



DET TEKNISK-NATURVITENSKAPELIGE FAKULTET

MASTEROPPGAVE

Studieprogram/spesialisering:

Vårsemesteret, 2022

Samfunnssikkerhet

Åpen

Forfatter: Harald Søiland

Signatur:

Harald Søiland

Fagansvarlig: Ove Njå

Veileder(e): Ove Njå & Geir Sverre Braut

Tittel på masteroppgaven: Røykgasseksponering og helseeffekter ved brann i vegtunnel. En litteraturstudie med fokus på nye krav til sikkerhetsstyring.

Engelsk tittel: Smoke gas exposure and health effects in road tunnel fires. A literature review with focus on new requirements for safety management.

Studiepoeng: 30

Emneord: Brann i tunnel

Toksiske gasser

Systemteori

Samfunnssikkerhet

Helseeffekter

Kronisk

Akutt

Prosessmodell

Sidetall: 77

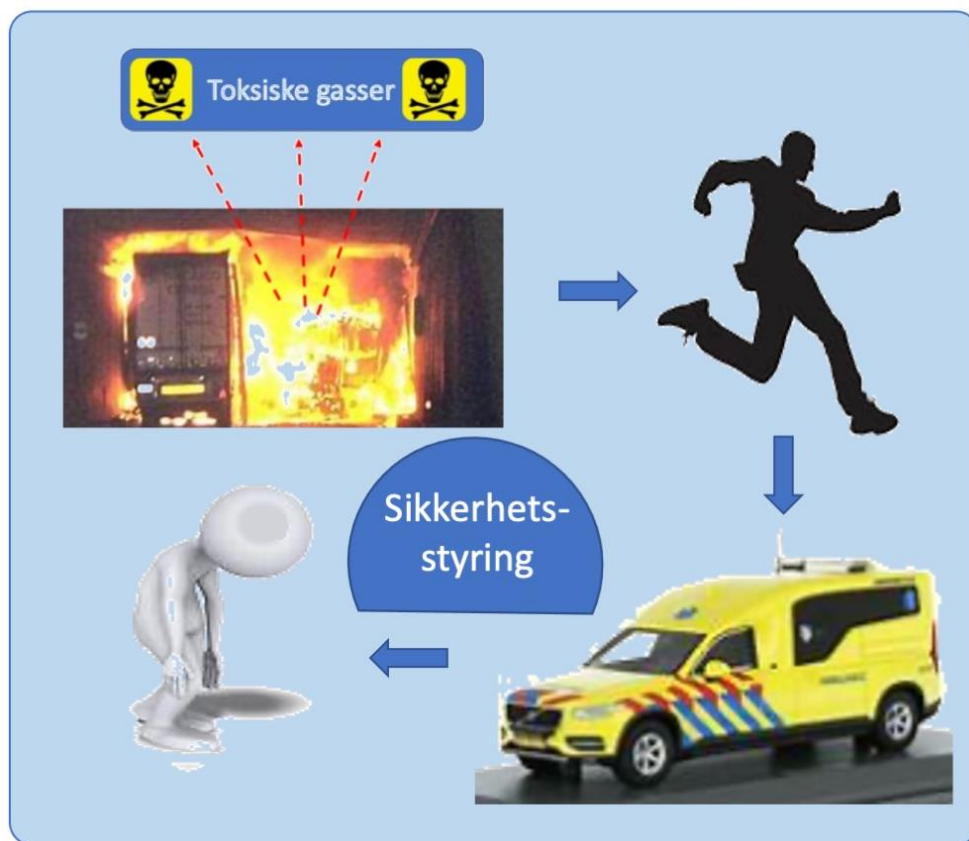
+ vedlegg/annet: 44

Stavanger, 15. juni/2022
dato/år

Røygasseksponering og helseeffekter

ved brann i vegtunnel

– en litteraturstudie med fokus på
nye krav til sikkerhetsstyring



Masteroppgave UiS

Harald Søliland

Veiledere: Prof. Ove Njå og Prof. Geir Sverre Braut

Sammendrag

I denne oppgaven har jeg studert hvilke toksiske gasser som utvikler seg ved branner i kjøretøy i vegtunneler. Videre så jeg på de akutte og kroniske medisinske helseeffekter av disse toksiske gasser på det menneskelige legemet.

Metoden jeg brukte var en systematisk review, der jeg gjorde et systematisk litteratursøk i fem databaser og identifiserte 3684 artikler. PRISMA utsilingen og litt «snowballing», gjorde at jeg til slutt satt igjen med 65 artikler for dybdelesing. Disse artiklene utgjør hovedgrunnlaget av den kunnskap som presenteres i oppgaven.

Resultatene av søket var at de toksiske gassene, som dannes i bilbranner, er av prinsipielt to typer. Den ene er lokalirriterende i luftveier med alvorlige lungeskader som følger. Den andre er de systemtoksiske. Disse gassene hemmer utnyttelsen av oksygen i kroppen.

De akutte helseeffekter av de ulike gasser rammer først og fremst de organer som er følsomme for oksygenmangel, dvs. hjerne og hjertet. Litteratursøket avslørte imidlertid store kunnskapshull når det gjelder kroniske helseeffekter. For å monitorere pasientene, trenger man medisinsk kunnskap om de toksiske gassene sine virkninger. Sykebilene må ha med nødvendig prehospitalt utstyr med til skadested. Sykehusene må også være beredte til å behandle på høyt nivå eller sende i fra seg pasienten til regionsykehus.

Et viktig moment er å definere våre begrensinger (constraints) ved tunnelbranner. Det gjelder hvor mye tid vi har til rådighet når vi vet konsekvensene av branngassenes virkning. Hvor fort klarer de som er eksponert for røykgasser å evakuere seg selv og hvor vanskelig blir det?

Dersom tunneleier ikke tar hensyn til disse sikkerhetsbegrensingene bryter de med de grunnleggende prinsippene bla. om nullvisjon og samvirke. Videre peker denne oppgaven på at medisinsk kunnskap er et relativt nytt perspektiv i sikkerhetsarbeidet til tunneler i Norge. Litteratursøket har også frembrakt til dels ny medisinsk kunnskap, riktignok litt fragmentarisk og noe utenom tunnelsettingen, men må ses på som en viktig del av arbeidet med å sette begrensinger i sikkerhetsarbeidet.

Opgaven har pekt på store mangler i kunnskap om kroniske helseeffekter etter røykgasseksponering. Det stimulerer til å gjøre videre studier for å skaffe ny empirisk kunnskap gjennom både retrospektive og prospektive metoder.

Forord

Alle innbyggere i Norge har en gang kjørt gjennom en vegtunell med egen bil eller i en buss. De fleste av oss har sett en brann eller sett en branntomt. Men kombinasjonen av brann og biltunnel har heldigvis hendt de færreste av oss. En slik kombinasjon er et mareritt, for slike branner er potensielt dødelige hvis man blir fanget i en røykpropp. Brann i biler, lastebiler og busser kan friggi en rekke giftige gasser som kan drepe de som blir fanget av brannrøyken.

Bygging av tunneler omfatter mange aktører i et hierarki, fra styrende direktorater til ingeniørene som utfører selve arbeidet. Imidlertid har ikke medisinsk kunnskap noen naturlig plass i dette hierarkiet. Når man vet hvor mange farlige gasser som kan dannes, virker mangel av den medisinske stemme inn i systemet som en selvmotsigelse. Det er naturlig at den medisinske forståelse av gassdannelse og deres virkning på kroppen blir en del av de ulike prosessmodeller i planlegging og bygging av vegtunneler. Spesielt når man vet at disse gassene trenger helt forskjellige beskyttelsestiltak. Målet med denne oppgaven er å gå gjennom eksisterende litteratur på feltet og se hva vi vet om akutte og kroniske helseeffekter av giftige branngasser fra kjøretøy i vegtunneler. I tillegg skal en se på hvor denne kunnskapen kan komme inn i sikkerhetsstyringen av tunneler. På masterstudier i Samfunnsikkerhet ved Universitetet i Stavanger (UiS) har det vært stort fokus på hvordan ulike sikkerhetsaspekter kommer inn ved ulike prosesser i det norske samfunnet. Ingenting er viktigere enn liv og helse. Derfor ønsket jeg å vinkle tematikken i mastergraden inn mot sikkerhetsstyring og medisinsk forsvarlighet vedrørende branner i vegtunneler.

Først og fremst vil jeg takke mine gode veiledere Prof. Ove Njå og Prof. Geir Sverre Braut ved Universitetet i Stavanger (UiS) og Stavanger Universitetssjukehus (SUS) for ypperlig veiledning gjennom oppgavens ulike faser. Så kunnskapsrike veiledere fortjener alle å få når en skal skrive en masteroppgave. Begge har oppmuntret og motivert meg når jeg trengte det som mest. De har alltid vært tilgjengelige og har gitt meg raske tilbakemeldinger. Tusen takk for uvurderlig god hjelp!

Gjennom løpet til masteroppgaven har jeg vært heldig og hatt en tett dialog med en erfaren kliniker – Håvard Sjøiland. Denne støtten har hjulpet meg på de områder der medisinsk fagkunnskap har vært nødvendig for å tolke helseeffektene av de toksiske gassene.

Det har vært en spennende reise i en spennende verden. Jeg har lært mye, men kjenner på at jeg bare har skrapet litt på overflaten. Etter denne masteroppgaven har jeg lyst til å lære mer om dette temaet.

Forkortelser og begreper

ASET	Available Safe Egress/Escape Time
ATP	Adenosin trifosfat
CHCHO	Formalin
CN	Cyanid
CO	Karbonmonoksid
CO ₂	Karbondioksid
COCl ₂	Fosgen
CoO	Coboltoksid
DSB	Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap
ECMO	Ekstra corporal membran oksygenering
EDTA	Etylendiamintetraeddiksyre (binder metallioner i blodet ved blodprøver, slik at blodet ikke koagulerer.)
Enzym	Katalysator for biokjemiske reaksjoner i alt biologisk materiale, som mennesket.
FEC	Fractional Effective Concentration
FED	Fractional Effective Dose
H ₂ SO ₄	Svovelsyre
Hb	Hemoglobin
HbCO	Karbonmonoksid bundet til hemoglobin
HbO ₂	Oksygen bundet til hemoglobin
HCl	Saltsyre
Heme-gruppen	Det stedet i hemoglobinmolekylet som har et jernatom og som binder både oksygen og karbonmonoksid.
HF	Flussyre
Hyperbar oksygenering	Plassering av pasient i overtrykkstank for å øke oksygenopptaket.
H ₂ SO ₃	Svovelsyring
KATS	Kapasitetløft Tunellsikkerhet
LC ₅₀	Lethal Concentration – 50%
Lungeødem	Vann i lungene som hindrer opptak av oksygen.
MnO	Manganoksider (flere typer forbindelser)
NH ₃	Ammoniakk

NiO	Nikkeloksid
O ₂	Oksygen
Oria	Er en norskutviklet og norskeid tjeneste for digitale søk i databaser tilhørende norske fag- og forskningsbiblioteker
PE	Polyetylen
pH	"Potential of H ⁺ ". Et mål på konsentrasjonen av syre eller base. Skala: 0-14. Vann har pH=7.
pCO ₂	CO ₂ trykket i blodet
pO ₂	Oksygentrykket i blodet
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta Analyses
PubMed	Database over publiserte medisinske artikler med over 32 millioner engelspråklige artikler
RSET	Required Safe Egress/Escape Time
SaO ₂	Metning av oksygen i blodet
Science direct	Nettsted som gir tilgang til en stor bibliografisk database over vitenskapelige og medisinske publikasjoner
Scopus	Akademisk database for sammendrag, referanser og henvisninger for artikler i forskningstidsskrifter.
SHK	Statens havarikommisjon
SHT	Statens havarikommisjon for transport (endret til SHK i 2019)
STAMP	System-Theoretic Accident Model and Processes
SVV	Statens Vegvesen
VD	Vegdirektoratet
VTS	Vegtrafikksentralen

Innholdsfortegnelse

Sammendrag	iii
Forord.....	iv
Forkortelser og begreper	v
Innholdsfortegnelse.....	vii
Figurliste	xi
1. Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn for valg av tema.....	2
1.1.1 Tunneler i Norge	3
1.2 Oppbygging av vegtunnel	4
1.3 Historikk: Brann i vegtunneler.....	5
2. Formål	7
2.1 Forskningsspørsmål	7
2.2 Faglig forankring	8
2.3 Avgrensing	9
2.4 Oppgavens oppbygning	9
3. Teori.....	11
3.1 Levesons systemteori - tre sentrale begrep	12
3.1.1 Hierarkisk struktur av sikkerhetskontrollen.....	13
3.1.2 Sikkerhetsbegrensninger	15
3.1.3 Prosessmodeller	15
3.2 Kontrollloop og ulike årsaker til uønskede hendelser.....	16
3.3 Kunnskap og informasjonsutveksling mellom aktører i systemet.	19
3.4 Systemteoriens bidrag inn mot oppgavens problemstilling.....	19
4. Metode - systematisk litteraturoversikt.....	22
4.1 Introduksjon til litteratursøk	22
4.2 Metode	22

4.3 Inklusjons- og eksklusjonskriterier og databaser	24
4.4 Enkel oversikt over søkeprosessen	27
4.5 Detaljert oversikt over søkeprosessen.....	28
4.6 Ekstrapolasjonsproblematikk	31
4.7 Innhenting av fagbøker og tiltakskort for monitorering av helseeffekter	32
5. Resultater	33
5.1 Forskningsspørsmål 1: Utvikling av toksiske gasser ved en vegtunnelbrann.....	33
5.1.1. Røykpartikler	34
5.1.2 Gasser som er overflateirritanter	34
Fosgen (COCl ₂).....	34
Saltsyre (HCl)	35
Svovelsyrling (H ₂ S ₀ ₃) og Svovelsyre /H ₂ SO ₄).....	35
Ammoniakk (NH ₃) og Formaldehyd/formalin (HCHO).....	35
5.1.3 Gasser med systemiske effekter	35
Karbonmonoksid (CO).....	35
Karbondioksid (CO ₂)	39
Cyanid (CN-)	39
5.1.4 Elbiler: Flussyre og Metalloksider.....	40
5.2 Forskningsspørsmål 2: Hvilke akutte helseeffekter kan oppstå etter eksponering for de ulike toksiske gassene som kan oppstå ved brann i tunnel?	41
5.2.1 Lunger	41
5.2.2 Sentralnervesystemet	44
5.2.3 Hjerne-kareffekter.....	46
5.2.4 Fosteret.....	47
5.2.5 Gasser med multiorgan effekter.....	47
Flussyre (HF)	47
5.2.6 Sammenstilling av funn	49

5.3 Forsknings spørsmål 3: Kroniske og latente helseeffekter etter eksponering for toksiske forhold ved brann i tunnel.....	52
5.3.1 Sentralnervesystemet (hjernen).....	52
5.3.2 Hjerne/kar systemet	53
5.3.3 Lunger	54
5.4 Forsknings spørsmål 4: Hvilken praksis er det i Norge for monitorering av ulike helseeffekter av personer eksponert for de ulike toksiske gassene, som kan oppstå ved brann i vegtunnel?.....	55
5.4.1 CO	57
Akutt prehospitalt nivå.....	57
Akutt hospitalt nivå.....	57
Kronisk nivå.....	59
5.4.2 Cyanid (CN).....	60
Akutt prehospitalt nivå.....	60
Akutt hospitalt nivå.....	60
Kronisk nivå.....	61
5.4.3 Sotpartikler.....	61
Akutt prehospitalt nivå.....	61
Akutt hospitalt nivå.....	61
Kronisk nivå.....	62
5.4.5 Monitoreringspraksis vurdert opp mot kunnskap	62
6. Diskusjon	64
6.1 Oppgavens aktualitet.....	64
6.2 Grunnleggende sikkerhetsprinsipp for tunnelforvaltningen og menneskers eksponering av branngasser.....	64
6.3 Tid, dimensjonerende hendelser og langtidseffekter	65
6.4 Apriori og aposteriori sårbarhets faktorer for eksponering av branngasser.....	67
6.5 Kategorier gasser som dannes i bilbrann	68

6.6 Sikkerhetsnivået: er det høyt nok?	68
6.7 Sensorer for ulike gasser i tunnel.....	71
6.8 Medisinsk kunnskap - på flere nivå i hierarkiet?	71
6.9 Standarder for vegtunneler og medisinsk kunnskap	74
6.10 Styrker og begrensninger til oppgaven	74
6.11 Videreutvikling av medisinsk kunnskap og forståelse av vegtunnelbranner.....	76
7. Konklusjon.....	77
8. Referanser	78
9. Appendiks	84
9.1 Appendiks A: Tiltaksbok Ambulanse Helse Stavanger HF.....	84
9.2 Appendiks B: Tiltaksbok Luftambulans – Brannskader	91
9.3 Appendiks C: Tiltakskort ved røyk- og inhalasjonsskade - Stavanger Universitetssjukehus	95
9.4 Appendiks D: Fagprosedyrer luftveier – Helse Bergen Haukeland Universitetssjukehus	97
9.5 Appendiks E: Metodebok i Brannskadebehandling – Haukeland Universitetssjukehus	103

Figurliste

Tabeller:

Tabell 1.1. Oversikt over branner i kjøretøy i 2020 i Norge.....	1
Tabell 1.2. Branner i norske vegtunneler med tilhørende statistikk over eksponerte og skadde av brannrøyken.....	5
Tabell 4.1. Detaljert oversikt over litteratursøket i alle søkemotorer som ble brukt relatert til forskningsspørsmålene.....	28
Tabell 5.1. Forbrenningsstoffer fra lithium-ion batterier.....	40
Tabell 5.2. De viktigste akutte helseeffekter på hjernen ved økende konsentrasjoner av COHb	44
Tabell 5.3. Sammenheng mellom konsentrasjon av flussyre og tid før symptomer utvikles. .	48
Tabell 5.4. Matrise over helseeffekter ved eksponering av ulike branngasser.	50

Figurer:

Figur 1.1. Oversikt over lange vegtunneler i Stavanger og omegn.	3
Figur 1.2. A Skisse over oppbygging av en standard tunnel.	4
Figur 2.1. Oversikt over designet av studien med de ulike kapitler og deres innhold.....	10
Figur 3.1. Oversikt over Levesons STAMP modell og de tre sentrale elementene.....	12
Figur 3.2. Eksempel på en modell av hierarkisk sosioteknisk kontroll.	14
Figur 3.3. Eksempel på en enkel kontrolloop.	16
Figur 3.4. Oversikt over mulige feil ved sensor funksjoner.	17
Figur 3.5. Noen utfordringer til kontrollfunksjonen av et system.	18
Figur 4.1. Trinnene i en systematisk review prosess.	23
Figur 4.2 viser et PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analyses) flowdiagram over screening prosessen.	27
Figur 5.1. Oksygen og karbonmonoksid sin binding til hemoglobin.	36
Figur 5.2. Modeller av røykspredning og varme og CO-konsentrasjon langs en vegtunnel. ..	37
Figur 5.3. % COHb ved ulik eksponering av CO og aktivitet.	39
Figur 5.4. Oversikt av akutte patofysiologiske mekanismer ved inhalasjon av brannrøyk.	42
Figur 5.5. Oversikt over karbondioksid-bufferligningen.	45
Figur 5.6. Forenklet oversikt over monitoreringspraksis for de viktigste branngassene.	56
Figur 5.7. Oversikt over de ulike nivå av oksygenbehandling ved CO forgiftning.	59

Figur. 6.1. Hierarkisk struktur av systemet “tunnel” med to nivå og kilder for justering av
prosessmodellene og sikkerhetsstyringen. 72

1. Introduksjon

Alle har opplevd kontrollerte branner, som i en grill, peis eller et sankthansbål. Det er ubehagelig å sitte i røyken av disse små brannkildene. Man flytter seg med en gang ut av røykosen. Etterpå kan man lenge kjenne røyklukt i klærne helt til man vasker dem et par ganger. Større og ukontrollerte branner er av skadelig natur og oppstår stort sett tre steder: 1. Bygningsmasse, 2. Vegetasjon og 3. Kjøretøy. Bilbranner vil kunne forekomme på åpen veg, parkeringshus eller i tunnel (Tabell 1.1). Jeg vil i denne oppgaven se nærmere på bilbrann i vegtunneler. Fokus vil være på dannelse av giftige gasser og hvilke akutte og kroniske helseeffekter som følge av slik gasseksponering. Til slutt vil jeg oppsummere hvordan man i dag kan monitorere personer som er blitt utsatt for branngasser i vegtunneler.

Hvert eneste år opplever mange nordmenn at bilen begynner å brenne. Forsikringsbransjen viser at antallet bilbranner i Norge har økt jevnt og trutt de siste årene. Fra 2016 til 2019 meldte direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap om 3 260 bilbranner i Norge (Direktoratet for Samfunnssikkerhet og beredskap, 2020). Disse utgjorde skader for 266 millioner kroner (Christensen, 2020). Spesielt mange bilbranner var registret i 2020, som delvis skyldes brannen i parkeringshuset på Sola i januar 2020. Trenden er uansett foruroligende.

Tabell 1.1. Oversikt over branner i kjøretøy i 2020 i Norge. (Direktoratet for Samfunnssikkerhet og beredskap, 2022).

Type kjøretøy	Antall
Lastebil	133
Bobil	31
Personbil	764
Buss	31
Motorredskap	120
Annet kjøretøy	124

Det har vært en jevn økning av elbiler/hybridbiler de siste årene. Statistisk sentralbyrå sine tall over bilparken etter type drivstoff i 2020 var det 1,26 millioner dieselmotorer, 950 000 bensinmotorer og 500 000 elbiler (Statistisk sentralbyrå, 2020). I 2021 har tallene endret seg til hhv. 1,22

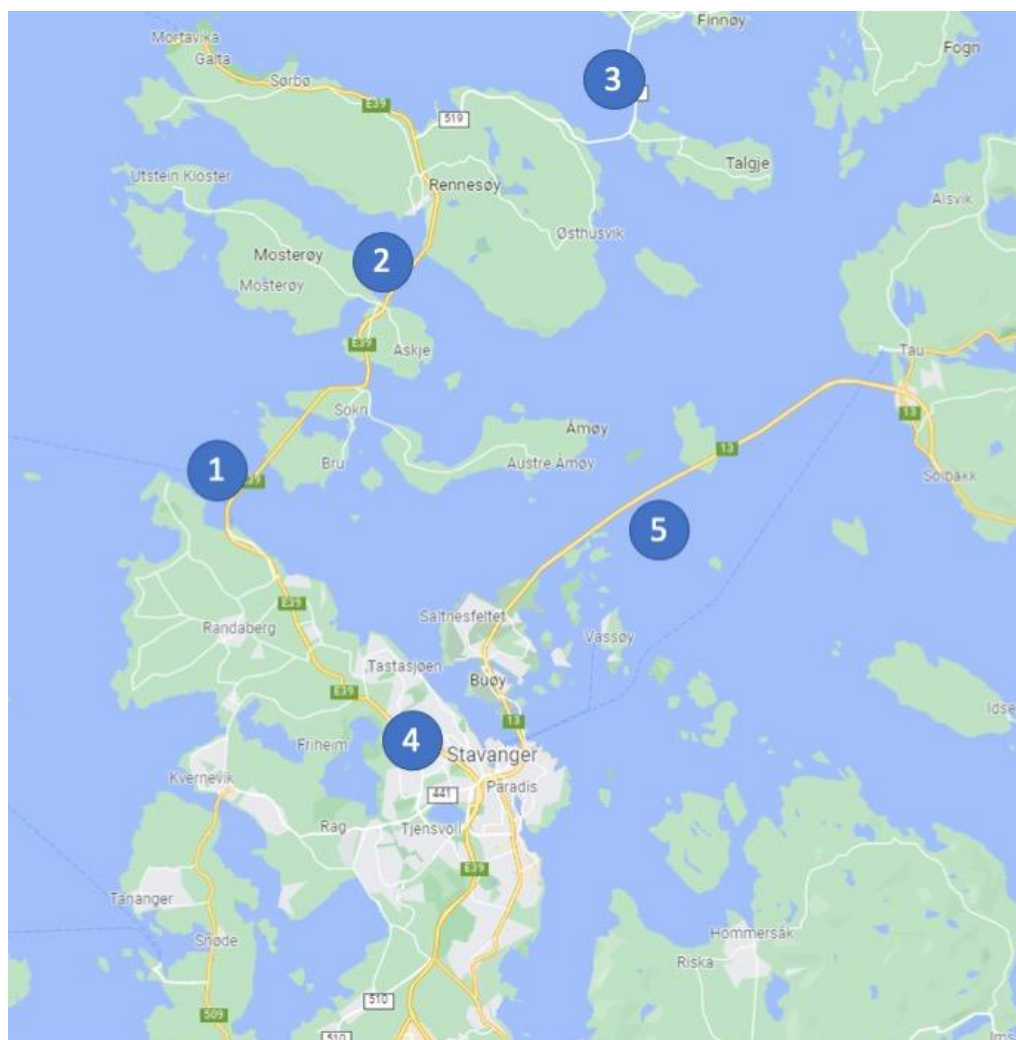
millioner dieslbiler, 900 000 bensinbiler og 645 000 elbiler eller ladbare hybridbiler (Statistisk sentralbyrå, 2022). Det viser at antall elbiler har steget relativt raskt og at totalt antall biler har steget med 50 000. I Norge har det de siste årene vært flere branner i kjøretøy i vegtunneler. Men ingen har omkommet grunnet inhalasjon av toksiske branngasser på det akutte stadiet i tunnelen eller i sykebil/på sykehus etterpå. Imidlertid har man begrenset kunnskap om evt. langvarige helseskader av branngass-eksponeringen (Østrem & Njå, 2019).

1.1 Bakgrunn for valg av tema

Planlegging, konstruksjon og bygging av tunneler har til alle tider vært ingeniørens gebet. Siden bilbrann forekommer relativt ofte, kan den forekomme i vegtunneler. Kombinasjon av brann og tunnel er et skrekksenario. Her kan mennesker bli fanget i røykpropper, bli forgiftet av gasser og bli fatalt deprivert for oksygen med døden til følge. Derfor er kunnskap om helseeffekter etter røykeeksponering svært viktig for å kunne gi innspill til de ansvarlige for tunnelbyggingen. Dette for å informere sikkerhetsstyringen for den menneskelige sårbarhet og hvordan man best kan møte disse utfordringene til sikkerheten i tunneler. Målet med denne oppgaven er å sette søkelys på konsekvensene av når mennesker blir eksponert for brannrøyk. Her i denne oppgaven vil jeg vektlegge brannrøykeeksponering i vegtunnel. Spesielt vil fokuset være på den medisinske kunnskapens rolle i sikkerhetskontrollhierarkiet, og hvor i hierarkiet den kan innlemmes. Dessuten vil jeg se på denne kunnskapen på individnivå (mikronivå) og sette det inn i en større sammenheng.

1.1.1 Tunneler i Norge

I Norge er det 1100 tunneler, hvorav 33 er undersjøiske. I Stavanger og omegn har vi 4 undersjøiske tunneller og en underjordisk tunnel som er relativt lange: to i Rennfast (Byfjord og Mastrafjordtunnelen), Finnfast og Ryfast tunnelen. I tillegg har vi Byhaugtunnelen som går fra motorveien til Tasta (Figur 1.1).



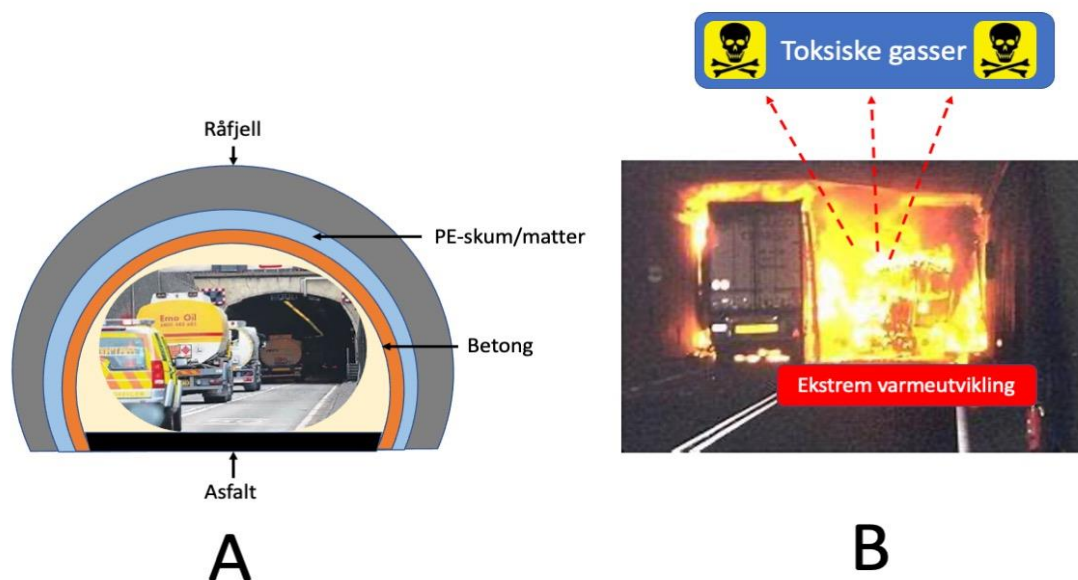
Figur 1.1. Oversikt over lange vegtunneler i Stavanger og omegn. 1. Byfjordtunnelen, 2. Mastrafjordtunnelen, 3. Finnfasttunnelen, 4) Byhaugtunnelen og 5) Ryfasttunnelen.

Grunnen til at det ikke har skjedd dødsfall etter brann i tunnel i Norge kan være flere. Det ene er at det kan ha vært at branner ikke har spredd seg til flere kjøretøy og dermed begrenset utvikling av varme og røykgasser. Derimot har ofte lange tunneler stor stigning, så risikoen for dødsfall er fullt ut til stede. Det har heller ikke vært en bevisst sikkerhetsstyring av tunneler,

når det gjelder helseeffekter av toksikologiske gasser. Norske tunneler bygges stadig ut og blir lengre (jf. Ryfast). Det kan da stilles spørsmål ved om det bare er et tidsspørsmål før det oppstår branner med dødsfall grunnet eksponering for toksiske gasser. Med flere biler på vegene vil man fort kunne tenke seg at det blir flere biler involvert i tunnelbranner. Det er derfor viktig å strebe etter stadig sikrere tunneler og at man tilpasser sikkerhetsarbeidet til nye utforminger av tunneler og kontekster som endres.

1.2 Oppbygging av vegtunnel

Vegtunneler i Norge har prinsipielt samme oppbygging, men det forekommer noen ulikheter i utformingen. Figur 1.2 A viser et tverrsnitt av en tunnel. Mellom råfjellet og betonglaget ligger Polyetylen-skum (PE-skum) eller matter som skal beskytte mot vann, frost og løsning av stein i tunnelen (Figur 1.2). Betonglaget skal bla. hindre brann å nå PE-skummet og tåler opp mot 1200 -1300 °C (Tunmo, 2007). Ved brann i kjøretøy utvikles en enorm varme som kan ødelegge betonglaget (Figur 1.2 B). Da tar PE-skummet/mattene fyr og det utvikles cyanidgasser.



Figur 1.2. A Skisse over oppbygging av en standard tunnel. PE- skum er polyetylen skum som tetter for vannlekkasje. B. Varmeutvikling og frigjøring av gasser ved brann i kjøretøy.

Dersom det oppstår brann eller brannen sprer seg til hele kjøretøyet eller last av ulik komposisjon, vil det også kunne oppstå flere ulike toksiske gasser.

1.3 Historikk: Brann i vegtunneler

Vegtunnelbranner er kjent verden over. Et par av de mest kjente utenlandske brannene er ved Mont Blanc tunnelen i 1999 hvor 39 personer døde og St. Gotthard i 2001 hvor 11 døde og 8 var skadet av røyk (Bettelini et al., 2003; Fielding, 2003). Disse har bidratt til forståelsen av brann i vegtunnel. Senere har det vært mange branner i tunneler verden over. Statistisk sett er det i Norge mindre branner i vegtunneler enn ellers på veien (Nævestad & Meyer, 2014; Nævestad et al., 2016). Derimot kan konsekvensene av en brann i vegtunnel være mer kritiske enn ellers på veien (Bjørnsen & Njå, 2019). Faktorer som påvirker dette er det lukkede miljøet som øker konsentrasjon av branngasser, tillater varmeutviklingen å bli høyere og vanskeliggjør rømning. En kompliserende faktor er dersom det befinner seg mange kjøretøy i tunnelen samtidig. Under vises en oversikt over noen tunnelbranner i Norge de siste årene som har blitt gransket eller er omtalt i granskingsrapporter og noen som er nevnt i avisartikler (Tabell 1.2).

Tabell 1.2. Branner i norske vegtunneler med tilhørende statistikk over eksponerte og skadde av brannrøyken.

* Sjøføren døde av skader i kollisjon med tunnelveggen.

År	Lokalisasjon	Kjøretøy	Eksponerte for røyk	Røyk skadet	Døde	Referanse
2000	Seljestadtunnelen	6 kjøretøy	9	4	0	(Statens havarikommisjon for transport (SHT), 2013)
2006	Seljestadtunnelen	Buss	0	0	0	(SHT, 2013)
2011	Oslofjordtunnelen	Vogntog/se mitrailer	34	32	0	(SHT, 2013)
2012	Eidsvolltunnelen	Bil	0	0	1*	(Verdens Gang, 2012)
2012	Mastrafjordtunnelen	Semitrailer	minst 3	3	0	(SHT, 2013, s. 44)
2013	Gudvang tunnelen	Vogntog/se mitilhenger	67	28	0	(SHT, 2015)
2013	Brattlitunnelen	Vogntog	1	1	0	(SHT, 2013)
2015	Gudvangtunnelen	Buss	5	4	0	(SHT, 2016a)

2015	Skatestraumtunnelen	Vogntog slepevogn	17	5	0	(SHT, 2016b)
2016	Måbøtunnelen	Vogntog semitilhenger	-	0	0	(SHT, 2017)
2017	Fjærlandstunnelen	Lastebil	13	13	0	(SHT, 2019)
2017	Oslofjordtunnelen	Vogntog/semitilhenger	3	0	0	(SHT, 2018)
2018	Nakkagjeldstunnelen	Buss/Vogntog	17	5	1*	(Terjesen, 2017)
2019	Gudvang tunnelen	Vogntog	33	4	0	(Statens havarikommisjon, 2020)

Dette gir en relativt utfyllende oversikt over brann i norske tunneler de siste årene. Det er viktig å påpeke at i Oslofjordtunnelen har det vært hele 16 branner og branntilløp fra 2000 til 2011 (SHK 2013/05). Det har bare blitt utarbeidet to rapporter av disse tilfellene. Dette viser et mye større hendelsesantall og risikobilde enn det som rapportoversikten til SHK gir inntrykk av i tabell 1.2.

2. Formål

Formålet med studien er å få en oversikt over den kunnskap som finnes i eksisterende norsk og internasjonal litteratur som gjelder potensielle toksiske gasser som kan oppstå ved bilbrann i tunneler og hvilke mulige helseeffekter de kan skape. I denne oppgaven vil jeg gjøre et systematisk søk i fagfelle-vurderte artikler, som lar seg finne ved søk i relevante databaser og vha. 'snowballing'. Hensikten er å få en oppdatert oversikt over den kunnskapen vi har i dag vedr. dannelse av toksiske gasser i bilbranner og dets akutte og kroniske helsemessige virkninger på kroppen. Til slutt vil jeg se på kunnskapsgrunlaget til helsevesenet og helsevesenets evne til å monitorere disse pasientene i akutfasen og i langtidsovervåkning. Jeg vil se på hvordan monitorering av helseeffekter av brann i tunnel kan bidra til et felles grunnlag for det medisinske og tekniske feltet hvor de kan utveksle kunnskap. Videre vil jeg diskutere helsevesenets og den medisinske kunnskapens stemme inn mot risikostyringen hos de organisasjoner som har ansvar for tunnelsikkerhet i Norge.

2.1 Forskningsspørsmål

Forskingsspørsmålene i oppgaven hviler på om det i dagens eksisterende litteratur finnes ny kunnskap om eksponering av branngasser, som både kan gi akutte- og kroniske helseeffekter. Videre stilles det spørsmål om funnene kan brukes i vegttunnelbranner for å unngå uønskede hendelser og redusere konsekvensene av dem. Jeg vil søke etter mer tverrfaglig informasjon om disse farene som man står overfor. Dermed muliggjøres utarbeidelse av bedre sikkerhetsbegrensninger og funksjonskrav til tunnelsikkerheten, inklusive bedre helseberedskap. Målet er ikke å gi en uttømmende liste over forslag til funksjonskrav som burde iverksettes. Fokuset er å legge frem en systemteoretisk tenkemåte, som kan bidra til et mer systematisk blikk på tunnelsikkerheten der medisinsk kunnskap blir inkludert. Fremstillingen vil også gi noen eksempler på funksjonskrav, som kan stilles ut fra denne tilnærmingen.

Det leder til følgende forskningsspørsmål:

Forskingsspørsmål 1: Hva er eksisterende kunnskap om toksiske gasser som kan oppstå ved brann i vegttunnel?

- Jeg vil se på eksisterende litteratur som omhandler toksikologiske momenter ved brann i vegtunnel. Jeg vil også screene litteratur på branner utenfor tunnel for å se om det er momenter her som kan gjøre seg gjeldende også ved vegtunnelbrann.

Forskningsspørsmål 2: Hvilke akutte helseeffekter kan oppstå etter eksponering for de ulike toksiske gassene, som kan oppstå ved brann i vegtunnel?

- Her er de akutte farene ved eksponering av røykgasser i fokus. De toksiske effektene på de ulike organsystemene blir omtalt.

Forskningsspørsmål 3: Hvilke kroniske helseeffekter kan oppstå etter eksponering for de ulike toksiske gassene, som kan oppstå ved brann i vegtunnel?

- Jeg vil se på den kunnskap som finnes om kroniske helseskader etter branneksponering generelt (helst i innelukkede områder) og i vegtunnel spesielt, og se på overføringsverdien mellom disse to type branner.

Forskningsspørsmål 4: Hvilken praksis er det i Norge for monitorering av ulike helseeffekter av personer eksponert for de ulike toksiske gassene, som kan oppstå ved brann i vegtunnel?

- Her vil jeg se på fagbøker og tiltakskort hos sykehus og ambulanse for å se hvilke gasser som blir omtalt og hvordan praksis er beskrevet. Dette forskningsspørsmålet vil da ikke inngå i den samme litteratursøkeprosessen som for øvrige forskningsspørsmål.

Forskningsspørsmålene dreier seg om dannelse av toksiske branngasser og er i hovedsak kjemiske og medisinske av natur. Videre i oppgaven vil syntetiseringen av kunnskapen fra dette litteratursøket inkorporeres i en enda mer tverrfaglig sammenheng – teknisk og sikkerhetsfaglig.

2.2 Faglig forankring

Denne oppgaven er forankret i forskningsgruppen Kapasitetløft Tunellsikkerhet (KATS) ved Universitetet i Stavanger. KATS er ledet av Henrik Bjelland som er ettergjenger av Prof. Ove Njå. Både Prof. Ove Njå og Prof. Geir Sverre Braut har oppgaver i KATS og er derfor godt egnet som veiledere for denne oppgaven. Hovedmålet til forskningsgruppen er å bygge forskningsbasert kompetanse som gjør involverte aktører i stand til å levere verdiskapende

løsninger for tunnelsikkerhet. Det innebærer å utfordre funksjonskrav i en risikobasert styring, samt beskrive ulike måter å uttrykke effektivitet av tiltak og løsninger. Oppgaven er også forankret ved Stavanger Universitetssjukehus ved seniorforsker og prof. Geir Sverre Braut, som er ekspert på samfunnssikkerhet med helseeffekter på individnivå samt virkninger på et systemisk nivå.

2.3 Avgrensning

Denne oppgaven begrenses til et avgrenset strukturert litteratursøk i norsk, engelsk og tysk litteratur. Man har ikke noe begrensning i tid. Avgrenser til å gjelde gasser ved brann, ikke luftforurensninger, røykere etc. Røykeeksponering hos brannmannskap over tid er heller ikke tatt med. Jeg vil bare sette søkelys på toksiske stoffene som oppstår i gassform, men ikke mulige farlige stoffer i væskeform. Ved brann i tunnel kan det også forekomme skader på den materielle strukturen. Dette er også en viktig del av sikkerhetsbildet. Derimot går dette ikke inn på i stor grad. Eneste som blir nevnt er skader på det ytterste betonglaget, slik at brannen kan nå PE-skummet og resultere i dannelsen av cyanid (se fig. 1.2).

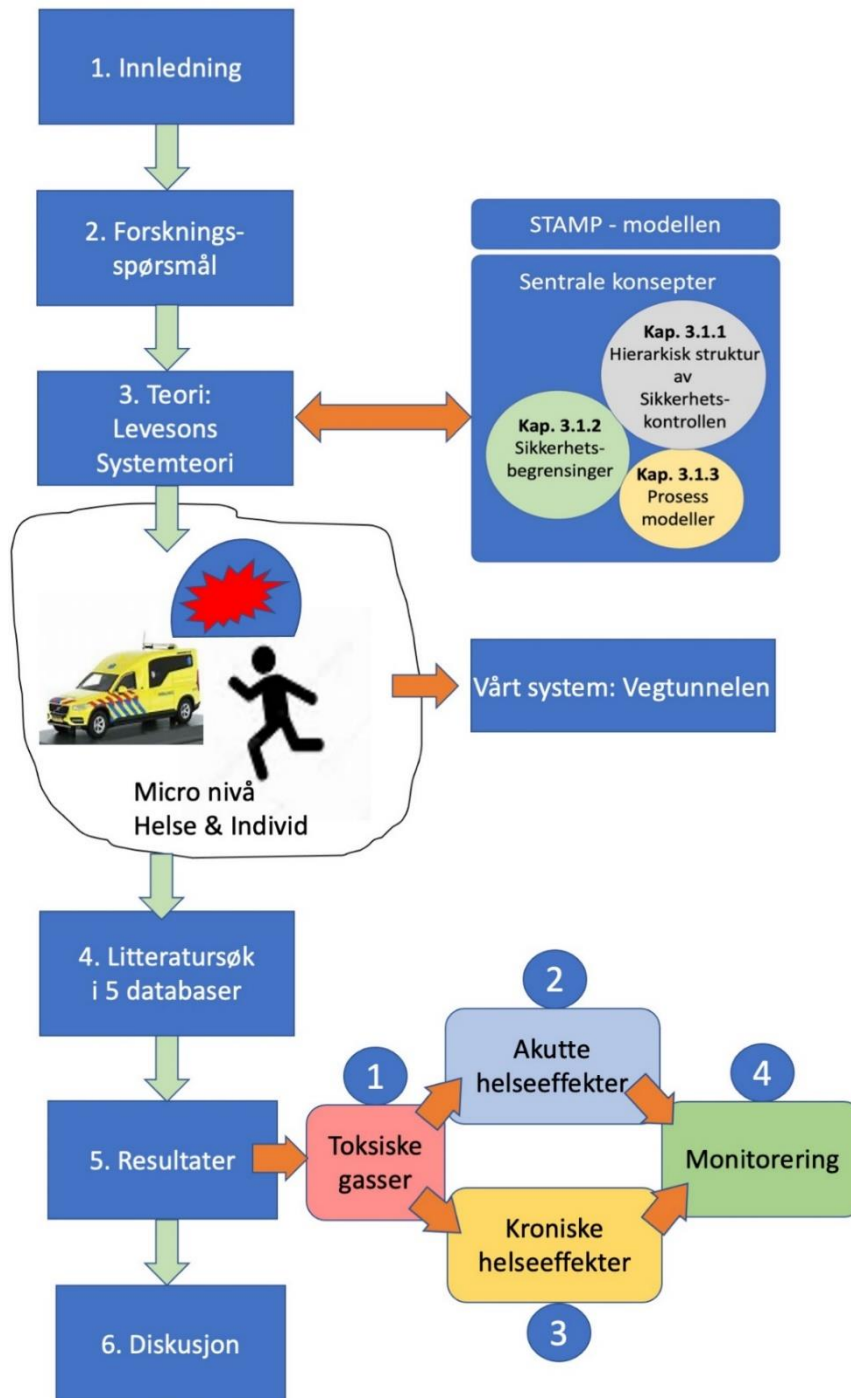
Det settes søkelys på brann i vegtunnel og spesifikt eksponering for gass og røyk sin kort- og langtidsvirkning på trafikanters akutte og kroniske helse. Dødsfall som utelukkende er forårsaket av varmeeksponering av brann er ikke tatt med i denne oppgaven. Det eneste er diverse additive effekter varmepåvirkning kan ha i forbindelse med eksponering for branngasser. Jeg er kjent med at det er psykiske traumer som følge av å være i en tunnel hvor det har oppstått brann (Palgi et al., 2020). Dette ligger ikke sentralt i denne oppgaven og er derfor bare nevnt kort i resultatene.

2.4 Oppgavens oppbygning

Oppgaven starter med en innledning i kapittel 1 og definering av forskningsspørsmålene i kapittel 2. Teorien som oppgaven hviler på er Nancy Levesons systemteori og er redegjort for i kapittel 3. Man forsøker å harmonisere teorien med forskningsspørsmålene og spisse den inn mot temaet i oppgaven. Videre er litteratursøket beskrevet i kapittel 4, der søket er i tråd med forskningsspørsmålene. Resultatene fra søket er presentert inklusive akutte og kroniske helseeffekter i kapittel 5. Helsevesenets rutiner for monitorering og oksygenbehandling av røykeeksponerte personer i akuttfasen angis i kapittel 6, før diskusjonen i kapittel 7 (Figur 2.1).

Det er viktig å påpeke at det er litteraturen fra søket som «snakker» i fremleggelsen av funnene i resultatdelen og i den påfølgende diskusjon.

Designet av denne studien



Figur 2.1. Oversikt over designet av studien med de ulike kapitler og deres innhold. Tallene ved siden av resultatene representerer de fire forskningsspørsmålene i kapittel 2.1.

Harald Sjøiland – 2022.

3. Teori

Jeg har i denne oppgaven valgt å bruke Nancy Levesons systemteoretiske tilnærming som en ramme for å forstå problemstillingen min. Denne tilnærming til ulykker gir en helt ny anskuelses -plattform for å forstå hvordan ulykker oppstår og hvordan man kan forhindre dem. Hennes tilnærming er via STAMP (System-Theoretic Accident Model and Processes) modellen (Leveson, 2011). STAMP anerkjenner faktorer som menneskelig feilbarhet og komponentsvikt. I tillegg inkluderes faktorer som organisatorisk hierarki, arbeidspraksis, roller og ansvarsforhold i alle ledd i organisasjonen (Altabbakh et al., 2014, s. 118).

En forutsetning for å anvende Leveson er at systemet en betrakter er karakterisert av kompleksitet. I forvaltningen og reguleringen av tunnelsikkerhet er det mange aktører som inngår i dette arbeidet. Veitrafikksentralen (VTS), Statens vegvesen (SVV), vegdirektoratet (VD), brannvesen, ambulanse og politi er noen av de mest sentrale aktørene, men det er flere som inngår i det helhetlige systemet. Jeg mener derfor at systemet tunnel er komplekse og at systemteori derfor er anvendelig i denne oppgaven.

Målet til Leveson er å skape en felles plattform i ulykkesgransking og dermed sikkerhetsstyring. Hun angir flere perspektiver hvorfor systemtenkning er nødvendig i ulykkesforståelse og -gransking. Blant annet er det en del grenseoppganger inn mot eksisterende teorier som utfordrer denne modellen. Den ene er at teknologien endrer seg fort. Leveson erkjenner at læring av tidligere ulykker fremdeles er aktuell kunnskap slik at type I safety tilnærming (Hollnagel, 2014) også er inkludert i denne modellen. Imidlertid er mange artikler og rapporter av eldre dato, og egner seg ikke så godt som grunnlag for systemteoretisk tilnærming. Teknologien endrer seg fortere enn det våre ingeniører og andre aktører kan respondere fornuftig på. Derfor vil ny teknologi initiere ukjente felt i systemet og danne nye veier til tap av mennesker og materiell.

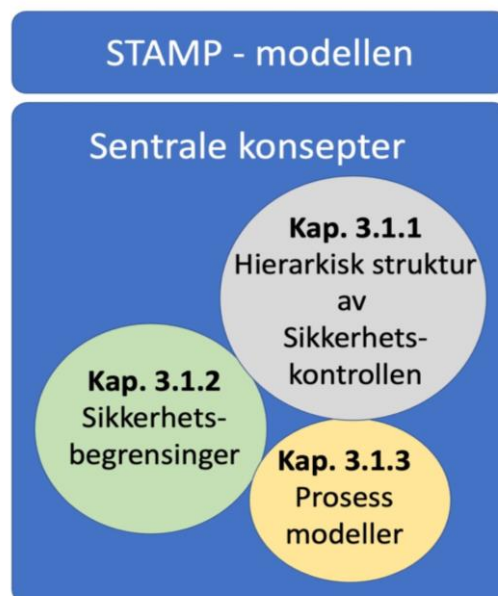
Videre tar Levesons systemteori opp utfordringen med redusert læring fra tidligere erfaringer. I gamle dager var tiden fra basal kunnskap til et kommersielt produkt opptil 30 år. I dag går prosessen mye fortere med bare to-tre år fra idé til produkt. Etter fem år fases ofte oppdagelsene ut. Det fører til at vi ikke lenger har kontroll med å teste tekniske systemer under utvikling. Heller ikke hvordan aktører håndterer risiko med nye oppdagelser før kommersiell og/eller vitenskapelig bruk av nye oppfinnelser. Her vil f.eks. den eksplosive økningen av el-biler på norske veier og da særlig i tunneler være et eksempel på dette. Kunnskap og informasjon om

hvordan risikobildet endret seg har tatt/tar mye lengre tid enn det har gjort for en markant økning av andel el-biler. Det medfører at ny teknologi går for fort til at sikkerhetsforvaltere av systemet klarer å holde systemet i sikker tilstand.

Levesons systemteori gjør seg nytte av gode generiske modeller, som kan overføres til det systemet en står ovenfor – være seg makro- eller mikro-nivå (Bjelland et al., 2021). I min oppgave vil Leveson gi et godt fundament for å forstå hvor det medisinske elementet kan få innpass i strukturen av sikkerhetskontrollen. I tillegg kan den brukes som et styringsverktøy for utarbeidelse av sikkerhetsrestriksjoner, som igjen kan være veiledende for utarbeidelse av funksjonskrav og spesifikke krav på det lokale nivå.

3.1 Levesons systemteori - tre sentrale begrep

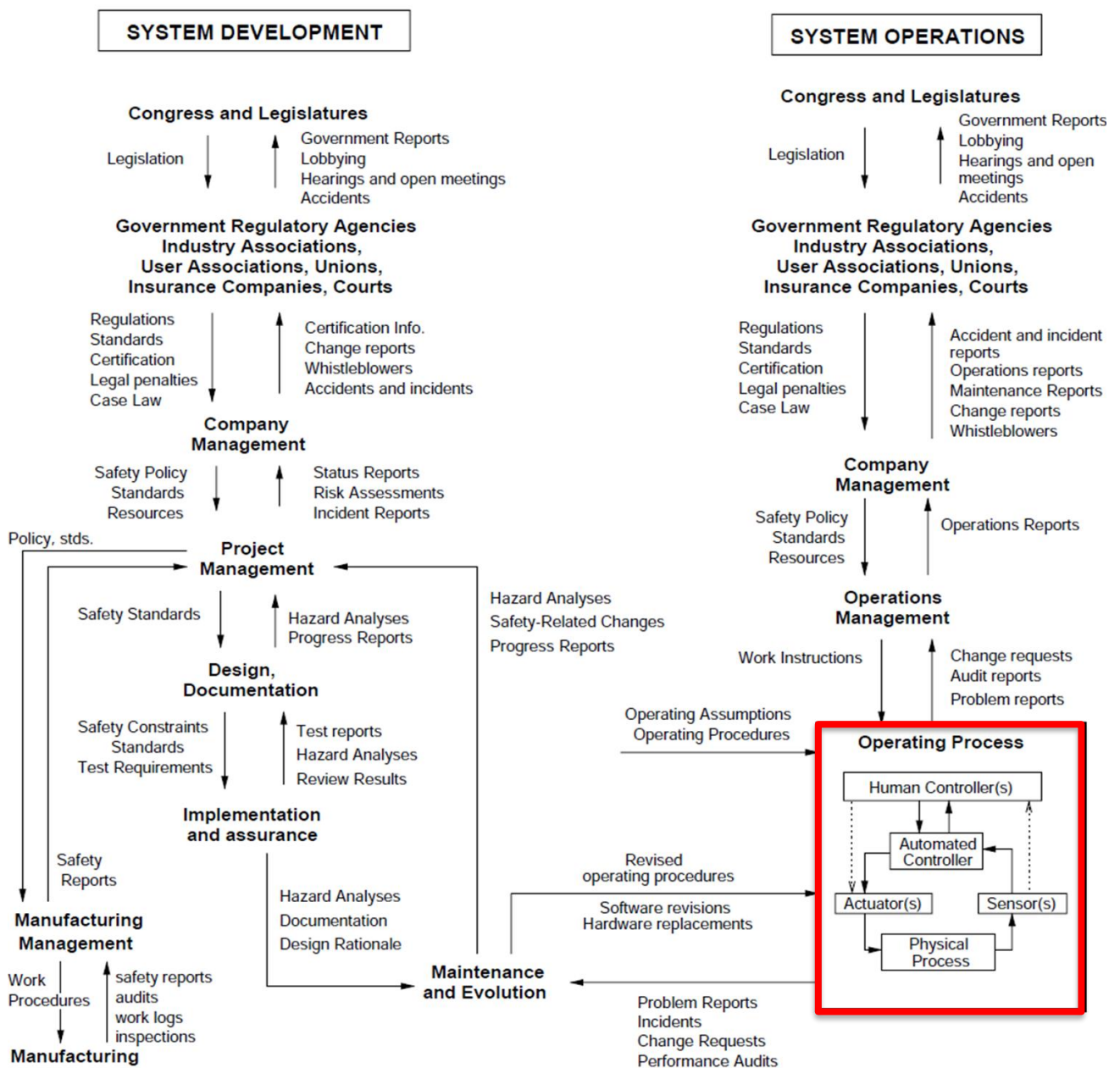
STAMP-modellen omfatter tre hovedelementer. Det ene er en hierarkisk struktur av sikkerhetskontrollen. Den andre er implementering av sikkerhetsbegrensninger, og den tredje er å legge prosessmodeller til grunn når kontrollhandlinger skal identifiseres (Figur 3.1). Disse gjennomgås mer i detalj under.



Figur 3.1. Oversikt over Levesons STAMP modell og de tre sentrale elementene; Hierarkisk struktur av sikkerhetskontrollen (behandlet i kap. 3.1.1), Sikkerhetsbegrensninger (kap. 3.1.2) og Prosessmodeller (kap. 3.1.3).

3.1.1 Hierarkisk struktur av sikkerhetskontrollen

For å bruke STAMP modellen i praksis er det noen viktige punkter som trenger å bli oppfylt. I STAMP blir systemer sett på som sammenhengende komponenter holdt i en tilstand av dynamisk likevekt ved tilbakemeldings kontroll sløyfer. Dynamisk likevekt peker på at sikkerhetsnivået holdes på et tilstrekkelig nivå i et miljø/kontekst som er i stadig endring. Tilbakemeldings kontrollsløyfer peker på de ulike kontrollsløyfene i hvert ledd i hierarkiet og kommunikasjonene mellom hvert ledd. Det er to hoved kommunikasjonskanaler. En som gir informasjon nedover i hierarkiet og har en kontrollfunksjon (Figur 3.2). Den andre gir tilbakemelding oppover i hierarkiet og har en målefunksjon. Leveson sin hierarkiske struktur av sikkerhetskontrollen omfatter to hoved sløyfer: Systemutvikling og systemstyring (Figur 3.2). Sikkerheten i et system vil være avhengig av begge disse sløyfene. Som en ser av figuren under er dette en iterativ prosess hvor en går frem og tilbake mellom utvikling og styringssløyfen. Figuren under er dessuten kun et eksempel og er simplifisert med koblinger og kommunikasjonskanaler. Det kan fort være seg at det finnes flere kommunikasjonskanaler mellom de to hovedsløyfene.



Figur 3.2. Eksempel på en modell av hierarkisk sosioteknisk kontroll. Her vises to hierarkiske kontrollstrukturer. En for utvikling av systemet og en for drift av systemet. Begge er avhengige av hverandre for å kunne ha et sikkert system. For enkelhetsskyld vises kun noen få interaksjoner mellom de to systemene. Kommunikasjonskanalene mellom de ulike nivåene vises med pilene opp og ned. I den røde rammen er det zoomet inn på en enkel kontrollloop lenger nede i hierarkiet. Se kap. 3.2 for mer utfyllende om kontrolllooper. (Leveson, 2011, s. 82).

3.1.2 Sikkerhetsbegrensninger

STAMP-modellen legger til grunn for at ulykker kan betraktes som et resultat av utilstrekkelig kontroll over sikkerhetsbegrensninger. Ethvert system har elementer av en hierarkisk modell i seg. I slike modeller vil leddet over kontrollere leddet under. Sikkerhetsbegrensninger er verktøyet kontrollørene i systemet bruker for å definere “handlingsrommet” til nivå under seg. Implementeringen og håndhevingen av sikkerhetsbegrensninger vil fokusere på å styre eller kontrollere dette handlingsrommet i en retning hvor det unngår usikre hendelser eller tilstander. For å overholde systemets sikkerhetsbegrensninger må det implementeres under-krav eller begrensninger nedover i kontrollhierarkiet.

3.1.3 Prosessmodeller

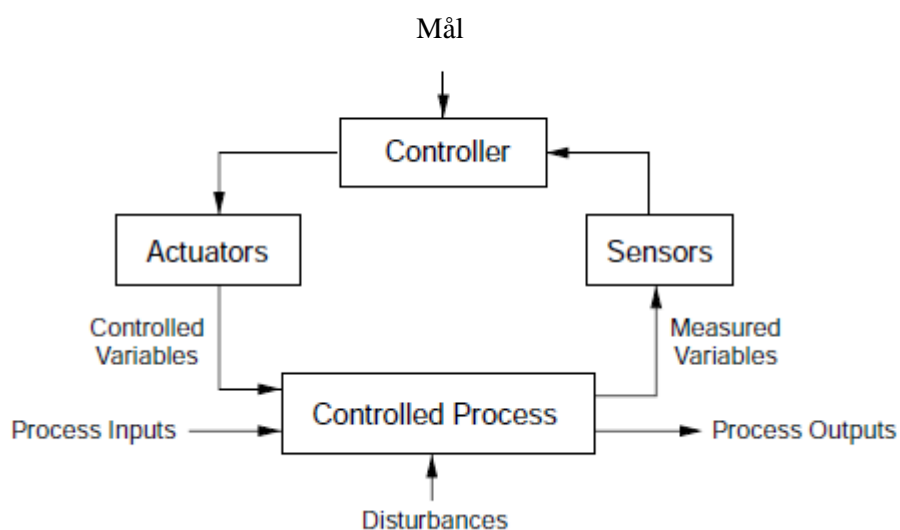
For å kontrollere en prosess finnes fire nødvendige betingelser. Den første er mål som i STAMP er sikkerhetsbegrensningene som må bli håndhevet av hver kontrollør i den hierarkiske sikkerhetskontrollstrukturen. Den andre er handlingsbetingelsen som er implementert i (nedover) kontrollkanalene. Den tredje er observerbarhetsbetingelsen som er inkorporert i (oppover) tilbakemeldings- eller målingskanalene. Den fjerde er modellbetingelsen som tilsier at enhver kontrollør – menneskelig eller automatisert – trenger en modell av prosessen som blir kontrollert for å oppnå effektiv kontroll. Denne sistnevnte prosessmodellen må inneholde informasjon om de nødvendige forholdene blant systemvariablene (kontrollovene), den nåværende tilstanden (nåværende verdiene av systemvariablene) og måtene prosessen kan endre tilstander. Denne modellen brukes til å fastslå hvilke kontrollhandlinger som trengs og den oppdateres gjennom ulike former for tilbakemelding.

Målet til prosessmodeller er at de skal stemme overens med virkeligheten og med andre kontrollørers prosessmodeller. Dersom dette ikke er tilfellet kan det oppstå fire utilstrekkelige kontrollhandlinger, som igjen kan føre til feil eller ulykker. Disse fire er: (1.) Usikre kontrollkommandoer blir gitt, (2.) Kontrollhandlinger nødvendige for sikkerhet blir ikke gitt, (3.) Mulig riktige kontrollkommandoer blir gitt til feil tid eller (4.) kontroll stoppes for tidlig eller opprettholdes for lenge.

3.2 Kontrollloop og ulike årsaker til uønskede hendelser

Sikkerhetskollstrukturer kan være veldig komplekse og det kan derfor være gunstig å konsentrere seg om et sub-system eller deler av systemet for å forstå, kommunisere og å undersøke ulike farer. Når en undersøker ulike farer er det ofte at bare deler av systemet er relevante og trengs å gå i dybden på, resten av systemet sees da på som input til eller del av miljøet rundt sub-systemet. Den eneste kritiske delen er at farene må først bli identifisert på systemnivå og prosessen må foregå «top-down» når en skal identifisere sikkerhetsbegrensningene til delene av den overordnede kontrollstrukturen.

En avgrensning kan være en eller flere kontrollprosess(er) eller kontrollloop(er). Dette kan være gunstig da STAMP-modellen bruker disse som utgangspunkt for å finne utfordringer i systemet. Figuren under viser et eksempel på en enkel kontrollloop (figur 3.3).



Figur 3.3. Eksempel på en enkel kontrollloop. Kontrolleren i loopen er avhengig av at sensorer måler det de skal måle riktig og til rett tid. Det gir dem informasjon om den nåværende tilstanden til prosessen som skal kontrolleres. Ut fra denne informasjonen og ut fra målet til kontrolleren, besluttet det hvilke begrensninger som skal settes inn for å styre atferden til den kontrollerte prosessen. Aktuatoren er verktøyet kontrolleren har for å påvirke den kontrollerte prosessen. Den kontrollerte prosessen får input og gir output knyttet til resten av systemet. Forstyrrelser i denne prosessen kan forekomme og gi uønskelige utfall. (Leveson, 2011, s. 66).

Her er det listet opp mulige utfordringer som kan oppstå i de ulike komponentene i en kontrollloop:

a) Den kontrollerte prosessen

Her må man identifisere de prosessene som er vesentlige å kontrollere. Det kan være flere ledd og mellom hvert ledd kreves nøyaktig og oppdatert informasjon. Ifølge Leveson sin systemtenkning er det flere faktorer som kan påvirke sikkerhet til en gitt prosess.

Det ene er samtidighetskonflikt mellom kontrollaktiviteter. Videre er manglende eller feil prosess input viktig å identifisere. Dessuten vil komponentsvikt og endringer over tid være avgjørende for å kunne ha kontroll over systemet. Det er også viktig å reflektere over prosessresultater som bidrar til systemfarer innenfor de definerte rammebetingelsene.

b) Sensor funksjoner

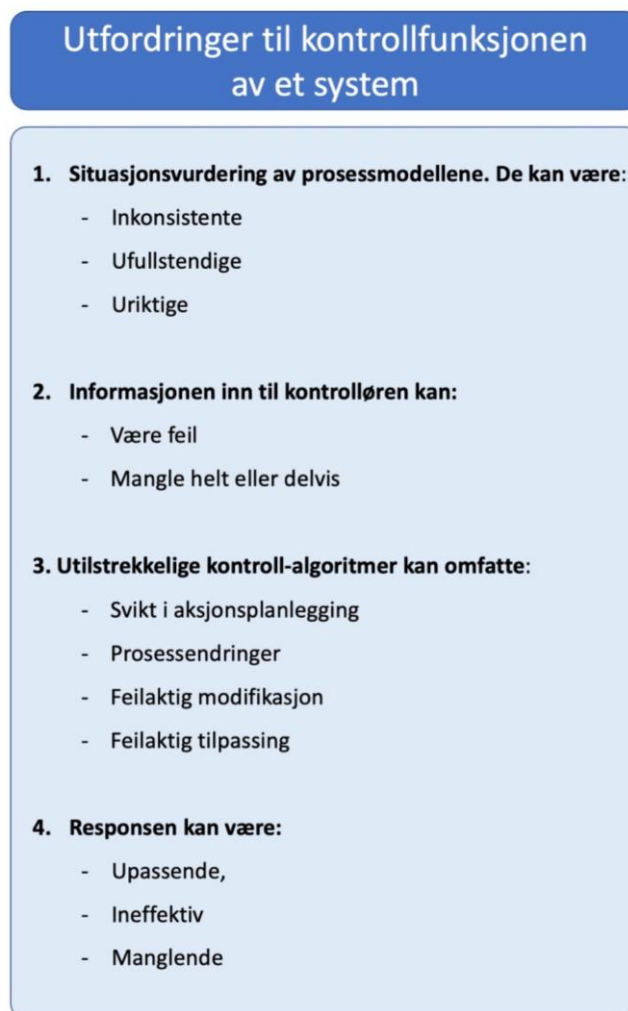
Det er viktig at den prosessen som skal kontrolleres må kunne observeres i riktig tid. Det medfører at egenskapene til prosessen må vurderes når en designer sensor funksjonene. Overvåking av drikkevannsforsyningen krever andre prosesser enn overvåking av brann og rømmingssikkerhet for branner i tunneler i Norge. Det første vil sensorer som måler bakterie, virus og parasitter innhold, i vannet, mens tunnelsikkerhet involverer personell på flere nivå.

Når mulige feil ved sensor funksjoner skal evalueres må man vurdere en del sentrale forhold, som er vist i figur 3.4.



Figur 3.4. Oversikt over mulige feil ved sensor funksjoner. Dersom en av disse feilene oppstår vil prosessmodellen til kontrolleren vike fra den virkelige tilstanden. Dette kan føre til manglende sikkerhetsbegrensninger og uønskede hendelser. (Njå et al., 2020, s. 272-273).

- c) Kontrollfunksjonen av systemet er en viktig del av STAMP modellen. Denne funksjonen krever høy kompetanse og må tilpasses hvert enkelt system som skal kontrolleres. Man må kunne forstå de systemene som er involvert, ikke minst avhengigheten mellom dem og hvordan informasjon om kontrollerte prosesser skal forstås. Uansett på hvilket nivå vi er, vil kontrolløren være avhengig av input fra kontrollører lenger opp i hierarkiet. En oversikt over de utfordringer som kontrollere av et system må være reflektert over, da dette er kjente feil, er summert opp i figur 3.5.



Figur 3.5. Noen utfordringer til kontrollfunksjonen av et system. En må forsikre seg at prosessmodellene en operer ut fra er adekvate. Dette kan en gjøre ved å stille kritiske spørsmål om dens godhet. Deretter kan en gå dypere å stille spørsmål om informasjonen som påvirker prosessmodellen er korrekt og utfyllende. En kan også stille spørsmål ved implementering av sikkerhetsbegrensninger. Klarer de å skape den endringen som var intendert? Er det i

tilstrekkelig grad implementert sikkerhetsbegrensninger ut fra prosessmodellene og det vi vet? (Njå et al., 2020, s. 273).

3.3 Kunnskap og informasjonsutveksling mellom aktører i systemet.

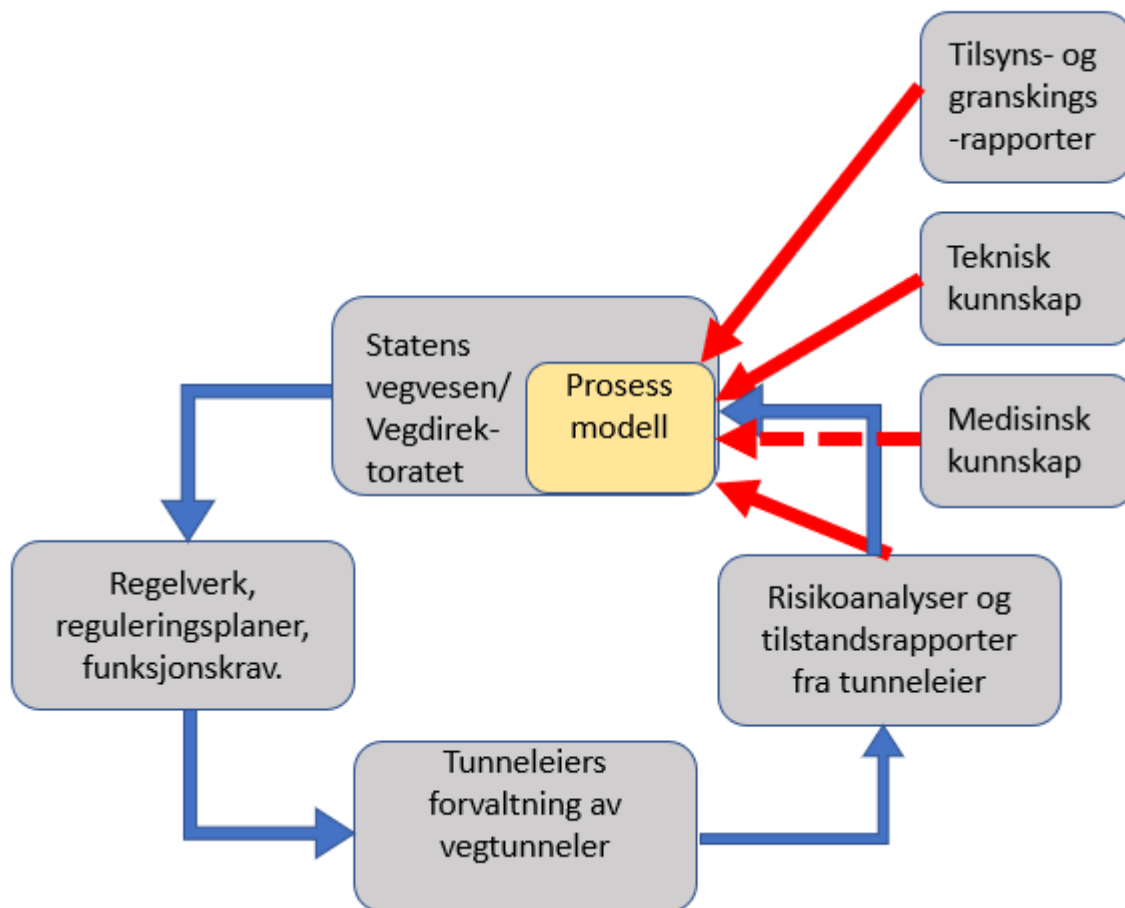
Ethvert system består av mange aktører som kommuniserer på ulike måter, til ulike tider med ulik hyppighet. De fleste systemer har en slags hierarkisk oppbygning, selv om noen organisasjoner har en flatere struktur enn andre.

For at et system skal kunne fungere må det være god kommunikasjon mellom leddene, uansett organisasjonsstruktur. Det er en fellesnevner for alle systemer. Begrensninger til systemene er ofte angitt i prosedyrebøker eller mandat fra overliggende myndigheter. Eksempelvis vil brannberedskapen og brannvesenet sin innsats være begrenset til brann og redning av menneskeliv hvor andre ikke har kompetanse. Dette er også et godt eksempel på hvor viktig kommunikasjonen til politi og helse er for innsatsen til brannmannskapet. Det er ikke uten grunn at disse tre elementene har fått fellesbetegnelsen “nødetatene” eller “blålys-etatene”. Hver for seg har alle disse tre etatene sine rammebetingelser- nemlig at de ikke skal utføre handlinger som går ut over hver enkelt sin kompetanse. Politiet skal ikke inn i røyken i en tunnelbrann, den kompetansen skal røykdykkere i brannvesenet gjøre. Derimot skal politiet styre trafikk og hindre at mennesker blir fanget av røyken. I vår oppgave ser jeg på brann i tunneler. Da vil “TUNNELEN” kunne defineres som vårt system hvor flere aktører jobber sammen (vegvesenet, politi, brann, helse, sikkerhetsingeniører, samfunnsikkerhetsgeneralister, Statens forurensningstilsyn (SFT)) for å sikre tunneler for ulykker inklusive brann i tunneler. Samspillet, kommunikasjonen og rollefordeling mellom disse aktørene er sentrale faktorer ved tunnelsikkerhet utfra en systemteoretisk modell.

3.4 Systemteoriens bidrag inn mot oppgavens problemstilling

I denne oppgaven vil vårt system være “Vegtunnelen”. Videre vil jeg koble systemteorien opp mot problemstillingen for å se om en av farene dette systemet står ovenfor - trafikanters eksponering for branngasser - i tilstrekkelig grad er overveid for å opprettholde en sikker tilstand.

Ansvarsforhold vedrørende sikkerhet i vegtunneler skjer på flere nivå. Alle nivåene i “tunnelhierarkiet” innehar prosessmodeller som hele tiden vil påvirke fastsettelsen av sikkerhetsbegreninger og funksjonskrav til nivåene under. Under (figur 3.6) ser man en avgrenset del av tunnelsystemet med Statens vegvesen som kontrollør og tunneleiers forvaltning av vegtunneler som den kontrollerte prosess.



Figur 3.6. Kontrollloop i tunnelsystemet med fokus på justering av prosessmodellen. I denne prosessmodellen tilflyter det kunnskap fra medisinsk hold, teknisk hold og fra tilsynsrapporter/risikoanalyser. Den røde pilen fra medisinsk kunnskap inn til prosessmodellen er stiptet for å vise at det er usikkerhet omkring hvor mye innflytelse denne kilden har i dag. En har valgt å legge vekt på følgende nivå i hierarkiet: Statens vegvesen på topp og tunneleier nede. De elementene som påvirker prosessmodellen er tilsyns- og granskingsrapporter, teknisk kunnskap, risikoanalyser og tilstandsrapporter i tillegg til den medisinske kunnskapen. Denne loopen er hentet ut midt i Levesons hierarkiske system. Det er nivåer både under og over dette nivå (Se kap. 7.7). Harald Søliland – 2022.

Den prosessmodellen som Statens vegvesen/Vegdirektoratet opererer ut fra har ulike input/sensorer. Det er fra fysiske sensorer og tidligere ulykker. Videre er teknisk kunnskap fra ingeniørhold. Det som tilflyter SVV/VD av medisinsk kunnskap, er usikkert. Det er også forbundet usikkerhet omkring hvor mye medisinsk kunnskap som kommer til de ulike kontrollerne i tunnelsystemet og hvor stor innflytelse denne har. For å plassere den medisinske kunnskapen inn i denne systemtilnærmingen må vi ha to parallelle aspekter med oss samtidig. På den ene siden vil den medisinske kunnskapen inngå i prosessmodellen til SVV/VD sammen med teknisk kunnskap og kunnskap fra tilsynsrapporter (Figur 3.6). Da vil medisinsk kunnskap kunne inkorporeres gjennom Levesons systemteori og dermed rettferdiggjøre bruken av denne systemteorien i min oppgave.

På den andre siden zoomer medisinsk kunnskap inn på mikronivå, på enkeltindividets sårbarhet og det medisinske systemet (prehospital og hospital) innsats til å begrense skadeomfanget av eksponering for røykgasser i en vegttunnelbrann. Vi vet ikke hvilken stemme den medisinske kunnskapen har inn i prosessmodellen. Helsevesenet har en rekke prosedyrer basert på kjent kunnskap, f.eks. håndtering av CO-intoksikasjon. Samtidig vet vi at det stadig tilflyter systemet ny kunnskap, men hvor stor den er vet vi ikke.

Det er mye vi ennå ikke vet om hvilke gasser som kan oppstå i tunnelbranner pga. at sammensetningen i en situasjon er avhengig av så mange variabler. Konstellasjonen av branngasser er avhengig av temperatur, hvor mye oksygen som er til stede, ventilasjon, utforming på tunnel og materialet som brenner. Spesielt vanskelig er det å forutse hvilke branngasser som vil forekomme når temperaturer blir veldig høye. Da vil det i tillegg til kjente gasser, slik som CO, dannes nye stoffer på grunn av høyt energinivå og at stoffer reagerer med hverandre og danner nye forbindelser. Dessuten er det nå ca. 25 % elbiler på veiene (Murphy et al., 2011). Dette kan endre branngassers sammensetning i forhold til tidligere. Disse betraktningene reiser nye spørsmål og krever en kritisk og omfattende gjennomgang av litteraturen for å se hva som er nytt og hva som er kjent kunnskap. Den medisinske kunnskapen er en viktig kommunikasjonsfaktor med de som jobber med den tekniske biten dvs. konstruerer tunnelen og kan utvikle sensorfunksjoner som kan hjelpe brukerne av tunnelen.

4. Metode - systematisk litteraturoversikt

4.1 Introduksjon til litteratursøk

Når en søker etter litteratur i ulike databaser finnes det ulike måter å innhente dataene på. Det kan være deduktiv, induktiv, abduktiv eller retroduktiv (Blaikie & Priest, 2019). I denne oppgaven er det både brukt en deduktiv og induktiv tilnærming. Dette innebærer at jeg har lest i litteratur for å sette meg inn i tematikken og har laget meg noen a priori antakelser om hva jeg skal/kommer til å finne - en deduktiv tilnærming. Derimot har søket også vært iterativt da jeg utviklet forståelsen min underveis og ble påvirket av datamaterialet til å justere søkestrategien og i tillegg utføre snøballsøk fra nøkkelartikler - en induktiv tilnærming.

I og med at jeg er en samfunnssikkerhetsstudent, hadde jeg i utgangspunktet ikke inngående kunnskap om helseeffekter av ulike gasser og monitoreringen av disse. Kildene til utvikling av forståelsen min og utforming av søkestrategi har vært gjennomlesing av sentral litteratur, veiledningsmøter og samtaler og diskusjon med en erfaren medisiner. Veilederne mine og samtalepartner er eksperter innenfor fagfelt denne oppgaven bygger på. Prosessen ved litteratursøket har tatt en god del av tiden til rådighet for oppgaven, nettopp for å utvikle en tilstrekkelig forståelse for å kunne utføre litteratursøket på en god måte. Dette innebærer å vite hvilken litteratur som skal søkes etter og å skille hvilken litteratur som er relevant og ikke, opp imot oppgavens problemstilling. Denne prosessen har endt opp med en forståelse av hvilke toksiske gasser som er aktuelle for vegtunneler, hvilke organsystem som blir påvirket og hvordan de blir påvirket og hvilken monitoreringspraksis som er aktuell.

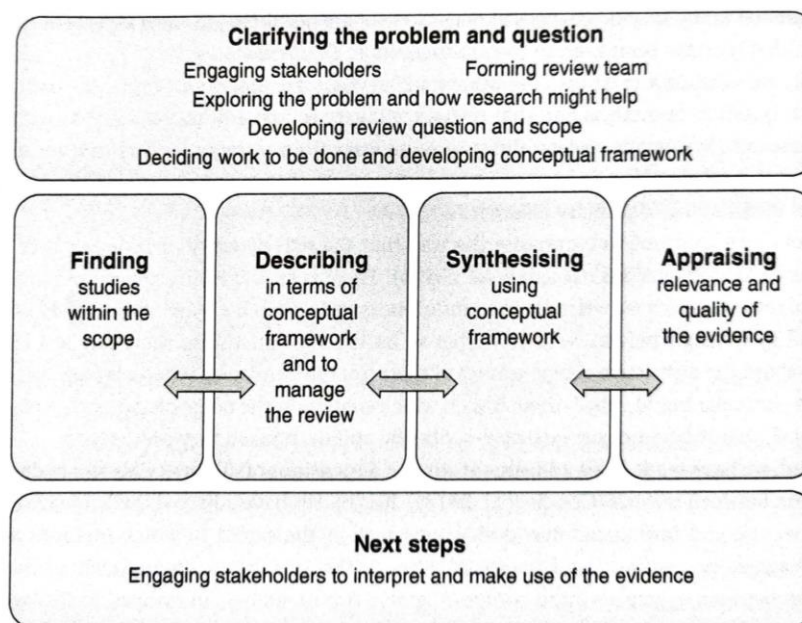
4.2 Metode

Rammeverket for systematic review har vært det metodiske utgangspunktet for denne oppgaven da jeg mener det passer best i denne oppgaven for å besvare forskningsspørsmålene. Derimot er gjennomføringen karakterisert av tilpasninger og reglene for et systematic review har ikke blitt fulgt slavisk. Måten en kan syntetisere data på kan forklares ut fra et "aggregasjon-konfigurasjons kontinuum". En aggregasjonssyntese er karakterisert av å legge sammen data fra flere lignende studier for å besvare forskningsspørsmålene. En konfigurasjonssyntese tar for seg konfigurering eller organisering av data fra de inkluderte artiklene og utforske og forklare variasjonene for å besvare forskningsspørsmålene (Gough et al. 2017). Ut ifra

forskningsspørsmålene og karakteristikken til litteraturen på området, blir den systematiske kunnskapsoppsommeringen i denne oppgaven karakterisert av en overveiende konfigurasjonssyntese. Derimot er det også hint av kvantitativ aggregering av data, da jeg har flere artikler som viser til samme resultater.

I tillegg utførte jeg et såkalt snøballsøk hvor litteratur fra referansene til de uthentede artiklene blir tatt med dersom de var relevante til forskningsspørsmålene. Det ble gjort for å legge til ytterligere datamateriale på området og dermed utfylle vår syntese av datamaterialet.

Den grunnleggende logikken bak det å foreta seg en systematisk kunnskapsoppsommering kan fremstilles ved å stille seg seks hjelpespmål.



Figur 4.1. Trinnene i en systematisk review prosess. 1. Avklare problemstillingen og forskningsspørsmål. 2. Finne studier/artikler som er innenfor søkelyset. 3. Beskrive metodisk rammeverk og fremgangsmåten for reviewen. 4. Syntetisering av kunnskapen uthentet fra litteraturoversikten. 5. Vurdering av relevans og kvaliteten til studiene en har funnet. 6. Engasjere interessenter til å fortolke og ta i bruk funnene. (Gough et al., 2017, s. 16).

Ut fra Figur 4.1 kan vi derivere seks spørsmål vi kan ta med oss inn i søkeprosessen.

1. Hva er problemet vi står ovenfor?

2. Hva er det vi vil vite (fra forskning som kan hjelpe oss å belyse/løse problemet - og hva er våre forskningsspørsmål)?
3. Hva er det vi vet allerede (så gjennomfør eller bruk eksisterende systematiske kunnskapsoppsummeringer)?
4. Hvordan vet vi det (fra hvilke metoder av systematisk kunnskapsoppsummering og hvilken type primærforskning)?
5. Hva mer er det vi vil vite (fra videre reviewer eller primærforskning)?
6. Hvordan kan vi vite det (hvordan kan systematiske kunnskapsoppsummeringer informere videre forskningsstrategier)?

Dette er en organiserende kunnskapsoppsummering med henblikk på å samle og sammenstille eksisterende kunnskap og peke på hull/mangler. Dette for å kunne si noe om hva som må til (forskning, kunnskapsoppsummering, systemer til å assistere fortolkningen/forståelsen av og implementeringen av forskning og hvilke mellomliggende kommunikasjonsprosesser og hvilke læringsmomenter organisasjoner må gjennom for å fasilitere arbeidet med å tette disse hullene.

Videre er søkene åpnet opp for å inkludere helseeffekter også av brann utenom tunnel, nettopp for å utforske om det er kunnskap som kan overføres til konteksten tunnelbrann. Man kan rette kritikk mot denne ekstrapoleringstilnærmingen. Derimot kan det, til tross for denne svakheten, bidra til å si noe om hva som er tilfellet ved eksponering for brann og hvilke helseeffekter dette kan ha.

4.3 Inklusjons- og eksklusjonskriterier og databaser

Litteratursøket har for det meste blitt gjort på engelsk, da flere av databasene som ble valgt ut ikke støttet søk på norsk eller at det kom få eller ingen treff. Det er allikevel gjennomført noe søk på norsk i Oria.

Inklusjonskriterier og eksklusjonskriterier:

Inklusjon

- Vitenskapelige (fagfelleverdert)
- Språk: norsk, dansk, svensk, engelsk, tysk
- Toksiske gasser i tunnel

Eksklusjon

- Må være vitenskapelig.
- Ikke toksiske stoffer som ikke er i gassform (som f.eks. flytende kjemikalier transportert av tunge kjøretøy).
- Ikke om miljøforurensning.
- Ikke om skog- og vegetasjonsbranner (eks lyng, kratt osv).
- Ikke om brannmenns helseeffekter grunnet langtids helseeksponering for ulike toksiske gasser.
- Ikke om kullminer generelt.
- Ikke om tobakksrøyk og avhengighet.
- Språk som ikke er nevnt i inklusjonskriteriene. Var blant annet en artikkel på koreansk og en på russisk som ikke ble tatt med på grunn av praktiske problemer knyttet til å forstå artikkelen.

Ut fra oppgavens problemstilling er det utskilt 3 forskningsspørsmål (presentert i kap. 2.1), som har vært utgangspunktet for utforming av søkeprosessen.

Disse databasene er anerkjente vitenskapelige databaser og har vært kriteriet for valg av databaser å søke i. Databasene jeg har søkt i er:

Scopus er en akademisk database for sammendrag, referanser og henvisninger for artikler i forskningstidsskrifter. Den dekker nær 18 000 titler fra mer enn 5 000 internasjonale utgivere, inkludert omtale av mer enn 16 500 tidsskrifter innenfor naturvitenskapelige, tekniske, medisinske og samfunnsvitenskapelige fag (<https://www.scopus.com/home.uri>).

Science Direct er nettsted som gir tilgang til en stor bibliografisk database over vitenskapelige og medisinske publikasjoner fra det nederlandske forlaget Elsevier.

Den er vert for over 18 millioner deler av innhold fra mer enn 4000 akademiske tidsskrifter og 30 000 e-bøker fra denne utgivelsen (<https://www.sciencedirect.com/>).

Oria er en norskutviklet og norskeid tjeneste for digitale søk i databaser tilhørende norske fag- og forskningsbiblioteker (<https://oria.no/>).

Web of Science er en betalt tilgangsplattform som gir tilgang til flere databaser som gir referanse- og siteringsdata fra akademiske tidsskrifter, konferansehandlinger og andre

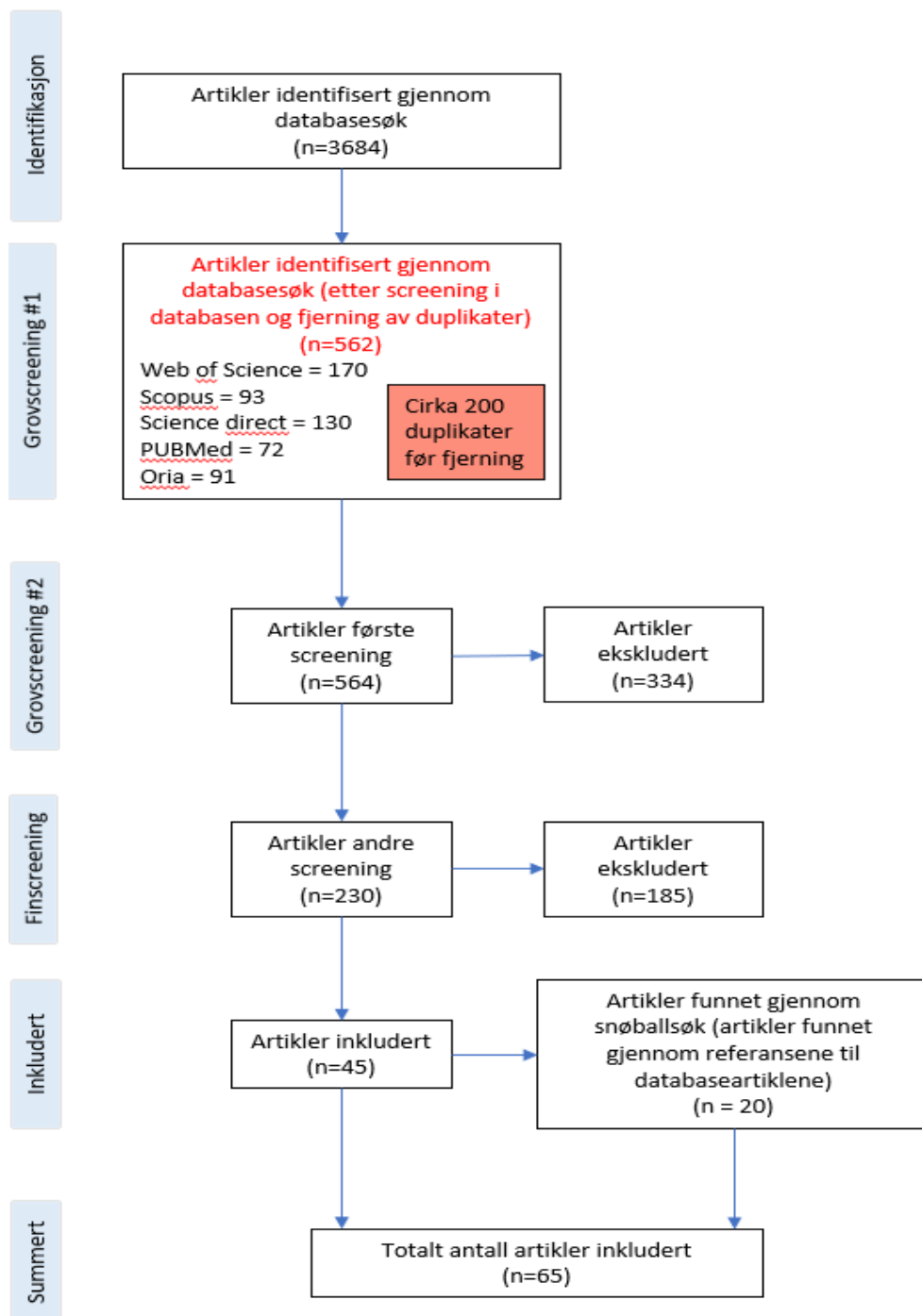
dokumenter innen ulike akademiske disipliner

(<https://www.webofscience.com/wos/woscc/basic-search>).

PUBMed: PubMed er verdens største database innen medisin, sykepleie, odontologi, veterinærmedisin, helsestell og preklinisk vitenskap. Den har over 32 millioner engelskspråklige artikler (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>).

4.4 Enkel oversikt over søkeprosessen

Figur 4.2 viser et PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analyses) flowdiagram over screening prosessen. I alt fant jeg 3684 artikler som gjennom flere gjennomganger ble redusert til 45 artikler. Alle søkene ble gjort i tidsperioden 10. Jan – 10. Mars 2022.



4.5 Detaljert oversikt over søkeprosessen

Jeg har valgt å dele opp søkene mine i tre etter forskningsspørsmål 1, 2 og 3. Spørsmål 1 tar for seg hvilke toksiske gasser som oppstår ved brann i tunnel. Spørsmål 2 omhandler akutte helseeffekter, mens spørsmål 3 tar for seg kroniske helseeffekter. Årsaken til at jeg delte opp det andre forskningsspørsmålet var for å få mer spesifikke treff. Utgangspunktet for søkene var søkeordslisten under. Søkene ble utført på både norsk og engelsk, men flertallet av databasene gav lite til ingen treff på norsk. Dermed er treffene og de utvalgte artiklene i hovedsak på engelsk. Videre ble søkene gjennomført i perioden 10.01-10.03.2022. Grunnlaget for forskningsspørsmål 4 er den eksisterende litteratur vi har i helse vest på prehospitalt og hospitalt nivå. Derfor ble ikke spørsmål 4 inkludert i litteratursøket. Se kapittel 4.7 for metode for forskningsspørsmål 4.

Tabell 4.1. Detaljert oversikt over litteratursøket i alle søkemotorer som ble brukt relatert til forskningsspørsmålene. Under databasenavnene er det oppført hvilke søkeparametre som ble anvendt (for eksempel tittel, abstrakt og nøkkelord). Videre er de ulike søkestrengene og antall treff presentert.

Database	Søkeord	Forsk.sp. 1	Forsk.sp. 2	Forsk.sp. 3
Pubmed				
Search included: All fields.	Health damage Cobustion	3		
	Toxic damages Combustion		67	
	Chronic health damages Comustion		5	
	Chronic Health effects/ Combustion			18
Scopus				
Search included: Title, abstract and keyword.	Tunell /fire/toxi*	104		
	Tunell /fire/toxi*/Products	28		
	tunnel / fire / toxi*	162		
	tunnel / fire / Health		88	
	fire / toxic / gas / health / effect		117	
	Hydrogene Chloride / fire / tunnel / Acute Health effects		0	
	Phosgene / fire / tunnel / Acute Health Effect		0	
	Cyanide / fire / tunnel / Acute Health Effect		13	
	CO/ fire / tunnel / Acute Health Effect		8	
	Hydrogen fluoride / fire / tunnel / Acute Health Effect		0	

	Hydrogen Chloride / fire / tunnel / Chronic Health effects			0
	Phosgene / fire / tunnel / Chronic Health Effect			0
	Cyanide / fire / tunnel / Chronic Health Effect			13
	CO / fire / tunnel / Chronic Health Effect			44
	Hydrogen fluoride / fire / tunnel / Chronic Health Effect			0
Science Direct				
Search included: title, abstract and keyword.	Tunnel /fire /toxic		44	
	Tunnel /fire /pyrolysis	18		
	Tunnel /fire /health		15	
	Tunnel /fire /injuries		6	
	Tunnel /fire /tenability	10		
	Hydrogen Chloride / fire / tunnel / Acute Health effects		0	
	Phosgene / fire / tunnel / Acute Health Effect		11	
	Cyanide / fire / tunnel / Acute Health Effect		45	
	CO / fire / tunnel / Acute Health Effect		128	
	Hydrogen fluoride / fire / tunnel / Acute Health Effect		0	
	Hydrogen Chloride / fire / tunnel / Chronic Health effects			0
	Phosgene / fire / tunnel / Chronic Health Effect			11
Cyanide / fire / tunnel / Chronic Health Effect			36	
CO / fire / tunnel / Chronic Health Effect			128	
Hydrogen fluoride / fire / tunnel / Chronic Health Effect			0	
Oria				
Søk i norske fagbibliotek.	Tunnel fire/toxic gases/Vehicle	204		
	Tunnel fire/cyanide	62		
	Tunnel fire /acute health effects		158	
	Hydrogen fluoride/acute health effects/fire		99	
	CO/acute health effects/fire		499	
	Cyanide/acute health effects/fire		277	

Søket inkluderte: alle felt.	Phosgene/OR hydrochloride/acute health effects/fire		48	
	Tunnel fire / sequelae			105
	CO/fire/chronic health effects/vehicle			253
	HF/fire/chronic health effects/vehicle			57
	Cyanide/fire/chronic health effects/vehicle			115
	Phosgene/fire/chronic health effects/vehicle			50
Web of science				
All databases.	Tunnel/fire/smoke/toxi*	68		
	Tunnel/fire/smoke/combustion	197		
	Tunnel/fire/smoke/gas*/concentration	70		
Search included: topic (includes title, abstract and keywords).	Tunnel/fire/smoke/health effects		131	
	Fire/smoke/ toxic damages		57	
	Fire/acute health effects/carbon monoxide		55	
	Fire/acute health effects/cyanide		10	
	Fire/acute health effects/hydrogen fluoride		0	
	Fire/acute health effects/phosgene OR hydrogen chloride		5	
	Fire/chronic health effects/carbon monoxide			34
	Fire/chronic health effects/cyanide			3
	Fire/chronic health effects/hydrogen fluoride			0
	Fire/chronic health effects/phosgene OR hydrogen chloride			3
		926	1886	872
Total		3684		

De samme søkeordene har blitt brukt i de ulike databasene. Det ikke vært mulig å få til de ulike søk grunnet utformingen av søkeverktøyene i de ulike databasene. Jeg har gått så åpent ut som mulig, før eventuelle innstramminger i søkestrengene. Ved veiledning fra bibliotekar ble det anbefalt å søke i tittel, abstrakt og nøkkelord. Dette da det var nokså vidt, men ville fortsatt gi nokså relevante treff. I alle databasene, utenom Oria og PubMed, var dette mulig og søkene ble derfor gjort deretter. I de to andre databasene ble søkene gjort i ALL, for å unngå å utelukke potensielt relevante treff.

Måten ordene ble kombinert på i søkefeltet var for det meste en base (tunnel fire smoke) etterfulgt av et avgrensende ord (combustion, toxic*, gas*, tenability, health effects osv.). Dersom dette gav for lite resultater tok jeg vekk tunnel fra søkestrengen. Hensyn til ekstrapolasjonsproblem vedrørende dette kommer jeg inn på i kap. 4.6. Dette så jeg som nyttig, da det var utfordrende å kople sammen for mange søkeord om gangen i denne databasen uten å få veldig få treff. Etter å ha utført søkene ble disse screenet etter inklusjons- og eksklusjonskriteriene nevnt over. Flere av søkene knyttet til forskningsspørsmål 2 og 3, da særlig 3, var det nødvendig å ta en mer indirekte tilnærming til. Det innebar ovennevnte sløyfing av ordet “tunnel” i søkestrengen for å da få flere treff som kanskje ikke direkte svarer på oppgavens problemstilling.

I noen tilfeller (spesielt Oria og PubMed) var det veldig mange treff og en stor andel ikke relevante i det hele tatt. Det ble det gjort en grovscreening inne i databasene før de ble hentet inn i EndNote. Totalt i søkene tilknyttet første forskningsspørsmål var det 926 treff. Etter screening var det igjen 14 treff. Antallet treff tilknyttet forskningsspørsmål 2 var 1886. Etter screening var det igjen 21 artikler. Antallet treff tilknyttet forskningsspørsmål 3 var 872. Etter screening var det igjen 8 artikler.

4.6 Ekstrapolasjonsproblematikk

Mye av søkene knyttet til forskningsspørsmål 2 har det vært nødvendig å ta en mer indirekte tilnærming til. Det innebærer ovennevnte sløyfing av ordet “tunnel” i søkestrengen og da få flere treff som kanskje ikke direkte svarer på oppgavens problemstilling. For å illustrere dette behovet kan vi se på noen relevante søk i Web of Science som gav veldig få treff:

- “tunnel fire smoke incapacit*” gav 1 treff.
- “tunnel fire smoke tenability” gav 5 treff.
- “tunnel fire smoke sequela*) gav 1 treff.
- “tunnel fire smoke late injuries” gav 0 treff.
- “tunnel fire smoke injuries” gav 9 treff.
- “tunnel fire smoke injuries health” gav 3 treff.
- “tunnel fire smoke health damages” gav 8 treff.

- Søkestrengen “tunnel fire smoke health” gav 240 treff, men når jeg leste gjennom abstraktene var det få som faktisk omhandlet helse direkte.

Dette viser at det ikke er gjort spesielt mye forskning på hvordan de ulike fasene i en tunnelbrann påvirker helsen til førere i tunneler. Dermed er det en a priori mangel på medisinsk orientert litteratur om tunnelbranner i relasjon til den bygningsmessige kunnskapen. Derfor tillater jeg meg å inkludere treff som ikke nødvendigvis omhandlet brann i tunneler, men også brann og toksiske gasser andre steder. Dette fordi jeg tror det er mulig å overføre noe kunnskap fra andre branner til tunnelbrann. Kunnskapen uthentet fra disse artiklene kan i det minste fungere som veiledende for hvilke risiko og sårbarheter mennesker kan stå overfor i møte med brann i tunnel. Det kan også gi noe informasjon og veiledning til videre forskningsdesign.

4.7 Innhenting av fagbøker og tiltakskort for monitorering av helseeffekter

Litteratursøket eller informasjonsinnhenting for forskningsspørsmål 4 (se kap. 2.1), ble gjennomført ved kontakt gjennom mail og telefon med relevante aktører med tilgang til slike dokumenter. Formålet var å få innsikt i helseetaten sine prosedyrer og praksis for monitorering og behandling når det gjelder eksponering for toksiske branngasser.

Når dokumentene ble innhentet foretok jeg meg en nærlesing av dokumentene og strukturerte dem etter etatsnivå. Denne prosessen ble, i likhet med litteratursøket, gjort i samråd med veiledere og en erfaren medisiner. Det gjorde at jeg kunne forstå de ulike fagtermene og dermed fikk en forståelse av hva som sto i de ulike dokumentene, som for øvrig er lagt ved i kapittel 10. appendiks. Ved syntetiseringen og fremstillingen i resultatene (kap. 5.4) var fokuset på hvilke gasser som var omtalt og hvilke prosedyrer som ble nevnt for monitorering og behandling.

5. Resultater

Resultatene som legges frem i denne delen er en syntetisering av kunnskapen i de 65 artiklene som PRISMA utsilingen gav. Dermed er funnene forankret i empirien min, som i det vesentlige er litteratur. Videre bærer resultatene i stor grad preg av inngående medisinsk kunnskap om virkningen av toksiske gasser på menneskekroppen. Det er mange faktorer som har betydning for sikkerhetsarbeidet knyttet til eksponering for branngasser i tunnel. Det er også flere faktorer som har betydning for helseeffekter av eksponering for branngasser i tunnel. Generelt sett kan man dele de i to: helseeffekter fra start av brann til evakuering og helseeffekter etter evakuering og inn i den medisinske monitorering og behandling. Den første innebærer inkapasitering og dødelighet. Inkapasitering omhandler den negative effekten branngasser kan ha på menneskers evne til å evakuere seg selv (jf. selvredningsprinsippet) og påvirker dermed eksponeringstiden. Dette kan være synsforstyrrelse, reduserte kognitive evner, fysisk lammelse osv. Dødelighet henger sterkt sammen med inkapasitering, da eksponeringstiden er en sentral faktor. Den andre innebærer også dødelighet, men også akutte og kroniske skader etter hendelsen. I tillegg innebærer det den medisinskfaglige monitoreringen av de som har blitt eksponert for branngasser (se kap. 6 for mer inngående om dette). Noen opererer med spesifikke begreper for noen av de ovennevnte faktorene. Slik som: Required Safe Escape Time (RSET), Available Safe Escape Time (ASET), Fractional Effective Concentration (FEC), Fractional Effective Dose (FED) og Lethal Concentration – 50% (LC₅₀) (Stec & Hull, 2015; Hurley, 2016; Purser et al., 2016). Det er derimot forbundet en del usikkerhet rundt anvendelsen av disse (Babrauskas et al., 2010). Jeg har derfor valgt å tilnærme meg problemstillingen uten utgangspunkt i disse.

5.1 Forskningsspørsmål 1: Utvikling av toksiske gasser ved en vegtunnelbrann

De 65 artiklene som ble dybdelest gav innsikt i de branngassene som kan utvikle seg i branner generelt og i bilbrann spesielt. Artiklene har gitt meg god innsikt i dette tema, men har også avslørt mangler og ikke minst mangler på originale studier. Det er mye repetisjon mellom artiklene.

Det medisinske kunnskapsgrunnlaget er ikke så solid som en vanligvis krever. Dette kan man se ved bla. at det fins få eller ingen kontrollerte studier som ellers er vanlig i medisinsk

forskning. Det har sin naturlige forklaring da det ikke er mulig å gjøre dobbelblind randomiserte studier i vegtunnelsammenheng.

Noen artikler er oversiktsartikler og har gitt meg god oversikt over feltet. Det er dog verdt å bemerke seg at noen av artiklene er fra 1970- og 80-tallet, som er relativt gammelt. Artiklene beskriver i detalj hvilke gasser som kan oppstå, noe om hvordan de ulike branngasser utvikler seg og hvilken grad de er farlige med tanke på toksisk virkning på kroppen. Det bærer dette kapitlet litt preg av. Men jeg har prøvd å forenkle det slik at det skal bli forståelig.

Når det gjelder brann i vegtunneler er trailere/vogntog og busser overrepresentert i statistikken (Nævestad et al., 2016). I tillegg kommer deres oppbygging og evt. lasten de transporterer. Et viktig poeng er at røyk fra tunnelbranner er sterkt heterogent sammensatt. Den består av en blanding av flere farlige stoffer og gasser som partikler, respiratoriske irritanter, systemiske toksiner og ekstrem varme (Toon et al., 2010, s. 53-61). De øvre luftveier kan være med å redusere varmepåvirkningen i de nedre luftveier (Murphy et al., 2011).

Vi vil se på hva som er eksisterende kunnskap om de ulike røykpartikler, varme og toksiske gasser som kan oppstå ved bilbrann generelt og i vegtunnel spesielt.

5.1.1. Røykpartikler

Røykpartikler setter seg fast i ulike steder i luftveiene avhengig av deres størrelse. Små partikler < 1 µm i diameter kalles nanopartikler, som kan komme helt ned i lungealveolene der oksygen opptaket til blodet skjer. Her blir nanopartiklene tatt opp i cellene og aktiverer betennelsesmessige kaskader via ulike signalveier inni cellene. I tillegg kan ulike gasser binde seg til røykpartiklene (f.eks. saltsyre (HCl)) (Cohen & Guzzardi, 1983, s. 628-632). Disse partiklene kan da virke som transportmiddel for toksiske gasser og øke den lokale skadevirkningen av de toksiske gasser i lungene.

5.1.2 Gasser som er overflateirritanter

Fosgen (COCl₂)

Fosgen er en meget giftig klorholdig gass. Den ble brukt i første verdenskrig som stridsgass. Fosgen dannes ved forbrenning av karbontetraklorid (Stefanidou, M. & Anthanaselis, S.,

2004). Når gassen kommer i kontakt med fuktighet, som for eksempel i luftveiene, dannes saltsyre. Således er fosgen en sterk overflate irritant og svært skadelig for luftveiene. Se under om saltsyre.

Saltsyre (HCl)

Saltsyre (HCl) kan være både i gass- og flytende form. Saltsyre oppstår typisk når fosgen oppløses i vann. Det dannes også når polyvinylklorid (PVC) brenner (Genovesi, 1980, s. 335-336). Det er mye PVC i interiøret i alle typer biler. Således er saltsyre en vanlig gass som oppstår i bilbranner.

Svovelsyring (H_2SO_3) og Svovelsyre (H_2SO_4)

Svovelsyre og svovelsyring dannes når svovel i motoroljen brenner. Disse syregassene er også etsende i luftveier slik som saltsyre over. Den vil føre til de samme type skader med ødeleggelse av de ulike celletypene i luftveiene.

Ammoniakk (NH_3) og Formaldehyd/formalin (HCHO)

Når nylon, ull og silke forbrenner dannes ammoniakk (NH_3) og formalin (HCHO) (Stefaniduo & Anthanaselis, 2004, s. 196-199). Forbrenning av gummi og urethan isocyanat polymerer, som finnes i bilene, danner også ammoniakk og formalin. Begge er sterke irritanter på hud og luftveier spesielt.

5.1.3 Gasser med systemiske effekter

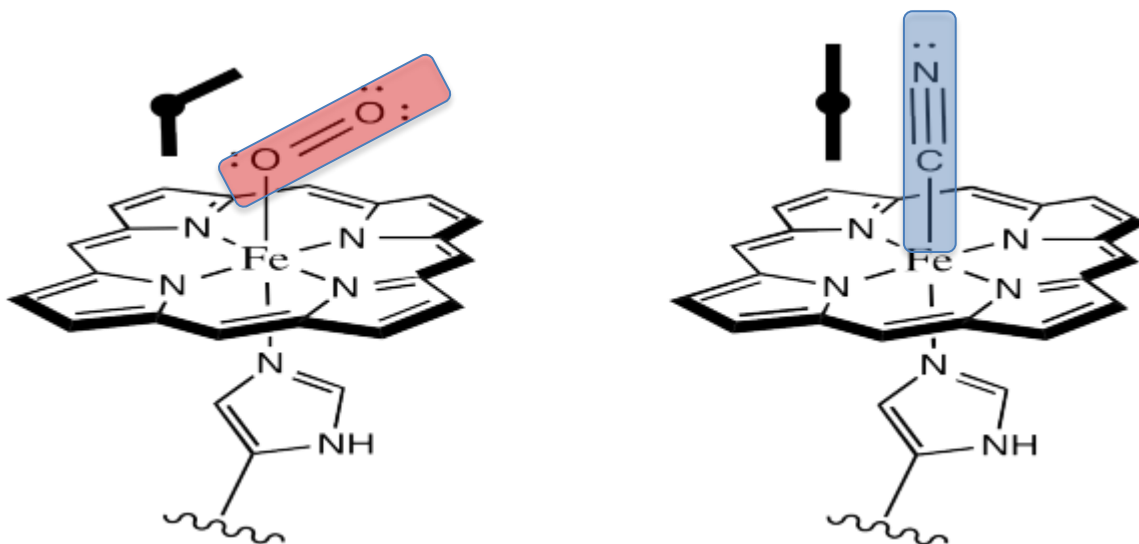
De to viktigste systemtoksiske gasser som dannes ved bilbrann er karbonmonoksid / kullos (CO) og cyanid (blåsyre, CN). Begge hemmer utnyttelsen av oksygen i kroppen. I tillegg kommer karbondioksid (CO_2) som også har systemiske effekter på kroppen.

Karbonmonoksid (CO)

Karbonmonoksid (CO), eller kullos er en fargeløs og luktløs gass, som hovedsakelig dannes ved ufullstendig forbrenning av organisk materiale. Naturlige prosesser (skogbranner, biologisk aktivitet og oksidering av metan) fører til utslipp av betydelige mengder CO. Dette gir bakgrunnskonsentrasjoner i atmosfæren mellom 0,06 og 0,14 mg/m³.

Ved forbrenning av organisk materiale (f.eks. tre og stoff i bil) dannes CO når det er underskudd av oksygen i luftblandingen og denne gassen tas deretter opp i kroppen via lungene (Bleecker, 2015). Det kjemiske grunnlaget for at CO-molekylet gir en alvorlig systemisk toksisk effekt er at mellom C og O er det en trippelbinding. Det fører til at CO har to par elektroner ledige for binding, noe som jernet (Fe^{2+}) i heme-gruppen i hemoglobinmolekylet har. Derfor kan CO binde seg til hemoglobinmolekylet 400 ganger sterkere enn bindingen av oksygen (Haraldsen & Pedersen, 2020) (se figur 5.1). Da har vi et problem.

Dette medfører at oksygenet blir fortrent og blodet frakter mye mindre oksygen til kroppens organer. Mest utsatt er hjernen og hjertet. Dette er altfor lite for kroppens behov. CO fører derfor til at oksygentransporten blir blokkert eller lite effektiv (Nelson & Cox, 2021).

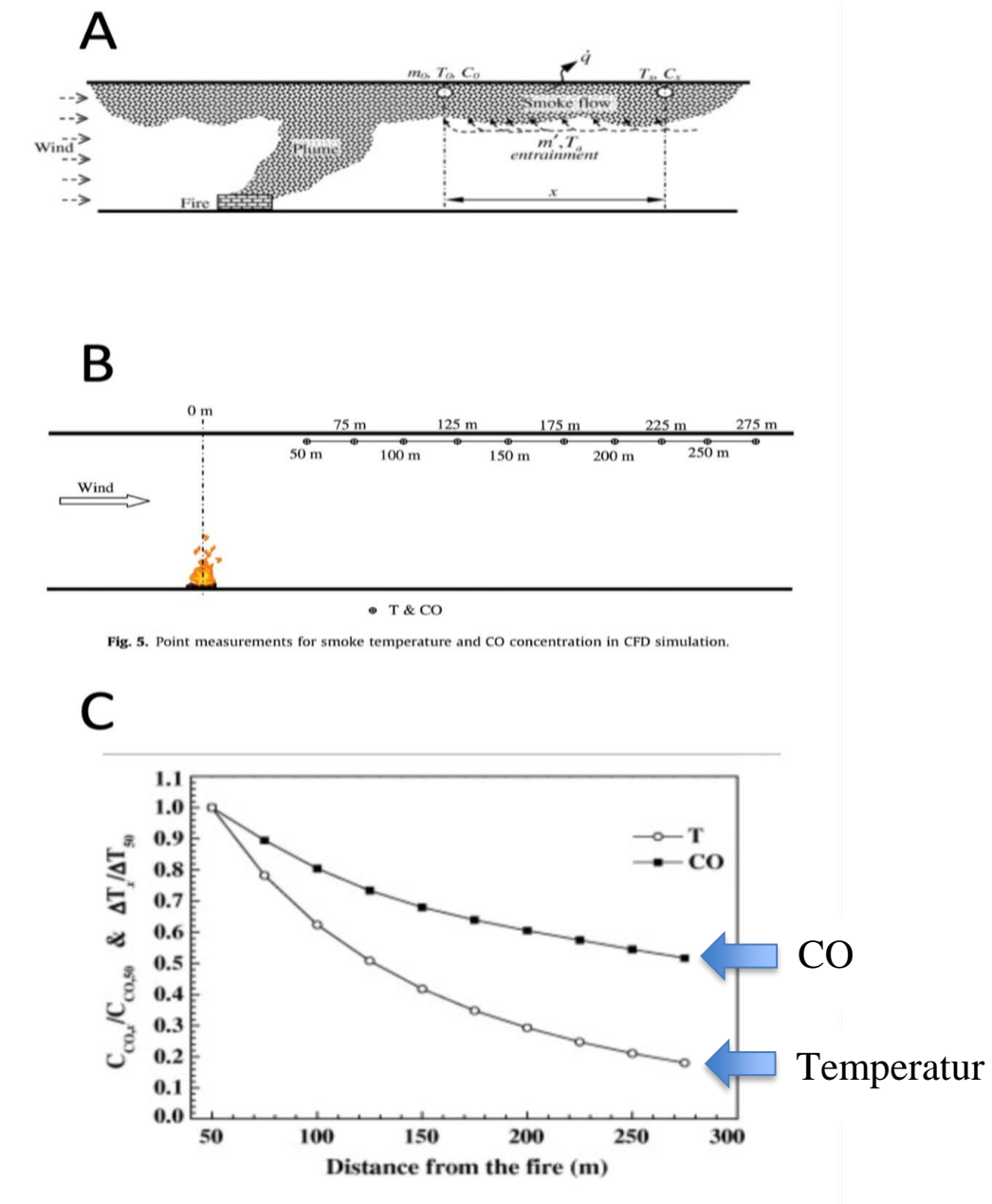


Figur 5.1. Oksygen og karbonmonoksid sin binding til hemoglobin.

Venstre: Binding av oksygen til heme-gruppen i hemoglobinmolekylet. Oksygen (O_2) bindes til jernatomet midt i heme-gruppen (rød O-O)

Høyre: Når CO bindes til jernatomet i heme-gruppen opptil 400 ganger sterkere enn oksygen, dyttes oksygenet ut av heme-gruppen med oksygenmangel i cellene til følge (blå CN-jernatom) Karbonmonoksidet vil derfor erstatte oksygenet i de røde blodcellene og hindre disse i å ta opp oksygen (Schaller, 2022).

Et funn fra forskere i Kina er at i tunnelbranner vil konsentrasjonen av CO være avhengig av flere variabler som f.eks. høyde i tunnelen, lufting og avstand fra brannen. Konsentrasjonene av CO avtar med avstanden til selve brannen. I denne studien fant man at forholdet mellom CO konsentrasjonen 50 meter fra brannen (Figur 5.2) og økende avstand fra brannen fulgte en logaritmisk kurve (Fig 5.2) (Hu et al., 2010, s. 2844-2855).



Figur 5.2. Modeller av røykspredning og varme og CO-konsentrasjon langs en vegtunnel.

A: Fordelingen av brannrøyk i tunnel med ventilasjon fra venstre

B: Luftprøver tatt med økende avstand fra brannkilden, starter fra 50 meter.

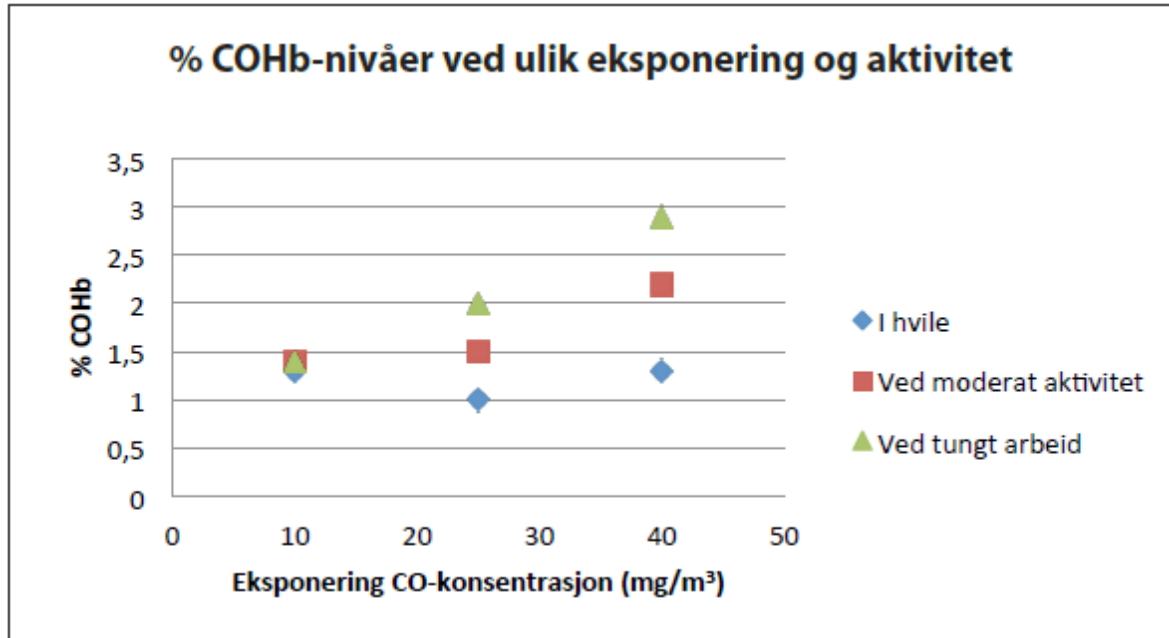
C: Resultater fra konsentrasjonsmålinger av CO (øverste kurve) og temperatur (T) (nederste kurve) konsentrasjoner fra figur 5.2 B. Legg merke til at CO konsentrasjonen er mye høyere enn det temperaturen(T) skulle tilsi.

(Hu et al., 2010, s. 2844-2855).

Dette fenomenet indikerer at selv om røyktemperaturen vil være svært lav ved posisjonen langt unna brannen i tunnelen, kan karbonmonoksidkonsentrasjonen fortsatt holde seg på et høyt og farlig nivå. Den relativt raskere reduksjonen i røyktemperatur sammenlignet med reduksjonen av CO-konsentrasjon langs tunnelen, skyldes at den langsgående reduksjonen i CO-konsentrasjon og røyktemperatur har til dels forskjellige styringsmekanismer (Hu et al., 2010, s. 2844-2855). Nedgangen i CO-konsentrasjonen vekk fra brannen i tunnelen skyldes at frisk luft trekkes inn i røykstrømmen, og dermed fortynnes CO-konsentrasjonen. Nedgangen i røyktemperaturen langs tunnelen tilskrives både innføring av frisk kjølig luft i røykstrømmen og, men også varmetapet fra røykstrømmen til omgivelsene ved konveksjon, som begge fører til varmetapet (Hu et al., 2010, s. 2844-2855).

Selv om man i dette eksperimentet operer med relative CO verdier ved 50 meter fra brannen, viser studien at CO mengden holder et høyt nivå opptil 300 meter fra brannen, mens temperaturen avtar mye raskere enn CO konsentrasjonen (Figur 5.2 C).

En annen viktig faktor som påvirker opptaket av CO, er graden av fysisk aktivitet (løping i tunnel bort fra brannstedet med røykgasser i luften langt borte fra brannen. Dette er vist i figur 5.3. hvor økt aktivitet øker opptaket av % COHb og opptaket øker med eksponeringstiden.



Figur 5.3. % COHb ved ulik eksponering av CO og aktivitet. Ved høy aktivitet øker % COHb ved CO-konsentrasjoner på 25 og 40 mg/m³. (Folkehelseinstituttet, 2019).

Karbondioksid (CO₂)

Denne gassen dannes det mest av i all forbrenning. Ved overskudd av oksygen i en forbrenning får vi CO₂. Ved oksygenmangel dannes CO. Karbondioksid dannes ved forbrenning av ulike organiske materialer og er en vanlig gass i tunnelbranner.

Cyanid (CN⁻)

Cyanidgass er 15 ganger så giftig som CO. Den dannes ved forbrenning av ulike plaststoffer (polyuretan) i bilkonstruksjoner (Murphy et al., 2011). I tillegg vil CN⁻ frigjøres dersom brannen når inn til PE skummet som ligger mellom betonglaget og råfjellet. CN⁻ binder seg meget sterkt til heme gruppen i hemoglobinmolekylet, slik at oksygen ikke lenger kan fraktes med blodet. I tillegg binder CN⁻ seg til mitokondriene, som er det siste leddet i utnyttningen av oksygen i produksjonen av adenosin trifosfat (ATP). Det er alle cellers energilager (batteri). ATP brukes i alle biokjemiske reaksjoner i cellene (Nelson & Cox, 2021). CN⁻ hemmer ATP produksjon kontant slik at alle kroppens celler kommer raskt i underskudd på ATP. Dette fører til umiddelbar sterk produksjon av melkesyre med svært lav pH (6.4) som hemmer bl.a biokatalysatorene (enzymene) i omsetningen av glukose. Dette kan føre til hjerneskade, hjertestans og død (Centers for Disease Control And Prevention, 2018).

5.1.4 Elbiler: Flussyre og Metalloksider.

Ved branner i elbiler dannes det en rekke giftige substanser der Hydrogenfluorid/flussyre er en viktig komponent (Willstrand et al., 2020). Elbilbranner gir også flere andre giftige gasser, f.eks. metalloksider (Tabell 5.1).

Tabell 5.1. Forbrenningsstoffer fra lithium-ion batterier. (Grunicke et al., 2020).

Tabelle 3 Zersetzungsprodukte während eines Lithium-Ionen-Batteriebrandes		
Stoff	Formel	Beschreibung (u.a. nach [25])
Fluorwasserstoff	HF	farbloses Gas mit stechendem Geruch, sehr giftig
Phosphoroxidfluorid	POF ₃	farbloses, stechend riechendes Gas, undefinierte Toxizität ([53])
Phosphorsäure	H ₃ PO ₄	farb- und geruchloser Feststoff oder Flüssigkeit, giftig
Flüchtige organische Verbindungen	VOC	kohlenstoffhaltige Stoffe, typisch als Gas vorliegend
Monophosphan	PH ₃	brennbares, giftiges, farb- und geruchloses Gas, sehr giftig
Schwermetallaerosole	Co, Ni, Mn	Staubförmige Rückstände in der Luft, sehr giftig

Flussyre er en sterkt etsende forbindelse som trenger lett gjennom hud og muskler. Cellemembraner og nerver blir raskt ødelagt. Hydrogenfluorid (HF) i gassform eller vannløsning (flussyre) har derfor svært høy toksisitet og gir alvorlige, dyptgående etseskader og risiko for livstruende systemisk forgiftning. Den systemiske toksisiteten skyldes hovedsakelig at dissosiert fluorid danner tungtløselige salter med vevskationer som kalsiumfluorid (CaF₂) og magnesiumfluorid (MgF₂). Kalsium og Magnesium er avgjørende for at hjertet og nervesystemet fungerer. Dermed er flussyre en stor trussel for alle biologiske systemer. Videre vil man også få generert en rekke tungmetalloksider som kobolt oksid (CoO), nikkeloksid (NiO) and manganoksid (MnO) (Helsebiblioteket, 2017; NTNU Kunnskapsbasen, 2015).

Samlet sett har Smith et al. (1994) gjort en studie av 1447 brannofre og fant at 284 ble utsatt for inhalasjonsskader og letaliteten var på 31 % (88 av 284 omkom). Brann i vegtunneler kan kompliseres av det avgrensede miljøet og at bestandigheten av tunneloverflatens stoffer kan bli dratt med i brannen og danne sekundære gasser, som f.eks. cyanid fra PE-skummet i tunnelveggen bak sementlaget. Cyanid er sterkt toksisk for personer som blir fanget i

tunnelbrannen (se kap. 5.1.3 og 5.2.1-5.2.4). I neste delkapittel skal vi se videre på de ulike effektene av ulike branngasser som kan føre til utfallene vist i studien til Smith.

5.2 Forskningsspørsmål 2: Hvilke akutte helseeffekter kan oppstå etter eksponering for de ulike toksiske gassene som kan oppstå ved brann i tunnel?

Litteraturen jeg har studert viste at det er akutte helseeffekter som har fått mest oppmerksomhet og at de kroniske virkningene ikke er blitt studert i utstrakt grad av helsevesenet. De fleste artikler er detaljert i de anatomiske og patofysiologiske prosesser etter branngasseksponering. Litteraturen gir en god grunnlagsteori og styrer derfor det vil jeg ta inn i oppgaven for å vise hvilke akutte og kroniske helseeffekter branngasser har på kroppen. Det er viktig å poengtere at det er flere gasser som kan gi samme symptomer initialt, men de kan ha ulike senskader over tid. Det kan derfor være at samme gass kan gi både akutte og kroniske helseeffekter. Derfor vil disse kapitlene være et retningsgivende grunnlag for tunnelsikkerheten overfor de myndigheter som har ansvar for den.

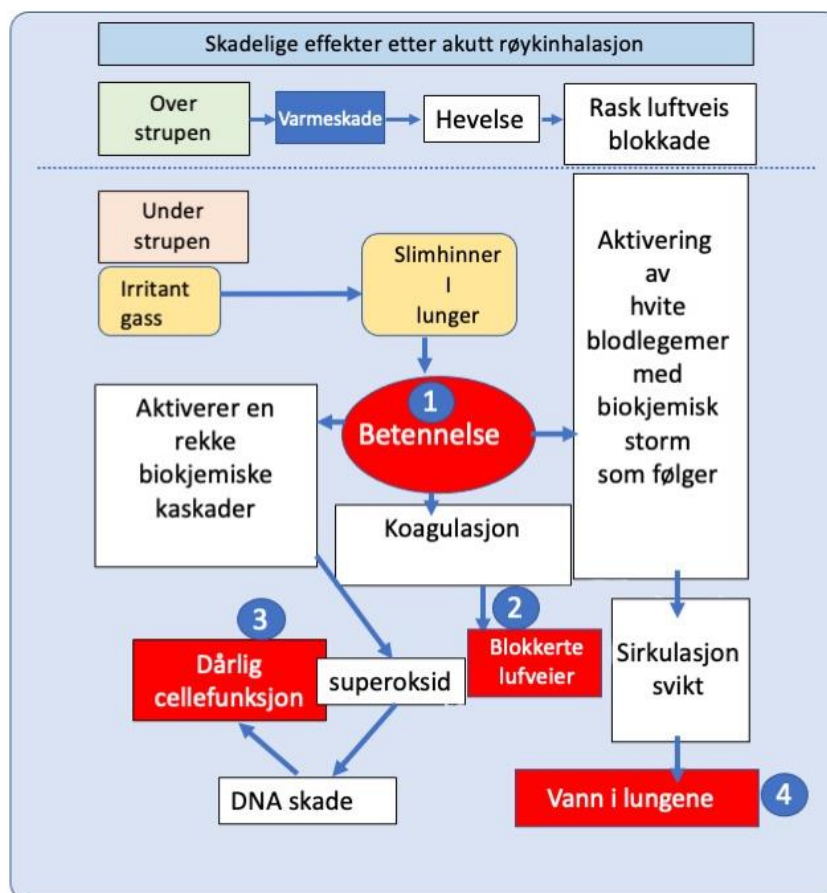
5.2.1 Lunger

Røyk fra branner består av en kompleks blanding av gasser og fine partikler som produseres når tre og andre organiske materialer brenner. En litt ukjent helsetrussel fra røyk er fra fine partikler. Disse mikro- og nanoskopiske partiklene kan trenge dypt inn i lungevevet. De kan forårsake en rekke helseproblemer, fra brennende øyne og rennende nese til forverrede kroniske hjerte- og lungesykdommer. Særdeles farlige er partikler $< 1 \mu\text{m}$ (nanopartikler). Når disse når ned i lungealveolene (lungeblærene) vil de øke luftveismotstanden, være irriterende og interferere med produksjonen av surfactant i lungealveolene. Surfactant fasiliterer oksygentransporten over alveolemembranen) (Toon et al., 2010, s. 53-61; Murphy et al., 2011). Nanopartikler er også med å trigge produksjonen av systemiske kaskadereaksjoner som kan være farlige for hele kroppen.

En annen viktig faktor er selve varmen av røyken som inhaleres. Man kan få indre brannskader som fører til hevelse og ødem (væskeansamling utenfor blodårene). Spesielt farlig er hevelse

ved strupehodet, som vil stenge for luftstrømmen nedover til lungene (Prien & Traber, 1988, s. 451-460). En slik situasjon vil fort være dødelig uten kyndig medisinsk behandling.

Lokalirritative gasser som fosgen, saltsyre, flussyre, ammoniakk og svovelsyre vil påvirke luftveiene og kan gi kjemiske skader av luftveiene, som trigger patofysiologiske kaskadereaksjoner. Saltsyre er en sterk syre og følgelig kunne føre til en kjemisk brannskade av cellene i luftveiene (flimmer celler, slimproduserende celler og muskelceller) fra nese/svelg til strupehodet, luftrøret, bronkiene og helt ned til lungealveolene. Skader i nedre luftveier starter med aktivering av betennelsesprosessene i vevet. Dette ender opp med: cellulær dysfunksjon; belegg inni større luftveier (bronkier og bronkioler); svikt i blodsirkulasjon (Figur 5.4), som fører til redusert oksygenopptak i deler av lungene og vann i lungealveolene og gir en sterk reduksjon av oksygenopptak i hele lungene.



Figur 5.4. Oversikt av akutte patofysiologiske mekanismer ved inhalasjon av brannrøyk. Det er prinsipielt fire viktige effekter av irritante gasser i luftveiene. 1. betennelse som fører til 2. blokkerte luftveier og 3. dårlig celledysfunksjon. I tillegg vil aktivering av hvite blodlegemer føre til en tsunami av biokjemiske uheldige reaksjoner som ender opp med vann i lungene (pkt. 4). Modifisert etter Toon et al., 2010.

Grunnen til at saltsyren kan komme helt ned i alveolene er at det binder seg til små partikler i brannrøyken (<1 µm) som kommer ned til alveolært nivå (Cohen & Guzzardi, 1983, s. 628-632). Ved en slik kjemisk brannskade vil man også få ødem i alveoleveggen (Skoog et al., 1981, s. 425), som vil kompromittere utvekslingen av oksygen og CO₂ mellom luften i alveolene og blodet. Dermed vil opptaket av O₂ i kroppen blir sterkt kompromittert (Dyer & Esch, 1976, s. 393-397). Dette skjer relativt raskt, i løpet av minutter (Trunkey, 1978, s. 1133-1140) og vil kunne medføre døden (Crapo, 1981, s. 1694-1696).

For den systemiske giftgassen CO er det for friske personer funnet en lineær sammenheng mellom karboksyhemoglobin (COHb) nivåer i området fra 5 til 20 % og maksimalt oksygenopptak. Tiden inntil utmattelse ved maksimal belastning er også brukt som mål på effekt. Den reduseres ved COHb-nivåer fra 2 til 20 %. Uten maksimal belastning er det ikke registrert noen effekter på oksygenopptak selv ved COHb-nivåer mellom 15 og 20% (Folkehelseinstituttet, 2019). De registrerte effektene ved maksimal belastning ved disse COHb-nivåene er så små at de bare er av betydning for toppidrettsutøvere.

Opptaket av CO i lungene skjer i to trinn. Det ene er innånding (inhalasjon) som gir økte CO-konsentrasjoner i alveolene. Det andre trinnet er diffusjon gjennom alveoleveggen over i blodet. Både innåndingen og diffusjonshastigheten av CO påvirker dermed opptaket av CO. De tre viktigste parameterne som bestemmer CO-nivåene i blodet er 1.CO-konsentrasjonen i innåndingsluften, 2.varigheten av eksponering og 3.grad av innånding (FHI, 2019). I tillegg varierer opptaket med alder, fysisk aktivitet og lungenes tilstand. Gjennomsnittlig (COHb)-nivå i den ikke-røykende delen av befolkningen er rundt 0,5-1,5 %. Dette nivået skyldes naturlig produksjon av CO i kroppen og eksponering for CO. Røykere har vanligvis COHb-nivåer rundt 3-4 % (FHI, 2019).

Brann i el-bil batterier generer en rekke tunge metalloksider. Et av de viktigste er kobolt oksid (CoO), som reduserer lungefunksjonen ved å danne CoO oksidanter og frie radikaler. Dette skaper hoste. Flimmerhårene i bronkiene blir ødelagt, noe som forverrer hosten. (Sheik, I., 2016). Fra batteribranner frigjøres også nikkeloksid. I lungene fører det til oksidativt stress som genererer kaskader med skade på selve lungeparenkymet inklusive cilie celler.

5.2.2 Sentralnervesystemet

Siden nerveceller er de mest sensitive for oksygenmangel vil CO forgiftning ramme hjernen først. Det er viktig å bemerke at allerede med et innhold i luft på 0,01 volumprosent CO nedsettes cerebral yteevne, 0,1 volumprosent fremkaller hodepine og illebefinnende i løpet av en time, og 0,5 til 1 volumprosent er tilstrekkelig til å fremkalle livsfarlige forgiftninger i løpet av fem til ti minutter (Se også tabell 5.3). Disse konsentrasjoner vil man fort kunne oppnå i en tunnelbrann og er dermed en meget farlig gass som man må ha respekt for i planlegging av sikkerhet i tunnelene.

Tabell 5.2. De viktigste akutte helseeffekter på hjernen ved økende konsentrasjoner av COHb (COHb = metning av CO i hemoglobinet i %). (Bleecker, 2015, s. 192).

COHb (%)	Akutte helseeffekt i mennesker
<1	Endogen CO fra nedbryting av hemoglobin. Ved disse konsentrasjoner er det påvist beskyttelse av nerveceller.
1-9	Tobakksrøykere. Man kan få brystmerter og redusert evne til trening pga. tette blodårer til hjertet.
15-20	Hodepine, forandringer i synsfunksjonen.
20-30	Sterk hodepine, svimmelhet, kvalme, slapphet, redusert evne til bevegelse, adferdsforstyrrelser.
40-50	Koma og kramper, lavt blodtrykk.
60-70	Dødelig, dersom ubehandlet.

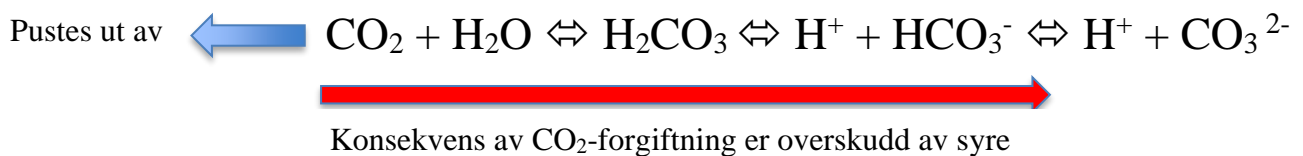
Et poeng er at dersom COHb er høy, er det større sjanse for at pasienten kan ha fått i seg andre farlige gasser, f.eks. cyanid (Clark et al., 1981, s. 1332 -1335).

Effekter av CO på oksygenforbruket i hjerneceller er studert. Selv ved konsentrasjoner opp mot 20 % COHb metning finner man ingen statistisk signifikante effekter. I en meta-analyse vedrørende adferdsforstyrrelser ble det observert 10 % reduksjon av utvalgte adferd parametere først ved 20 % COHb (Benignus, 1994, sitert i Bleecker, 2015, s. 193-194). EPA oppsummerer at verken hjerne- eller adferdsforstyrrelser kan registreres hos unge voksne ved nivåer lavere enn 20 % COHb, men at effekter på atferd først kan dokumenteres fra 20 til 30 % COHb. Denne

konklusjonen bekreftes av at oksygenforbruket i hjernen reduseres med 10 % når COHb-metningen er mellom 21 og 32 %.

Eksponering for svært høye konsentrasjoner av CO (ved forgiftningstilfeller) gir akutt hjerneskade (United States Environmental Protection Agency (EPA), 2022).

CO₂ -forgiftning vil forverre effekten av CO-forgiftning på hjernen. Vi har allerede CO₂ i kroppen. I innpustingsluften er det 0,5% CO₂, men i utåndingsluften har CO₂ steget til 5%. Pasienter med KOLS har ofte høyere CO₂ i blodet. CO₂ løses i vann til H₂CO₃ (Karbonsyre) som dissosierer til H⁺ og HCO₃⁻ og videre til H⁺ og CO₃²⁻.



Figur 5.5. Oversikt over karbondioksid-bufferligningen. Normalt sett skyves likevekten mot venstre og CO₂ luftes ut av lungene og reduserer syreinnholdet i blodet. Ved økt CO₂ i branngassene eller tette lunger skyves likevekten mot høyre og man får dannelsen av mye syre (H⁺). Dette kan være farlig for alle cellene i kroppen, da biokatalysatorene (enzymene) slutter å virke ved pH i overkant av 6.

Ligningen i Figur 5.5 viser at sure produkter i vevet (f.eks. melkesyre i musklene) buffres gjennom CO₂-ligningene slik at syren (H⁺) skyver likevekten mot venstre og CO₂ kan pustes ut gjennom lungene. På den måten kvitter vi oss med syreoverskudd gjennom lungene. Slik blir pH holdt stabil. Hvis derimot CO₂ mengden blir for høy i brannrøyk, vil denne bufferen ikke lenger klare å opprettholde pH-likevekten. I tillegg vil skadet lungevev med vann i lungealvoelene ikke slippe ut CO₂ på vanlig måte. Da vil det oppstå en forskyving av buffer likevekten i retning høyre og dannelse av syre (H⁺). Blodet blir da for surt og man får en lav pH. Det sure miljøet gjør at enzymene (katalysatorene) som omsetter glukose til energi (ATP) slutter å virke når pH er rundt 6 (Øyås, 2011). Denne energimangelen ved lav pH vil ramme alle celler spesielt hjerneceller og hjerteceller og føre til hjerneskade, hjertestans og evt. død. Således konvergerer CO, CN og CO₂ mot de samme patofysiologiske effekter: lav pH og dårlig effekt av biokatalysatorer (enzymmer)

5.2.3 Hjerte-kareffekter

For hjertet er også CO en svært toksisk gass. Det er viktig å bemerke seg at effekter på hjerte- og blodkar systemet som rytmeforstyrrelse i hjertet (rask eller sein hjerterytme), hjertekrampe og hjerteinfarkt kan komme allerede ved COHb nivå mellom 1% og 9% (Bleecker, 2015, s. 191-203).

Hos friske personer er det rapportert effekter på hjerterefrekvensen ved 15-20 % COHb ved maksimal belastning. Pasienter med kjent hjertesykdom synes imidlertid mer sensitive for CO eksponering. Dette gjelder spesielt dem med innsnevrede blodårer til hjertet (på grunn av aterosklerose) og dem med redusert evne til utvidelse av blodårer til hjertet (vasodilatasjon). For slike pasienter registreres de første tegn på hjertekrampe (angina pectoris) eller ischemia (manglende oksygen) ved 3,0-5,9 % COHb. Betydningen av de små effektene som registreres i de laveste COHb-områdene (rundt 3 %) er omstridt. CO vil kunne begrense aktiviteten og livskvaliteten til pasientene. Flere studier indikerer at gjentatte episoder med angina pectoris (hjertekrampe) vil kunne øke risikoen for hjerteinfarkt eller alvorlig arytmi (unormal hjerterytme). Det er vist at forhøyede COHb-nivåer kan gi slike rytmeforstyrrelser ved over 5 % COHb hos hjerte- og karpasienter, men først over 20 % COHb hos friske individer (Folkehelseinstituttet, 2019).

COHb-nivåer på over 40 % er dødelig for friske personer, men lavere nivåer kan være livstruende for eldre personer med hjerte problemer, småbarn og gravide (Engtrø & Haugen, 2003). CO-konsentrasjoner som fører til slike høye COHb-nivåer opptrer ved brann, ulykker eller selvmord ved bruk av bileksos. Befolkningsstudier som har sett på effekten av økte CO-konsentrasjonen i uteluft over kort tid (time- eller dagsverdier) i konsentrasjons-områder 1-60 mg/m³ viser sprikende resultater. Enkelte studier har vist sammenheng mellom CO og dødelighet, men i de fleste befolkningsstudier er det ingen klar sammenheng mellom CO og dødelighet (Folkehelseinstituttet, 2019). I en casestudie av en pasient som hadde en 10 år gammel stent i en av hjertekrans årene, fikk den 1 ½ time etter CO påvirkning fra brannrøyk symptomer på hjerteinfarkt. Undersøkelse viste at stenten i hjertekransåren var 100% tett. Pasienten fikk ny utblokking og ny stent uten komplikasjoner (Selçuk et al., 2017).

Coboltoksid fra batteribranner er et av de få toksiske stoffene som kan svekke hjertemuskelcellene (Kardiomyopati), gjennom ødeleggelse av nøkkelenzymer i hjertemuskelcellene. Kardiomyopati fører til hjertesvikt og død hvis man ikke får reversert den toksiske virkningen av CoO (Sheik, I., 2016). Nikkeloksid fra batteribranner kan generere en lignende effekt ved at det oksidet fører til mitokondriell dysfunksjon og derigjennom kardiomyopati (Genchi et al., 2020).

5.2.4 Fosteret

Fosteret er vanligvis beskyttet av morkake-barrieren mellom mors blod og fosterets blod. Det er imidlertid slik at fosterets hemoglobin (HbF) har enda større binding til CO enn morens hemoglobin. Derfor overføres CO fra moren til fosteret. CO-nivåene hos fosteret kan være opptil 10-15 % høyere enn hos mødrene. Under graviditet, har eksempelvis COHb-nivåer på mellom 0,7 og 2,5 % blitt rapportert hos ikke-røykende mødre (FHI, 2019).

Ved brann i vegtunnel vil fosteret få lenger og høyere eksponering av en CO-forgiftning enn det mor gjør. Dette kan føre til for tidlig fødsel og lav fødselsvekt. Dette kan tyde på at fostre, nyfødte barn og mødre under graviditeten er mer utsatt for CO-induserte effekter enn andre (FHI, 2019). Nikkeloksid passerer morkakebarriæren over til fosteret og kan gi en rekke skader der (Genchi et al., 2020).

5.2.5 Gasser med multiorgan effekter

Flussyre (HF)

Siden flussyre gir en rekke organskader i kroppen, behandles denne samlet her. Flussyre kan både gi overflateskader og farlige systemiske effekter (Kaushik & Bird, 2021) og behandles derfor under ett i denne oversikten. Den overfladiske etseskade skyldes frie hydrogenioner (syre ionet H⁺). Det gir en lav pH. Det gjelder kontakt med fuktigheten i øyne, slimhinner eller hud. Den sekundære skaden er imidlertid mye mer alvorlig og skyldes at flussyre penetrerer dypt inn i vevet. Inne i vevet vil reaktivt fritt fluorid reagere med kalsium og magnesiumioner og danne tungtløselige salter. Siden kalsium og magnesium er viktige for membranpotensialet i muskel- og nerveceller vil det påvirke disse viktige organene. Videre vil all cellulær metabolisme påvirkes, som kan lede til celledød. Det oppstår også systemiske effekter hovedsakelig relatert til lavt fritt kalsium. Fluorid-ionet (F⁻) har også en direkte hjertetoksisk effekt og kan gi arytmier.

Hudeksponering kan gi dyptgående etseskader, men også systemiske effekter. Ved eksponering på over 1 % av hudoverflaten med løsninger > 50 % eller eksponering på over 5 % av hudoverflaten (ca. 5 av pasientens håndoverflater) uansett konsentrasjon, er det fare for systemisk forgiftning. Tiden før symptomene oppstår avhenger av flussyre-konsentrasjon. Nyrene er spesielt utsatte for skade. I en preklinisk studie med rotter, fant man at Quercetin reduserte nyreskadene. Men det er usikkert om man kan overføre disse funnene til mennesker (Nabavi et al., 2012, s. 901-906).

Tabell 5.3. Sammenheng mellom konsentrasjon av flussyre og tid før symptomer utvikles. (Helsebiblioteket, 2017).

Flussyrekonsentrasjon	Tid før symptomer utvikles
0-20%	Inntil 24 timer
20-50%	1-8 timer
> 50%	Umiddelbart

I luftveiene er det en høy risiko for systemisk forgiftning etter inhalasjon av hydrogenfluoridgass (flussyre damp). Inhalasjon av hydrogenfluoridgass kan gi et vidt spekter av effekter, fra milde symptomer i øvre luftveier til luftveisobstruksjon, blødninger, lungeødem og død. Det kan ta inntil 24 timer før symptomene inntre.

Symptomer og kliniske tegn:

- Hoste
- Brennende følelse i luftveiene
- Brystsmerter
- Tungpustete og eventuelt blå lepper

De systemiske effektene er primært relatert til elektrolyttforstyrrelser, spesielt hypokalsemi.

Det er risiko for systemiske effekter ved:

- Inntak gjennom mage-tarmkanalen
- Inhalasjon gjennom lungene
- Eksponering på > 1 % av hudoverflaten for løsninger > 50 %*
- Eksponering på > 5 % av hudoverflaten uansett

- Elektrolytt- og syre/base balanse: Lav kalsium (med økning i parathyroidhormon sekresjon), lav magnesium, høy kalium og lav pH (surt blod).
- For hjertet er symptomene rask puls, lavt blodtrykk og evt. hjertestans, mens de nevrologiske bivirkninger er CNS-depresjon og kramper.

Coboltoksid (CoO) fra brann i bilbatterier (f.eks. el-biler) reduserer blodproduksjonen i den røde beinmarg. Videre har den en immunologisk undertrykkende funksjon med effekter på immunapparatet som følgetilstand. Den kan påvirke mage-tarmkanalen, hormon organer, øyet og kan gi nevrologiske skadelige effekter. (Sheik, I., 2016).

Nikkel oksid (NiO) kan føre til skader i nyrer, slik som flere tungmetaller kan gjøre. Det er fordi de skilles ut i urinen og vil følgelig kunne skade nyrevevet (Genchi et al., 2020).

5.2.6 Sammenstilling av funn

Det er fire organsystemer som oftest blir rammet ved inhalasjon av branngasser/røyk: hjerne, lunge, ansikt/oropharynx og hjertet (Cohen & Guzzardi, 1983, s. 628-632). Det er de vitale organene som først blir rammet av de giftige gassene. Det er lunger, hjerte og hjerne. En oversikt over dette er vist i matrisen i Tabell 5.2. I oversikten under er ansikt ikke tatt med som egen kategori, men det går inn under hud/slimhinner og delvis lunge.

Tabell 5.4. Matrise over helseeffekter ved eksponering av ulike branngasser.

Organ \ Gass	CO	Fosgen	CN-	HF	Co2	Sot	NH3	H2SO3
Lunge		Ødem i bronkier Og lungevev	Total oksygen-blokade	Etseskader	Økt pustefrekvens. Forsøker å bli kvitt CO2.	Partikler som transporterer gasser i lunger. Nanopartikler aktiver patofysiologiske kaskader	Etseskader	Etseskader
Hjerne	Oksygenmangel Celledød Kognitive forstyrrelser	-	Celledød	-	Sur pH Redusert funksjon av hjernen. Koma	-	Koma	-
Hjerte	Oksygenmangel Celledød Arytmi Infarkt	-	Celledød	-	Sur pH Redusert funksjon	-	-	-
Nyrer	Oksygenmangel Celledød	-	-	Skade av nefroner i nyrevevet	-	-	-	-
Hud/slimhinner		-	-	Etseskader	-	-	Penetrasjon	-
Systemiske effekter		-	-	Vevspenetrasjon Elektrolytt-forstyrrelser som kan gi hjertestans	Total acidose i hele kroppen. Enzymer slutte å fungere.	-	pH i basisk retning. Enzymer slutter å fungere	-
Foster	Langvarig oksygen blokkade Vekstretardasjon	-	Død	-	Redusert pH	-	-	-

Varme er mest farlig for de øvre luftveier (Murphy et al., 2011). Irritante substanser angriper først og fremst de nedre luftveiene. De systemiske substansene påvirker hele kroppen. Som vi har sett i kapittel 5.1 vil branngasser inneholde prinsipielt tre farlige komponenter; 1. Varme, 2. Lokal irritative gasser (fosgen, H_2SO_3 (svovelsyring) og NH_3 (ammoniakk), og 3. systemtoksiske gasser (CO , CO_2 og CN^-) (Tabell 5.2). Alle disse faktorer virker sammen i de patofysiologiske prosesser. Det viktige er at de ulike betennelsemessige mediatorer setter i gang biokjemiske kaskader som konvergerer mot de samme patofysiologiske effekter.

Når vi ser det vide spekteret av gasser som utvikler seg i bilbranner er det ikke vanskelig å tenke seg at man kan bli eksponert for flere faktorer samtidig som griper inn i hverandres patofysiologi. Eksempelvis vil varmeskader i luftvegene vanskeliggjøre oksygenering av blodet dersom man har fått CO forgiftning i tillegg. Videre vil eksponering av koboltoksid svekke hjertet og derved oksygenering av blodet i lungene og i resten av kroppen. Derfor må man ved bilbranner i vegtunneler tenke på kombinerte toksiske effekter som kan forsterke hverandre. Ikke bare tenke på CO eksponering, noe som kan måles.

5.3 Forskningsspørsmål 3: Kroniske og latente helseeffekter etter eksponering for toksiske forhold ved brann i tunnel

I litteratursøket mitt fant jeg svært få artikler som omhandlet kroniske helseeffekter. Det kan henge sammen med at røykeeksponerte tilsynelatende ser friske ut og dermed er det ikke gjort studier. Jeg fant at eksponering for partikkelforurensning generelt er knyttet til for tidlig død (EPA, 2022). Spørsmålet er om eksponeringen fra bilbrann i tunnel kan gi samme effekt. I det videre bruker jeg organtilnærming i fremstillingen av resultatene, dvs. ser på alle gasser som påvirker hjernen, lunger osv.

5.3.1 Sentralnervesystemet (hjernen)

Dersom COHb nivået kommet over 40% med bevisstløshet som følger, da kan man etter en latensperiode på 2-40 dager få forsinket neurologisk senvirkning. Grunnen til at det kommer så sent er at den akutte påvirkningen av CO vil sakte men sikkert ødelegge nervefibrene i sentralnervesystemet, som vil gi kroniske neurologiske seneffekter (Lee, 1978, s. 374-385).

Nevropsykologiske abnormiteter etter kronisk CO-eksponering er funnet selv når magnetisk resonansavbildning (MRI) og magnetisk resonans spektroskopi er normale. Skade på nervetrådene (White matter= myelinet i nervefibrene) i sentrale deler av hjernen er oftest sett på MR etter CO-eksponering. Selv om de ikke er like vanlige, er toksiske eller oksygenmangel skade på perifere nerver assosiert med CO-eksponering hos mennesker og dyr.

De områdene i hjernen som oftest blir affisert er hjernebarken (som har mange ulike funksjoner: sensorikk, motorikk, språk osv.), hippocampus (hukommelse) og lillehjernen (bevegelse/balanse) (Okeda et al, 1981, s. 1-10; Park & Choi, 2004, s. 363-366).

COHb-nivåer mellom 30 % og 70 % fører til tap av bevissthet og til slutt død. Etter opphør av akutte symptomer kan det være et symptomfritt intervall på 2-40 dager før utvikling av forsinkede neurologiske følgetilstander i CNS slår til. Slike skader er diffus skade på nervetrådene i hjernen ledsaget av sløvhet, atferdsendringer, glemsomhet, hukommelsestap og Parkinson trekk. Syttifem prosent av pasientene med affeksjon i CNS blir friske innen 1 år (Bleecker, 2015). Det vil si at 25% får vedvarende neurologiske skader mer enn ett år etter CO eksponeringen.

Hos en pasient har man påvist neurologiske senvirkning som depresjon, kognitive forstyrrelser med redusert evne til å lære opptil 14 år etter røykeeksponering av brann i interiøret av en bil. Det var også ledsagende funn på PET-scann av hjernen, som viste permanente patologiske endringer uten bedring i løpet av disse 14 årene (Tobe, 2012). Andre har også funnet kroniske kognitive senskader etter CO eksponering (Weaver et al., 2002).

Personer som har vært eksponert for brann generelt sliter med kroniske cerebrale seneffekter, som for eksempel posttraumatisk stressyndrom (PTSD) (Palgi et al., 2020). Vi har ingen publiserte studier i Norge som tar for seg dette funnet. Det er derimot, i en rapport om Oslofjordtunnelen, utført intervjuer med trafikanter som er utsatt for brann i tunnel, hvor den traumatiske opplevelsen blir belyst (Njå & Kuran, 2014). Man vil trolig finne et lignende bilde dersom det utføres studier på post-traumatiske effekter av å oppleve brann i tunnel. Videre har man blant brannpersonell sett øket kronisk tretthet (fatigue) og depresjon, slik som kjente langtidseffekter av eksponering for røyk og flammer (Chiu et al., 2011). Trolig kan slike neurologiske senvirkninger også forekomme hos brannrøykeeksponerte i tunneler.

Sentralnervesystemet påvirkes fort av cyanid gassene og kunne gi hjerneskade flere plasser i hjernen og død. Dersom en overlever vil man kunne utvikle kroniske skader som bl.a. redusert kognitive evner. Også Cobolt Oksid (CoO) kan gi latente /kroniske skader i hjernen. Det kan være redusert hukommelse, mental status og depresjon. (Sheik, I., 2016).

Det er få befolkningsstudier som har undersøkt om slike effekter kan forekomme ved langvarige, mindre økninger av CO-konsentrasjoner i uteluft. Derimot er det enkelte holdepunkter for at oppvekst i byområder med høy luftforurensning (som Mexico City) gir redusert vekst av hjernen og konsekvenser for den mentale utviklingen. Det er uklart hvilke luftforurensnings-komponenter som bidrar, men økte betennelsesreaksjoner kan være involvert. Dette retter mest oppmerksomhet mot komponenter som fine partikler, og ikke CO (Folkehelseinstituttet, 2019).

5.3.2 Hjerte/kar systemet

Karbonmonoksid er en helsefare som gir vanskelige diagnostiske utfordringer. Karbonmonoksidforgiftning kan forårsake kardiovaskulære påvirkninger, som til tider kan forårsake pustestans (Bleecker, 2015, s. 191-203).

5.3.3 Lunger

Coboltoksid (CoO) aktiverer immunapparatet og gir en kronisk inflammasjon i lungevevet som senere kan gi lungefibrose (Sheik, I., 2016). Den samme langtidseffekten på lungene finner vi hos Nikkeloksid (NiO). Nikkeloksid kan på sikt skape en allergisk reaksjon mot nikkel. Det viktigste ved NiO eksponering er at det kan gi utvikling av lungekreft via epigenetiske mekanismer (Genchi et al., 2020).

I litteraturen er det ikke flere dokumenterte seneffekter på lunger. Men man må anta at det vil være flere med luftveisplager slik som: såre slimhinner, redusert lungekapasitet og kronisk obstruktiv lungesykdom (KOLS). Det må dertil vel designerte studier kunne avsløre (Se kapittel 6.11).

I neste forskningsspørsmål vil jeg ta for meg hvordan de ulike medisinske aktørene i Norge praktiserer monitorering av helseeffekter av brann i tunnel.

5.4 Forskningsspørsmål 4: Hvilken praksis er det i Norge for monitorering av ulike helseeffekter av personer eksponert for de ulike toksiske gassene, som kan oppstå ved brann i vegtunnel?

Vi har sett at litteraturen er mest fyldig på akutte helseeffekter av branngasser på mennesker, mens det er kunnskapshull på langtidseffekter. Dette vil prege fremstillingen av monitoreringen av helseeffekter i dette kapitlet. De akutte helseeffektene peker spesielt på effekter på lunger, hjerne og hjertet. Men det er også viktig å være klar over de toksikologiske effekter de ulike branngasser har og monitorere målrettet. Eksempelvis er flussyre med påvirkning av nervefunksjoner, fosgen med mange virkninger i luftveiene, CO og CN- som fortrenger oksygen. Disse medisinske truslene får følger for monitoreringen av pasientene. Overvåking av symptomer er viktig og for å forstå de patofysiologiske bakenforliggende prosesser, som vil få følger for det kliniske arbeidet. Viktige faktorer å ta i betraktning i monitoreringen er konsentrasjon av ulike branngasser, eksponeringstid og individuell sårbarhet. Kapitlet videre er delt opp i tre nivå for monitorering av eksponering for branngasser. Inndelingen tar for seg de omtalte gassene og de tre nivåenes monitoreringspraksis. Under forklares nivåene:

Nivå 1: Akutt nivå - prehospitalt (sykebil) (Appendiks A og B).

Formålet med monitorering på dette nivået er behovet for akutt intervensjon av sikring av sirkulasjons- og respirasjonsstans.

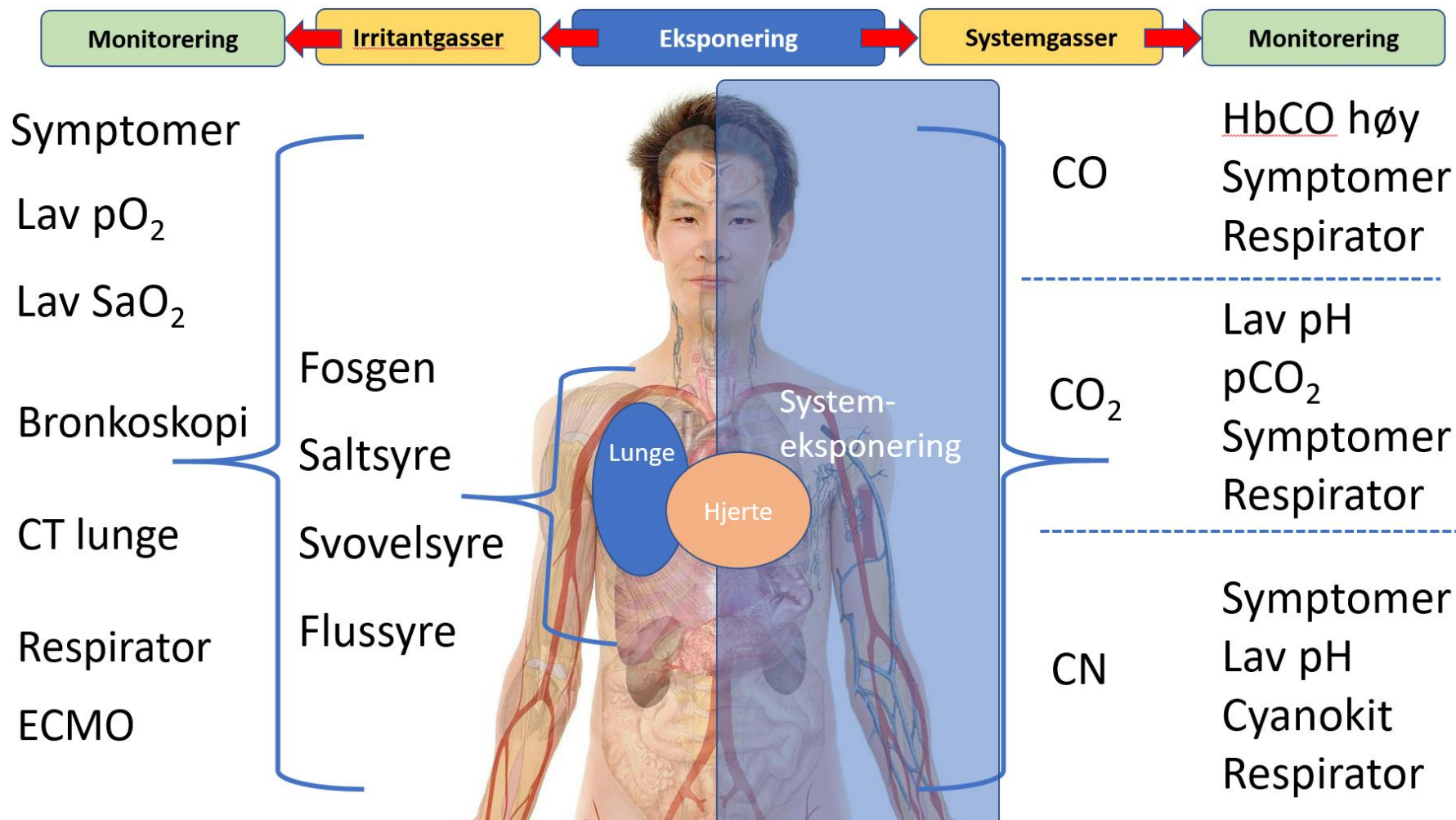
Nivå 2: Akutt nivå - Sykehus. (Appendiks C, D og E).

Formålet med monitorering på dette nivået er knyttet til behandling og første rehabilitering. En skal sikre at pasienten kommer gjennom dette med livet i behold og uten varige organskader.

Nivå 3: Kroniske nivået i spesialisthelsetjenesten og hos fastlege. (Appendiks C, D og E).

Formålet med monitorering på dette nivået er å oppdage eventuelle langtidseffekter, slik at en kan iverksette nødvendig rehabilitering.

Under (figur 5.6) gis en oversikt over irritante- og systemgasser og hvilke monitoreringstiltak som en bruker i dag. Grunnet manglende monitorering, er metalloksider utelatt fra fremstillingen og omtalelsen videre i dette kapitlet.



Figur 5.6. Forenklet oversikt over monitoreringspraksis for de viktigste branngassene. Behandling og monitorering overlapper ofte, da behandlingsmetoder gir mulighet for bedre monitorering. Eksempelvis respirator og ECMO (Ekstra corporal membran oksygenering). Se figur 5.4 for detaljer vedr. virkningen av irritante gasser på lungene. pO_2 : oksygentrykket i blodet, SaO_2 : metning av oksygen i blodet, pCO_2 : CO_2 trykket i blodet, $HbCO$: mengden CO bindet til hemoglobin. Harald Sjøiland – 2022.

For å unngå gjentakelse omtales de irritante gassene kun i figur 5.6 og ikke i kapittelet for øvrig. Gassene er omtalt i kapittel 5.2 og i appendiks C, D og E.

5.4.1 CO

Akutt prehospitalt nivå

- a) Monitorering av symptomer.

Symptomene på CO-forgiftning er først uspesifikke som hodepine, utmattelse, kvalme og svimmelhet.

Ved alvorlig forgiftninger: bevissthetstap, kramper, synkope, koma, oksygenmangel i hjertet, rytmefeil i hjertet og vann i lungene

- b) Monitorering av CO i blodet

CO bundet til hemoglobin (HbCO) kan måles ved hjelp av avansert pulsoksymeter. som skiller om det er oksygen eller CO som er bundet til hemoglobin. Ikke alle sykebler har dette utstyret om bord.

Akutt hospitalt nivå

- a) Stratifisere pasientene i risikogrupper

Høy risiko gruppene: Barn, eldre, gravide/foster, eller pasienter med sykdommer i hjernens eller hjertets blodårer.

- b) Felle ved CO-forgiftning: dårlig korrelasjon mellom CO-Hb% og alvorlighetsgrad av forgiftning. Nytt av hyperbar oksygen er omdiskutert.

- c) Vær oppmerksom på faren for sentralnervøs eller hjertepåvirkning.

1. Mild forgiftning:

Hodepine, svimmelhet, synsforstyrrelser, kvalme og oppkast, diare.

2. Moderat forgiftning:

Forvirring, redusert bevissthet, hurtig puls, hjertekrampe, åndenød og rask pust.

3. Alvorlig forgiftning:

Lavt blodtrykk, uregelmessig puls, manglende oksygen i vevene, hjertestans,

vann i lunger, respirasjonsstans, kramper, koma, lav pH som hemmer enzymene.

d) Klinisk undersøkelse:

1. Hud ("kirsebærrød")
2. Nevrologisk us. inkl. Våkenhetsgrad (Glasgow Coma Scale)
3. Blodtrykk, puls, temperatur og oksygenmetning (SpO₂).

OBS! SpO₂ kan være "falsk normal", da sensor ikke skiller mellom oksygenert Hb og CO bundet til hemoglobinet (COHb).

e) Karboksyhemoglobin (COHb). Avklares med arteriell blodgass (blodprøve tatt fra en arterie, oftest håndleddet eller i lysken) på apparat med CO-oksymeter.

f) Supplerende Undersøkelser:

1. Arteriell blodgass som måler Oksygen, CO og CO₂. Dessuten pH, elektrolytter (natrium, kalium og kalsium) og total surhetsgrad.
2. COHb, oppgis på blodgass i prosent
3. Syrebase-status (lav pH som skyldes produksjon av melkesyre i vevene) og glukose. EKG, evt. overvåking av hjerterytmen.
4. Lab: Glukose, melkesyre, hjertemuskelmarkør (troponin), nyrefunksjon (kreatinin) Natrium, Kalium, etanol, evt. CO i venøst blod (Heparin-rør).
5. Bestemmelse av karboksyhemoglobin (COHb) er nødvendig for sikker diagnose av CO- forgiftning. COHb måles ved vanlig blodgassanalyse, men kan også måles i EDTA-blod (etylendiamintetraeddiksyre).

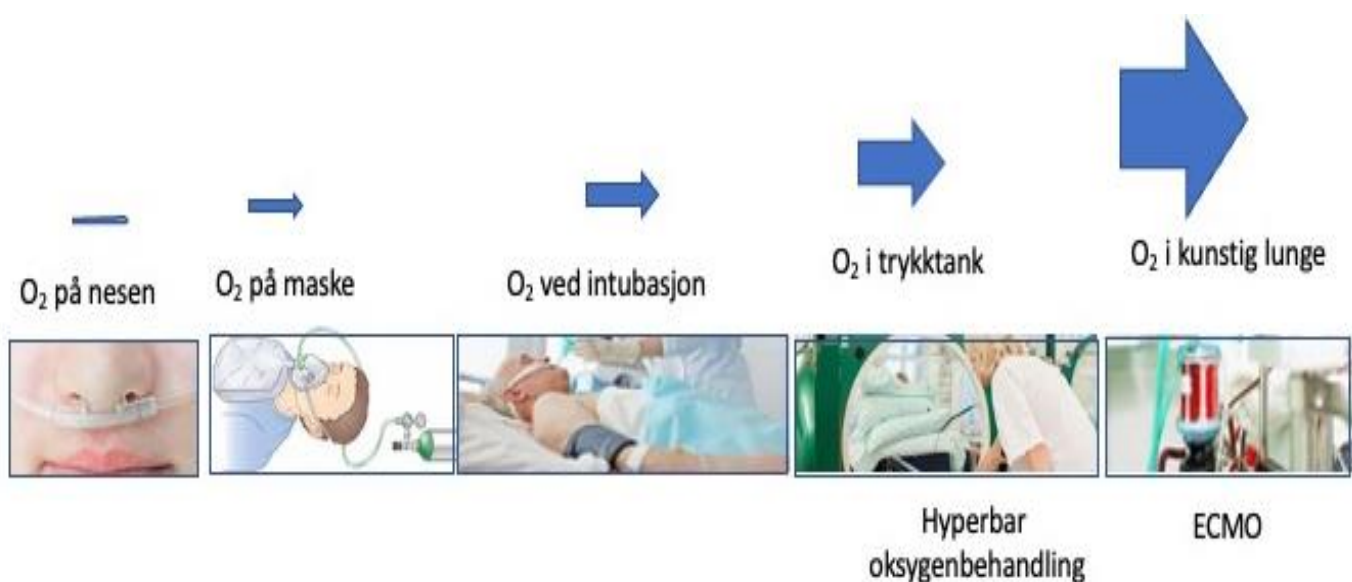
6. Pulsoksymetermålt oksygenmetning (SpO₂) påvirkes av COHb og kan ved CO- forgiftning ikke brukes til å bedømme oksygenering. Dokumentasjon på sammenheng mellom målt COHb verdi og kliniske symptom er høyst ufullstendig. Hodepine, kvalme/oppkast og lufthunger er angitt ved COHb >30 %. Sterkt rødlig hud- og slimhinne-farge ("cherry-red") ses ikke alltid, men er angitt å være typisk for COHb >40 %.

Første COHb prøve som tas, vil avhengig av tid som er gått siden eksponering og senere O₂ tilførsel, vise vesentlig lavere COHb verdi enn på skadestedet. Det har vært vanlig å regne med at CO-Hb blir halvert etter knapt 60 minutter ved 100% O₂.

g) Røntgen undersøkelser ved behov

1. Røntgen av lunger
2. CT av hjerne/lunge
3. MR av hjerne

h) Prinsipiell behandling av CO-forgiftning. (Figur 6.1) Oksygen på nese, maske og intubasjon kan skje prehospitalt. Dersom behov for trykktank (Økland et al., 2020) eller kunstig lunge (ECMO) (Pellegrino, 2014) må man fly pasienten til et regionsykehus. Det kan bli aktuelt hos noen pasienter. Dog er bruken av de to sistnevnte behandlingsformene noe omdiskutert og uavklart på grunn av manglende erfaring.



Figur 5.7. Oversikt over de ulike nivå av oksygenbehandling ved CO forgiftning. I sykebil kan de tre første nivå forekomme dersom anestesilege er kommet til skadested. Trykktankbehandling og kunstig lunge foregår på regionsykehus.

Kronisk nivå

Ved luftveissymptomer skal pasienten observeres i sykehus minst 24 - 48 timer med tanke på utvikling av ødem i øvre luftveier eller respirasjonssvikt. Husk spirometri og måling av gassovergang gjennom alveolemembranen i lungene, blodgasser (oksygen og CO₂) og røntgen bilde av lungene før utskrivning, evt. oppfølging ved Lungepoliklinikken på sykehuset.

Alle pasienter som skrives ut må få beskjed om å ta ny legekontakt ved feber, økt dyspne, hoste eller tetthet i brystet den første uken etter utreise.

Det finnes kasuistiske informasjon som er svært interessant. En 46 år gammel mann ble eksponert for gasser av uviss komposisjon i en bilbrann i et verksted. Han fikk 14 års oppfølging med kognitive tester og PET-scan. Man fant tydelige reduserte kognitive funksjoner og forandringer på hjernecellefibre sentralt i hjernen). Det var ingen bedring på de 14 årene man fulgte opp pasienten. De konkluderer med at den originale skaden mest sannsynlig resulterte fra hypoksi og nevrotoksisitet (Tobe, 2012). Dette kan tyde på at det har vært flere gasser som f.eks. CO og CN- til stede.

Dette kan tyde på at det kan være store mørketall når det gjelder kognitive seneffekter etter CO-eksponering i tunnelbranner, som også sett i kap. 5.3.1.

5.4.2 Cyanid (CN)

Akutt prehospitalt nivå

a) Monitorering av symptomer

1. ved lave konsentrasjoner: Hodepine, kvalme, brekninger, store pupiller, lufthunger, påvirket bevissthet.
2. Etter hvert hjerterytmeforstyrrelser og lavt blodtrykk.
3. Symptomer ved høyere konsentrasjoner: Hjerne påvirkning, voldsomme pustebevegelser, kramper og bevisstløshet. Store, nesten lysstive pupiller. Ustabil sirkulasjon, hjertestans. Vurder rask assistanse for administrasjon av motgift (CyanoKit)

Akutt hospitalt nivå

a) Symptomer og funn.

Mistenk cyanid-forgiftning ved brann i lukket rom, spesielt hvis pasienten har alvorlig metabolsk acidose. Misforhold mellom COHb, melkesyre og arteriell og venøs oksygenmetning. Ved røykinhalasjon og serumnivå av melkesyre > 10 mmol/L bør samtidig cyanidforgiftning mistenkes og cyanid motgift gis. Eller forhøyet melkesyre i serum uten samtidig forhøyet CO-Hb eller lavt blodvolum. Hurtigtest for cyanidforgiftning finnes ikke og hydroksokobalamin (Cyanokit) 5 g (til voksne) i.v. anbefales som motgift ved mistanke (det gir rødlig misfarging av huden og lilla farget urin).

Kronisk nivå

Etter oksygen behandling skal pasienten henvises til nevrologisk vurdering med Elektroencephologram (EEG) og nevropsykologisk undersøkelse ved Yrkesmedisinsk avdeling. Disse undersøkelser skal gjentas etter 6 uker og 12 måneder. Henvisning til psykiater bør gjøres for å avdekke kognitiv svikt, posttraumatisk stress-syndrom eller depresjon.

5.4.3 Sotpartikler

Akutt prehospitalt nivå

- a) Monitorering av symptomer og tegn til truet luftvei:
Skade hode, ansikt og nakke.
Inhalasjon av varme branngasser eller damp?
Sot i nese, munn, svelg og svidde ansiktshår, hovne slimhinner.
Heshet, vansker å puste inn eller ut.

Akutt hospitalt nivå

Inhalasjonsskade brukes som betegnelse på forandringer i luftveier og lunger som følge av inhalert røyk (sot partikler), gasser og opphetet luft/damp. Nedenfor struphode-nivå er kjemisk slimhinneskade vanligere enn termisk.

Monitorering av luftveier via:

Bronkoskopi (fleksibel lysfiberopptikk for å visualisere luftveiene) med rensing av luftveier ved inhalasjon av mye sot. Se etter tegn på luftvei-irritanter f.eks. vann i lunger, inhalasjon av lite vannløselige gasser (klor, nitrøse gasser og fosgen). Disse gir en kjemisk betennelse i luftrøret og bronkiene som videre ofte fører til lungebetennelse. Inhalasjonsskade og eventuelle sekundære komplikasjoner forverrer prognosen ved brannskade. De fleste pasienter som overlever alvorlig inhalasjonsskade vil lungemessig greie seg godt.

- a) Fortetning av øvre luftveier. Dette er oftest følge av kjemisk og/eller varme

skade.

Den sekundære ødemutvikling i slimhinnene kan inntre i løpet av få timer og gi betydelig innsnevring av luftvegene. Dette kan særlig være dramatisk hos mindre barn.

- b) Kjemisk betennelse i bronkiene. Skade av slimhinner i nedre luftveier (under stemmebåndene i strupehodet) er nesten alltid en kjemisk skade. Dette skyldes inhalasjon av røyk, sot, gasser og damper. Kunstige tekstiler vil ofte gi sterkt etsende gasser ved forbrenning (aldehyder, f.eks. formaldehyd=formalin). Sekundært er lungebetennelse svært vanlig.
- c) Lungeblære skade. Dette kan ses ved alvorlige inhalasjonsskader, og spesielt ved inhalasjon av damp.

Ved disse tilstandene vil respiratorbehandling være aktuelt. I tillegg kan medisiner som åpner opp luftvegene (atropin/ventolin) og som demper betennelsen (steroider) være aktuelt. Her vil man kunne overvåke pasientens oksygen, CO₂ og CO innhold, samt syre/base status kontinuerlig.

Kronisk nivå

I litteraturen er det angitt få kroniske oppfølgingsrutiner for sot. Men det er enighet om at inhalering av sot kan være kreftfremkallende (Leikauf et al., 2020). Det er viktig å anta at sot-eksponerte kan ha fått i seg andre giftige gasser (se kap. 5).

5.4.5 Monitoreringspraksis vurdert opp mot kunnskap

Over er det beskrevet monitoreringspraksis i de ulike nivå knyttet til flere av branngassene. Derimot ser man at det er noen mangler i forhold til det som ble omtalt i kap. 5.1-5.3. Det er ikke alle de toksiske gassene som er nevnt og hele symptom bildet til noen gasser er ikke nevnt. For eksempel er ikke metalloksider nevnt og klogassen sine effekter (membranpotensialforskyvning, hypokalsemi og utsettelse for nyreskade) står ikke beskrevet i fagbøkene til de medisinske aktørene.

Dette viser at det er et manglende kunnskapsgrunnlag ved dagens monitoreringspraksis. Årsaken til dette kan være flere. For det første kan det være manglende fokus på oppdatering eller syntetisering av eksisterende kunnskap fra faglitteraturen. For det andre kan det være at

kunnskapen enda ikke har blitt utarbeidet og forsket på og at den da ikke finnes i faglitteraturen. For det tredje kan det være manglende informasjon om hvilke toksiske gasser personer har blitt utsatt for og hvor stor konsentrasjonen har vært. Dette blir diskutert mer i kap. 6.

6. Diskusjon

6.1 Oppgavens aktualitet

Bilbrann i vegtunneler er en aktuell samfunnsikkerhetsmessig problemstilling. Det viser både historikken i kapittel 1 og ikke minst det aktuelle nyhetsbildet med tre tilløp til brann i bil i vegtunnel mens jeg skrev oppgaven (Birkemo, 2022). I tillegg er det mange utenlandske vogntog som inntatt norske veier med dårlige bremseanlegg.

De mange vegtunneler i Norge er spredt rundt i hele landet og har ulik alder. Dermed har de ulik oppgradering mtp. bygningstekniker, sensorsystemer og rømningsveier (Statens Vegvesen, 2022). Noen tunneler har brannvesen rett utenfor tunnelåpningen (den nye Ryfast tunnelen i Stavanger), mens andre har mye lenger avstand. Når brannvesenet har lang avstand, har den medisinske akutthjelpen ofte lengre avstand. Noen tunneler har rømningsvei, mens andre har det ikke. SOS-rom har man sluttet å bruke etter at man påviste lekkasje av branngasser inn i slikt rom i Mt. Blanc tunnelen i 1999 (Fielding, 2003).

Derved er det en stor heterogenitet med tanke på sikkerhet i norske vegtunneler. Er det også stor heterogenitet i sikkerhetstilstanden i tunnelene?

6.2 Grunnleggende sikkerhetsprinsipp for tunnelforvaltningen og menneskers eksponering av branngasser.

For å sette den medisinske kunnskapen inn i sikkerhetsstyringen av tunnelsystemet, kan man se på noen prinsipper som ligger til grunn for styringen. Disse kommer igjen i resten av kapitlet. Under presenteres disse prinsippene kort og vinkles inn mot den medisinske kunnskapen om branngasser.

- 1 Selvregulering og 0- visjonen: Selvregulering av beredskapen betyr at aktører på ulike nivå i systemet har en viss frihet i arbeidet med beredskap. Dette er i og for seg greit nok, da funksjonskrav som regel gjør beredskapen mer adaptive. Derimot kan det også by på visse utfordringer (se kap. 6.6) 0-visjonen sier at det skal ikke bli noen drepte eller hardt skadde på veiene (Statens Vegvesen, u.å.). Dette vil da også gjelde akutt og langtids helseeffekter av røykeksponering i tunneler. Er det akseptabelt å la mennesker bli eksponert for røyk? Det er i hvert fall noe man må ta på alvor, spesielt da det er manglende kunnskap og mange usikkerhetsmomenter.

- 2 Samvirke: Er et av fire sentrale beredskapsprinsipp i Norge (Regjeringen, 2021). Det lyder slik: *Myndigheter, virksomheter og etater har et selvstendig ansvar for å sikre et best mulig samvirke med relevante aktører og virksomheter i arbeidet med forebygging, beredskap og krisehåndtering* (Regjeringen, 2021). Dette prinsippet er i likhet med Levesons fokus på kommunikasjon mellom leddene i kontrollstrukturen. Her kan man f.eks. dra frem hvordan den medisinske kunnskapen kan påvirke de som kommer først til pasienten. Her må man tenke utenfor boksen. Brannmannskap har per i dag ingen ansvar for røykskadde pasienter. Her kan f.eks. brannvesenet ha med seg masker å sette på pasienten inne i røykhavet. Det kan gjøre en forskjell (Tidsskriftet "Brann og Redning, 2012).
- 3 Selvredning: De som er fanget inni tunnelrøyken vil måtte berge seg selv. De som eier tunnelene, må forstå den rådende medisinske kunnskap med de potensielt dødelige forhold som oppstår i bilbranner i tunneler (Tønseth, 2015). Dette for å kunne utforme sikkerhetsbegrensninger til utforming av tunnelen og ulike sikkerhetstiltak som gjør trafikanter i stand til å kunne evakuere på egenhånd. Den medisinske kunnskapen vil kunne bidra til å si noe om sårbarhetene til mennesket. Dette er viktig kunnskap som kan utvikle prosessmodellene til ansvarlige kontrollører i tunnelsystemet slik at bedre sikkerhetsbegrensninger kan implementeres.
- 4 Universell utforming: Det er en utfordring å ha samme regler i de ulike tunneler (Njå & Braut, 2019, s. 70). Eksempelvis vil en tunneleier stenge for transport av traktor eller ved farlig last, mens en annen eier vil ikke det. Man må ha samme innsikt, både teknisk og medisinsk for transport i tunell (Direktoratet for Byggkvalitet, u.å.). Når brannmannskapet går inn i en tunnelbrann og ventilasjonen settes på for fullt, vil de kunne eksponere mennesker for branngasser de ikke har kunnskap om.

6.3 Tid, dimensjonerende hendelser og langtidseffekter

Ved brann i vegtunneler er tidsaspekter uhyre viktig. Branner kan utvikle seg eksplosivt med en voldsom røykutvikling som følger. Da er det naturlig å betrakte tidsaspekter og hvor god tid en egentlig har på seg til å berge seg selv ut av røyken og tunnelen (Østrem & Njå, 2019). For eksempel vil det være relevant å vite hvor lang tid det tar å komme seg ut av en 3-km lang tunnel. Litteratursøket mitt viser at disse flyktende menneskene er røyk- og CO eksponert og har derved redusert bevegelsesytelse. Løping øker CO-opptaket i kroppen betraktelig, slik at disse må behandles raskt og måle CO- metningen straks i sykebil. Dette må fremskutt

medisinsk kompetanse vite om og vil ha direkte konsekvenser for tilgjengeligheten og ytelseskravet til nødstatene. Man må bla. ha mulighet til å måle CO ute i felten og evt. gi high-flow oksygen. Redning og begrensingen av helseskader hos disse menneskene er tross alt førsteprioritet. I tillegg vil det også være viktig å tenke på hvor lang tid det tar for nødstatene å komme seg skadestedet, slukke brannen, evakuere trafikanter i tunnelen og monitorere og behandle helseeffektene til de eksponerte for branngasser.

I et tunnelsystem bør man innføre dimensjonerende hendelser og beredskapssystemet bør ha en universell utforming. Man bør konkretisere hva man klarer å håndtere i en tunnel og samtidig bevare sikkerheten. For eksempel bør man kanskje sperre tunnelen når det transporteres farlig last som bensin, diesel o.l. Alternativt kan man tenke seg at det står brannbiler i beredskap i begge ender av tunnelen. Slike ideer mangler det forskning på og effektiviteten er ukjent, men det er fristende å tenke seg at det kan ha positive effekter på sikkerheten og beredskapen til vegtunneler.

Når det gjelder universell utforming er det derimot vanskelig å ha en slik tilnærming når det gjelder eksponering for branngasser. Dette fordi det er forbundet stor usikkerhet til konsentrasjonen av ulike branngasser trafikanter har blitt utsatt for. I tillegg er det individuelle variasjoner i sårbarhet for eksponering av ulike branngasser. Dette gjør at standarder for tålegrenser og inkapasitering av ulike konsentrasjoner av branngasser er utfordrende å bruke i dimensjonering av sikkerhetstiltak, både i design og driftsfasen.

Litteratursøket mitt avslørte at det er store hull i kunnskapen om helsemessige seneffekter av røykeeksponering. Det er naturlig nok noe hjernepåvirkning, da dette organet er mest utsatt på oksygenmangel. Selvsagt er påvirkningen på lungene gjenstand for mulig langtidseffekt med KOLS og lungekreft som eksempler. Med den økende elbilparken kan man få økende koboltoksid som virker lammende på hjertet. Det blir da også et organ som kan kreve monitorering over tid. Men det er klart at her er det behov for å gjøre studier å kartlegge dette bedre, både retrospektive og prospektive.

6.4 Apriori og aposteriori sårbarhets faktorer for eksponering av branngasser

Det er en del apriori sykdommer og tilstander som gjør noen personer mer sårbare overfor eksponering av røykgasser. Mest utsatt er personer som har hjerte eller lungesykdommer, slik som hjertesvikt, angina, iskemisk hjertesykdom, kronisk obstruktiv lungesykdom, emfysem eller astma. Barn og unge er også utsatt for røykskader fordi luftveiene deres fortsatt utvikler seg, de puster inn mer luft (og røykgasser) per kilo kroppsvekt enn voksne. Eldre voksne har større sannsynlighet for hjerte- og karsykdommer enn yngre mennesker og kan dermed sees på som mer sårbare generelt. Diabetikere har mer sannsynlighet for å ha underliggende hjerte- og karsykdom og tilhører da en mer sårbar gruppe. Gravide kvinner, spesielt fosteret, er også en sårbar gruppe (EPA, 2022).

Videre er røykere mer sårbare siden de apriori har høyere nivåer av CO i blodet og er derfor mer utsatt for ytterligere CO-eksponering. Covid-19 pandemien og såkalt “long-covid” har ført til mye usikkerhet vedrørende effekter og utbredelse. Det er ikke umulig at Covid 19 kan vise seg å være en veldig viktig faktor for sårbarheten til befolkningen i møte med brann i tunnel.

Det finnes også noen aposteriori forhold som kan være med på å øke inhalasjonen av røykgasser og utsettelse for termiske brannskader (Hartzell, 1996). Disse er: fysisk handlingslammelse, tap av motorisk koordineringsevne, feilaktig bedømming, desorientering, begrenset syn og panikk. De artikkelen jeg studerte manglet informasjon om inkapasiteringsforhold. Dvs hvor fort brannrøyken gjør individet inkapabel til å rømme fra faren. Det finnes standarder for denne problemstillingen (<https://www.standard.no/standardisering/iso-standarder/>), som ofte er utgangspunkt for utarbeidelse av sikkerhetstiltak. Stor inkapasitering fører til redusert evne til å flykte fra brannen med økt letalitet som følger (International Organization for Standardization, 2015). Alle disse effektene påvirker tiden det tar å komme seg bort fra det farlige området og inn i sikkerhet. I tillegg, dannes CO også i eksosen fra fossile biler. Derfor kan CO forekomme i relativt høye konsentrasjoner i lange tunneler og i større parkeringsanlegg før en evt. brann oppstår (Tang et al., 2014, s. 130-134).

6.5 Kategorier gasser som dannes i bilbrann

I prinsippet dannes så mange gasser at alle organsystemer i kroppen kan bli skadet. De lokalirriterende gasser er først og viktigste her er irritasjonen i luftveier og på hud. De systemiske toksiske gasser er giftige for alle celler i kroppen, slik som CO, CN- og CO₂. Spesielt er de toksiske for hjertet og hjernen. Disse kan føre til omfattende organskade og død. Dette er kjente gasser som dannes ved brann i biler som jeg har beskrevet i detalj i kapittel 5. Det som ikke er så kjent er den nye studien fra Kina (Hu et al., 2010) som viser at CO nivået holder seg mye høyere enn det temperaturen i luften fra selve bilbrannen i tunnelen skulle tilsi. Videre vil fysisk aktivitet øke opptaket av CO betydelig, f.eks. når en springer bort fra brannkilden. Dette er ny kunnskap som tilsier at sensorer for måling av CO i tunnelen får større aktualitet. I tillegg bør alle sykebiler være utstyrt med pulsoksymeter som måler CO bundet til hemoglobin på skadested. Da kan man differensiere mellom pasienter som bør direkte i trykkammer og hvilke som ikke trenger det. En slik triagering på skadested kan være både livreddende og skadebegrensende. Et viktig moment er at branngasser fra elbilbatterier har en spesiell blanding som kan gi både lokalirriterende og systemtoksiske helseeffekter. Det er bla. flussyre og ulike metalloksider. Disse stoffene har hittil ikke vært et stort problem, da batterier i vanlige batterier er relativ små i forhold til bilens størrelse. Men ved mer elbiler på veiene (25 %) vil disse branngassene bety mer i fremtiden enn det har gjort hittil. I tillegg brenner elbilbatterier ved høyere varme enn fossile biler og kan derfor lettere ødelegge betonglaget i tunnelen. Dermed kan flammene få tak i PE-skummet, som ligger mellom råfjellet og betonglaget, og frigjøre CN-gass ved forbrenning. Det faktum at det er mange flere og stadig økende antall elbiler på veiene, vil endre branngass-bildet i tunnelene. og derved endre behov for ulike sensorer. I fremtiden vil man derfor kunne trenge sensorer som også detekterer flussyre og metalloksider i tillegg til CO og CN-.

6.6 Sikkerhetsnivået: er det høyt nok?

Et moment er å vurdere hvordan den medisinske kunnskapen kan få plass og bidra til en sterkere sikkerhetsstyring. Her oppstår det et problem med "funksjonskrav-paradigmet" i Norge, hvor en på et høyt nivå stiller generelle funksjonskrav som setter begrensninger for hvordan sikkerhetsarbeidet skal bli gjennomført på lavere nivå. Problemet med dette er ofte at det ikke er kompetanse nok på de laveste nivåene som skal utføre sikkerhetsarbeidet. Dette kan påvirker sluttproduktet – de lokale sikkerhetstiltakene som blir satt. Det blir kanskje godt nok,

men i en verden hvor stadig høyere sikkerhetsnivå strebes etter og kreves vil dette ofte være stedet i hierarkiet hvor kontrollproblemet ligger. Dette kan sees i lys av det Leveson (2011) og Hollnagel (2014) peker på i sin fremstilling av samfunnsutviklingen. Den spurtende teknologiske utviklingen og økte sikkerhetsforventninger fra befolkningen er så stor at sikkerhetsstyringen ikke klarer å holde følge. En løsning er å se nærmere på hva Checkland (1999, sitert i Bjelland et al., 2021) sier om hvordan sikkerhetsbegrensninger bør se ut:

1. De må pålegge nye funksjonelle forhold.
2. Ha en balanse mellom å være for spesifikke og for vage.
3. Være tilrettelagt den detaljerte dynamikken på de lavere nivå.

Her kan kanskje særlig pkt. 2 være utfordrende. I lys av problematikken stilt ovenfor, kan løsningen være å spesifisere sikkerhetsbegrensningene ytterligere, slik at det ikke blir unnlatt å produsere viktige sikkerhetstiltak på det lokale nivået. Dette er gjerne tanken bak diverse veiledere fra DSB om hvordan en ROS-analyse og beredskapsanalyse i en kommune kan se ut. Derimot, tenker jeg at dette ikke nødvendigvis løser problemet, fordi de lavere nivåene vil fortsatt ha kapasitetsproblemer som fører til mindre enn ønskelig sikkerhetsnivå. Derfor tenker jeg at samvirkeprinsippet kan anvendes. Her med tanke på å delegere ansvar til nivåer over, når de lavere nivåene har vanskeligheter ved å produsere mindre detaljerte og dermed mindre ønskelige sikkerhetstiltak. Dette for å kunne ha kapasiteten til å utarbeide bedre ROS-analyser som inkorporerer den medisinske kunnskapen. Dermed kan en informere sikkerhetsstyringen på de lavere nivåene slik at de lettere kan utarbeide, implementere og vedlikeholde et ibrøydere sikrere system.

Det har som nevnt i kapittel 1 ikke omkommet noen i tunneler de siste årene grunnet inhalasjon av toksiske gasser. Det som kan skje med risikoforståelsen til organisasjoner og systemer når det ikke har skjedd store ulykker på en god stund er å overdrive sikkerhetstilstanden (ref). Ved å sikte brannventilasjon kan en tenke seg at dette er tilstrekkelig for å sikre trafikanter mot eksponering for toksiske gasser ved brann. Dette er ikke nødvendigvis tilfellet. Når en har en slik situasjon, med få ulykker, er det viktig å ha en proaktiv tilnærming. Dette til kontrast fra en compliance-basert tilnærming, hvor en opprettholder minimums sikkerhetskrav og reagerer passivt på hendelser. Dette er også i tråd med hvordan systemteori ser på arbeidet med sikkerhet. Slik vil en kunne følge 0-visjonens ideal på en mer utfyllende måte.

Det er en rekke sikkerhetstiltak som går på å unngå branner. For eksempel er det tiltak som går på hvor bratte og bratte tunnelene skal være og hvordan en ordner kjøretøyene. Derimot er det ikke nok med kun forebyggende tiltak. Dette vil uansett oppstå branner i tunneler (se kap. 6.1). En må i tillegg ha beredskap som reduserer konsekvensene når det oppstår brann i tunnel. En må ha på plass detekterings- og alarmeringssystemer for så tidlig som mulig varsling, slik at nødetatene kan rykke ut og slokke brannen og gi behandling til involverte trafikanter. Det vil derimot ikke alltid være tilstrekkelig, da det kan oppstå hinder i varsling, slokking og mulighet for å nå trafikantene. Det finnes sikkerhetstiltak som er ment å skulle håndtere konsekvensene av de toksiske effektene brann kan ha på mennesket. Ventilasjon er et sentralt tiltak i denne sammenheng, og finnes nok i de fleste lengre tunneler i Norge. Evakueringstunneler, enten det er ut i det fri, til det andre tunnellopet eller til en evakueringstunnel, er et annet tiltak. Utbredelsen av dette er usikkert, og det går an å stille spørsmål ved om avstanden (250m) er tilstrekkelig.

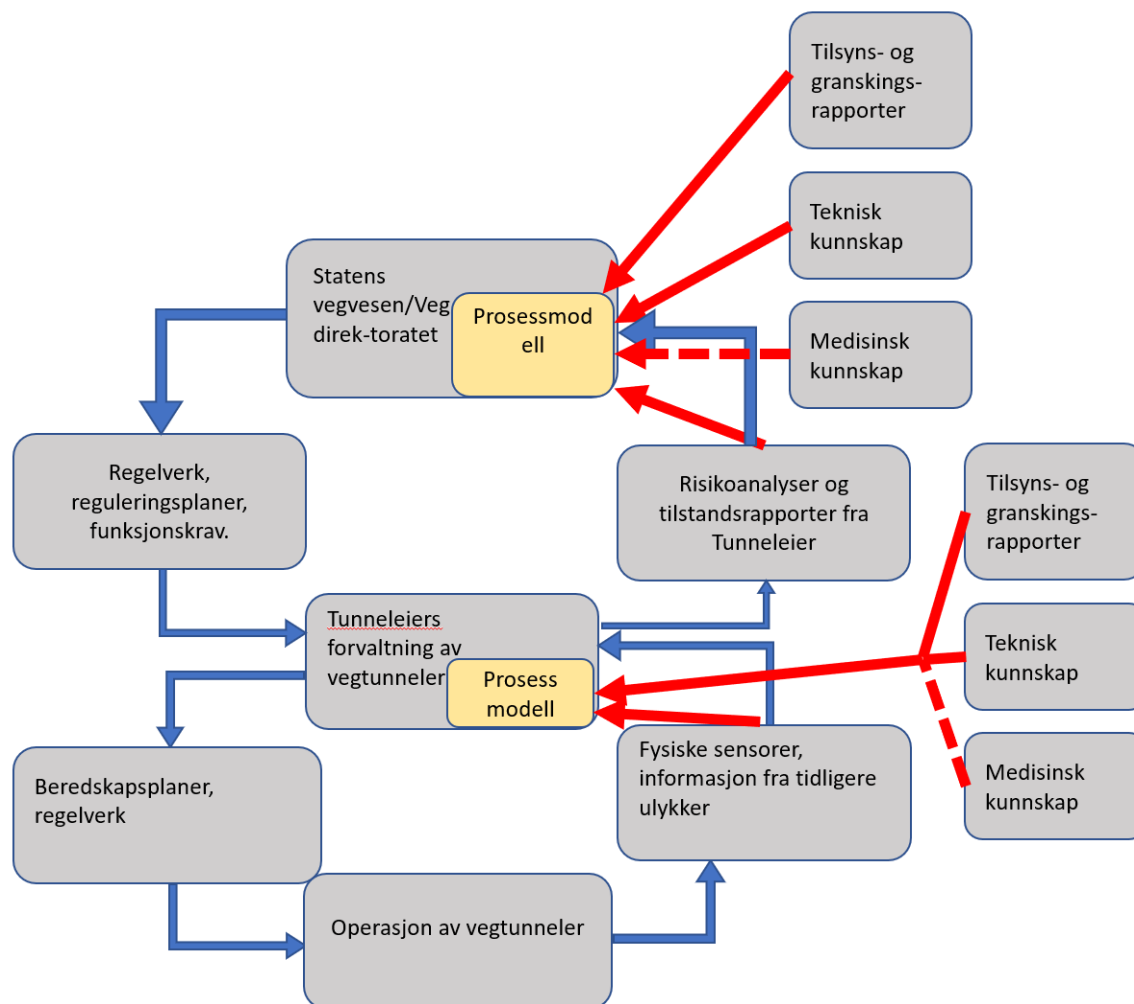
Det er vanskelig å få en full oversikt over hvilke toksiske gasser som kan oppstå i tunnelbranner. I stor grad skyldes det et bredt spekter av ulik last i tungtransportkjøretøy og bygningsmaterialet disse kjøretøyene består av. For eksempel vil kjølevogner inneha en del gasser som kan danne særdeles farlige og toksiske gasser dersom det blir utsatt for brann. Tungtransportkjøretøy i dag har full frihet til å kjøre gjennom tunneler med hva som helst, så lenge det overholder reglene i ADR. ADR er et internasjonalt regelverk for regulering av vegtransport av farlig gods (DSB, 2021). Denne tar for seg transport av toksiske materialer, men ikke toksisitetspotensialet til disse materialene ved brann. Per i dag er det ingen slik regulering som tar for seg ulik last sitt toksisitetspotensial ved brann. For å redusere kompleksiteten av gasskonstellasjonen ved brann, kan en slik regulering bidra til bedre sikkerhet i tunneler. En klassifisering av ulik last og vogntyper etter toksisitetspotensialet ved brann burde opprettes. Dette burde videre tas med inn i risikoanalysene til hver enkelt tunnel for å se hvorvidt beredskapen er kapabel til å håndtere ulike type last, hvis det oppstår brann. Her bør kjemisk og medisinsk kunnskap komme inn klassifiseringsarbeidet og i fastsettelse av reguleringer og beredskapsplaner til tunneler (se fig. 3.6 og 6.1). Sikkerhetstiltak, enten som del av reguleringsdokument eller beredskapsplan, kan da fastsette hvilke typer tunge kjøretøy som får lov å kjøre gjennom tunneler. Noe mindre radikalt tiltak kan være å stenge av tunnelen for allmenn trafikk når disse typer kjøretøy og last skal gjennom eller si at de kan bare kjøre gjennom på tidspunkt hvor trafikken er på det laveste. Dette kan bestemmes etter farlighetsgraden til kjøretøy og last.

6.7 Sensorer for ulike gasser i tunnel

Et forslag til sikkerhetstiltak som kunne blitt implementert er sensorer for CO, cyanid, tungmetaller, flussyre, osv. Dette vil kunne bidra til å skape et informasjonsgrunnlag for blålysetatenes håndtering av ulykker og for fremtidige studier. I tillegg vil etableringen av kommunikasjonskjeder, slik at prehospital og inhospital medisin får tidlig melding om dette, være særdeles viktig. De kan da administrere riktig behandling kjappere ved at prehospital kan gjennomføre riktig behandling tidligere eller at de kan si ifra til lokal- eller regionalsykehuset de er tilknyttet for å mobilisere ressurser som er nødvendig for behandlingen. Et eksempel på det siste er cyanokit eller hydroksokobalmin som prehospital medisin ikke har tilgjengelig i bilene sine og ikke alle sykehus har. Da må de ta kontakt med regionssykehus og si at de har en pasient som trenger dette. Da settes i gang en helt annen utrykningsprosess enn det ellers ville gjort. Dette kan bidra til å redusere konsekvensene av en ulykke dersom den inntreffer. Muligheten for gjennomførelsen av dette tiltaket er ikke undersøkt i denne oppgaven. Det er nok diverse utfordringer den tekniske biten (f.eks. funksjon ved høy varme) og kanskje litt økonomiske begrensninger. Derimot kan det være verdt å undersøke muligheter for innføringen av et slikt tiltak.

6.8 Medisinsk kunnskap - på flere nivå i hierarkiet?

I kap. 3.1.1 legges det frem viktigheten av hierarkisk struktur av kontrollstrukturen. Innlemmelsen av medisinsk kunnskap kan skje på flere nivåer i den hierarkiske strukturen til systemet "tunnel". Den vil mest sannsynlig bidra til justering av prosessmodeller på flere nivå, dersom den blir innlemmet. Det vil være kunstig å si at den medisinske kunnskapen bare kommer inn på ett nivå i mitt system. Dette er fordi koblingen mellom de ulike nivåene ifølge Leveson er sterke og de ulike nivåene reagerer på hverandre. Det er en iboende effekt av kommunikasjonskanalene opp og ned i hierarkiet (Figur 6.1).



Figur. 6.1. Hierarkisk struktur av systemet "tunnel" med to nivå og kilder for justering av prosessmodellene og sikkerhetsstyringen. Medisinsk kunnskap inngår i begge nivå. Harald Sjøiland – 2022.

Derimot hvis vi fokuserer på at den medisinske kunnskapen blir innlemmet i prosessmodellene til kontrollørene i strukturen, vil det gi mer mening. Den vil da justere prosessmodellene i de ulike nivåene og kunne skape endringer i implementering av sikkerhetsbegrensninger og funksjonskrav i hele hierarkiet.

Sikkerhetskonnrollstrukturer er på alle ledd, men må på designes på hvert nivå i hierarkiet, fordi de vil ha forskjellige funksjoner eller effekter i form av utvikling av sikkerhetsbegrensninger. Noen kontrollstrukturer er designet direkte for tunnelen og hvordan driften av tunnelen skal være. Mens andre er høyere oppe. Som nevnt i kapittel 6.1 er det stor heterogenitet i sikkerhetsforutsetningene til norske tunneler. Ryfast har brannstasjon rett ved den ene åpningen, mens Brattlitunnelen har større avstand til nærmeste brannstasjon. Dette er noe som

bør tas i betraktning når en utformer sikkerhetstiltak i tunneler. Hvis man tar for seg klassifiseringen av toksisitetspotensialet til tunge kjøretøy, som omtalt over, kan dette være aktuelt å ta med inn i sikkerhetsstyringen. Da må man også ta i betraktning sikkerhetsforutsetningene til hver enkelt tunnel når man skal regulere ferdselen av tunge kjøretøy av ulik klassifisering. I et systemteoretisk perspektiv kan man da si at hver tunnel er et eget system og innebærer ulike prosessmodeller. Dermed er det også ulike sikkerhetstiltak som bør iverksettes.

Det viktige spørsmålet er: hvem har ansvaret for å inkludere den medisinske kunnskapen fra litteratursøket i systemet? Det kan være både aktører på tunneleier-nivå og forvaltningsmyndighetsnivå. Tunneleier er i hovedsak SVV i riksvegstunneler og fylkeskommunen ved mer lokale tunneler. Det er tunneleier som har ansvar for utarbeidelse av risikoanalyser og beredskapsplaner eller sikkerhetsrestriksjoner i form av funksjonskrav til tunneler. Det kan til og med være på nivåer over dette igjen, f.eks. samferdselsdepartementet eller direktoratet for sikkerhet og beredskap (DSB), som regulerer samarbeid og inkluderingen av medisin inn i utarbeidelse av regulering og funksjonskrav som settes av Statens vegvesen.

Det er vanskelig å gå normativt inn her og si akkurat hvor den medisinske kunnskapen skal inkluderes og innlemmes. Derimot kan det tenkes at høyere nivåer har større kapasitet til å gjøre et slikt, til dels omfattende, grep i styringen av systemets kilder. Det viktigste er at det blir gjort og at risiko og sårbarheter knyttet til menneskets eksponering for toksiske gasser i tunneler blir tatt høyde for i design og operasjon av tunneler. Dette være seg innførelsen regelverk, håndbøker, funksjonskrav og sikkerhetstiltak eller opprettelsen av studiedesign som bøter med den manglende kunnskapen omkring disse helseeffektene.

Et viktig moment med sikkerhetskrollstrukturen, i tillegg til hvor utfyllende totaliteten av den medisinske kunnskapen i systemet er, er hvorvidt den tilgjengelige medisinske kunnskapen blir kommunisert og implementert i prosessmodellene til aktører på nivå som burde ha hatt denne type kunnskap med i utarbeidelse av sikkerhetsbegrensninger.

Betyr denne mangelfulle medisinske kunnskapen at en har lagt forståelsen av mulige sikkerhetsbegrensninger på feil nivå i kontrollhierarkiet i tunnelsystemet? Den medisinske kunnskapen vil ha forskjellig innflytelse for de ulike nivå i sikkerhetskrollstrukturen. Forvaltningsmyndighet vil kunne anvende denne kunnskapen til å utforme standarder og normer, f.eks. en revidering av N500 (Statens Vegvesen, 2022). Tunneleier vil kunne gjøre mer

utfyllende risikoanalyser og utforme tunnelen slik at disse medisinske helseeffektene blir tatt i betraktning. Går en ned på mikronivå og sikkerhetsforvaltningen av menneskers helse, kan den også brukes til å utfylle monitorerings- og behandlingspraksis.

Det vil altså være et spørsmål om flyten til den medisinske kunnskapen innad i tunnelsystemet og utarbeidelsen av sikkerhetsbegrensninger med denne kunnskapen som kilde. I tillegg vil det også være et spørsmål om utarbeidelsen av ytterlig medisinsk kunnskap, da dette er på et lavt nivå, for å kunne heve sikkerhetsnivået i tunneler ved å utarbeide sikkerhetsbegrensninger på alle nivå.

6.9 Standarder for vegtunneler og medisinsk kunnskap

Vegtunneler i Norge (antall > 1100) er bygd over mange år og med ulike standarder. Ved reparasjon av eksisterende delanlegg brukes standard som var gjeldende ved montering/åpning. Erfaringer fra rehabiliterings- og oppgraderingsprosjekter er at hovedutfordringen med ettersikring av berget er at tverrsnittet ofte blir for lite når sprøytebetong og vann-/frost-/brannsikring skal reetableres. Strossing og eventuell ytterligere utvidelse for å eliminere eventuelle tidligere høyderestriksjoner er kostnadskrevende (Statens Vegvesen, 2020).

Standarden N500 Veitunneler (Statens vegvesen, 2022) viser til "skal" krav om nødutganger i tunneler over 500 meter. Den viser også til ventileringsstrategi ved brann. Dette viser at det er noe medisinsk kunnskap i forvaltningsmyndighets prosessmodell. Det går derimot an å stille seg spørsmål ved hvor mange av tunnelene i Norge som oppfyller kravene satt i denne standarden.

Selv om det vises spor av medisinsk kunnskap i standarden, kan det nok som følge av den manglende litteraturen, utarbeides ytterligere sikkerhetsbegrensninger ved økt tilflytning av medisinsk kunnskap.

6.10 Styrker og begrensninger til oppgaven

En slik systemtenkning kan utfylle den klassiske risikobaserte tenkningen (Kazaras et al. 2012). Dette har også karakterisert forståelsen min gjennom oppgaven. Det er derfor ikke

nødvendigvis brukt Leveson og hennes begreper gjennomgående i hele oppgaven. Det er også begrunnet ved at det ikke er en skikkelig oversettelse av "constraints" til norsk, men også for å anvende sjargong som er brukt i praksis.

Styrken med denne oppgaven er at den viser en måte der medisinsk fagkunnskap kan benyttes i et systemperspektiv. Videre er det fremlagt en oppdatert oversikt over relevant medisinsk kunnskap for brann i vegtunneler. Det er også belyst kunnskapshull i denne kunnskapen. Dersom aktører ansvarlige for sikkerheten i tunnelene, på flere nivå, beslutter å ta med disse funnene og videreutvikle dem og innlemme dem i sikkerhetsstyringen, er det et potensiale for forbedring av sikkerhetsnivået i tunnel. Dette fordrer at medisinske aktører må tas med for å informere sikkerhetsstyringen.

En mulig begrensning ved oppgaven er at inklusjon av flere artikler kanskje ville gitt et annet resultat når det gjelder kroniske helseeffekter av branngasser i tunnel. Men søkeordene gav ikke flere treff enn det som allerede er inkludert, slik at det er lite trolig at jeg ville fått et annet resultat.

Litteratursøket er svært omfattende med mange søkeord i et utstrakt antall søkemotorer. Jeg identifiserte i alt 3684 artikler. Etter å ha redusert og fokusert omfanget til søket i flere omganger endte jeg opp med 45 artikler som ble nøye studert. Det betyr at bare 1,2% av artiklene i det originale søket ble tatt med i den videre dybdelesning. Den videre seleksjonsprosess ble gjort i samråd med bibliotekaren ved UiS, slik som vist i kapittel 4.3. (Helsebiblioteket, 2018). Mange viktige artikler kan ha blitt utelatt i seleksjonsprosessen. Imidlertid identifiserte jeg mange duplikater og nært beslektede artikler. Videre var mange artikler helt uaktuelle. Derfor har jeg med en mye større andel av de viktige artiklene, nemlig 65 av 230=28%. Det er et såpass stort utvalg at validiteten ivaretas.

Videre er søkene åpnet opp for å inkludere helseeffekter også av brann utenom tunnel, nettopp for å utforske om det er kunnskap som kan overføres til konteksten tunnelbrann. Man kan rette kritikk mot denne ekstrapolering tilnærmingen. Derimot kan det til tross for denne svakheten bidra til å si noe om hva som er tilfellet ved eksponering for brann og hvilke helseeffekter dette kan ha.

En begrensning i denne oppgaven er at brannskader ved varmeeksponering ikke er gått inn på. Dette kunne bidratt til å kunne omfatte større deler av sikkerhetsarbeidet med brann i tunnel.

6.11 Videreutvikling av medisinsk kunnskap og forståelse av vegtunnelbranner

Litteratursøket mitt avslører at det er store kunnskapshull vedr. seneffekter og vedvarende medisinske effekter etter branngasseksponering i bilbranner i vegtunneler. Dels mangler vi studier helt og dels har branngass bildet endret seg en del de siste ti-årene. Derfor foreslår jeg å innhente ny empirisk kunnskap om dette emnet. Det er to prinsipielle måter å gå fram på. Den ene er en retrospektiv observasjonsstudie hvor man inviterer alle de som er blitt eksponert for branngasser i boliger og i vegtunnel de siste 10 årene. Boliger tas med til sammenligning og for å øke antallet slik man får størst mulig statistisk styrke. Informantene gjennomgår et strukturert intervju, psykometriske tester, pustepøver av lungene, ultralyd av hjertet og samt MR av hjernen. Da vil vi kunne se om det er funksjonelle og strukturelle forandringer i de tre viktigste organene som kan bli skadet av brannrøyk. Videre fyller de ut spørreskjema som går på helserelatert livskvalitet, depresjon, fatigue og andre psykiske plager (f.eks. PTSD).

Den andre studien er en prospektiv observasjonsstudie hvor man oppretter et landsomfattende tunnelbrann-register, som registrerer alle biologiske, psykometriske, psykiatriske data og helse-relatert livskvalitet og fatigue av eksponerte individer. Registeret er ment å være et kvalitetsregister over hvordan branngass-eksponerte i vegtunneler blir behandlet og fulgt opp. De som inngår i dette registeret, får tilbud om årlige undersøkelser. Kombinasjonen av disse to studiene vil generere solid empirisk datagrunnlag. Dette har vi ikke i Norge pr. i dag.

7. Konklusjon

Hovedbudskapet til denne oppgaven er at det finnes et potensial i å koble den medisinske kunnskapen på et systemnivå for å bedre sikkerheten i den enkelte tunnelen. Dette muliggjøres ved at ansvarlige for tunnelsikkerheten/ forvaltningsmyndighet (Vegdirektoratet) og tunnelleiere må reflektere rundt prosessmodellene sine og inkorporere det medisinske aspektet ved tunnelbranner. De må da inkludere hvilke toksiske gasser som kan oppstå ved brann i tunnel og hvilke helseeffekter disse kan ha på trafikantene. Det vil være gjennom å stille seg spørsmål som: "hvor mye tid vi har til rådighet når vi vet konsekvensene av branngassenes virkning?". I forlengelse av det kan man spørre: "hvor fort klarer de som er eksponert å evakuere seg selv og hvor vanskelig blir det?" Dersom tunnelleier ikke tar hensyn til disse begrensingene, kan de risikere å bryte de med de grunnleggende prinsippene for beredskap. I tillegg vil det være viktig for helseetaten å reflektere rundt monitoreringspraksis av personer eksponert for disse gassene. Da spesielt om de har tatt høyde for typer gasser som kan oppstå og hvilke symptomer disse kan skape. Dette tror jeg kan gjøres best ved at tunnelsystemet inkorporerer medisinsk kunnskap og ekspertise. Altså at tunnelforvaltningen og helseetaten inngår et sterkere samarbeid, da både i designfasen og driftsfasen. Det er også viktig at den medisinske kunnskapen blir oversatt til hver enkelt tunnel, da de har ulike sikkerhetsforutsetninger. Ved å behandle de hver for seg sikrer man at beredskapsplanene blir relevante for tunnelene. Et eksempel på tiltak er å sette opp sensorer for ulike branngasser og kommunikasjonsstrukturer som viderefører denne informasjonen fra VTS til prehospital og innsjukhus medisin. I tillegg må det være fokus på utarbeidelse av ny medisinsk kunnskap som kan bidra til et sikrere tunnelsystem. Det kan for eksempel gjøres gjennom retrospektive og prospektive studier. Opprettelsen av et tunnelbrannregister med definerte årlige parametere er nødvendige for å komme et skritt videre.

8. Referanser

- Altabbakh, H., AlKazimi, M. A., Murray, S. & Grantham, K. (2014). STAMP – Holistic system safety approach or just another risk model? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 32, 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2014.07.010>
- Babrauskas, V., Fleming, J. M. & Don Russell, B. (2010). RSET/ASET, a flawed concept for fire safety assessment. *Fire and Materials*, 34(7), 341-355. <https://doi.org/10.1002/fam.1025>
- Bettelini, M., Neuenschwander, H., Henke, A., Gagliardi, M. & Steiner, W. (2003, 20-21. November). *The Fire in the St Gotthard Tunnel of October 24, 2001* [Conference Proceedings]. International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF), Borås, Sweden. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962271/FULLTEXT01.pdf>
- Bjelland, H., Njå, O., Heskestad, A. W. & Braut, G. S. (2021). Emergency preparedness for tunnel fires – A systems-oriented approach. *Safety Science*, 143, 105408. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105408>
- Bjørnsen, G. & Njå, O. (2019). *Applying Systems Theory to Increase Competence in Tunnel Fire Safety - Focusing on the Fire and Rescue Services* [Conference Paper]. Singapore. https://www.uis.no/sites/default/files/2020-11/KATS_Publikasjoner_Bj%C3%B8rnsen%20%26%20Nj%C3%A5.%20%282019%29.%20Applying%20Systems%20Theory%20to%20Increase%20Competence%20i%20Tunnel%20Fire%20Safety.pdf
- Blaikie, N. & Priest, J. (2019). *Designing Social Research* (3. utg.). Polity Press.
- Bleecker, M. L. (2015). Carbon monoxide intoxication. I M. Lotti & M. L. Bleecker (Red.), *Handbook of Clinical Neurology* (Bd. 131, s. 191-203). Elsevier B. V. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-62627-1.00024-x>
- Chiu, S., Niles, J. K., Webber, M. P., Zeig-Owens, R., Gustave, J., Lee, R., Rizzotto, L., Kelly, K. J., Cohen, H. W. & Prezant, D. J. (2011). Evaluating Risk Factors and Possible Mediation Effects in Posttraumatic Depression and Posttraumatic Stress Disorder Comorbidity. *Public Health Reports*, 126(2), 201-209. <https://doi.org/10.1177/003335491112600211>
- Christensen, B. (2020, 17. November). Stadig flere norske biler går opp i røyk: og brannene har også blitt betydelig dyrere. *Broom*. <https://www.tv2.no/a/11749962/>
- Clark, C. J., Campbell, D. & Reid, W. H. (1981). BLOOD CARBOXYHAEMOGLOBIN AND CYANIDE LEVELS IN FIRE SURVIVORS. *The Lancet*, 317(8234), 1332-1335. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(81\)92516-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(81)92516-2)
- Cohen, M. A. & Guzzardi, L. J. (1983). Inhalation of products of combustion. *Ann Emerg Med*, 12(10), 628-632. [https://doi.org/10.1016/s0196-0644\(83\)80209-1](https://doi.org/10.1016/s0196-0644(83)80209-1)
- Crapo, R. O. (1981). Smoke-Inhalation Injuries. *JAMA*, 246(15), 1694-1696. <https://doi.org/10.1001/jama.1981.03320150042027>
- David, G., Sandy, O. & James, T. (2017). *An Introduction to Systematic Reviews* (2. utg.). SAGE Publications.
- Direktoratet for Byggkvalitet. (u.å.). *Universell utforming*. Hentet 31. Mai 2022 fra <https://dibk.no/verktoy-og-veivisere/universell-utforming/>
- Direktoratet for Samfunnssikkerhet og beredskap. (2020, 09. Januar). *Branner i personbiler*. <https://www.dsb.no/nyhetsarkiv/2020/branner-i-personbiler/>
- Direktoratet for Samfunnssikkerhet og beredskap. (2021). *ADR/RID: Landtransport av farlig gods*. Fagbokforlaget. <https://www.dsb.no/globalassets/dokumenter/veiledere-handboker-og-informasjonsmaterieell/andre-boker/adr-rid-2021-web.pdf>

- Direktoratet for Samfunnssikkerhet og beredskap. (2022, 26. Mai). *Brann i kjøretøy pr år*. https://www.brannstatistikk.no/brus-ui/search?searchId=E5428DD8-47C9-4B40-A4BC-3080859B5DBC&type=SEARCH_DEFINITION
- Dyer, R. F. & Esch, V. H. (1976). Polyvinyl Chloride Toxicity in Fires: Hydrogen Chloride Toxicity in Fire Fighters. *JAMA*, 235(4), 393-397. <https://doi.org/10.1001/jama.1976.03260300019022>
- Engtrø, F. & Haugen, O. A. (2003). Dødelige kullstoffgiftninger. *Tidsskrift for Den norske legeforening*, 123(4), 1081-1083. <https://tidsskriftet.no/2003/04/aktuelt/dodelige-kullstoffgiftninger>
- Fielding, L. (2003, 20-21. November). *Fire Suppression in Road Tunnels - Why it is Needed A Fire Brigade View* [Conference Proceedings]. International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF), Borås, Sweden. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:962271/FULLTEXT01.pdf>
- Folkehelseinstituttet. (2019, 31. Januar). *Karbonmonoksid*. Folkehelseinstituttet. <https://www.fhi.no/nettpub/luftkvalitet/temakapitler/karbonmonoksid/?term=&h=1>
- Genchi, G., Carocci, A., Lauria, G., Sinicropi, M. S. & Catalano, A. (2020). Nickel: Human Health and Environmental Toxicology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 679. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030679>
- Genovesi, M. G. (1980). Effects of Smoke Inhalation. *Chest*, 77(3), 335-336. <https://doi.org/10.1378/chest.77.3.335>
- Grunicke, U. H., Stefan, C., van Linn, A., Weninger-Vycudil, A. & Mellert, L. D. (2020). Traffic tunnels – Development of a cross-asset, reliability-based life cycle management. *Geomechanik und Tunnelbau*, 13(5), 520-530. <https://doi.org/10.1002/geot.202000018>
- Haraldsen, H. & Pedersen, B. (2020, 31. August). Karbonmonoksid. I *Store Norske Leksikon*. <https://snl.no/karbonmonoksid>
- Hartzell, G. E. (1996). Overview of combustion toxicology. *Toxicology*, 115(1-3), 7-23. [https://doi.org/10.1016/S0300-483X\(96\)03492-00](https://doi.org/10.1016/S0300-483X(96)03492-00)
- Helsebiblioteket. (2017, 01. november). *Hydrogenfluorid - behandlingsanbefaling ved forgiftning*. <https://www-helsebiblioteket-no.ezproxy.uis.no/forgiftninger/gasser-og-kjemikalier/hydrogenfluorid-flussyre-og-hydrogenfluoridgass-behandlingsanbefaling-ved-forgiftning>
- Helsebiblioteket. (2018, 12. November). *Litteratursøk*. <https://www.helsebiblioteket.no/fagprosedyrer/lage-og-oppdatere-fagprosedyrer/litteratursok>
- Hollnagel, E. (2014). *Safety-I and safety-II: the past and future of safety management* (1. utg.). Farnham: Ashgate Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1201/9781315607511>
- Hu, L. H., Tang, F., Yang, D., Liu, S. & Huo, R. (2010). Longitudinal distributions of CO concentration and difference with temperature field in a tunnel fire smoke flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(13), 2844-2855. [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.013](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.02.013)
- Hurley, M. J. (Red.). (2016). *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* (5. utg., Bd. 1). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>
- International Organization for Standardization. (2015). *Estimation of the lethal toxic potency of fire effluents*. (ISO 13344).
- Kaushik, S. & Bird, S. (2021, 10. august). Topical chemical burns: Initial assesment and management - Hydrofluoric acid. I M. Ganetsky (Red.), *UpToDate*. https://www-uptodate-com.ezproxy.uis.no/contents/topical-chemical-burns-initial-assessment-and-management?search=Hydrofluoric%20Acid&source=search_result&selectedTitle=1~7&usage_type=default&display_rank=1#H17

- Kazaras, K., Kirytopoulos, K. & Rentizelas, A. (2012). Introducing the STAMP method in road tunnel safety assessment. *Safety Science*, 50, 1806–1817.
<https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.04.013>
- Lee, M. (1978). Clinical studies on delayed sequelae of carbon monoxide intoxication. *J Korean Neuropsychiatr Assoc*, 17, 374-385.
- Leikauf, G. D., Kim, S.-H. & Jang, A.-S. (2020). Mechanisms of ultrafine particle-induced respiratory health effects. *Experimental & Molecular Medicine*, 52(3), 329-337.
<https://doi.org/10.1038/s12276-020-0394-0>
- Leveson, N. G. (2011). *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*. Massachusetts Institute of Technology.
- Nabavi, S. M., Nabavi, S. F., Habtemariam, S., Moghaddam, A. H. & Latifi, A. M. (2012). Ameliorative Effects of Quercetin on Sodium Fluoride-Induced Oxidative Stress in Rat's Kidney. *Ren Fail*, 34(7), 901-906.
<https://doi.org/10.3109/0886022X.2012.687347>
- Nelson, D. L. & Cox, M. (2021). *Lehninger Principles of Biochemistry* (Bd. 8). W. H. Freeman Co Ltd.
- Njå, O. & Braut, G. S. (2019). *On the interpretation of risk acceptance of major tunnel fires* [Conference proceedings]. Nordic Fire & Safety Days 2018, Trondheim.
https://www.uis.no/sites/default/files/2020-11/KATS_Publikasjoner_%C3%98strem%20%26%20Sommer.%20%282019%29.%20Inherent%20fire%20safety%20engineering%20in%20complex%20road%20tunnels_learning%20between%20industries%20in%20safety%20manage.pdf
- Njå, O., Sommer, M., Rake, E. L. & Braut, G. S. (2020). *Samfunnssikkerhet: Analyse, styring og evaluering*. Universitetsforlaget.
- NTNU Kunnskapsbasen. (2015, 13. oktober). *Arbeid med Hydrogenfluorid - flussyre og HF-gass*. <https://i.ntnu.no/wiki/-/wiki/Norsk/Arbeid+med+Hydrogenfluorid+-+flussyre+og+HF-gass>
- Nævestad, T.-O. & Meyer, S. (2014). A survey of vehicle fires in Norwegian road tunnels 2008–2011. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 41, 104-112.
<https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.12.001>
- Nævestad, T.-O., Ranestad, K., Elvebakk, B. & Meyer, S. (2016). *Kartlegging av kjøretøybranner i norsk vegtunneler 2008-2015* (TØI rapport 1542/2016). Transportøkonomisk institutt. <https://www.toi.no/getfile.php?mmfileid=43990>
- Okeda, R., Funata, N., Takano, T., Miyazaki, Y., Higashino, F., Yokoyama, K. & Manabe, M. (1981). The pathogenesis of carbon monoxide encephalopathy in the acute phase—Physiological and morphological correlation. *Acta Neuropathologica*, 54(1), 1-10. <https://doi.org/10.1007/BF00691327>
- Palgi, Y., Dicker-Oren, S. D. & Greene, T. (2020). Evaluating a community fire as human-made vs. natural disaster moderates the relationship between peritraumatic distress and both PTSD symptoms and posttraumatic growth. *Anxiety, Stress, & Coping*, 33(5), 569-580. 10.1080/10615806.2020.1755818
- Park, S. & Choi, I. S. (2004). Chorea Following Acute Carbon Monoxide Poisoning. *Yonsei Med J*, 45(3), 363-366. <https://10.3349/ymj.2004.45.3.363>
- Paul, M., Chris, C. & Gilbert, P. (2011). SMOKE INHALATION. *EMS World*, 40(6), 42.
- Pellegrino, V. (2014). Extracorporeal membrane oxygenation (ECMO). I A. D. Bersten & N. Soni (Red.), *Oh's Intensive Care Manual* (7. utg., s. 472-484). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-7020-4762-6.00114-4>
- Prevention, C. f. D. C. a. (2018, 04. april). Facts About Cyanide. I *Centers for Disease Control and Prevention*. <https://emergency.cdc.gov/agent/cyanide/basics/facts.asp>

- Prien, T. & Traber, D. L. (1988). Toxic smoke compounds and inhalation injury—a review. *Burns*, 14(6), 451-460. [https://doi.org/10.1016/S0305-4179\(88\)80005-6](https://doi.org/10.1016/S0305-4179(88)80005-6)
- Purser, D. A., Maynard, R. L. & Wakefield, J. C. (Red.). (2016). *Toxicology, Survival and Health Hazards of Combustion Products*. The Royal Society of Chemistry.
- Regjeringen. (2021, 14. Oktober). *Hovedprinsipper i beredskapsarbeidet*. <https://www.regjeringen.no/no/tema/samfunnssikkerhet-og-beredskap/innsikt/hovedprinsipper-i-beredskapsarbeidet/id2339996/>
- Schaller, C. P. (2022, 26. Mai). *Oxygen Binding*. <https://employees.csbsju.edu/cschaller/Reactivity/oxygen/ORbinding.htm>
- Selçuk, Ö., Selim, A., İbrahim, D., Fatma, E. & Alim, E. (2017). Very Late Stent Thrombosis in a Patient Presenting with Acute Carbon Monoxide Poisoning. *Akademik acil tıp olgu sunumları dergisi*, 8(2), 37. <https://www.researchgate.net/publication/309688615>
- Sheikh, I. (2016). Cobalt Poisoning: A Comprehensive Review of the Litterature. *Journal of Medical Toxicology and Clinical Forensic Medicine*, 2(2), 1-5. <https://doi.org/10.21767/2471-9641.100017>
- Smith, D. L., Cairns, B. A., Ramadan, F., Dalston, J. S., Fakhry, S. M., Rutledge, R., Meyer, A. A. & Peterson, H. D. (1994). EFFECT OF INHALATION INJURY, BURN SIZE, AND AGE ON MORTALITY: A STUDY OF 1447 CONSECUTIVE BURN PATIENTS. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 37(4). https://journals.lww.com/jtrauma/Fulltext/1994/10000/EFFECT_OF_INHALATION_INJURY,_BURN_SIZE,_AND_AGE_ON.21.aspx
- Statens havarikommisjon (SHK). (2020). *Rapport om brann i vogntog på E16 i Gudvangatunnelen i Aurland 30. mars 2019* (Vei 2020/04). <https://havarikommisjonen.no/Vei/Avgitte-rapporter/2020-04>
- Statens havarikommisjon for transport (SHT). (2013). *Rapport om brann i vogntog på Rv 23, Oslofjordtunnelen, 23. juni 2011* (Vei 2013/05). <https://havarikommisjonen.no/Vei/Avgitte-rapporter/2013-05>
- Statens havarikommisjon for transport (SHT). (2015). *Rapport om brann i vogntog på E16 i Gudvangatunnelen i Aurland 5. august 2013* (Vei 2015/02). <https://havarikommisjonen.no/Veitrafikk/Avgitte-rapporter/2015-02>
- Statens havarikommisjon for transport (SHT). (2016a). *Rapport om bussbrann i Gudvangatunnelen på E16 i Aurland 11. august 2015* (Vei 2016/03). <https://havarikommisjonen.no/Vei/Avgitte-rapporter/2016-03>
- Statens havarikommisjon for transport (SHT). (2016b). *Rapport om brann i tanktilhenger i Skatestraumtunnelen i Sogn og Fjordane 15. juli 2015* (Vei 2016/05). <https://havarikommisjonen.no/Vei/Avgitte-rapporter/2016-05>
- Statens havarikommisjon for transport (SHT). (2017). *Rapport om brann i vogntog på Rv 7 i Måbøtunnelen 19. mai 2016* (Vei 2017/07). <https://havarikommisjonen.no/Vei/Avgitte-rapporter/2017-07>
- Statens havarikommisjon for transport (SHT). (2018). *Rapport om brann i vogntog på rv. 23 Oslofjordtunnelen 5. mai 2017* (Vei 2018/04). <https://havarikommisjonen.no/Vei/Avgitte-rapporter/2018-04>
- Statens havarikommisjon for transport (SHT). (2019). *Rapport om brann i kjøretøy på rv. 5, Fjærlandstunnelen 17. april 2017* (Vei 2019/05). <https://havarikommisjonen.no/Vei/Avgitte-rapporter/2019-05>
- Statens Vegvesen. (2020). *V520 Tunnelveiledning (V520:2020)*. <http://hdl.handle.net/11250/2641698>
- Statens Vegvesen. (2022). *N500 Vegtunneler (N500:2022)*. <https://viewers.vegvesen.no/product/859938/nb#id-e822b26d-4886-493c-acbf-085339968f3b>

- Statistisk sentralbyrå. (2020). *Bilparken etter type drivstoff [Statistikk]*.
<https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/statistikker/bilreg/aar/2021-03-25?fane=tabell&sort=nummer&tabell=448725>
- Statistisk sentralbyrå. (2022). *Bilparken etter type drivstoff [Statistikk]*.
<https://www.ssb.no/transport-og-reiseliv/landtransport/statistikk/bilparken>
- Stec, A. A. & Hull, T. R. (Red.). (2010). *Fire toxicity*. CRC Press.
- Stefanidou, M. & Anthanaselis, S. (2004). Toxicological aspects of fire. *Veterinary and human toxicology.*, 46(4), 196-199. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15303394/>
- Tang, F., Hu, L. H., Yang, L. Z., Qiu, Z. W. & Zhang, X. C. (2014). Longitudinal distributions of CO concentration and temperature in buoyant tunnel fire smoke flow in a reduced pressure atmosphere with lower air entrainment at high altitude. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 75, 130-134.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.058>
- Terjesen, T. (2017, 16. Oktober). En omkommet og fem skadd i bussulykke på E16. *Bussmagasinet*. <https://bussmagasinet.no/omkommet-fem-skadd-bussulykke-pa-e16/>
- Tobe, E. (2012). Progressive neuropsychiatric and brain abnormalities after smoke inhalation. *BMJ Case Reports*, 2012, bcr0220125945. <https://doi.org/10.1136/bcr-02-2012-5945>
- Toon, M. H., Maybauer, M. O., Greenwood, J. E., Maybauer, D. M. & Fraser, J. F. (2010). Management of acute smoke inhalation injury. *Critical Care and Resuscitation*, 12(1), 53-61. <https://www.webofscience.com/wos/woscc/full-record/WOS:000295753200010?SID=EUW1ED0F2DKyBQaAlAMBGbuvm4XcK>
- Trunkey, D. D. (1978). Inhalation Injury. *Surgical Clinics of North America*, 58(6), 1133-1140. [https://doi.org/10.1016/S0039-6109\(16\)41681-6](https://doi.org/10.1016/S0039-6109(16)41681-6)
- Tunmo, T. (2007, 19. Juni). Godtar PE-skum i tunneler. *Teknisk Ukeblad*.
<https://www.tu.no/artikler/godtar-pe-skum-i-tunneler/259772>
- United States Environmental Protection Agency. (2022, 26. September). *How Smoke from Fires Can Affect Your Health*. EPA. <https://www.epa.gov/pm-pollution/how-smoke-fires-can-affect-your-health>
- Verdens Gang (VG). (2012, 17. Januar). Omkom i tunnelulykke på Eidsvoll.
<https://www.vg.no/nyheter/innenriks/i/Gkrbl/omkom-i-tunnelulykke-paa-eidsvoll>
- Weaver, L. K., Hopkins, R. O., Chan, K. J., Churchill, S., Elliott, C. G., Clemmer, T. P., Orme, J. F., Thomas, F. O. & Morris, A. H. (2002). Hyperbaric Oxygen for Acute Carbon Monoxide Poisoning. *New England Journal of Medicine*, 347(14), 1057-1067.
<https://doi.org/10.1056/NEJMoa013121>
- Willstrand, O., Bisschop, R., Blomqvist, P., Temple, A. & Anderson, J. (2020). *Toxic Gases from Fire in Electric Vehicles* (2020:90). Research Institute of Sweden (RISE).
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-52000>
- Økland, O. P., Nakstad, E. R. & Opdahl, H. (2020). Forgiftning med karbonmonoksid og cyanidgass ved brann. *Tidsskrift for Den norske legeförening*, 140(10), 1031-1033.
<https://doi.org/10.4045/tidsskr.19.0748>
- Østrem, L. & Njå, O. (2019). Toxicity Limit States in Tunnel Fire Safety Designs. I J. P. Liyanage, J. Amadi-Echendu & J. Mathew (Red.), *Engineering Assets and Public Infrastructures in the Age of Digitalization* (s. 407-415). Springer, Cham.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-48021-9_45
- Øyås, O. (2011, 30. November). *TBT4102 Biokjemi 1: Oppsummeringshefte*. NTNU.
<https://folk.ntnu.no/audunfor/5.%20semester/Biokjemi%201/Kompendium.pdf>

Referanselisten ovenfor viser de referansene som er brukt aktivt i oppgaven. Dersom det skulle være aktuelt så har jeg ytterligere referanser å vise til. Disse er lest, men silt vekk i skriveprosessen.

9. Appendiks

9.1 Appendiks A: Tiltaksbok Ambulanse Helse Stavanger HF

Tiltaksbok Ambulanse

Oppdatert: 13.01.2022

#1000 - Brannrøyk

Undersøkelser og sykehistorie

- Primærundersøkelse - Traumer
 - Tegn til truet luftvei:
 - Skade hode, ansikt, nakke.
 - Inhalasjon av varme branngasser eller damp?
 - Sot i nese, munn, svelg og svidde ansiktshår, hovne slimhinner.
 - Heshet, stridor, pustevansker.
 - SpO₂ er upålitelig.
 - Bevissthetsnivå (forgiftning med CO, cyanid).
- Sekundærundersøkelse
 - Eventuelt SpCO.
 - Pasienter med annen sykdom (spesielt lungesyke) er spesielt utsatt.

Spesielle skader

Ved redusert bevissthet hos pasient etter brann i lukket rom vurder:

CO forgiftning

- Symptomene på kullosforgiftning er først uspesifikke som hodepine, utmattelse, kvalme og svimmelhet.
- Ved alvorlig forgiftninger: bevissthetstap, krampes, synkope, koma, myocardischemi, arytmier, lungeødem.
- Vurder transport til trykkammer ved SpCO over 20%

Cyanid forgiftning

- Symptomer ved lave konsentrasjoner: Hodepine, kvalme, brekninger, store pupiller, lufthunger, påvirket bevissthet. Etter hvert kardiale arytmier og hypotensjon.
- Symptomer ved høyere konsentrasjoner: Cerebral påvirkning, voldsomme respirasjonsbevegelser, krampes og bevisstløshet. Store, nesten lysstive pupiller. Ustabil sirkulasjon, hjertestans.
- Vurder rask assistanse for administrasjon av CyanoKit

Behandling og overvåkning

- Re-evaluer ABCDE.
- Våkne pasienter, elevert overkropp.
- Oksygenbehandling, 100% maske med reservoar, eventuelt CPAP med høy FiO₂
- Assistanse for sikring av luftveier.
- Obstruktive symptomer Salbutamol og Ipratropiumbromid, eventuelt CPAP.
- Lungeødem: CPAP, eller overtrykksventilasjon ved behov.
- Vurder Hydrocortison

Grunnlagsinformasjon

Introduksjon

Brannrøyk kan inneholde CO, cyanid, sot og luftveisirritanter og kan gi termiske skader.

Indikasjon for behandling

Symptomer etter inhalasjon brannrøyk:

- Heshet, stridor, pustevansker.
- Sot i nese, munn, svelg og svidde ansiktshår, hovne slimhinner.
- Redusert bevissthet.
- Ustabil sirkulasjon, hjertestans.

#1001 - Brannskade

Undersøkelser og sykehistorie

Primærundersøkelse - Traumer.

- Tegn til truet luftvei:
 - Skade hode, ansikt, nakke.
 - Inhalasjon.
- Arytmifare ved elektriske skader og lynnedslag.
- Bevissthetsnivå.

Sekundærundersøkelse.

Fall? Andre skader?

- Inhalasjon av røyk?
- Temperatur.
- 4-kanals EKG.
- Størrelse på skaden.
- Spesielle lokalisasjoner.
 - Ansikt.
 - Sirkulær tredje grad (hals, thorax, ekstremiteter).
 - Fingre, genitalia.
- Eventuelt SpCO.
- SpO₂ er upålitelig.
- Pasienter med annen sykdom (spesielt lungesyke) er spesielt utsatt.
- Årsak til skaden (sykdom, ulykke, spesielt hos eldre).

Behandling og overvåkning

- Re-evaluer ABCDE.
- Oksygenbehandling.

Avkjøling med temperert vann (ca. 20^o), fuktige omslag (kompress, rene tekstiler) eller brannbandasje. Kjølning til smertefrihet, eller inntil 20 min. Slik nedkjøling kan ha effekt inntil 3 timer etter skaden. Vurder og fjern våte omslag og brannbandasjer etter 20 min. for å forhindre hypotermi.

- **Kjøl skaden, ikke pasienten.**
- Hvis kjøling er utført før vår ankomst brukes det ikke tid på dette.
- Kjølning må ikke forsinke transport unødig.
 - Unngå hypotermi, monitorer kroppstemperatur, kjølemetode tilpasses eller avbrytes.
 - Fjern bleie.
- Skadet område dekket med rene tekstiler, plastfolie eller fuktige omslag.

- [Smertelindring](#).
- Fjern smykker/ringer.
- [Volumbehandling](#), venekanyler/intraossøs i uskadd vev.

Spesielle skader

Etseskader

[Elektrisk skade, lynnedslag](#)

Grunnlagsinformasjon

Introduksjon

Brannskade kan forårsakes av både varme væsker, åpen flamme, kjemikalier og elektrisitet. Kontakttiden og temperaturen på kilden bestemmer hvor dyp skaden blir. Brannskader kan også forekomme ved mishandling.

Symptomer

Symptomer avhenger av dybden på skadene: Smerter, rødhet, blemmedannelse, væskende sårflate. Hvit, hard, brun/svart "læraktig" hud ved dype skader.

Brannskade gir ikke sirkulasjons- eller bevissthetspåvirkning i tidlig fase. Let etter annen skade ved slike tegn.

[Bergegning av skadet overflate](#)

#838 - Hjertesvikt / lungeødem

Spesielle former for lungeødem:

[Lungeødem pga. innåndning av irriterende gasser, nervegasser og plantevernmidler](#)

- Behandling med [CPAP](#). Ved lav oksygenmetning kan det være behov for høyere FI_{O_2} .
- Ikke indikasjon for behandling med [Glyceroltrinitrat](#), [Morfin](#) og [Furosemid](#) .
- Ved forgiftning med nervegasser og plantevernmidler (organofosfater) kan store doser [Atropin](#) være indisert. Konsultasjon.

#1016 - CPAP

Lokal tilpasning

I Helse Stavanger bruker vi O2 Max CPAP. På disse skal det monteres et O2 Max Guard filter under PEEP ventilen for å sikre smittevern.

Introduksjon

CPAP gir et kontinuerlig overtrykk i luftveiene. Dette fører til at alveoler som er kollapset kan åpnes, og til at væske presses ut fra alveoler og lungekretsløp. En effekt av dette er at gassutvekslingen bedres.

Indikasjon

- Hjertesvikt / lungeødem - lungeødem.
- Ved KOLS med forverring med uttalt respirasjonspåvirkning (RF>25, inndragninger eller bruk av hjelpemuskler).
- Pneumoni med respirasjonssvikt
- Inhalasjonsskade med mistanke om lungeødem.
- Allergi og anafylaksi respirasjonssvikt med hypoxi som ikke responderer på annen behandling
- Akutt astma og respirasjonssvikt med hypoxi som ikke responderer på annen behandling
- Drukning
- Ved tvil konsulteres lege.

Kontraindikasjon

- Traumer mot hode og thorax.
- Mistanke om pneumothorax.
- Bevisstløshet eller manglende evne til å holde fri luftvei.
- Utmattet pasient (trenger assistert ventilasjon).
- Mistanke om epiglotitt.
- Brekninger.

Forsiktighetsregler

Konsulter lege ved:

- Systolisk blodtrykk mindre enn 100 mmHg
- Blodtrykksfall > 20 % etter start med CPAP.
- Kvalme med fare for brekninger.

Bivirkninger

- Redusert venøs tilbakestrømming til hjertet kan påvirke pumpeeffekt og blodtrykk.
- Psykisk reaksjon – engstelse.
- Luft i magen – pasienten svelger luft.
- Uttørring og irritasjon av øvre luftveier.

Ved uttalt bivirkning avbrytes behandlingen midlertidig eller helt.

Behandling og overvåkning

- Reevaluer ABCDE.
 - Auskultur over lungene, spesielt etter sideforskjeller (pneumothorax).
 - Kontinuerlig scopovervåking, regelmessig blodtrykk.
- Informer pasienten
 - Masken er tett og det kommer en kraftig luftstrøm.
 - I starten blir det tyngre å puste, før tilvenning og effekt.
- Tilvenning
 - Plasseres langsomt over ansiktet for tilvenning til trykkforandringen.
 - La pasienten eventuelt holde masken selv.
- Kontroller at det strømmer overskuddsluft ut av PEEP-ventilen under hele respirasjonssyklusen.
- Sikkerhetsventilen skal forbli lukket under respirasjonssyklusen for å sikre tilstrekkelig gasstilførsel.
- Påse at luftinnsuget til generatoren ikke tettes.
- Respirasjonsfrekvens, dybde og grad av våkenhet følges nøye av hensyn til CO₂-opphopning.
- Forlat aldri pasienten uten kompetent tilsyn.

PEEP

- Astma/KOLS: begynn på 5 cm/H₂O, øk om nødvendig til 7,5 cm/H₂O.
- Alle andre: begynn på 5 cm/H₂O, øk om nødvendig til 7,5 og 10 cm/H₂O.

#1017 - Oksygenbehandling

Introduksjon

Hypoksi er definert som for lavt oksygeninnhold i vevet, og kan føre til skadelige cellereaksjoner eller vevsdød.

Indikasjon

Hovedregelen er at alle alvorlig syke eller skadde pasienter skal initialt ha oksygentilførsel på 100% maske med reservoir.

- Når vi får tilfredstillende saturasjonsmålinger justeres O₂-behandlingen (mengde og administrasjon)
- Generelt er det ikke anbefalt å gi oksygenterapi ved SpO₂ over 95, se unntak under

Ved manglende eller unøyaktig saturasjonsmåling gis det oksygentilførsel på 100% maske til pålitelig måling kan gjennomføres.

Noen tilstander skal ha oksygen på tett maske med reservoir uavhengig av vitale tegn.

- Brannrøyk og gassforgiftninger
- Dykkersyke

Spesielle tilstander der oksygenbehandling skal tilpasses:

- KOLS med forverring
- Hjerneslag / TIA
- Brystsmerter, kardiell årsak
- Post resuscitering
- Resuscitering av nyfødte

9.2 Appendiks B: Tiltaksbok Luftambulans – Brannskader

Helse Bergen HF

Tiltaksbok Luftambulans / 12 - Traumatologi og kirurgi

#1077 - Brannskader

Skademekanisme

- Hva har skjedd – og når skjedde det?
- Er det grunn til å mistenke inhalasjonsskade?
- Kan pasienten ha pådratt seg andre traumer i tillegg til brannskaden? Har pasienten f.eks. hoppet ut av en brennende bygning eller fått fallende gjenstander over seg?

Inndeling av brannskader

Til å begynne vil det være vanskelig å vurdere dybden av brannskaden og det har også mindre betydning i initialfasen. Men en viss formening må man danne seg da dybden og omfanget vil diktere væskebehandling og valg av mottakende sykehus.

Grad	I	Ila	Ilb	III
Dybde	Epidermal	Overflatisk dermal (delhud)	Dyp dermal (delhud)	Subdermal (fullhud)
Fuktig?	Tørr	Fuktig	Fuktig	Tørr
Blemmer	-	+	+	-
Ødemer	+/-	+	+	+
Sirkulasjon	Normal	Normal	Nedsatt	Ingen
Farge	Rød	Rød	Hvitaktig / perlehvit / voksaktig	Hvit / læraktig
Smerte	++	+++	-/(+)	-/(+)

Skadeutbredelse – "nierregelen"

Skadeutbredelsen kan estimeres ved at kroppsoverflaten deles opp i sektorer på 9 %:

- En overekstremitet 9 %
- En underekstremitet 18 %
- Truncus forflate 18 %
- Truncus bakflate 18 %
- Hode 9 %
- Genitalia 1 %

Denne tilnærmingen gjelder ikke for barn under 12 år hvor hodet utgjør relativt mer av overflaten. Da benyttes en tabell (Lund & Browder) for å beregne skadeomfanget.

En annen regel som kan benyttes er at pasientens håndflate med samlede fingre utgjør ca. 1 % av kroppsoverflaten.

Primærbehandling

Initialt vurderes ABC og nødvendige tiltak rettet mot evt. ABC-problemer iverksettes. Tidlig intubasjon kan være nødvendig grunnet ødem-dannelse. Prosedyren utføres på ordinært vis med de vanlige medikamentene. Benytt intubasjonen til å vurdere potensielle inhalasjonsskader.

I.v. og i.a. innganger legges om mulig gjennom uskadet hud. Vurdér å anlegge flere innganger på skadestedet da det kan være teknisk lettere å etablere dem da enn på et senere tidspunkt i sykdomsforløpet grunnet ødemdannelsen.

Avkjøling reduserer skadeutbredelse og skadedybde, men det er uklart hvor lenge det skal avkjøles og hvilken temperatur vannet skal ha. I en studie ble det anbefalt å skylle med vann som holder 12- 18 °C i 20 min. Det anbefales å fortsette til smerten forsvinner. En annen studie viser at kjøling kan ha effekt selv om den startes så sent som inntil 30 min. etter skadetidspunktet.

Det skylles derfor med avkjølt/lunkent vann i 30 min. så sant andre tiltak som luftveishåndtering ikke må ta prioritet. Dekk deretter til de skadete områdene med Waterjel.

Vær oppmerksom på faren for hypotermi både ved skylling med vann og med anvendelse av Waterjel.

Affiserte områder dekkes enten av fuktete kompresser eller Waterjel og disse fikses med kompresser og/bandasjer før transport.

Analgesi utover avkjøling er hyppig nødvendig og løses med titrerte doser fentanyl i.v.

Væskebehandling

Det er økt kapillærlekkasje ved brannskader. Omfatter skaden > 25 % av kroppsoverflaten vil det i tillegg til lokal ødemdannelse være generalisert lekkasje av proteinholdig væske fra blodbanen til interstitiet slik at det også blir ødemer i uskadet hud, muskulatur og indre organer. Det gis (Parkland-formelen):

4 ml NaCl/kg/prosentandel skadet areal (delhud og fullhud)

Halvparten av væsken gis de første åtte timene etter skaden. Væsketilførselen justeres etter klinisk effekt (timediurese, puls, blodtrykk).

For pasienter

3 ml NaCl/kg/prosentandel skadet areal (delhud og fullhud)

Det tilstrebes en diurese på 0,5 ml/kg/t hos voksne og 1 ml/kg/t hos barn.

Etter 24 timer er kapillærlekkasjen vanligvis mindre og NaCl bør da seponeres og det bør startes med kolloider (utgangspunkt: 0,5 ml/kg/prosentandel skadet hud pr. 8 timer).

Transport

Ved omfattende skader kan transport direkte til Brannskadeavsnittet på Haukeland universitetssykehus vurderes (se avsnitt nedenfor) etter konsultasjon med vakthavende.

Det store flertallet av pasientene skal transporteres til sine respektive sentralsykehus – brannskader er ikke regionalisert – men undersøk med vakthavende kirurg i hvert enkelt tilfelle hvorvidt sykehuset har den nødvendige (plastikkirurgiske) kompetansen til å håndtere den aktuelle skaden.

Inhalasjonsskader

- Inhalasjonsskader skyldes inhalasjon av røyk (partikler), gasser og opphetet luft/damp. Mistenk CO-forgiftning (dårlig korrelasjon mellom CO-Hb og alvorlighetsgrad). Nytt av hyperbar oksygen er omdiskutert
- Mistenk cyanid-forgiftning ved brann i lukket rom, spesielt hvis pasienten har alvorlig metabolsk acidose og forhøyet serum-laktat uten samtidig forhøyet CO-Hb eller hypovolemi. Hurtigtest for cyanid-forgiftning finnes ikke og hydroksykobalamin (Cyanokit) 5 g (til voksne) i.v. anbefales som antidot ved mistanke (men det gir rødlig misfarging av huden og lillafarget urin)

Kriterier for vurdering av overflytting til Brannskadeavsnittet, Haukeland

I Norge behandles ca. 700 pasienter pr. år i sykehus for brannskader. Ca. 10 % av disse behandles på Haukeland. Overflyttingskriterier:

- Barn med > 5 % dyp delhuds- og/eller fullhudsskade
- Voksne med > 15 % dyp delhuds- og/eller fullhudsskade
- Dypere og/eller sirkulære skader på hender/genitalia/ansikt
- Høyvoltskader
- Kjemiske skader
- Store hudsår av annen årsak

Elektriske skader

- Høyvoltskader (elektriske skader) er termiske skader i vev forårsaket av elektrisk ledende materiale med spenning over 1000 V. Hjertets ledningssystem kan også påvirkes og avhengig av alvorlighetsgrad bør pasientene overvåkes med kontinuerlig EKG i minst 24 timer etter skaden

Grunnlagsinformasjon

Skrevet av:

- Mårten Sandberg

Opprinnelse:

- Oslo universitetssykehus - Prehospital Klinikk
Luftambulansesavdelingen

Kilde:

- Guttormsen et al (2010) Tidsskr Nor Legeforen 130, 1236-41

Røyk- og inhalasjonsskade

Oddleif Tjemsland, april -16

Sist revidert okt -18, Tjemsland

4 hovedproblemer:

CO. Cyanid. Sot. Termisk skade

Anamnese og klinisk us:

- Dødsfall i aktuell brann? Bevissthetstap?
- Inhalert toksisk, irriterende eller oksygenfortrengende gass? (toksisk skade kan manifestere seg 12-36 timer e. eksponering).
- Brannskade hals/ansikt? Sot i oppspytt? (øvre luftveisødem kommer innen 24t e. skade)
- Vanlig klinisk us: Bronkial obstruktivitet?
- Mental status/ GCS (+nevrologisk us)

Supplerende us.

- Blodgass - avgjørende for å måle COHb. (Pulsoksymeter skiller ikke COHb fra O2Hb)
- Rtg. thorax (dersom pos. funn: alvorlig prognose)
- Lab (AAKUM + INTOX + CK + INR) (Må ikke forsinke behandling). EKG

Håndtering - generelt

- Vurder klinikk, noen skal kun observeres (termisk skade ses innen 24t; stridor, resp. besvær, hypoksemi) (toksisk skade ses innen 36t; hosting, hvesing, obstruktivitet)
- ABC
- Intubering hvis stridor, bruk av aksessoriske resp.muskler, pustebesvær, hypoventilasjon, dype brannår i ansikt/hals.
- Oksygen gis i praksis til alle, FiO2 ofte 100%
- Atrovent/Ventoline 0,5/5 mg hvert 20. min. v/behov
- Vurder steroider, Solu-Medrol 20-100 mg x 3 iv.
- Antibiotika haster ikke, sikre bakteriologi først.

CO-forgiftning

Våkne pasienter: 100% O2 på maske med reservoar, behandlingstid avhengig av klinikk, til blodgasser er akseptable (COHb <10%), deretter evt. nesegrime.

Vurder trykktankbehandling (HBO) ved én av følgende:

- HbCO 20-30% og samtidig alvorlige symptomer
- Bevissthetstap i forløpet eller alvorlige nevrologiske symptomer
- Gravide (foster har 10-15% høyere HbCO enn mor)
- Uttalt metabolsk acidose
- Pas med iskemisk hjertesykdom/iskemi på EKG

Usikker dokumentert effekt av HBO. Konferer med vakthavende dykkelege ved Haukeland (via AMK i Bergen 55 36 45 50) og evt. bakvakt ved giftinformasjonsentralen (22 59 13 00). Dersom HBO skal tilbys bør det gis relativt raskt (ideelt <6 timer).

Cyanid-forgiftning

- 100% O2 på maske med reservoar
- Cyanokit hos dårlig pasient med sannsynlig CN-forgiftning. (misforhold mellom grad av met. acidose og COHb, høy laktat (>10), mye sot rundt nese og munn el. liten forskjell i art. og venøs O2-metning fordi O2 tas ikke opp). Dosering 5g i.v. (70 mg/kg) over 15 min. (Obs bivirkn: Langvarig misfarging av kroppsvæsker (rød/fiolett), obs urin, informer pasient, og interferens med blodprøver; ta lab først!)

Sot

- Dersom pas. har vært i nærheten av brannkilde, kan sot/tjærelignende partikler trekkes langt ned i luftveiene og forstyrre gassutveksling.
- Liberal med bronkoskopi og evt. respiratorbehandling.
- Sot i luftveiene kan gi høy «auto-PEEP» og høyt intrathoracalt trykk som hindrer venøs tilbakestrømning og gir sirkulatorisk kollaps. Bronkoskopi ø.hjelp med rensing av luftveier vil kunne være livreddende.
- Lite funn på rtg thorax ses selv med mye partikler i luftveiene.

Termisk skade


- Laryngoskopi hvis blemmedannelse/ hevelse i oropharynx.
- Ved brannskade med red. gapeevne og ødemdannning i ansikt, munn og svelg: Intuberes oftest tidlig.

Hjem? Alle bør observeres 4 timer, de med lav sannsynlighet for skade kan reise hjem dersom:

- Klinisk kjekk
- Ingen sot i ansikt / rundt nese eller munn eller i oppspytt
- Ingen brannskader i ansikt, ingen brente nesehår
- Ingen mistanke om inhalasjon av toksiske, irriterende eller oksygenfortrengende gasser
- Når COHb <10%, ev. etter 4 timers observasjon
- Ingen metabolsk acidose ved innkomst
- Ikke obstruktiv

Obligat rekontakt med lege/sykehus dersom utvikling av tungpust, alle gis åpen retur i 36 timer.

9.4 Appendiks D: Fagprosedyrer luftveier – Helse Bergen Haukeland Universitetssjukehus

 HELSE BERGEN Haukeland universitetssjukehus	CO- forgiftning
Kategori: Fagprosedyrer/Luftveier	Gyldig fra/til: 02.01.2020/02.01.2023
Organisatorisk plassering: HVRHF/Helse Bergen HF/Metodebøker	Versjon: 1.00
Godkjenner: Lehmann, Sverre	Prosedyre
Dok. ansvarlig: Storesund, Anders og Vaagbø, Guro	Dok.id: D61498

Generelt:

Karbonmonoksid (CO) er en luktfri gass som dannes ved ufullstendig forbrenning av organisk materiale. Inhalasjon av CO ved brann og suicidforsøk er de hyppigste årsakene til CO-forgiftning. CO fortrenger O₂ fra hemoglobinet og hemmer cellenes respirasjonskjede, og gir vevshypoksi, i tillegg dannes vevsskadelige frie radikaler og nitrogenforbindelser. Alle organer kan påvirkes ved CO-forgiftning, men CNS og hjertet er de mest følsomme, med fare for akutt og kronisk skade.

Definisjon:

COHb-verdi > 10%, eller kliniske tegn/symptomer etter kjent CO-eksponering. Nivået på COHb alene kan si noe om forgiftningens alvorlighetsgrad, men må også vurderes opp mot eksponering, tidsforløp, klinikk, metabolsk acidose og evt prehospital oksygenbehandling.

Risikopasienter:

- Barn, eldre, gravide/foster, eller pasienter med cerebro- eller kardiovaskulære lidelser.

Symptomer/funn:

Stor variasjon, lite spesifikke. Avklar mekanisme bak forgiftning, graviditetsstatus og om pasienten er eller har vært bevisstløs. Vær oppmerksom på faren for CNS- eller kardiell ischemi!

- Mild forgiftning:
 - Hodepine, svimmelhet, synsforstyrrelser, kvalme og oppkast, diare.
- Moderat forgiftning:
 - Forvirring, redusert bevissthet, takykardi, angina, dyspne, takypne.
- Alvorlig forgiftning:
 - Hypotensjon, arytmi, ischemi, hjertestans, lungeødem, respirasjonsstans, kramper, koma, metabolsk acidose.

Klinisk undersøkelse:

- Somatisk us. inkl. hud ("kirsebærrød") + neurologisk us. inkl. Glasgow Coma Scale.
- BT, puls, temp, SpO₂.
 - OBS! SpO₂ kan være "falsk normal", da sensor ikke skiller mellom oksygenert Hb og karboksyhemoglobin (COHb). Avklares med arteriell blodgass på apparat med CO-oksymeter.

Supplerende Undersøkelser:

- Arteriell blodgass tas straks!
 - COHb, oppgis på blodgass i prosent.
 - Syrebase-status (metabolsk acidose?) inkl. laktat og aniongap, glukose.
- EKG, evt. telemetri.
- Lab: Glukose, laktat, troponin, NT-proBNP, kreatinin, Na, K, etanol, toxscreen, evt. CO i venøst blod (Heparin-rør).
- Rtg thorax.
- CT eller MR cerebri ved behov.

Behandling:

Oksygentilskudd. Alltid normobar oksygenbehandling (NBO), i svært alvorlige tilfeller hyperbar oksygenbehandling (HBO). Dette øker CO-utskillelse gjennom lungene. Halveringstid for CO ved

inhalasjon av romluft er 5 timer, ved NBO 90 min, og ved HBO 30 min. Ved mistenkt eller bekreftet CO-forgiftning må vakthavende dykkerlege kontaktes via AMK (97-7000) for vurdering av HBO.

- **Normobar oksygenbehandling:**
 - Gis til alle. 100% oksygen på maske med reservoar med 15 L O₂/minutt i 6-12 timer, eller til COHb < 5%. Vurder lengre behandlingstid hos gravide.
- **Hyperbar oksygenbehandling:**
 - Indikasjon:
 - Bevisstløse pasienter.
 - Gravide med COHb > 10–15%, eller tegn til føtalt stress.

HBO gis med 90 min. oksygenpusting på 3 bar (tabell 20/90) i trykkammer ved HUS. Bevisstløse skal alltid paracenteres bilateralt før HBO. Ubehandlet pneumothorax er en absolutt kontraindikasjon.

- **Symptomatisk behandling:**
 - Ved komatøse eller respiratorisk ustabile pasienter, må intubering vurderes.
 - Ved hypotensjon gis væske og evt. vasopressor.
 - Alvorlig metabolsk acidose korrigeres.
 - Krampor behandles med benzodiazepiner.

OBS! Ved røykinhalasjon og laktat > 10 mmol/L bør samtidig cyanidforgiftning mistenkes og cyanid-antidot gis (se eget kapittel om inhalasjonsskader).

Lav terskel for kontakt med Giftinformasjonssentralen, tlf. 22 59 13 00.

Oppfølging:

Etter HBO-behandling skal pasienten henvises til neurologisk vurdering med EEG (nevro bakvakt calling 93-5002) og nevropsykologisk undersøkelse ved Yrkesmedisinsk Avdeling (tlf. 97-3875). Disse undersøkelser skal gjentas etter 6 uker og 12 måneder. Henvisning til psykiater dersom aktuelt.


Referanser:

Helsebibliotekets side om behandlingsanbefalinger ved forgiftning med CO.

Håndbok i NBC-medisin; Gasser som hemmer transport og omsetning av oksygen.

www.uptodate.com (Carbon monoxide poisoning).

EK – Elektronisk kvalitetshåndbok, HUS - Oksygenbehandling for voksne innlagt i sykehus.

 HELSE BERGEN <small>Helse Bergen HF</small>	<h2>Inhalasjonsskader</h2>
Kategori: Fagprosedyrer/Luftveier	Gyldig fra/til: 02.01.2020/02.01.2023
Organisatorisk plassering: HVRHF/Helse Bergen HF/Metodebøker	Versjon: 1.00
Godkjenner: Lehmann, Sverre	Prosedyre
Dok. ansvarlig: Storesund, Anders Kjellevoid, Indrekvam, Solfrid	Dok.id: D61776

Årsak: Skader oppstått i luftveier og lunger sekundært til inhalasjon av kjemikalier i form av damp, gass eller aerosoler.

Generelt:

- Er det trygt å gi hjelp? Vurder om det skal iverksettes sanering samt gass/kjemikaliealarm.
- Kontakt AMK (7-3312/13), evt. Giftinformasjonen (tlf. 22 59 13 00) – døgnberedskap.
- Ved mistanke om/bekreftet CBRNE-hendelse opprettes kontakt med Nasjonal behandlingstjeneste for CBRNE-medisin (tlf. 22 11 91 01, evt. 23 25 61 50).

Klinikk:

Skadeomfanget avhenger blant annet av det inhalerte stoffets egenskaper, eksponeringstid og omgivelser, og pasientens helsetilstand. Initial presentasjon kan derfor variere fra ingen eller milde luftveissymptomer, til akutt lungeskade/lungeødem og utvikling av ARDS, evt. også multiorgansvikt. Til tross for milde initialsymptomer kan forgiftningen likevel få et alvorlig forløp, slik at pasienten må observeres over et visst tidsrom, med repeterte undersøkelser.

Diagnostikk:

- Triagering (livstruende, alvorlig, lettere skader) etter ATLS/ BEST-prinsipp.
- Tenk ABC(DE) uansett genese.
- Avklar hvilken type gass det dreier seg om. En gass kan virke på flere måter. Se tabell nederst for oversikt over ulike gasser:
 - Oksygenfortrengende
 - Systemtoksiske (hemmer viktige cellefunksjoner)
 - Irriterende (hud- og slimhinneirritasjon)
 - Brannrøyk (termal skade, forgiftning med CO/cyanid, sot i luftveiene)
- Klinisk undersøkelse:
 - Sot rundt nese/munn? Sot i oppspytt? Brannskade i ansikt/hals?
 - Termal skade i øvre luftveier (hevelse/blemmer i munn og oropharynx)?
 - Tegn til ødem i og evt. okklusjon av øvre luftveier?
 - Stridor, aksessorisk respirasjonsmuskulatur, takypne
 - Affeksjon av nedre luftveier?
 - Hoste, obstruktive lungefysikalia, lungeødem, takypne
 - Lokalirritasjon (øvre luftveier, øyne, hud)?
- Supplerende undersøkelser:
 - Pulsoksymetri
 - OBS! Skiller ikke mellom oksy-Hb og CO-Hb, kan gi falsk normal SpO2 ved CO-forgiftning. Avklares med arteriell blodgass.
 - Arteriell blodgass
 - pO2, pCO2, SaO2, CO-Hb, oksygenratio, S/B-status (met acidose?) inkl. laktat + anion gap, glukose.
 - Rtg thorax
 - Evt PEF-målinger
 - Lab
 - Hematogram, CRP, Na, K, kreatinin, laktat, troponin, levergalle (= prøver mtp endeorganskade), toxscreen, etanol, evt s-cyanid (heparinglass) til Nasjonalt Folkehelseinstitutt.
 - Vurder laryngoskopi (ØNH-vakt) eller bronkoskopi (Lungevakt).

- Ved inhalasjon av brannrøyk og laktat > 10 mmol/L må cyanidforgiftning mistenkes!

Behandling:

- Vurder det kliniske bildet:
 - Ved termal skade eller ødem i øvre luftveier, alvorlig respirasjonssvikt eller ved komatøs pasient, må ØH intubering vurderes. Diskuter med anestesilege!
 - Oksygen skal i praksis gis til alle. Høy flow og FiO₂ (100%).
 - Ved obstruktive sympt gis Ventoline 5 mg + Atrovent 0,5 mg på forstøver hvert 20 min.
 - Ved alvorlige irritasjonssymptom, lungeødem, inh av lite vannløselige gasser (klor, nitrøse gasser, fosgen) gis Pulmicort (budesonid) 0,5 – 1 mg på forstøver, deretter x 3 – 4 daglig, evt. Solu-Medrol 20 – 100 mg iv x 3 daglig.
 - Ved lungeødem: CPAP 5 – 10 cm H₂O, høy FiO₂. Vurder intubering.
 - Vurder bronkoskopi med rensing av luftveier ved inhalasjon av mye sot.
 - Antibiotika ved mistanke om infeksjon.
 - Ved øyeeffeksjon fjernes evt. kontaktlinser, skylt grundig med isotont NaCl eller lunkent vann i 10 – 20 min. Tilsyn av øyelege.
 - Tilsyn av hudlege/plastikkirurg ved hudaffeksjon.
 - Ved CO-forgiftning, se kapittel om CO-forgiftning og hyperbar O₂-behandling.
- Antidot:
 - Ved cyanidforgiftning:
 - Cyanokit[®]: Førstevalg. Voksne: Startdose 5 gr (= 2 hetteglass, hvert glass løses i 200 ml NaCl 0,9 %) gis iv over 15 min. Gjentas ved utilstrekkelig effekt (inf over 15 min - 2 timer). Cyanokit gir rødlig misfarging av kroppsvæsker.
 - Evt Tiosulfat[®]: For dosering, se Felleskatalogen. Begge er tilgjengelig i akuttmottak.
 - Ved forgiftning med organofosfater (insekticider/nervegasser):
 - Atropinsulfat: Gis umiddelbart. Voksne 2 mg im eller langsomt iv. Gjenta dose etter 5 min, senere hvert 10-15 min inntil full atropinisering (opphevet bronkialesekresjon).
 - Alternativt atropin/oxim autoinjektor im (inneholder 2 mg Atropin og 220 mg Obidoxim). Tilgjengelig i akuttmottak.
- Ved minste tvil, kontakt Giftinformasjonen, tlf. 22 59 13 00.

Observasjonstid:

- Ved luftveissymptomer skal pasienten observeres i sykehus minst 24 - 48 timer mtp utvikling av ødem i øvre luftveier eller respirasjonssvikt. Husk spirometri og diffusjonsmåling, blodgass og rtg thorax før utreise, evt. oppfølging ved Lunge pol.
- Alle pasienter som skrives ut må få beskjed om å ta ny legekontakt ved feber, økt dyspne, hoste eller tetthet i brystet den første uken etter utreise.

Inhalasjonsskader

Versjon:
1.00

Agens	Gass/kjemikalie	Gassinfo	Symptomer	Behandling Antidot	Dekontaminering
Irriterende gasser	Klorgass	Gulgrønn, stikkende lukt. Lite vannløselig, når nedre luftveier. Vannrenseanlegg. Blekemidler, Treindustri Produksjon/brann av plast	Irritasjon øyne. Sår hals. Lett dyspne OBS bronkospasme ØLV/NLV symptomer OBS forsinket reaksjon	O2 Steroider* Bronkolytika* CPAP?	Fuktig hud/klær Unngå å ta av klær over hodet
	Ammo- niakk	Fargeløs. Stikkende lukt (salmiak) Prod av gjødsel Luting av halm Større kjøleanlegg	Lokalirriterende. ØLV symptomer Ved øyeaffeksjon skylk godt, kontakt øyelege. OBS forsinket reaksjon	O2 Steroider* Bronkolytika* CPAP?	Fuktig hud/klær Unngå å ta av klær over hodet
	Nitrøse gasser	Dannes ved brann ved høy temp (silo/sveising). Fortrenger O2. Lite vannløselig, når derfor nedre luftveier, kan gi forsinket luftveisreaksjon. Obs minst 24 t ved sympt.	Som regel få symptomer initialt, oftest fra ØLV, deretter fra NLV (Lungeødem). Vasodil. ↑↔Met-Hb OBS forsinket reaksjon	O2 Steroider* Bronkolytika* CPAP?	Fuktig hud/klær Unngå å ta av klær over hodet
	Fosgen	Fargeløs. Lukt som råtnende frukt. Produksjon av plast + insektmidler. Brukt generelt i industri. Lite vannløselig, når derfor nedre luftveier.	Brennende øyne Sår hals OBS Lungeødem NLV symptomer OBS forsinket reaksjon	O2 Steroider* Bronkolytika* CPAP?	Fuktig hud/klær Unngå å ta av klær over hodet
	Svovel- dioksid	Fargeløs, stikkende lukt. Vannløselig, affiserer hoveds ØLV. Blekemidler, Prod av svovelsyre. Kjøle- aggregater. Fumigasjon	ØLV symptomer Bronkokonstriksjon Hoste	O2 Steroider* Bronkolytika* CPAP?	Fuktig hud/klær Unngå å ta av klær over hodet
Oksygen- fortrengende	CO2	Fargefri, luktfri. Brann	Svimmelhet, likegyldig Hypoksiske kompl	O2	Nei
Inhibert transport og omsetning av oksygen	CO	Smak-/farge- og luktløs. Dannes ved ufullstendig forbrenning av organisk materiale ved lav O2-tilførsel	«Kirsebærfarget» hud v/alvorlig forgiftning. Svimmelhet, hodepine, kvalme, hypervent. Takykardi, hyperrefleksi	O2 Vurder trykktank (3 atm)	Nei
	Cyanid (cyano- gen)	Fargeløs/svakt blå. Bitende/stikkende lukt av mandler. I bruk i industri. Beh. av gull, sølv, bronse. Brann-røyk. Fumigasjon av skip.	Store pupiller. Kvalme. Hodepine. ↓RR ↓bevissthet	O2 Antidot: Cyanokit, evt. Tiosulfat	Nei
Systemtokiske gasser	Nerve- gasser/ insekti- cider	Lukt/farge avhenger av agens. Ikke i allmenn sirkulasjon. Hemmer acetylkolinesterase, gir kolinerge symptomer (muskarinerge/nikotinerge).	Små pupiller, uskarpt syn, økt saliva, tåreflod og bronkialsekresjon. Dyspne, bradykardi, svette, miksjonstrang, Kramper, paralyse, koma.	O2 Antidot: Atropin, evt Autoinjektor med atropin /obidoxim. Diazepam ved kramper.	Alle tilseilte. Unngå hud til hud kontakt inntil fullst dekont. Klær klippes av.

* = ved luftveissymptomer ØLV = øvre luftveier NLV = nedre luftveier

Dok.id: D61776

Ref.nr: 02.28.1.8-07

Uoffisiell utskrift er kun gyldig på utskriftsdato

Side 3 av 4

Referanser:

- Helsebiblioteket, behandlingsanbefalinger for akutte forgiftninger
(<https://www.helsebiblioteket.no/forgiftninger/gasser-og-kjemikalier>)

-Håndbok i NBC-medisin 2011
(<https://www.helsebiblioteket.no/retningslinjer/h%C3%A5ndbok-i-nbc-medisin/nasjonalt-kompetansesenter/innledning-til-nbc-h%C3%A5nboken>)

9.5 Appendiks E: Metodebok i Brannskadebehandling – Haukeland Universitetssjukehus

Fokuser også på andre skader og kroniske sykdommer

Dato publisert: 12.02.2020 Versjon: 1.0

Generelt
Inhalasjonsskader
Andre sykdommer

GENERELT

Utbredte hudbrannskader kan føre oppmerksomheten bort fra andre samtidige skader og også andre, kroniske sykdommer.

Forsøk via pasient, ledsagere, og ambulansepersonell å få klarlagt skademekanismen med tanke på assosierte skader. En nøyaktig klinisk undersøkelse er derfor påkrevet. Se: også [Bruk av traumeteam](#).

INHALASJONSSKADER

Røykutvikling i lukket rom gir mistanke om inhalasjonsskade. (se [Inhalasjonsskader](#)).

ANDRE SYKDOMMER

Tidligere alvorlig sykdom og eventuelt kroniske tilstander noteres. Allergi?
Alkohol-/medikamentmisbruk? Psykiske problemer?

<https://brannskade.prosedyrer.no/index.php?action=showtopic&topic=smqw8x7x>

1/1



Brannskader med utfordrende lokalisasjon

Dato publisert: 13.02.2020 Versjon: 1.1

Forfattere: Henning Onarheim, Janne Skiftesvik, Grete Thormodsæter Fitjar og Ragnvald Ljones Brekke

HÅNDBRANNSKADER

Ved omfattende og sirkulære skader på hender kan det være behov for akutt trykkavlastning i form av eskarotomi også på håndrygg og fingre. Vi foretrekker nå som oftest å benytte enzymatisk eskarotomi, se [Akutt kirurgi \(Enzymatisk eskarotomi\)](#). Dersom dette ikke er gjennomførbart, utføres kirurgisk eskarotomi, se: [Akutt kirurgi: eskarotomi](#), inkludert avlastning av karpaltunnelen ved behov. Denne prosedyren bør utføres av kirurg som er vant med å operere på hender, da den er teknisk noe mer krevende enn øvrige eskarotomier.

Dersom man er usikker på om eskarotomi er nødvendig, må hendene og deres sirkulasjon overvåkes nøye. Hendene eleveres og perifer sirkulasjon må kontrolleres hyppig.

Sårstell:

Hendene vaskes, løse hudflak fjernes, negler klippes og renses. Håndbrannskader kan være særlig godt egnet til "kjemisk debridement" ved bruk av Nexobrid, slik at en mest mulig kan bevare viabelt vev.

Bandasjering av hender:

Må tilpasses det valgte bandasjematerialet. Generelt bandasjeres hver finger for seg. Ved skade i håndflate, særlig hos barn, er det svært viktig med ekstensjon av fingre og håndflate, samt abduksjon av tommel. Ved skade både i håndflate og av håndrygg bandasjeres i "hvilestilling". Ved sårstell av hender på dagtid er det ønskelig at fysioterapeut deltar

Ved brannskade av hender og armer eleveres alltid disse, særlig i akuttfasen. (Se også [Fysioterapi](#)).

BRANNSKADE AV ANSIKT OG ØRER

Svært omfattende og dype brannskader i ansiktet kan være aktuelle for tidlig kirurgi. Det er da gjerne aktuelt å utføre enzymatisk revisjon (se i kapittelet [Nedskjæring](#))

Delhudsskader i ansiktet behandles konservativt. Blemmer og forurensning fjernes, og ansiktet smøres inn med et **tynt** lag vaselin eller medisinsk honning. Medisinsk honning kan ligge på i inntil tre dager; erfaringsmessig kan honning kreve ny påføring etter 1-2 dager.

Stell av ansiktsbrannskader er ofte svært smertefullt, og slike stell krever da ofte generell anestesi. Ansikt vaskes da med saltvann eller Prontosan, og øyne rengjøres eventuelt med "øyespyd". Menn barberes skånsomt.

Det er viktig å være forsiktig ved stell slik at vask og skorpefjerning ikke medfører blødning idet dette vil øke tendensen til arrdannelse.

Brannskader på ørene

Ører behandles nesten alltid konservativt med daglig vask med Prontosan eller NaCl 9mg/ml og påsmøring av Flamazine. Selv om det er blottet brusk vil ørene langsomt kunne epitelialiseres og selve øreformen forhåpentligvis beholdes.

BRANNSKADER PÅ HALS

Ved brannskader på halsen utvikles lett fleksjonskontrakturer. Nakken eksterteres godt, og bruk av hodepute frarådes.

Dype brannskader fortil på hals, kan gjøre det aktuelt å vurdere tidlig tracheostomi og gjerne samtidig revisjon og dekking.

BRANNSKADER I ARMHULENE

Armhuleområdet er særlig utsatt for kontrakturer og arrstrengdannelser. Armene forsøkes leiret med 90° abduksjon i skuldre, se [Fysioterapi](#). Ofte er det aktuelt for fysioterapeut å bruke

anestesi ved sårstell til samtidig å få tøyet godt i skuldrene.

BRANNSKADER I PERINEUM OG PÅ GENITALIA

Hos pasienter som ikke selv har kontroll på avføring, kan en **Fecal-collector** fungere brukbart - hvis det er tilstrekkelig margin med uskadet hud omkring anus for feste av fecal-collector.

Flexi-Seal kan også fungere rimelig bra for oppsamling av avføring, men dette forutsetter av avføringen har ganske tynn konsistens og tolereres dårlig av ikke-sederte pasienter.

Helt unntaksvis har en i noen tilfeller med svært dyp skade på setet, og samtidig tilgjengelig uskadet hud fortil på abdomen, tidlig i forløpet vurdert å anlegge en avlastende kolostomi, om mulig gjort laparoskopisk. Vurdering av eventuell kolostomi bør diskuteres tidlig med gastrokirurg og gjerne gjøres før abdominalområdet brukes som donorområde.

Håndbrannskader

Brannskade av ansikt og ører

Brannskader på hals

Brannskader i armhulene

Brannskader i perineum og på genitalia

Inhalasjonsskader



Dato publisert: 12.02.2020 Versjon: 1.0
Forfattere: Henning Onarheim

GENERELT

Inhalasjonsskade brukes som betegnelse på forandringer i luftveier og lunger som følge av inhalert røyk (partikler), gasser og opphetet luft/damp. Nedenfor larynx-nivå er kjemisk slimhinneskade vanligere enn termisk. Denne gir en kjemisk trakeobronkitt som sekundært ofte fører til pneumoni. Inhalasjonsskade og eventuelle sekundære komplikasjoner forverrer prognosen ved brannskade. De fleste pasienter som overlever alvorlig inhalasjonsskade vil lungemessig greie seg godt.

Mulighetene for å ha inhalert større doser røyk og skadelige gasser er store dersom den forulykkede har oppholdt seg i "lukket rom". I akutfasen må en mistenke både alvorlig *hypoksi* og *gassforgiftning* (karbonmonoksyd og hydrogencyanid).

I tillegg til gassforgiftning må en være forberedt på følgende:

- 1. Obstruksjon av øvre luftveier.** Dette er oftest følge av kjemisk og/eller termisk skade. Den sekundære ødemutvikling i slimhinnene kan inntre i løpet av få timer og gi betydelig obstruksjon. Dette kan særlig være dramatisk hos mindre barn.
- 2. Kjemisk trakeobronkitt.** Skade av mukosa i nedre luftveier (under glottis) er nesten alltid en kjemisk skade. Dette skyldes inhalasjon av røyk, sot, gasser og damper. Kunstige tekstiler avgir ofte sterkt etsende gasser ved forbrenning (aldehyder). Sekundært er pneumoni svært vanlig.
- 3. Alveol/lungeparenkymsskade.** Dette kan ses ved alvorlige inhalasjonsskader, og spesielt ved inhalasjon av damp (steam).

DIAGNOSTIKK VED INHALASJONSSKADE

1. Sykehistorie og kliniske funn som taler for at det kan foreligge inhalasjonsskade:

- Skade oppstått ved brann i lukket rom, gjerne med forbrenning av syntetiske materialer eller petroleumsprodukter
- Obstruksjonsfysikalia ved stetoskopi
- Tap av eller påvirket bevissthet
- Dyspnoe og hoste
- Heshet, stridor og/eller hvesende respirasjon
- Brannskade i ansiktet
- Svidde nesehår
- Sot i nese, munn eller svelg
- Sotfarget oppspytt

Kliniske symptomer ved CO-forgiftning er variable, og gir på det beste kun en grov antydning om alvorlighetsgrad.

2. Laboratorieundersøkelser

Bestemmelse av karboksyhemoglobin (COHb) er nødvendig for sikker diagnose av CO-forgiftning. COHb måles ved vanlig blodgassanalyse, men kan også måles i EDTA-blod.

Pulsoksymetermålt oksygenmetning (SpO₂) påvirkes av COHb og kan ved CO-forgiftning ikke brukes til å bedømme oksygenering.

Første COHb prøve som tas, vil avhengig av tid som er gått siden eksponering og senere O₂-tilførsel, vise vesentlig lavere COHb verdi enn på skadestedet. Det har vært vanlig å regne at CO-Hb blir halvert etter knapt 60 minutter ved 100% O₂.

Dokumentasjon på sammenheng mellom målt COHb verdi og kliniske symptom er høyst ufullstendig. Hodepine, kvalme/oppkast og anstrengelsesdyspnoe er angitt ved COHb >30 %, sterkt rødlig hud- og slimhinne-farge ("cherry-red") ses ikke alltid, men er angitt å være typisk for COHb >40 %.

Generelt

Diagnostikk ved inhalasjonsskade

Behandling ved inhalasjonsskade

Hyperbar oksygenbehandling (HBO) ved karbonmonoksid (CO) - forgiftning

Luftveistilgang

Ekstracorporeal membranoksygenering (ECMO) ved brannskade

Referanser

Ved Avd. for medisinsk biokjemi og farmakologi oppgjes øvre normalgrense for COHb 0,018 (1,8%), mens opptil 8 % COHb kan ses "normalt" hos røykere.

Stigende se-lactat og økende metabolsk acidose kan ses ved både CO- og HCN-forgiftning.

Ved alvorlig CO-forgiftning kan det ses myokardskade. Ta EKG og troponin-T. Vurder ekkokardiografi dersom klinikk preges av pumpevikt.

3. Spesielle undersøkelser

Ved **laryngoskopi** kan en finne sot, ødem og slimhinneforandringer i svelg og larynx.

Sikring av diagnosen gjøres med **fiberoptisk bronkoskopi**. På BSA har en tilgjengelig engangs aScop 3 bronkoskop (modeller 5.0/2.2 og 3.8/1.2). Bronkoskopi er da lett tilgjengelig, særlig dersom pasienten likevel er intubert. Hvis en bruker et engangs bronkoskop på vakttid, kan en etter bruk suge gjennom arbeidskanalen, tørke av skopet, og legge skopet tilbake i posen, slik at samme skop eventuelt kan brukes til en ny bronkoskopi på dagtid.

Funn av erythem, sot, ødem, økte sekretmengder og eventuelt også sårdannelse er typisk for inhalasjonsskade, i svært alvorlige tilfeller ses nekrose (hvite devitaliserte områder) av mukosa. Med bronkoskopet når man ned til segmentalbronkier og kan få et godt bilde av både graden og utbredelsen av forandringene. **Mengde av synlig sot samsvarer dårlig med senere respirasjonsproblem.**

Rtg thorax gjøres ved innkomst og daglig deretter, men viser initialt ofte ikke så mye. Forandringer inntreffer ofte forsinket (1-2 dager).

I praksis stilles diagnosen inhalasjonsskade på basis av sykehistorie og kliniske funn, og bronkoskopi.

Klinisk forløp

Forløpet etter inhalasjonsskade er variabelt. Kombinasjonen av alvorlig inhalasjonsskade og omfattende hudbrannskade innebærer generelt en betydelig forverret prognose. Hos pasienter med lett til moderat inhalasjonsskade vil det typiske forløp være utvikling av en kjemisk trakeobronkitt som i løpet av noen dager kan gå over i en bronkopneumoni. I alvorligere tilfelle kan en se tre stadier:

1. **Akutt respirasjonssvikt** som opptrer i løpet av første døgn, er forårsaket av luftveisobstruksjon, inflammasjon i luftveier med bronkospasme samt gassforgiftningseffekter.
2. **Lungeødem** kan opptre mellom 6 og 72 timer etter skaden. Det er mer typisk å se lungeødem 2. og 3. døgn i væskeresorbsjonsfasen enn i akutfasen.
3. **Bronkopneumoni** av alle alvorlighetsgrader kan oppstå. Pga pasientens nedsatte infeksjonsforsvar, vil en kunne forvente infeksjon også med uvanlige mikrober. Det er dog vanlig med gram-positive kokker i første uke, og en økning av gram-negative staver og sopp senere i forløpet.

BEHANDLING VED INHALASJONSSKADE

1. Mtp gassforgiftning gis det initialt rikelig med oksygen. Er det mistanke om CO-forgiftning, skal det gis 100 % O₂ hvis mulig (CPAP, Lærdalsbag m/reservoar, evt. respirator). Halveringstiden for karboxy-hemoglobin (COHb) er ca. 4 timer når pasienten puster romluft, men reduseres til under 1 time når pasienten puster 100 % O₂. Fortsett 100% O₂ til COHb er < 5%.
2. Hyperbar oksygenering (HBO) i trykk-kammer vil effektivisere avgiften av CO ikke bare fra blodet, men også i vevene. HBO overveies hos pasienter som er bevisstløse og med påvist forhøyet CO-Hb. HBO-vurdering er en bakvaktsoppgave i samarbeid med vakthavende på Hyperbarmedisin. HBO bør være startet innen seks timer etter skaden (se eget avsnitt: [Inhalasjonsskader og luftveisproblemer \(Hyperbar oksygenbehandling ved karbonmonoksid \(CO\) forgiftning\)](#)).
3. Cyanid-forgiftning bør mistenkes ved metabolsk acidose uten vesentlig forhøyet COHb. Behandling med hydroxycobalamin (Cyanokit), til voksne 5 gr. i.v over 15 minutter, eventuelt gjentatt en gang. Husk at metabolsk acidose også kan sees ved underresuscitering eller ved andre (gjærne oversette) skader.
4. Elevasjon av hode/overkropp (dersom hypovolemi er korrigeret) for om mulig å begrense ødemdannelsen.
5. Normalt gis det ikke corticosteroider. Ved bronkospasme kan bronkodilaterende inhalasjoner prøves.
6. Profylaktisk antibiotika gis ikke.
7. Adekvat bakteriologisk prøvetaking (steril børste eller som skyll via bronkoskop).
8. Intensiv lungefysioterapi, stillingsforandringer og drenasjeleie er nyttig for å forebygge sekretstagnasjon og atelektaser. Ved seigt slim er det aktuelt å gi slimløsende middel (Mucomyst).
9. PEP-fløyte kan være utmerket til disse pasienter og bør anvendes når pasienten er våken. CPAP-maske er et godt alternativ dersom pasienten ikke har vesentlig brannskade i ansikt. Supplerende hjelpemidler til barn: 17-mai fløyte, såpebobler.

10. Hos pasienter som har symptomer på luftveisobstruksjon og pasienter som en frukter

vil få et økende ødem i luftveiene – spesielt hos mindre barn, bør det være lav terskel for intubasjon (gjøres ofte forut for transport av pasienten). Suksametonium (Curacit) anses kontraindisert etter 12-24 timer. Etter intubasjon må det alltid være høy beredskap for (re-)intubasjon.

11. Dersom en ikke oppnår tilfredsstillende oksygenering og/eller CO₂-utlufting, startes respiratorbehandling. Økt respirasjonsarbeid kan i seg selv være indikasjon for respirator. En anvender oftest trykk-kontrollert eller trykkunderstøttet ventilasjon. PEEP 5-15 cm H₂O har gunstig effekt på oksygenering. FiO₂ >0,6 utover 2 døgn bør unngås, likeså høye platåtrykk (>30 cmH₂O).
12. Ved skader sirkulært på thorax er det aktuelt å gjøre eskarotomier for å lette ventilasjonen, senke luftveistrykket og også bedre den venøse retur til hjertet.
13. Alle intuberte pasienter må få fuktet inspirasjonsluft. Sugning av sekret, evt. instillasjon av NaCl 9 mg/ml, og repetert sugning for å hente opp seigt slim og sot er viktig.
14. Hos enkelte pasienter med omfattende slimhinneskade i trachea og sentrale bronkialtre kan det i en periode være nødvendig med nesten daglige bronkoskopier for målrettet å fjerne seigt sekret og sot. I enkelttilfelle har det vist seg nødvendig å bruke biopsi-tang til å «plukke opp» seige «membraner». God billegddokumentasjon er ønskelig.
15. Ytterligere tiltak som kan være aktuelle ved progressiv lungesvikt:
 - Rekrutteringsmanøver (gjentatt)
 - Optimalisere respiratorinnstilling: øke PEEP >15 cmH₂O, øke inspirasjonstid (I:E=1, OBS: auto-PEEP).
 - Evt muskelrelaksantia.
 - Bukleie
 - Oscillator
 - Permissiv hyperkapni (godta forhøyet PaCO₂, men holde pH >7,20)

HYPERBAR OKSYGENBEHANDLING (HBO) VED KARBONMONOKSID (CO) - FORGIFTNING

Det er ikke internasjonal enighet om hvorvidt man ved å behandle CO-forgiftninger med hyperbar oksygenbehandling (HBO) for å eliminere CO raskere fra blodbanen kan redusere kognitive senfølger eller om HBO kan forverre slike. Av den grunn er det bare pasienter med svært alvorlig CO-forgiftning som tilbys tilleggsbehandling med HBO.

- Dersom HBO *ikke kan startes innen 6 timer* etter CO-intoksikasjonen, behandles pasienten med normobar oksygenbehandling
- Hos *ustabile pasienter* må nytten av HBO veies mot faren ved transport og kammerbehandling
- Pasienter som har hatt *hjerrestans*, behandles kun med normobar oksygenbehandling i 12-24 timer og eventuelt kjøling ifølge sykehusets rutiner

Behandling:

- Førstebehandling ved CO-forgiftning er normobar oksygenbehandling (NBO)
- Pasienter som er gravide eller er bevisstløse skal behandles med én behandling Tabell 20/90

Ved røykinhalasjon og lactat >10mmol/l må cyanidforgiftning mistenkes og Cyanokit administreres.

Etter HBO skal pas henvises til Nevrologisk avd for EEG og nevrofysiologisk undersøkelse.

Kilde: Prosedyrebeskrivelse, Seksjon for hyperbarmedisin, Yrkesmedisinsk avdeling, Haukeland universitetssykehus (lest: 12. desember 2019)

LUFTVEISTILGANG

I akuttfasen brukes vanligvis oral tube. Nasotrakeal tube sikrer mer stabil tubeoposisjon, men kan gi sinusitt. Oral eller nasotrakeal tube bør ikke klippes, og må festes godt med bendelbånd sirkulært rundt hodet.

Tracheotomi har vært ansett for å være kontraindisert i akuttfasen, ut fra betraktninger om at en tracheostomikanyle kunne «løftes» ut av trachea pga økende ødem på halsen. Hvis en velger tidlig tracheotomi i skadet hudområde, bør en mtp. truende ødemutvikling vurdere å bruke en tracheal-kanyle med regulerbar flens.

Tidspunktet for en mer «elektiv» tracheotomi må individualiseres. En fordel med tidlig tracheostomi vil være at en ofte vil kunne redusere adskillig på sedering, samtidig som at luftvei kan sikres bedre ifm. senere sårstell (sammenlignet med pasienter som primært har hatt tube noe lenger, men som så ekstubereres).

EKSTRACORPOREAL MEMBRANOKSYGENERING (ECMO) VED BRANNSKADE

Erfaring med ekstracorporeal membranoksygenering (ECMO) til brannskadede er svært begrenset, og en rolle for ECMO ved mer utbredt brannskade kombinert med inhalasjonsskade ikke er avklart.

Formodentlig må en vurdere å gjøre et forsøk med ECMO dersom respirasjonssvikten ellers skulle tilsagt at en ville vurdert ECMO, at hudaffeksjonen ikke er («håpløst») omfattende og/eller dyp, at kanylering vil være teknisk og praktisk mulig, at videre brannskadekirurgi kan skyves noe ut i tid, og at cerebral status ikke er bekymringsfull.

REFERANSER

1. Walker PF, Buehner MF, Wood LA et al. Diagnosis and management of inhalation injury: an updated review. *Crit Care* 2015;19:351.
2. Burke CR, Chan T, McMullan DM. Extracorporeal life support in adult burn patients. *J Burn Care Res* 2017; 38: 174-8.
3. Hampson NB. Myth busting in carbon monoxide poisoning. *Am J Emerg Med* 2016; 34, 295-7.