

Abgasschadstoffe von Dieselmotoren im Tunnelbau

Bulletin 1: Probleme, Ziele, Programm

Abgasschadstoffe von Dieselmotoren

Bei Otto-Motoren (Benzin, Gas) können die Abgasemissionen mittels 3-Wege-Katalysatoren, wie sie in Strassenfahrzeugen üblich sind, auf weniger als 1% der Rohemission vermindert werden. Wegen der Brand- und Explosionsgefahr dürfen aber im Tunnelbau keine Benzinmotoren oder Gasmotoren eingesetzt werden. Wo der Einsatz von elektrischen Antriebsaggregaten nicht möglich ist, müssen Tunnelbaumaschinen daher mit Dieselmotoren ausgerüstet werden. Es stellt sich damit die Frage, wie deren typische Abgasschadstoffe, Stickoxide und Partikel, auf ein zulässiges Mass vermindert werden können.

- **Stickoxide (NO_x)** setzen sich im wesentlichen aus NO und NO₂ zusammen. Dieselmotoren emittieren überwiegend NO, der Anteil von NO₂ beträgt am Motorausstritt lediglich 5-10%. NO wandelt sich in der Atmosphäre aber langsam in das stark toxische NO₂ um, in langen Tunnels wird diese Reaktion weitgehend vollzogen [1].

Editorial

Das Projekt VERT hat zum Ziel, die Schadstoffe von Baumaschinen, die im Tunnelbau zum Einsatz kommen, auf ein äusserstes Minimum zu reduzieren*) Dies geschieht zum Schutz der Gesundheit der im Tunnelbau beschäftigten Arbeitnehmer. Das im Hinblick auf die zahlreichen Tunnelbauvorhaben initiierte Projekt wird gemeinsam von den für die Arbeitssicherheit im Tunnelbau zuständigen Instanzen in Österreich, Deutschland und in der Schweiz getragen, d.h. von der AUVA, der TBG und der SUVA (Föderführung).

Das vorliegende Bulletin richtet sich an Fachleute, die sich beruflich mit diesem Problem beschäftigen. In Abständen von 2 bis 3 Monaten sollen weitere Bulletins erscheinen, die sich mit einzelnen Aspekten des Projekts befassen werden. Wir hoffen, dass diese Informationen bei den betroffenen Fachleuten auf Interesse stossen. Kontaktadressen finden Sie auf der letzten Seite dieses Bulletins. AUVA, SUVA, TBG

*) VERT steht für Verminderung der Emissionen von Realmaschinen im Tunnelbau. "Realmaschinen" meint die bereits real im Feld existierenden Motoren, also nicht Zukunftsentwicklungen.

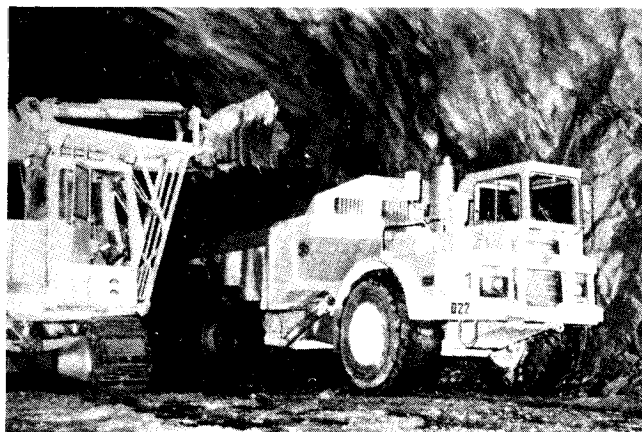


Bild 1: Baumaschinen im Tunneleinsatz

Die toxische Wirkung des NO₂ ist in erster Linie dadurch bedingt, dass es im Kontakt mit Wasser salpetrige Säure und Salpetersäure bildet, Reaktionen, die bei entsprechender Exposition auch in den feuchten Atemwegen ablaufen und dort Verätzungen hervorrufen können.

		MAK 93 A	MAK 94 CH	MAK 94/95 D
No	mg/m ³	30	30	30
No ₂	mg/m ³	6	6	9

- **Partikel** sind definiert als die Gesamtheit filterbarer Stoffe im motorischen Abgas nach Verdünnung mit Luft und Kühlung auf weniger als 52°C. Partikel treten vor allem bei der dieselmotorischen Verbrennung auf. Sie sind, wie Bild 2 zeigt, lungengängig und setzen sich je nach Betriebspunkt und Kraftstoff aus unterschiedlichen Anteilen von Russ, Sulfaten, angelagerten Kohlenwasserstoffen und Wasser zusammen.

Sulfationen bilden bei der Abkühlung mit dem im Abgas reichlich vorhandenen Wasser schweflige Säure und Schwefelsäure, die nach der MAK-Liste wegen ihrer ätzenden Wirkung mit 1 mg/m³ sehr streng begrenzt ist. Die Sulfatbildung kann allerdings weitgehend vermieden werden, wenn anstelle des handelsüblichen Kraftstoffes schwefelarme Sonderkraftstoffe verwendet werden, die mit S<0.05 Gewichtsprozent im Handel sind.

Kohlenwasserstoffe, deren polyzyklische aromatische Komponenten (PAH) kanzerogene Wirkung haben, können sich an die Russpartikel anlagern und bleiben

dort adsorbtiv fest gebunden. Im Teillastbetrieb ist der Anteil der Kohlenwasserstoffe an der Partikelmasse gross, gegen Vollast verschwindet er nahezu. Die PAH-Konzentration im Abgas liegt nach neueren Untersuchungen [2] typischerweise im Bereich von einigen $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

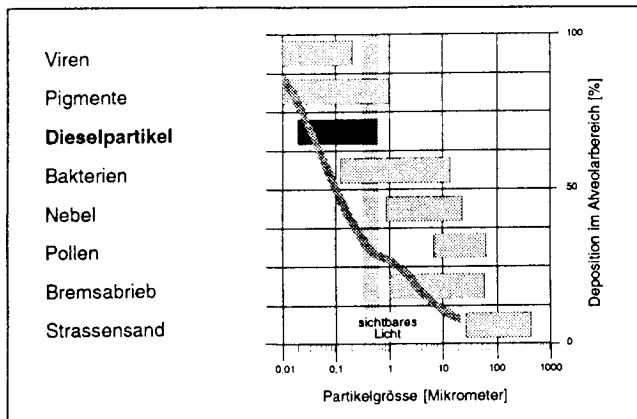


Bild 2: Grössenverteilung von luftverunreinigenden Partikeln (Balken) und Depositionswahrscheinlichkeit im Alveolarbereich in Abhängigkeit der Partikelgrösse.

Das Feinstpartikel "Russkern", das im wesentlichen aus elementarem Kohlenstoff besteht, ist nach neueren toxikologischen Forschungen [3, 4] in den Verdacht geraten, ebenfalls kanzerogen zu wirken. Der Wirkungsmodus wird hierbei in der Gefahr der Deposition gesehen [5].

Aufgrund der Ergebnisse von Kanzerogenitäts-Studien sind 1988 von der International Agency for Research on Cancer (IARC) Dieselmotor-Emissionen als "wahrscheinlich krebserzeugend" eingestuft worden. In der Folge wurden auf nationaler Ebene folgende Grenzwerte festgelegt:

	TRK 93 A	MAK 94 CH	TRK 94 D
DME (Partikel)			
Untertage mg/m^3	0.6*	0.2	0.6
Übertage mg/m^3		0.2	0.2
Benzo(a)pyren mg/m^3	0.002	0.002	0.002

*) Orientierungswert

In dieser Grenzwertdefinition sind nicht mehr die "Partikel" als heterogenes Filtrat genannt, sondern die "Dieselmotor-Emissionen" (DME) sind als Gesamtkohlenstoff-Anteil des Partikelfiltrates definiert. Die DME enthalten also sowohl den elementaren Kohlenstoff (Russ) als auch den organischen Kohlenstoffanteil der angelagerten Kohlenwasserstoffe.

Es ist weiter darauf hinzuweisen, dass beim Umgang mit kanzerogenen Stoffen ein Minimierungsgebot besteht, d.h. dass die Grenzwerte grundsätzlich so weit als technisch möglich unterschritten werden müssen.

Die SUVA hat zusammen mit dem Schweizerischen Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) 1993 ein Inventar der Emissionen von Baumaschinen in der Schweiz erstellt, aus dem hervorgeht (Bild 3), dass

Baumaschinen, wie wir sie im Feld vorfinden, ausserordentlich hohe Partikelemissionen aufweisen; sie liegen bis zu 10mal über den gültigen Grenzwerten im Strassenverkehr.

Im Bereich der Nutzfahrzeuge im Strassenverkehr findet derzeit sogar eine deutliche Verschärfung der Gesetzgebung statt, die die Partikel von Neumotoren von 0.36 g/kWh auf weniger als 0.15 g/kWh reduzieren wird.

Für Nichtstrassenfahrzeuge existiert europaweit eine derartige Gesetzgebung noch nicht. Erste Entwürfe zielen zunächst auf die Reduktion der Emissionen von landwirtschaftlichen Traktoren. Üblicherweise werden Vorschriften dieser Art aber nur für Neumotoren formuliert, in der Regel mit Übergangsfristen von 3-4 Jahren. Eine Gesetzgebung, die die Nachrüstung bereits existierender Motoren erzwingen würde, gibt es bisher nur bei Stationärmotoren nach der deutschen "Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft" (TA Luft), nicht aber bei Strassenfahrzeugen und schon gar nicht bei Nichtstrassenfahrzeugen wie Baumaschinen. Es ist daher nicht zu erwarten, dass sich die Schadstoffbelastung durch Dieselmotoremissionen beim Tunnelbau in den nächsten Jahren von selbst deutlich ändern wird.

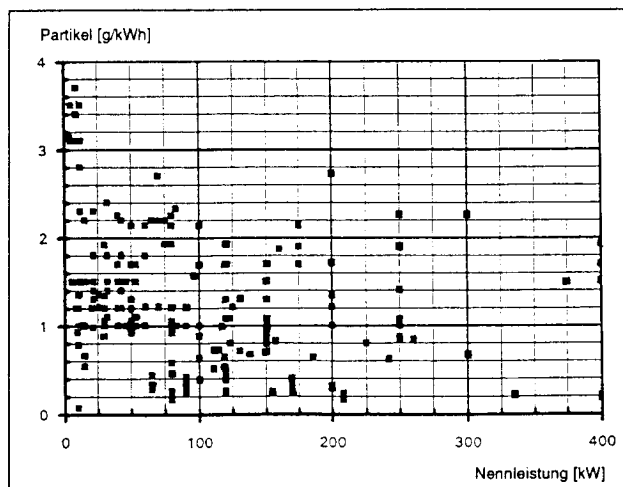


Bild 3: Partikelemission als Funktion der Nennleistung, aus dem Schweiz. Baumaschinen-Emissions-Inventar [6]

Luftqualität im Tunnel und in der Tunnelabluft

Da nach bisheriger Vorschriftenlage die Emissionen von dieselmotorisch angetriebenen Fahrzeugen und Maschinen nicht begrenzt sind, bleibt zur Erzielung einer durch die MAK-Werte bzw. TRK-Werte vorgegebenen Luftqualität nur das Mittel der Verdünnung.

Verdünnung durch Belüftung wird heute auf allen Tunnelbaustellen praktiziert. Für die erforderliche Frischluftzufuhr gilt ein Richtwert von $4\text{m}^3/\text{min}$ pro installiertem Diesel-kW. Erfahrungsgemäss genügt diese Luftzufuhr, um die MAK-Werte für NO und NO₂ zu unterschreiten.

Bezüglich der DME liegen, im Sinne der Grenzwertdefinition, aus den letzten Jahren Messergebnisse der AUSA und der TBG aus stichprobenartigen Messungen auf untertägigen Baustellen vor. Die meisten Messwerte liegen im Bereich von 0.4 bis 0.8 mg/m^3 . Spitzenwerte

erreichen allerdings Werte über 2 mg/m³, d.h. dass die Grenzwerte in diesen Fällen erheblich überschritten wurden.

Natürlich ist es grundsätzlich denkbar, die Frischluftzufuhr zu den untertägigen Arbeitsplätzen zu erhöhen. Dies würde allerdings zu folgenden Problemen führen:

- ◆ Nur im Mittel wird eine Besserung erzielt, d.h. am Arbeitsplatz selbst sind nach wie vor hohe Überschreitungen zu erwarten.
- ◆ Die Gesamt-Emissionsfracht, die schliesslich als Tunnelabluft die Baustelle verlässt, bleibt unverändert hoch - ein Umweltproblem.
- ◆ Tunnelbelüftung ist ein wesentlicher Kostenfaktor im Tunnelbau.
- ◆ In vielen Fällen würde die Installierung leistungsstärkerer Belüftungsanlagen überdimensionierte Tunnelquerschnitte erforderlich machen.

Um dieser Situation Rechnung zu tragen, muss das bisher übliche Immissions-Denken, also eine undifferenzierte Durchschnittsbewertung, verlassen werden. Nicht die durchschnittliche Schadstoffbelastung ist zu begrenzen, sondern der Schadstoff-Ausstoss an der Quelle, also die Emission jedes einzelnen Dieselmotors.

Dadurch könnte es gelingen, stark emittierende Motoren, die sogenannten "schwarzen Schafe", ganz aus dem Tunnel zu verbannen und dadurch die geforderte Qualität der Tunnelluft auch ohne Erhöhung der Belüftungsleistung zu erreichen. Ausserdem könnten als Folge regelmässiger Kontrollen der Motoren gezielte Massnahmen bei der Wartung, allenfalls sogar Nachrüstungs-massnahmen durchgesetzt werden.

Zielsetzung VERT

Das Projekt hat eine dreifache Zielsetzung:

1. Abgas-Nachbehandlungsmethoden

Untersuchung von Massnahmen zur Verminderung der Emissionen von Baumaschinen. Diese Massnahmen sollen geeignet sein, sie bei bestehenden Motoren, also auch bei älteren Fahrzeugen, anzuwenden. Um Massnahmen dieser Art auch durchsetzen zu können, müssen sie den folgenden Bedingungen genügen:

- ◆ sie müssen am Markt verfügbar sein
- ◆ sie dürfen ein vertretbares Preisniveau nicht überschreiten
- ◆ sie müssen vom Motorenhersteller ohne Einschränkung der Gewährleistung akzeptiert werden.

2. Messtechnik

Untersuchung und gegebenenfalls Weiterentwicklung von Messmethoden zur Ermittlung der Abgasqualität von Dieselmotoren vor Ort. An diese sogenannten Feldmessgeräte werden die folgenden Forderungen gestellt:

- ◆ sie müssen dem rauen Betrieb auf der Baustelle gewachsen sein
- ◆ sie müssen am Markt frei verfügbar sein
- ◆ das Kostenniveau muss so sein, dass sich auch Bau-

unternehmer mit einem kleinen Baumaschinenpark derartige Geräte selbst beschaffen können, um die Emissionsqualität ihrer Motoren im Serviceturnus zu überprüfen.

- ◆ die Messungen mit Feldmessgeräten müssen mit den offiziellen Messungen bei der Zertifizierung der Motoren in vertretbarem Mass korrelieren.
- ◆ die Messgeräte müssen von den zuständigen nationalen Behörden anerkannt werden.

3. Formulierung von Grenzwerten

Für Dieselmotoren, die auf Tunnelbaustellen eingesetzt werden, sollen Emissionsgrenzwerte für die Partikel (DME) sowie für die Stickoxide vorgeschlagen werden. Diese Grenzwerte sollen nach ISO 8178 definiert werden, je nach Gerätetyp gemäss den Messzyklen C1 und D2 oder dem 13-Punkte-Test. Die Zertifikations-Messung soll unter stationären Bedingungen in gewohnter Weise am Motorprüfstand erfolgen.

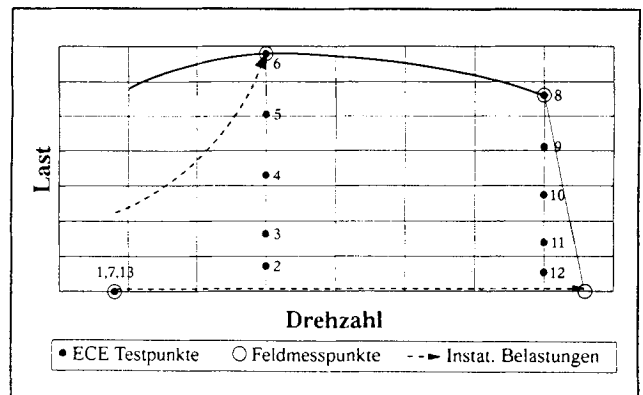


Bild 4: Testzyklus ECE R49 "13-Punkte-Test" und Betriebspunkte für Kontrollmessungen

Kontrollmessungen: Auf Baustellen sind derartig aufwendige Messungen nicht durchführbar. Vor Ort sollen vielmehr nur Kontrollmessungen durchgeführt werden, und zwar in Betriebszuständen, die ohne Modifikation der Fahrzeuge und Motoren einstellbar sind. Solche Betriebspunkte sind beispielsweise:

- ◆ Tiefer Leerlauf
- ◆ Hoher Leerlauf
- ◆ Vollast im Wandler-Festbremspunkt
- ◆ Vollast im Hydraulik-Ankopplungspunkt

Diese Betriebspunkte sind im Standard-Test-Zyklus gemäss Bild 4 enthalten, Hinweise für das im Feld zu erwartende Emissionsniveau in diesen Betriebspunkten können somit der Zertifikationsmessung nach dem ISO-Zyklus entnommen werden.

Hinzu kommt als wichtige weitere Überprüfung des motorischen Verhaltens die transiente Rauchmessung während der freien Beschleunigung vom Tieflerlauf bis zum Hochlerlauf mittels Opazimetrie.

Die genannten Betriebszustände können in ihrer Summe als repräsentativ für das Verhalten der Motoren betrachtet werden, sie sind gut reproduzierbar und bei

Einstellzeiten von etwa 3 Min. belasten sie die Maschinen nicht unzulässig.

Als Referenzwerte zur Bewertung dieser Messungen dienen Herstellerangaben oder Messwerte, die bei der Zulassung der Geräte zum Tunnelbau ermittelt wurden.

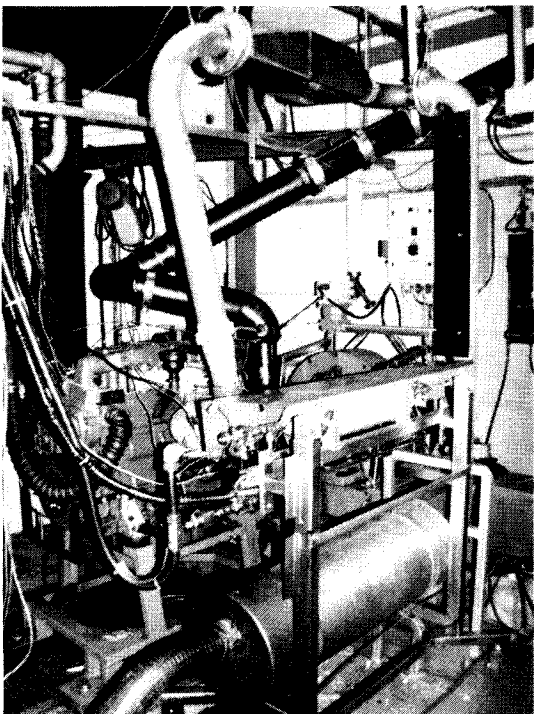
Planung und Finanzierung

Das Projekt VERT wurde im November 1993 gestartet und gliedert sich in drei Phasen:

- ◆ 1994 bis Anfang 1995: Messungen am Motorprüfstand der Abgasprüfstelle der Ingenieurschule Biel/Schweiz, Prof. Dr. J. Czerwinski, zur Evaluation von Abgasminderungsmassnahmen und Untersuchung von Abgasmessgeräten, die sich für den Einsatz auf Baustellen eignen.
- ◆ 1995 bis Anfang 1996: Ausrüstung von repräsentativen Baumaschinen mit den evaluierten Abgasminderungseinrichtungen. Langzeitüberprüfung im Feld. Gleichzeitige Überprüfung der Abgasmessstechnik.
- ◆ 1996: Formulierung von Grenzwerten und Kontrollverfahren.

Die Gesamtkosten des Projektes belaufen sich auf etwa 1.6 Mio Schweizer Franken, die zur Hälfte von den Programmträgern AUVA, SUVA und TBG, zur anderen Hälfte von der Industrie (Motoren, Russfilter, Katalysatoren, Treibstoffe, Additive, Messgeräte) aufgebracht werden.

Diesem Bulletin werden in Abständen von 2-3 Monaten weitere folgen, die sich detailliert mit der Evaluation von Nachrüstmassnahmen, der Feldmesstechnik und der Grenzwert-Philosophie befassen werden.



Russfilter am LIEBHERR-Motor

Literatur

1. K. Wörsdorfer, Verhalten von NO und NO₂ in Abwettern, Glückauf-Forschungshefte 53(1990)¹
2. H. Schlitt, Untersuchung des Verhaltens von Russfiltern an Dieselmotoren unter Tage, Glückauf-Forschungshefte 54 (1993) 4
3. P.D. Heinrich, Zur Frage der Gefährdungspotentials von Dieselmotoren für den Menschen, Fraunhofer-Institut, Hannover, SAE-Tagung Wil, 22.4.94
4. William E. Peplko, Chao Chen, Quantitative Assessment of Cancer Risk from Exposure to Diesel Engine Emissions, US Environmental Protection Agency, Regulatory Toxicology and Pharmacology, 17/1993
5. Depositions- und Retentionsmodell für die interne Dosimetrie des menschlichen Respirationstraktes, Health Physics 12 (1966), 173
6. Schadstoffemission und Treibstoff-Verbrauch von Baumaschinen, Bericht Umweltmaterialien Nr. 23 des BUWAL/Bern, 1994

Abkürzungen:

SUVA	Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
AUVA	Allg. Unfallversicherungsanstalt/Österreich
TBG	Tiefbau-Berufsgenossenschaft/Deutschland
BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Land u. Landschaft
MAK	Maximale Arbeitsplatz-Konzentration
TRK	Technische Richtkonzentration
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
PAH	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
DME	Dieselmotor-Emissionen
IARC	International Agency for Research on Cancer
TA LUFT	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
ISO	International Standards Organization

Projektleitung:

Ing. Büro TTM, A. Mayer,
Fohrhölzistr. 14b, CH-5443 Niederrohrdorf
Tel. CH-0041/(56) 95 14 14
Fax 0041/(56) 95 14 15

Kontaktadressen:

AUVA: E. Bigga A/0043(3842)24317
TBG: Prof. D. Kieser D/0049(761)73135
SUVA: W. Scheidegger CH/0041/(41)21 50 60

Bulletin-Bestellungen:

AUVA:
Allgemeine Unfallversicherungsanstalt
Abteilung für Unfallverhütung und Berufskrankheitenbekämpfung
Adalbert-Stifterstr. 65, A-1200 Wien (Frau Radszics)
Tel. 0222-33111-418 Fax: 0222-33111-347
Bestell-Nr. AUVA-Report 4/1

TBG:
Tiefbau-Bauberufsgenossenschaft
Am Knie 6D-81241 München
Tel. (089)8897-505 Fax. (089)8897-494

SUVA:
Schweizerische Unfallversicherungsanstalt
Kundendienst, Postfach 6002 Luzern
Tel. 041/21 58 51 Fax: 041/21 59 17