



UMWELT-MATERIALIEN
NR. 148

Luft

Nachrüstung
von Baumaschinen
mit Partikelfiltern

Kosten/Nutzen-Betrachtung



BUWAL Bundesamt für Umwelt,
Wald und Landschaft

UMWELT-MATERIALIEN
NR. 148

Luft

Nachrüstung
von Baumaschinen
mit Partikelfiltern

Kosten/Nutzen-Betrachtung

Herausgegeben vom Bundesamt
für Umwelt, Wald und Landschaft
BUWAL
Bern, 2003

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft
(BUWAL)

*Das BUWAL ist ein Amt des Eidg. Departements für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation
(UVEK)*

**Website BUWAL-Abteilung Luftreinhaltung
und NIS**

www.umwelt-schweiz.ch/buwal/de/fachgebiete

Thema Luft

Autoren

Mario Keller/René Zbinden, INFRAS, Mühlemattstr.
45, 3007 Bern

Peter Straehl, Abt. Luftreinhaltung und NIS, BUWAL,
3003 Bern

Zitierung

KELLER, M.; STRAEHL, P.; ZBINDEN, R. 2002: Nach-
rüstung von Baumaschinen mit Partikelfiltern – Kos-
ten/Nutzen-Betrachtung.

BUWAL Umwelt-Materialien Nr. 148, Bundesamt für
Umwelt, Wald und Landschaft, Bern. 52 S.

Begleitung BUWAL

Anton Stettler, Abt. Luftreinhaltung und NIS,
BUWAL

Bildnachweis

BUWAL/Docuphot: Titelblatt oben

Priska Ketterer, Fotografin, Luzern: Titelblatt unten

Bezug

BUWAL

Dokumentation

CH-3003 Bern

Fax + 41 (0) 31 324 02 16

E-Mail: docu@buwal.admin.ch

Internet: www.buwalshop.ch

Bestellnummer

UM-148-D

Preis

CHF 10.– (inkl. MWSt)

© BUWAL 2003

Inhaltsverzeichnis

Abstracts	5		
Vorwort	7		
Zusammenfassung	9		
A Kosten-Betrachtung		B Nutzen-Betrachtung	
1 Grundlagen und Annahmen	13	5 Ausgangslage	33
1.1 Segmentierung	13	5.1 Luftreinhalte-Verordnung	33
1.2 Bestandesmodell	13	5.2 Definitionen (PM10, PM2.5, Russ)	33
1.2.1 Neuzulassungen	13	6 Anteil Industrie und Gewerbe	35
1.2.2 Lebensdauer	14	6.1 Anteil an den primären PM10-Emissionen	35
1.2.3 Bestandesentwicklung	15	7 Umweltnutzen von Partikelfiltern	37
1.3 Betriebsstunden	15	7.1 Reduktion der Partikel-Anzahl und der biologisch aktiven Oberfläche der Partikel	37
1.4 Emissionsfaktoren	16	7.2 Reduktion der Partikel-Masse	38
1.5 Filterkosten	18	7.3 Reduktion der gesamten Toxizität und der kanzerogenen Potenz der Dieselabgase	39
2 Szenarien: Emissionen und Kosten	19	8 Nutzen für die Gesundheit	41
2.1 Definition der Szenarien	19	8.1 Immissionssituation im bevölkerungsgewichteten Mittel	41
2.2 Emissionsentwicklung 2002–2020	19	8.2 Gesundheitliche Auswirkungen (Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankheiten, Krebs)	42
2.3 Kosten der Szenarien	23	8.3 Quantifizierung des Gewinns für die Gesundheit beim Einbau von Partikelfiltern in Baumaschinen	43
3 Kosteneffizienz	25	8.4 Weitere Gewinne für die Gesundheit	43
3.1 Vergleich der Szenarien	25	Anhang	45
3.2 Optimierung der Nachrüstung	25	Anhang 1: Bestandesentwicklung	45
4 Fazit	29	Anhang 2: Bestandesentwicklung nach Emissionsstufen	46
		Anhang 3: Emissionsentwicklung	47
		Anhang 4: Kostenentwicklung	48
		Anhang 5: Kosten-Nutzen in Abhängigkeit des Alters (Illustrationen)	49
		Anhang 6: Literatur	50
		Weiterführende Literatur	52

Abstracts

Benefits to public health outweigh costs from equipping construction machines with particulate traps

The risk to public health arising from carcinogenic soot particles emitted by construction machines is quantified. By equipping diesel engines from construction machines with state-of-the-art particulate traps, the emission of microscopic soot particles can be reduced by over 90%. In the present report, the additional costs arising in the building industry up to 2020 are calculated and compared with the benefit to the national economy arising from avoidance costs in the public health sector. It is shown that the savings clearly outweigh the costs.

Einsparungen bei der Gesundheit überwiegen Kosten von Partikelfiltern für Baumaschinen

Das von den Dieselermissionen der Baumaschinen ausgehende Gesundheitsrisiko für die Bevölkerung wird aufgezeigt. Mit der Nachrüstung von Baumaschinen mit Partikelfiltern kann der Ausstoß der krebserzeugenden Dieseleruss-Feinstpartikel nach dem Stand der Technik um mehr als 90% reduziert werden. Im vorliegenden Bericht werden die dadurch für die Bauwirtschaft anfallenden Gesamtkosten bis 2020 berechnet und mit dem volkswirtschaftlichen Nutzen verglichen, der durch die Vermeidung von Kosten im Gesundheitswesen entsteht. Daraus geht hervor, dass die Einsparungen bei den Gesundheitskosten deutlich überwiegen.

Bénéfice en termes de santé supérieur au coût des filtres à particules

Le risque du aux émissions de particules diesel des engins et machines de chantier sur la santé de la population est établi. Il est possible de réduire de plus de 90% les émissions de particules ultrafines de suie diesel cancérigène en équipant ces engins de filtres à particules conformes à l'état de la technique. Le présent rapport calcule les coûts totaux que cette opération générera pour l'industrie de la construction d'ici à 2020, et en compare les résultats avec les bénéfices que l'économie nationale en retirera du fait des économies réalisées sur les coûts de la santé. Il en ressort que ces économies sont nettement supérieures.

La somma risparmiata per i costi sanitari è nettamente superiore a quella necessaria per dotare le macchine e gli apparecchi edili con filtri antiparticelle.

La presente pubblicazione sottolinea il rischio per la salute della popolazione derivante dalle emissioni di fuliggine diesel emanate dai motori diesel di macchine e apparecchi edili. Secondo lo stato della tecnica, dotare le macchine e gli apparecchi edili con filtri antiparticelle consentirebbe di ridurre di oltre il 90% l'emissione di particelle di fuliggine diesel cancerogene. Nel presente rapporto vengono calcolati i costi complessivi fino al 2020 per l'edilizia derivanti dall'attuazione di tale misura. Tali costi sono poi confrontati con i vantaggi economici legati alla riduzione delle spese sanitarie. Dal paragone emerge chiaramente che la somma risparmiata per i costi sanitari è nettamente superiore a quella necessaria per attuare il provvedimento.

Vorwort

Baustellen, insbesondere Grossbaustellen sind wesentliche Emissionsquellen von Luftschadstoffen. Von Bedeutung sind vor allem die staubförmigen, lungengängigen Feinpartikel, zu denen auch die Russpartikel aus Dieselmotoren gehören. Wenn wir diese winzigen Russpartikel einatmen, dringen sie tief in die feinsten Verästelungen unserer Lunge ein, wo sie entweder abgelagert werden und während Monaten oder Jahren verweilen, oder aber relativ rasch in den Blutkreislauf übertreten. In beiden Fällen kann dies zu Atemwegs- oder Herz-Kreislaufkrankungen führen. Dieselruss hat überdies ein grosses kanzerogenes Potenzial und wird deshalb in der MAK-Liste der Suva, in den MAK-Listen anderer Länder sowie in der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) als Krebs erzeugender Stoff aufgeführt.

Für Krebs erzeugende Stoffe gilt nach der LRV ein Minimierungsgebot. Demnach müssen sich auch die Massnahmen zur Reduktion von Dieselermissionen jeweils nach dem neusten Stand der Technik richten.

Baumaschinen tragen heute rund 25% an die gesamtschweizerische Dieselermission bei. In Anbetracht dieses namhaften Anteils, der Krebs erzeugenden Wirkung von Dieselermissionen und der im Vergleich zum Strassenverkehr auf Baustellen weitgehend fehlenden Verdünnung der Maschinenabgase durch den Fahrtwind weisen Baumaschinen ein beträchtliches Belastungspotenzial für die Bevölkerung in der Nachbarschaft von Baustellen und für die Bauarbeiter auf.

Mit der Nachrüstung von Baumaschinen mit Partikelfiltern kann der Ausstoss der Krebs erzeugenden Feinstpartikel um mehr als 90% reduziert werden. Es handelt sich dabei um eine bewährte Technik, die in der Schweiz und anderen Ländern für Baumaschinen im Untertagebau bereits obligatorisch ist, und die in der Schweiz zur Zeit auch über Tage an rund 1'600 Baumaschinen eingesetzt wird.

Die Nachrüstung von Baumaschinen mit Partikelfiltern verursacht der Bauwirtschaft und damit letztlich den Bauherrschaften zusätzliche Kosten und Aufwendungen.

Um diese Kosten mit dem volkswirtschaftlichen Nutzen, der durch die Vermeidung von Gesundheitskosten entsteht, vergleichen zu können, ist der vorliegende Bericht erstellt worden. Dabei wurden für verschiedene Szenarien die bis 2020 aufsummierten, gesamten Nachrüstkosten (Investition und Betrieb) sowie die Monetarisierung der dadurch verminderten Gesundheitskosten berechnet.

Der Kostenvergleich zeigt, dass der Einsatz von wirksamen Partikelfiltersystemen nach dem Stand der Technik bei Baumaschinen einen klaren volkswirtschaftlichen Nutzen ergibt.

Bundesamt für Umwelt,
Wald und Landschaft

Gerhard Leutert
Chef der Abteilung Luftreinhaltung und
NIS

Zusammenfassung

Im Teil A «Kosten-Betrachtung» des vorliegenden Berichtes werden die Luftschadstoff-Reduktionspotenziale durch Filternachrüstungen bei Baumaschinen sowie deren Kosteneffizienz untersucht. Dazu werden die Partikelemissionen der Baumaschinen während der Jahre 2002 bis 2020 berechnet, und zwar *ohne* Nachrüstung mit Partikelfiltern (=Referenz-Szenario), wie auch *mit* Nachrüstung (in drei verschiedenen Ausgestaltungsvarianten). Dazu werden jeweils die Kosten der Nachrüstung ermittelt. Die Kosteneffizienz kann dann anhand der Vermeidungskosten (Franken pro Tonne vermiedener PM-Emission) beurteilt werden.

Zu diesem Zweck wird der Baumaschinenpark mit einem Bestandesmodell nachgebildet, indem Zu- und Abgänge modelliert werden; Kapitel 2 erläutert die entsprechenden Grundlagen sowie die Annahmen bezüglich Emissionsfaktoren und bezüglich Nachrüstungskosten. In Kapitel 3 werden die Auswirkungen, d.h. die Emissionen und die Kosten verschiedener Nachrüstungsszenarien und in Kapitel 4 die Kosteneffizienz dargestellt.

Die Berechnungen zeigen auf, dass die Gesamtemissionen durch die Nachrüstung von Baumaschinen mit Partikelfiltern über die nächsten 20 Jahre noch um rund zwei Drittel bis drei Viertel gesenkt werden können. Die Kosten dafür betragen im Mittel rund 60–85 Mio Fr. pro Jahr. Die Kosteneffizienz, d.h. die PM-Reduktion pro investierten Franken, beträgt im Mittel rund 163 SFr. pro Tonne vermiedener PM-Emission und ist damit vergleichsweise gut (wobei die Umrüstung der kleinen Maschinen pro investierten Franken im Durchschnitt weniger Partikelemissionen zu reduzieren vermag als jene grosser Maschinen).

Die summierten Gesamtkosten, die durch die Nachrüstungen der Baumaschinen (ohne Maschinen <18 kW) mit Partikelfiltern bis 2020 für Filtereinbau und variable Kosten zu erwarten sind, betragen rund 1'360 Mio. SFr.

Im Teil B «Nutzen-Betrachtung» des Berichtes wird in Kapitel 6 der Anteil von Industrie und Gewerbe an der PM10-Luftbelastung dargelegt. Kapitel 7 zeigt das Potential der Partikelfilter bei der Reduktion der Feinstpartikel. Im Kapitel 8 werden die Auswirkungen der Dieseleruss-Emissionen von Baumaschinen auf die Bevölkerung quantifiziert und schliesslich die dadurch verursachten Gesundheitskosten berechnet.

Aus zahlreichen epidemiologischen Studien aus der ganzen Welt ist bekannt, dass bei kurzfristig erhöhten Feinstpartikel-Belastungen vermehrt Beschwerden und Erkrankungen der Atemwege bei Kindern und Erwachsenen auftreten. So zum Beispiel Anfälle von Atemnot, chronischer Husten und Auswurf, akute Bronchitis sowie Atemwegsinfektionen. Die verschmutzte Atemluft führt zu einer Verminderung der Lungenfunktion, auch bei gesunden Personen, sowie zu einer Zunahme von Arztbesuchen, Notfallkonsultationen, Hospitalisierungen und Todesfällen, die auf Atemwegserkrankungen zurückgehen. Bei den kurzfristigen Folgen von erhöhter Schadstoffbelastung sind auch Herzkrankheiten sehr wichtig. Herzrhythmus-Störungen nehmen zu und das Herzinfarkttrisiko steigt.

Eine chronisch erhöhte Feinpartikel-Exposition vermindert in der Bevölkerung generell die Lungenfunktion und kann zu einer chronischen Bronchitis bei Kindern und Erwachsenen führen. Längerfristig angelegte epidemiologische Studien haben auch gezeigt, dass eine übermässige Langzeit-Schadstoffexposition weltweit die Sterblichkeit, verursacht durch Atemwegs- und kardiovaskuläre-Todesfälle, erhöht, was eine Verkürzung der Lebenserwartung bewirkt.

Besonders bedenklich ist überdies, dass feine Partikel, wie die Dieselpartikel der Abgase von Baumaschinen, in den heute in der Atemluft gemessenen Konzentrationen ein grosses kanzerogenes Potential aufweisen.

Rund 8'600 Tonnen feine Russpartikel würden durch den Einbau von Partikelfiltern in Baumaschinen zwischen 2002 und 2020 weniger emittiert werden. Die oben beschriebenen gesundheitlichen Auswirkungen würden zurückgehen. Der Gewinn für die öffentliche Gesundheit in der Schweiz wäre beträchtlich. Bis ins Jahr 2020 könnten so zum Beispiel rund 1240 vorzeitige Todesfälle, davon rund 170 Fälle wegen Lungenkrebs, verhindert werden. Bis 2020 könnten zudem rund 1'600 Fälle von chronischer Bronchitis bei Erwachsenen und rund 17'000 Fälle von akuter Bronchitis bei Kindern vermieden werden. Insgesamt könnten bis zu diesem Zeitpunkt rund 4'000 Mio. SFr. an Gesundheitskosten eingespart werden.

Als Fazit der Abklärungen sind durch den Einbau von Partikelfiltern in Baumaschinen für die Bauwirtschaft bis 2020 aufsummierte Gesamtkosten von rund 1'360 Mio. Fr. zu erwarten, während die Einsparungen bei den Gesundheitskosten rund 4'000 Mio. SFr. betragen werden.

A Kosten-Betrachtung

1 Grundlagen und Annahmen

1.1 Segmentierung

Die Emissionen von Baumaschinen ermitteln sich gemäss folgender Formel:

$$\text{Emission} = \text{Anzahl Maschinen} * \text{Betriebsstunden} * \text{Emissionsfaktor (in g/h)}$$

Emissionsfaktoren, aber auch Betriebsstunden variieren je nach Segment, d.h. je nach Grösse bzw. Leistung der Baumaschinen. In Übereinstimmung mit den bisherigen Arbeiten wird deshalb eine Segmentierung des Bestandes der Baumaschinen entlang ihrer Motorenleistungen vorgenommen. Gegenüber BUWAL (1994) handelt es sich um eine Aggregierung, da damals zusätzlich nach den Funktionen der einzelnen Baumaschinen differenziert wurde.

Bei der Bestimmung der Eigenschaften (wie z.B. jährliche Betriebsstunden) der jeweiligen Leistungsklassen werden die Aggregierungen immer auf der Grundlage von 1994 durchgeführt, um die durchschnittlichen Eigenschaften der Segmente zu bestimmen, so dass die Gesamtwerte (z.B. Bestände, Emissionen) des Jahres 1990 reproduziert werden.

In Analogie zur EU-Richtlinie EU-R 97/68 EG werden folgende Leistungsklassen unterschieden:

- <18 kW
- 18–37 kW
- 37–75 kW
- 75–130 kW
- 130–560 kW

(Die Anzahl der Baumaschinen mit einer Leistung >560 kW ist so gering, dass darauf verzichtet wurde, diese in einer separaten Leistungsklasse aufzuführen; sie werden der Leistungsklasse 130–560 kW zugewiesen.)

1.2 Bestandesmodell

Der Bestand des Maschinenparks über den interessierenden Zeitraum lässt sich durch Neuzugänge und Abgänge (Geräte, die aus dem Verkehr gezogen werden) simulieren. Demnach werden die zwei Kenngrössen Neuzulassungen und Lebensdauer benötigt.

1.2.1 Neuzulassungen

Die Beschreibung der Neuzulassungen erfolgt in 4 Phasen:

- Für den Zeitraum 1950–1981 liegen keine Angaben zu den Neuzulassungen vor. Diese werden deshalb auf der Grundlage der Bauausgaben gemäss BFS und den Neuzulassungen 1981–1991 abgeschätzt. Die verwendete Formel¹ wird in ihrem

¹ $\text{Neuzulassungen} = 427,7 * e^{0,0262 * \text{Index}_{\text{Bauausgaben}}}$

Nullpunkt angepasst, so dass der Bestand von 47'300 Maschinen im Jahre 1990 gemäss BUWAL (1994) erreicht werden.

- Für den Zeitraum 1981–1991 werden die Neuzulassungen gemäss BUWAL (1994) verwendet, welche auf der Verkaufstatistik des VSBM (Verband schweizerischer Baumaschinenfabrikanten und Handelsfirmen) basieren.
- Für den Zeitraum 1992–2000 sind diese Werte nicht vorhanden. Sie werden auf der Grundlage der Verkaufstatistik eines Marktführers (gleiche relative Veränderungen der Verkäufe über den Zeitraum) hochgerechnet.
- Ab 2000 werden die Neuzulassungen so gewählt, dass der Gesamtbestand konstant bleibt.

Bei der Aufteilung der Neuzulassungen auf die einzelnen Segmente werden – soweit vorhanden – die vorhandenen Zahlen aus BUWAL (1994) verwendet. Für den Zeitraum vorher und nachher werden konstante Anteile geschätzt.

1.2.2 Lebensdauer

Die Kurven zur Lebensdauer der Maschinen verschiedener Segmente werden aufgrund der Zuordnung der Maschinen zu Verschleisstypen² und der in BUWAL (1994) geschätzten Verschleisstypen ausgerechnet, indem der «Verschleissmittelwert» aller Maschinen eines Segmentes berechnet wird. Dadurch resultieren die in Abbildung 1 dargestellten Überlebenskurven für die definierten Leistungsklassen. Diese Kurven ergeben eine Lebenserwartung der Maschinen zwischen 10 (<18 kW) und 17 (>130 kW) Jahren.

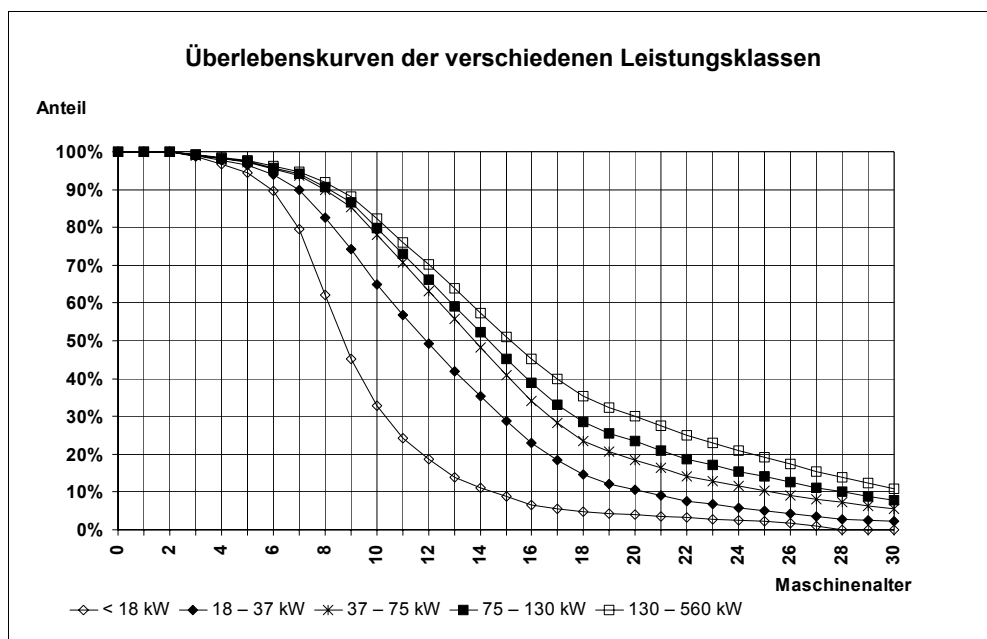


Abbildung 1: Überlebenswahrscheinlichkeiten der verschiedenen Leistungsklassen der Baumaschinen (Lebebeispiel: Nach 12 Jahren sind noch ca. 20% der Maschinen der Klasse <18 kW im Einsatz, aber noch gut 70% der Klasse 130–560 kW).

² In BUWAL (1994) wurden die verschiedenen Baumaschinensegmente sog. Verschleisstypen zugewiesen.

1.2.3 Bestandeseentwicklung

Aufgrund der oben beschriebenen Inputdaten ergibt sich folgende Bestandeseentwicklung:

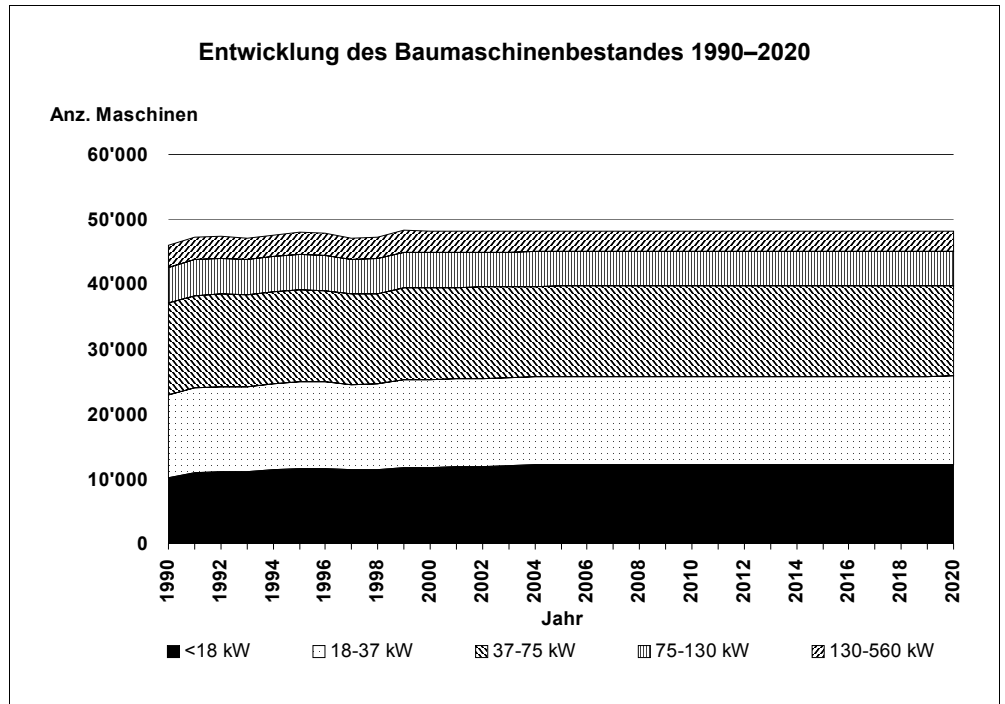


Abbildung 2:
Resultierende Entwicklung des Baumaschinenbestandes 1990–2020 nach Leistungsklassen (vgl. Anhang 1)

1.3 Betriebsstunden

Die jährliche Einsatzdauer von Baumaschinen variiert sowohl nach Leistungsklasse als auch nach dem Alter. Für die vorliegende Modellierung wurde aber unterstellt, dass sich die durchschnittliche jährliche Einsatzdauer der Maschinen einer Leistungsklasse über den betrachteten Zeitraum (2002–2020) nicht verändert.

Im Durchschnitt sind die kleinen Maschinen weniger lang im Einsatz als die Grossen. Zusätzlich nimmt die Einsatzdauer der Maschinen mit fortschreitendem Alter ab, da im Zweifelsfall Maschinen mit aktuellerer Technologie verwendet werden. Bei den sehr alten Geräten handelt es sich vielfach nur mehr um Ersatzgeräte.

Die entsprechenden Werte sind gemäss BUWAL (1994) gewählt worden, so dass die Gesamteinsatzzeiten für 1990 reproduziert werden.

Tabelle 1: Durchschnittliche jährliche Einsatzdauer nach Leistungsklasse [Bh/a] über alle Altersklassen [Hinweis: Neue Maschinen haben entsprechend längere Einsatzzeiten].

Durchschnittliche Jährliche Einsatzdauer nach Leistungsklasse [Bh/a]					
Segment	<18 kW	18–37 kW	37–75 kW	75–130 kW	130–560 kW
Betriebsstunden [Bh/a]	195	344	400	518	623

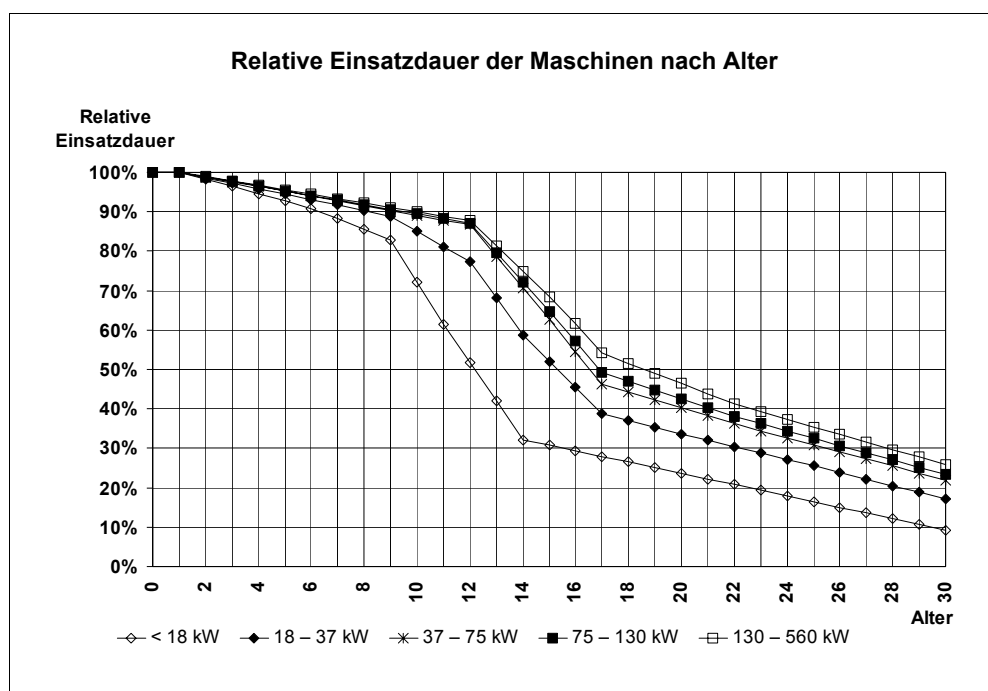


Abbildung 3: Veränderung der jährlichen Betriebsstunden in Abhängigkeit des Alters der Baumaschinen nach BUWAL (1994)

1.4 Emissionsfaktoren

Das Ergebnis der Emissionsberechnung wird wesentlich durch die unterstellten Emissionsfaktoren geprägt. Diese sind u.a. abhängig von den gesetzlichen Rahmenbedingungen. Insbesondere ist die EU-Richtlinie EU-RL 97/68 EG zu berücksichtigen. Dabei werden zwei Emissionsstufen («EU1», «EU2») mit unterschiedlichem Einführungsdatum unterschieden. In der nachstehenden Tabelle sind die verwendeten Emissionsfaktoren gemäss EU-RL 97/68 EG dargestellt. Abbildung 4 zeigt, wie sich die beiden Emissionsstufen im Maschinenpark umsetzen.

Die neuen Grenzwerte gemäss Stufe «EU1» reduzieren die Emissionen in vergleichsweise geringem Umfang, wenn angenommen wird, dass die entsprechenden Maschinen die Grenzwerte um durchschnittlich 10% unterschreiten werden. Die Stufe «EU2» wird demgegenüber spürbarere Wirkungen zeigen. Die Einführung von Partikelfiltern (entsprechend EU3) ist noch unsicher und wird in der vorliegenden Modellierung nicht berücksichtigt.

Bei der Nachrüstung von Maschinen mit Filtern wird einheitlich für alle Emissionsniveaus von einer Reduktion der Partikelemissionen um 95% des Ausgangswertes ausgegangen.

Tabelle 2: Unterstellte Emissionsfaktoren (EF) nach Leistungsklasse (Quellen: «vor EU» gemäss BUWAL 1994, die EF EU1 resp. EU2 entsprechen 90% der jeweiligen Grenzwerte [BUWAL 2000a])

Emissionsfaktoren (EF)						
Leistungs- klasse	EF «vor EU» [g/Bh]	EF EU1 [g/Bh]	EF EU2 [g/Bh]	Niveau EU1 im Vergleich zu «vor EU» [%]	Niveau EU2 im Vergleich zu «vor EU» [%]	Einführungs- zeitpunkt (EU1 ³ /EU2)
<18 kW	20,7	-	-	-	-	-/-
18–37 kW	36,8	-	20,2	-	55%	-/2001
37–75 kW	54,3	42,1	19,8	77%	36%	2000/2003
75–130 kW	81,6	63,0	27,0	77%	33%	2000/2002
130–560 kW	123,8	121,5	45,0	98%	36%	2000/2001

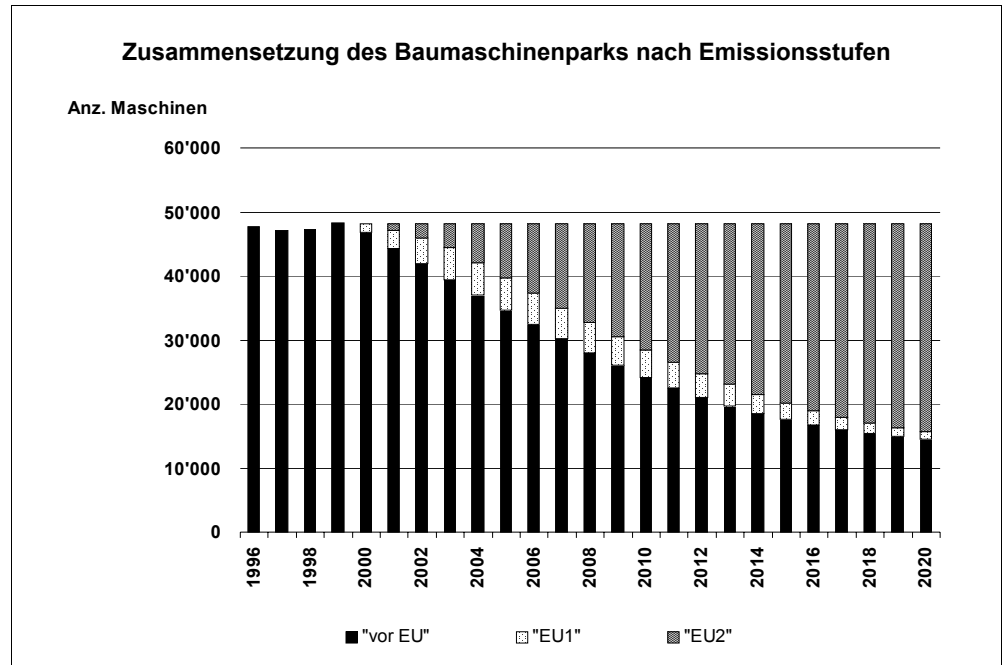


Abbildung 4:
Die Emissionsstufen setzen sich sukzessive im Maschinenpark um (Zahlen in Anhang 2, zusätzlich differenziert nach Segmenten).

³ Einführungstermin gemäss Richtlinie 97/68/EG des europäischen Parlaments wäre 30.6.2000. Im Sinne einer Vereinfachung werden aber schon sämtliche Neumaschinen des Jahres 2000 der Emissionsstufe EU1 zugewiesen.

1.5 Filterkosten

Analog zu den Emissionsberechnungen für die Zeitreihe 2002–2020 werden auch die Nachrüstungskosten berechnet. Diese werden gemäss nachstehender Kostenstruktur nach TTM (2001) berechnet. Die variablen Kosten werden gleichmässig über alle Betriebsstunden verteilt. D. h. es werden keine sprunghaften Kosten bei Ersatz der Filter u.ä. berücksichtigt, die nötigen Rückstellungen werden gleichmässig allen Betriebsstunden zugewiesen.

Tabelle 3: Übersicht über die Kostenstruktur von Baumaschinen gemäss TTM (2001)

Kostenstruktur von Partikelfiltern bei Baumaschinen					
Segment (kW)	<18	18–37	37–75	75–130	130–560
Gewichtetes Mittel (kW)	15	28	55	100	250
Lastfaktor (-)	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
Kaufpreis [Fr/ Masch.]	3150	4760	6875	9500	16250
Einbaukosten [Fr/Masch.]	1000	1300	1500	2000	2500
Wartungskosten (Waschen) [Fr/2000 Bh]	500	750	1000	1500	2000
Regenerationskosten [Fr/1000 Bh]	100	150	300	500	1200
Messkontrollen [Fr/a*Masch.]	100	150	200	250	250
Treibstoffmehrverbrauch [%]	4	4	3	3	2
Ersatzkosten [Fr/5000 Bh]	2520	3800	5500	7600	13000

Die Kostenstruktur gemäss Tabelle 3 wird umgerechnet in fixe Umrüstungskosten (Kaufpreis und Einbau), gebrauchsbhängige variable Kosten (Wartung, Regeneration, Treibstoffmehrverbrauch⁴, Rückstellungen für Ersatz) sowie bestandesabhängige Kosten (Kontrollen). Für die weiteren Berechnungen werden je Leistungsklasse die in Tabelle 4 dargestellten Werte verwendet.

Tabelle 4: Kosten der Partikelfilternachsrtung pro Baumaschine, wie im Modell berücksichtigt

Kosten von Partikelfiltern pro Baumaschine wie im Modell berücksichtigt					
Segment (kW)	<18	18–37	37–75	75–130	130–560
Fixkosten bei Einbau [Fr]	4150	6060	8375	11500	18750
Variable Kosten bei Gebrauch [Fr/Bh]	1,01	1,59	2,29	3,47	5,62
Jährliche Fixkosten [Fr/a]	100	150	200	250	250

⁴ Die Kosten des Treibstoffmehrverbrauchs berechnen sich aus den Verbrauchsangaben gemäss BUWAL (1994), sowie dem durchschnittlichen Dieselpreis (1,41 Fr/l) 2000 und 2001 gemäss OZD.

2 Szenarien: Emissionen und Kosten

2.1 Definition der Szenarien

Die Partikelemissionen sowie die Nachrüstungskosten werden für den Zeitraum 2002–2020 für vier Szenarien berechnet werden. Die Szenarien unterscheiden sich bezüglich der Nachrüstung der Baumaschinen mit Partikelfiltern, hingegen nicht hinsichtlich der Einführung und der Ausgestaltung der Abgasgrenzwerte nach den Normen EU1 und EU2, welche je nach Segment für den Zeitraum 2000–2003 vorgesehen sind (siehe Kapitel 1.4). Folgende Szenarien werden berechnet:

- Referenzszenario: Keine Nachrüstung mit Partikelfiltern
- Szenario A: «Baurichtlinie»⁵: Nachrüstung aller Leistungsklassen der Baumaschinen mit Partikelfilter, wobei im Jahr 2002 pro Leistungsklasse 20% des Bestandes nachgerüstet werden (jeweils die jüngsten Maschinen), 2003 die Ausrüstung auf 40% erhöht wird (Ausrüstung Neumaschinen plus Nachrüstung der alten Maschinen bis der Anteil erreicht), 2004 Erhöhung auf 60% und 2005 auf 80%.
- Szenario B: «Baurichtlinie ohne Maschinen <18 kW»): Nachrüstung analog Szenario A «Baurichtlinie». Die Leistungsklasse <18 kW wird jedoch nicht mit Partikelfiltern nachgerüstet.
- Szenario C: «Baurichtlinie ohne Maschinen <37 kW»): Nachrüstung analog Szenario A «Baurichtlinie». Die Leistungsklassen <37 kW werden jedoch nicht mit Partikelfiltern nachgerüstet.

2.2 Emissionsentwicklung 2002–2020

Die Entwicklung der Emissionen der verschiedenen Szenarien ist in den nachstehenden Abbildungen 5–8 dargestellt. Die entsprechenden Zahlenwerte sind den Tabellen im Anhang (Anhang 3) zu entnehmen.

Abbildung 9 zeigt die Effekte aller Nachrüstungsszenarien auf die jeweiligen Jahresemissionen relativ zum Referenzfall. Durch die Nachrüstung nimmt der relative Ausstoss bis 2005 je nach Szenario auf 40–20% des Referenzfalls ab. Bei den Szenarien A: «Baurichtlinie» und B: «Baurichtlinie ohne <18 kW» sinken die relativen Anteile im Zuge der Ausrüstung der Neumaschinen weiter ab, beim Szenario C: «Baurichtlinie ohne <37 kW» bleibt der Anteil anschliessend mehr oder weniger konstant, da die Maschinen der Leistungsklasse 18–37 die EU2-Norm ab 2002 auch im Referenzfall zu erfüllen haben.

⁵ Nach der definitiven Baurichtlinie Luft (Inkraftsetzung: 1.9.2002) betrifft die Pflicht zur Ausrüstung von Baumaschinen mit Partikelfiltern nur Baumaschinen auf sog. „Grossbaustellen“ gemäss Definition in Kapitel 4.2 der Richtlinie. Zudem sind die Baumaschinen <18 kW von dieser Auflage ausgenommen.

Abbildung 5:
Entwicklung der Partikel-
emissionen in Tonnen
pro Jahr nach Leistungs-
klassen 2002–2020 im
Referenzszenario

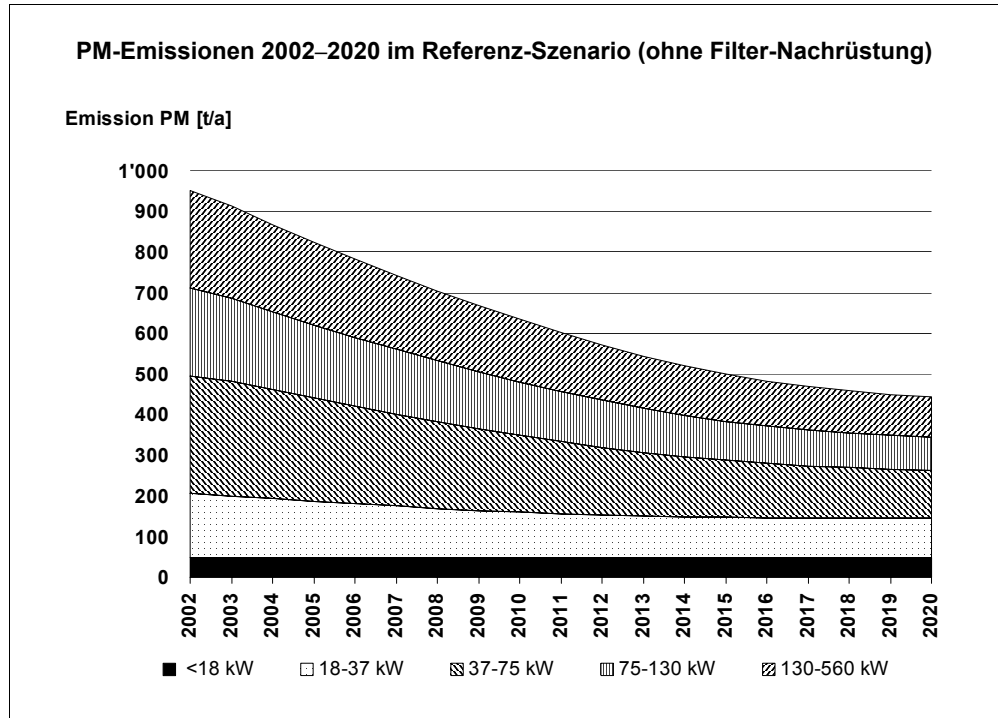


Abbildung 6:
Entwicklung der Partikel-
emissionen in Tonnen
pro Jahr nach Leistungs-
klassen 2002–2020 im
Szenario A: «Baurichtli-
nie»

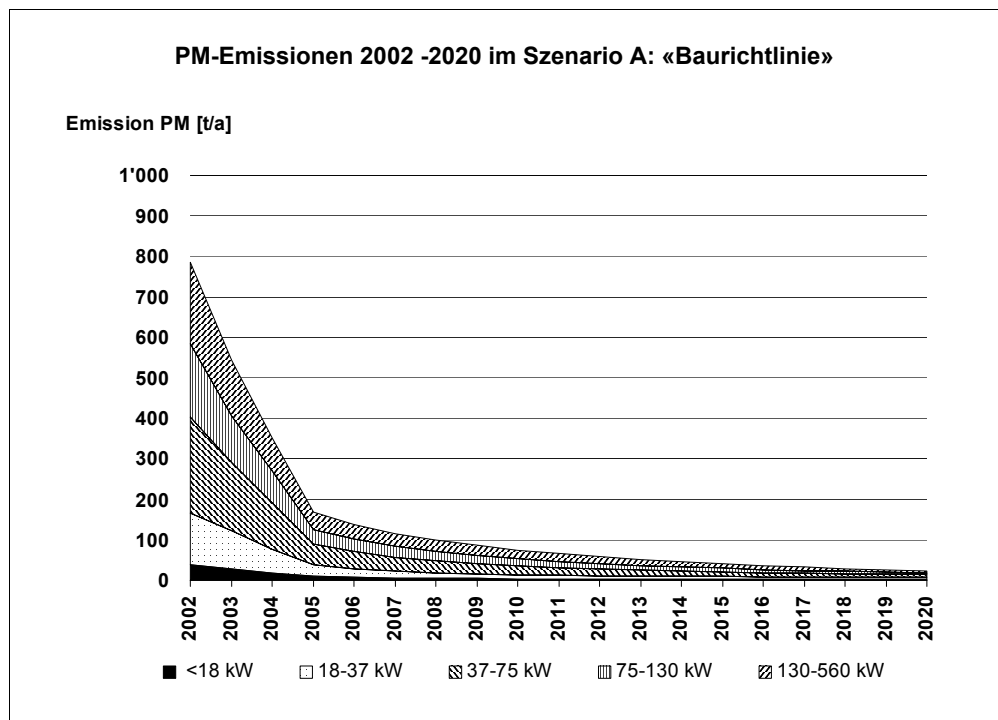


Abbildung 7:
Entwicklung der Partikel-
emissionen in Tonnen
pro Jahr nach Leistungs-
klassen 2002–2020 im
Szenario B: «Baurichtli-
nie ohne Nachrüstung
von Baumaschinen
<18 kW»

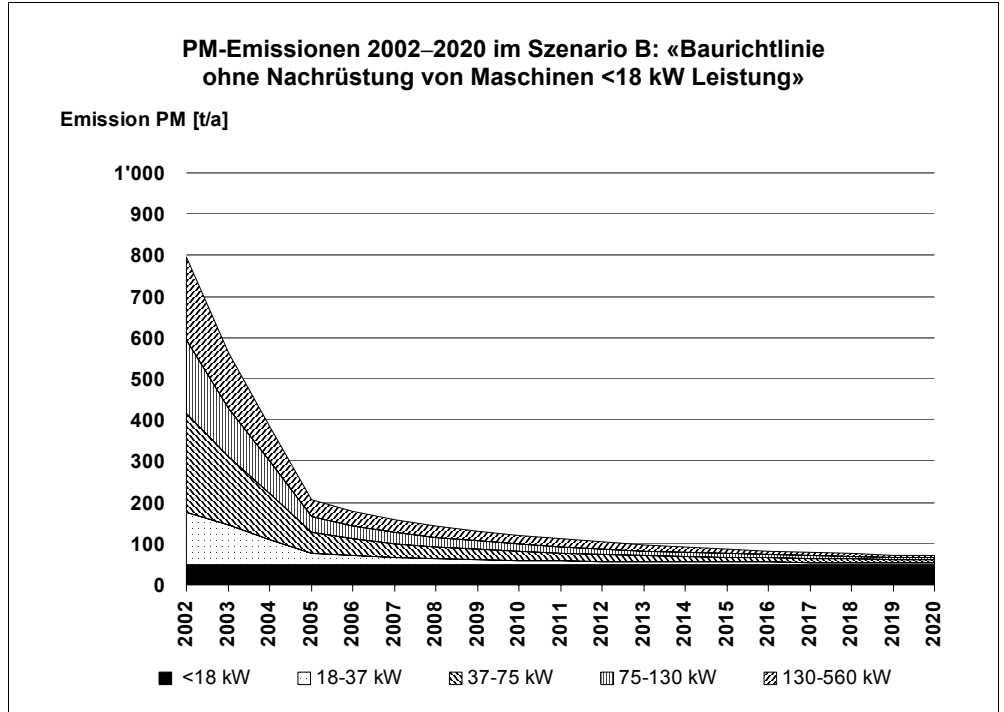


Abbildung 8:
Entwicklung der Partikel-
emissionen in Tonnen
pro Jahr nach Leistungs-
klassen 2002–2020 im
Szenario C: «Baurichtli-
nie ohne Nachrüstung
von Baumaschinen
<37 kW»

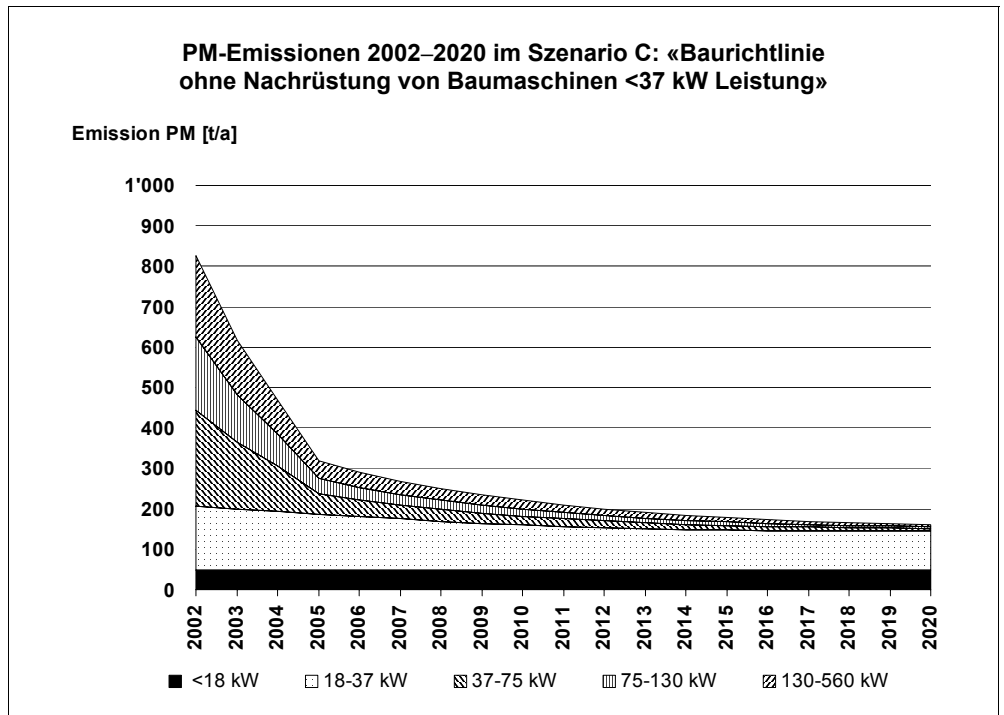
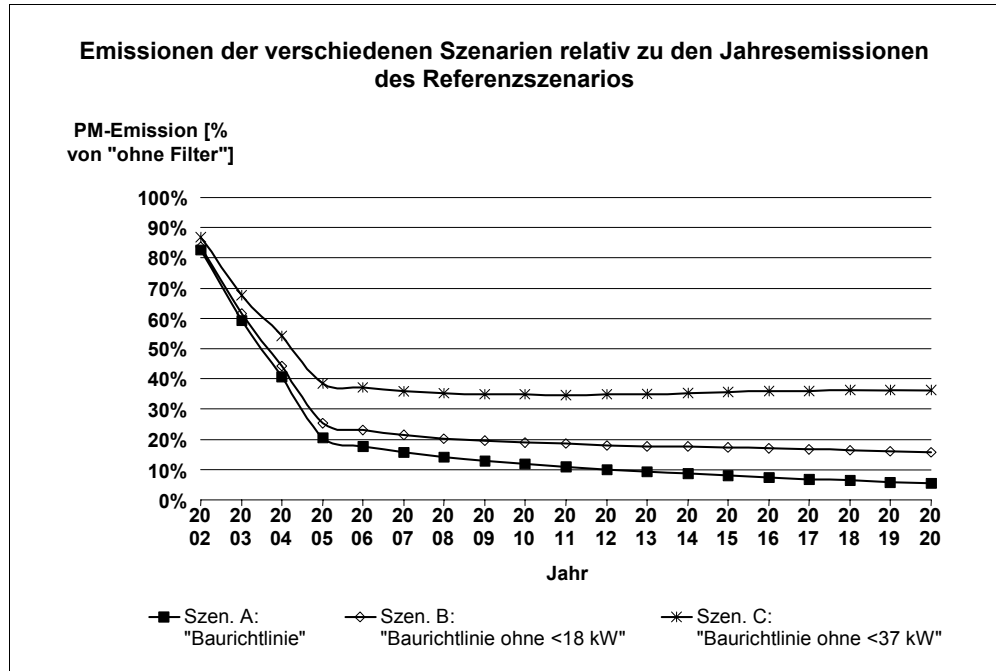
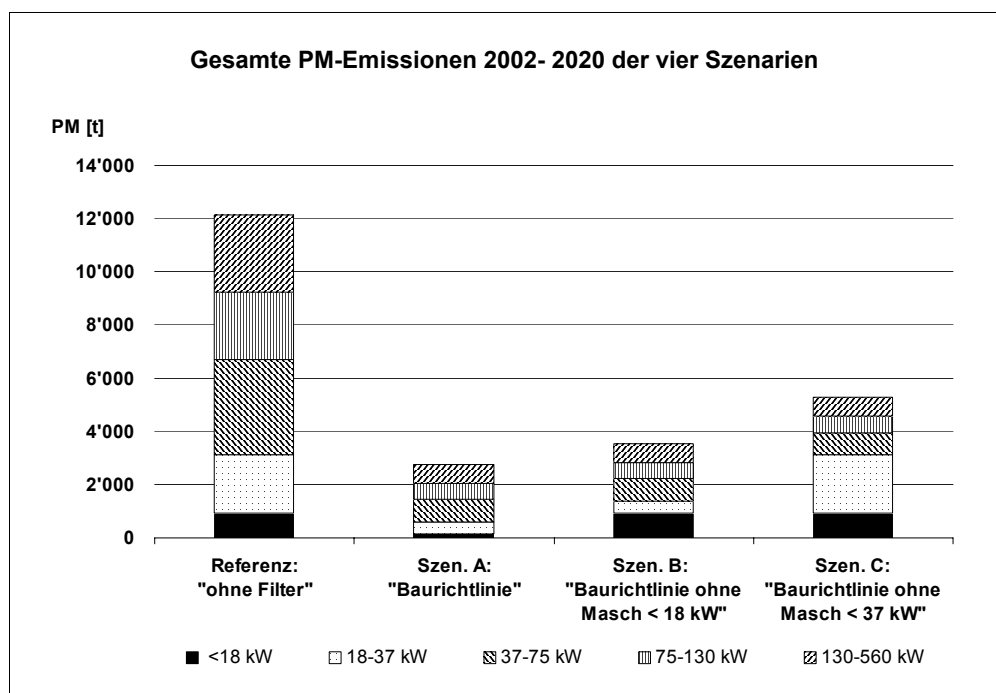


Abbildung 9:
Relative Jahresemissionen der Szenarien bezogen auf den Referenzzustand (= 100% im jeweiligen Jahr)



Die folgende Darstellung fasst die Emissionsreduktionen über den gesamten Zeitraum 2002–2020 zusammen. Das Szenario A: «Baurichtlinie» führt zu einer gesamthaften Einsparung von 77% der Emissionen gegenüber dem Referenzfall, beim Verzicht auf Umrüstung bei den kleinen Maschinen reduziert sich diese Einsparung auf 71% resp. 56%.

Abbildung 10:
Gesamtemissionen PM in [t] im Zeitraum 2002–2020 für die verschiedenen Szenarien



2.3 Kosten der Szenarien

Die nachstehende Abbildung zeigt die Gesamtkosten, die durch die Nachrüstungen verursacht werden (Filtereinbau und variable Kosten). Szenario A: «Baurichtlinie» erfordert im betrachteten Zeitraum ca. 1,55 Mia. Fr. (für Kostenannahme je Maschine siehe Kapitel 1.5), für die übrigen Szenarien reduzieren sich die benötigten Finanzmittel um 11% resp. 31%. Die Zahlenwerte finden sich im Anhang (Anhang 4).

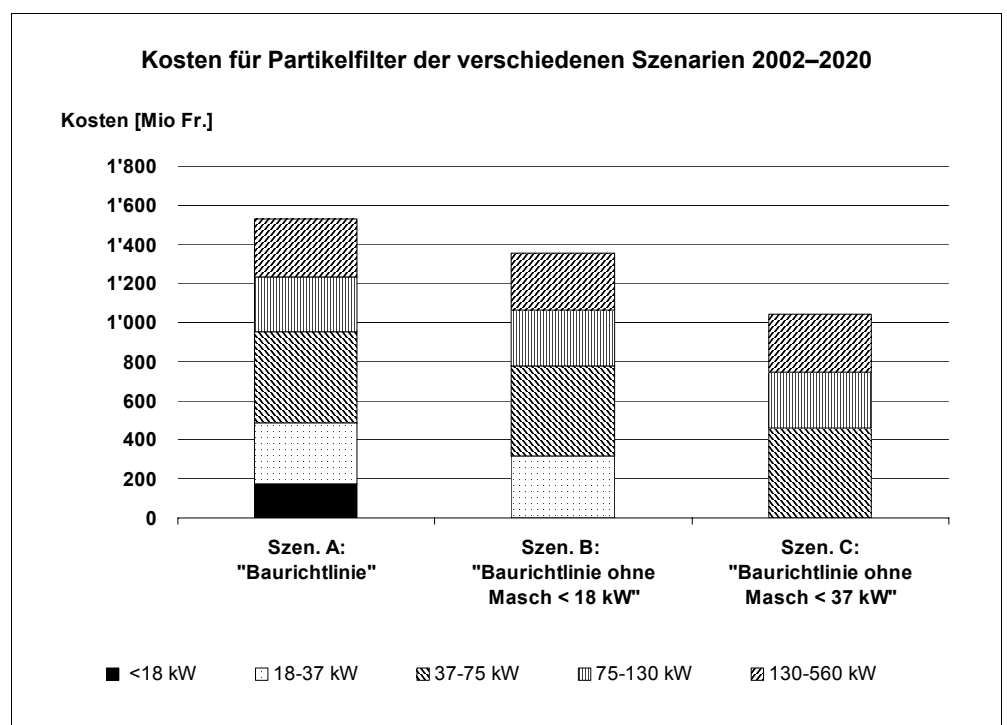


Abbildung 11;
Totale Kosten der verschiedenen Umrüstungs-szenarien in Mio. Fr.

Die Kosten fallen jedoch nicht gleichverteilt über den gesamten Zeitraum an, vielmehr ist in den ersten Jahren für die Umrüstungen mit einem höheren Finanzaufwand zu rechnen (siehe Abbildung 12). Nach 2005 fallen dann nur noch die variablen Kosten und die Umrüstungskosten der Neumaschinen an. Abbildung 13 zeigt die entsprechende Verteilung für das Szenario A: «Baurichtlinie».

Abbildung 12:
Kosten der verschiedenen Umrüstungsszenarien in Mio. Fr. zwischen 2002 und 2006

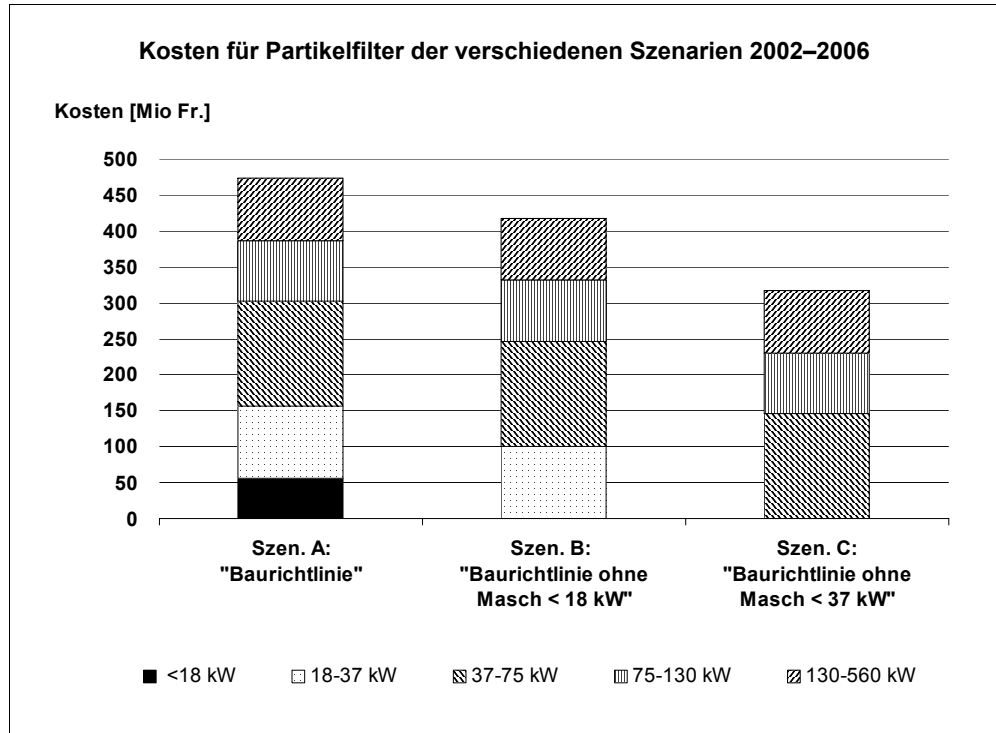
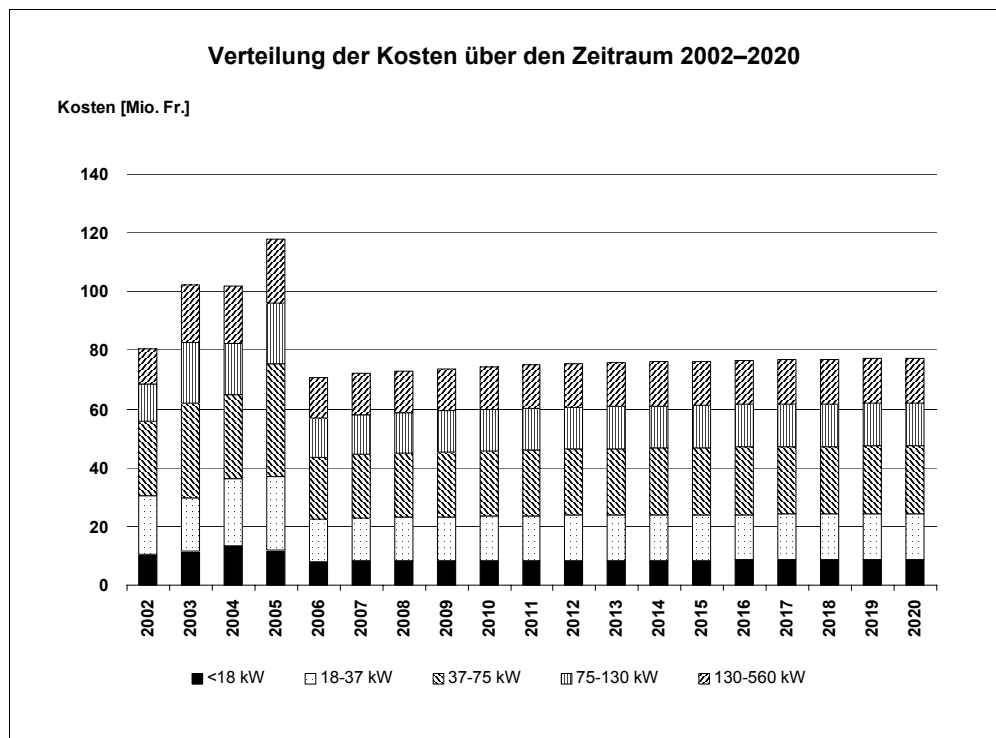


Abbildung 13:
Verteilung der Kosten über den Zeitraum 2002–2020 für das Szenario A: «Baurichtlinie» (Vgl. Anhang 4).



3 Kosteneffizienz

3.1 Vergleich der Szenarien

Die folgende Tabelle zeigt die Kosteneffizienz der Umrüstung nach Leistungsklasse und Segmenten, ausgedrückt in Fr. pro Tonne vermiedener PM-Emission. Demnach ist es am effizientesten, primär die grossen Maschinen umzurüsten. Dies ist auf die grösseren Einsatzzeiten und Lebenserwartungen dieser Maschinen zurückzuführen. Die Umrüstungskosten und die jährlich pro Maschine anfallenden Kosten können auf diese Weise auf mehr Betriebsstunden verteilt werden als bei den kleinen Maschinen. Deshalb ergibt sich bei den Szenarien mit steigender Leistungsgrenze für die Umrüstung eine zunehmende Effizienz der eingesetzten Mittel bzw. eine geringere Kosten je Tonne vermiedener PM-Emission.

Tabelle 5: Kosteneffizienz der Umrüstungsszenarien und der Umrüstung der einzelnen Leistungsklassen (Hinweis: Es sind nur Nutzen und Kosten, welche 2002–2020 anfallen, berücksichtigt).

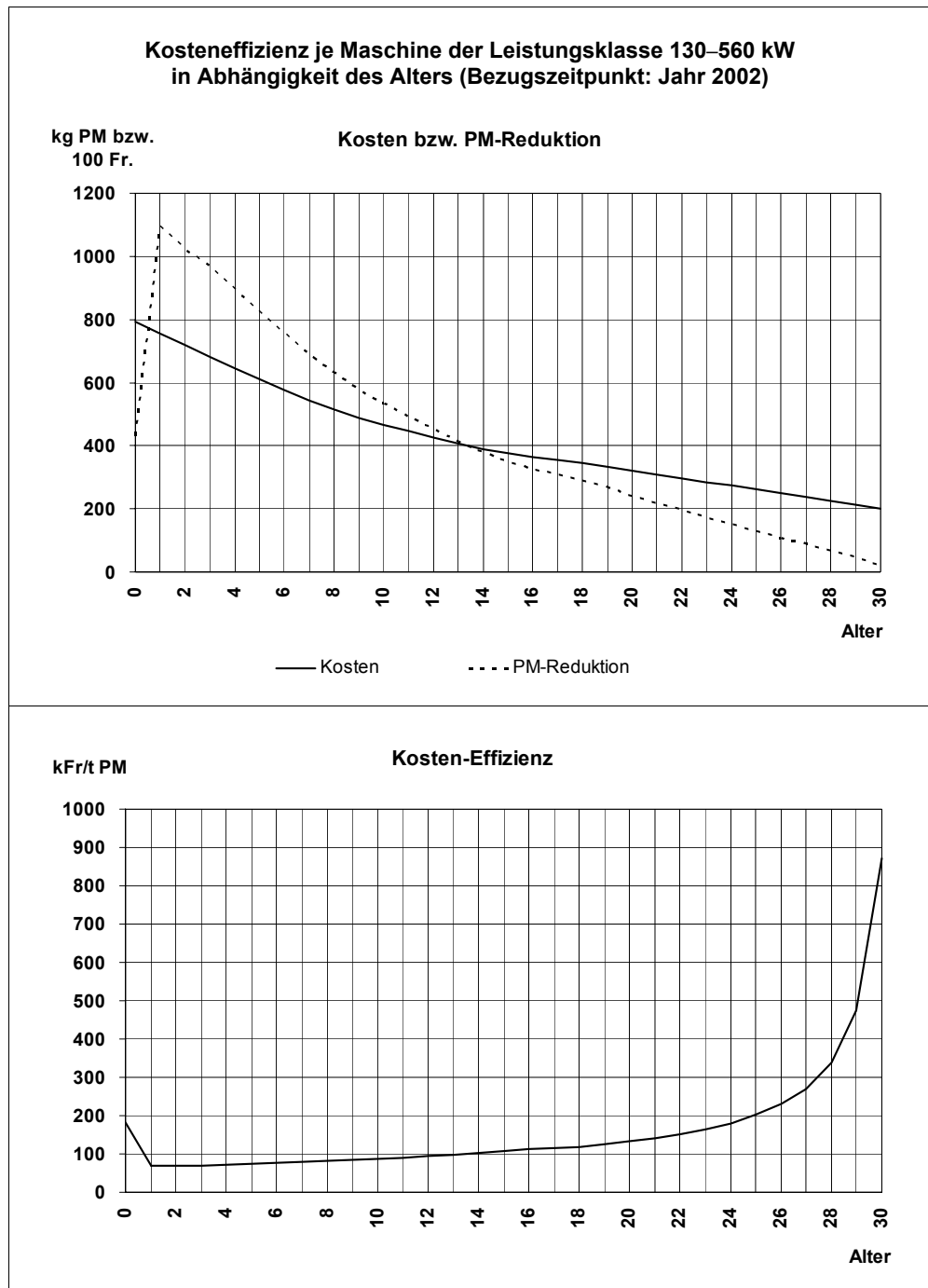
Kosteneffizienz 2002–2020 in [1000 Fr. pro Tonne PM-Vermeidung]	
	Kosten/Nutzen
Nach Leistungsklasse	
<18 kW	222
18–37 kW	182
37–75 kW	169
75–130 kW	149
130–560 kW	133
Nach Szenario	
Durchschnitt «Baurichtlinie»	163
Durchschnitt «Baurichtlinie ohne <18 kW»	158
Durchschnitt «Baurichtlinie ohne <37 kW»	152

3.2 Optimierung der Nachrüstung

Die Kosteneffizienz einer Umrüstung zu einem fixen Zeitpunkt variiert nicht nur innerhalb einer Leistungsklasse, sondern kann auch je nach Alter und Einsatzbereich der Maschine (unterschiedliche Lastfaktoren, Einsatzzeiten, usw.) stark variieren. Bei einer Kostenoptimierung der Umrüstungsvorschriften sollte deshalb eine weitere Differenzierung nach Alter und Einsatzbereich ins Auge gefasst werden. Zu diesem Zweck muss allerdings eine andere Methodik angesetzt werden (analog BUWAL 2000a): Im folgenden wird aufgezeigt, wie viele PM-Emissionen vermieden werden bzw. welche Kosten bezogen auf die gesamte restliche Lebensdauer bis zur Ausmusterung entstehen, wenn Geräte der gleichen Leistungsklasse, aber unterschiedlichen Alters umgerüstet werden. Im Sinne einer Illustration werden die Verhältnisse der Leistungsklasse 130–560 kW sowie 37–75 kW für das Jahr 2002 nach Alter der Maschinen dargestellt (Zahlen siehe Anhang 5).

Abbildung 14:
 Im oberen Teil der Abbildung werden Einsparungspotenzial und Filterkosten je Maschine der Leistungsklasse 130–560 kW in Abhängigkeit des Alters aufgezeigt, im unteren Teil die Kosteneffizienz in 1000 Fr. pro Tonne PM.

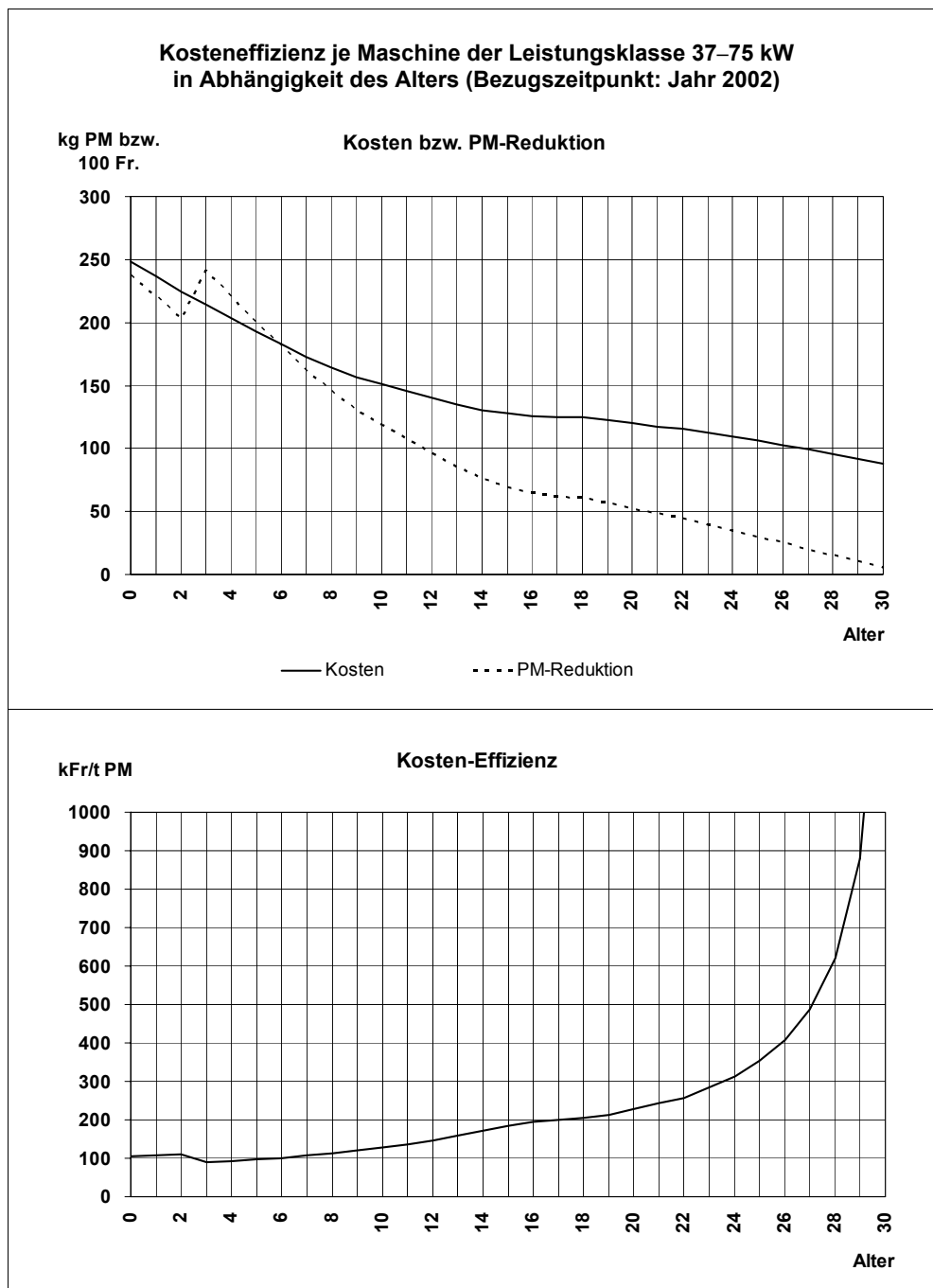
Lesebeispiel: Die Nachrüstung einer Maschine mit Baujahr 2002 zum Zeitpunkt 2002 verursacht Gesamtkosten für den Zeitraum 2002–2020 von ca. 80'000 Fr. und reduziert die PM-Emissionen im gleichen Zeitraum um ca. 430 kg. Die Nachrüstung im Jahr 2002 einer dreijährigen Maschine verursacht Kosten von ca. 68'000 Fr. bei einer Einsparung von 970 kg PM. (Zum Vergleich: die Anschaffungskosten einer Maschine dieser Leistungsklasse betragen ca. 350'000 Fr.)



In obiger Darstellung wird der Effekt der EU2-Grenzwerte auf die Kosteneffizienz deutlich: Da Neumaschinen im Jahr 2002 diese neuen Grenzwerte erfüllen, sinkt die Kosteneffizienz der Nachrüstung deutlich ab. Die EU1-Norm hat bei dieser Klasse hingegen kaum einen Einfluss, da sie die spezifischen Emissionsfaktoren der Maschinen kaum limitiert.

Abbildung 15:
Im oberen Teil der Abbildung werden Einsparungspotenzial und Filterkosten je Maschine der Leistungsklasse 37–75 kW in Abhängigkeit des Alters aufgezeigt, im unteren Teil die Kosteneffizienz in 1000 Fr. pro Tonne PM.

Lesebeispiel: Die Nachrüstung einer Maschine mit Baujahr 2002 zum Zeitpunkt 2002 verursacht Gesamtkosten für den Zeitraum 2002–2020 von ca. 25'000 Fr. und reduziert die PM-Emissionen im gleichen Zeitraum um ca. 240 kg. Die Nachrüstung im Jahr 2002 einer dreijährigen Maschine verursacht Kosten von ca. 22'000 Fr. bei einer Einsparung von 245 kg PM. (Zum Vergleich: die Anschaffungskosten einer Maschine dieser Leistungsklasse betragen ca. 90'000 Fr.)



Der Vergleich der Leistungsklasse 37–75 kW mit der Klasse 130–560 kW zeigt deutlich, dass die PM-Reduktion im Durchschnitt je investierten Franken schlechter ist. Gewisse Altersstufen der Maschinen 37–75 kW weisen aber zumindest ähnlich gute Kosteneffizienz auf wie die grossen Maschinen. Allerdings lässt die vergleichsweise kurze Lebenserwartung der Maschine (= hohe Ausfallquote) ab einem Alter 6–10 Jahren die Kosten einer PM-Reduktion stark ansteigen.

Aufgrund der späteren Einführung der Norm EU2 ergibt sich im Jahr 2002 noch keine Effizienzreduktion bei den Neumaschinen, hingegen ist der «Knick» der EU1-Einführung im Jahr 2000 zu erkennen (also bei dreijährigen Maschinen im Jahr 2002), da für diese Leistungsklasse bereits eine sichtbare Reduktion der spezifischen Emissionen verursacht wird.

4 Fazit

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die PM-Reduktion pro investierten Franken einer Filternachrüstung von Baumaschinen vergleichsweise sehr gut ist.

Die Kosteneffizienz, d.h. die PM-Reduktion pro investierten Franken, beträgt im Mittel rund 163 SFr. pro Tonne vermiedener PM-Emission. Um einen zielgerichteten Einsatz der Geldmittel zu gewährleisten, sollten entsprechende Regelungen aber nach Leistungsklassen differenziert werden. Die Kosten pro Tonne vermiedener Partikelemission variieren von 133 SFr. (grosse Maschinen) bis 222 SFr. (kleine Maschinen). Die Umrüstung der kleinen Maschinen vermag also pro investierten Franken im Durchschnitt weniger Partikelemissionen zu reduzieren als jene grosser Maschinen.

Für die Kosteneffizienz sind jedoch Alter resp. Emissionsniveaus der einzelnen Maschinen mindestens von gleicher Bedeutung wie die Leistungsklassen. Der Faktor zwischen der Kosteneffizienz von Maschinen der Klasse <18 kW und >130 kW beträgt ca. 1,7, zwischen einer einjährigen Maschine gemäss Grenzwert EU1 und einer Neuen, welche bereits dem Grenzwert EU2 genügt, aber 2,7 (Leistungsklasse >130 kW).

Aufgrund der variierenden Einsatzzeiten und Motorlasten könnte eine weitere Differenzierung der Analysen hinsichtlich Einsatzbereiche und Maschinentypen ähnliche Differenzen aufzeigen.

Die Berechnungen zeigen auf, dass die Gesamtemissionen durch die Nachrüstung von Baumaschinen mit Partikelfiltern über die nächsten 20 Jahre noch um rund zwei Drittel bis drei Viertel gesenkt werden können. Die Kosten dafür betragen im Mittel rund 60–85 Mio Fr. pro Jahr. Weitere Einflussfaktoren für die Kosteneffizienz sind Alter und Emissionsniveau der einzelnen Maschinen.

Die summierten Gesamtkosten, die durch die Nachrüstungen der Baumaschinen (ohne Maschinen <18 kW) mit Partikelfiltern bis 2020 für Filtereinbau und variable Kosten zu erwarten sind, betragen rund 1'360 Mio. SFr.

B Nutzen-Betrachtung

5 Ausgangslage

5.1 Luftreinhalte-Verordnung

Aufgrund der Beurteilung einer Vielzahl von wissenschaftlichen Studien hat der Bundesrat im März 1998 in der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) [LRV 1998] Immissionsgrenzwerte für lungengängigen Feinstaub (PM10) zum Schutz der Bevölkerung der Schweiz festgelegt. Sowohl der Tagesmittelwert von $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wie auch der Jahresmittelwert von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ werden heute jedoch in weiten Gebieten der Schweiz deutlich überschritten. Insgesamt leben ca. 60% der Bevölkerung in Gebieten, wo der Grenzwert nicht eingehalten wird.

Dieselschluss ist lungengängiger Feinstaub und hat überdies ein grosses kanzerogenes Potenzial [WHO 1989] und wird deshalb in der Luftreinhalte-Verordnung (Anhang 1 Ziff. 83 LRV), in der MAK-Liste der Suva [SUVA 1997] und in den MAK-Listen anderer Länder als Krebs erzeugender Stoff aufgeführt. Für Krebs erzeugende Schadstoffe gilt in der LRV das Minimierungsgebot. Durch den Einbau von Partikelfiltern lässt sich die kanzerogene Potenz des Dieselschlusses um mehr als 90% vermindern.

5.2 Definitionen (PM10, PM2.5, Russ)

PM10 sind feine, lungengängige Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser $\leq 10 \mu\text{m}$. PM10-Partikel werden noch in weitere Grössenbereiche unterteilt:

- ultrafeine Partikel (bis $0.08 \mu\text{m}$)
- Partikel im Akkumulationsbereich ($0.08\text{--}2.5 \mu\text{m}$)
- sogenannte «grobe Partikel» ($2.5\text{--}10 \mu\text{m}$).

Rund 75–80% der PM10-Partikel sind kleiner als $2.5 \mu\text{m}$ (PM2.5) und können bis in die tiefsten Abschnitte der Lunge eindringen.

PM10 ist ein komplexes physikalisch-chemisches Gemisch und besteht aus primär emittierten und sekundär gebildeten Partikeln natürlichen und anthropogenen Ursprungs.

- Die primären Partikel entstehen aus Verbrennungsprozessen aller Art (Verkehr, Industrie und Gewerbe, Haushalte, Land- und Forstwirtschaft). Diese primären Partikel werden vor allem als ultrafeine Teilchen emittiert. PM10 besteht zudem aus primären Teilchen aus mechanischen Prozessen (Abrieb, Aufwirbelung), welche oft als gröbere Partikel (grösser als $2.5 \mu\text{m}$) auftreten.
- Die sekundären Partikel werden erst in der Atmosphäre aus den emittierten Vorläufergasen NO_x (vorwiegend aus dem Strassenverkehr), SO_2 (vorwiegend aus Industrie/Gewerbe), NH_3 (vorwiegend aus der Landwirtschaft) und VOC (vorwiegend aus Industrie/Gewerbe) gebildet. Die sekundären Partikel wie Nitrate, Sulfate oder Ammonium bewegen sich zum grössten Teil im mittleren Grössenbereich (zwischen 0.08 und $2.5 \mu\text{m}$).

Chemisch gesehen bestehen die PM10-Partikel aus Russ (Elementarer Kohlenstoff EC und Organischer Kohlenstoff OC), aus Nitrat, Sulfat, Ammonium, sekundären organischen Aerosolen, biogenem Material, mineralischem Material, Schwermetallen, Salz, Wasser und weiteren, teilweise noch nicht identifizierten Bestandteilen.

Alle primären kohlenstoffhaltigen Partikel eines unvollständigen Verbrennungsprozesses sind Russpartikel. Russpartikel sind sehr fein (aerodynamischer Durchmesser ca. 0.001–0.3µm), liegen in grosser Anzahl vor und haben im Verhältnis zu ihrer Masse eine sehr grosse aktive Oberfläche. Sie verfügen damit über ein grosses toxisches und kanzerogenes Potenzial.

6 Anteil Industrie und Gewerbe

Nachstehend wird der Anteil von Industrie und Gewerbe an der PM10-Luftbelastung dargelegt. Dabei wird zwischen Emissionen und Immissionen unterschieden. Unter Emissionen wird die Schadstofffracht verstanden, welche durch den Auspuff, via Kamin, als Abrieb oder Aufwirbelung in die Luft ausgestossen wird. Relevanter für Wirkungsfragen sind jedoch die Immissionen, d.h. die Schadstoffkonzentrationen am Ort des Einwirkens.

6.1 Anteil an den primären PM10-Emissionen

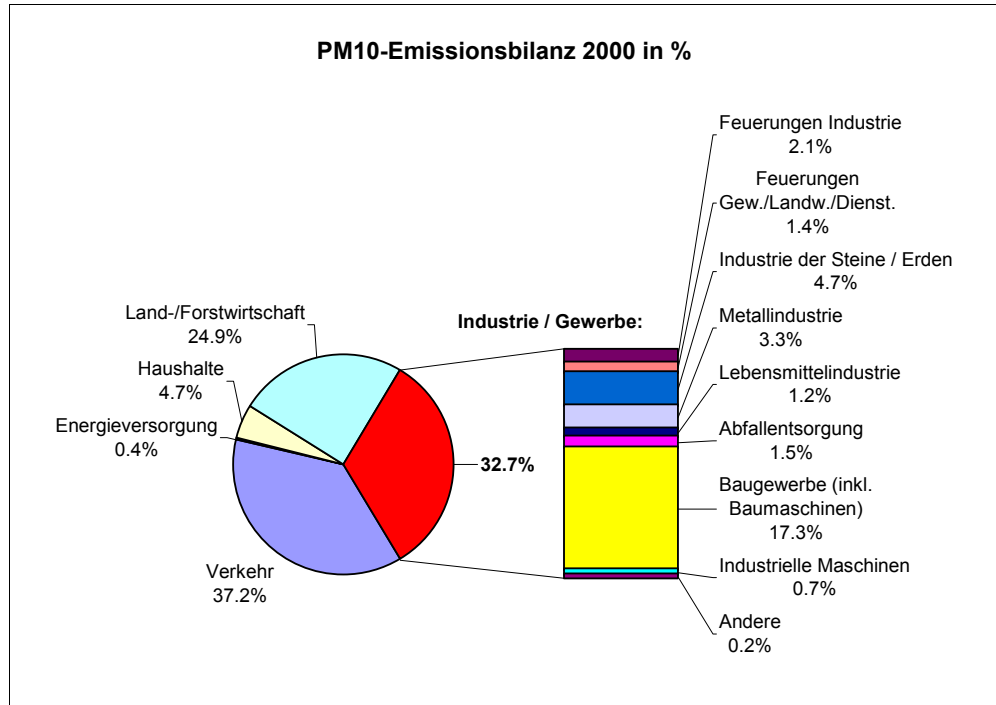
Im Jahr 2000 wurden durch die verschiedenen Quellen in der Schweiz rund 26'500 Tonnen PM10 in die Luft emittiert. Industrie und Gewerbe sind mit ca. 8'700 Tonnen oder ca. 33% nach dem Verkehr der zweitbedeutendste PM10-Emittent in der Schweiz (Tabelle 6, Abbildung 16).

Tabelle 6: PM10-Emissionsbilanz 2000 in der Schweiz (primäre Emissionen aus Verbrennung, Abrieb und Aufwirbelung) gemäss [BUWAL 2001]

Quellengruppe	Massgebliche Quellen	PM10-Emissionen 2000	
		in Tonnen	in %
Verkehr	Total	9'830	37.2
Energieversorgung	Total	104	0.4
Haushalte	Total	1'251	4.7
Industrie / Gewerbe	Feuerungen Industrie	551	2.1
	Feuerungen Gew./Landw./Dienst.	369	1.4
	Industrie der Steine / Erden	1'249	4.7
	Metallindustrie	860	3.3
	Lebensmittelindustrie	314	1.2
	Abfallentsorgung	409	1.5
	Baugewerbe (inkl. Baumaschinen)	4'578	17.3
	Industrielle Maschinen	186	0.7
	Andere	124	0.2
	Total	8'639	32.7
Land-/Forstwirtschaft	Total	6'578	24.9
Gesamttotal		26'402	100.0

Von den rund 8'700 Tonnen PM10 des Sektors Industrie und Gewerbe werden ca. 4580 Tonnen (52%) durch das Baugewerbe verursacht, davon sind ca. 1000 Tonnen feine Russpartikel aus den Dieselmotoren der Baumaschinen. Der Rest stammt aus staubenden Prozessen sowie aus der Aufwirbelung und der Wiederaufwirbelung von abgelagerten Partikeln aus der Bautätigkeit. Die Dieselmotoren-Emissionen der Baumaschinen machen ca. 22% der PM10-Emissionen des Baugewerbes aus. Verglichen mit den Dieselmotoren-Emissionen des gesamten Verkehrs (2550 Tonnen) sind es ca. 40%. Diese Emissionen könnten durch den Einbau von Partikelfiltern zum grössten Teil verhindert werden.

Abbildung 16:
PM10-Emissionsbilanz
2000 in der Schweiz
(primäre Emissionen)
gemäss [BUWAL 2001]



Relevant für die Gesundheit der Bevölkerung sind jedoch nicht die gesamtschweizerischen Emissionsfrachten, sondern die resultierenden Immissionen unter Berücksichtigung der primären und sekundär gebildeten Aerosole.

Auch wenige Procente sind lufthygienisch bedeutend

Obwohl die ca. 1000 Tonnen feiner Russpartikel der Baumaschinen nur ca. 22% der PM10-Emissionen des Baugewerbes darstellen ist eine Emissionsreduktion beim Auspuff dieser Maschinen bedeutungsvoll:

- Der Nutzen für die Gesundheit der Bevölkerung und der betroffenen Arbeitnehmer ist wegen des grossen toxischen und kanzerogenen Potenzials der feinen Russpartikel überproportional gross.
- Die Baumaschinen, deren Emissionen durch die Partikelfilter entscheidend vermindert werden, sind eine massgebende Quelle von PM10-Emissionen und zusammen mit dem Verkehr (2550 Tonnen Russ) und der Land- und Forstwirtschaft (970 Tonnen Russ) die Hauptverursacher von Dieselmuss-Emissionen in der Schweiz.
- Zur Reduktion der übrigen PM10-Emissionen des Baugewerbes wie staubende Prozesse, Aufwirbelung und Wiederaufwirbelung, sieht die «Baurichtlinie Luft» geeignete technische und betriebliche Massnahmen vor.
- Die oben angegebenen Emissionsanteile stellen einen Durchschnitt für die gesamte Schweiz dar. Lokal kann aber der Anteil der Baumaschinen-Emissionen an der PM10-Luftbelastung deutlich höher sein.

7 Umweltnutzen von Partikelfiltern

7.1 Reduktion der Partikel-Anzahl und der biologisch aktiven Oberfläche der Partikel

Mit dem Partikelfilter ist es möglich, die Anzahl der ultrafeinen Feststoff-Partikel (Dieselruss) um mindestens 98% zu reduzieren. Aus der Abbildung 17 ist ersichtlich, dass moderne Filter die Anzahl von Feststoff-Feinpartikeln um 2–3 Grössenordnungen bis in den Bereich der Umgebungsluft reduzieren können; für mehrere Filtertypen sind Abscheidegrade von >99% nachgewiesen worden. Treibstoff-Additive, welche zur Regeneration einzelner Filtersysteme verwendet werden, sind ebenfalls sehr fein (ca. 0.01–0.03 μm), werden aber im Filter zurückgehalten.

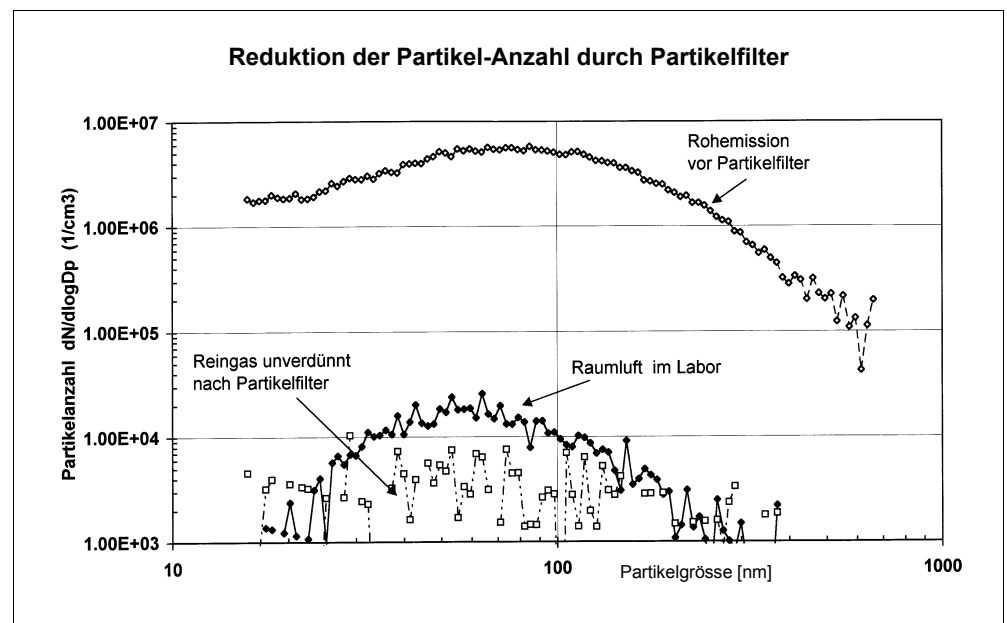


Abbildung 17:
Reduktion der Partikel-
Anzahl durch Partikelfil-
ter [BUWAL 2000a]

In der Nähe von Quellen wie z.B. Baustellen können sich bei einer durchschnittlichen PM₁₀-Konzentration von ca. 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ca. 10^{11} (100 Milliarden) feine Partikel in einem Kubikmeter Atemluft befinden. Bei einer städtischen Hintergrundstation sind bei einer PM₁₀-Belastung von ca. 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ rund 4-mal weniger Partikel (ca. 25 Milliarden) in einem Kubikmeter Luft [NABEL 2000, HARRISON 1999].

Zum Beispiel beträgt die biologisch aktive Oberfläche von sehr feinen Partikeln (Durchmesser 0.02 μm) über 3'000'000'000 m^2 pro m^3 Luft [EPA 1996], während die Oberfläche von gröberen Partikeln (Durchmesser 2 μm) mit ca. 8'000'000 m^2/m^3 deutlich geringer ist. Durch Partikelfilter wird die Anzahl und die biologisch aktive Oberfläche der Partikel in der Umgebung von Baustellen sehr stark um mehr als 95% verringert.

7.2 Reduktion der Partikel-Masse

Mit heutigen Partikelfiltersystemen, welche mit schwefelfreiem Treibstoff (max. 10 ppm Schwefel) betrieben werden, können Massenreduktionen von durchschnittlich 95% erzielt werden. Bei einzelnen Filtersystemen wurden sogar Massenreduktionen bis zu 99% ermittelt. Bei Verwendung von schwefelreichem Treibstoff oder erhöhten Temperaturen werden jedoch geringere Wirkungsgrade gemessen. Die Verwendung von schwefelfreien Dieseltreibstoffen nimmt jedoch ständig zu. In Deutschland ist ab dem 1. Januar 2003 ein flächendeckendes Angebot von schwefelfreien Treibstoffen vorgesehen. In der Schweiz sollen schwefelfreie Treibstoffe ab dem 1. Januar 2004 mit finanziellen Anreizen gefördert werden. In der EU haben sich die Umweltminister darauf geeinigt, dass ab 2005 schwefelfreie Dieseltreibstoffe und Benzine flächendeckend angeboten werden müssen. Ab 2009 sollen schwefelhaltige Treibstoffe ganz verboten werden.

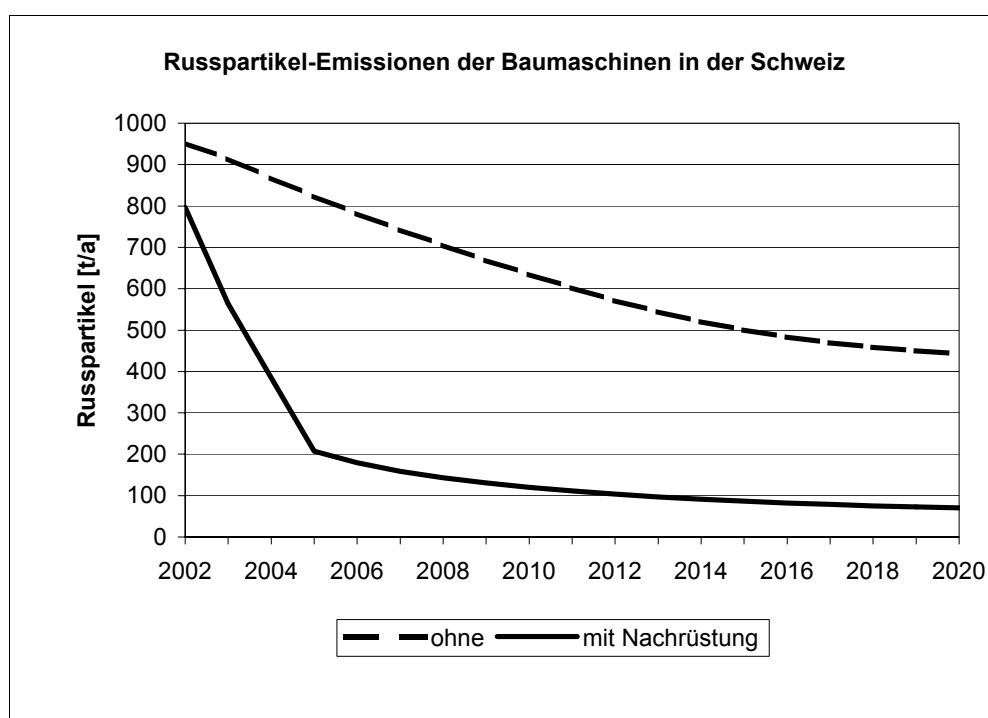


Abbildung 18:
Entwicklung der Partikel-Emissionen der Baumaschinen in der Schweiz gemäss dem Szenario «ohne Filter» bzw. dem Szenario «Baurichtlinie ohne Nachrüstung von Maschinen <18 kW Leistung» [INFRAS 2002].

Abbildung 18 stellt die zeitliche Entwicklung der PM-Emissionen der Baumaschinen in der Schweiz 2002–2020 im Szenario «ohne Filter» sowie im Szenario «Baurichtlinie ohne Nachrüstung von Maschinen <18 kW Leistung» dar [INFRAS 2002].

Zwar werden dank allmählicher Umrüstung des Baumaschinen Parks auf emissionsärmere Maschinen (gemäss geltenden EU Abgasvorschriften für neue Maschinen) in Zukunft die Partikel-Emissionen ohne Nachrüstung langsam zurückgehen. Würden jedoch die sich in Verkehr befindlichen Baumaschinen ab dem Jahr 2002 mit Partikelfiltern gemäss dem Szenario «Baurichtlinie ohne Nachrüstung von Ma-

schinen <18 kW Leistung» nachgerüstet, so würden die Partikel Emissionen der Baumaschinen stark zurückgehen und bereits 2004 unter das Niveau des Jahres 2020 im Vergleich mit dem Szenario «ohne Filter» fallen.

Gemäss dem Szenario «Baurichtlinie ohne Nachrüstung von Maschinen <18 kW Leistung» könnten in den nächsten 5 Jahren (2002–2006) insgesamt ca. 2210 Tonnen Partikel eingespart werden (ca. 440 Tonnen pro Jahr). Bis ins Jahr 2020 beträgt die Einsparung gegenüber dem Szenario «ohne Filter» sogar ca. 8600 Tonnen feine, lungengängige Partikel.

7.3 Reduktion der gesamten Toxizität und der kanzerogenen Potenz der Dieselabgase

Dank Partikelfiltern wird die *gesamte Humantoxizität* der Dieselabgase auf rund die Hälfte reduziert. Dies ist auf die deutlich abgesenkten Emissionen von Partikeln und von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAH) zurückzuführen (INFRAS 1998).

Die *kanzerogene Potenz* der Dieselabgase wird durch den Partikelfilter aber noch deutlich stärker vermindert.

In einer im Auftrag des Deutschen Umweltbundesamtes (UBA) durchgeführten Studie wurde die kanzerogene Potenz verschiedener Abgase speziell bewertet [IFEU 1999]. Basierend auf den «Unit risks» verschiedener kanzerogener Abgaskomponenten wie (Diesel-)Russ (Elemental Carbon EC), Benzol und den PAH (BaP) und den entsprechenden Emissionen wird das kanzerogene Potenzial des Abgases bestimmt. Partikelfilter sind gerade bei der Reduktion von Dieselmotoren sehr effizient (Absenkung der Anzahl Partikel um mindestens 98%). Die Studie hat gezeigt, dass zum Beispiel die kanzerogene Potenz der Abgase von Dieselmotoren dank Partikelfiltern um weit über 90% reduziert wird. Ein analoges Bild ist auch für Baumaschinen zu erwarten.

8 Nutzen für die Gesundheit

8.1 Immissionssituation im bevölkerungsgewichteten Mittel

Zur Belastung der Bevölkerung mit PM10 tragen verschiedene Quellen aus der Schweiz und aus dem Ausland bei. In zwei Studien [SOMMER 1996, SEETHALER 1999] wurde der bevölkerungsgewichtete Jahresdurchschnitt der PM10-Exposition in der Schweiz ermittelt. Dabei wurde für jeden Quadratkilometer anhand der PM10-Emissionen die PM10-Konzentration bestimmt und mit der Anzahl der dort lebenden Personen gewichtet. Die so ermittelte PM10-Belastung der Bevölkerung beträgt im Jahresmittel rund $21.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Von den $21.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 (bevölkerungsgewichteter Jahresdurchschnitt) sind rund die Hälfte ($10.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sekundäre Partikel, welche aus dem Ausland und der Schweiz stammen [HELDSTAB 1999]. Weitere $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sind primäre Partikel, welche aus dem Ausland grossräumig in die Schweiz verfrachtet werden. Damit stammen rund $7.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ des bevölkerungsgewichteten Mittels von PM10 aus den Emissionen von primären Partikeln aus der Schweiz (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Herkunft der verschiedenen PM10-Anteile am bevölkerungsgewichteten Mittel in der Schweiz.

PM10-Komponente	Bevölkerungsgewichtetes Mittel $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Total	21.4
Sekundär Ausland	8.3
Primär Ausland	3.0
Sekundär Inland	2.2
Primär Inland	7.9

Das bevölkerungsgewichtete Mittel von $7.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ wird durch die gesamtschweizerische Emission von rund 26'400 Tonnen primärer PM10-Partikel verursacht. Bei einer Reduktion der Emissionen um rund 2210 Tonnen zwischen 2002–2006 würde sich dieses Mittel um ca. $0.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 verringern. Bei einer Reduktion der Emissionen um rund 8600 Tonnen zwischen 2002 und 2020 würde sich das bevölkerungsgewichtete Mittel der PM10 Belastung sogar um ca. $2.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ verringern. Vorausgesetzt wird dabei, dass die räumliche Verteilung der wegfallenden Emission mit derjenigen der totalen Emission vergleichbar ist. Lokal kann durch den Einbau von Partikelfiltern bei Baumaschinen die PM10-Belastung stärker sinken als im bevölkerungsgewichteten Durchschnitt. Die Berechnung des gesundheitlichen Gewinns auf der Basis des bevölkerungsgewichteten Durchschnitts ist somit eine vorsichtige Schätzung des zu erwartenden gesundheitlichen Benefits beim Einbau von Partikelfiltern in die Baumaschinen.

8.2 Gesundheitliche Auswirkungen (Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankheiten, Krebs)

Mit jeder Einatmung gelangen Tausende von Partikeln in unsere Lunge, wo sie je nach Grösse und Mobilität in den luftleitenden Atemwegen oder im Gasaustauschbereich – den Lungenbläschen (Alveolen) – abgelagert werden können. Je kleiner die Partikel sind, desto tiefer dringen sie in die Lunge ein. Die deponierten feinen Partikel können in den Bronchien, Bronchiolen und Alveolen entzündliche Prozesse hervorrufen. Die Entzündungen können zu einem verminderten Gasaustausch und zur Hypoxie sowie zur Ausschüttung von Botenstoffen (Cytokinen) führen. Dadurch steigt das Risiko für eine erhöhte Blutgerinnung oder einer Verminderung der Herzrhythmusvariabilität, was wiederum ein erhöhtes Risiko für Herz/Kreislauf-Erkrankungen und kardiovaskuläre Mortalität bedeutet [POPE 2000]. Die feinsten Partikel können auch von der Lunge in den Blutkreislauf übertreten. Übermässige Immissionen von feinen Partikeln beeinträchtigen deshalb nicht nur die Atemwege, sondern können auch den Verlauf von Herz-Kreislaferkrankungen beeinflussen. Bei übermässigen Immissionen von PM10 treten vermehrt Anfälle von Atemnot, chronischer Husten und Auswurf, Bronchitis und chronische Bronchitis, Atemwegsinfektionen sowie weitere Beschwerden und Erkrankungen der Atemwege bei Kindern und Erwachsenen auf. Ferner verschlechtern sich bestehende Krankheiten, und es kommt zu Lungenfunktionseinbussen sowie zu vermehrten Notfallkonsultationen und Spitaleintritten wegen Asthma, Bronchitis, Lungenentzündung und Herz-Kreislaufkrankheiten. Dies führt zu einer grossen Zahl von Tagen mit eingeschränkter Aktivität im beruflichen und privaten Bereich.

Diese Auswirkungen wurden in verschiedenen epidemiologischen Studien in Europa, den USA und Asien bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen, aber ähnlicher Zusammensetzung des Schadstoffmixes festgestellt [DOCKERY 1993, POPE 1995, EKL 1996, ABBEY 1999]. So auch in den zwei bedeutenden Schweizer Studien SAPALDIA [ACKERMANN-LIEBRICH 1997, ZEMP 1999] und SCARPOL [BRAUN-FAHRLÄNDER 1997], in welchen rund 10'000 Erwachsene und 5'000 Schulkinder aus verschiedenen Regionen zu den Auswirkungen der Luftverschmutzung untersucht und befragt wurden. Da die wirkungsrelevanten feinen Schadstoffpartikel effizient von Aussen- in Innenräume eindringen [OGLESBY 2000], müssen Erwachsene und Kinder praktisch den ganzen Tag diese Partikel einatmen.

In den epidemiologischen Studien wurde auch eine Zunahme der täglichen Zahl der Todesfälle und der Gesamtsterblichkeit (Langzeit-Sterblichkeit) festgestellt, was zu einer verkürzten Lebenserwartung führt. Die Gesamtsterblichkeit umfasst Atemwegstodesfälle, Todesfälle an Herz-Kreislauf- und Lungenkrankheiten sowie Lungenkrebstodesfälle. Ferner wurden bei erhöhter Feinpartikelbelastung auch Todesfälle bei Säuglingen und Kleinkindern beobachtet (plötzlicher Kindstod, SIDS) [WOODRUFF 1997].

In der Schweiz wurden die gesundheitlichen Auswirkungen der verkehrsbedingten Luftverschmutzung anhand des für die Gesundheitsschädigung massgebenden Leit-schadstoffes PM10 in mehreren von Epidemiologen, Lufthygienikern und Ökonomen gemeinsam durchgeführten Studien genauer quantifiziert und monetarisiert

[SOMMER 1996, KÜNZLI 2000]. Die Studien kommen zum Ergebnis, dass wegen der Luftverschmutzung in der Schweiz jährlich rund 3'300 Personen vorzeitig sterben und 4'300 Personen wegen Atemwegs- und Herz-Kreislaufkrankungen ins Spital eingewiesen werden. Die belastete Atemluft führt weiter zu rund 45'450 Fällen von akuter Bronchitis bei Kindern und 4'250 Fällen von chronischer Bronchitis bei Erwachsenen. Ferner entstehen ca. 2'762'700 Tage mit eingeschränkter Aktivität bei Erwachsenen. Dabei entstehen Gesundheitskosten von rund 6.7 Milliarden Franken.

8.3 Quantifizierung des Gewinns für die Gesundheit beim Einbau von Partikelfiltern in Baumaschinen

In der Schweiz leben 7.08 Millionen Einwohner. In Gebieten mit geringer Luftverschmutzung ($7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10) gibt es pro Million Einwohner im Durchschnitt 7'794 Todesfälle pro Jahr. Ist die Luftverschmutzung durchschnittlich um $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 höher, nimmt die Zahl der Todesfälle pro Million Einwohner und Jahr um rund 340 zu [SEETHALER 1999, KÜNZLI 2000]. Wird nun der bevölkerungsgewichtete Durchschnitt der PM10-Belastung durch die Emissions-Reduktion von 2210 Tonnen Dieselmotoren um $0.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ verringert, sind – berechnet auf die gesamte Bevölkerung der Schweiz – ca. 160 Todesfälle weniger zu erwarten. Da die feinen Auspuffpartikel gegenüber den sekundär gebildeten und den natürlichen PM10-Partikeln ein grösseres toxisches und kanzerogenes Potenzial aufweisen, werden sie mit dem Faktor 2 gewichtet.

Durch die Nachrüstung der Baumaschinen mit Partikelfiltern gemäss Szenario «Baurichtlinie ohne Nachrüstung von Maschinen <18 kW Leistung» können deshalb bei einer Emissions-Reduktion von 2210 Tonnen feiner Auspuffpartikel rund 320 vorzeitige Todesfälle in den nächsten 5 Jahren (2002–2006) unter der erwachsenen Bevölkerung der Schweiz vermieden werden. Bis ins Jahr 2020 wären es bei einer Reduktion von ca. 8600 Tonnen sogar rund 1240 Todesfälle.

8.4 Weitere Gewinne für die Gesundheit

Steigt die PM10-Belastung um $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, so nehmen pro Million Einwohner die Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen um rund 130 und diejenigen wegen Herz/Kreislaufkrankungen um rund 300 Fälle zu. Sinkt die Belastung um $0.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lassen sich in den nächsten 5 Jahren rund 125 Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen und rund 280 Spitaleintritte wegen Herz-Kreislaufkrankungen vermeiden. Bis ins Jahr 2020 könnten ca. 475 Spitaleintritte wegen Atemwegserkrankungen und ca. 1090 Spitaleintritte wegen Herz/Kreislaufkrankungen vermieden werden.

Steigt die PM10-Belastung um $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, so nimmt pro Million Einwohner die Anzahl Kinder mit akuter Bronchitis um rund 4'620 und die Anzahl Erwachsener mit chronischer Bronchitis um rund 430 zu. Sinkt die Belastung um $0.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$, können in nächsten 5 Jahren rund 4320 Fälle von akuter Bronchitis bei Kindern und rund 400 Fälle von chronischer Bronchitis bei Erwachsenen verhindert werden.

Bis ins Jahr 2020 könnten ca. 16'880 Fälle von akuter Bronchitis bei Kindern und ca. 1570 Fälle von chronischer Bronchitis bei Erwachsenen vermieden werden.

Steigt die PM10-Belastung um $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, nimmt pro Million Einwohner die Anzahl Tage mit eingeschränkter Aktivität um rund 281'000 zu. Sinkt die Belastung um $0.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lassen sich in den nächsten 5 Jahren rund 265'000 Tage mit eingeschränkter Aktivität bei Erwachsenen vermeiden. Bis 2020 wären es rund 1'025'000 Tage.

Auf der Basis von PM10 kann mit dem Konzept der attributablen Fälle die Anzahl Krebsfälle quantifiziert werden, welche durch die Nachrüstung der Dieselmotoren der Baumaschinen mit Partikelfiltern vermieden werden kann. Dieses Konzept wurde im Projekt «Basler Risikostudie Aussenluft, BRISKA» [RÖÖSLI 2000] erstmals in der Schweiz angewandt. Basierend auf drei grossen amerikanischen epidemiologischen Kohortenstudien ergeben sich 6.77 (CI = 0.82–12.72) Lungenkrebsfälle pro 100'000 Personenjahre und zusätzlichen $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM10 in der Atemluft. In den amerikanischen Studien wurde das Krebsrisiko nur für Personen, die älter als 30-jährig sind, quantifiziert. In der Schweiz sind etwa zwei Drittel (67%) der Gesamtbevölkerung älter als 30 Jahre. Bezogen auf die gleiche Population wie in den USA gibt das für die ganze Schweiz 4'743'600 Personenjahre. Bei einer Reduktion der Dieselmotoren-Emissionen um 2210 Tonnen und der darauffolgenden Reduktion der bevölkerungsgewichteten PM10-Belastung um $0.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ könnten in den nächsten 5 Jahren ca. 45 Todesfälle wegen Lungenkrebs vermieden werden. Bis ins Jahr 2020 wären es bei einer Reduktion von ca. 8600 Tonnen sogar rund 170 Todesfälle.

Mit der Zahlungsbereitschaftsmethode können die verminderten Auswirkungen monetarisiert werden. Bei diesem Ansatz werden die Gesundheitskosten anhand des monetären Beitrages bestimmt, den die der Luftverschmutzung ausgesetzte Bevölkerung für eine Verminderung des Gesundheitsrisikos zu zahlen bereit wäre. Der Zahlungsbereitschaftswert für die Risikoverminderung von vorzeitigen Todesfällen zum Beispiel beträgt pro Fall rund 2.3 Millionen Franken [JONES-LEE 1998]. Die Zahlungsbereitschaft zur Verminderung des Krankheitsrisikos umfasst materielle Kosten für ambulante und/oder stationäre medizinische Behandlung, den Produktionsausfall sowie die immateriellen Kostenkomponenten für Schmerzen, Leid, Angst, und den Verlust an Lebensfreude und Lebensqualität.

Insgesamt lassen sich bei einer Reduktion von ca. 2210 Tonnen feiner Auspuffpartikel in den nächsten 5 Jahren Gesundheitskosten (Mortalität und Morbidität) von rund 1030 Millionen Franken vermeiden. Die Kosten zur Vermeidung der vorzeitigen Mortalität machen gut 70% der Gesamtkosten aus. Bis ins Jahr 2020 könnten bei einer Reduktion von ca. 8600 Tonnen sogar rund 4000 Millionen Franken an Gesundheitskosten eingespart werden.

Anhang

Anhang 1: Bestandesentwicklung

Tabelle 8: Bestandesentwicklung der Baumaschinen gemäss Bestandesmodell

Bestandesentwicklung Baumaschinen 1990–2020						
Bezugsjahr	<18kW	18–37kW	37–75kW	75–130kW	130–560kW	Summe
1990	10'190	12'755	14'143	5'518	3'367	45'973
1991	10'863	13'112	14'284	5'531	3'373	47'163
1992	11'044	13'160	14'230	5'509	3'356	47'301
1993	11'108	13'118	14'100	5'457	3'324	47'107
1994	11'361	13'249	14'135	5'463	3'324	47'532
1995	11'587	13'383	14'190	5'473	3'327	47'960
1996	11'561	13'348	14'117	5'439	3'306	47'771
1997	11'329	13'185	13'946	5'368	3'265	47'094
1998	11'340	13'243	13'979	5'371	3'265	47'200
1999	11'676	13'560	14'237	5'455	3'310	48'239
2000	11'703	13'562	14'199	5'433	3'294	48'191
2001	11'783	13'566	14'154	5'411	3'277	48'191
2002	11'880	13'566	14'101	5'386	3'257	48'191
2003	11'985	13'564	14'047	5'361	3'235	48'191
2004	12'085	13'560	13'996	5'337	3'213	48'191
2005	12'162	13'552	13'958	5'321	3'198	48'191
2006	12'191	13'547	13'945	5'316	3'192	48'191
2007	12'175	13'550	13'956	5'319	3'191	48'191
2008	12'147	13'555	13'973	5'325	3'192	48'191
2009	12'124	13'559	13'985	5'330	3'193	48'191
2010	12'107	13'564	13'994	5'332	3'192	48'191
2011	12'102	13'570	13'999	5'332	3'189	48'191
2012	12'103	13'574	13'999	5'330	3'185	48'191
2013	12'106	13'576	13'999	5'326	3'183	48'191
2014	12'110	13'579	13'998	5'322	3'182	48'191
2015	12'116	13'581	13'996	5'317	3'180	48'191
2016	12'128	13'582	13'991	5'312	3'177	48'191
2017	12'144	13'586	13'984	5'307	3'170	48'191
2018	12'159	13'590	13'977	5'301	3'163	48'191
2019	12'185	13'598	13'964	5'294	3'150	48'191
2020	12'208	13'603	13'957	5'285	3'138	48'191

Anhang 2: Bestandesentwicklung nach Emissionsstufen

Tabelle 9: Durch Überlagerung von Neuzulassungen, Lebensdauer und Einführungszeitpunkten der Emissionsstufen ergibt sich die hier aufgeführte Bestandeszusammensetzung nach Emissionsstufen und Segmenten.

Bestandesentwicklung Baumaschinen nach Segmenten und Emissionsstufen												
Jahr	<18 kW	18–37 kW		37–75 kW			75–130 kW			130–560 kW		
		Vor EU	Vor EU	EU2	Vor EU	EU1	EU2	Vor EU	EU1	EU2	Vor EU	EU1
1996	11'561	13'348		14'117			5'439			3'306		
1997	11'329	13'185		13'946			5'368			3'265		
1998	11'340	13'243		13'979			5'371			3'265		
1999	11'676	13'560		14'237			5'455			3'310		
2000	11'703	13'562		13'290	910		5'106	328		3'112	182	
2001	11'783	12'547	1'019	12'334	1'820		4'756	655		2'913	364	
2002	11'880	11'527	2'039	11'371	2'730		4'403	983		2'711	364	182
2003	11'985	10'502	3'062	10'411	3'636		4'051	980	329	2'507	363	365
2004	12'085	9'492	4'068	9'469	3'619	907	3'707	975	656	2'307	360	546
2005	12'162	8'506	5'046	8'562	3'595	1'801	3'377	967	977	2'117	357	724
2006	12'191	7'543	6'005	7'703	3'553	2'689	3'066	955	1'294	1'940	353	899
2007	12'175	6'606	6'944	6'878	3'503	3'576	2'766	942	1'611	1'770	348	1'074
2008	12'147	5'711	7'844	6'092	3'427	4'453	2'481	919	1'925	1'607	340	1'246
2009	12'124	4'890	8'669	5'342	3'318	5'325	2'207	889	2'233	1'450	327	1'416
2010	12'107	4'153	9'411	4'655	3'160	6'179	1'954	842	2'537	1'303	310	1'580
2011	12'102	3'506	10'064	4'025	2'950	7'023	1'717	783	2'831	1'163	288	1'739
2012	12'103	2'935	10'639	3'454	2'707	7'839	1'500	717	3'113	1'032	266	1'888
2013	12'106	2'441	11'135	2'952	2'438	8'609	1'305	649	3'372	915	244	2'025
2014	12'110	2'016	11'563	2'513	2'168	9'317	1'131	581	3'610	810	221	2'152
2015	12'116	1'653	11'928	2'138	1'897	9'961	977	513	3'827	715	197	2'268
2016	12'128	1'351	12'231	1'815	1'633	10'543	843	447	4'023	628	175	2'374
2017	12'144	1'105	12'480	1'540	1'383	11'061	726	384	4'197	547	155	2'469
2018	12'159	910	12'680	1'308	1'158	11'510	623	330	4'349	474	137	2'552
2019	12'185	750	12'848	1'092	973	11'898	527	286	4'481	399	123	2'628
2020	12'208	617	12'987	905	830	12'222	437	254	4'594	330	114	2'694

Anhang 3: Emissionsentwicklung

Tabelle 10: PM-Emissionen nach Jahr und Leistungsklasse für den Zeitraum 2002–2020

Emissionen nach Jahr und Szenario in Tonnen PM pro Jahr																				
Leistungskl.	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Summe
Referenz-Szenario: «ohne Nachrüstung»																				
<18 kW	47,8	48,2	48,6	48,9	49,1	49,0	48,9	48,8	48,7	48,7	48,7	48,7	48,7	48,8	48,8	48,9	48,9	49,0	49,1	926
18–37 kW	157,8	151,0	144,3	137,9	131,8	126,0	120,6	115,6	111,2	107,5	104,4	101,7	99,7	98,3	97,2	96,5	96,0	95,7	95,4	2'189
37–75 kW	290,5	284,2	268,4	253,2	239,0	225,6	212,8	200,3	188,5	177,1	166,2	156,4	147,7	140,2	133,6	128,5	124,5	121,4	119,0	3'577
75–130 kW	216,3	204,1	192,1	180,7	170,1	160,1	150,6	141,3	132,4	123,9	115,9	108,7	102,3	96,6	92,1	88,5	85,6	83,3	81,5	2'526
130–560 kW	239,5	226,8	214,4	202,7	192,0	181,9	172,2	162,8	153,7	144,9	136,5	129,1	122,2	116,4	111,4	107,2	103,8	100,8	98,2	2'916
Summe	952,0	914,2	867,8	823,5	782,1	742,6	705,0	668,8	634,6	602,1	571,7	544,5	520,7	500,2	483,1	469,5	458,8	450,1	443,2	12'135
Szenario A: «Baurichtlinie»																				
<18 kW	37,3	27,6	17,3	9,7	7,3	5,6	4,6	3,9	3,5	3,2	3,0	2,9	2,8	2,8	2,7	2,6	2,6	2,6	2,5	145
18–37 kW	127,9	96,0	60,3	27,4	21,7	17,4	14,3	12,1	10,4	9,3	8,3	7,6	7,0	6,5	6,1	5,8	5,5	5,3	5,1	454
37–75 kW	239,0	166,7	114,1	51,0	41,4	34,2	29,0	25,1	21,9	19,2	16,7	14,7	13,0	11,5	10,2	9,1	8,2	7,3	6,7	839
75–130 kW	179,8	116,5	77,6	37,6	31,3	26,6	23,1	20,2	17,6	15,3	13,3	11,6	10,1	8,8	7,7	6,7	5,9	5,1	4,5	619
130–560 kW	202,0	136,3	84,1	42,3	36,2	31,7	27,9	24,5	21,4	18,6	16,2	14,2	12,4	10,8	9,4	8,1	7,0	5,8	4,9	714
Summe	786,0	543,0	353,3	167,9	137,9	115,5	98,8	85,7	74,8	65,6	57,7	51,0	45,3	40,4	36,1	32,3	29,1	26,1	23,7	2770
Szenario B: «Baurichtlinie ohne Nachrüstung von Maschinen <18 kW»																				
<18 kW	47,8	48,2	48,6	48,9	49,1	49,0	48,9	48,8	48,7	48,7	48,7	48,7	48,7	48,8	48,8	48,9	48,9	49,0	49,1	926
18–37 kW	127,9	96,0	60,3	27,4	21,7	17,4	14,3	12,1	10,4	9,3	8,3	7,6	7,0	6,5	6,1	5,8	5,5	5,3	5,1	454
37–75 kW	239,0	166,7	114,1	51,0	41,4	34,2	29,0	25,1	21,9	19,2	16,7	14,7	13,0	11,5	10,2	9,1	8,2	7,3	6,7	839
75–130 kW	179,8	116,5	77,6	37,6	31,3	26,6	23,1	20,2	17,6	15,3	13,3	11,6	10,1	8,8	7,7	6,7	5,9	5,1	4,5	619
130–560 kW	202,0	136,3	84,1	42,3	36,2	31,7	27,9	24,5	21,4	18,6	16,2	14,2	12,4	10,8	9,4	8,1	7,0	5,8	4,9	714
Summe	796,5	563,6	384,6	207,2	179,7	158,9	143,1	130,6	120,1	111,1	103,3	96,8	91,2	86,4	82,2	78,5	75,4	72,5	70,2	3'552
Szenario C: «Baurichtlinie ohne Nachrüstung von Maschinen <37 kW»																				
<18 kW	47,8	48,2	48,6	48,9	49,1	49,0	48,9	48,8	48,7	48,7	48,7	48,7	48,7	48,8	48,8	48,9	48,9	49,0	49,1	926
18–37 kW	157,8	151,0	144,3	137,9	131,8	126,0	120,6	115,6	111,2	107,5	104,4	101,7	99,7	98,3	97,2	96,5	96,0	95,7	95,4	2'189
37–75 kW	239,0	166,7	114,1	51,0	41,4	34,2	29,0	25,1	21,9	19,2	16,7	14,7	13,0	11,5	10,2	9,1	8,2	7,3	6,7	839
75–130 kW	179,8	116,5	77,6	37,6	31,3	26,6	23,1	20,2	17,6	15,3	13,3	11,6	10,1	8,8	7,7	6,7	5,9	5,1	4,5	619
130–560 kW	202,0	136,3	84,1	42,3	36,2	31,7	27,9	24,5	21,4	18,6	16,2	14,2	12,4	10,8	9,4	8,1	7,0	5,8	4,9	714
Summe	826,4	618,6	468,7	317,8	289,8	267,5	249,4	234,1	220,9	209,3	199,4	191,0	184,0	178,2	173,3	169,2	165,9	162,9	160,5	5'287

Anhang 4: Kostenentwicklung

Tabelle 11: Filterkosten nach Jahr und Leistungsklasse für den Zeitraum 2002–2020

Filterkosten nach Jahr und Szenario in Mio Fr. pro Jahr																				
Leistungskl.	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	Summe
Szenario A: «Baurichtlinie»																				
<18 kW	10,4	11,5	13,5	12,0	8,0	8,2	8,3	8,3	8,4	8,4	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,6	8,6	8,6	8,6	174
18–37 kW	20,1	18,3	22,7	25,2	14,4	14,7	14,9	15,0	15,1	15,2	15,3	15,4	15,4	15,5	15,5	15,6	15,6	15,6	15,7	315
37–75 kW	25,2	32,3	28,9	38,3	21,2	21,6	21,9	22,1	22,3	22,5	22,6	22,7	22,8	22,9	23,0	23,1	23,1	23,2	23,2	463
75–130 kW	12,9	20,7	17,2	20,9	13,3	13,5	13,7	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,3	14,4	14,5	14,5	14,5	14,6	14,6	284
130–560 kW	11,9	19,5	19,8	21,5	13,9	14,1	14,3	14,4	14,6	14,7	14,8	14,9	15,0	15,0	15,1	15,2	15,2	15,2	15,2	294
Summe	80,4	102,2	102,0	117,7	70,8	72,1	73,0	73,8	74,3	74,9	75,4	75,7	76,0	76,3	76,6	76,9	77,0	77,2	77,2	1'530
Szenario B: «Baurichtlinie ohne Nachrüstung von Maschinen <18 kW»																				
<18 kW	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18–37 kW	20,1	18,3	22,7	25,2	14,4	14,7	14,9	15,0	15,1	15,2	15,3	15,4	15,4	15,5	15,5	15,6	15,6	15,6	15,7	315
37–75 kW	25,2	32,3	28,9	38,3	21,2	21,6	21,9	22,1	22,3	22,5	22,6	22,7	22,8	22,9	23,0	23,1	23,1	23,2	23,2	463
75–130 kW	12,9	20,7	17,2	20,9	13,3	13,5	13,7	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,3	14,4	14,5	14,5	14,5	14,6	14,6	284
130–560 kW	11,9	19,5	19,8	21,5	13,9	14,1	14,3	14,4	14,6	14,7	14,8	14,9	15,0	15,0	15,1	15,2	15,2	15,2	15,2	294
Summe	70,1	90,8	88,5	105,8	62,7	63,9	64,7	65,4	66,0	66,5	67,0	67,2	67,5	67,8	68,1	68,3	68,4	68,6	68,6	1'356
Szenario C: «Baurichtlinie ohne Nachrüstung von Maschinen <37 kW»																				
<18 kW	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18–37 kW	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
37–75 kW	25,2	32,3	28,9	38,3	21,2	21,6	21,9	22,1	22,3	22,5	22,6	22,7	22,8	22,9	23,0	23,1	23,1	23,2	23,2	463
75–130 kW	12,9	20,7	17,2	20,9	13,3	13,5	13,7	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,3	14,4	14,5	14,5	14,5	14,6	14,6	284
130–560 kW	11,9	19,5	19,8	21,5	13,9	14,1	14,3	14,4	14,6	14,7	14,8	14,9	15,0	15,0	15,1	15,2	15,2	15,2	15,2	294
Summe	49,9	72,5	65,8	80,6	48,3	49,2	49,8	50,4	50,8	51,3	51,6	51,8	52,1	52,3	52,5	52,7	52,8	52,9	53,0	1'041

Anhang 5: Kosten-Nutzen in Abhängigkeit des Alters (Illustrationen)

Tabelle 12: Je nach Alter der Maschine, die im Jahr 2002 umgerüstet wird, variieren die bis zur Ausmusterung anfallenden Kosten bzw. die vermiedenen PM-Emissionen und damit auch die Kosteneffizienz.

Alter	Leistungsklasse 130–560 kW, Umrüstung im Jahr 2002			Leistungsklasse 37–75 kW, Umrüstung im Jahr 2002		
	Kosten (Fr)	PM-Reduktion (kg)	Kosteneffizienz (kFr/t)	Kosten (Fr)	PM-Reduktion (kg)	Kosteneffizienz (kFr/t)
0	79'431	433	183	24'800	238	104
1	75'655	1'096	69	23'647	220	107
2	71'792	1'020	70	22'476	203	111
3	68'234	968	70	21'417	241	89
4	64'622	896	72	20'348	221	92
5	61'023	824	74	19'274	200	96
6	57'669	757	76	18'297	181	101
7	54'275	689	79	17'299	162	107
8	51'366	631	81	16'458	146	113
9	48'640	577	84	15'680	130	120
10	46'591	535	87	15'114	119	127
11	44'624	495	90	14'568	108	135
12	42'646	454	94	14'039	97	145
13	40'605	413	98	13'494	85	158
14	38'900	378	103	13'068	76	171
15	37'510	350	107	12'773	70	183
16	36'374	326	112	12'579	65	194
17	35'478	307	115	12'481	62	201
18	34'668	291	119	12'469	61	205
19	33'455	268	125	12'285	57	214
20	32'052	241	133	11'995	52	229
21	30'862	218	141	11'760	48	244
22	29'736	197	151	11'576	45	257
23	28'460	173	164	11'225	39	284
24	27'305	152	180	10'927	35	314
25	26'087	129	202	10'605	30	355
26	24'934	108	230	10'293	25	407
27	23'806	88	270	9'950	20	487
28	22'606	67	339	9'588	15	621
29	21'373	45	474	9'215	10	879
30	20'102	23	872	8'813	5	1'645

Anhang 6: Literatur

- ABBEY D., NISHINO N., McDONNELL W. et al. 1999: Long-term inhalable particles and other air pollutants related to mortality in nonsmokers. *Am J Respir Crit Care Med* 1999; 159: 373–382.
- ACKERMANN U., LEUENBERGER P., SCHWARTZ J. et al. 1997: Lung function and long-term exposure to air pollutants in Switzerland (SAPALDIA study). *Am J Respir Crit Care Med* 1997; 155 (1): 122–129.
- BRAUN-FAHRLÄNDER C., VUILLE J., SENNHAUSER F. et al. 1997: Respiratory Health and long-term exposure to air pollutants in Swiss schoolchildren (SCARPOL study). *Am J Respir Crit Care Med* 1997; 155(3): 1042–1049.
- BUWAL 1994: Schadstoffemissionen und Treibstoffverbrauch von Baumaschinen, Synthesebericht, Umweltmaterialien Luft Nr. 23, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 1994
- BUWAL 2000a: Partikelfilter für schwere Nutzfahrzeuge, Technische Grundlagen zur Nachrüstung grosser Fahrzeugflotten, Umweltmaterialien Luft Nr. 130, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 2000
- BUWAL 2000b: Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1950–2020, Schriftenreihe Umwelt Luft Nr. 255 Nachtrag, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 2000
- BUWAL 2000c: Schadstoffemissionen und Treibstoffverbrauch des Offroad-Sektors, Inventare 1990 und 1995 Entwicklung 1990–2030, Umweltmaterialien Luft Nr.49 Nachtrag, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern 2000 (Entwurf)
- BUWAL 2001: Massnahmen zur Reduktion von PM10-Emissionen. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Umwelt-Materialien Nr. 136, Luft, Bern 2001.
- DOCKERY D., POPE A., XU X. et al. 1993: An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *N Engl J Med* 1993 329 (24); 1753–1759.
- Eidgenössische Kommission für Lufthygiene EKL 1996: Schwebestaub. Messung und gesundheitliche Bewertung. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Schriftenreihe Umwelt Nr. 270, Bern 1996.
- EPA (United States Environmental Protection Agency) 1996: Air Quality Criteria for Particulate Matter. Vol. II-11. Research Triangle Park, 1996.
- HARRISON R., JOHNES M. AND COLLINS G. 1999: Measurements of the physical properties of particles in the urban atmosphere. *Atmospheric Environment* 1999; 33: 309–321.
- HELDSTAB J., KÜNZLE T., DE HAAN P. et al. 1999: Modellierung der PM10-Belastung in der Schweiz. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Schriftenreihe Umwelt Nr. 310, Bern 1999.
- HÜGLIN C., GEHRIG R., BALTENSPERGER U. et al. 2000: NFP 41 Verkehr und Umwelt. Projekt C4: Partikelemissionen (PM10) des Strassenverkehrs. Schlussbericht, Juli 2000.
- IFEU 1999: Immissionsnaher Risikovergleich von Diesel- und Ottoabgasen. Auswirkungen zukünftiger Emissionsgrenzwerte auf die Luftqualität und die Gesundheit, Institut für Energie- und Umweltforschung (zusammen mit dem Fraunhofer Institut für Toxikologie und Aerosolforschung und FOBIG Freiburg), im Auftrag des Umweltbundesamtes Berlin, Heidelberg, Dezember 1999.

- INFRAS 1998: Ökopprofile von Treibstoffen. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Umwelt-Materialien Nr. 104, Bern 1998.
- JONES-LEE M. et al. 1998: On the contingent valuation of safety and the safety contingent valuation: Part 2 – The CV/SG «Chained» Approach. ExternE-Project. European Community 1998.
- KELLER M. DE HAAN P. 2000: Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs. Herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Schriftenreihe Umwelt Nr. 255 Nachtrag, Bern 2000.
- KÜNZLI N., KAISER R., MEDINA S. et al. 2000: Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *Lancet* 2000; 356; 795–801.
- Luftreinhalte-Verordnung (LRV) der Schweiz 1998: SR 814.318.142.
- Nationales Messnetz für Luftfremdstoffe (NABEL) 2000: Messungen im Jahr 2000 (noch unveröffentlicht).
- OGLESBY L, KÜNZLI N., RÖÖSLI M. et al. 2000: Validity of ambient levels of fine particles as surrogate for personal exposure to outdoor air pollution. Results of the European Expolis-EAS study. *J Air and Waste Man Assoc* 2000; 50 1251–1261.
- POPE C.A.III 2000: Epidemiology of fine particulate air pollution and human health: Biologic mechanisms and who's at risk? *Environmental Health perspectives* 2000; 108 (Suppl. 4), 713–723
- POPE C.A.III, THUN M., NAMBOODIRI M. et al. 1995: Particulate Air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults *Am J Respir Crit Care Med* 1995; 151 (3): 669–674
- RÖÖSLI M., KÜNZLI N., BRAUN-FAHRLÄNDER C. et al. 2000: Gesundheitsrisiko durch Luftschadstoffe in der Region Basel. 2. Bericht der Basler Risikostudie Aus-senluft BRISKA. Institut für Sozial- und Präventivmedizin der Universität Basel und Lufthygieneamt beider Basel, Basel und Liestal 2000.
- SEETHALER R. 1999: Health costs due to road traffic-related air pollution. Synthesis report. Prepared for the WHO Ministerial Conference on Environment and Health, London 1999. Federal Department of Environment, Transport, Energy and Communications. GVF-report 1/99, order number 801.633e; Bern 1999.
- SOMMER H., NEUENSCHWANDER R. 1996: Monetarisierung der verkehrsbedingten externen Gesundheitskosten, Synthesebericht. Studie im Auftrag des Dienstes für Gesamtverkehrsfragen des Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschafts-Departementes. GVF-Auftrag Nr. 272, Bern 1996.
- SUVA 1997: Grenzwerte am Arbeitsplatz 1997 (Dieselmotor-Emissionen: S. 40; Kanze-rogene Stoffe S. 109ff) Suva Luzern 1997.
- TTM 2001: Partikelfilter für Baumaschinen-Systemkosten, Email vom 14.11.2001
- WHO 1989: International Agency for Research on Cancer IARC: Diesel and gasoline engine exhausts and some nitroarenes. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol. 46; IARC, Lyon 1989.
- WOODRUFF T.J., GRILLO J., SCHOENDORF K.C. 1997: The relationship between selected causes of postneonatal infant mortality and particulate air pollution in the United States. *Environmental Health Perspect.* 1997; 105/6: 608–612.
- ZEMP E., ELSASSER S., SCHINDLER C. et al. 1999: Long-term ambient air pollution and chronic respiratory symptoms in adults (SAPALDIA study). *Am J Respir Crit Care Med* 1999; 159: 1257–1266.

Weiterführende Literatur

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) 1996: Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents, Biological Exposure Indices (Diesel Exhaust: p. 39). ACGIH, Cincinnati, Ohio 1996.
- Health Effect Institute 1996: Diesel exhaust: a critical analysis of emissions, exposure and health effects. Report 1996.
- HOFER et al. 2001: Im Auftrag des BUWAL: Health Effects, Measurement and Filtration of Solid Particles emitted from Diesel Engines, April 2001.
- JING L.; FORSS A.M., BACH CH., EGGENBERGER U. 1996: Umfassende, wirkungsorientierte Charakterisierung von Partikeln aus Dieselabgasen. Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft 56 (1996): 139–145.
- KEITH W., MORGAN C. 1995: The Deposition and Clearance of Dust from the Lungs – Their Role in the Etiology of Occupational Lung Disease, in: Occupational Lung Diseases, 3rd ed., S. 111–126. Keith W., Morgan C., Seaton A. (ed.): W.B. Saunders Company, Philadelphia 1995.
- POTT F. 1991: Dieselmotorabgas – Tierexperimentelle Ergebnisse zur Risikoabschätzung. In: Krebserzeugende Stoffe in der Umwelt – Herkunft, Messung, Risiko, Minimierung. VDI-Bericht 888, S. 211–244. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991.
- Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe der Deutschen Forschungsgemeinschaft 1987. Greim H. (Hrsg.): Dieselmotor-Emissionen. In: Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe – Toxikologisch-arbeitsmedizinische Begründungen von MAK-Werten (Maximale Arbeitsplatzkonzentration), 13. Lieferung 1987. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim.
- SIEGMANN K., SIEGMANN H.C. 1997: Molekulare Vorstadien des Russes und Gesundheitsrisiko für den Menschen. Laboratorium für Verbrennungsaerosole und Schwebeteilchen der ETH Zürich, Vortragsunterlagen 1997.
- US Environmental Protection Agency (EPA) 1987: Air Quality Criteria for Particulate Matter, Vol. I-III. Environmental Protection Agency, Washington D.C. 1996.
- McClellan, R.O.: Health Effects of Exposure to Diesel Exhaust Particles. Annu Rev Pharmacol Toxicol 1987; 27: 279–300.