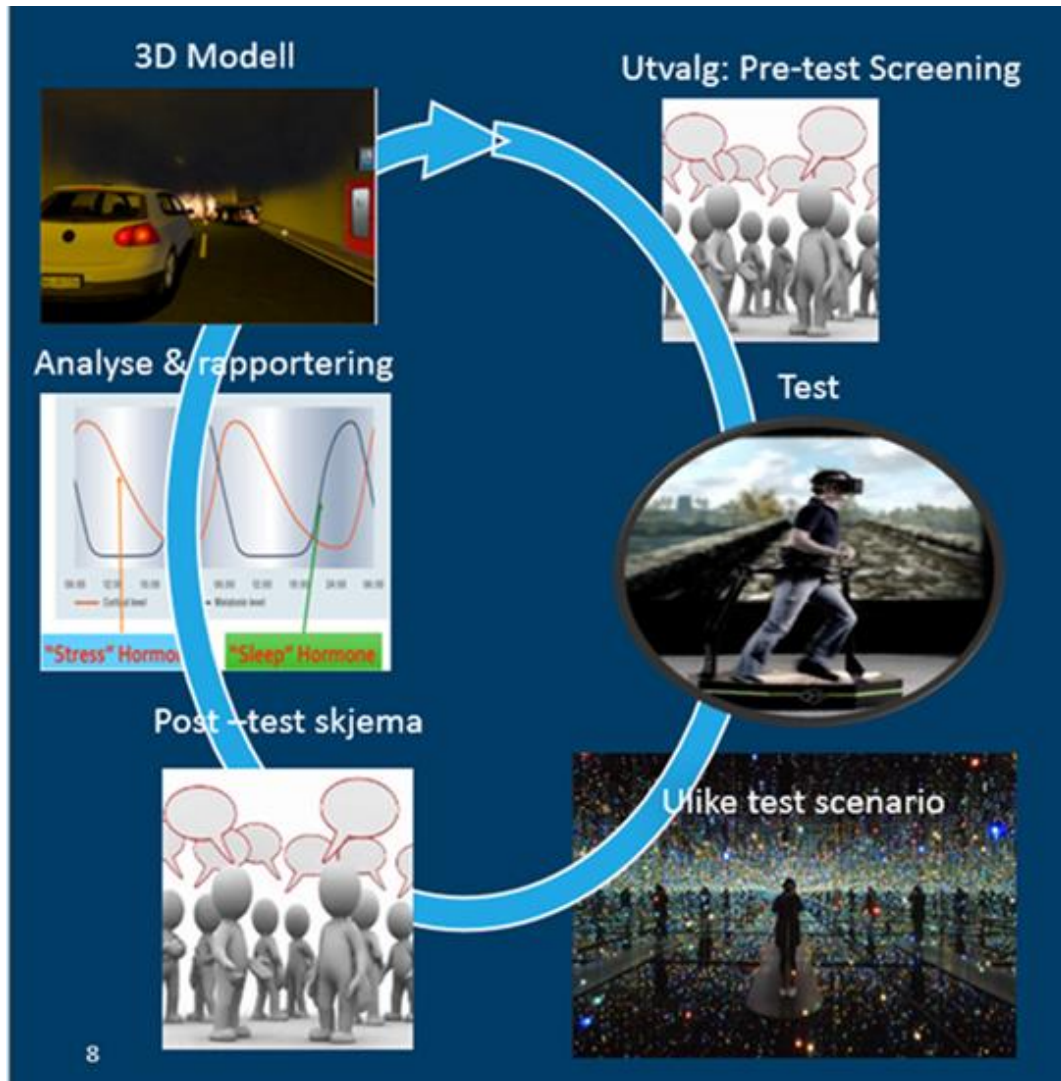
Det står i ofte i rapporten at brannen ble slukket 1—2 timer etter den startet !

I realiteten er kjøretøyet helt utbrent !

Prosjekt 16/34743

- Selvredning – Hvordan finner folk redningsrom?
 - Effekt av skilting
 - Effekt av høyttalere
 - Effekt av dørutforming
 - Effekt av avstand til redningsrom
 - Effekt av kontinuerlig lysende håndlist
- Simulering av brann i lang tunnel - Virtual Reality studie

Metode



Totalt: 82 personer fra 8 nasjoner

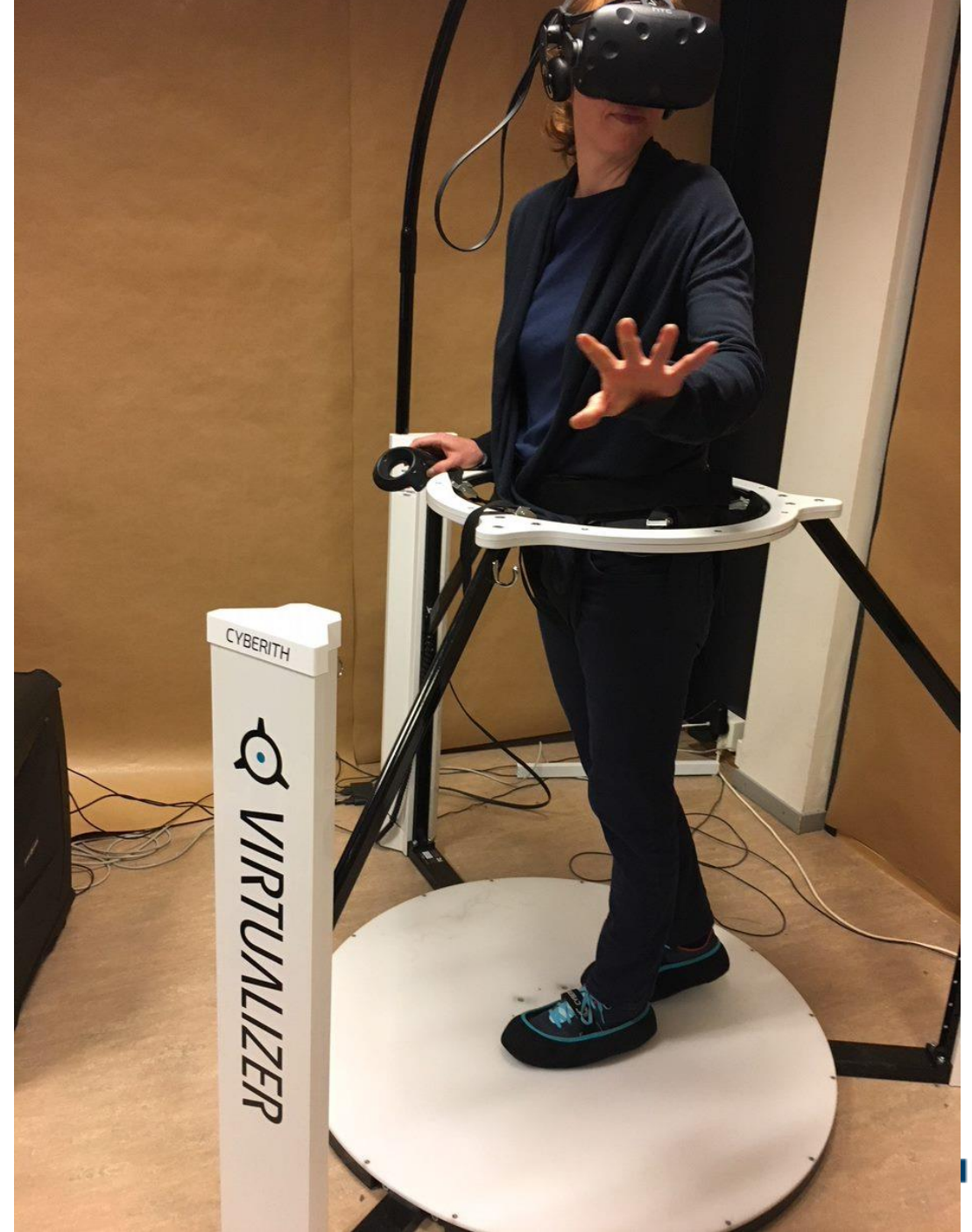
Norge, Sverige, Kina, UK ,
Colombia, Italia, Bulgaria
Nederland

62 i den Norske studien

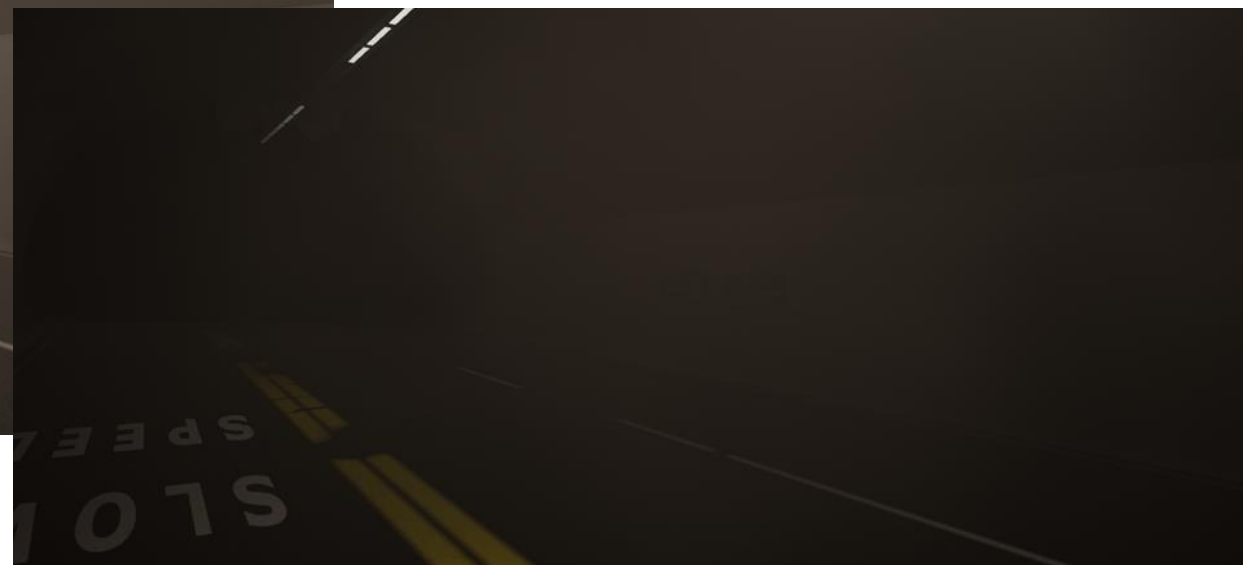
40 i Svenske studien

Identisk VR utstyr gåplattform

Og 3D model av tunnel



Brann og røykutvikling- Screenshot fra VR modell



HVA KAN VI LÆRE AV LITTERATUR STUDIENE?

State-of-the-art Litteraturstudie

- Selvredning
 - Tid til å redde seg ut i live kan være veldig kort
 - 2015 - Skatestraum 2017 (2 min)
 - 2017- Oslofjord (2 min)

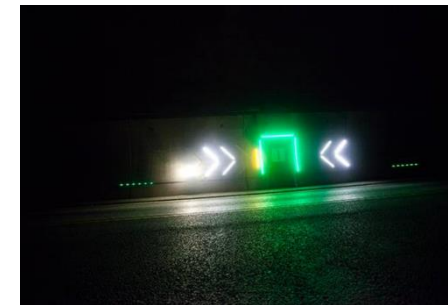




*Road users in tunnel fires will not seek emergency exits
if not guided by personnel*

*Report of the Task Force for Technical Investigation of the 24 March
1999 Fire in the
Mont Blanc Vehicular Tunnel, Duffé, P. 1999*

Fakta



- Alle, pluss de to som omkom i Mont Blanc fant fram til redningsrom uten assistanse
- Trafikanter som rømmer til fots famler seg fram langs tunnelveggen og søker inn i rom de finner. Jamfør dokumentert atferd ved brann i Gudvangatunnelen 2013 og Oslofjordtunnelen 2011 og 2017.
- Tre i telefonboks - Tauern
- To personer fant fram til og reddet sannsynligvis livet i ved bruk av redningsrom ved brann i Oslofjordtunnelen 2017

Når går "brannalarmen"?

"Brannalarmen" går når:

- 1) Tungtrafikken øker ut over det tunnelen er dimensjonert, designet for
- 2) Stigningsforholdene er ugunstig i og utenfor tunnelen
 - Det var tilfellet ved de tre store brannene i Mellom-Europa
 - Mont Blanc , St. Gotthard og Tauern 1999-2001 med til sammen 62 drepte
 - Tre store branner i Gudvanga og de tre i Oslofjordtunnelen har to ting til felles
 - Stor stigning i eller utenfor tunnelen
 - Stor økning i tungtrafikk !
- EU direktivet krever risikoanalyse av tunneler på TERN vegnettet hvert 5 år
 - Risikoanalyse i 2011 to år før Gudvanga brannen i 2013 viste at tungtrafikken oversteg det tunnelen var designet for!
 - Rapport før brannen i Oslofjordtunnelen 2011, viste urovekkende mange branntilløp og mindre branner i tunge kjøretøy

Litteraturstudiet viser:

Den største tunnelbrann katastrofen hittil har de færreste hørt om!

2014 Incident: Yanhou-Jincheng-Tunnel



Yanhou Jincheng tunnel - Shanxi, China
800m long, twin tube highway tunnel
42 vehicles, 4 HGV's

Fire and explosion: 13th of March 2014

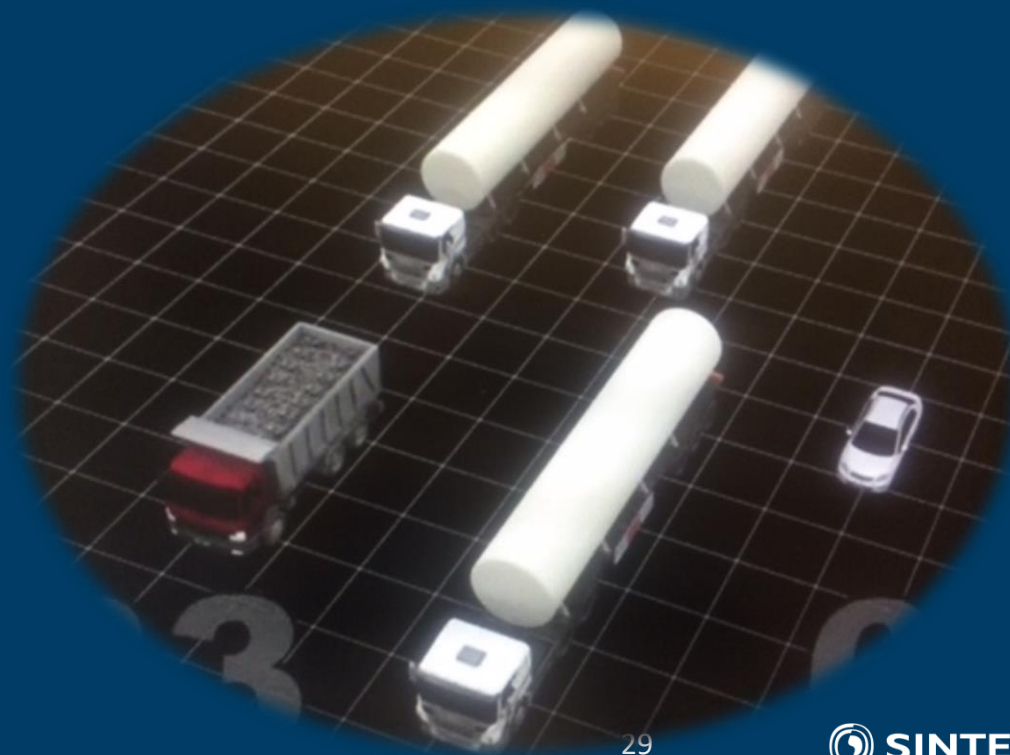
First: Collision - two Methanol tank trucks

Then: Truck with coal also caught fire

Finally: Truck with natural gas exploded

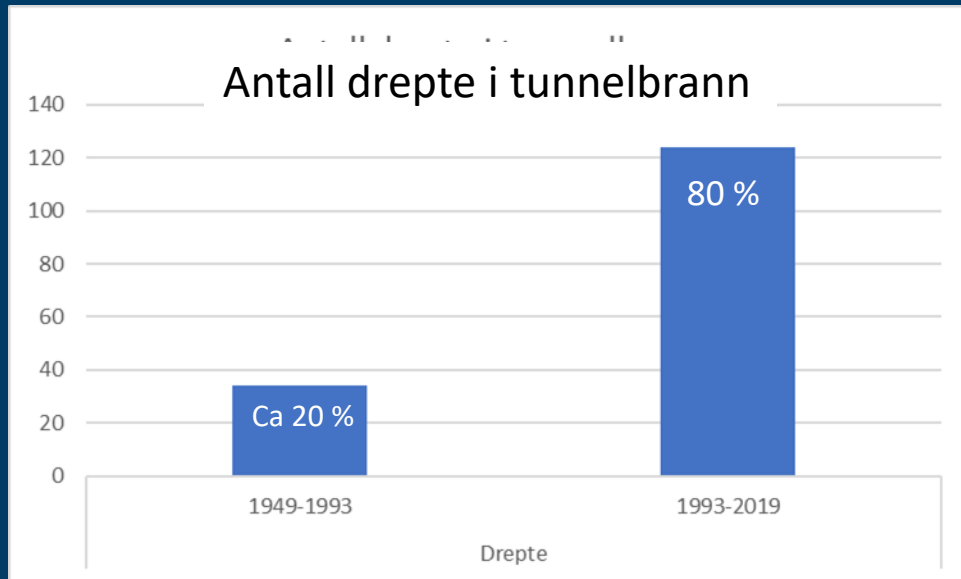
**40 killed as truck collision
turns Chinese tunnel into fiery death**

Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=aMLmD6nIM4o> & <https://www.youtube.com/watch?v=sK87e5y2JFU>



Statistikk: 78 større branner i perioden 1949-2019

- 158 drepte i tunnel på 70 år



- 124 drepte i perioden 1993-2019 (26 år)
- Ca 80 % på færre år

- 39 drepte i perioden 1949-1993 (44år)
- Ca 20 % over lengre periode, men med lavere andel godstransport på veg

- 1 drept i Norsk tunnelbrann (1996)
Løgstakktunnelen

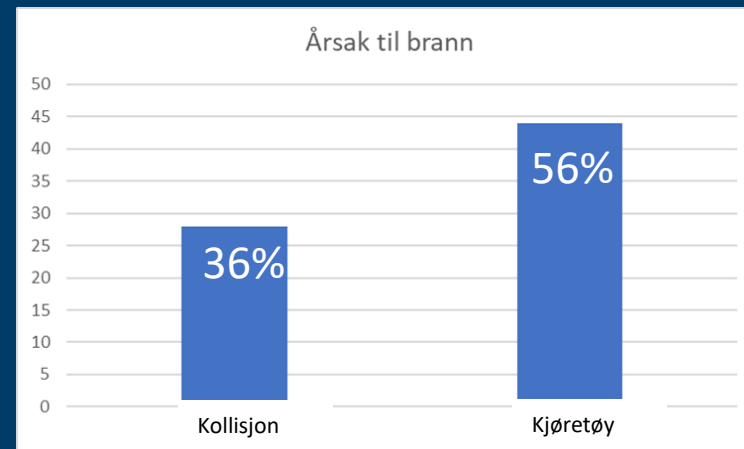
- Flaks ?

Statistikk: 78 større tunnelbranner i perioden 1949-2019

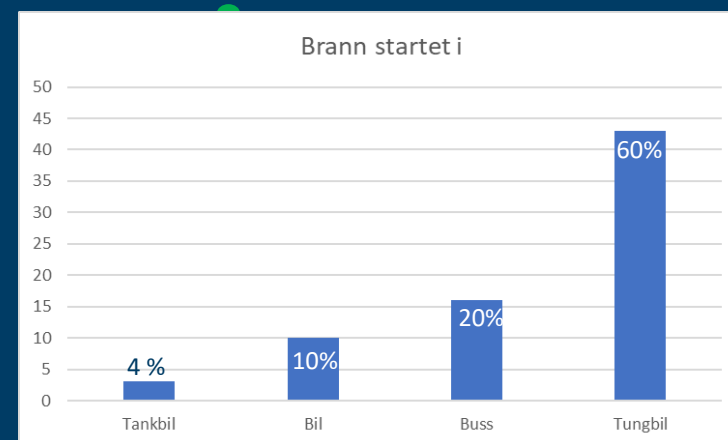
*HGV = Heavy Goods Vehicle

År	Navn	Løp	Lengde	Start	Årsak	Drepte	Behandlet på sykehus	Antall Kjøretøy som brant	Tunnel skade
2019	Gudvanga	1	11.400m	Tungbil	Kj.tøy	0	5	1	●
2017	Oslofjord	1	7.310m	Tungbil	Kj.tøy	0	25	1	●
2017	Fjærland	1	6.400m	Tungbil	Kj.tøy	0	13	1	●
2015	Sangju	2	400m	Tank	Kj.tøy	0	21	12	●
2015	Skatestraum	1	1.902m	Tank	Kj.tøy	0		2	●
2014	Yanhou	2	800m	Tank	Koll.	40		42	●
2013	Baltimore H.	2	2.330	Bil	Kj.tøy	0	0	1	●
2013	Gudvanga	1	11.400	Tungbil	Kj.tøy	0	26	17	●
2013	Brattli	1	3.600m	Tungbil	Kj.tøy	0	0	1	●
2011	Oslofjord	1	7.301m	Tungbil	Kj.tøy	0	31	1	●
2011	Oslofjord	1	7.301m	Tungbil	Kj.tøy	0	4	1	●
2009	Eiksund	1	7.770m	Bil	Koll.	5	0	1	●
2007	Burnley	1	3.400m	HGV	Koll.	3	3		●
2007	Newhall	2	170m	HGV	Koll.	3	10	31	●
2005	Frejus	2	12.870m	HGV	Kj.tøy	2	21	2	●
2001	St.Gotthard	1	16.920m	HGV	Koll.	11		15	●
1999	Tauern	1	6.400m	HGV	Koll.	12	49	40 (26, 24)	●
1999	Mont. Blanc	1	11.600m	HGV	Kj.tøy	39		36 (25, 11)	●
1996	Løpvstakk	1	2.032m	Bil	Koll	1	3	1	●

• Årsak til brann



• Brannen startet i....



Kilder: Tunntech <https://www.tunntech.com/index.php/what-s-up/incidents/tunnel-fires-database>

Jenssen , Hoem,Roche-Ceraci og Grøv (2017) Litteraturstudie –Selvredning i tunnel

Gunnar Jenssen, Moen Terje and Cato Bjorkli (2008) In Martens M.H. (Ed.) Workpackage 3 **Human response**

D33 Human Factors Aspects in Tunnels: Tunnel User Behaviour and Tunnel Operators.

31 Official deliverable © version September (2008) Available at <http://www.uptun.net/downloads/finalreports/orts>

Hvorfor skjer tunnelbranner

Vegutforming

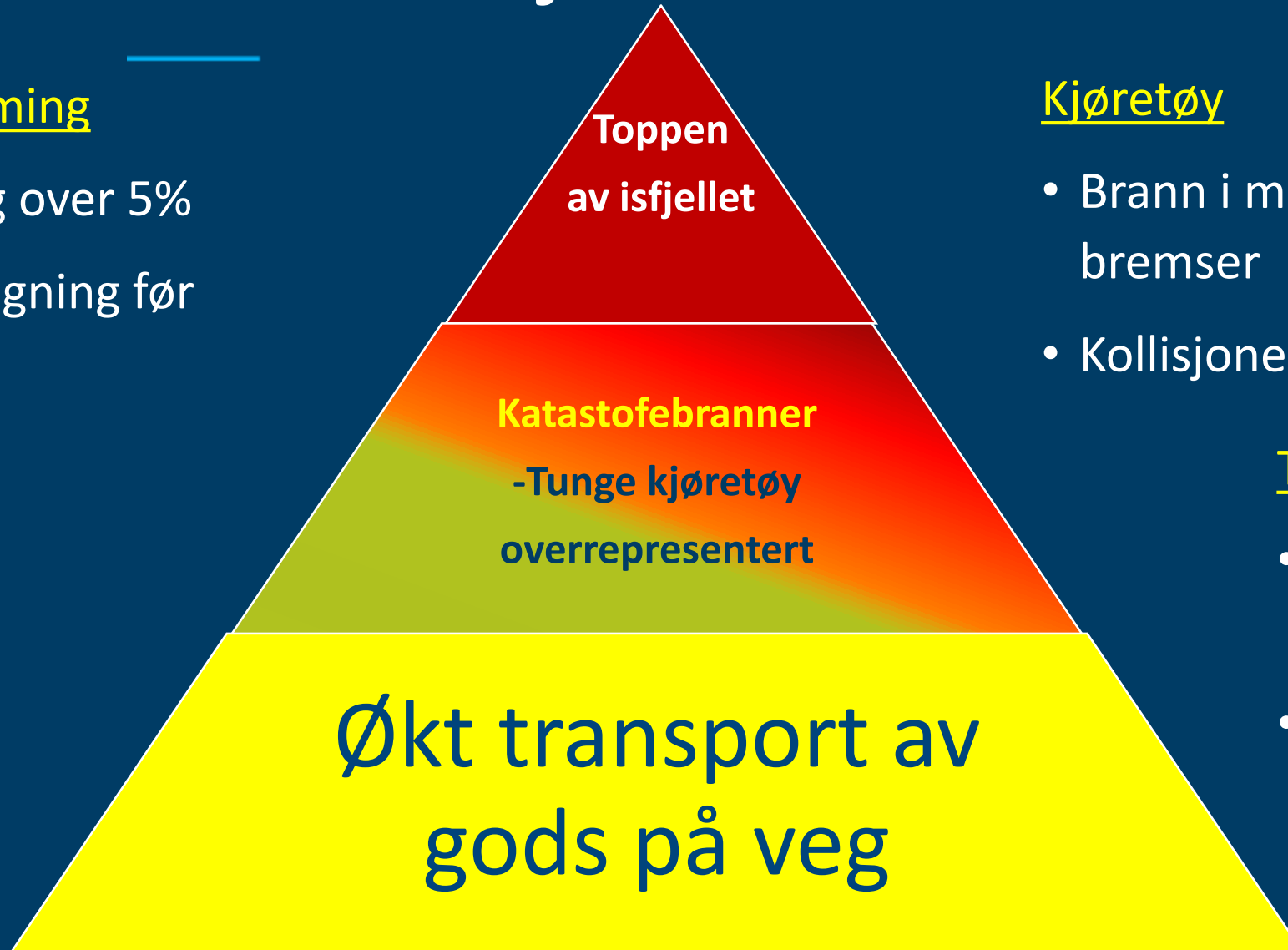
- Stigning over 5%
- Bratt stigning før tunnel

Kjøretøy

- Brann i motorrom og bremses
- Kollisjoner

Trafikant

- Uerfaren med tunnel og norsk topografi
- Manglende vedlikehold av kjøretøy



Sikre rom redder liv!

- Det er dokumentert at bruk av redningsrom innen gruve-industrien og i byggefasen av tunnel der hele 22 personer har reddet livet i perioden 2007-2017 ved bruk av redningsrom.
- Litteratursøket viser at mange personer reddet livet i Mont Blanc tunnelen ved bruk av redningsrom lenger unna brannen. Alle disse, inklusive de to som omkom, fant fram til redningsrom.
- Norske tunnelbranner viser at trafikanter som rømmer til fots famler seg fram langs tunnelveggen og søker inn i rom de finner. To personer fant fram til og reddet sannsynligvis livet ved bruk av redningsrom ved brann i Oslofjordtunnelen mai 2017.

HVA KAN VI LÆRE AV VIRTUAL REALITY STUDIENE?

VR studien viser:

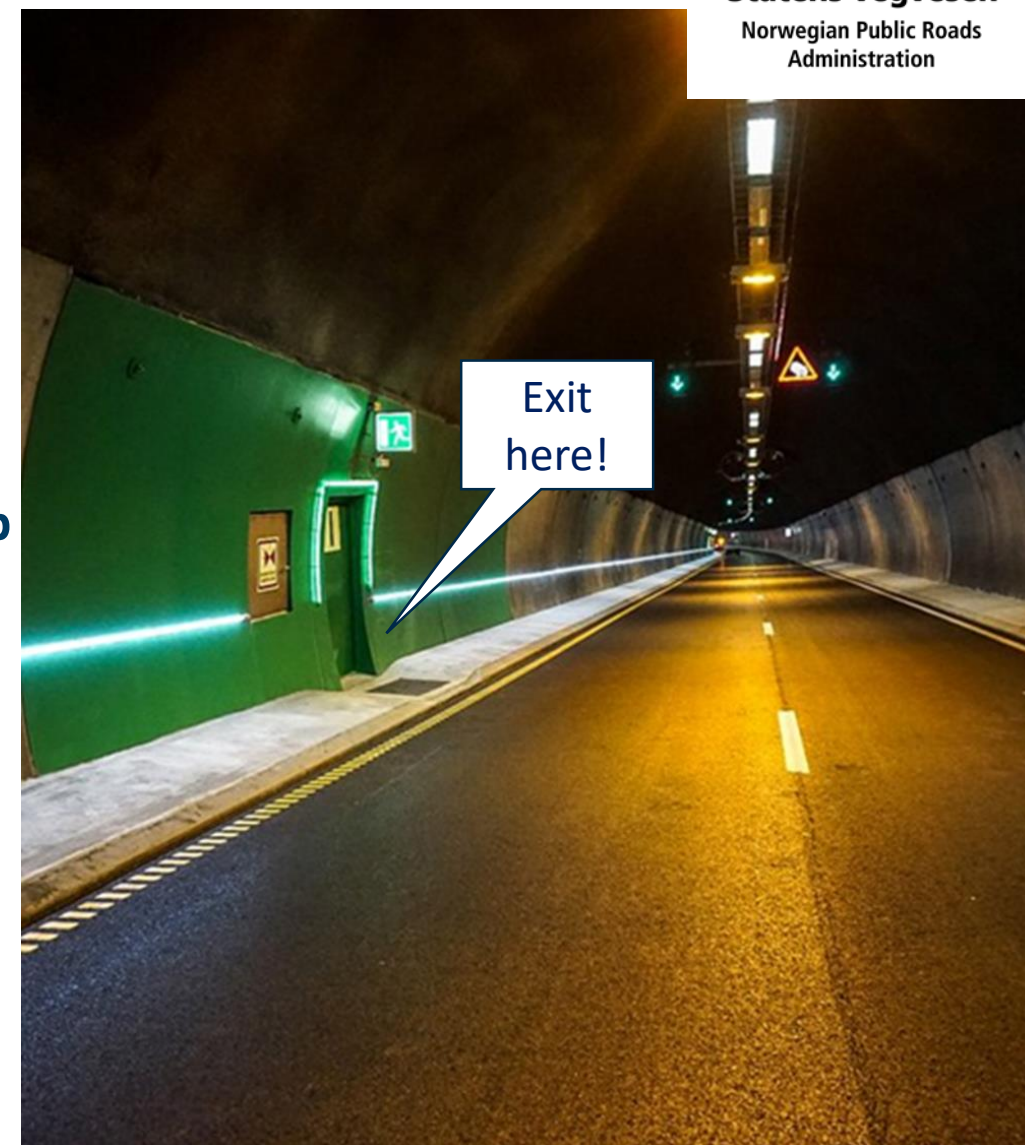
Enkle tiltak kan redde liv!

Kontinuerlige ledelys (håndlist) fungerer veldig bra!

- **Alle finner nærmeste redningsrom**
 - Uavhengig av alder, kjønn, nasjonalitet og erfaring med tunnel
- **Uten ledelys er det tilfeldig hvilken vegg folk havner opp ved**
 - Typisk følger dem gule sperrelinja inntil den forsvinner i røyken
- **Folk går raskere når de kan følge ledelys**
- **Høytalere plassert ved utgang sikrer at de finner redningsrom**
 - Selv i tynn svart røyk!
 - 0.5m sikt



Statens vegvesen
Norwegian Public Roads
Administration



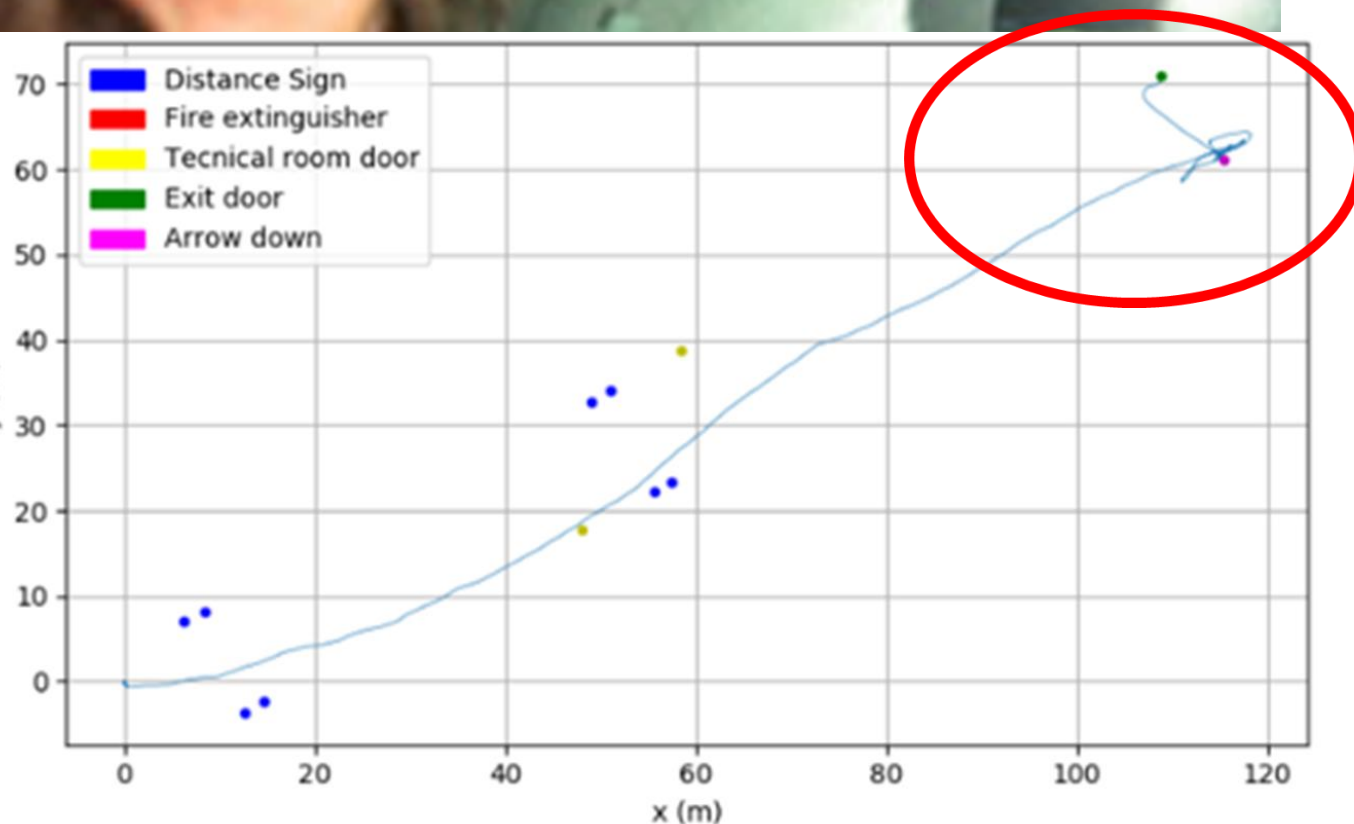


VR studien viser:



Statens vegvesen
Norwegian Public Roads
Administration

Kan vi ha 500m avstand mellom redningsrom?



- Usikkerhet øker med 500m avstand
- Nesten halvparten av trafikantene (47%) snudde og gikk mot brannen
- Famlet rundt- gikk fram og tilbake
- Lurte på om de hadde passert et redningsrom
- De brukte 4 ganger lengre tid, en økning fra 2 min til 8 min på å finne sikre rom

Hvordan ivareta selvredning

VR studien viser:

Skilt er alene ikke tilstrekkelig!

- I tjukk svart røyk ser du bare det ene skiltet, og kan ende opp med å gå i feil retning

-
- Veldig få forstod et skilt for utgang på motsatt side



SIMULERING AV OPPHOLD I SIKRE ROM



Vi testet ulike design ,
takhøyde
og kommunikasjon

To typer (4 Varianter)

- a) Sikre kontainerom
- b) Sikre bergrom



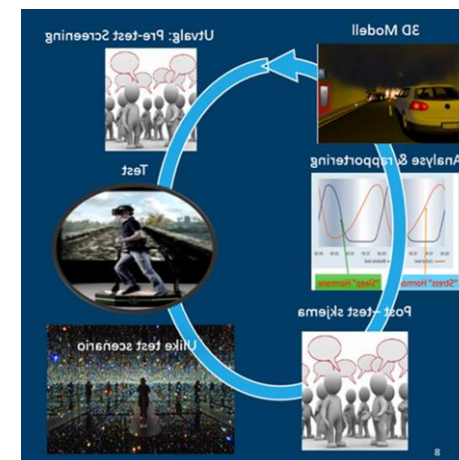
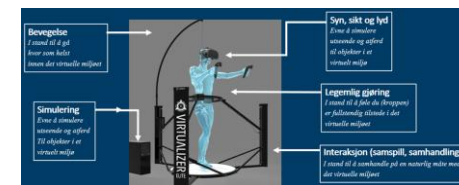
Simulering av opphold i sikre rom

Testsituasjon i rommet og oppgaver

- **Skadd person** som ber om hjelp
- **Sammen med 20 andre** personer i rommet
- **Finne fram til,-aktivere og forholde seg til** råd fra Vegtrafikksentralen(VTS)
- **Finne fram til førstehjelpsutstyr**
- **Omsorg** -forholde seg til skadet person)
- **Forholde seg rolig**-følge råd

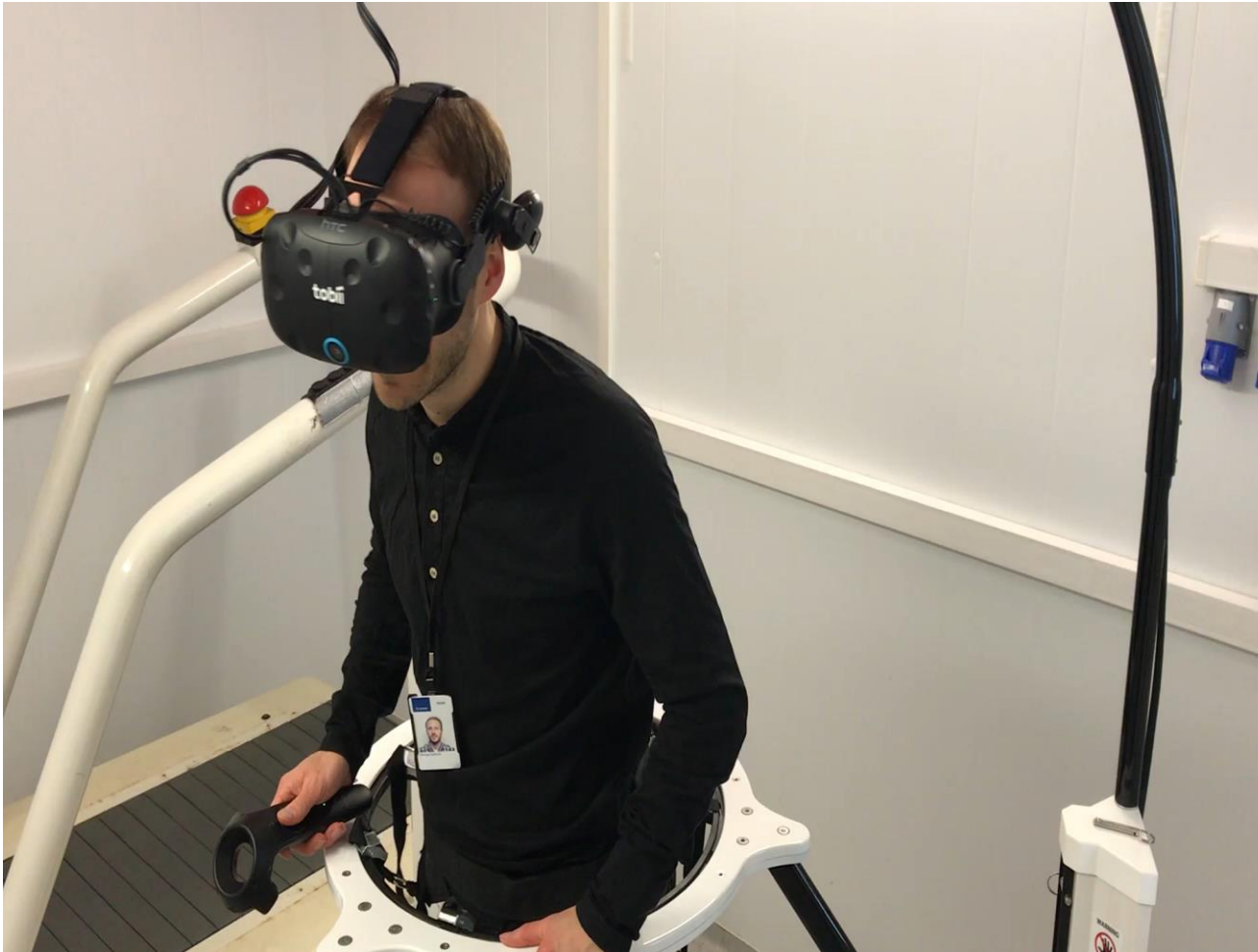
Hvordan måler vi trygghet og effekt av design?

- **Objektive mål:** Eye tracking
Hva ser du på, når, hvor ofte og lenge + Stress
- **Fysiologiske mål på stress**
Puls – HRV, kroppstemperatur
- **Atferd:** Prøver de å gå ut igjen? Blir de beroliget av samtale med Vegtrafikksentralen? Følger de råd fra VTS, finner førstehjelp, forsøker hjelpe skadde
- **Subjektive mål:** Human Environment
Interaction test og intervju



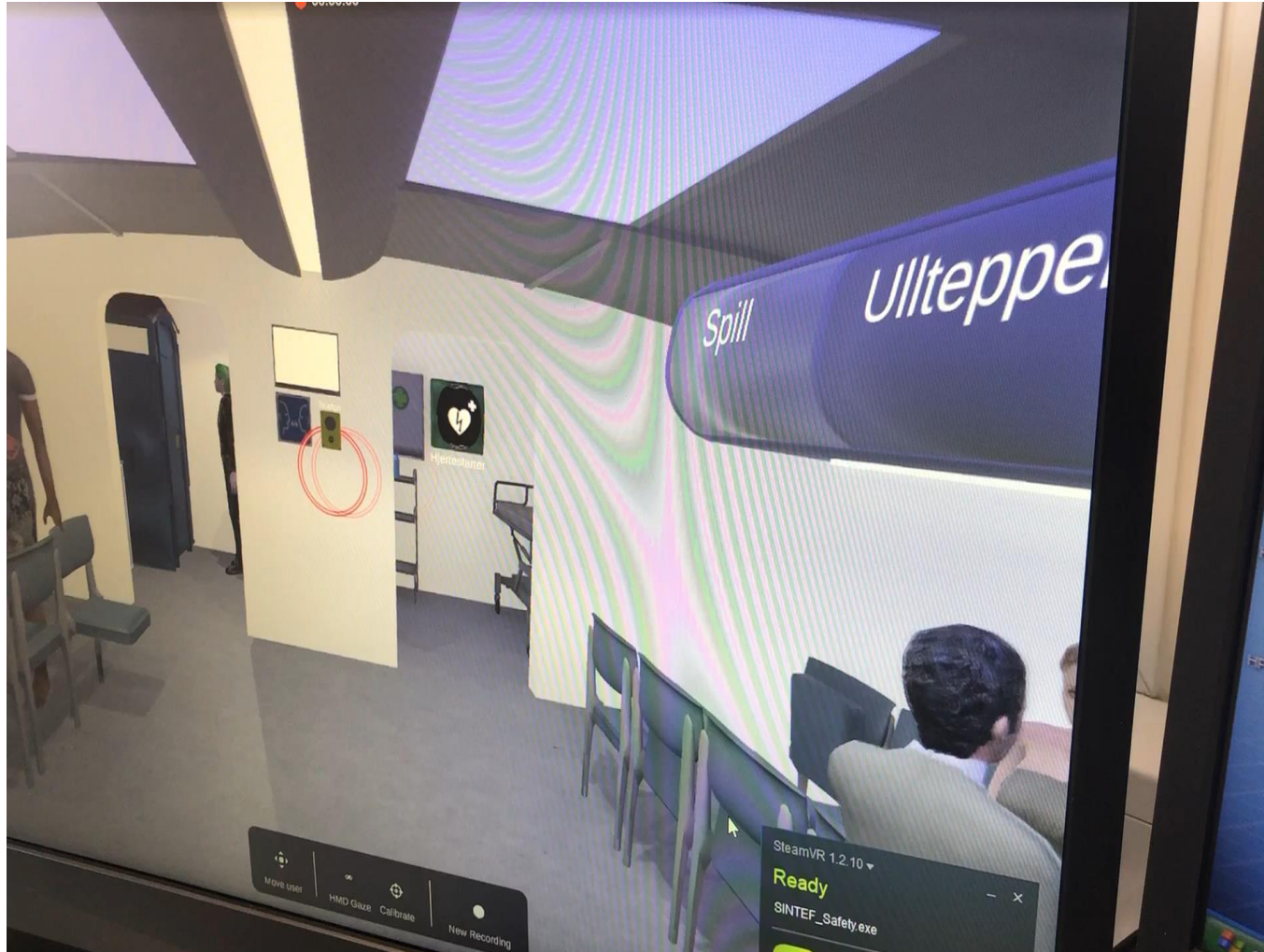
Hvordan ivareta selvredning

SINTEF Helse -Klima Lab



32 grader
70% luftfuktighet
90 Decibel

Opphold i redningsrom



Hva kan vi lære av studiene?

Vi har dokumentert

- **Redder liv:** Vi har dokumentert at sikre rom i Oslofjordtunnelen, i byggefase av tunnel i gruver osv. har reddet mange liv
- **Finner fram til:** Vi har dokumentert at folk kan finne fram til sikre rom i tett svart røyk ved brann i tunnel
- **Enkle tiltak:** Vi har dokumentert at enkle ledesystem fungerer godt
- **Trygghet og design:** Vi er i ferd med å dokumentere hvordan folk vil oppleve opphold i sikre rom uten utgang til det fri

Konklusjoner

- Vi har vært heldige som har unngått tap av mange liv ved store tunnelbranner de siste 7 årene
- Vi har gode grunner for å anta at sikre rom vil være minst like akseptabelt som å stå tettpakket i en T-bane ved lengre tids utilsiktet stopp
- Sikre rom er et godt alternativ for å ivareta selvredning i utsatte ettløpstunneler. Det er adskillig rimeligere enn å bygge nytt løp

Takk for oppmerksomheten



Teknologi for et bedre samfunn

Kontakt

+47 926 19 415
gunnar.d.jenssen@sintef.no