



VENTILASJON

KRAV TIL ATMOSFÆREN I TUNNELER

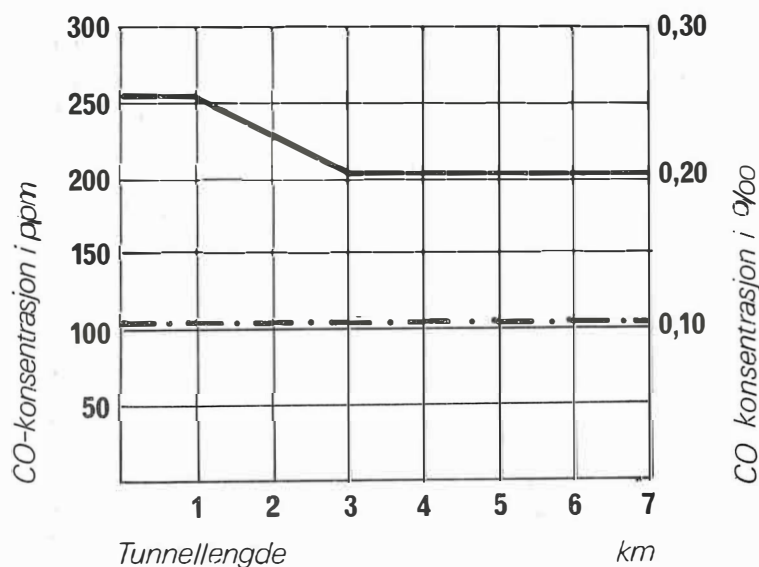
1.1 GENERELT

Hovedoppgavene til et ventilasjonsanlegg i en vegtunnel er til enhver tid å sørge for at konsentrasjonen av giftige og ubehagelige gasser holdes på et ufarlig nivå, og at konsentrasjonen av støv og sot ikke gir for dårlige siktforhold i tunnelen.

Med den normale sammensetning av gassene i eksosen, er det bare nødvendig å sette grenser for tillatt konsentrasjon av karbonmonoksyd (CO-gass) og nitrogendioksyd (NO₂-gass). Konsentrasjonene av de øvrige giftige gassene byr ikke på helsemessige faremomenter hvis en sikrer tilstrekkelig uttynning av CO- og NO₂-gassen.

1.2 GRENSEVERDIER FOR KARBONMONOKSYD

Tillatte CO-konsentrasjoner i tunneler, som funksjon av tunnellengden, er gitt i figur XIII-1.1.



Figur XIII-1.1: Grenseverdier for CO-gass i vegtunneler, c:

- Stengt for gang- og sykkeltrafikk
- .- Åpen for gang- og sykkeltrafikk



VENTILASJON

KRAV TIL ATMOSFÆREN I TUNNELER

Utluftningstid	Tillatt konsentrasjon av nitrøse gasser (NO_x) C_{NO_x}
Mindre enn 1/3 time	30 ppm
1/3 - 1/2 time	25 ppm
1/2 - 1 time	20 ppm
1 - 2 timer	15 ppm
2 - 5 timer	10 ppm
Over 5 timer	8 ppm

Figur XIII-1.2: Tillatt konsentrasjon av nitrøse gasser (NO_x)

1.4

GRENSEVERDI FOR TILLATT SIKTFORURENSNING

Grenseverdien for tillatt siktforurensning beregnes ut fra høyeste trafikkfart ved dimensjonerende trafikkmengde, se figur XIII-1.3. For vanlige vegtunneler bør ventilasjonsanlegget dimensjoneres for en fart på ca 60 km/h. For tunneler på motorveger hvor det generelle fartsnivået er høyere, bør en høyere fart i dimensjonerende time brukes. Partikkelinnholdet i luften er sammensatt av støv og sot fra forbrenningen.

Trafikkfart (km/h)	50	60	70	80	90
Høyeste partikkelinnhold i luften $\text{mg/m}^3 : \rho_{\text{sot}}$	1,4	1,25	0,9	0,7	0,5

Figur XIII-1.3: Grenseverdi for tillatt siktforurensning (partikkelforurensning) - ρ_{sot}



2.1 CO-PRODUKSJON

Beregningsmodell for CO-produksjon fra biltrafikken:

$$Q_{oCO} = q_{oCO} \cdot M \cdot f_h \cdot f_s \cdot L$$

$$Q_{oCO} = \text{totalt produserte CO-mengder, m}^3/\text{h}$$

$$q_{oCO} = \text{basisverdi, CO-produksjon pr bil, m}^3/\text{km} \cdot \text{kjt}$$

$$M = \text{trafikkmengde, kjt/h}$$

$$f_{hh} = \text{korreksjonsfaktor for høyde over havet, se figur XIII-2.1}$$

$$f_s = \text{korreksjonsfaktor for kjøring i stigning og redusert fart, se figur XIII-2.2}$$

$$L = \text{tunnellengde, km}$$

Friskluftbehovet Q_o luft finnes på grunnlag av produserte CO-mengder (Q_{oCO}) og tillatt CO-konsentrasjon i tunnelen c , (ppm). c finnes fra figur XIII-1.1.

$$Q_o \text{ luft} = \frac{Q_{oCO} \cdot 10^6}{c} \text{ m}^3/\text{h}$$

Dette friskluftbehovet som forutsetter normaltrykk (760 mmHg) og temperatur på 0° C omregnes til friskluftbehov ved ugunstigste atmosfæriske forhold ved dimensjonerende trafikkbelastning.

$$Q_{\text{luft}} = Q_o \text{ luft} \frac{P_o}{P} \cdot \frac{T_t}{T_o}$$

$$P_o = \text{normaltrykk 760 mmHg}$$

$$P = \text{aktuelt trykk}$$

$$T_o = \text{normaltemperatur 273°K}$$

$$T_t = \text{aktuell middellufttemperatur i tunnelen, °K}$$

VEGNORMALER  STATENS VEGVESEN	GEOMETRISK UTFORMING	ÅR	1977
	VENTILASJON LUFTBEHOV	Kapitel	XIII
		Avsnitt	2
		Side nr.	3

Dersom ikke trafikens fordeling på de to kjøreretninger er kjent, antas 2/3 å kjøre i stigning.

2.1.5 CO-produksjon ved tomgangskjøring

Ved tomgangskjøring kan det regnes med en midlere CO-produksjon på $0,5 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{kjt}$. Denne verdien tilsvarer et bensinforbruk på ca 1 liter pr time og 6% CO i eksosgassen.

2.2 NO_x-PRODUKSJON

Beregningsmodell for produksjon av nitrøse gasser (NO_x):

$$Q_{\text{NO}_x} = q_{\text{NO}_x} \cdot (M_l + 10 M_t) \cdot f_s \cdot L$$

$$Q_{\text{NO}_x} = \text{produserte mengder NO}_x\text{-gass i tunnelen, m}^3/\text{h}$$

$$q_{\text{NO}_x} = \text{basisverdi for personbil, } 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{km} \cdot \text{kjt}$$

$$M_l = \text{trafikkmengde, lette kjøretøyer, kjt/h}$$

$$M_t = \text{trafikkmengde, tunge kjøretøyer, kjt/h}$$

$$f_s = \text{korreksjonsfaktor for kjøring i stigninger, se figur XIII-2.3}$$

$$L = \text{tunnellengde, km}$$

Konsentrasjonen av de nitrøse gassene finnes av:

$$C_{\text{NO}_x} = \frac{Q_{\text{NO}_x}}{Q_{\text{luft}}}$$

Q_{luft} er nødvendig friskluftmengde for uttynning av CO-gass eller siktforurensninger i tunnelen. Ut fra dette friskluftbehovet kan utluftningstiden beregnes. NO_x-konsentrasjonen kontrolleres i forhold til de oppsatte krav i punkt XIII-1.3.

2.3.1 Korreksjonsfaktor for høyde over havet, f_{hh}

	Høyde over havet i meter							
	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
Korreksjonsfaktor f_{hh}	1,12	1,24	1,35	1,47	1,58	1,69	1,81	1,93

Figur XIII-2.4: Korreksjonsfaktor for høyde over havet, f_{hh} 2.3.2 Korreksjonsfaktor for stigninger, f_s

	← Fall i % Stigning i % →									
	8	6	4	2	0	2	4	6	8	
Korreksjonsfaktor f_s	0,5	0,5	0,7	0,8	1,0	1,8	2,7	3,6	4,5	

Figur XIII-2.5: Korreksjonsfaktor for stigninger, f_s

Friskluftbehovet for uttytning av siktreduserende forurensninger:

$$Q_{\text{luft}} = \frac{P_{\text{sot}}}{\rho_{\text{sot}}} \text{ m}^3/\text{h}$$

$$P_{\text{sot}} = \text{ sotproduksjon i tunnelen, mg/h}$$

$$\rho_{\text{sot}} = \text{ krav til høyeste sotkonsentrasjon, mg/m}^3, \text{ figur XIII-1.3}$$



3.1 GENERELT

Vegtunneler kan ventileres etter tre forskjellige hovedprinsipp:

- Langslufting
- Halvtverrlufting
- Tverrlufting

3.2 LANGSLUFTING

Figur XIII-3.1 viser eksempel på virkemåter ved langslufting. Et slikt system kan bygges med eller uten sjakter/tverrslag. Luftstrømningen kan regnes som rørstrømning, og det kan settes opp enkle ligninger for luftbevegelsen gjennom tunnelen.

For tilfellet i figur XIII-3.1 fås:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \left(\zeta_i + \lambda \frac{L}{D} + 1 \right) u^2 + \rho L \frac{du}{dt} \quad (1)$$

her er

$$\Delta p = \text{trykktapet gjennom tunnelen, N/m}^2$$

$$\rho = \text{luftens tetthet, kg/m}^3$$

$$\zeta_i = \text{koeffisient for innløpstep 0,5}$$

$$\lambda = \text{koeffisient for strømningstep. For en råsprengt tunnel kan denne settes til ca 0,05}$$

$$L = \text{tunnellengde i m}$$

$$D = \text{hydraulisk diameter, m}$$

$$u = \text{lufthastighet, m/sek.}$$

Tapsleddet (friksjonsleddet) vil oftest være dominerende i denne ligningen. Akselerasjonsleddet vil mest virke som utjevning av lufthastigheten. I praksis kan det antas at luftstrømningen er stasjonær og ligningen kan forenkles til:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \left(\zeta_i + \lambda \frac{L}{D} + 1 \right) u^2 \quad (2)$$

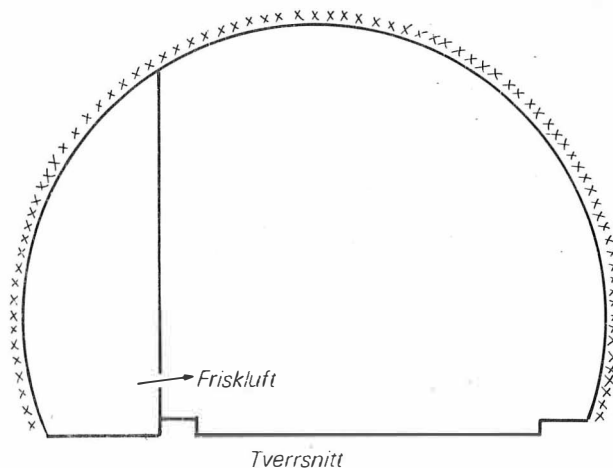
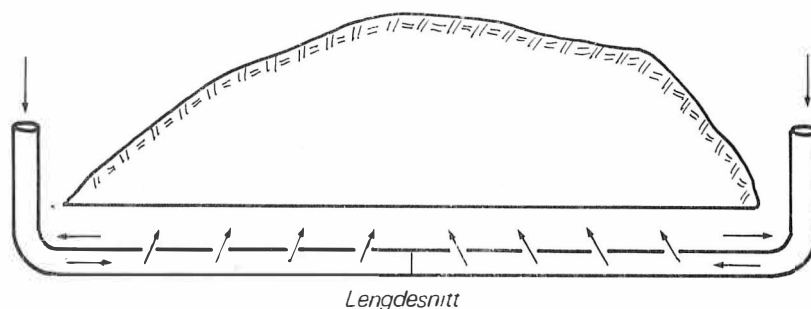
Singulærtap i forbindelse med strømning gjennom bend, innsnevringer etc i forbindelse med sjakter o l kan uttrykkes som funksjon av hastighetshøyden i tunnelen.



3.3 HALVTVERRLUFTING

Figur XIII-3.2 viser virkemåten for halvtverrlufting. Friskluft føres inn i tunnelen via en separat kanal hvor den fordeles jevnt langs tunnelen gjennom sideventiler. Friskluftkanalen kan plasseres over, under eller ved siden av trafikkkrommet, alt etter det som er mest praktisk. Ventilåpningene for luftinntaket til trafikkkrommet bør alltid plasseres lavt i tunnelen. Luftventilene vil også kunne benyttes som forholdsvis sikre tilfluktsplasser ved brann hvis trafikantene kan lokalisere dem. Luftinntakene bør derfor markeres med lyspunkter i ventilåpningene.

Ved halvtverrlufting kan også den forurensete luft suges ut i egen kanal, slik at tilførselen av friskluft skjer gjennom portalene. En slik løsning er uønsket fordi det lett kan oppstå soner i tunnelens midtparti som får svært dårlig utlufting (vanskeligere å regulere jevnt sug enn jevn utblåsing fra ventiler). I en brannsituasjon er det sikkerhetsmessig gunstigere med jevnt fordelt frisklufttilførsel enn utsugning fra tunnelen.



Figur XIII-3.2: Halvtverrlufting



4.1 GENERELT

De kreftene som forårsaker ventilasjon i en tunnel kan inndeles i tre:

- Meteorologiske ventilasjonskrefter
- Stempeeffekt fra kjøretøyer
- Mekaniske ventilasjonskrefter

En tunnel vil vanligvis være utsatt for to eller alle ventilasjonskreftene samtidig, avhengig av om det er installert mekanisk ventilasjonsanlegg i tunnelen.

Ventilasjon som skyldes meteorologiske krefter og stempeeffekt fra kjøretøyer betegnes som naturlig ventilasjon.

4.2 NATURLIG VENTILASJON

4.2.1 Meteorologiske ventilasjonskrefter

Meteorologiske ventilasjonskrefter kan opptre som

- A Temperaturkrefter
- B Vindkrefter
- C Innvirkning fra klimaskille

De meteorologiske ventilasjonskreftene er oftest ustabile og det kan være vanskelig å forutsi styrke og fordeling av de ulike bidragene. Dette gjelder spesielt for vindkrefter og innvirkning fra klimaskiller. Temperaturkreftene kan være noe mer stabile og lettere å få oversikt over.

A - Temperaturkrefter

Forutsetningen for denne effekten er at tunnelinnslagene (evt tverrslag og sjaktåpninger) ligger i ulik høyde og at det er en temperaturforskjell mellom luften i og utenfor tunnelen. Trykkdifferansen mellom tunnelinnslagene blir

$$\Delta p_T = \gamma_U \frac{\Delta T}{T_t} \Delta H \quad (\text{N/m}^2) \quad (4)$$

hvor

$$T_t = \text{midlere lufttemperatur i tunnelen, } ^\circ\text{K}$$

$$\gamma_U = \text{luftens spesifikke vekt ved nedre innslag, N/m}^3$$

VEGNORMALER  STATENS VEGVESEN	GEOMETRISK UTFORMING	ÅR	1977
	VENTILASJON VENTILASJONSKREFTER	Kapitel	XIII
		Avsnitt	4
		Side nr.	3

- T_u = midlere lufttemperatur, °K
 h = høydedifferanse mellom tunnelnivå og dreneringsnivå for luften over tunnelen (overdekning for tunnelen), m

Ventilasjonskrefter p g a klimaskiller oppstår oftest i lange tunneler som passerer større fjellpartier. For de fleste tunneler er sannsynligvis denne effekten liten.

4.2.2 Stempeleffekten fra kjøretøy

Når biler trafikerer en tunnel med en fart som er forskjellig fra luft-hastigheten i tunnelen, vil de utøve et trykk (skyvekraft) mot luftmassene i tunnelen.

Den kraften som bilene utøver på luften i tunnelen (luftmotstanden) uttrykkes som

$$P_F = \frac{\rho}{2} \frac{\zeta_F \cdot A_F}{\left(1 - \frac{A_F}{A_T}\right)^2} (N_+ (V_T - u)^2 - N_- (V_T + u)^2) \quad (7)$$

hvor

P_F = "stempelkraft", N

ρ = luftens tetthet, kg/m³

A_T = tunnelverrsnitt, m²

A_F = biltverrsnitt

personbiler $A_F \sim 2 \text{ m}^2$

lastebiler og busser $A_F \sim 4 - 8 \text{ m}^2$

ζ_F = formfaktor for å finne effektiv motstandsflate

personbiler $\zeta_F \sim 0,5$

lastebiler og busser $\zeta_F \sim 1,0 - 1,7$

N_+ og N_- = antall biler inne i tunnelen på et gitt tidspunkt i dimensjonerende time som kjører med dimensjonerende fart, med (+) og mot (-) luftstrømmen

V_T = trafikkfart, m/sek

u = lufthastighet, m/sek

VEGNORMALER  STATENS VEGVESEN	GEOMETRISK UTFORMING	ÅR 1977
	VENTILASJON VENTILASJONSKREFTER	Kapitel Avsnitt Side nr.

4.3 MEKANISK VENTILASJON

Mekanisk langslufting kan bygges etter to hovedprinsipper: Impulsventilatorer eller ventilatorer plassert i sjakter eller tverrslag. Ved impulsventilatorer skapes en luftstrøm i tunnelen ved at stråleventilatorer avgir en kraftimpuls til luftmassene. Ved ventilatorer plassert i sjakter, presses frisk luft inn eller forurenset luft ut av tunnelen.

A - Impulsventilatorer

Ved beregning av strømningsstapet etter ligning (2) er det forutsatt jevn lufthastighet gjennom tunnelen. Impulsventilatoren gir vesentlig høyere lufthastighet og større turbulens enn ved jevnt hastighetsprofil i tunnelen. Dette tas hensyn til i beregningene ved at det innføres en virkningsgradfaktor for impulsventilatorene.

Ventilatorene vil normalt bli opphengt i hengen, én og én eller flere sammen hvis plassforholdene tillater det. Resirkulasjon (tilbakestrømming) av luft under viftene bør unngås. Avstanden mellom ventilatorene i tunnelens lengderetning bør være så stor at luftstrømmen blandes mellom hver vifte evt viftegruppe, ca 50-60 m vil normalt være tilstrekkelig avstand.

I tunneler med trafikk i begge retninger bør impulsventilatorene være reversible slik at de kan kjøres i samme retning som de naturlige ventilasjonskrefter. Ved branntilfeller i tunnelen bør brannstedet kunne luftes ut mot den nærmeste tunnelåpningen, slik at ikke mesteparten av tunnelen blir røykfyllt.

I tunneler med trafikk i én kjøreretning, vil ventilasjonsretningen normalt være den samme som trafikketretningen. Det er derfor ikke så viktig med reversible impulsventilatorer i slike tunneler.

B - Ventilatorer plassert i sjakter eller tverrslag

Ved å dele en tunnel opp i flere avsnitt ved hjelp av sjakter eller tverrslag skapes mulighet til å fornye luften i et langsluftingssystem. Anlegg av sjakter og tverrslag fører imidlertid til at luftbevegelsene gjennom tunnelen blir mer komplisert og det kan være vanskelig å få en slik tunnel til å virke tilfredsstillende under alle vær- og trafikkforhold.

Tunneler kan i lange tidsrom ha store naturlige ventilasjonskrefter, og et mekanisk ventilasjonsanlegg må utformes slik at naturlig og mekanisk ventilasjon ikke oppveier hverandre i noen del av tunnelen (skaper ventilasjonsskygger). Dette unngås ved å bygge et fleksibelt system med reverserbare vifter, doble sjakter o l.

VEGNORMALER  STATENS VEGVESEN	GEOMETRISK UTFORMING	ÅR 1977
	VENTILASJON SIKKERHETSFORHOLD	Kapitel XIII Avsnitt 5 Side nr. 1

5.1 VED LANGSLUFTING

På veger med liten eller moderat trafikk i begge retninger vil en tunnel med langslufting normalt være rimeligst.

Denne ventilasjonsmetoden søkes brukt så langt det er sikkerhetsmessig forsvarlig. Ved et bilhavari med brannutbrudd vil en slik tunnel lett få trafikkopphopninger på begge sider av brannstedet og de personene som får ført brannavgassene mot seg kan lett komme i en farlig situasjon. Dette begrenser bruken av denne ventilasjonsmetoden.

For langsluftede tunneler skilles det mellom tunneler med trafikk i begge retninger og énvegstrafikerte tunneler.

Et bilhavari i en énvegstrafikert tunnel gir normalt bare trafikkopphopninger fremfor ulykkesstedet. Trafikanter som oppholder seg her vil normalt ha frisklufttilførsel i ryggen og vil ikke bli utsatt for fare i tilfelle det oppstår brann ved havariet. Bak ulykkesplassen vil det ikke dannes trafikkopphopninger da disse bilene har fri veg ut av tunnelen.

De angitte kravene til sikkerhetsforhold i vegtunneler må anses som minsteverdier. Hvor forholdene tillater det, må det tilstrebes å forbedre sikkerhetsforholdene, både når det gjelder ventilasjonsanlegg, ekstra sikkerhetstiltak og vedlikeholdsrutiner.

5.1.1 Tunneler med trafikk i begge retningerr

Langslufting i tunneler med trafikk i begge retninger aksepteres når dimensjonerende ventilasjonsbehov, uttrykt som dimensjonerende lufthastighet, er lavere enn basisgrensene angitt på figur XIII-5.1. Kurve 1 gjelder når det ikke er iverksatt tiltak utenom minstekravene. Kurve 2 gjelder når det i tillegg er satt restriksjoner på trafikk med spesielt brannfarlige, eksplosjonsfarlige, etsende eller giftige laster, og gjennomført effektiv kontroll av denne transporttypen.

Sikkerhetsutstyr og sikkerhetstiltak i tunneler bør tilfredsstillende følgende minstekrav:

1. Med jevne mellomrom skal det plasseres lett synlige nødhjelpestasjoner som inneholder:
 - a) Lette håndholdte brannslukningsapparater
 - b) Brannvarslingsanlegg, evt automatiske brann-detektorer i tunnelhengen



Utvidelsene av basisgrensene for bruk av langslufting er uavhengig av tunnallengden. Basisgrensen for en tunnel som deles i flere avsnitt kan ikke settes høyere enn basisgrensen for tunneler med lengde lik det enkelte tunnelavsnitt.

5.1.2 Énvegstrafikerte tunneler

Når den dimensjonerende lufthastigheten overskrider 8-10 m/s, bør andre ventilasjonsmetoder vurderes.

5.2 VED HALTVERRLUFTING

Ved brann i en tunnel med halvtverrlufting vil, på samme måte som ved langslufting, brannavgassene spre seg langs trafikkkrommet. Spredningshastigheten for brannavgassene vil også kunne bli av omtrent samme størrelse. Når ventilasjonsanlegget er innkoplet, vil lufttilførselen kunne skape en gunstig lagdeling i tunnelen og luftinntakene vil virke som friskluftkilder som kan være relativt sikre tilfluktsplasser. Dette gjør at et halvtverrluftingssystem generelt må anees for å ha bedre sikkerhetsegenskaper enn et langsluftingsanlegg i en tunnel med trafikk i begge retninger. Sikkerhetsgevinstene i forhold til langslufting vil være større jo sterkere anlegget er dimensjonert. I tunneler med svakt trafikkgrunnlag, og spesielt ved kraftig naturlig ventilasjon, synes ikke sikkerhetsforholdene å bli vesentlig bedre enn ved ren langslufting. Her vil luftmengdene som tilføres tunnelen via det mekaniske ventilasjonsanlegget oftest være av samme størrelsesorden, eller ofte endog mindre enn den naturlige langsluftingen i tunnelen, slik at uttynningseffekten av brannavgassene bak brannstedet kan bli beskjeden.

Sikkerhetsforholdene ved halvtverrlufting vil imidlertid bli dårligere enn ved langsluftede énvegstrafikerte tunneler.

5.3 VED TVERRLUFTING

Et tverrluftingssystem gir generelt det sikreste ventilasjonsanlegget i en vegtunnel. Ved brann blir friskluft tilført bak brannstedet og brannavgassene vil etter hvert bli sugd ut av tunnelen. Det oppnås derfor en dobbel fortynningseffekt av de farlige gassene. Hvor raskt denne uttynningen skal skje, er avhengig av kapasiteten for ventilasjonsanlegget og