Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 98 (1980)
Heft: 36: Der Gotthard-Strassentunnel

Artikel: Le système de gestion de la ventilation
Autor: Thiéry, Jean-Paul
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-74192

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 24.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Le système de gestion de la ventilation

par Jean-Paul Thiéry, Locarno

Introduction

Lors de la conception du projet du tunnel du Saint-Gothard, les problèmes posés par la ventilation ont été à la base de nombreux choix décisifs pour la construction (choix du tracé, de la position des puits, du dimensionnement des profils du tunnel et des puits, de la disposition des centrales de ventilation, etc.). Lors de l'exploitation du tunnel, les conditions de sécurité et de confort pour les usagers dépendront pour une grande part du fonctionnement de l'installation de ventilation.

Afin de garantir au maximum la sécurité des usagers et aussi de l'installation, le système de commande de la ventilation a été conçu de manière à consentir une grande flexibilité d'exploitation permettant de s'adapter à toutes les circonstances possibles.

Trois niveaux principaux de commande peuvent être distingués:

- La *commande centralisée de toute l'installation:* la gestion de toute l'installation est assurée par un programme spécial activé par un ordinateur de processus
- La *commande à automatisme local:* à chaque couple de ventilateurs (air frais/air vicié) est attribué le contrôle automatique d'un tronçon de ventilation: un système de régulation propre adapte les débits des deux ventilateurs aux besoins requis par l'évolution de l'atmosphère du tronçon associé.
- La *commande manuelle de chaque élément:* chaque élément (ventilateur, by-pass) peut être manœuvré singulièrement, c'est-à-dire indépendamment des autres.

Le niveau normal d'utilisation est celui à commande centralisée, car il permet l'exploitation optimale de tous les éléments de l'installation. Les deux autres niveaux interviennent comme réserve en cas de défaillance dans le fonctionnement du système à commande centralisée.

L'exposé suivant se réfère au système à commande centralisée et se propose de décrire brièvement en premier lieu le système de ventilation, puis le modèle mathématique utilisé pour étudier le comportement du système et enfin le programme de gestion mis en œuvre sur l'ordinateur de processus. Ce programme de gestion de la ventilation a pour but de déterminer le mode de fonctionnement de l'installation de ventilation sur la base des objectifs fixés et en respectant les contraintes imposées. Il dispose pour cela des informations qui lui sont transmises et des ressources du système.

Description du système de gestion de la ventilation

On peut décrire le système de gestion de la ventilation en considérant les objectifs, l'environnement, les ressources et les composants du système.

Les objectifs

Le but posé au système de gestion de la ventilation est d'atteindre les objectifs fixés pour l'installation de ventilation de la manière la plus sûre, la plus rationnelle et la plus économique. Nous distinguerons d'abord les objectifs du système de ventilation et les objectifs du système de gestion pour ensuite les associer dans la définition des mesures de performance.

Les objectifs du système de ventilation

Le but posé au fonctionnement de l'installation de ventilation est de permettre aux usagers de trouver dans le tunnel les meilleures conditions de sécurité et de confort possibles. Cet objectif peut ainsi se décomposer:

a) permettre aux usagers de traverser le tunnel dans des conditions d'atmosphère admissibles (pour toutes les conditions de trafic: normal et congestionné)
b) permettre la réalisation de conditions de travail admissibles pour le personnel d'exploitation dans le tunnel (par exemple en cas de travaux dans le tunnel)
c) permettre le «sauvetage» des usagers en cas de catastrophe (incendie) en favorisant d'une part la survie des usagers (atmosphère respirable) et d'autre part le travail des services de secours

Les conditions énoncées ci-dessus se rapportent pour les paragraphes a) et b) à la pureté de l'air, à la visibilité et à la sensation de confort.

Examinons-les plus en détail:

- la *pureté de l'air* se mesure par la teneur en monoxyde de carbone CO. Des valeurs limites (en ppm) sont fixées selon les conditions de trafic et d'exploitation
- la *visibilité* dépend de l'émission de particules étrangères provenant des moteurs à combustion de type Diesel et de l'usure des pneus. Elle dépend aussi des conditions d'illumination et peut être contrariée par la formation de brouillard. Elle est représentée par la mesure de l'opacité (en mg/m³)
- la *sensation de confort* dépend de la température et de l'humidité dans le tunnel. On considère aussi la vitesse longitudinale de l'air qui influe d'une part sur le «guidage» des véhicules et d'autre part sur la sensation de chaleur

Pour la condition du paragraphe c), c'est-à-dire *d'incendie,* les recherches effectuées jusqu'à présent ont montré que l'objectif à atteindre est:

- d'empêcher la formation d'un courant d'air longitudinal sur le lieu de l'incendie afin d'éviter la propagation et la dispersion des fumées
- d'aspirer le plus rapidement et complètement possible les fumées dans les canaux d'air vicié situés dans la calotte du tunnel
- de maintenir la partie inférieure du tunnel libre de fumées.

Les objectifs du système de gestion de la ventilation

Le système de gestion de la ventilation doit permettre d'atteindre les objectifs précédents d'une manière sûre, économique et rationnelle.

- *d'une manière sûre:* cela implique que toutes les situations possibles doivent être envisagées et qu'à chacune d'elles doit correspondre une solution satisfaisant aux critères requis.
- *d'une manière économique:* c'est là un aspect important du système qui introduit un critère d'optimisation dans la recherche des solutions. C'est cet aspect économique qui constitue une des raisons de la supériorité du système à commande centralisée sur le système à commande locale. Prenant en compte tous les éléments de l'installation, il permet la recherche d'une solution économiquement optimale.
- *d'une manière rationelle:* le système de gestion doit être construit de telle façon qu'un contrôle de son fonctionnement soit possible afin de permettre d'éventuelles adaptations. Cela implique une construction structurée et modulaire du programme de gestion permettant de maintenir une vision claire de l'ensemble. Cela implique aussi l'introduction de paramètres de contrôle indiquant les déviations par rapport aux objectifs fixés, facilitant ainsi une révision du système.

Les mesures de performance du système de gestion

Nous pouvons résumer ce qui précède en établissant les mesures de performance suivantes:

a) pour les cas d'exploitation autres que le cas d'incendie

- la *concentration en oxyde de carbone* sera maintenue en dessous des limites suivantes:
  - trafic normal: 100 à 150 ppm selon l'intensité du trafic
  - trafic congestionné: 250 ppm
  - travaux dans le tunnel: 50 ppm.
- la valeur de *l'opacité* sera maintenue en dessous des limites suivantes:
  - trafic normal: 2 à 4 mg/m³ selon l'intensité du trafic
  - trafic congestionné: 8 mg/m³.
- la valeur de *la vitesse longitudinale du courant d'air* dans le tunnel à ne pas dépasser est fixée à 8 m/s.
- *l'énergie de ventilation* dépensée (en kWh) devra être la plus faible possible, c'est-à-dire que la puissance totale instantanée devra être minimale.

b) en cas d'incendie

- la *vitesse longitudinale sur le lieu de l'incendie* devra être la plus faible possible
- les *fumées* devront être aspirées le plus rapidement et complètement possible.

L'environnement du système

Il s'agit des contraintes du système qui se composent principalement des éléments suivants:

- *les conditions de trafic*. Le trafic détermine la production de CO et l'opacité, ainsi que la vitesse du courant d'air longitudinal par effet de pistonnement des véhicules.
- *les conditions atmosphériques* (pression et température). Elles influent sur le courant d'air longitudinal dans le tunnel. L'effet de tirage dans les puits peut aider ou contrarier le travail des ventilateurs.
- *l'alimentation électrique*. Un défaut dans l'alimentation introduit des restrictions sur l'utilisation des ventilateurs.
- *les conditions de fonctionnement des ventilateurs*. Les ventilateurs sont soumis à certaines contraintes d'exploitation qui doivent être respectées.
- *l'état des installations*. L'installation peut ne pas être complètement intègre (ventilateur en réparation, installation de télétransmission défaillante ...,etc.).

Les ressources du système

Ce sont les moyens dont dispose le système pour accomplir sa tâche. Il s'agit du débit des ventilateurs et de l'ouverture ou de la fermeture des by-pass (les by-pass sont des ouvertures situées dans les centrales au pied des puits qui permettent à l'air du tunnel de s'échapper directement par le canal d'air vicié des puits. Ces by-pass ne peuvent être ouverts que si les ventilateurs d'air vicié correspondants ne fonctionnent pas).

Les composants du système

Ce sont les activités dont la mesure de performance coïncide avec celle du système global. Ont été considérées les activités suivantes:

- *Exploitation d'alarme*. C'est le cas où il se produit un ou plusieurs incendies dans le tunnel. C'est aussi le cas de pointes de trafic accidentelles résultant d'une situation imprévisible (trafic congestionné).
- *Exploitation limite*. Lorsque les ventilateurs sont à la limite de leur capacité. Le trafic limite du tunnel lui-même est alors sur le point d'être atteint.
- *Exploitation perturbée*. Au moins un élément principal de l'installation est défaillant (ventilateur, by-pass, appareils de mesure, station de télétransmission, etc.).
- *Exploitation normale*. Lorsqu'aucun des cas précédents n'est rencontré, on se trouve en exercice normal. Le critère d'économie exposé auparavant est alors pris en considération.

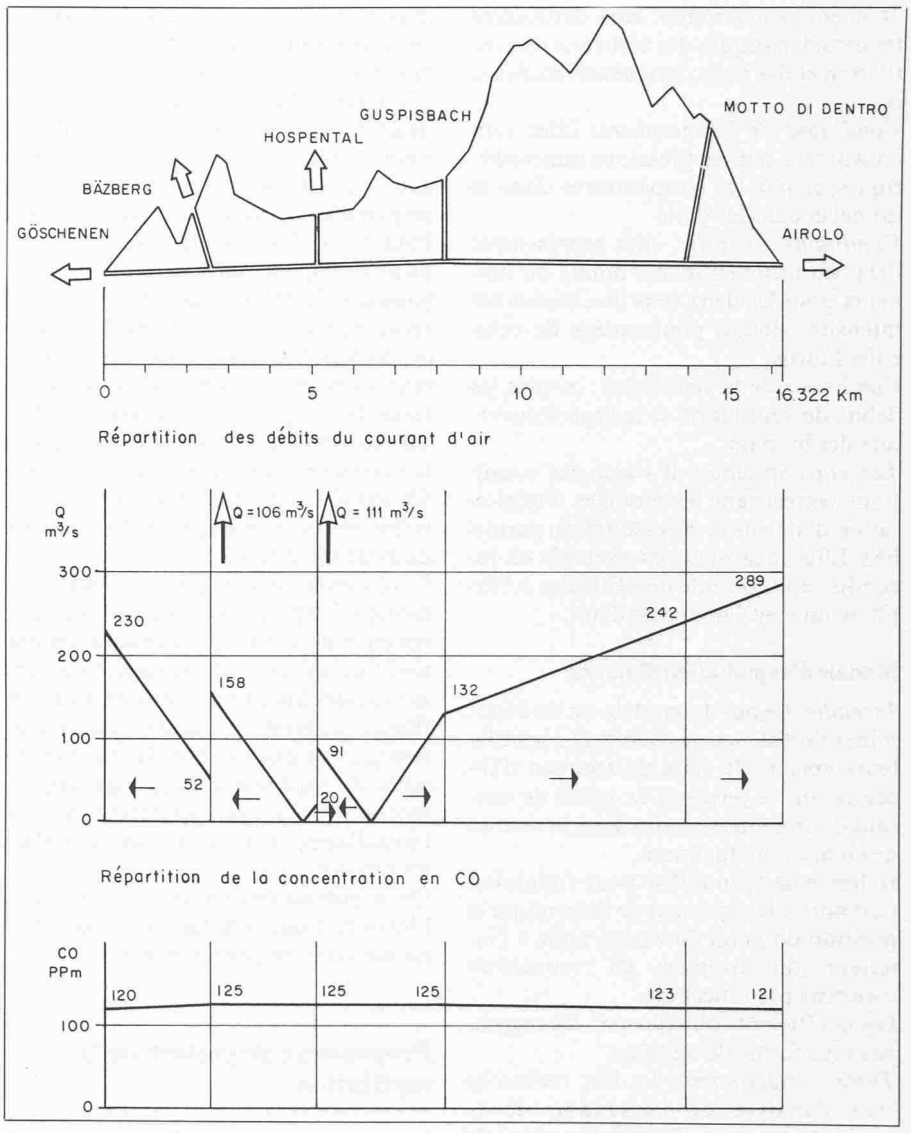

Fig. 1. Exemple de répartition du courant d'air et de la concentration en CO dans le tunnel pour le cas de deux by-pass de puits fermés

Modèles mathématiques du système

Afin de pouvoir étudier le comportement du système, on a construit des modèles mathématiques représentant aussi fidèlement que possible le processus de ventilation. Le but en était d'étudier les relations entre les variables d'entrée et de sortie et, plus particulièrement, de déterminer l'influence de variations des valeurs d'entrée sur les signaux de sortie. Les résultats obtenus ont ensuite été utilisés par le programme de gestion.

Ces modèles ont été établis sur une base déterministe à partir des relations physiques existant entre les variables. Ils ont été développés sur des ordinateurs IBM 1130 puis VAX 11/780 du *Centro di Calcolo Elettronicco (CCE) à Locarno*.

Nous examinerons d'abord les variables d'entrée intervenant dans les modèles et ferons ensuite une brève description des modèles d'exploitation d'alarme, d'exploitation perturbée et d'exploitation normale

Variables d'entrée

Plus de *200 variables d'entrée* ont permis de définir le processus. Ces variables concernent les données géométriques, les conditions de l'atmosphère, du trafic, de la ventilation et les états spéciaux.

Données géométriques: elles définissent les caractéristiques des tronçons de ventilation et des puits: longueurs, sections, etc.
Conditions de l'atmosphère: Elles sont constituées par les pressions atmosphériques et par les températures dans le tunnel et dans les puits
Conditions du trafic: elles représentent l'état du trafic en divers points du tunnel et pour les deux sens de circulation: intensité, vitesse, pourcentage de véhicules lourds.
Conditions de la ventilation: ce sont les débits de ventilation et le type d'ouverture des by-pass.
Les états spéciaux: il s'agit des conditions concernant les modèles d'exploitation d'alarme et d'exploitation perturbée. Elles localisent par exemple un incendie, une colonne de véhicules à l'arrêt ou un ventilateur défaillant.

Modèle d'exploitation d'alarme

Incendie. Le but du modèle est de déterminer l'influence des débits des ventilateurs voisins de ceux du tronçon d'incendie sur la position du point de courant d'air à vitesse nulle dans la section de circulation du tunnel.
Il dérive de celui utilisé pour l'exploitation normale et permet de déterminer la position du point de vitesse nulle à l'intérieur du tronçon de ventilation concerné par l'incendie.
Les coefficients obtenus ont été regroupés sous forme de matrices.
Trafic congestionné. Le but recherché était l'analyse de l'évolution de la concentration en CO en fonction du temps, de la position de la colonne de véhicules, de l'intensité du trafic et des conditions de ventilation. Les résultats obtenus ont permis de définir la stratégie à adopter en cas de formation d'une colonne de véhicules à l'arrêt. Le principe en est de créer sur le lieu de la colonne un courant d'air longitudinal suffisamment important.

Modèle d'exploitation perturbée

Le but en était la recherche des mesures à adopter en cas de défaillance d'éléments de l'installation et plus particulièrement en cas de ventilateurs hors service.
Etant donné le grand nombre de combinaisons possibles, le modèle a été volontairement limité au cas d'un seul ventilateur hors service.

Modèle d'exploitation normale

Ce modèle permet de déterminer pour chaque état du système la concentration en CO, l'opacité et la vitesse de l'air en chaque point de mesure du tunnel.
La figure 1 représente un exemple des résultats obtenus. L'étude du modèle a fait apparaître en premier lieu que le nombre de cas possibles de répartition de l'air dans la section de circulation du tunnel avec un ou plusieurs by-pass ouverts se réduisait à moins d'un tiers du nombre des cas théoriques (14, resp. 57). Les résultats obtenus ont permis de déterminer l'influence de chaque variable d'entrée sur le processus. On a ainsi pu distinguer un lot de variables principales à influence prédominante. Pour les différents états des variables principales, il fut ensuite possible de déterminer l'influence de chacun des 22 ventilateurs sur les variables de référence, c'est-à-dire sur les variables mesurant les objectifs fixés (CO, opacité, vitesse de l'air). Chaque coefficient d'influence obtenu représente l'influence de la variation d'un ventilateur sur une des 55 variables de référence. Ces coefficients ont été regroupés en des matrices de dimension 55×22.
L'introduction du facteur de coût représentant l'aspect économique s'est opérée en déterminant pour chaque ventilateur l'influence d'une variation de débit sur la puissance totale utilisée. Cette influence dépend entre autres des caractéristiques de chaque ventilateur, notamment du rendement du groupe ventilateur-moteur et des caractéristiques de l'installation (coefficients de perte dans les canaux, etc.)
On a obtenu des courbes représentant l'influence des ventilateurs voisins permettant de compenser le déficit d'air.

Programme de gestion de la ventilation

Le but du programme de ventilation est d'élaborer, à partir des informations représentant l'état du processus, le mode de fonctionnement des ventilateurs et des by-pass de manière à respecter les objectifs fixés et les contraintes imposées. Ce programme sera activé à intervalles réguliers par un ordinateur de processus.

L'ordinateur de processus

L'ordinateur de processus de type DIGITAL PDP 11/34 est équipé du système d'exploitation en temps réel DEC RSX-11M. La capacité de mémoire centrale à disposition pour le programme de gestion est de 24 k-mots.
Le programme étant chargé selon une structure à segments de recouvrement (overlay), la capacité maximale correspond à la dimension de la plus grande branche de l'arbre de structure.
Le langage de programmation utilisé est FORTRAN version IV plus. La mémoire périphérique est constituée de quatre unités de disques RK05 pour une capacité totale de dix mégabytes.
Outre le programme de gestion de la ventilation, l'ordinateur active divers programmes de statistiques et de liaison, en particulier avec l'ordinateur de gestion du trafic.

Les variables d'entrée

Les variables d'entrée sont transmises à l'ordinateur de processus par l'ordinateur de gestion de l'installation de télétransmission. Les informations reçues à traiter, en nombre supérieur à 900, concernent l'atmosphère du tunnel, le trafic, le matériel de ventilation et les appareils de surveillance.

Mesures de l'atmosphère du tunnel

- Mesures de la concentration en *CO* (vingt-neuf points de mesure): les appareils sont situés aux extrémités des sections de ventilation. Des appareils intermédiaires supplémentaires sont prévus de manière à ce que la distance maximale entre deux appareils n'excède pas 1000 m.
- Mesure de l'opacité (onze points de mesure): les appareils sont normalement situés au milieu de chaque section de ventilation.
- Mesure de la vitesse longitudinale dans le tunnel (quinze points de mesure): les anémomètres se trouvent aux extrémités de chaque section de ventilation.
- Mesure de la température (vingt-deux valeurs): la température est relevée à l'endroit des centrales et dans les puits.
- Mesure de la pression atmosphérique: elle est enregistrée à chaque portail.

Mesures du trafic

quarante-huit valeurs permettent d'identifier pour chaque voie l'intensité du trafic, la vitesse, la répartition des véhicules (légers/lourds), en différents points du tunnel ainsi qu'au sud et au nord (*Varenzo* et *Amsteg*).

Mesures concernant le matériel de ventilation

Il s'agit des mesures de fonctionnement des ventilateurs et des by-pass.

- Mesures des débits effectifs et à atteindre.
- Mesures de certaines caractéristiques (pression, angle des pales, régime de fonctionnement, puissance consommée).
- Mesures concernant l'alimentation électrique.

Informations de surveillance

Ce sont les informations servant à contrôler l'exécution du processus, à signaler les anomalies concernant le matériel et à signaler les états d'alarme.

- Contrôle de l'exécution du processus. Des signaux d'alarme indiquent le dépassement des valeurs prescrites pour la concentration en CO et l'opacité.
- Informations concernant le matériel. Ce sont des signaux indiquant l'état des divers composants de l'installa-

tion: ventilateurs, by-pass, alimentation électrique, fonctionnement du système de commande, etc.
- États d'alarme. Il s'agit des signaux d'alarme d'incendie et de colonne de véhicules à l'arrêt dans le tunnel.

Toutes ces informations sont à disposition du programme de gestion de la ventilation sous forme numérique.

Le programme de gestion

La structure du programme de gestion dérive de celle du système considéré précédemment au paragraphe «Description du système de gestion de la ventilation». Les éléments principaux en sont l'analyse des données, l'exploitation d'alarme, l'exploitation limite, l'exploitation perturbée, l'exploitation normale, les contrôles et l'élaboration des ordres de sortie, les opérations statistiques (fig. 2).

Analyse des données

L'analyse des données a pour objet l'identification de l'état du processus. Après leur lecture, les données sont soumises à un contrôle de plausibilité et à un éventuel lissage. L'identification du processus advient par une suite de tests portant sur les différents signaux. Selon le résultat de ces tests, l'exécution du programme est dirigée sur l'une des quatre exploitations: alarme, limite, perturbée, normale.

Exploitation d'alarme

Cette exploitation entre en jeu à la suite de l'activation d'un des signaux suivants:
- détecteur d'incendie,
- détecteur de pointes de trafic exceptionnelles.

Dans le cas de l'incendie, le but recherché est d' éviter la formation d'un courant d'air longitudinal sur le lieu de l'incendie.
Dans le cas de la colonne de véhicules, il faut maintenir la concentration en CO et l'opacité en dessous des limites prescrites. Pour ces deux cas, la résolution advient sur la base des résultats obtenus avec le modèle mathématique correspondant, en agissant sur tous les ventilateurs et by-pass. Ce cas d'exploitation prend également en compte les éventuelles défaillances d'un ou plusieurs éléments de l'installation.

Exploitation limite

Lorsque les ventilateurs sont parvenus à la limite de leur capacité et ne sont plus en mesure de respecter les objectifs, un signal est transmis au personnel de surveillance, l'incitant à intervenir afin de réduire le trafic.

Exploitation perturbée

Les défaillances dans l'installation de ventilation sont compensées par les éléments intègres restants, de manière à maintenir le respect des objectifs. Sont concernées les défaillances d'éléments vitaux: ventilateurs, by-pass, alimentation électrique, installation de télétransmission, etc. Une défaillance du calculateur entraîne automatiquement le passage au système de commande à automatisme local.

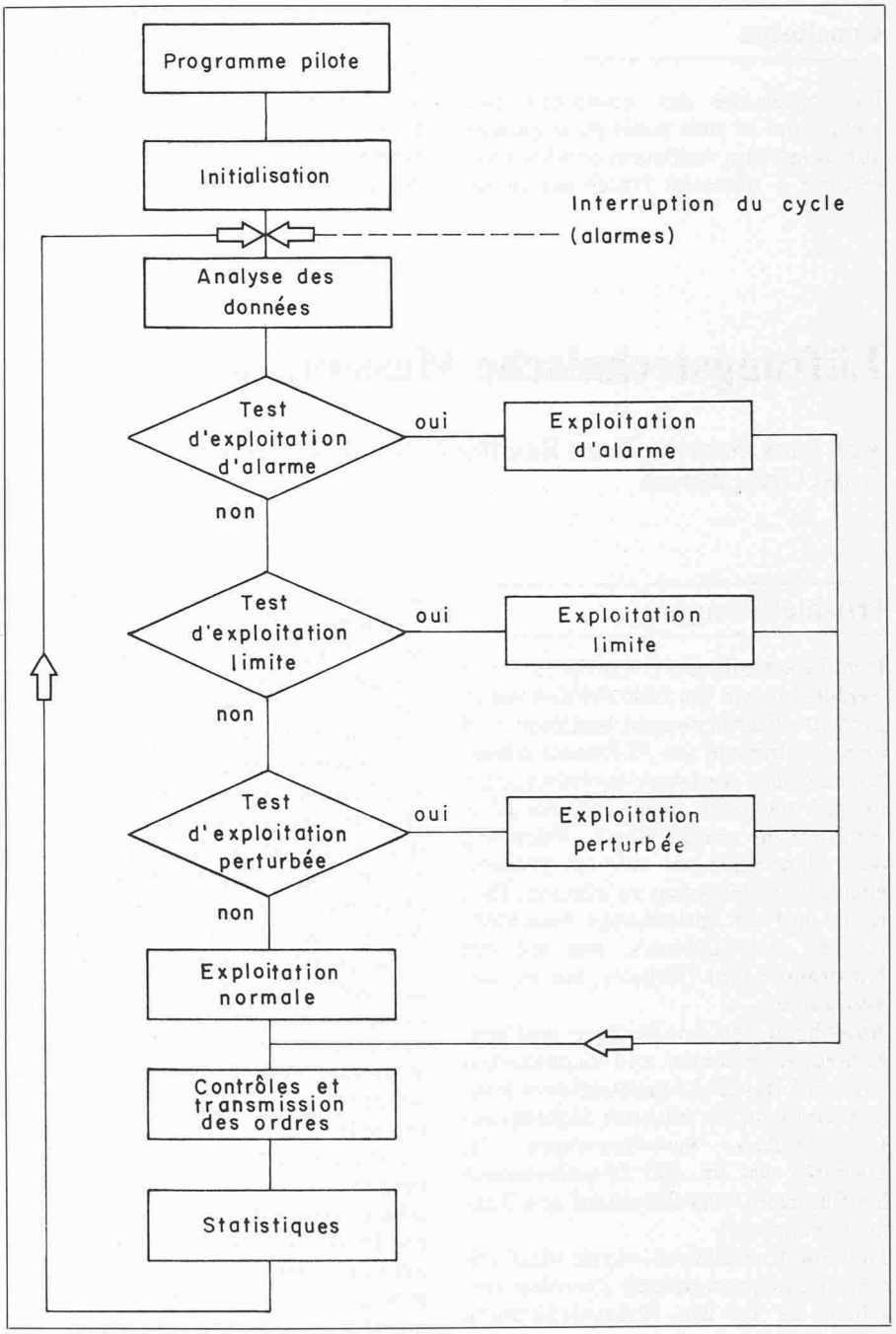

Fig. 2. Schéma du programme de gestion de la ventilation

Exploitation normale

Le but poursuivi est le maintien de la concentration en CO et de l'opacité en dessous des limites fixées de manière économiquement optimale. Le problème d'optimisation a été résolu comme un problème de programmation linéaire selon la méthode du simplexe.
La matrice de base est formée à partir des coefficients d'influence et de coût obtenus avec le modèle mathématique d'exploitation normale. Le critère d'optimisation est représenté par la puissance totale de ventilation.

Contrôles et transmission des ordres de sortie

Il s'agit de contrôles concernant l'exécution du programme. Les ordres sont ensuite élaborés et transmis aux ventilateurs et by-pass par l'intermédiaire de l'ordinateur de télétransmission.

Opérations statistiques

Les données nécessaires permettant de suivre l'évolution du processus sont enregistrées sur des fichiers spéciaux. Grâce à ces données, il sera possible de détecter d'éventuelles anomalies ou déviations par rapport aux objectifs fixés.

Conclusion

La complexité des nombreux problèmes qui se sont posés pour garantir aux usagers les meilleures conditions de sécurité a nécessité l'intervention des techniques les plus modernes. Parmi celles-ci, l'emploi d'un ordinateur de processus pour la gestion de la ventilation permet une utilisation optimale de tous les éléments de l'installation. Le tunnel du Saint-Gothard est ainsi l'un des premiers au monde à être équipé d'un système de gestion de la ventilation à commande centralisée.

Adresse de l'auteur: *J.-P. Thiéry*, ing. dipl., SIA, Bureau d'études Dr ing. G. Lombardi, 6600 Locarno

Lüftungstechnische Messungen

Von Alex Haerter, Hans Baumann, Hans Peter Müller und Ernst Graf, Zürich

Frischluftmengen

Der Frischluftbedarf wurde für eine *Verkehrsmenge von 1800 PWE/h mit 10 Prozent Diesellastwagen* bestimmt und diese Luftmenge *um 30 Prozent erhöht*, um einerseits *stockende Verkehrszustände* und anderseits einen *späteren Richtungsverkehr* (3600 PWE/h, Rückgang der Abgasemission auf 65 Prozent) ebenfalls beherrschen zu können. Dies führte auf die installierten Frischluftmengen von 189 m^3/s, km auf der Nordrampe und 159 m^3/s, km auf der Südrampe.

Ausgehend von den heutigen mittleren Fahrzeugemissionen und zugelassenen CO- und Rauch-Konzentrationen können damit auf der *höchsten Lüftungsstufe stündlich Verkehrsmengen bis 3000 PW und bis 400 Diesellastwagen* bei flüssigem Verkehrsablauf den Tunnel passieren [1].

Die Abluftventilation wurde nicht mit dem dreissigprozentigen Zuschlag versehen, da sie zur Abgasverdünnung nichts beiträgt.

Im Tunnel wird sich bei dichtem Verkehr ein gleichmässiger Verkehrsablauf und entsprechender Abgasanfall einstellen, so dass auch in jeder Tunnelrampe eine *gleichmässige Frischluftverteilung anzustreben* ist. Die damit in die einzelnen Lüftungsabschnitte zu befördernden Frischluftmengen sind aus Tabelle 1 ersichtlich.

Ausmessung der installierten Lüftungsanlage

Die von den Ventilatoren aufzubringenden Drücke zur Beförderung der Solluftmenge mussten im Zeitpunkt der Ventilatorsubmission *vorausberechnet* werden anhand der Baupläne über die Kanal- und Schachtabmessungen und einer Schätzung der Wandrauhigkeit, wie es das Bauverfahren beim Betonieren und Einziehen der Zwischendecke und Trennwände erwarten liess. Die Krümmerverluste und die Impulsbilanzen entlang den Verteil- und Sammelkanälen wurden aufgrund von Modellversuchen bestimmt [2].

Die vom Ventilatorlieferanten mit diesen Volumen-Druckwerten ausgelegten Ventilatoren wurden im verkleinerten Massstab als *Modellventilatoren* hergestellt und beim Hersteller auf die Einhaltung der Garantiewerte hin geprüft. Offen blieb damit noch die Frage, ob in der Anlage selbst die Ventilatoren die verlangten Luftmengen bei den vorgegebenen Leistungen erbringen. *Abweichungen sind zu erwarten*, weil die Kanal- und Schachtquerschnitte sowie die Wandrauhigkeiten und die Impulsgewinne in den Verteil- und Sammelkanälen teilweise anders ausfallen können als angenommen und die Grossausführungen der Ventilatoren etwas anders arbeiten als die Modellventilatoren.

Die Messungen im Bauwerk teilten sich auf in die Bestimmung der Gesamtluftmenge und Ventilatorleistung je Lüftungskanal, und der Mengen- und Druckverläufe längs den Verteil- und Sammelkanälen.

Luftmenge und Ventilatorleistung je Lüftungsabschnitt

In jedem Verteil- und Sammelkanal wurden 50 m ab Ventilator in einer Messebene *30 Gesamtdrucksonden* und *sechs Prandtlsonden* fest eingebaut. Die Lage der Staudrucksonden im Messquerschnitt bestimmt sich nach der *Log-Tschebyschew-Regel*, einem normierten Messverfahren [3], das auch bei ungleichmässiger Geschwindigkeitsverteilung im Vergleich zum Rohrreibungsprofil eine Messgenauigkeit von ±4 Prozent in der Mengenmessung ergibt.

Die Enden der Luftkanäle haben keine Abschlusswand, damit sich bei Druckgradienten längs des Tunnels die Verteilungen ausgleichen können und bei Ausfall eines Ventilators der Lüftungsabschnitt vom andern Ventilator her durchbelüftet werden kann. Im Abnahmeversuch liessen sich nicht alle Ventilatoren gleichzeitig in Betrieb nehmen, im Abschnittsende wurde jeweils eine provisorische Trennwand eingebaut.

In jedem Tunnelabschnitt wurde die maximale Luftmenge gemessen und eine zweite reduzierte Menge, um den Auftriebseinfluss überblicken zu können.

Die aufgenommene Motorleistung wurde mit speziellen Messgeräten ermittelt. Die abgegebene Motorleistung wurde mit der Motorcharakterisitk aus der gemessenen aufgenommenen Leistung ermittelt.

Es liegen alle Messungen des Haupttunnels vor, die Lüftung des Vortunnels wird später ausgemessen. Aus Tab. 1 sind für die neun Lüftungsabschnitte des Haupttunnels die Solluftmengen und die Ventilator-Nennleistungen bei der jeweils höchsten Lüftungsstufe ersichtlich.

Während den Abnahmemessungen waren die Ventilatorlaufschaufeln so eingestellt, dass die Ventilatorleistungen über der Motor-Nennleistung lagen. Diese gemessenen Luftmengen wurden umgerechnet auf jene, die sich bei der Motornennleistung einstellen und sind in Tab. 1 eingetragen.

Die Kapazität der Tunnellüftung liegt also in allen Lüftungsabschnitten um einige Prozent über den Sollwerten. Der Grund ist, dass die Reibungsverluste vorsichtiger angenommen wurden als sie sich nun eingestellt haben, wodurch die Ventilatoren ein grösseres Luftvolumen fördern können.

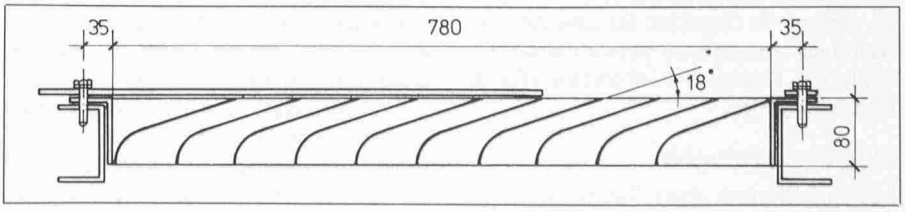

Bild 1. Abluftgitter mit Abdeckplatte und Einbaurahmen