

## Abgasschadstoffe von Dieselmotoren im Tunnelbau

### Bulletin 3: Mehr Luft oder weniger Abgasschadstoffe? Bewetterungsmassnahmen contra Abgasnachbehandlung

#### 1. Problemstellung

Tunnelbaustellen müssen künstlich belüftet werden, um der Verschlechterung der Atemluftqualität durch Sprengschwadern, Gesteinsstaub, Spritzbetonstäube und Abgasschadstoffe von Dieselmotoren zu begegnen. In den 80er Jahren wurde für die Dieselmotoren ein Regel-Belüftungswert von 4 m<sup>3</sup>/kWmin eingeführt, der den damaligen Vorstellungen bezüglich Atemluftqualität entsprach. Mit der Erkenntnis der Kanzerogenitätsgefahr durch Dieselpartikel kehrt diese Problematik jedoch verschärft wieder. Um die heute gültigen Grenzwerte für diese Schadstoffkategorie zu erreichen, wäre eine weitere Steigerung der Belüftung erforderlich, was zu erheblichen Kostensteigerungen führen und in der praktischen Ausführung an vielerlei Grenzen stossen würde. Als Alternative steht die Abgasminderung an den Dieselmotoren zur

#### Editorial

Um die seit 1994 gesetzlich gültigen Grenzwerte für die Atemluft am Arbeitsplatz im Tunnelbau einzuhalten, sind Massnahmen erforderlich, die über das bisher Übliche deutlich hinausgehen. In diesem Bulletin wird gezeigt, dass das Ziel durch Tunnellüftung alleine nicht erreichbar ist. Nur die Minderung des Schadstoffausstosses der im Tunnel betriebenen Diesel-Aggregate ist eine realistische Lösung. Es zeigt sich weiter, dass Massnahmen zur Abgasnachbehandlung bei weitem kostengünstiger sind als die Intensivierung der Tunnellüftung. Die Abgasnachbehandlung ermöglicht es auch, auf zeitraubende Spezialentwicklungen von Untertage-Motoren zu verzichten. Gleichzeitig wird durch die Schadstoffreduktion an der Quelle die in die Umwelt abgegebene Gesamt-Schadstofffracht stark vermindert.

Der Einsatz moderner Motoren und der Abgasnachbehandlung wird es vermutlich erlauben, den Regelwert für die Luftzufuhr von 4 m<sup>3</sup>/kWmin abzusenken.

AUVA, Suva, TBG

VERT steht für Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau. „Realmaschinen“ meint die real im Feld betriebenen Motoren, also nicht Zukunftsentwicklungen. Über die Hintergründe und Ziele des VERT-Projektes informiert VERT-Bulletin 1 vom Juni 1995, über Versuchsergebnisse mit Partikelfiltern VERT-Bulletin 2 vom Dezember 1995.

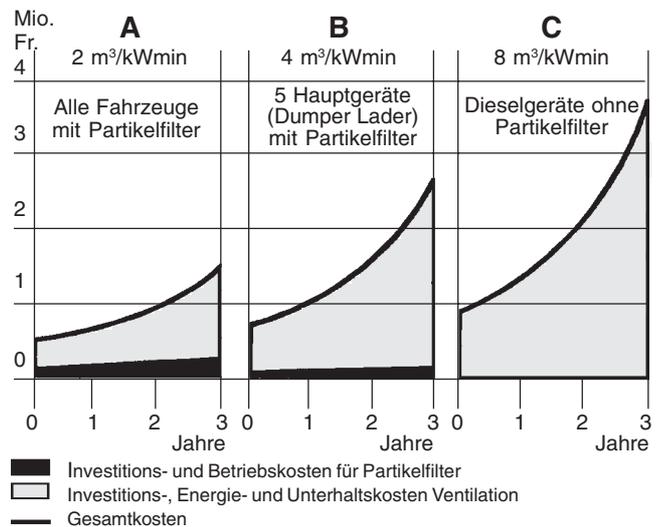


Bild 1: Kostenreduktion der Ventilation durch Abgasnachbehandlung. Grafik zu Rechenbeispiel Punkt 6.

Diskussion, insbesondere deren konsequente Nachrüstung mit Partikelfiltern. Es soll hier untersucht werden, welche dieser beiden Lösungen – mehr Luft zur Verdünnung oder weniger Schadstoffausstoss an der Quelle – in bezug auf die Luftqualität, die technische Durchführbarkeit und vor allem die Wirtschaftlichkeit als vorteilhaft betrachtet werden muss.

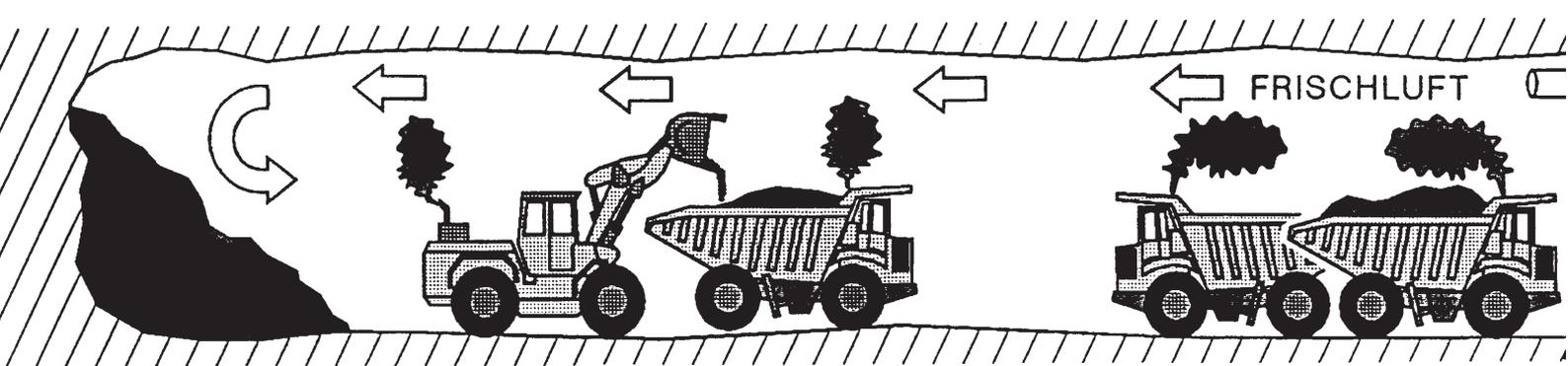
#### 2. Abgasschadstoffe im Tunnelbau

Tabelle 1

mg/Nm <sup>3</sup> Abgas	CO	NOx	SO <sub>2</sub>	HC	Partikel
Dieselmotor-Emissionen	1000	3000	350	400	250
Immissionsziel gemäss MAK	35	NO 30 NO <sub>2</sub> 6		5	0.2 0.1*
Verdünnungs-Faktor	28	100	70		2500

\* Warnwert der deutschen TRGS 554

Die erste Zeile zeigt repräsentative Werte heutiger Dieselmotoren [1]. Die zweite Zeile gibt die Anforderung an die Qualität der Atemluft gemäss derzeit gültigen Werten für die maximal zulässige Arbeitsplatzkonzentration (MAK) wieder [2]. Die dritte Zeile zeigt den daraus resultierenden Verdünnungsgrad, wie er bei durchgängigem Betrieb der Motoren und vollständiger Vermischung erforder-



derlich wäre – eine idealisierte Betrachtung. Während bisher  $\text{NO}_x$  als hauptsächliche Belastung für die Atemluft betrachtet wurde, übernehmen nun offensichtlich die Partikel diese Rolle: Damit wird der erforderliche Verdünnungsgrad sehr viel grösser, die Lüftung müsste weit über das hinausgehen, was bisher zu genügen schien.

### 3. Das Verhalten der Schadstoffe im Tunnel

Im Strassenverkehr geht man davon aus, dass die Schadstoffe nach Verlassen des Auspuffs rasch so stark verdünnt werden, dass keine unmittelbare toxische Gefahr mehr besteht und Nachreaktionen sehr langsam ablaufen. In der Tunnelröhre gelten andere Bedingungen:

- Die Schadstoffkonzentration erhöht sich, wenn die erforderliche Belüftung fehlt.
- Im Bereich der Arbeitsmaschinen treten hohe Schadstoff-Konzentrationen auf.
- Emissionsschwaden hoher Konzentration werden in Form von Strömungspfropfen in der Tunnelröhre langsam nach aussen getragen und erreichen damit Arbeitsplätze im Transport- und Ausbaubereich. Da eine homogene Mischung der Gase nur mit grossem Aufwand möglich wäre, gilt es als aussichtslos, diese Konzentrationsspitzen zu vermindern .
- Die Abgasschadstoffe verändern sich:
  - $\text{SO}_2$  oxidiert langsam zu  $\text{SO}_3$ . Mit dem aus der Verbrennung vorhandenen kondensierten Wasser entstehen Aerosole aus schwefliger Säure und Schwefelsäure. Diese Reizstoffe wirken bereits in kleinen Konzentrationen auf Augen und Atemwege.
  - $\text{NO}$ , der grösste Anteil der Stickoxide, oxidiert weiter zu dem wesentlich stärker toxischen  $\text{NO}_2$  (Bild 2),

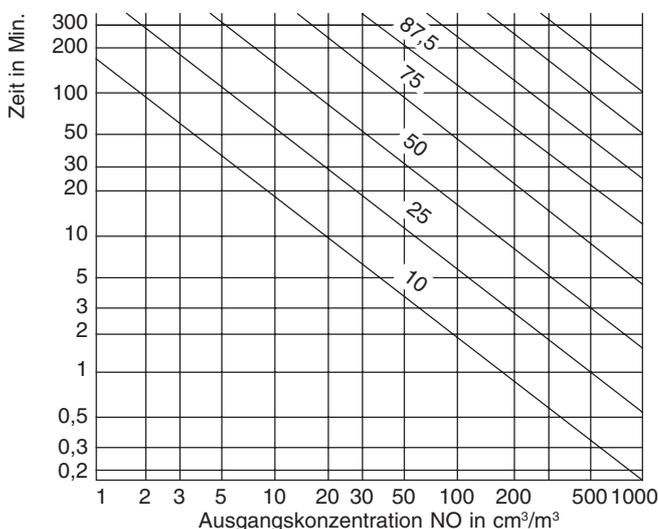


Bild 2: Oxidation von  $\text{NO}$  zu  $\text{NO}_2$  in % [3].

wobei die Geschwindigkeit dieser Reaktion erheblich ist. Bei einer typischen Verweilzeit von 100 min., was bei normaler Driftgeschwindigkeit einer Tunnellänge von 2–3 km entspricht, ist bei einer Ausgangskonzentration des verdünnten Abgases von 50 ppm eine Umsetzung um 75% zu erwarten.

- Zur Veränderung der Kohlenwasserstoffe ist noch wenig bekannt, es sind vielfältige Reaktionen denkbar, wie die Ozon-Vorläuferreaktionen der Kohlenwasserstoffe mit Stickoxiden.

### 4. Immissionen bei Standard-Bewetterung

Tabelle 2 zeigt, mit welchen Immissionswerten bei einer Standard-Bewetterung von  $4 \text{ m}^3/\text{kWmin}$  zu rechnen ist, sofern die in der ersten Tabelle genannten Emissionen vorliegen. Dabei wird von einem durchschnittlichen Luftverbrauch eines Dieselmotors im Vollast-nahen Bereich von  $6 \text{ m}^3/\text{kWh}$  ausgegangen. Der effektive Verdünnungsgrad liegt bei vollständig homogener Mischung somit bei 40 – in Wirklichkeit muss allerdings immer mit inhomogenen Verteilungen gerechnet werden.

Tabelle 2

mg/Nm <sup>3</sup> Abgas	CO	NOx	SO <sub>2</sub>	HC	Partikel
Immissionsziel	35	30	5		0.2
errechnete Werte	25	67	8	10	6
gemessene Werte	15	12	0.6		bis 2.0

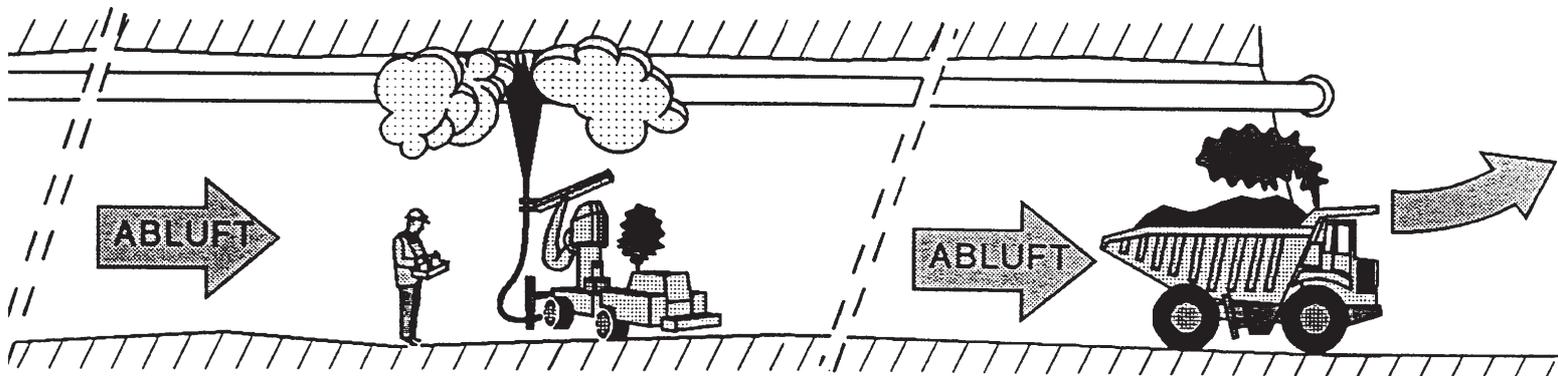
Die gemessenen Werte von CO, NOx und  $\text{SO}_2$  stammen aus Tunnelmessungen der Suva [4]. Angegeben sind Messwerte im oberen Bereich, die Durchschnittswerte liegen 50% tiefer. Die Messwerte für Partikel sind Untersuchungen der TBG und der AUVA auf Tunnelbaustellen entnommen.

Dass die im praktischen Tunnelbaubetrieb gemessenen Werte unter den errechneten liegen, findet seine Erklärung darin, dass die Auslastung der Dieselmotoren in der Praxis unter 20% liegt.

Es wird damit offensichtlich, dass eine Belüftung mit  $4 \text{ m}^3/\text{kWmin}$  zur Einhaltung der Immissionsgrenzwerte der gasförmigen Schadstoffe in der Regel genügt, bei den Partikeln aber nicht ausreicht.

### 5. Erforderliche Bewetterung

Eine beispielhafte Betrachtung soll zeigen, welche einschneidende Massnahmen bezüglich Bewetterung, Begrenzung der installierten Leistung resp. der Geräteeinsatzdauer erforderlich wären, um ohne Veränderung der Emissionsqualität der Dieselmotoren die Zielwerte zu erreichen:



In 8 Stunden Arbeitszeit stehen bei Vorgabe von  $4 \text{ m}^3/\text{kWmin}$  für die pro Dieselmotor-kW emittierten Abgase  $1920 \text{ m}^3$  Verdünnungsluft zur Verfügung. Die zulässige Fracht an Dieselpartikeln einer Tunnelröhre beträgt dann:

- $1.15 \text{ g/kWh}$  bei einem Grenzwert von  $0.6 \text{ mg/m}^3$
- $0.38 \text{ g/kWh}$  bei einem Grenzwert von  $0.2 \text{ mg/m}^3$
- $0.19 \text{ g/kWh}$  bei einem Grenzwert von  $0.1 \text{ mg/m}^3$

Geht man nach [1] von einer durchschnittlichen Emission heutiger Dieselmotoren von  $1.5 \text{ g/kWh}$  aus, so stünde dem eine in 8 h emittierte effektive Fracht an Dieselpartikeln von  $12 \text{ g/kW}$  gegenüber! Daraus folgt, dass bei einer mittleren Auslastung eines in Tunnel eingesetzten Dieselmotors von nur 10% der Partikel-Grenzwert von  $0.2 \text{ mg/m}^3$  bereits überschritten wird. Unter Ansatz des Warnwertes nach TRGS 554 von  $0.1 \text{ mg/m}^3$  müsste die mittlere Auslastung auf 1.6% vermindert werden, was unrealistisch ist.

Um die Einhaltung der Grenzwerte im Untertagebereich sicherzustellen, wäre es daher erforderlich, die Zuluftmenge zu erhöhen, um die emittierten Schadstoffe ausreichend zu verdünnen. Rein rechnerisch zeigt das Beispiel, dass eine Verfünffachung der Zuluftmenge erforderlich wäre, um eine mindestens 15-prozentige Auslastung der Geräte zu ermöglichen. Die Lüftungsrate müsste also auf  $20 \text{ m}^3/\text{kWmin}$  angehoben werden, eine aus technischen und Kostengründen utopische Vorstellung, wie im folgenden gezeigt wird.

## 6. Kosten für die Bewetterung

Um die alles entscheidende Kostenfrage zu verdeutlichen, wird nachstehend ein wiederum stark vereinfachtes Beispiel wiedergegeben:

Tunnellänge von 5 km, Bauzeit 3 Jahre

Einsatz von 5 Dieselgeräten im Vortrieb

Gesamt-Nennleistung 800 kW

Gesamte Luftmenge vor Ort

Luftgeschwindigkeit in der Lutte  $< 20 \text{ m/s}$

Betriebsdruck  $10'000 \text{ Pa}$

Berechnung nach SIA 196

Amortisation: Lüfter 10 Jahre, Lutten 6 Jahre

Energiekosten:  $0.20 \text{ DM/kWh}$

Einsatz: 6000 h/a, Auslastung 0.5

Beispiel		A	B	C
Luftmenge $\text{m}^3/\text{kWmin}$		2	4	8
Lüfterleistung kW		440	1000	1600
Luttendurchm. m		1.6	2.0	2.6
Druckverlust ca. Pa		9'500	10'500	10'500
Lüftertyp		GAL140	AL20	AL25
Lüfteranzahl Stk		2	4	4
Lüfterkosten DM		60'000	166'000	242'000
Luttenkosten/m DM		93	115	166
Luttenkosten DM		232'000	288'000	415'000
Investition DM		292'000	454'000	657'000
mit Zins+Wartung DM		388'000	604'000	874'000
Energiekosten Mio DM		0.79	1.80	2.88
Ges.kosten Mio DM		1.18	2.40	3.75
Kosten/100 kW DM		147'500	300'000	468'750
Kosten/Motor DM		236'000	480'000	750'000

Die Auslegung des Lüftungskonzeptes beeinflusst die Kosten für die Lüftung sehr stark!

Wollte man die Bewetterungsleistung weiter steigern, so wäre wohl kaum mit einer weiteren Vergrößerung des Luttendurchmessers zu rechnen. Bleibt der Luttendurchmesser aber gleich, so steigen die Belüftungsleistung und die Betriebskosten mit der dritten Potenz der Bewetterungsmenge. (Bild 1)

Es wurde hier lediglich mit einer Verdoppelung der Bewetterungsrate von 4 auf  $8 \text{ m}^3/\text{kWmin}$  gerechnet. Um die Zielvorgaben zu erreichen, genügt diese Steigerung aber – wie die Beispiele unter Punkt 4 und 5 zeigen – bei weitem nicht. Es ist somit offensichtlich, dass auch unter Nutzung aller technischen Möglichkeiten (Anpassung des Luttenquerschnittes an die Gegebenheiten, bessere Verteilung der Belüftung im Bereich der Schadstoffentstehung und des Schadstofftransportes) nicht zum Ziel führen. Bereits eine Verdoppelung der Bewetterungsrate sprengt die Grenzen des Machbaren.

## 7. Unzulänglichkeiten der Bewetterung

Abgesehen von dem Kostenproblem ist das Schadstoff-Verdünnungsmodell durch höhere Luftzufuhr aus folgenden Gründen generell als eine Sackgasse anzusehen:

- Die erforderlichen Luttenquerschnitte finden im Tunnelquerschnitt keinen Raum.
- Die Driftgeschwindigkeiten in der Tunnelröhre, die heute bei etwa  $0.5\text{--}1 \text{ m/s}$  liegen, würden auf  $3\text{--}5 \text{ m/s}$  gesteigert.

- Selbst wenn im Durchschnitt eine Unterschreitung des Partikel-Grenzwertes erzielt würde, so ist doch damit zu rechnen, dass lokal und periodisch Schadstoffbelastungen an Arbeitsplätzen auftreten, die weit über den Grenzwert hinausgehen.
- Überdies bliebe die mit der Tunnelabluft in die Umwelt abgegebene Schadstoff-Fracht unverändert hoch; eine Randbedingung, die aus Umweltverträglichkeitsgründen für sehr viele Standorte, insbesondere für innerstädtische Baustellen, problematisch ist.

Aus all diesen Gründen muss das übliche *Verdünnungsdenken* verlassen werden.

## 8. Vorteile der Massnahmen an der Quelle

Benzinmotoren mit Katalysatoren werden heute als Gesamtsysteme betrachtet und sind allgemein akzeptiert. Nur so werden akzeptable Emissionswerte erzielt.

Dieses Denken ist nun auf den Dieselmotor zu übertragen: Er ist in analoger Weise mit einer auf die dieselspezifischen Emissionen abgestimmten Abgasnachbehandlung auszurüsten. Nur dieses System gehört in den Tunnel:

- Partikelfilter vermindern die Partikel-Emission auf weniger als 10%. Solche Filter sind verfügbar (siehe VERT-Bulletin 2 [6]) und lösen das Problem der Partikel-Emissionen in effizienter Weise. Der Aufwand liegt für viele Systeme bereits heute, bei geringen Stückzahlen, unter 125 DM/kW.
- Katalysatoren vermindern die Emission der HC-Komponenten und des CO auf weniger als 10%. Dies setzt allerdings voraus, dass ein extrem schwefelarmer Kraftstoff verwendet wird. Katalysatoren sind verfügbar, aber angesichts der dieseltypischen Emissionen, die sie nicht wesentlich reduzieren können, nicht zwingend für den Einsatz im Tunnel.
- Spezielle Katalysatoren, die im Bereich stationärer Motoren seit langem zum Standard gehören und jetzt auch für Fahrzeuge intensiv entwickelt werden, ermöglichen eine Verminderung der NOx-Emissionen auf 5–10%, jedoch ist diese für den Tunnelleinsatz sehr wünschenswerte Technik noch nicht verfügbar.

Werden die Massnahmen an der Quelle ausgeschöpft, so kann die Bewetterungsrate fühlbar vermindert werden.

## Literatur

1. Schadstoffemission und Treibstoffverbrauch von Baumaschinen, Bericht Nr. 23 BUWAL/Bern 94
2. Grenzwerte am Arbeitsplatz, 1994, Suva/Luzern
3. Verhalten von Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid in kleinen Konzentrationen in Abwettern, Glückauf-Forschungshefte 51(1990) Nr. 1.
4. Schadstoffmessungen im Tunnelbau, Ein Vergleich GESTERN (1975-82) und HEUTE (1986-89), Suva/Luzern, Bericht 90.218, 1990
5. VERT-Bulletin 1, Probleme, Ziele und Programm
6. VERT-Bulletin 2, Partikelfilter

## Abkürzungen:

Suva Schweizerische Unfallversicherungsanstalt  
 AUVA Allg. Unfallversicherungsanstalt/Österreich  
 TBG Tiefbau-Berufsgenossenschaft/D  
 MAK Maximale Arbeitsplatz-Konzentration  
 TRGS Technische Regeln für Gefahrstoffe

Massgebend sind dann die gasförmigen Dieselmotor-Emissionen sowie die Sprenggase. In manchen Fällen wird es dann vielleicht sogar möglich sein, die Bewetterungsrate auf 2 m<sup>3</sup>/kWmin. abzusenken.

Die Suva, die TGB und die AUVA sind bereit, die heute gültigen Vorgaben in diesem Sinn zu lockern, sobald die Zuverlässigkeit der Abgasnachbehandlungssysteme dies zulassen.

Als zielführend sowohl hinsichtlich des Arbeitnehmerschutzes als auch hinsichtlich des Umweltschutzes ist somit die Verminderung der Schadstoff-Emission jedes einzelnen Dieselmotors durch eine dem Motor unmittelbar nachgeschaltete Abgasnachbehandlung anzusehen.

## 9. Kostengegenüberstellung

Die nachstehenden Vergleichszahlen gelten für eine Baumaschine mit einem 100-kW-Dieselmotor, die während 3 Jahren im Tunnel betrieben wird.

### Gesamtaufwand für die Abgasnachrüstung

Partikelfilter mit Einbau	12'500 DM
Wartung	5'000 DM
Erhöhter Brennstoffverbrauch:	3'000 DM
Regenerationsadditiv	3'000 DM
Total	23'500 DM

### Gesamtaufwand für Bewetterung

mit 8 statt 2 m<sup>3</sup>/kWmin >300'000 DM

Auch wenn der Einsatz derartiger Nachrüstmassnahmen im Tunnelbau aufgrund der noch recht schmalen Erfahrungsbasis dazu führen sollte, dass erhöhte Wartung und gelegentlicher Ersatz erforderlich wird, ist der finanzielle Vorteil gegenüber Bewetterungsmassnahmen doch eindeutig.

## 10. Quintessenz

Der Weg zur Verminderung der dieselmotorischen Schadstoffbelastung an Arbeitsplätzen im Tunnel kann aufgrund finanzieller und technischer Gegebenheiten nur über die Verminderung der Emission an der Quelle führen. Kurzfristig ist dies bei bestehenden Motoren durch die Anwendung von Dieselpartikelfiltern in Verbindung mit schwefelarmem Kraftstoff möglich.

**Projektleitung:** Ing.-Büro TTM, A. Mayer, Fohrhölzlistr. 14b, CH-5443 Niederrohrdorf  
 Tel. 0041(56) 496 6414 Fax 0041(56)496 6415

**Projektausschuss der Auftraggeber:**  
 AUVA: E. Bigga 0043(3842)24317  
 TBG: Prof. D. Kieser 0049(761)73135  
 Suva: W. Scheidegger 0041(41)419 5060

### Bulletin-Bestellungen:

**AUVA:** Allgemeine Unfallversicherungsanstalt  
 Abteilung für Unfallverhütung und Berufskrankheitenbekämpfung  
 Adalbert-Stifterstr. 65, A-1200 Wien (Frau Radosztics)  
 Tel. 0222-33111-418 Fax 0222-33111-347  
 Bestell-Nr. AUVA-Report 4/2

**TBG:** Tiefbau-Bauberufsgenossenschaft  
 Am Knie 6, D-81241 München  
 Tel. (089)8897 505 Fax (089)8897494

**Suva:** Schweizerische Unfallversicherungsanstalt  
 Kundendienst, Postfach 6002 Luzern  
 Tel. (041)419 5851 Fax (041)419 5917