

AND 624/2025**GHID TEHNIC****SISTEME DE VENTILATIE PENTRU TUNELE RUTIERE - PRINCIPII DE BAZĂ****Cuprins**

0	Comentarii preliminare.....	2
1	Domeniu de aplicare.....	2
2	Principii generale de planificare.....	3
3	Calculul necesarului de aer.....	3
3.1	Date de trafic.....	3
3.1.1	Volumul de trafic utilizat ca bază pentru dimensionare.....	3
3.1.2	Structura traficului.....	3
3.1.3	Condiții de trafic.....	4
3.2	Planificarea valorilor limită.....	4
3.2.1	Concentrația de CO.....	4
3.2.2	Concentrația de NO _x	4
3.2.3	Opacitate.....	4
3.2.4	Viteza maximă longitudinală a aerului.....	4
4	Selectarea sistemului.....	4
4.1	Criterii decizionale.....	4
4.1.1	Tip de trafic/criterii caracteristice structurale.....	4
4.1.2	Criterii de mediu.....	5
4.2	Sisteme de ventilație.....	6
4.2.1	Ventilație longitudinală.....	6
4.2.2	Sistem de ventilație semi-transversal.....	6
4.2.3	Sistem de ventilație transversal.....	6
4.2.4	Sistem de extracție a punctelor.....	7
5	Cerințe tehnice.....	7
5.1	Note generale.....	7
5.2	Ventilatoare.....	7
5.2.1	Ventilatoare de introducere și de evacuare.....	7
5.3	Clapete ajustabile pentru extracția aerului.....	8
5.3.1	Funcționare normală.....	8
5.3.2	Funcționare în caz de incendiu.....	8
5.3.3	Parametri de proiectare.....	8
5.3.4	Specificații.....	9
5.3.5	Cerințe în caz de incendiu.....	10
5.3.6	Evaluarea clapetelor pentru extracția aerului.....	10
5.3.7	Aparate de măsurare a vitezei aerului.....	11
5.4	Echipamente suplimentare.....	13
5.5	Structura conductelor de aer și a tunelului.....	13

6	Dimensionare aerodinamică	14
6.1	Note generale	14
6.1.1	Influențe meteorologice precum schimbările presiunii barometrice și impactul vântului	14
6.1.2	Impactul termic provocat de schimbările de temperatură	14
6.1.3	Cerințe suplimentare pentru sistemele de ventilație cu extracția aerului evacuat	16
6.2	Ventilație longitudinală	18
6.3	Sisteme de ventilație semi-transversale și transversale	18
6.4	Metode de calcul	18
7	Controlul și funcționarea sistemului de ventilație	19
7.1	Reglementări privind controlul sistemelor de ventilație	19
7.1.1	Variabile și date măsurate	19
7.1.2	Valori de prag pentru închiderea tunelului	19
7.1.3	Valori vizate pentru funcționarea normală	19
7.1.4	Valori limită pentru funcționare în timpul lucrărilor de întreținere	19
7.2	Control în funcție de datele de trafic	19
7.2.1	Date ce trebuie incluse	19
7.2.2	Stabilirea debitului necesar de aer diferențial (qdiff)	20
7.2.3	Comparație între valoarea vizată și cea reală a necesarului de aer	21
7.3	Controlul în funcție de valorile poluării măsurate a aerului	21
7.3.1	Descrierea sistemului de control	22
7.3.2	Parametri de control	22
7.4	Reglementări specifice legate de funcționare	22
7.4.1	Mod de control automat	22
7.4.2	Mod de funcționare manual	23
7.4.3	Control în timpul lucrărilor de întreținere	23
7.4.4	Modul de funcționare în timpul reparării și al inspectării sistemului de ventilație	23
7.5	Reglementări speciale referitoare la sistem	23
7.5.1	Ventilația longitudinală în tuneluri cu trafic unidirecțional	23
7.5.2	Ventilația longitudinală în tuneluri cu trafic bidirecțional	24
7.5.3	Sisteme de ventilație semi-transversale și transversale	24
7.5.4	Extracția localizată a aerului evacuat	24
7.5.5	Sisteme de ventilație combinate	24
7.5.6	Ventilația pasajelor acoperite	25
7.6	Accese transversale și ieșiri	25
7.7	Proiectarea portalurilor tunelurilor	25
8	Teste antiincendiu	25
8.1	Note generale	25
8.2	Teste antiincendiu	25
8.3	Studii privind parametrii	26
9	Referințe	26

0 Comentarii preliminare

Prezentul ghid tehnic are la bază reglementarea tehnică RVS 09.02.31. „VENTILATION SYSTEMS - BASIC PRINCIPLES”, elaborată de către FSV Austria.

1 Domeniu de aplicare

Prezentul ghid tehnic este aplicabil ca bază pentru planificarea noilor tunele rutiere și a galeriilor acoperite în raport cu legea nr.277/2007 privind cerințele minime de siguranță în tuneluri. În cazul renovărilor, ghidul trebuie aplicat prin analogie, dar numai în măsura în care nu se încalcă posibilitatea de utilizare.

2 Principii generale de planificare

În mod fundamental, fiecare tunel în parte și galeriile acoperite adiacente trebuie examinate în ceea ce privește cerințele privind sistemul de ventilare mecanică. Tunelele de pe autostrăzi, cu trafic bidirecțional pe termen scurt - datorat atât deschiderilor parțiale pentru trafic, cât și închiderilor pentru reabilitare - sunt considerate tuneluri unidirecționale. În ceea ce privește specificațiile sistemului de ventilație, trebuie să se respecte principiile de mai jos:

- Când tunel este exploatat
 - utilizatorii tunelului și personalul operațional nu trebuie să resimtă efecte negative asupra sănătății în nicio situație de trafic posibilă, ținând cont de intervalul de timp pe care trebuie să îl petreacă în tunel,
 - trebuie să se păstreze distanța de oprire în siguranță.
- În caz de incendiu
 - În căile de evacuare trebuie prevăzut un sistem de presurizare cu scopul de a preveni trecerea fumului de la o galerie la alta atunci când ușile sunt deschise în timpul evacuării utilizatorilor, pentru a permite autosalvarea.
 - trebuie înlesnite activitățile serviciilor profesionale pentru situații de urgență, asigurându-se cele mai bune condiții.
 - trebuie redusă amplitudinea pagubelor și a vătămărilor (ale oamenilor, vehiculelor, structurii tunelului). Evaluarea riscului și analizele dinamicii fluidelor permit determinarea nivelului de siguranță al infrastructurii; analizând rezultatele, se pot evalua eventuale măsuri suplimentare prin introducerea unor scenarii de gestionare operațională și/sau proceduri operative menite să ridice nivelul de siguranță

Dacă este necesar un sistem de ventilare mecanică în conformitate cu Tabelul 1, trebuie luate în considerare efectele unui incendiu la proiectarea sistemului de ventilație și verificate prin simulări fluidodinamice și analize de evacuare a utilizatorilor.

3 Calculul necesarului de aer

3.1 Date de trafic

3.1.1 Volum de trafic

Pentru susținerea dimensionării sistemului de ventilație, la fel ca în evaluarea riscului, trebuie realizat un Studiu de Trafic (previziuni de trafic, compoziția traficului incluzând mărfuri periculoase și autobuze, numărul de ore cu trafic congestionat etc.).

Calculul necesarului de aer trebuie efectuat pe baza structurii traficului și a volumului orar de trafic relevant (Q_{BEM}), respectiv a volumului de trafic atins sau depășit timp de 30, 50 etc. de ore pe an. Ambele valori trebuie preluate dintr-o prognoză de trafic privind tunelul respectiv.

Relația dintre volumul de trafic orar relevant (Q_{BEM}) și MZA (traficul mediu zilnic anual) trebuie preluată în baza studiului de trafic realizat pentru traficul preconizat al proiectului. Previziunile trebuie să ofere informații cu privire la condițiile de trafic prevăzute pentru primul an de funcționare și după zece ani. În plus, trebuie luat în considerare volumul maxim de trafic preconizat, fiind preferabile sistemele de ventilație mai flexibile, care iau în calcul structura.

Volumul de trafic maxim pentru tunelul în cauză trebuie calculat în conformitate cu studiul de trafic aferent proiectului.

La efectuarea acestor calcule, trebuie să se țină cont întotdeauna de eventualele reduceri de trafic ca urmare a condițiilor specifice ale rețelei rutiere.

3.1.2 Structura traficului

Pentru a face calcule zilnice de ventilație, distribuția vehiculelor în tunel trebuie determinată fie pe baza unui standard, fie pe baza unei statistici/legislație locală/ etc. dacă este disponibil.

Când se calculează emisiile vehiculelor, numărul total de vehicule trebuie divizat în următoarele categorii (a se vedea reglementarea tehnică RVS 09.02.32 - Calculul necesarului de aer):

- Autoturisme
- Autovehicule ușoare de marfă (<3.5T)
- Vehicule grele de marfă
- Autobuze

Trebuie stabilite separat emisiile pentru fiecare grup.

În general, trebuie estimat procentul traficului de vehicule grele de marfă. În cazul tunelurilor cu volum redus de trafic ($MZA \leq 5000$ vehicule/24 ore) și cu pante longitudinale mai mici de 2%, se poate presupune o fracțiune a vehiculelor grele de marfă de 10%, dacă nu s-a obținut o valoare mai mare în cele mai recente înregistrări de trafic. În alte situații, trebuie considerată ca bază o analiză detaliată privind transportul greu de mărfuri.

3.1.3 Condiții de trafic

În mod normal, trebuie luată în considerare numai starea „traficului în flux” (≥ 30 km/h).

Traficul staționar sau în mișcare lentă (< 30 km/h) trebuie luat în considerare numai dacă blocajele de trafic cauzate de supraîncărcare sunt relativ frecvente (a se vedea punctul 4.1.1). Cu toate acestea, este preferabil să se reducă la minim sau să se limiteze astfel de condiții de trafic la doar câteva sectoare prin mijloace adecvate de control al traficului. Aceste sectoare trebuie specificate pe baza proiectului corespunzător de tehnică a traficului.

O viteză medie pentru sectoarele ascendente este definită în conformitate cu viteza maximă posibilă pentru vehiculele grele pentru fiecare bandă (a se vedea reglementarea tehnică RVS 09.02.32 - Calculul necesarului de aer).

3.2. Planificarea valorilor limită

Volumul necesar al aerului de admisie (necesarul de aer proaspăt) trebuie evaluat pentru condițiile de trafic descrise în punctul 3.1.3, precum și pentru datele de trafic preconizate pe baza valorilor-prag indicate mai jos.

3.2.1. Concentrația de CO

Valoarea proiectată a concentrației de CO este de 100 ppm.

3.2.2 Concentrația de NO_x

În cazul tunelurilor care necesită un sistem de ventilație controlată pentru NO_x, trebuie stabilită valoarea proiectată pentru NO_x, luând în considerare nivelul acceptabil de calitate a aerului în zona portalului în conformitate cu reglementarea tehnică RVS 09.02.32.

3.2.3 Opacitate

Valoarea de proiectare în ceea ce privește opacitatea este coeficientul de absorbție de $7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$.

3.2.4 Viteza maximă longitudinală a aerului

Viteza longitudinală în tunel nu trebuie să depășească 10 m/s, luând în considerare influențele meteorologice și efectul de piston al vehiculelor în mișcare.

4 Selectarea sistemului

Atât pentru condiții normale de funcționare, cât și pentru cazuri de incendiu, este esențial să se aleagă sistemul de ventilație sau o combinație de sisteme de ventilație ținând cont de eficiența economică și de

analizele de inginerie a siguranței. Rațiunile economice trebuie să pornească de la prezumția că durata de viață a echipamentului electromecanic este de 20 ani.

Durata de viață a structurii tunelului este în mod normal de 100 de ani.

4.1. Criterii decizionale

În condiții normale de operare, trebuie luate în considerare următoarele criterii:

- Modul de operare a traficului (trafic unidirecțional, trafic bidirecțional, trafic bidirecțional periodic, volum de trafic utilizat ca bază pentru dimensionare, ambuteiajele etc.)
- Caracteristicile structurale (lungimea, înclinația, secțiunea transversală, căile de evacuare etc.)
- Caracteristici ambientale (calitatea aerului, măsuri de protecție etc.)

4.1.1 Tip de trafic/criterii caracteristice structurale

Sistemele de ventilație longitudinală se pot folosi în funcție de lungimea tunelului și de volumul de trafic, conform Tabelului 1. Pentru tunelurile mai lungi, trebuie planificate sisteme de ventilație transversală, sisteme cu puncte de extracție sau sisteme combinate.

Tabelul 1: Criterii de selecție pentru sistemele de ventilație

Trafic unidirecțional			
	VN	VL	RiA sau SEP
Fără congestii de trafic ³⁾	≤ 700 m	> 700 m - ≤ 5000 m ¹⁾	> 5000 m ⁴⁾
Cu congestii de trafic	≤ 500 m	> 500 m - ≤ 1500 m ²⁾	> 1500 m ⁴⁾

Trafic bidirecțional			
MZA [vehicule/24 h]	VN	VL	RiA sau SEP
< 5000	≤ 700 m	> 700 m - ≤ 3000 m ¹⁾	> 3000 m ⁴⁾
< 10000	≤ 500 m	> 500 m - ≤ 2000 m ²⁾	> 2000 m ⁴⁾
≥ 10000	≤ 500 m	> 500 m - ≤ 1500 m ²⁾	> 1500 m ⁴⁾

Legendă:

VN Ventilație naturală

VL Ventilație longitudinală (mecanică)

RiA Extracția masivă a fumului RiA efectuată la intervale regulate (a se vedea și punctele 4.2.2. și 4.2.3)

SEP Sistem puncte de extracție PA

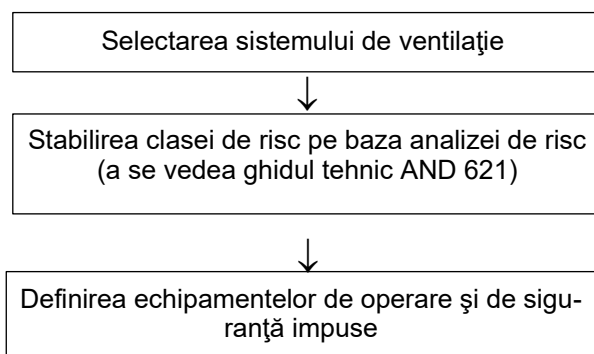
- 1) Limita maximă pentru utilizarea sistemelor mecanice de ventilație longitudinală se stabilește atât necesarul de aer proaspăt, cât și viteza maximă longitudinală permisă a aerului.
- 2) Pentru tunelurile de pe autostrăzi și drumurile expres naționale, trebuie luată în considerare legea privind siguranța rutieră și în tuneluri, punctul 2.9.3 (trimitere la analiza de risc a tunelului și/sau la măsuri speciale).
- 3) Caracterizare: tuneluri și tronsoane rutiere deschise adiacente care sunt suficient de eficiente; fără dovezi ale cauzelor specifice ale congestiilor de trafic (valoare de referință pentru frecvența congestiei: aproximativ 25 h/an).
- 4) Este permis un sistem alternativ de ventilație, dacă se confirmă echivalența printr-o analiză de risc (în conformitate cu ghidul tehnic AND 621/2025). În acest sens, trebuie luate în considerare în special incendiile de vehicule din congestiile de trafic care au loc ca urmare a unui accident sau a unei avarii.

4.1.2 Criterii de mediu

Pentru portalurile tunelurilor din zone care se supun unor cerințe mai stricte în ceea ce privește protecția împotriva emisiilor, pot fi necesare sisteme mecanice de ventilație chiar și pentru structurile de tuneluri care nu au nevoie de un sistem de ventilație în conformitate cu punctul 4.1.1. Posibila nevoie de un sistem de ventilație trebuie confirmată printr-un studiu de evaluare de mediu care urmează să fie realizat în cadrul studiului de fezabilitate.

Procedura de selectare a unui sistem de ventilație

Sistemul de ventilație trebuie ales conform procesului de mai jos:



Secțiunile transversale cu înălțimi mai mare ale tunelului au, în general, efecte pozitive în ceea ce privește siguranța tunelului în caz de incendiu. Măsurile ce țin de construcții, cum ar fi grinzile și elementele similare, împiedică în mod semnificativ procesul de eliminare a fumului.

4.2 Sisteme de ventilație

Sistemele de ventilație sunt clasificate pe principalele tipuri menționate la punctul următor în ceea ce privește funcționarea și aplicarea lor.

4.2.1 Ventilație longitudinală

Un sistem de ventilație longitudinală asigură mișcarea longitudinală a aerului în tunel, fie prin fluxul de aer natural, fie prin utilizarea ventilatoarelor. Trebuie îndeplinite următoarele cerințe:

- Viteza longitudinală maximă admisă a aerului în zona secțiunii transversale a tunelului, în conformitate cu punctul 3.2.4.
- Ventilatoarele trebuie proiectate astfel încât să fie reversibile și să poată asigura o viteză minimă a fluxului de aer de 2 m/s și o mișcare minimă a aerului de 120 m³/s (în raport cu densitatea, conform standardului ISO 2533 corespunzător nivelului mediu al mării) în caz de incendiu în condițiile stabilite definite la punctul 6.1.
- Pentru tunelurile cu o pantă a drumului cuprinsă între 3% și 5%, viteza minimă proiectată a aerului trebuie mărită la 3 m/s. Viteza critică variază în funcție de panta, aria secțiunii transversale, sarcina de incendiu etc. Aceeași valoare critică a vitezei este luată pentru panta de 3% și 5%. Trebuie să se verifice cu viteza critică calculată cu diferite metode de calcul Kennedy, Li Y. Z. & Ingason etc. și/sau standardele PIARC, NFPA, CETU etc.
- Pentru a spori siguranța funcțională în condiții de incendiu și pentru a reduce la minim turbulențele de aer, ventilatoarele trebuie distribuite pe întreaga lungime a tunelului, iar ventilatoarele cu jet trebuie amplasate în diferite sectoare de detecție a incendiului (cel puțin două sectoare de detecție a incendiului).

4.2.2 Sistem de ventilație semi-transversal

Un sistem de ventilație semi-transversal asigură intrarea aerului proaspăt prin portalurile tunelului, iar aerul evacuat este extras uniform pe întreaga lungime a tunelului, prin conductele de evacuare a aerului. Sunt permise atât sistemele de ventilație semi-transversale, cât și sistemele de ventilație semi-transversale combinate cu sistemele de ventilație longitudinale sau transversale. Aceste sisteme trebuie să îndeplinească următoarele cerințe:

- Trebuie respectată viteza maximă longitudinală a aerului, astfel cum este definită la punctul 3.2.4.
- Sistemul de ventilație trebuie proiectat astfel încât, în caz de incendiu în orice parte a conductei de evacuare a aerului, să se extragă minim 120 m³/s din spațiul de trafic al tunelului pe un sector de 150 m (în raport cu densitatea conform ISO 2533, corespunzătoare elevației respective).
- În zona incendiului, clapetele pentru extracția aerului trebuie să fie deschise complet. Toate celelalte clapete trebuie să fie închise.
- Distanța dintre două clapete pentru extracția aerului nu trebuie să depășească 110 m.
- Pentru a optimiza costurile de operare, trebuie produs un flux de aer longitudinal utilizând ventilatoare cu jet sau prin controlul adecvat al clapetelor de extracție.

4.2.3 Sistem de ventilație transversal

Un sistem de ventilație transversală asigură atât intrarea aerului proaspăt, cât și extracția aerului evacuat pe întreaga lungime a tunelului. Trebuie îndeplinite următoarele cerințe:

- Nu trebuie depășită viteza maximă longitudinală a aerului, astfel cum este definită la punctul 3.2.4.
- Sistemul de ventilație trebuie proiectat astfel încât, în caz de incendiu în orice parte a conductei de evacuare a aerului, să se extragă minim 120 m³/s din spațiul de trafic al tunelului pe un sector de 150 m (în raport cu densitatea conform ISO 2533, corespunzătoare elevației).
- În zona incendiului, clapetele pentru extracția aerului trebuie să fie deschise complet. Toate celelalte clapete de extracție trebuie să fie închise.
- Pentru a asigura aer proaspăt de la conducta de aer proaspăt, trebuie instalate orificii reglabile pentru aer proaspăt. Pentru extracția aerului evacuat din zona de trafic a tunelului, trebuie prevăzute clapete reglabile de extracție a aerului. Orificiile de admisie a aerului proaspăt și clapetele de extracție a aerului trebuie ajustate astfel încât să se asigure o distribuție uniformă a aerului pentru ca scenariul să fie luat ca bază pentru dimensionare.
- În mod normal, distanța dintre două clapete de extracție nu trebuie să depășească 110 m, iar distanța dintre două orificii de admisie a aerului proaspăt nu trebuie să depășească 55 m.

4.2.4 Sistem cu puncte de extracție

Pentru sistemele cu puncte de extracție (extracție fără plafon intermediar), distanțele dintre punctele de extracție sau dintre punctul de extracție și portal trebuie definite pentru fiecare proiect individual, în funcție de criteriile de selecție indicate în Tabelul 1.

Debitul volumetric al aerului necesar la punctul de extracție trebuie stabilit în conformitate cu ecuația de mai jos (în raport cu densitatea conform cu ISO 2533 corespunzătoare elevației). Pentru a specifica debitul volumetric de aer la punctul de extracție, trebuie luată ca bază valoarea maximă rezultată din secțiunea transversală triplă a zonei tunelului fără refugii de urgență (RU) sau 200 m³/s:

$$V = \max(3,0 \cdot A_T; 200)$$

unde:

V este debitul volumetric de aer [m³/s]

A_T - suprafața secțiunii transversale a zonei tunelului fără refugiile de urgență [m²]

5 Cerințe tehnice

5.1 Note generale

Cerințele tehnice care trebuie luate în considerare în ceea ce privește ventilatoarele, inclusiv echipamentele suplimentare și posibilele conducte de ventilație, sunt următoarele:

Ventilatoarele și echipamentele și cablurile aferente suplimentare concepute pentru a fi utilizate în condiții de incendiu (fum) trebuie să rămână funcționale pentru o perioadă de timp de cel puțin 120 minute la temperaturi de 400°C (de exemplu, cu ajutorul unui sistem de răcire cu temperatură controlată). În cazul unei defecțiuni a unui ventilator, celelalte ventilatoare nu trebuie să fie afectate funcțional.

Această regulă se aplică în mod analog pentru toate echipamentele instalate în conducta de evacuare a aerului.

Pentru ventilatoarele cu jet (inclusiv sistemele de cabluri aferente) utilizate în tunelurile din clasele de pericol I-III având o distanță longitudinală de acțiune de cel puțin 200 m, este suficient să reziste la temperatură de 250°C pentru o perioadă de timp de 60 minute.

5.2 Ventilatoare

Ventilatoare cu jet (jet fans)

Ventilatorul cu jet, inclusiv cadrul de suspendare aferent și amortizorul de zgomot, trebuie realizat din materiale rezistente la coroziune, în conformitate cu AND 623. Motorul în sine și cutia cu borne trebuie proiectate în așa fel încât să corespundă cel puțin nivelului de protecție IP65, conform SR EN 60034-5.

Elementele de fixare a ventilatorului cu jet la structura tunelului trebuie proiectate astfel încât să absoarbă vibrațiile. Trebuie prevăzut un mecanism suplimentar care să împiedice căderea ventilatorului (de exemplu, un cablu de oțel).

5.2.1. Ventilatoare de introducere și de evacuare

Ventilatoarele utilizate trebuie să fie ventilatoare axiale.

Ventilatoarele de aer proaspăt și ventilatoarele de aer evacuat sunt alcătuite din următoarele părți: o unitate de ventilare care include o elice, o paletă de ghidare și un motor electric (unitate a motorului ventilatorului - **UMV**), duză, difuzor, clapetă de închidere și, în unele cazuri, un adaptor față și spate (unitate completă de ventilare - **UCV**).

Referitor la valorile standard care trebuie utilizate pentru nivelurile de eficiență în specificarea capacității sistemului de ventilație, valorile UMV și UCV sunt $\eta_{UMV} = 0,9$ și, respectiv, $\eta_{UCV} = 0,7$.

În funcție de caracteristicile tunelului, ventilatoarele trebuie să fie cu trepte de viteză, fie cu viteza variabilă sau o combinație a celor două pentru a controla debitul volumetric de aer. Vibrațiile UMV, precum și variațiile de temperatură ale bobinei și rulmentului trebuie ținute sub control. Volumul de aer admis/evacuat și schimbările ce țin de presiunea aerului la ventilator trebuie înregistrate și salvate (a se vedea AND 623).

Etanșeitățile clapetei și a conductelor de aer trebuie confirmată prin intermediul unor măsurători adecvate.

În mod normal, motorul trebuie să fie un motor asincron trifazat cu rulmenți cu frecare redusă, fără în-

treținere. Materialul izolant care trebuie utilizat trebuie clasificat (conform SR EN 60034-18) într-o clasă cu două grade mai mare decât cea necesară pentru sarcina termică maximă care apare în condiții de operare continuă.

Atât unitatea motorului ventilatorului, cât și sursa de alimentare trebuie specificate astfel încât să se poată garanta o pornire sigură în orice moment (chiar și în cazul curenților insuficienți cu până la 10% sau al unor tensiuni diferite în tensiunea furnizată). Valoarea maximă permisă a tensiunii de pornire trebuie setată conform specificațiilor furnizorului de energie electrică în cauză și nu trebuie să depășească o valoare egală cu de șase ori valoarea curentului nominal.

În mod normal, ventilatoarele se instalează în lăcașurile din portaluri sau tavan. Trebuie să se acorde o atenție deosebită amplasării ventilatoarelor astfel încât întreținerea și, eventual, înlocuirea acestora să poată fi efectuate din afara zonei de trafic; dacă este necesar, trebuie prevăzut accesul adecvat pentru reparații, precum și pentru echipamentul de ridicare.

Dacă se efectuează întreținerea sau repararea unității complete de ventilare, acest lucru nu trebuie să influențeze celelalte părți ale sistemului de ventilație.

În cazul instalării unui sistem fix de stingere a incendiilor, acest lucru trebuie luat în considerare la proiectarea ventilatorului de evacuare a aerului.

5.3 Clapete ajustabile pentru extracția aerului

Clapetele ajustabile pentru extracția aerului controlează în mod specific schimbul de aer dintre zona de trafic și conductele de evacuare a aerului. În tunelele cu sisteme de ventilație transversale, în timpul funcționării normale, acestea trebuie să îndeplinească alte scopuri decât în caz de incendiu. În mod normal, clapetele pentru extracția aerului trebuie să fie longitudinale și să se poată închide. Clapetele pentru extracția aerului trebuie controlate de la distanță.

5.3.1. Funcționare normală

Aerul poluat trebuie extras în mod regulat pe întreaga lungime a respectivului tronson ventilat și evacuat prin conductele de evacuare. Acest lucru se realizează prin reglarea corespunzătoare a unghiului de deschidere al clapetelor pentru extracția aerului. Pentru sistemele de ventilație semi-transversale, fluxul de aer longitudinal din tunel se poate susține cu ajutorul ventilatoarelor cu jet pentru a reduce la minimum costurile operaționale (a se vedea punctul 4.2.2).

5.3.2 Funcționare în caz de incendiu

În cazul accidentelor care generează emisii de fum, fumul trebuie extras cât mai aproape posibil de sursa de emisie. Conform conceptului de ventilație aplicabil, una sau mai multe clapete pentru extracția aerului din sectorul de ventilație în cauză trebuie păstrate deschise (a se vedea punctele 4.2.2 și 4.2.3), iar celelalte trebuie închise. Prin această metodă se obțin următoarele efecte:

- Extracția concentrată a fumului oferă cea mai mare eficiență posibilă.
- Se pot menține o stratificare naturală a fumului și o zonă fără fum în zona de auto-salvare.
- Fumul rămâne concentrat în zona de unde a provenit focul; acest lucru se datorează parțial apariției suprapresiunii în zonele care nu au fost încă afectate de incendiu.

5.3.3 Parametri de proiectare

Volumul aerului evacuat

Clapetele pentru extracția aerului trebuie proiectate astfel încât să se extragă un volum minim de aer de 120 m³/s prin intermediul clapetelor deschise în caz de incendiu (acest lucru se măsoară în conducta de aer evacuat în raport cu densitatea aerului corespunzătoare elevației, în conformitate cu ISO 2533).

Viteza aerului în clapetele pentru extracția aerului

Viteza medie longitudinală a aerului în clapetele pentru extracția aerului care au fost deschise nu trebuie să depășească 25 m/s. Viteze mai mari ale aerului ar putea duce la pierderi critice de presiune.

Proiectarea și amplasarea clapetelor pentru extracția aerului

Clapetele trebuie proiectate astfel încât să fie cât mai largi posibil. Lățimea optimă a deschiderii efective este de 3,0 m. Suma secțiunilor transversale ale clapetelor deschise în caz de incendiu trebuie să fie echivalentă cu secțiunea transversală a conductei de extracție.

Clapetele se pot amplasa astfel:

Instalare în tavanul fals: Dacă tavanul fals constituie partea inferioară a conductei de evacuare, clapetele pentru extracția aerului trebuie instalate în tavanul fals. Forma clapetelor pentru extracția aerului trebuie să fie dreptunghiulară. Dacă este posibil, acestea trebuie plasate în mijlocul secțiunii transversale a tunelului, iar conducta de evacuare trebuie să se asigure o proiectare hidraulică optimă.

Conducte laterale: Conducte laterale: Dacă proiectarea unui tunel construit prin metoda tăierii și acoperirii (cut&cover) include canale de evacuare pe părțile laterale ale tunelului, clapetele de extracție a aerului trebuie amplasate cât mai aproape posibil de tavanul tunelului.

Dimensiunile verticale nu trebuie să fie prea mari astfel încât să împiedice extracția aerului proaspăt din zona de sub stratul de fum. Pentru secțiunile transversale mari ale tunelului, accentul trebuie pus pe extracția eficientă a fumului din partea superioară. Pentru a obține o valoare a eficienței egală cu cea obținută prin extracția prin tavan, volumul de aer extras trebuie mărit, după caz.

Distanțele dintre clapetele pentru extracția aerului

Distanța normală dintre două clapete pentru extracția aerului nu trebuie să depășească valorile indicate la punctele 4.2.2 și 4.2.3.

5.3.4 Specificații

Presiune statică

Clapetele pentru extracția aerului trebuie proiectate astfel încât să funcționeze cu diferențele maxime posibile de presiune aferente tunelului, fără să piardă din etanșitate sau să se defecteze.

Influența temperaturii asupra controlului clapetelor

În timpul incendiilor, clapetele pentru extracția aerului pot fi expuse la temperaturi foarte ridicate. Prin urmare, clapetele, precum și unitatea de control, echipamentul asociat și cablurile de alimentare și control trebuie să rămână funcționale fără excepție timp de cel puțin 120 minute la temperaturi de 400°C. Rezistența la temperatură trebuie testată printr-un test de recepție care urmează să fie efectuat de un laborator acreditat și trebuie să fie confirmat prin furnizarea rezultatelor testului (este permisă certificarea testării tip). La efectuarea evaluării, în primele 30 de minute, clapetele trebuie să fie complet deschise (până la limita mecanică) și închise la fiecare cinci minute și apoi la fiecare zece minute cu ajutorul mecanismului de acționare aferent.

Pierderi de presiune

Clapetele pentru extracția aerului trebuie să fie cât mai etanșe posibil, deoarece pierderea de presiune reduce cantitatea efectivă de aer extras.

Nu trebuie depășite pierderile volumetrice /ventilator indicate în Tabelul 2.

Tabelul 2: Pierderi volumetrice maxime permise în funcție de presiunea aerului în timpul evaluării

Temperatură [°C]	Presiune [N/m²]	Debit volumetric [m³/s/m²]
20	4000	0,100
20	3500	0,090
20	3000	0,080
20	2500	0,070
20	2000	0,060
20	1500	0,055
20	1000	0,050
20	500	0,040

Etanșitatea la aer trebuie confirmată prin măsurare (a se vedea punctul 5.3.6.1). Debitul volumetric de aer măsurat trebuie să fie raportat la o densitate de 1,2 kg/m³. Clapetele trebuie instalate în tavanul fals astfel încât să nu favorizeze pierderi suplimentare.

Timpii de funcționare

Timpul necesar pentru deschiderea completă (90°) a unei clapete complet închise (0°) și invers nu trebuie să depășească 25 de secunde.

5.3.5 Cerințe în caz de incendiu

Pentru a asigura funcționarea optimă a clapetelor pentru extracția aerului în caz de incendiu, trebuie luate în considerare următoarele:

- Toate echipamentele din tubulatura de extracție a aerului (inclusiv unitatea de control și de monitorizare) trebuie să fie rezistente la temperaturi de 400 °C timp de minim 120 de minute (a se vedea punctul 5.3.4.2) sau trebuie să fie protejate în mod corespunzător pentru a garanta funcționalitatea acestora. Echipamentul nu trebuie distrus mecanic la temperaturi de până la 750°C într-un interval de 60 minute.
- În sistemele transversale care includ atât o tubulatură de admisie, cât și una de evacuare, unitățile de control trebuie instalate în tubulatura de admisie și trebuie să asigure o izolare termică eficientă a arborelui de transmisie pentru a împiedica transferul de temperatură către actuatorul electric.

5.3.6 Evaluarea clapetelor pentru extracția aerului

Teste efectuate de producător și/sau de un laborator acreditat (test de omologare) Testarea de omologare a clapetei trebuie efectuată conform descrierii de mai jos:

- Clapeta trebuie instalată corect pentru a garanta buna funcționare a acesteia. Dispozitivul de acționare trebuie montat și conectat la sursa de alimentare, iar pozițiile finale trebuie reglate și testate corespunzător.
- Trebuie simulate corect condițiile de presiune a aerului aferente sistemului, care acționează la nivelul clapetei.
- Înainte de a efectua testul de etanșeitate, clapeta trebuie reglată cu dispozitivul de acționare în poziția „deschis” și apoi în poziția „închis”. Fiecare oprire a clapetei după reglarea în cele două poziții trebuie efectuată folosind comutatorul de capăt. După închiderea clapetei, nu trebuie schimbată reglarea clapetei (de exemplu, folosind roata de mână) până la efectuarea testului.
- Nu trebuie efectuate măsuri suplimentare de corecție în vederea etanșării (de exemplu, utilizarea siliconului).
- Clapetele pentru extracția aerului sunt expuse la presiuni diferite, conform Tabelului 2. Fiecare nivel de presiune este menținut timp de cinci minute, cu excepția ultimului, care este menținut timp de 30 de minute. În etapa finală a testului, clapetele trebuie să fie complet deschise și complet închise de mai multe ori (de cel puțin de 10 ori) la presiunea ambientală. Între modificările de la o etapă de presiune la alta, deformările posibile se măsoară în punctele caracteristice ale clapetei. Nu trebuie să apară deformări care să afecteze eficiența.
- Condiții de lucru la presiune ridicată: funcționarea clapetei se testează la presiune înaltă. La presiune maximă (4000 Pa cu clapeta închisă), se efectuează cinci cicluri de deschidere/închidere cu ajutorul mecanismului de acționare electric corespunzător.

Toate testele menționate mai sus sunt efectuate folosind un prototip. În cazul în care există o serie de minim zece clapete, clientul trebuie să selecteze o clapetă pentru evacuarea aerului care să fie supus unor teste de calibrare mecanică, precum și unor teste de eficiență.

Teste la fața locului

Înainte de punerea în funcțiune a sistemului, trebuie efectuate următoarele teste funcționale:

- Fiecare clapetă individual pentru extracția aerului trebuie să fie deschis și închis cu ajutorul sistemelor de control local și/sau de la distanță pentru a-i testa funcționalitatea.
- Trebuie efectuate teste de extracție a aerului cu ventilatoare puse în funcțiune, măsurând volumul fluxului de aer cu diferite configurații. Debitul minim necesar al volumului de aer extras trebuie obținut în dreptul clapetei pentru extracția aerului cea mai îndepărtată de ventilatorul de evacuare a aerului.
- Trebuie efectuată o inspecție vizuală cu privire la funcționalitatea elementelor de etanșare din conducta de evacuare a aerului și a clapetelor.
- Funcționarea sistemului cu clapetă pentru extracția aerului trebuie testată prin efectuarea testelor de incendiu în conformitate cu punctul 8.2.

5.3.7 Dispozitive de monitorizare a vitezei aerului

Măsurarea vitezei longitudinale a aerului are în mod fundamental următoarele scopuri:

- Controlul sistemului de ventilație
- Evaluarea performanței sistemului de ventilație
- Controlul fluxului de aer în zona de trafic a tunelului în caz de incidente

Expresia „secțiune transversală de măsurare” utilizată mai jos se referă la poziționarea unui dispozitiv de măsurare sau la dispunerea mai multor dispozitive de măsurare care măsoară viteza longitudinală a aerului reprezentativă pentru secțiunea transversală a tunelului în cauză. Un sistem de măsurare constă în dispunerea a trei secțiuni transversale de măsurare individuale care permit o testare a funcționării și a valorilor măsurate pentru secțiunea transversală a tunelului în cauză.

Specificații:

Cerințele tehnice minime pentru aparatele de măsurare a vitezei aerului sunt specificate în AND 623.

Teste efectuate înainte de începerea operării

După instalarea dispozitivelor de măsurare a vitezei aerului, trebuie confirmat caracterul adecvat atât pentru dispozitivul de măsurare, cât și pentru locul în care este instalat.

Pentru fiecare sistem individual de măsurare, trebuie să se confirme că viteza medie a aerului pe întreaga secțiune transversală a tunelului se obține prin efectuarea măsurărilor de referință. Testarea funcțională se efectuează cu un interval de viteză a aerului de $\pm 3\text{m/s}$, precum și cu ventilatoare complet activate (pentru ventilație longitudinală). Valorile sunt comparate cu valoarea de referință a vitezei aerului înregistrată pe baza valorilor medii de 10 secunde. Diferența față de valoarea de referință nu trebuie să depășească $\pm 0,3\text{m/s}$.

Testarea funcționării în timpul exploatării normale

În timpul exploatării normale, trebuie efectuate teste de calibrare a anemometrelor (senzori de măsurare a vitezei aerului în tunel) privind funcționarea și monitorizarea vitezei aerului. O metodă adecvată constă în compararea mai multor secțiuni transversale de măsurare în ceea ce privește viteza și direcția aerului.

La efectuarea testelor de funcționare, trebuie luate în considerare caracteristicile specifice ale fluxului de aer al structurii tunelului respectiv.

Teste de funcționare în timpul incidentelor

În caz de incidente, testele de funcționare și verificare a vitezei longitudinale a aerului trebuie efectuate în mod continuu.

Tuneluri cu flux de aer longitudinal:

În tunelurile cu ventilație longitudinală, sistemele de măsurare care permit o evaluare a funcționării și verificare a valorilor înregistrate trebuie instalate la ambele portaluri ale tunelului (a se vedea Fig. 1).



Figura 1: Exemplu de poziționare a sistemelor de măsurare pentru testarea funcționării în zona portalurilor, prezentată pentru metodele de mediere a măsurărilor realizate la distanță (cu ultrasunete)

Tuneluri cu ventilație transversală:

Pentru tunelurile cu ventilație transversală, este necesar un sistem de măsurare cu testarea funcționării pentru valorile înregistrate luate pe ambele părți ale clapetei(elor) pentru extracția aerului, deschisă (deschise) în caz de incendiu. Deoarece sectoarele individuale de ventilație pot fi ventilate separat, pentru fiecare sector de ventilație este necesar cel puțin un sistem de măsurare cu testare a funcționării. Pentru sectoarele de ventilație adiacente portalurilor, este necesar un sistem de măsurare suplimentară cu testarea funcționării (a se vedea Fig. 2). Poziționarea sistemelor de măsurare trebuie efectuată în conformitate cu conceptul de ventilație relevant în caz de incendiu. Trebuie luate în considerare pozițiile ventilatoarelor cu jet, ale dispozitivelor de injecție cu aer proaspăt și ale altor echipamente similare.

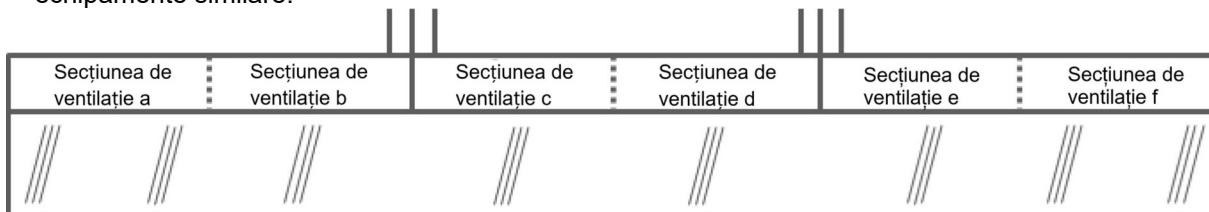


Figura 2: Exemplu de poziționare a secțiunilor transversale de măsurare cu testarea funcționării pentru tuneluri cu ventilație transversală, prezentată pentru metodele de mediere a măsurătorilor realizate la distanță (cu ultrasunete).

Metodă și intervale de timp aferente verificării funcționării

Metoda care trebuie utilizată pentru verificarea funcționării trebuie definită în funcție de proiect. Pentru funcționarea normală, trebuie setată o valoare medie de timp a valorilor de măsurare ce acoperă câteva minute pentru verificarea funcționării. În caz de incidente, valorile medii ale timpului pentru valorile măsurate trebuie reduse la 5-10 secunde.

Procesul de testare

La ora stabilită sau în urma unei solicitări, procesul de testare se efectuează conform descrierii de mai jos.

Pentru a exclude acele secțiuni transversale de măsurare i din cadrul sistemului de măsurare j care prezintă valori de măsurare false ca urmare a stabilirii valorii medii, trebuie să se efectueze următoarele trei interogări:

$$\begin{aligned} |\bar{u}_{1,j} - \bar{u}_{2,j}| &\leq \Delta u \\ |\bar{u}_{1,j} - \bar{u}_{3,j}| &\leq \Delta u \\ |\bar{u}_{2,j} - \bar{u}_{3,j}| &\leq \Delta u \end{aligned}$$

Cele două secțiuni transversale de măsurare i care respectă interogarea se pot utiliza pentru următoarea evaluare.

Evaluarea prezentată mai jos se face consecutiv de patru ori pentru fiecare secțiune transversală de măsurare i neperturbată din cadrul sistemului de măsurare j , salvând rezultatul secțiunii transversale de măsurare (ADMIS, RESPINS):

$$\bar{u}_{i,j} \leq \bar{U}_j + \Delta u \wedge \bar{u}_{i,j} \geq \bar{U}_j - \Delta u$$

Definirea variabilelor:

$\bar{u}_{i,j}$ Valoarea medie în timp a vitezei aerului pentru o secțiune transversală de măsurare validă i în sistemul de măsurare j pe o perioadă de timp definită [m/s]

$\bar{U}_j = \frac{\sum \bar{u}_{i,j}}{k}$ Valoarea medie a tuturor secțiunilor transversale de măsurare valide i din cadrul sistemului de măsurare j [m/s]

Valoarea medie a tuturor secțiunilor transversale de măsurare valide i din cadrul sistemului de măsurare j [m/s]

Numărul de secțiuni transversale de măsurare valide i din sistemul de măsurare j [m/s]

$\Delta u = 0,3-0,5$ Valoare-limită (abatere permisă pentru fiecare secțiune transversală de măsurare individuală i în sistemul de măsurare j de la media aritmetică $\bar{U}_j$) [m/s]. În funcție de structură, valoarea-limită trebuie setată la 0,3 pentru tunelurile unidirecționale și la 0,5 pen-

tru tunelurile bidirecționale [m/s].

$i = 1..3$ Secțiunea transversală de măsurare i în cadrul sistemului de măsurare j

Cerințe privind poziționarea dispozitivelor de măsurare

La configurarea secțiunilor transversale de măsurare, distanțele minime care trebuie respectate sunt de 20 m față de indicatoarele de trafic și de obiecte de interferență similare (de exemplu, pasaje de trecere pentru vehiculele de urgență), precum și, dacă este posibil, de 100 m de la ventilatoarele cu jet și de la refugiile de urgență sau de la portaluri. În tunelurile cu ventilație longitudinală, secțiunile transversale de măsurare trebuie să fie situate în apropierea portalurilor, dacă este posibil. În ceea ce privește tunelurile cu ventilație transversală, trebuie instalate două secțiuni transversale de măsurare în fiecare dintre sectoarele de ventilație ale portalului și una cât mai aproape posibil de centrul fiecăreia dintre celelalte sectoare de ventilație. Pentru structuri complexe de tuneluri, inclusiv pe rampe și în afara rampelor, numărul de secțiuni transversale de măsurare trebuie mărit în funcție de cerințele specifice.

În tunelurile cu tuburi (galerii) duble, poziționarea secțiunilor transversale de măsurare trebuie stabilită conform cerințelor legate de asigurarea suprapresiunii pentru tuburile fără fum la pasajele transversale. În cazurile limită, testarea funcționării are prioritate mai mare decât asigurarea suprapresiunii.

Măsurători de referință regulate

Testele de omologare efectuate la fața locului în timpul punerii în funcțiune trebuie repetate la intervale de trei până la cinci ani (de exemplu, în timpul exercițiilor sau al testelor de incendiu), cu realizarea măsurătorilor de referință adecvate (a se vedea punctul 5.3.7.2).

5.4 Echipamente suplimentare

Pentru a preveni debitul necontrolat de aer în conductele de admisie și de evacuare când ventilatoarele nu sunt în funcțiune, trebuie instalate clapete adecvate în amonte sau în aval de ventilatoare. În ceea ce privește posibilitatea ca aerul rece să intre în tunel, ceea ce duce la formarea gheții, trebuie examinată cerința posibilă pentru instalarea unei clapete suplimentare lângă conducta de admisie a aerului proaspăt, care trebuie închisă atunci când ventilatorul nu funcționează.

În plus față de cerințele menționate în punctul 5.1, trebuie acordată atenție rezistenței la coroziune a echipamentului suplimentar.

Echipamentele suplimentare pot fi:

- Clapete pentru incendiu, fum și extracția aerului
- Amortizoare de zgomot
- Palete de ghidare
- Trape pentru reparații

În ceea ce privește impactul zgomotului produs de sistemele de ventilație asupra mediului tunelului, evaluările trebuie efectuate în conformitate cu orientările și reglementările corespunzătoare.

5.5 Structura conductelor de aer și a tunelului

Trebuie să se respecte următoarele cerințe tehnice pentru conductele de aer și alte structuri aferente tunelului:

- Conductele de aer și toate instalațiile conexe trebuie proiectate astfel încât să fie performante aerodinamic.
- Trebuie atinsă o etanșeitate suficientă pentru a asigura un sistem eficient de extracție a fumului; acest lucru trebuie verificat și confirmat prin teste adecvate de etanșeitate.
- La efectuarea testelor de punere în funcțiune, pierderea de debit volumetric prin scurgere al întregii conducte de evacuare (fără a include ratele de scurgere de la clapetele pentru extracția aerului) nu trebuie să depășească $5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$. Evaluarea trebuie efectuată în apropierea ventilatoarelor ($<1000 \text{ m}$), lungimea minimă necesară a secțiunii de măsurare este de 500 m.
- Sistemul de admisie a aerului proaspăt trebuie să aibă o plasă aferentă împotriva zăpezii.
- La proiectarea portalurilor, a pasajelor transversale, precum și a structurilor conexe de ventilație, trebuie luate în considerare măsuri adecvate pentru a preveni scurtcircuitarea fluxului de aer.
- Trebuie evitată pătrunderea aerului poluat și a prafului din zona de trafic a tunelului în stația de ventilație (de exemplu, presurizarea)

- Trebuie examinate frecvențele naturale ale structurii de portantă și cele ale unității motorului ventilatorului și trebuie acordată atenție pentru separarea frecvențelor proprii ale acestora.

6 Dimensionare aerodinamică

6.1. Note generale

Calculul aerodinamic trebuie efectuat pe baza necesarului de aer proaspăt. Parametrii aerodinamici rezultați servesc la stabilirea celor mai bune specificații pentru sistemul de ventilație și la optimizarea parametrilor de inginerie civilă.

Elementele de bază ale designului aerodinamic sunt următoarele:

6.1.1. Influențe meteorologice precum schimbările presiunii barometrice și impactul vântului

Este de preferat ca datele care trebuie utilizate să provină din măsurători ale schimbărilor de presiune și

ale vitezelor vântului efectuate pe parcursul mai multor ani în locurile unde urmează să fie construite portalurile. Pentru clasele de pericol I - III și pentru clasa de pericol IV, presiunile atmosferice și vitezele vântului care trebuie utilizate trebuie să corespundă procentului de 95%, respectiv procentului de 98% a valorilor medii orare. Viteza vântului la o înălțime de 4 m deasupra solului trebuie calculată utilizând formula de mai jos:

$$u = u_{\text{mess}} \cdot \left(\frac{4}{z_{\text{mess}}} \right)^p \quad (1)$$

Unde

u viteza aerului la o înălțime de 4 m deasupra solului [m/s]

u_{mess} viteza aerului la înălțimea de măsurare [m/s]

z_{mess} înălțimea de măsurare (în general la 10 m deasupra solului) [m]

p exponent privind condițiile de dispersie neutră (0,25) [-]

Sectorul de vânt trebuie limitat la sectoarele relevante ale portalurilor. Trebuie luate în considerare în mod adecvat caracteristicile portalurilor (cum ar fi barierele fonice) care măresc contrapresiunea.

Dacă nu sunt disponibile astfel de rezultate ale măsurătorilor, influența meteorologică relevantă (presiunea vântului și diferențele de presiune barometrică la portaluri) trebuie analizate printr-o evaluare meteorologică corespunzătoare.

6.1.2. Impactul termic provocat de schimbările de temperatură

Rata de eliberare a căldurii utilizată ca bază pentru dimensionarea sistemului de ventilație pentru toate tunelele cu două benzi și secțiune transversală normală a tunelului implică un vehicul pentru mărfuri grele și două autoturisme (intensitate incendiu 30 MW).

Efectele forței ascensionale în tunel în urma creșterii temperaturii care apar în condiții normale, precum și în caz de incendiu trebuie luate în considerare în conformitate cu abordarea de mai jos:

$$\Delta p_{\text{nat}} = (\rho_a \pm \rho_i) \cdot g \cdot L_{\text{tunnel}} \cdot \frac{s}{100} \quad (2)$$

$$\Delta p_{\text{fire}} = - \frac{g \cdot s_{\text{fire}} \cdot \rho_i \cdot \dot{m}_i \cdot c_p}{100 \cdot \alpha \cdot U} \cdot \ln \left[\frac{e^{-\frac{\alpha \cdot U \cdot L_{\text{fire}}}{\dot{m}_i \cdot c_p} (T_B - T_i) + T_i}}{T_B} \right] \quad (3)$$

unde:

$$T_B = \frac{\dot{Q} \cdot 10^6 \cdot \eta_{\text{fire}}}{\dot{m}_i \cdot c_p} + T_i \quad (4)$$

$$T_{\text{fire}}(x) = e^{-\frac{\alpha \cdot U \cdot x}{\dot{m}_i \cdot c_p} (T_B - T_i) + T_i} \quad (5)$$

La dimensionarea ventilatoarelor cu jet, trebuie luată în considerare corecția densității. Temperatura la ventilatorul cu jet ($T_{\text{incendiu}}(x)$) se calculează folosind distanța dintre locul incendiului și ventilatorul cu jet

în direcția fluxului de aer pentru variabila x . Viteza medie locală a aerului trebuie adaptată în raport cu distribuția calculată a temperaturii.

Pentru tunelele cu pantă în schimbare (a se vedea Fig. 3) în cadrul unui sector de incendiu, efectul forței ascensionale se calculează după cum urmează:

$$\Delta p_{\text{fire}} = \Delta p_{\text{fire}_I} + \Delta p_{\text{fire}_{II}} + \dots \quad (6)$$

$$\Delta p_{\text{fire}_I} = - \frac{g \cdot s_{\text{fire}_I} \cdot \rho_i \cdot \dot{m}_i \cdot c_p}{100 \cdot \alpha \cdot U} \cdot \ln \left\{ \frac{e^{-\frac{\alpha \cdot U \cdot \Delta x_I}{\dot{m}_i \cdot c_p}} [T_{\text{fire}}(x=0) - T_i] + T_i}{T_{\text{fire}}(x=0)} \right\} \quad (7)$$

$$\Delta p_{\text{fire}_{II}} = - \frac{g \cdot s_{\text{fire}_{II}} \cdot \rho_i \cdot \dot{m}_i \cdot c_p}{100 \cdot \alpha \cdot U} \cdot \ln \left\{ \frac{e^{-\frac{\alpha \cdot U \cdot \Delta x_{II}}{\dot{m}_i \cdot c_p}} [T_{\text{fire}}(x=x_1) - T_i] + T_i}{T_{\text{fire}}(x=x_1)} \right\} \quad (8)$$

etc.

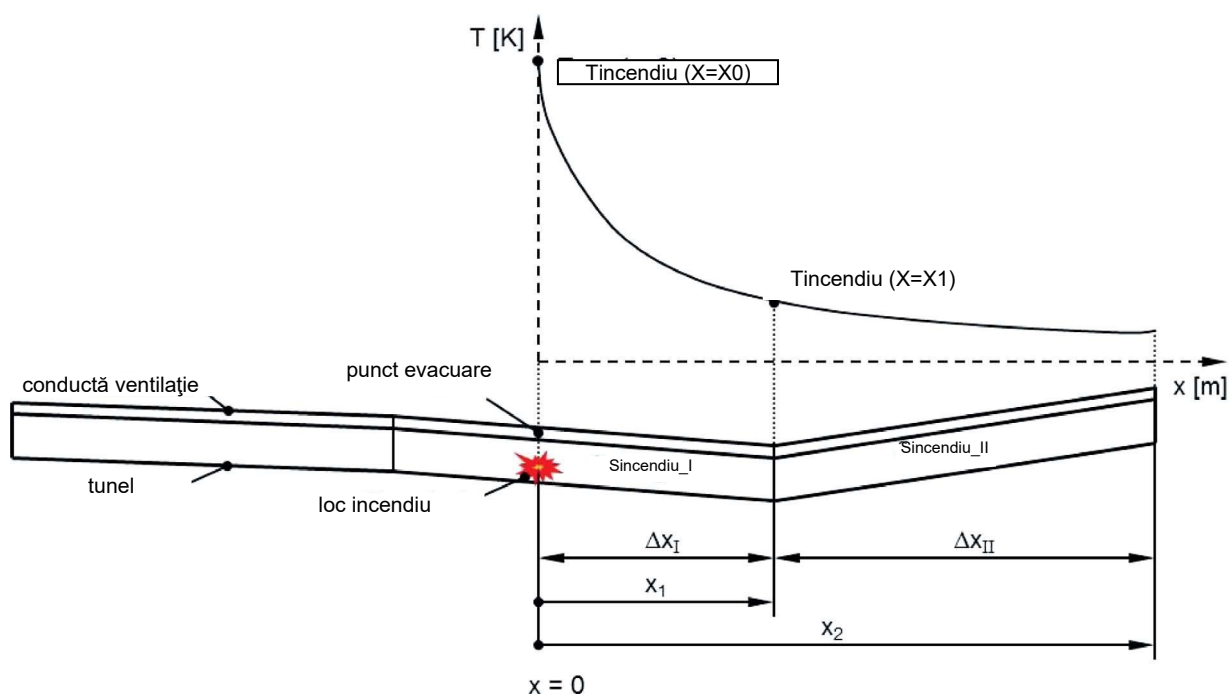


Figura 3: Pantă la incendiu pentru un caz unidimensional

Coeficientul de transfer de căldură α pentru ecuațiile 3 și 5, precum și 6-8 care trebuie utilizat este coeficientul de transfer de căldură α_F al profilului tunelului corespunzător (a se vedea ecuația 9 și 10).

Coeficienții de transfer de căldură α_F indicați mai jos au la bază căptușelile tunelului care nu sunt prevăzute cu materiale termoizolante (de exemplu, construcții de protecție împotriva incendiilor). În alte cazuri, trebuie să se ia în considerare coeficienții de transfer de căldură corespunzători.

Stabilirea coeficientului de transfer de căldură α_F pentru tunelurile cu secțiune transversală pătrată:

$$\alpha_F = 2,8 \cdot (u - 2,0) + 6,6 \text{ pentru } 2,0 \leq u \leq 3,0 \quad (9)$$

Stabilirea coeficientului de transfer de căldură α_F pentru tunelurile cu secțiune transversală potcoavă:

$$\alpha_F = 1,15 \cdot (u - 2,0) + 8,4 \text{ pentru } 2,0 \leq u \leq 3,0 \quad (10)$$

$$\rho = \frac{P}{R_i} \quad (11)$$

unde:

c_p	capacitate termică specifică cu p_i [J/kgK]
g	acelerație gravitațională [m/s ²]
L_{incendiu}	lungimea sectorului de incendiu (începând de la locul incendiului) [m]
s	pantă longitudinală mediu ponderată la lungime [%]
s_{incendiu}	pantă longitudinală în sectorul de incendiu [%]
T_B	temperatura la locul incendiului $x = 0$ [K]
$T_{\text{incendiu}(x)}$	temperatură la incendiu în locul incendiului x [K]
u	viteza longitudinală a fluxului de aer în funcție de p_i [m/s]
U	circumferința tunelului în locul x [m]
v	punctul de la locul incendiului ($x = 0$) la L_{incendiu} în direcția fluxului de aer [m]
α_F	coeficientul de transfer termic pentru zona de trafic din tunel [W/m ² K]
Δp_{nat}	impactul presiunii provocat de forța ascensională naturală [Pa]
$\Delta p_{\text{incendiu}}$	impactul presiunii provocat de forța ascensională (a focului) [Pa]
ΔT_{nat}	$T_a - T_i$ [K]
$\dot{m}_i$	debitul masic în tunel [kg/s]
η_{incendiu}	eficiența eliberării căldurii (raportul dintre eliberarea reală și teoretică a căldurii) [-]
ρ	densitatea aerului depinde de temperatură, precum și de presiunea externă [kg/m ³]
$\dot{Q}$	Rata de eliberare a căldurii la incendiu [MW]
Index a	în afara tunelului
Index i	în interiorul tunelului fără incendiu
Index I, II	sectoare longitudinale de pantă

Proiectarea sistemelor de ventilație pentru tunelele cu trafic combinat de autoturisme și vehicule grele de marfă și pentru cele cu trafic exclusiv de autoturisme se efectuează pe baza unei rate de eliberare a căldurii de 30 MW și, respectiv, de 5 MW. În ceea ce privește tunelele cu o proporție mai mare a traficului greu (>15%), impactul siguranței tunelului trebuie stabilit în baza unei analize de risc a tunelului sau a unei evaluări de risc a tunelului (a se vedea AND 621) pentru a analiza necesitatea creșterii sarcinii calorifice.

Valorile caracteristice date în Tabelul 3 sunt valabile pentru ratele proiectate de degajare a căldurii.

Tabelul 3: Valori caracteristice pentru incendii standard privind funcțiile intensității incendiului

Rata de degajare a căldurii	5 MW	30 MW	50 MW
ΔT_{nat} [K]	10	10	10
L_{incendiu} cu extracția fumului ^{*)} [m]	900 m	900 m	900 m
L_{incendiu} fără extracția fumului	dinspre incendiu spre portal	dinspre incendiu spre portal	dinspre incendiu spre portal
η_{incendiu} [-]	0,85	0,75	0,75

^{*)} Se presupune că, după aproximativ 5 minute, sistemul de ventilație împiedică răspândirea în continuare a gazelor de fum. Această perioadă de timp are la bază o viteză medie presupusă de propagare a fumului de aproximativ 3,0 m/s (5 min · 60 s/min · 3 m/s = 900 m).

Valorile menționate mai sus sunt valori practice medii; trebuie luate în considerare abaterile posibile pentru structurile speciale. Pentru dimensionarea sistemului de ventilație în caz de incendiu, trebuie luat în considerare cel mai rău caz posibil. Astfel, în cazuri speciale, ar putea fi necesară dimensionarea sistemului de ventilație pentru incidente cu fum rece (de ex., tunel unidirecțional cu o pantă pozitivă a drumului în direcția de deplasare).

6.1.3. Cerințe suplimentare pentru sistemele de ventilație cu sisteme de extracție a aerului evacuat

În ceea ce privește sistemele de ventilație cu extracția aerului evacuat, performanța ventilatorului trebuie specificată prin luarea în considerare a gazelor de fum fierbinți. La stabilirea specificațiilor sistemului trebuie luată în considerare temperatura fumului la punctul de extracție (T_B), precum și influențele temperaturii din conducta de aer.

Trebuie respectată următoarea procedură:

Performanța ventilatorului necesară pentru extracția aerului evacuat trebuie să aibă specificații ce iau în calcul pierderile de presiune în tunel (a se vedea punctele 5.3.4.3, 5.5 și 6.3) aferente unui loc de instalare care corespunde cotei medii a tunelului față de nivelul mării. Volumul de aer la ventilator, calculat astfel este apoi crescut cu factorul F_V pentru a stabili volumul de aer, luând în considerare fumul (ecuația 12 și

13). Diferența de presiune calculată a ventilatorului este mărită cu factorul F_p pentru a ține cont de influențele termice (ecuația 14 și 15). Pentru conductele de aer cu pante longitudinale, trebuie luat în considerare efectul forței ascensionale $\Delta p_{\text{incendiu}}$ (ecuația 3). La proiectarea ventilatoarelor, trebuie să se asigure faptul că fiecare punct individual de operare (definit de presiune și de debitul volumetric) al ventilatorului se regăsește în rețeaua sa de ventilatoare. Temperatura T_{incendiu} în raport cu lungimea conductei sau lungimea de extracție x trebuie calculată conform ecuației 5. Coeficientul de transfer termic α , care este prezent în ecuațiile 3 și 5, precum și în ecuațiile 6-8, este echivalent cu coeficientul de transfer termic α_{AK} . Acesta poate fi calculat folosind ecuațiile 16-18 prin aproximarea valorilor necesare cu o densitate corespunzătoare altitudinii în conformitate cu ISO 2533. Temperatura T_B se calculează cu ajutorul ecuației 4 utilizând m , pentru debitul masic, acesta fiind debitul masic prezent la punctul de extracție al sistemului de ventilație în cauză (a se vedea punctul 4.2). Circumferința este reprezentată de circumferința conductei de aer, ca în ecuația 5, iar pentru variabila L_{incendiu} trebuie introdusă lungimea care acoperă distanța dintre punctul de extracție și ieșirea conductei, dacă panta longitudinală din acest sector al conductei de aer s_{incendiu} este constantă. Altfel, trebuie folosite ecuațiile 6-8.

$$\dot{V}_w = \dot{V}_k \cdot F_V \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (12)$$

$$F_V = \frac{T_{\text{incendiu}}(x=l)}{T_k} \quad (13)$$

$$\Delta p_w = \Delta p_k \cdot F_p + \Delta p_{\text{incendiu}} \quad [\text{Pa}] \quad (14)$$

$$F_p = 1 + \left(\frac{T_{\text{incendiu}}(x=l)}{T_k} - a \cdot l \right) \cdot \left(\frac{T_B - T_k}{T_B} \right) \quad (15)$$

$$Nu_m = \frac{\left(\frac{\xi}{8} \right) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \cdot \left[1 + \left(\frac{D_h}{l} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad [-] \quad (16)$$

$$\xi = \left(1,8 \cdot \log_{10} Re - 1,5 \right)^{-2} \quad [-] \quad (17)$$

$$\alpha_{AK} = \frac{Nu_m \cdot \lambda}{D_h} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{K}] \quad (18)$$

unde:

a	constantă conform Tabelului 4, în funcție de sarcina nominală de degajare a căldurii luată ca baza pentru dimensionare [-]
D_h	diametrul hidraulic al conductei de evacuare [m]
F_V	factorul de debit volumetric care servește la luarea în considerare a efectelor termice [-]
F_p	factorul pentru diferența de presiune care servește la luarea în considerare a efectelor termice [-]
k	lungimea conductei care acoperă distanța dintre punctul de extracție și ventilator [m]
Nu_m	număr Nussell median (în cazul utilizării treptate, trebuie folosit numărul Nussell local [-])
ξ	coeficient de pierdere a presiunii conform lui Konakov
Pr	Numărul Prandtl [-]
Re	Numărul Reynold [-]
T_i	temperatura din tunel în amonte de incendiu [K]
T_K	temperatura la densitatea corespunzătoare elevației conform ISO 2533 [K]
$\dot{V}_k$	debit volumetric la ventilator cu densitatea corespunzătoare elevației în conformitate cu ISO 2533 [m³/s]
$\dot{V}_W$	debit volumetric la ventilator, ținând cont de efectele termice [m³/s]
α_{AK}	coeficient de transfer termic pentru conducta de evacuare [W/m²K]
$\Delta p_{\text{incendiu}}$	diferența de presiune în urma efectelor forței ascensionale [Pa]
Λ	capacitatea de transfer termic a aerului [W/MK] (a se vedea atlasul termic VDI)

Tabelul 4: Temperatura gazelor de fum la punctul de extracție TB ca funcție a ratei de degajare a căldurii (puncte de extracție, ventilație semi-transversală și transversală)

Rata de degajare a căldurii	Constantă a
30 MW	0,00028
50 MW	0,00023

Proiectarea echipamentului de ventilație necesar pentru a controla fluxul longitudinal în tunel (a se vedea punctele 7.5.3 și 7.5.4) trebuie să țină cont de impacturile termice de la punctul 6.1.2.

6.2. Ventilație longitudinală

În tunelurile cu sisteme mecanice de ventilație longitudinală, forța necesară pentru a îndeplini standardele aferente sistemului (a se vedea punctele 4.2.1 și 7.5) trebuie stabilită luând în calcul următorii factori:

- influențe meteorologice
- admisia necesară de aer proaspăt
- condiții structurale și instalații relevante în ceea ce privește ingineria ventilației
- date de trafic
- efectul de piston produs de vehicule
- rațiuni economice (de ex., necesarul de energie electrică)

Disponerea ventilatoarelor cu jet trebuie planificată astfel încât forța de împingere a aerului să poată fi utilizată într-un mod optim pe întreaga secțiune transversală a tunelului (fără obstacole prin elemente structurale, indicatoare rutiere grafice etc.). În ceea ce privește tunelurile cu secțiuni transversale mari (o lățime a deschiderii de 12 m sau mai mare), trebuie să se vizeze o dispunere regulată a ventilatoarelor pe întreaga lățime. Instalațiile care influențează semnificativ secțiunea transversală a tunelului (cum ar fi indicatoare de trafic, dispozitive de control al traficului etc.) trebuie luate în calcul la stabilirea performanțelor necesare ale ventilatorului.

Calculul aerodinamic care trebuie efectuat pentru sistemele de ventilație longitudinală constau în elementele menționate în secțiunea anterioară și în calculul pierderilor de presiune din tunel, luând în considerare caracteristicile structurale specifice și elementele instalate (cum ar fi indicatoarele de trafic, nișele, elementele de proiectare ale portalului, rugozitatea suprafeței etc.).

În plus, trebuie luat în considerare faptul că, în prezența fumului, impulsul (forța de propulsie) ventilatoarelor cu jet scade în urma creșterii temperaturii.

Ventilatoarele cu jet trebuie să fie aranjate astfel încât să nu se influențeze reciproc. Dacă nu se poate împiedica acest lucru din cauza caracteristicilor specifice ale structurii tunelului, trebuie luată în considerare pierderea preconizată a forței de propulsie (a impulsului).

Ventilatoarele din zona de incendiu nu trebuie puse în funcțiune (distrugerea straturilor de fum etc.). Acest lucru trebuie luat în calcul la stabilirea specificațiilor sistemului de ventilație (respectiv nu se poate utiliza doar un ventilator sau doar o serie de ventilatoare). Zonele de detectare a incendiilor trebuie definite în mod specific pentru fiecare sistem individual de ventilație.

6.3. Sisteme de ventilație semi-transversale și transversale

Atunci când se stabilesc specificațiile sistemelor de ventilație semi-transversale și transversale, trebuie luate în considerare condițiile de circulație a aerului prezente și pierderile de presiune care apar în zona instalațiilor de ventilație și în conductele de admisie și evacuare, precum și în zona tunelului.

Proiectarea aerodinamică a acestor sisteme de ventilație ține cont și de următoarele aspecte:

- Evaluarea pierderilor de presiune din zonele instalațiilor de ventilație, a conductelor sau a puțurilor de admisie și evacuare, precum și a conductelor de distribuție a aerului proaspăt și a conductelor de extracție a aerului
- Stabilirea pierderilor de presiune care apar în spațiul de trafic al tunelului
- Stabilirea pierderilor de presiune care apar la deschiderile de admisie și la dispozitivele de extracție
- La noile structuri ale tunelurilor trebuie planificate și specificate astfel încât diferența de presiune dintre conducta de evacuare și spațiul de trafic al tunelului să nu depășească 3000 Pa
- Lungimea fiecărui sector individual de ventilație (evacuare aer) nu trebuie să depășească 2500 m

- Pe măsură ce ratele de scurgere cresc în timpul funcționării, rata maximă de scurgere permisă utilizată pentru stabilirea specificațiilor debitului volumetric la ventilator (a se vedea Tabelul 2 și punctul 5.5) trebuie mărită cu 100% pentru a menține funcționalitatea de extracție a fumului în condiții de siguranță în caz de incendiu.

6.4. Metode de calcul

Se permite aplicarea unor metode de calcul unidimensionale și tridimensionale adecvate și validate, bazate pe ecuațiile de conservare pentru masă, energie și impuls pentru proiectarea sistemelor de ventilație.

7. Controlul și funcționarea sistemului de ventilație

7.1. Reglementări privind controlul sistemelor de ventilație

Sistemul de ventilație trebuie să țină cont de rațiuni economice la asigurarea nivelului de siguranță necesar în timpul funcționării normale și în caz de incendiu.

În general, sistemele de ventilație sunt controlate automat; intervențiile manuale trebuie să fie posibile în toate modurile de funcționare. În plus, operatorul de tunel trebuie să poată ajusta oricând parametrii și ordinea programelor în funcție de nevoile curente.

Abaterile de la reglementările stabilite în această secțiune sunt permise numai în anumite cazuri și trebuie justificate temeinic.

7.1.1. Variabile și date măsurate

În plus față de valorile măsurate ale CO, opacității, vitezei longitudinale a aerului și traficului menționate în AND 623, trebuie să se colecteze datele de mai jos și să fie luate în considerare la stabilirea specificațiilor sistemului de control:

Pentru a optimiza performanțele ventilației în raport cu condițiile structurii tunelului, trebuie colectate următoarele date de trafic pentru fiecare sector de ventilație și bandă de circulație în parte precum și pentru direcția de circulație: numărul de vehicule prezente în tunel (vehicule grele de marfă, autoturisme, viteza vehiculului, frecvența congestiilor de trafic)

- Debitul volumetric și creșterea presiunii la ventilatoare în sistemele de ventilație semi-transversale și transversale, precum și în sistemele de extracție locală.
- Parametrii specifici ai unității complete de ventilare (temperatură, vibrații etc.)
- Putere electrică (controlul valorilor maxime acceptabile)

7.1.2. Valori limita pentru închiderea tunelului

Tunelul trebuie închis automat în cazul uneia dintre condițiile de mai jos:

- ≥ 100 ppm CO mai mult de 10 minute
- ≥ 150 ppm CO
- Coeficientul de extincție $\geq 12 \cdot 10^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$ mai mult de 1 minut

Tunelul trebuie redeschis automat traficului dacă se detectează o tendință descrescătoare și valorile respective rămân sub una dintre următoarele valori de prag mai mult de 1 minut:

- 90 ppm CO
- Coeficient de extincție $7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$

Opacitate: Numărul de particule din atmosferă între observator și obiect și cât de eficient pot absorbi și împrăști lumina. Această valoare este definită de un termen numit coeficient de extincție atmosferică (factorul k). Pe măsură ce factorul k crește, vizibilitatea scade.

7.1.3. Valori vizate pentru funcționarea normală

Valorile indicate mai jos trebuie ajustate în timpul funcționării pentru a corespunde unui mod de funcționare avantajos din punct de vedere economic.

- Valoare vizată CO 30 ppm
- Coeficient vizat de extincție $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$

7.1.4. Valori de prag în timpul lucrărilor de întreținere

În cazul lucrărilor de întreținere pe termen lung, nu trebuie depășite următoarele valori de prag în secto-

rul de ventilație afectat:

- CO 20 ppm
- Opacitate $3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$

Trebuie respectate legile privind protecția la locul de muncă.

7.2. Control în funcție de datele de trafic

7.2.1 Date impuse

Indiferent de parametrii fixați, trebuie definite următoarele variabile utilizate în ceea ce privește controlul ventilației.

- Structura traficului
Traficul trebuie împărțit în următoarele categorii:
 - Autoturisme
 - Vehicule grele de marfă
- Valoarea estimată a emisiilor de CO.
Valoarea estimată a emisiilor de CO trebuie calculată folosind ca bază tabelele de emisii cuprinse în RVS 09.02.32 și volumul traficului curent, precum și structura traficului. Valoarea estimată a emisiilor trebuie utilizată ca parametru pentru necesarul de aer calculat (necesarul de aer CO q_{CO}) în funcție de emisia CO a vehiculelor.
- Valoarea estimată a emisiilor ce cauzează opacitate.
Valoarea estimată a emisiilor ce cauzează opacitate trebuie calculată în baza tabelor de emisii cuprinse în RVS 09.02.32 și volumul traficului curent, precum și structura traficului. Valoarea estimată a emisiilor trebuie utilizată ca parametru pentru necesarul de aer calculat (necesarul de aer Tr (q_{Tr}) în funcție de emisia de particule (exprimată ca valoare a opacității) ale vehiculelor și de repunerea în suspensie a prafului rutier.
- Abaterea maximă permisă de la valorile de emisie estimate (intervalul de toleranță)
- Inițial, valorile țintă ale concentrației care sunt necesare pentru efectuarea calculului necesarului de aer trebuie stabilite după cum urmează: 30 ppm pentru concentrația de CO și $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ pentru opacitate. Ulterior, aceste valori se pot ajusta în funcție de experiența operațională.
- Atât pentru CO, cât și pentru opacitate, trebuie definite intervale de toleranță legate de trafic (limitate în timp) în care nu se efectuează modificări directe ale sistemului de control. Cu toate acestea, intervalul maxim de toleranță nu trebuie să depășească valorile limită de planificare.
- Constantă de timp critică t_{crit} în ceea ce privește sistemul de control.
Trebuie stabilită o perioadă de timp specifică sistemului în care valoarea estimată a emisiilor poate să nu fie atinsă sau să fie depășită fără a provoca modificări ale sistemului de control.

În cazul sistemelor de ventilație longitudinală și al condițiilor simple (de ex., trafic unidirecțional, tunel scurt), este suficientă stabilirea intervalelor maxime de toleranță pentru valorile operaționale maxime permise.

Dacă nu sunt disponibile date privind traficul (de ex., trafic staționat), sistemul de control trebuie să treacă automat în modul control bazat pe valorile măsurate ale calității aerului (a se vedea punctul 7.3). Poate interveni o reducere a admisiei de aer proaspăt q_{req} prezentă în momentul avariei cu o întârziere de 20 minute.

7.2.2. Stabilirea debitului necesar de aer diferențial (q_{dif})

Sistemele automate de control al ventilației necesită stabilirea debitului necesar de aer diferențial. Se stabilește separat pentru fiecare sector de ventilație în parte, folosind următoarele criterii importante:

- Debitul necesar de aer necesar CO (q_{CO})
(debitul de aer necesar stabilit prin calcule, în funcție de emisiile CO ale vehiculelor). Necesarul de aer pe banda de circulație a vehiculelor și pe direcția de deplasare în ceea ce privește CO, acesta trebuie calculat pe baza valorilor estimate ale emisiilor. Necesarul de aer q_{CO} este rezultatul adăugării necesarului de aer pentru toate benzile de circulație.
- Debitul de aer necesar față de opacitate (q_{Tr})
(debitul de aer necesar stabilit prin calcule, în funcție de emisiile de particule ale vehiculelor)
Debitul de aer necesar q_{Tr} trebuie stabilit la fel ca necesarul de aer q_{CO} .
- Debitul de aer necesar (q_{soll})
(debit de aer necesar relevant)

Cea mai mare dintre cele două valori q_{co} și q_{Tr} se folosește ca valoare vizată pentru q_{req} , valoare ce este importantă pentru stabilirea debitului total necesar de aer.

- Debitul total necesar de aer (q_{tot})
(debit de aer necesar)
Debitul total necesar de aer este valoarea vizată a debitului necesar de aer q_{soll} , corectată cu coeficientul de corecție K_f necesar pentru determinarea valorii estimate, care rezultă din comparația valorii vizate/reale conform punctului 7.2.3.
- Volumul de aer admis (q_{cur})
(Volumul efectiv de aer proaspăt admis prezent în zona tunelului).

În ceea ce privește sistemele de ventilație semi-transversale și transversale, valoarea volumului de aer proaspăt admis q_{cur} se măsoară direct la unitatea motorului ventilatorului. Pentru ventilația longitudinală, valoarea q_{cur} se poate stabili prin aproximare cu ajutorul vitezei longitudinale a aerului și folosind aria secțiunii transversale.

Debitul necesar de aer diferențial q_{dif} este diferența dintre debitul total necesar de aer q_{tot} și volumul efectiv de aer admis q_{cur} de la ventilația mecanică sau naturală.

Valoarea relevantă rezultă din calculele efectuate la fiecare minut în intervale de șase minute, luând în considerare următoarele condiții:

- În cazul unei valori q_{dif} în creștere, se folosește ultima valoare calculată (valoarea măsurată în ultimul minut)
- În cazul unei valori q_{dif} constante sau descrescătoare, se folosește valoarea medie din toate cele șase minute.

În cazul în care debitul total necesar de aer corectat q_{tot} depășește intervalul maxim de toleranță prestabilit, conform punctului 7.2.1, pentru o perioadă care depășește perioada critică de timp t_{crit} , volumul efectiv de aer admis q_{cur} trebuie ajustat la debitul de aer necesar relevant q_{req} .

Dacă valorile măsurate ale emisiilor depășesc în mod constant intervalul de toleranță stabilit (de ex., din cauza unei defecțiuni a sistemului de control), debitele de aer necesare trebuie setate manual. Trebuie afișată trecerea în modul manual.

7.2.3. Comparație între valoarea vizată și cea reală a debitului de aer necesar

Pentru adaptarea curbilor de control este necesară o comparație a valorii vizate/efective a debitului de aer necesar.

Pentru efectuarea acestei comparații, analiza concentrațiilor de monoxid de carbon CO și a opacității prezente în sectorul de ventilație se măsoară fiecare de două ori. Valoarea mai mare rezultată a concentrației de CO și a opacității se folosește pentru calculul necesarului de aer. Valoarea mai mare a necesarului de aer este comparată cu debitul total necesar de aer relevant q_{req} . Această analiză comparativă trebuie efectuată în următoarele condiții stabilite:

- Se pot folosi valorile pentru comparație numai dacă sistemul de ventilație a funcționat timp de cel puțin șase minute.

Valorile măsurate și calculate ale CO și ale opacității, precum și valorile conexe ale necesarului de aer trebuie integrate în raport cu perioade de timp comparabile de peste 24 de ore (luând în considerare perioada de inactivitate a sistemului). Ulterior, coeficientul de corecție corespunzător pentru valoarea estimată se calculează pe baza diferenței dintre valorile măsurate. Acest coeficient de corecție reprezintă o ajustare a tabelelor de emisii menționate în RVS 09.02.32 la emisia reală a traficului în condițiile unui tunel (de ex., ca urmare a pantelor, prafului, structurii traficului)

$$K_f = \frac{\int_0^{24h} Q_{MESS} dt}{\int_0^{24h} Q_{PREDICTION} dt} \quad (19)$$

Unde:

$Q_{estimat}$ = Max [q_{CO} , q_{Tr}]

Q_{MESS} volumul debitului de aer măsurat în sectorul de ventilație [m^3/s]

K_f coeficient de corecție [-]

q_{CO} , q_{Tr} debitul necesar de aer în conformitate cu RVS 09.02.32, punctele 4.1 și 4.2 pentru fiecare

sector de ventilație, calculat folosind valorile normale ale CO și ale opacității [m^3/s]

- Reglajul trebuie să rămână în intervalul $\pm 10\%$ din valoarea estimată în cauză. Dacă reglajul necesar depășește acest interval (± 10) pe o perioadă lungă de timp, trebuie realizat un raport automat (SCADA). În baza acestei notificări, trebuie reanalizate tabelele cu emisii în conformitate cu RVS 09.02.32 și - dacă este necesar - structura traficului.

7.3. Controlul în funcție de valorile poluării măsurate a aerului

Scopul unui sistem de control a ventilației tunelului este acela de a garanta respectarea valorilor limită de poluare a aerului, pentru a le permite utilizatorilor tunelului să treacă prin tunel fără riscuri. Deoarece valoarea CO și cea a opacității sunt măsurate în mod constant, aceste valori sau acești parametri trebuie utilizați ca bază pentru controlul sistemului de ventilație. Aceste valori ale poluării aerului includ în mod inerent toate influențele generate de condițiile de trafic și de mediu, cum ar fi volumul traficului, nivelurile diferite ale emisiilor tuturor vehiculelor, diferențele de contaminare a aerului din cauza pantelor ascendente și descendente și a prafului din tunel, precum și influențele meteorologice. Valorile poluării aerului reprezintă rezultatul tuturor influențelor menționate anterior.

Această metodă de control (a se vedea punctul 7.3.1) se recomandă în special pentru tunelurile lungi, în special pentru cele cu trafic bidirecțional care au în mod normal ventilație transversală și extracția a aerului evacuat, deoarece răspunde la valorile de poluare a aerului și la influențele mediului care variază în mod constant.

Setarea optimă a componentelor individuale ale sistemului de control, precum și întreținerea profesională a dispozitivelor de monitorizare a poluării aerului sunt esențiale pentru a garanta funcționarea optimă economică a sistemului de ventilație al tunelului.

7.3.1. Descrierea sistemului de control

Trebuie garantată respectarea valorilor setate privind CO și opacitatea indiferent de volumul traficului. Acest obiectiv trebuie atins prin utilizarea unor componente de control adecvate (de ex., prin intermediul unui dispozitiv de control diferențial integral proporțional sau PID). Pentru fiecare parametru individual de poluare a aerului și sector de ventilație, trebuie prevăzut un dispozitiv de control care funcționează independent. Parametrii de control (de ex., constanta timpului) trebuie reglați în funcție de inerția sistemului din sectorul de ventilație aferent.

Valoarea setată pentru calitatea aerului este prestabilită pentru fiecare dispozitiv de control. Dispozitivul de control recepționează în mod constant valorile poluării aerului ca valori reale (adică valorile maxime ale tuturor valorilor măsurate într-un sector de ventilație pentru CO și opacitate). Dispozitivul de control compară valoarea reală cu valoarea vizată. Diferența rezultată este definită ca abatere de control. Dacă există o abatere pozitivă de control, adică dacă valoarea reală depășește valoarea setată, începe să curgă timpul de întârziere al comutării (maxim 2 minute). După această întârziere, ventilația sectorului respectiv este pusă în funcțiune, de exemplu 20% din puterea de ventilație. În funcție de evoluția abaterii de control, dispozitivul de control reglează admisă de aer. Dispozitivul de control mărește volumul de aer admis atât timp cât abaterea de control este pozitivă. Dacă abaterea de control scade și atinge valoarea zero, aerul admis rămâne constant (stabilitate între cantitatea de poluare admisă și cea rezultată). Dacă abaterea de control devine negativă, dispozitivul de control reduce puterea de ventilație până la oprirea sistemului de ventilație. Prin urmare, o abatere pozitivă de control generează o creștere a puterii de ventilație, iar o abatere negativă de control generează o reducere a acesteia. Valoarea totală a abaterii de control stabilește viteza de funcționare a dispozitivului de control. În mod normal, se utilizează un tip de dispozitiv de control PID. Elementul diferențial (D) al dispozitivului de control garantează un răspuns adecvat la schimbările bruște ale abaterii de control.

7.3.2. Parametri de control

Trebuie setați următorii parametri de control în timpul exploatarei:

- Întârziere de pornire: 2 minute
- Punct de oprire pentru aerul minim admis de către ventilatoarele cu debit axial: 20% (exemplu)
- Proporția P: amplificarea controlului (termen proporțional)
- Proporția I: termen integral
- Proporția D: constantă de timp diferențial (factor)

Parametrii de control menționați mai sus trebuie stabiliți în mod specific pentru fiecare proiect în parte. Aceștia trebuie ajustați de către personalul autorizat al centrului de comandă al tunelului și trebuie să fie transferabili către dispozitivul de control (SCADA) corespunzător de la fața locului.

7.4 Reglementări specifice legate de funcționare

Fiecare schimbare a modului de funcționare trebuie indicată în mod clar în toate unitățile de comandă (centre de operare). În mod similar, la fiecare nivel de comandă, trebuie clar indicată responsabilitatea de supraveghere corespunzătoare.

7.4.1. Mod de control automat

Mod de control automat în timpul exploatării normale

Funcționare normală înseamnă, practic, controlul automat al sistemului de ventilație, luând în considerare parametrii și condițiile de control descrise în punctul 7.1. Sistemul de ventilație trebuie să fie controlat în conformitate cu principiile eficienței economice și să asigure o calitate consecventă. Toate dispozitivele interconectate, precum și toate dispozitivele de protecție a instalațiilor și echipamentelor sunt active.

Mod de control semi-automat

Modul de control semi-automat funcționează în principal conform descrierii de la punctul 7.4.1.1 și permite posibilitatea modificării valorilor setate pentru unul sau mai multe sectoare de ventilație fără a întrerupe controlul automat în celelalte sectoare de ventilație.

Control automat în caz de incendiu

În caz de incendiu, controlul automat trebuie să asigure extracția concentrată a tuturor gazelor de fum prezente în tunel pe baza parametrilor disponibili și a valorilor măsurate ale tronsonului de tunel în cauză. Trebuie acordată o atenție deosebită să nu se deterioreze nici un strat de fum prin ventilare, pe cât posibil. În timpul unui incendiu, se suspendă toți senzorii de protecție a ventilatorului cu excepția celor de monitorizare a vibrațiilor și a debitului (dacă există), precum și monitorizarea aprovizionării maxime cu energie. În plus, în caz de incendiu, sistemul de control trebuie să permită reglaje manuale (de ex., deschiderea altor clapete pentru extracția aerului) fără a întrerupe modul de control automat. De asemenea, nu trebuie să ajungă fum în căile de urgență și de evacuare. În măsura în care acest lucru este posibil, trebuie luate în considerare perturbațiile de flux care pot fi cauzate, de exemplu, de ușile de evacuare deschise. Controlul ventilației în caz de incendiu are întâietate asupra tuturor celorlalte moduri de control al ventilației, cu excepția modului de control utilizat pentru inspecție.

7.4.2. Operare manuală

În timpul operării manuale, se mențin setările efective ale controlului automat până când trebuie modificată setarea manuală. Toate sistemele interconectate care servesc la protejarea echipamentelor și a întregii structuri rămân active. În cazul unei alarme de incendiu, controlul manual este oprit automat. Nivelurile diferite de control manual urmează ierarhia sau sistemele interconectate descrise mai jos, începând de la cel mai înalt nivel:

- Local
- Stație de control operare
- Centru de control de supraveghere și altele

7.4.3. Control în timpul lucrărilor de întreținere

În timpul lucrărilor de întreținere, toți parametrii de măsurare și control ai galeriei tunelului sau ai sectorului de ventilație specific în cauză sunt setați la valori constante care asigură o calitate suficientă a aerului pentru personalul care efectuează lucrări de întreținere și inspecție (de ex. la sistemul de alarmă de incendiu). Valorile limită aferente care trebuie stabilite se aleg în conformitate cu reglementările privind protecția angajaților.

7.4.4. Modul de funcționare în timpul reparării și al inspecției sistemului de ventilație

În acest mod de funcționare, se suspendă toate activitățile de monitorizare și control automat aferente componentelor afectate ale sistemului de ventilație. Selectarea acestui mod de funcționare este permisă numai atunci când se efectuează lucrări de reparație și inspecție asupra componentelor sistemului de ventilație. În plus, acest mod are cea mai mare prioritate și nu trebuie suspendat automat, chiar în caz de alarmă de incendiu.

7.5. Reglementări speciale referitoare la sistem

Pentru a garanta funcționalitatea constantă a pieselor mecanice mobile (de ex., clapete pentru extracția

aerului, ventilatoare), trebuie să fie prevăzute unități speciale de control care permit controlul automat al funcționalității. În caz de incendiu, viteza longitudinală vizată a aerului din tunel trebuie atinsă de la momentul aprinderii incendiului în 5 minute pentru sistemele de ventilație longitudinală și în 10 minute pentru sistemele de ventilație transversală, și trebuie menținută ulterior.

Amplasarea pasajelor transversale pentru vehicule (uși deschise) trebuie luată în considerare în special la proiectarea software-ului pentru modul de incendiu, a monitorizării vitezei corespunzătoare a aerului și la proiectarea modalității de intervenție în caz de urgență.

7.5.1. Ventilația longitudinală în tuneluri cu trafic unidirecțional

În condiții normale de funcționare, fluxul de aer produs de ventilatoarele cu jet trebuie să fie direcționat în direcția traficului. Viteza longitudinală a aerului care trebuie atinsă în caz de incendiu este de 1,5 m/s până la 2 m/s. Aceste valori nu includ toleranțele de măsurare.

Activarea ventilatoarelor cu jet trebuie inițiată mai întâi din portal (în modul de aspirație). În funcție de locul incendiului, se poate utiliza și modul sub presiune. Căile de evacuare trebuie ferite de fum (incendiu în direcția de deplasare a vehiculelor după ultima cale de evacuare). În celălalt tunel, debitul de aer trebuie inversat și trebuie generată presiune pozitivă în raport cu tunelul afectat prin măsuri adecvate de control al ventilației.

7.5.2. Ventilația longitudinală în tuneluri cu trafic bidirecțional

În condiții normale, trebuie luate în considerare următoarele criterii:

- Condiții de mediu (construcție, alte condiții)
- Direcția principală a traficului (primar)
- Fluxul natural de aer predominant prezent în tunel
- Direcția preferată a ventilatorului cu jet (nivel de eficiență)
- Modificări ușoare ale direcției principale de trafic sau ale fluxului natural de aer nu trebuie să schimbe direcției de admisie a aerului de la ventilatoarele cu jet.

În caz de incendiu, ventilația trebuie controlată conform descrierii de mai jos:

- Pentru a menține căile de evacuare fără fum cât mai mult timp posibil, viteza optimă a fluxului de aer este de 1,0 m/s până la 1,5 m/s. Intervalul de valori vizat indicat nu include toleranțe de măsurare.
- Trebuie menținută direcția fluxului de aer predominant la momentul detectării incidentului.
- Sunt permise modificările de direcție a fluxului de aer, ca excepție pentru situația în care acest lucru ar contribui la reducerea la minim a pericolului pentru utilizatorii tunelului. Optimizarea posibilă trebuie realizată pe baza vitezei longitudinale a aerului.
- De preferat, ventilatoarele trebuie puse în funcțiune generând presiune în direcția aerului ventilat, începând de la portal.

Trebuie luate în considerare următoarele criterii la activarea sistemului în caz de incendiu:

- Locul sursei incendiului
- Numărul de vehicule din tunel, viteza și direcția de deplasare
- Direcția fluxului de aer în momentul aprinderii focului
- Locul și direcția principală de funcționare a ventilatoarelor

7.5.3. Sisteme de ventilație semi-transversale și transversale

În condiții normale de funcționare, trebuie luați în considerare următorii factori:

- Condițiile de mediu
- Condițiile structurii tunelului

În sistemele de ventilație semi-transversale și transversale, admisia de aer se realizează prin portaluri, iar aerul evacuat este extras prin tubulatură corespunzătoare.

În caz de incendiu, sistemul de ventilație semi-transversal și transversal trebuie controlat astfel încât să extragă fumul din zona sursei incendiului. Ventilatoarele de evacuare trebuie reglate la nivelul maxim de aspirație, iar clapetele pentru extracția aerului trebuie reglate conform descrierii de la punctul 5.3. Dacă există mai multe sectoare de ventilație, controlul sectoarelor de ventilație învecinate trebuie efectuat astfel încât aerul să curgă din ambele părți spre zona de incendiu. În tunelurile unidirecționale,

volumele de aer prezente în tunel trebuie distribuite astfel încât viteza fluxului de aer care vine de la intrarea în tunel să fie mai mare decât cea care vine din direcția opusă. Viteza fluxului de aer (în amonte de sursa incendiului) în direcția traficului nu trebuie să fie sub 1,2 m/s. Pentru traficul bidirecțional, trebuie asigurată o viteză minimă a fluxului de aer de 1,2 m/s și trebuie să se vizeze un flux de aer echilibrat din ambele părți (în cazul secțiunilor transversale mai mari, ar putea fi necesar un volum mai mare de aer extras). Ratele de scurgere dintre dispozitivul de măsurare și sursa de incendiu trebuie luate în considerare folosind un coeficient de corecție în trepte (în sectoare de aproximativ 500 m).

Pereții de separare din conductele dintre sectoarele de ventilație trebuie proiectați astfel încât să poată fi deschiși, dacă este necesar, pentru a susține ventilația (o secțiune transversală maximă posibilă a deschiderii).

7.5.4. Punctele de extracție a aerului

Este analogă sistemelor de ventilație semi-transversale.

7.5.5. Sisteme de ventilație combinate

În tunelurile cu sisteme de ventilație combinate, trebuie elaborate programe speciale de control care întrunesc cerințele de control menționate mai sus.

7.5.6. Ventilarea galeriilor

Pentru galerii, în mod normal nu este necesară ventilația mecanică (observație: galeriile au deschideri în peretele lateral sau în plafon, permițând un schimb de aer).

Galeriile adiacente tunelurilor trebuie luate în considerare în schema de control a ventilației tunelului. În plus, trebuie luată în considerare asigurarea unui număr suficient de căi de evacuare care să permită auto-salvarea. Dacă este necesar, trebuie prevăzute căi suplimentare de evacuare.

7.6. Pasaje transversale și ieșiri

Sistemul de ventilație trebuie proiectat astfel încât, în caz de incendiu, aerul din ușa de evacuare a pasajului de traversare și a căii de evacuare deschise în direcția de evacuare să circule spre tubul în care se află incendiul. Trebuie respectate forțele de deschidere maxim permise (în conformitate cu AND 623), luând în calcul inerția sistemului.

7.7. Proiectarea portalurilor tunelurilor

Dacă portalurile sunt situate unul lângă celălalt, trebuie acordată atenție să nu se blocheze fluxul de aer. În funcție de condițiile topografice și meteorologice, portalurile trebuie separate între ele sau pereții de separare trebuie să aibă o lungime de aproximativ 30 m și o înălțime egală cu cea a portalurilor.

8. Teste antiincendiu

8.1 Note generale

În tunelele cu sisteme mecanice de ventilație, trebuie efectuate teste antiincendiu. În ceea ce privește tunelele fără ventilație mecanică, este posibil să fie necesare teste antiincendiu conform prevederilor legale.

8.2 Teste antiincendiu

Trebuie efectuate teste antiincendiu pentru a obține rezultate reprezentative privind performanțele de extracție a fumului ale sistemelor de ventilație semi-transversale și transversale, precum și privind propagarea fumului în tunelurile cu sisteme de ventilație longitudinală. Testele antiincendiu trebuie efectuate înainte de deschiderea unui tunel pentru traficul public (test la darea în exploatare).

Pentru a anticipa performanța sistemului de ventilație în condiții de incendiu, se pot realiza următoarele analize de dinamică a fluidelor asistată de calculator (CFD):

1- Analiza CFD pentru Condiții de Test. Modelul CFD va fi verificat prin compararea rezultatelor testelor reale.

2- Analiza CFD pentru Scenariul de incendiu. Capacitatea sistemului de ventilație a tunelului va fi confirmată prin efectuarea unei analize CFD în funcție de scenariul de incendiu acceptat (rata de degajare a căldurii 30-50 MW, locația incendiului, parametrii de proiectare etc.).

Testele antiincendiu servesc următoarele scopuri:

- Testarea funcționalității echipamentelor de siguranță în caz de incendiu.

- Testarea și, după caz, reglarea funcțiilor sistemului de intervenție în caz de incendiu în funcție de rezultatele testării.
- Familiarizarea serviciilor profesionale de urgență și a personalului care operează tunelul cu situațiile posibile de incendiu.

Testele antiincendiu se efectuează pe baza următoarelor elemente:

- Două bazine plate din oțel, având fiecare o suprafață de bază de 1 m², umplute fiecare cu 20 l de motorină și 5 l de benzină și fixate la o înălțime de 50 cm-80 cm. Dimensiune nominală a focarului aprox.: ca. 3,5 MW.
- Bazinele din oțel sunt așezate unul lângă celălalt.
- Locul incendiului: inginerul proiectant al ventilației stabilește locul testului antiincendiu. Testul trebuie efectuat într-un loc nefavorabil din punctul de vedere al ventilației.

Rezultatul testului antiincendiu trebuie notat într-un raport scris.

Trebuie să se instaleze scuturi concepute corespunzător pentru protecția structurii învecinate (parte carosabilă, tavan etc.).

Testele antiincendiu trebuie efectuate în mod regulat pentru a garanta funcționarea corectă a sistemului de ventilație în caz de incendiu și pentru a înțelege mai bine capacitatea sistemului de control al ventilației de intervenție în caz de incendiu.

8.3 Studii privind parametrii

În tunelurile cu condiții structurale complexe (căi de acces și de ieșire în tunel, modificări semnificative ale secțiunii transversale etc.) și pentru a ține cont de sarcina calorifică mare din timpul unui incendiu, se pot efectua calcule numerice în plus față de testele antiincendiu. Pentru aceste condiții, se poate folosi doar un software validat.

9 Referințe

Directiva 2004/54/CE a Parlamentului European și a Consiliului din 29 aprilie 2004 privind cerințele minime de siguranță aplicabile tunelelor din Rețeaua Rutieră Transeuropeană

Legea nr.277/2007 Legea privind cerințele minime de siguranță pentru tunelele situate pe secțiunile naționale ale rețelei rutiere transeuropene.

AND 621/2025 Model de analiză a riscurilor privind tunelele rutiere

AND 622/2025 Echipamente structurale de operare și de siguranță pentru tunele rutiere

AND 623/2025 Echipamente pentru dotarea tunelelor rutiere

RVS 09.02.32/2020 Sisteme de ventilație. Calculul necesarului de aer

ISO 2533 Atmosferă standard

SR EN 60034-5 Mașini electrice rotative. Partea 5: Grade de protecție asigurate prin proiectarea completă a mașinilor electrice rotative (Cod IP). Clasificare

SR EN 60034-18 Mașini electrice rotative. Partea 18-31: Evaluare funcțională a sistemelor de izolație. Proceduri de încercare pentru înfășurări performante. Evaluarea termică și clasificarea sistemelor de izolație utilizate în mașinile electrice rotative

VDI: Wärmeatlas. Hrsg. VDI e.V. Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC). 11. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2013