

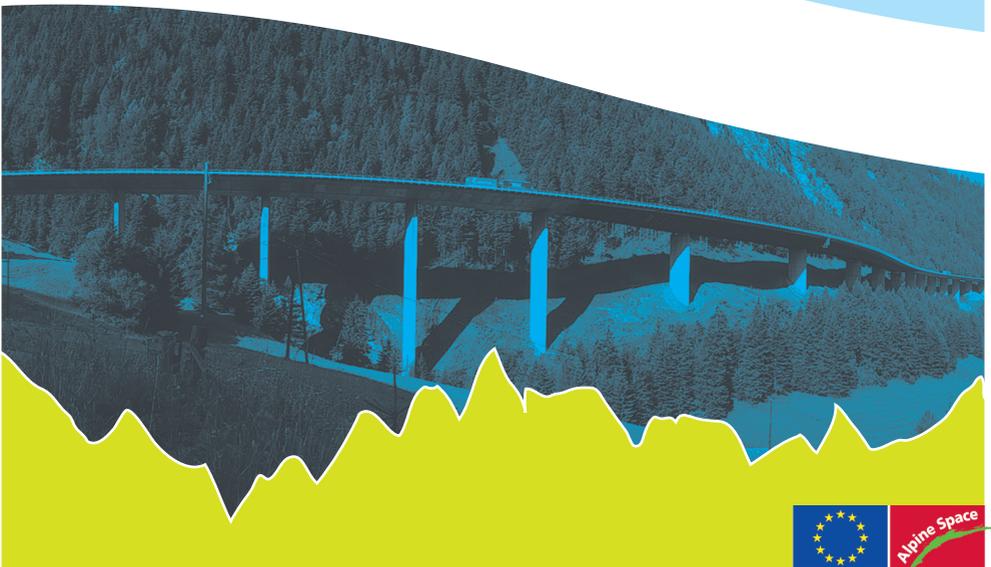
The logo graphic for ALPNAP features a blue mountain peak shape at the top. Below the peak, the word "ALPNAP" is written in white, bold, sans-serif capital letters. Underneath the text are three horizontal white lines: a solid top line, a dashed middle line, and a solid bottom line. The entire logo is set against a light blue background.

ALPNAP

Leben an der Transitroute - Luftverschmutzung,  
Lärm und Gesundheit in den Alpen

**ALPNAP**

Projekt Konsortium



Interreg III B

## **ALPNAP Lenkungsgruppe**

D. Heimann, M. Clemente, X. Olny, J. Defrance, P. Suppan, S. Trini Castelli, P. Lercher, U. Uhrner, D. Zardi, P. Seibert, F. Obleitner

## **Redaktionsausschuss**

D. Heimann, M. de Franceschi, S. Emeis, P. Lercher, P. Seibert

Der vollständige oder auszugsweise Nachdruck ist nur mit entsprechender Zitierung gestattet:

Heimann D., de Franceschi M., Emeis S., Lercher P., Seibert P. (Hrsg.), 2007: Leben an der Transitroute – Luftverschmutzung, Lärm und Gesundheit in den Alpen. ALPNAP Broschüre. Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Trento, Italien, 20 pp.

Übersetzung aus dem Englischen: F. Obleitner, S. Emeis, D. Heimann.

Das Foto auf dem Umschlag wurde mit freundlicher Genehmigung der ASFINAG verwendet.

Umschlaggestaltung: Grafikbüro L, [design@grafikbuero-L.at](mailto:design@grafikbuero-L.at)

Gedruckt in Italien von Grafiche Futura s.r.l.

Università degli Studi di Trento  
Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Trento, Dezember 2007

## Vorwort

Diese Broschüre wurde durch das ALPNAP Projektkonsortium, einer Gruppe von elf Partner-einrichtungen aus Österreich, Deutschland, Italien und Frankreich, erstellt. Das dreijährige Projekt (2005 – 2007) wurde durch den Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE) im Rahmen des Europäischen Interreg IIIB Alpenraum-Programms kofinanziert. Ziel von ALPNAP war es, die neuesten wissenschaftsbasierten Methoden zur Beobachtung und Vorhersage von Luftverschmutzung und Lärm entlang der transalpinen Verkehrsachsen zusammen zu stellen und zu beschreiben, und die damit verbundenen Einflüsse auf die Gesundheit und das Wohlbefinden zu analysieren. Diese Methoden können zur Analyse der Auswirkungen neuer, in Planung befindlicher Verkehrsinfrastrukturen (Straßen und Bahnlinien) benutzt werden, sowie zur Entwicklung geeigneter administrativer oder technischer Maßnahmen gegen die Überschreitung von Luftschadstoff- und Lärmgrenzwerten. Die Ergebnisse des Projekts wurden in einem umfangreichen Bericht für Fachleute in Umwelt- und Verkehrsbehörden veröffentlicht.

Diese Broschüre wendet sich dagegen vor allem an diejenigen Einwohner in den Alpen, die von den Umweltbeeinträchtigungen in ihrer direkten Umgebung betroffen sein können. Sie beschreibt, wie die Luftverschmutzung und der Lärm entstehen. Weiter erklärt sie, wie sich die Luftschadstoffe und der Lärm in Abhängigkeit vom Wetter ausbreiten. Die Broschüre will insbesondere die speziellen topografischen Gegebenheiten im Alpenraum, die sich von denen im Flachland deutlich unterscheiden, aufzeigen. Schließlich werden die Möglichkeiten moderner, an Universitäten und Forschungszentren entwickelter Verfahren zur Vorhersage von Luftqualität und Lärm und deren Auswirkungen für zukünftige Verkehrsplanungen zusammengestellt.



## Die Alpen: Lebensraum, Erholungsgebiet und Transitbereich

Die Alpen sind eine der wichtigsten Naturreserven in Europa. Zudem sind sie der Lebensraum von 13 Millionen Menschen, etwa zwei Prozent der europäischen Bevölkerung. Mit 68 Einwohnern pro km<sup>2</sup> ist die Bevölkerungsdichte in den Alpen ungefähr gleich hoch wie die durchschnittliche Bevölkerungsdichte in Europa. Gleichzeitig ist der 950 km lange und im Mittel 250 km breite Alpenbogen eine topografische Barriere, die wichtige ökonomische Zentren und Siedlungsschwerpunkte in Europa voneinander trennt (Italien – Frankreich, Italien – Deutschland, Slowenien – Tschechische Republik). Die einzelnen Gebirgsmassive bilden zudem auch eine Barriere zwischen den inneralpinen Siedlungsgebieten. Andererseits ziehen die Naturschönheiten und Sportmöglichkeiten der Alpen eine große Zahl von Touristen an.

Lokaler Verkehr, Quell- und Zielverkehr der Touristengebiete und der Transitverkehr addieren sich zu einem enormen Fahrzeugstrom. Der freie Handel in der Europäischen Union hat bereits und wird weiterhin den Bedarf von Transporten über die Alpen hinweg erhöhen. Zwischen 1980 und 2005 hat sich das gesamte Transportvolumen des Alpentransits mehr als verdoppelt und beträgt nunmehr 193 Millionen Tonnen pro Jahr. Auch in der Zukunft ist mit einem weiteren Anwachsen des Güterverkehrs durch die alpinen Transitkorridore zu rechnen.

Das wachsende Transportvolumen lässt Luftverschmutzung und Lärmbelästigung zu einem immer größeren Problem werden, das dringend einer Lösung bedarf. Verglichen mit dem Flachland ist die Umweltbelastung in Gebirgsregionen allerdings wesentlich ernster.



**Abb. 1** Ein schönes Tal wird durch die Brennerautobahn zerschnitten. Der Viadukt überspannt Teile von Steinach in Tirol.



**Abb. 2** Ein langer Güterzug erklimmt die Bergstrecke in Richtung österreichisch-italienische Grenze. Er transportiert Wechselbehälter und Sattelaufleger und symbolisiert somit den modernen intermodalen Transport.

Die alpinen Ökosysteme sind sehr sensibel, insbesondere die höher gelegenen Regionen, die auch harten klimatischen Bedingungen ausgesetzt sind. Alpine Wälder haben eine wichtige Schutzfunktion gegen Lawinen und Erdbeben. Die alpinen Gewässer und Gletscher stellen eine wichtige Wasserreserve von großer ökologischer und wirtschaftlicher Bedeutung dar. Luftverschmutzung hat daher hier schwerwiegendere Auswirkungen als im Flachland. Sowohl Luftverschmutzung als auch Lärmbelastung widersprechen zudem den Erwartungen der Touristen und beeinträchtigen somit die wirtschaftliche Entwicklung von Erholungsgebieten.

Die am dichtesten besiedelten Gebiete befinden sich in den tiefer gelegenen Talbereichen, in denen auch die wichtigen Autobahnen und Eisenbahnlinien verlaufen. Daher lebt ein Großteil der Bevölkerung in unmittelbarer Nähe zu den alpenquerenden Verkehrswegen und ist seinen negativen Einflüssen auf das allgemeine Wohlbefinden und die Gesundheit unmittelbar ausgesetzt.

### ***Nachhaltige Transportpolitik braucht wissenschaftliche Unterstützung***

Auf Grund des ständig ansteigenden Transportvolumens ist anzunehmen, dass sich die bereits existierenden Konflikte zwischen ökonomischen und ökologischen Interessen verschärfen werden. Des Weiteren ist zu erwarten, dass ohne entsprechende Maßnahmen die gesetzlich einzuhaltenden Grenzwerte der Schadstoff- und Lärmbelastung noch häufiger überschritten werden und ehemals unbetreffene Gebiete durch die Errichtung neuer Verkehrsinfrastrukturen zunehmend beeinträchtigt werden.

Eine nachhaltige Entwicklung von Verkehr und Wirtschaft unter Wahrung von Naturräumen, Gesundheit und Lebensqualität erfordert neben der Einsicht des Einzelnen auch entsprechende politische und administrative Maßnahmen. Soweit möglich, sollen die zu Grunde liegenden Entscheidungen von wissenschaftlicher Expertise getragen sein, welche neben Ökonomie und Ökologie insbesondere auch die Fachgebiete Meteorologie, Luftchemie, Akustik und Sozialmedizin umfassen muss.

Durch die Errichtung neuer Verkehrsinfrastrukturen ändern sich die Emissionsverhältnisse und damit auch die Auswirkungen auf die betroffenen Menschen. Dies gilt sowohl für den Bau von Eisenbahntunneln, wie auch für die Umsetzung administrativer Maßnahmen (z.B. ein LKW-Nachtfahrverbot) oder Anreize zur Verlagerung von Gütertransporten auf die Schiene oder den kombinierten Verkehr. Gegenwärtig werden auch die verkehrssteuernden Möglichkeiten erweiterter Straßenmauten oder einer so genannten Transitbörse diskutiert. Derartige Maßnahmen haben alle ein grundsätzliches Potenzial zur Verbesserung der Umweltsituation, die tatsächliche Wirkung an einem bestimmten Ort ist jedoch schwer einzuschätzen. So kann z.B. die Verlagerung von Verkehrsströmen auf die Schiene einerseits lokal zu verminderter Schadstoffbelastung führen, andererseits aber auch zu einer stärkeren Beeinträchtigung durch Lärm.

### ***Auf dem Weg zu einem Dialog zwischen Forschung und Behörden***

Eine systematische und alpenweite Zusammenarbeit zwischen Experten untereinander hat bisher weitgehend gefehlt, ebenso wie ein Dialog mit Behörden und Verwaltungsorganen. Im Rahmen des ALPNAP Projektes ("Überwachung und Minimierung von Lärm und Luftbelastung durch den Verkehr entlang alpiner Hauptverkehrswege") haben sich Universitäten, Forschungszentren und Behörden zusammengefunden, um erste Schritte zur Verbesserung dieser Situation zu unternehmen. Zu den Zielen von ALPNAP gehört die Beschreibung und Untersuchung der Prozesse, die die Schadstoff- und Lärmsituation in den Alpentälern bestimmen, sowie das Aufzeigen von wissenschaftlichen Möglichkeiten und Methoden um diese zu messen und vorherzusagen. Die möglichen Auswirkungen auf die Gesundheit der Bevölke-

rung werden dabei besonders berücksichtigt. Zur Verdeutlichung der Komplexität, sowie zur Demonstration der Möglichkeiten und Grenzen wurden einige dieser Methoden in bestimmten Testgebieten während ausgewählter Perioden angewandt. Auf dieser Basis wurden schließlich auch Empfehlungen für Behörden und deren Berater erarbeitet, die als Hilfestellung für eine optimale Erfassung der Auswirkung von behördlichen Maßnahmen oder die Planung von Verkehrsinfrastruktur gedacht sind. Von besonderer Bedeutung ist dabei die adäquate Berücksichtigung der Komplexität und Besonderheit der natürlichen Prozesse im alpinen Raum.

Die Bedeutung von ALPNAP wird durch die koordinierte Zusammenarbeit mit dem gleichzeitig durchgeführten Projekt MONITRAF („Monitoring der Auswirkungen des Straßenverkehrs im Alpenraum und Entwicklung gemeinsamer Maßnahmen“) verstärkt. MONITRAF schuf ein Netzwerk aus regionalen Verkehrs- und Umweltbehörden im Alpenraum, mit dem Ziel umfassende Maßnahmen zur Reduktion der negativen Auswirkungen des Straßengüterverkehrs bei gleichzeitiger Steigerung der Lebensqualität der betroffenen Bewohner zu entwickeln.

## Emission von Luftschadstoffen und Lärm

Der Begriff Emission bezieht sich auf die Freisetzung von gasförmigen und festen Luftschadstoffen oder von Lärm, die aus den verschiedensten Quellen stammen können. Luftschadstoffe werden hauptsächlich durch Verbrennungsprozesse beim Hausbrand (Heizungen), bei Industrieprozessen (von kleinen Betrieben bis hin zu großen Kraftwerken) und durch Kraftfahrzeuge aller Art freigesetzt. Verkehrsbedingte Feinstaubanteile werden zudem durch Abrieb (z.B. beim Bremsen) und Aufwirbelung im Luftstrom von Fahrzeugen produziert. Gleichzeitig entsteht auch Lärm durch den Betrieb der Motoren und Auspuffanlagen (Antriebslärm), aber auch durch die Wechselwirkung von Rädern und Reifen mit der Unterlage (Rollgeräusche von Kraftfahrzeugen und Zügen) und durch die Luftströmung um die Fahrzeugkörper (aerodynamischer Lärm von Hochgeschwindigkeitszügen oder Flugzeugen). Lärm wird außerdem durch industrielle Prozesse, Bautätigkeit oder Landwirtschaft erzeugt, sowie von menschlichen Aktivitäten (Rasenmähen, Heimwerken, Musik, Sport) und von Tieren (häusliche / landwirtschaftliche Tierhaltung, Wildtiere).

Straßenverkehr erzeugt sowohl Luftschadstoffe wie auch Lärm, wobei in Gebirgsgegenden deren Quellstärke durch zusätzliche Faktoren bestimmt wird. Insbesondere sind im Vergleich zum Flachland Anstiege zu überwinden, wobei die entsprechend hohe Drehzahl der Motoren eine vergleichsweise starke Emission bedingt. Untersuchungen haben gezeigt, dass entlang eines mit 5 % ansteigenden Straßenabschnittes doppelt soviel Stickoxide (NO<sub>x</sub>) wie in der Ebene emittiert werden. Darüber hinaus steigt die Lärmemission von Schwerfahrzeugen auch durch die im Zuge der Talfahrten notwendigen Bremsmanöver (Motorbremse) an. Fahrtgeräusche händ-



**Abb. 3** Eine endlose Schlange mit Schwerverkehr überquert an einem schönen Herbstnachmittag die österreichische „Europabrücke“. Sie ist Teil der Brennerautobahn, die Süddeutschland und Tirol mit dem nördlichen Italien verbindet.

gen auch vom Zustand des Fahrwegs ab, wobei diese bei rauen oder nassen Verhältnissen lauter sind als bei trockenen oder schneebedeckten. Das Rollgeräusch von Zügen hängt weitgehend von der Oberflächenbeschaffenheit der Räder und Schienenköpfe ab. Insbesondere ist bekannt, dass die Grauguss-Bremsklötze alter Zuggarnituren die Oberfläche von Rädern und Schienen aufrauen und somit die Lärmemission verstärken.



**Abb. 4** Drei elektrische Lokomotiven, zwei ziehend und eine schiebend, sind notwendig um die rumpelnden Waggonen dieses schweren Güterzuges über die Steilstrecke nahe des Ortes St. Jodok/Tirol in Richtung Brenner zu bewegen.

Gebirgsstraßen sind auch durch Brücken und Tunnel gekennzeichnet (Abb. 3). Einerseits haben diese einen eher positiven Effekt auf die Emissionen, weil sie die Fahrtstrecken zu den Zielorten reduzieren und steile Straßenabschnitte ausgleichen. Zudem werden von den eher hoch gelegenen Brückenabschnitten die emittierten Schadstoffe vergleichsweise gut durchmischt bevor sie die Wohngegenden erreichen können. Andererseits werden die in Tunnels emittierten Schadstoffe sehr konzentriert an deren Portalen oder über Entlüftungssysteme an die benachbarte Umwelt abgegeben, was örtlich zu hohen Belastungen führen kann.

Die meisten Bahnlinien im Alpenraum sind elektrifiziert, sodass von ihnen keine wesentlichen Schadstoffemissionen ausgehen. Andererseits stellt der Zugverkehr eine Linienquelle für Lärm dar, wobei durch die besonderen Situationen im Gebirge zu einer Verstärkung der Emissionen kommen kann (Abb. 4).

Die alpine Topografie übt auch über die räumliche Verteilung der Emissionsquellen einen spezifischen Einfluss aus. Da sich die stark befahrenen Autobahnen und Bahnlinien oft zusammen mit den Hauptsiedlungsgebiete in den beengten Tälern drängen, ist der Abstand zwischen den Wohnbereichen und den Verkehrswegen zwangsläufig geringer als im Flachland, sodass die Bevölkerung von vergleichsweise hohen Belastungen durch verkehrsbedingte Schadstoffe und Lärm betroffen ist.

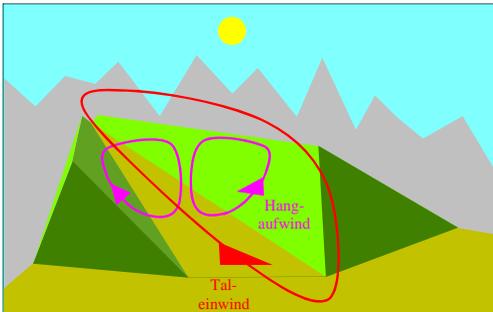
## Alpine Meteorologie

Gebirgszüge in der Größenordnung der Alpen sind von vielfältiger Bedeutung für das Wetter und das Klima. Sie reichen in die Atmosphäre hinein und stellen daher eine Barriere für die anströmenden Luftmassen dar, die ihrerseits von der großräumigen Druckverteilung (Hoch- und Tiefdruckgebiete) angetrieben werden. Die anströmenden Luftmassen sind dadurch zum Über- oder Umströmen dieser Hindernisse gezwungen. In den Tälern kommt es zu Kanalisierungseffekten, wodurch die inneralpinen Winde häufig den Talachsen folgen. Durch Reibung am Boden entsteht Turbulenz, die die bodennahen Luftmassen durchmischt und mit der darüber liegenden Atmosphäre austauscht. Der horizontale Transport und die turbulente Durchmischung sind wichtige meteorologische Mechanismen, die zur Verringerung von Schadstoffkonzentrationen im Zuge ihrer Verfrachtung aus den Quellregionen beitragen.

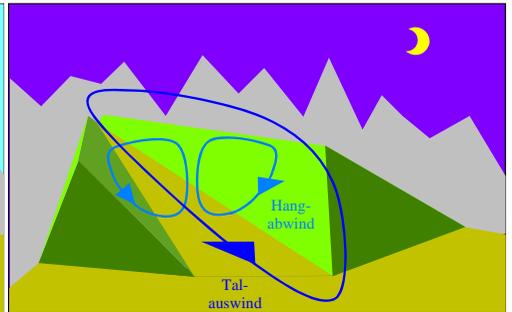
Unter besonderen Bedingungen können im Lee von Gebirgszügen Fallwinde entstehen. Deren unterschiedliche Erscheinungsformen sind auch unter dem Begriff „Föhn“ bekannt (Abb. 5). Föhnwinde können extrem turbulent und böig sein und sorgen so für eine gute Durchmischung der Talatmosphäre. Bei Schwachwindverhältnissen, die üblicherweise bei Hochdruckwetterlagen auftreten, ist der Austausch von Luftmassen durch Wind und reibungsbedingte Turbulenz stark unterdrückt. An Schönwettertagen erwärmt die starke Sonneneinstrahlung die Erdoberfläche und die darüber liegenden Luftmassen. Diese können in Form von Thermikblasen oder als Hangaufwinde aufsteigen, was zu kompensierenden Absinken von Luft in der Talatmosphäre führt. Auch diese Prozesse bewirken einen vertikalen Austausch und damit eine Durchmischung von Luftmassen sowie der in ihnen enthaltenen Schadstoffe.



**Abb. 5** Die Alpen verursachen ganz besondere Wetterphänomene wie die hier als *altocumulus lenticularis* Wolken sichtbar gewordenen Leewellen.



**Abb. 6a** Die Hangaufwinde (violett) und Taleinwinde (rot) sind am frühen Nachmittag sonniger Tage besonders ausgeprägt.



**Abb. 6b** Während der späten Stunden klarer Nächte treten Hangaufwinde (hellblau) zusammen mit Talauswinden (dunkelblau) auf.

Ein weiterer wichtiger Gebirgseffekt besteht darin, dass der Strahlungs- und Wärmeaustausch zwischen dem Erdboden und der Luft von der Hangeigung und -richtung, sowie von der Meereshöhe abhängt. Bei wolkenlosem Himmel und schwacher großräumiger Strömung

werden die verschiedenen Talabschnitte unterschiedlich erwärmt oder gekühlt, was zu horizontalen Temperaturunterschieden zwischen hangnaher und talmittiger Atmosphäre führt. Diese Temperaturunterschiede stellen ihrerseits den Antrieb für thermische Talwindsysteme dar, die durch eine zweimaltägliche Richtungsumkehr gekennzeichnet sind. Die während der Nachtstunden an den Hängen abgekühlte Luft ist in der Regel dichter als die in derselben Höhe liegende Luft über der Talmitte. Dieser Dichteunterschied bewirkt einen hangabwärts gerichteten Kaltluftabfluss. Umgekehrt ist die untertags erwärmte Hangluft leichter als die Luft der Talatmosphäre und führt zu Hangaufwinden. In größerem Maßstab bewirken diese Mechanismen auch einen Austausch von Luftmassen zwischen dem Gebirgsinneren und dem Gebirgsvorland.

Thermische Windsysteme in den Alpen (Abb. 6) bestehen daher aus zwei sich oft überlagernden Zirkulationssystemen, nämlich den Hangwinden quer zur Talachse und den talparallelen Berg- und Talwinden: (1) die Hangwinde sind durch Hangaufwinde untertags und Hangabwinde während der Nachtstunden gekennzeichnet. (2) die eher regionale Berg- und Talwindzirkulation ist gegenüber den Hangwinden um wenige Stunden verzögert und setzt in den späten Vormittagsstunden mit einer taleinwärts gerichteten Strömung ein und wird am späten Abend von den nächtlichen Talauswinden abgelöst.

Im Fall von nur schwachen Winden und geringer Sonneneinstrahlung wird der Austausch von Luftmassen allgemein stark unterdrückt. Derartige Bedingungen sind oft bei Hochdruckwetterlagen in den Nachtstunden oder auch bei starker Bewölkung gegeben. Insbesondere in Kessellagen bleibt die bodennahe Luft innerhalb der umliegenden Gebirgszüge gefangen („Stagnation“), wodurch der horizontale Austausch stark beschränkt wird. Während der Wintermonate werden derartige Situationen durch die strahlungsbedingte Auskühlung der bodennahen Luftschichten und gleichzeitigem Absinken und Erwärmen von höher gelegenen Luftschichten verschärft. Dies führt zur Ausbildung von so genannten Inversionen, die durch eine Zunahme der Temperatur mit der Höhe und (falls die Luft feucht genug ist) durch dicken und lang anhaltenden Nebel gekennzeichnet sind (Abb. 7). Die damit einhergehende Unterdrückung des vertikalen Austausches der darunter liegenden Luftmassen wird oft auch als sprichwörtlicher „Deckel“ umschrieben. Darunter befindliche Luftschadstoffe können sich nur schlecht ausbreiten und verdünnen, wodurch die Konzentrationen im Lauf der Zeit ansteigen.



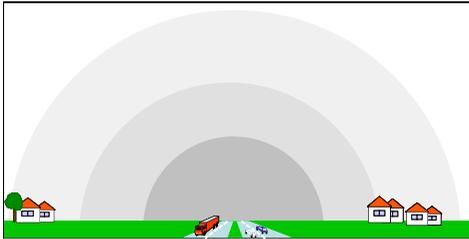
**Abb. 7** Im Tal hat sich eine tief liegende *Stratus* Wolke gebildet, die eine Temperaturinversion markiert. Über der Wolke sind dünne Dunstschichten sichtbar, welche die komplexe Struktur der alpinen Atmosphäre verdeutlichen.

Die durch Kanalisierung, Föhn, Stagnation, Inversionslagen und thermische Windsysteme modifizierten Strömungen spiegeln sich in diversen Besonderheiten des Gebirgsklimas wider. Viele dieser atmosphärischen Phänomene kommen im Flachland überhaupt nicht oder nur schwach ausgeprägt vor.

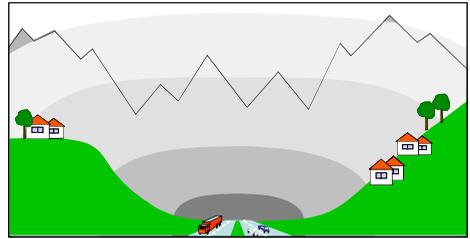
## **Transport von Luftschadstoffen in der alpinen Umwelt**

Das wichtigste Maß für Luftverschmutzung ist die Konzentration von besonders schädlichen Komponenten. Als solche werden Gase wie Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), Kohlenmonoxid ( $\text{CO}$ ), Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ), Ozon ( $\text{O}_3$ ) etc. angesehen, beziehungsweise Schwebeteilchen (Partikel,

Aerosole) in Form von Staub, Schwermetallen (Blei), dem Abrieb von Bremsen, Reifen und Kupplungen. Aerosole und ultrafeine Teilchen werden nach ihrem maximalen Durchmesser in Mikrometern ( $\mu\text{m}$ ) klassifiziert. Somit bezieht sich z.B. der Begriff „PM10“ auf Teilchen von einer Größe kleiner als  $10 \mu\text{m}$ . Konzentrationsmaße beziehen sich auf den Massenanteil eines bestimmten Schadstoffes pro Kubikmeter Luft ( $\text{mg}/\text{m}^3$  oder  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).



**Abb. 8a** Die im Flachland freigesetzten Luftschadstoffe können sich ungehindert in den Raum der darüber liegenden Atmosphäre ausbreiten. Die Grautöne in dieser Skizze deuten die durchschnittlichen Konzentrationen für eine gleichmäßige Verteilung der Windrichtung an.



**Abb. 8b** In einem Tal ist das verfügbare Luftvolumen durch die Hänge reduziert. Die Grautöne verdeutlichen die nun erhöhten durchschnittlichen Konzentrationen für eine gleichmäßige Verteilung der Windrichtung an.

Die lokale Konzentration (Immission) eines bestimmten Schadstoffes hängt sowohl von der Emission wie auch von der so genannten Transmission ab. Erstere gibt die in die Atmosphäre abgegebene Masse an, während letztere ein Maß dafür ist wie viel davon durch die mittlere Strömung (Advektion) und turbulente Prozesse (Diffusion) von oder zu einem gegebenen Ort transportiert wird. Diffusionsprozesse führen ihrer Natur nach zu einer gleichmäßigen Verteilung und abnehmender Konzentration mit zunehmender Entfernung von der Quelle. Anders gesagt, die freigesetzte Menge an Schadstoffen wird auf ein immer größer werdendes Volumen verteilt. Im Fall eines Gleichgewichts zwischen Emission und Transmission bleibt die lokale Immission zeitlich konstant. Bei gegebener Emissionsrate stellt sich bei mäßiger bis hoher Windgeschwindigkeit und entsprechend starkem turbulentem Austausch eine niedrige Gleichgewichtskonzentration ein (Sommer, sonnige Tage, Föhn, Frontdurchgänge). Besonders hohe Konzentrationen sind andererseits bei Schwachwindlagen mit entsprechend ineffizienter turbulenter Durchmischung zu erwarten (Winter, Inversionslagen, klare Nächte).

In den inneralpinen Gebirgsregionen treten noch zusätzliche Effekte auf, da dort im Vergleich zum Flachland ein geringeres Volumen-/Flächenverhältnis gegeben ist. Gebirge reduzieren also das zur Ausbreitung von Luftschadstoffen zur Verfügung stehende Luftvolumen (Abb. 8), was wiederum zur Folge hat, dass bei gleicher Emission und Wetterlage im Gebirge höhere Konzentrationen als im Flachland auftreten müssen.

Die Gegenwart von Inversionen (gekennzeichnet durch eine Zunahme der Temperatur mit der Höhe) in Kombination mit schwa-



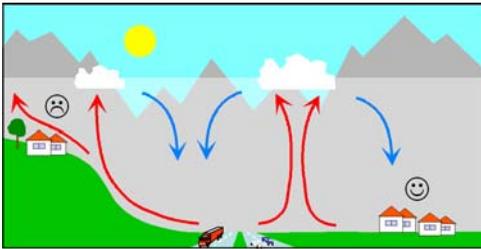
**Abb. 9** Über dem schneebedeckten Talboden hat sich Kaltluft angesammelt. Die damit einhergehende Temperaturinversion hält die sich darunter ansammelnden Luftschadstoffe gefangen, was an der bräunlichen Farbe erkennbar ist. Die Luft ist an diesem Tag zu trocken um Nebel zu bilden.

chem Wind ist besonders kritisch und verursacht besonders starke Luftverschmutzung (Abb. 9 und 10). In den Alpen sind derartige Situationen besonders häufig in Kessel- und engen Tallagen anzutreffen. In beiden Fällen ist die horizontale Strömung stark behindert, sodass durch die entsprechend niedrigen Windgeschwindigkeiten die Luftschadstoffe nicht abtransportiert werden und die gleichzeitig schwache Turbulenz auch deren vertikale Durchmischung stark einschränkt. Da derartige Situationen über Tage bis Wochen anhalten können, sammeln sich die Schadstoffe in den bodennahen Luftschichten an, was zu ständig steigenden Konzentrationen führt.

Auch die thermischen Windsysteme haben besondere Einflüsse auf die Luftverschmutzung in Gebirgslandschaften. So können die Hangaufwinde (Abb. 11a) die hauptsächlich am Talboden entstandenen oder herantransportierten Schadstoffe an den Hängen entlang nach oben und von dort über die Ausgleichsströmung wieder in die Talmitte führen. Thermik, die sich von den Hängen an Felsen, Vorsprüngen oder Waldkanten ablöst, trägt zusätzlich zu einer guten Durchmischung der Talatmosphäre bei. Dies führt im Talgrund zu relativ niedrigeren Schadstoffkonzentrationen, während die Belastung der höher gelegenen Lagen entsprechend steigt.



**Abb. 10** Nahe des Talbodens sind flache Schichten mit stark verschmutzter Luft erkennbar, während darüber die charakteristischen *alocumulus lenticularis* Wolken auf eine großräumige Überströmung der Alpen hinweisen.



**Abb. 11a** Untertags führen Hangaufwinde (rot, links) und Thermik (rot, rechts) zu einer hochreichenden Mischungsschicht. Am Talboden führt dies zu geringeren Schadstoffkonzentrationen weil die Schadstoffe entlang der Talflanken nach oben transportiert werden. Kompensierendes Absinken über der Talmitte ist in blau eingetragen.



**Abb. 11b** In klaren Nächten sind die Abgase unter der Inversion in der Nähe des Talbodens gefangen. Orte direkt am Talrand profitieren von den unverschmutzten Hangabwinden (blau). Plateaus erheben sich meistens über die verschmutzte Inversionsschicht und verbleiben in der Mischungsschicht des vorangegangenen Tages.

Die nächtlichen Hangabwinde (Abb. 11b) führen frische und kühle Luft in die tiefer gelegenen Tallagen. Solange diese Kaltluft nicht durch Hindernisse blockiert wird, strömt sie am Talboden weiter. Verschmutzte Luft kann so zumindest lokal durch Frischluft ersetzt werden, solange die im Allgemeinen flachen Kaltluftströme nicht durch Hindernisse wie z.B. Gebäude eingeschränkt werden, was jedoch häufig der Fall ist. Daher, und auch weil die vertikale Durchmischung während der Nachtstunden generell schlecht ist, werden in Becken- und Tal-

lagen besonders häufig hohe Schadstoffbelastungen angetroffen. Die höher gelegenen Siedlungen sind diesen gegenüber eher begünstigt, obwohl die Luftqualität auch dort durch die oben erwähnten Transporteffekte zumindest untertags bzw. vom Vortag her beeinträchtigt sein kann.

Schließlich kann es während lang anhaltender Schönwetterperioden mit entsprechend ausgeprägten thermischen Windsystemen auch zu einer Akkumulation von Luftschadstoffen kommen. So pendeln die mit Schadstoffen angereicherten Luftmassen mit den tagesperiodischen Gebirgswinden entlang und quer zur Talrichtung hin- und her, während durch die andauernden Emissionen immer mehr Schadstoffe eingetragen werden. Ein großräumiger Austausch von Luftmassen wird durch die oft geringe Mischungsschichthöhe oder eine Inversion in der Höhe behindert. Die anhaltenden Emissionen führen so zu Schadstoffkonzentrationen, die von Tag zu Tag steigen, jedoch weiterhin durch Unterschiede zwischen Tag und Nacht gekennzeichnet sind.

## **Ausbreitung von Lärm in den Alpen**

Ausgehend von seiner Schallquelle, breitet sich Lärm über unsichtbare Schallwellen in der Luft aus. Die Lautheit wird durch die Amplitude der Druckschwankungen bestimmt, die mit dem Durchgang der sich ausbreitenden Schallwellen verbunden sind. Diese können mit Mikrofonen gemessen werden. Die Amplitude der Druckschwankungen wird als *Schallpegel* in einer logarithmischen Skala in Dezibel (dB) angegeben. Lärm setzt sich aus einem breiten Spektrum verschiedener Frequenzen zusammen. Das menschliche Gehör empfindet allerdings Schall gleicher Amplitude aber verschiedener Frequenz unterschiedlich laut. Dies kann jedoch über eine entsprechende Gewichtung der verschiedenen Frequenzbänder berücksichtigt werden. Ein allgemein verwendetes Maß dafür ist der so genannte "A-bewertete Schallpegel", der in dB(A) ausgedrückt wird.

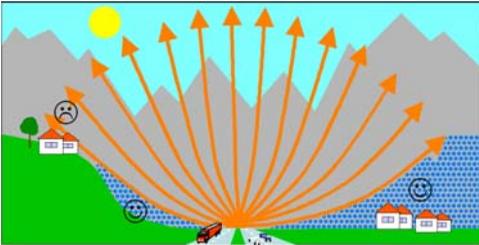
In der Praxis werden kurz- und langfristigen Schallpegel definiert. Für einzelne Lärmereignisse wie z.B. einem vorbeifahrenden Zug, ist der Maximalwert des A-bewerteten Schallpegels von Interesse. Für die allgemeine Beurteilung von Verkehrslärm über längere Perioden werden langfristige Mittelwerte des Schallpegels verwendet (Jahresmittelwerte). Die Europäische Umgebungslärmrichtlinie schreibt die Verwendung des Tag-Abend-Nacht-Schallpegels vor, in den die innerhalb der einzelnen Tagesperioden (Tag, Abend, Nacht) gemittelten Lärmpegel mit unterschiedlichem Gewicht eingehen. Dabei wird den Abend- und Nachtwerten ein größeres Gewicht zugeschrieben, was der menschlichen Empfindung hinsichtlich Lärmbelästigung Rechnung trägt.

Bei ungehinderten Schallausbreitungsbedingungen (Freifeldausbreitung) nimmt die Intensität des Schalls mit der Entfernung von der Quelle ab. Betrachtet man dabei eine Punktquelle (z.B. ein einzelnes Auto), so kann als grobes Maß dafür eine Abnahme des Schallpegels um 6 dB(A) bei Verdoppelung des Abstands von der Quelle angenommen werden. Im Fall einer Linienquelle (z.B. einer Autobahn mit kontinuierlichem und dichtem Verkehr) nimmt der Schallpegel nur um 3 dB(A) je Verdoppelung des Abstands ab. Dies sind jedoch nur Richtwerte und die realen Gegebenheiten hängen von zusätzlichen Faktoren ab.

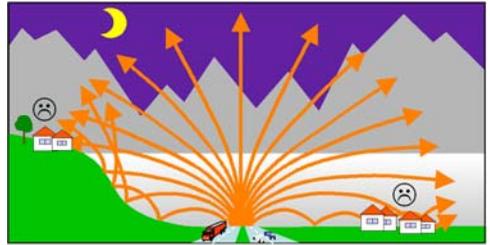
Die in Schallwellen enthaltene Energie nimmt während ihrer Ausbreitung in der Luft durch Absorption ab. Dies betrifft vor allem die hohen Frequenzen, weshalb die Basstöne von Freiluftkonzerten über relativ weite Entfernungen wahrgenommen werden können, während die hohen Töne stark gedämpft werden. Der Grad der Absorption hängt von der Temperatur und der Luftfeuchte ab.

Schallwellen werden zusätzlich durch die Wechselwirkung mit dem Boden gedämpft, was insbesondere die Schallausbreitung von bodennahen Quellen (z.B. eine Straße) zu bodennahen Empfängern (z.B. eine horchende Person) betrifft. Das Ausmaß dieses Effekts hängt von den akustischen Eigenschaften des Bodens ab. Akustisch „weicher“ Untergrund (frischer Schnee, Gras) wirkt stark dämpfend, während akustisch „harte“ Oberflächen (Beton, Wasseroberflächen) fast keine Dämpfung bewirken.

Unter den meteorologischen Einflüssen auf die Schallausbreitung sind vor allem Brechungseffekte von Bedeutung. Dies ist auch der Grund dafür, dass manchmal eine entfernte Schallquelle (z.B. eine Autobahn oder vorbeifahrende Züge) sehr laut zu hören ist, während sie zu anderen Zeiten kaum gehört werden.



**Abb. 12a** Richtung der Schallausbreitung (Schallstrahlen) während des Tages, wenn die Temperatur mit der Höhe abnimmt und der Schall entsprechend nach oben gebrochen wird. In den blau markierten Gebieten (akustische Schattenzonen) am Talboden ist der Lärm deutlich reduziert, da die aufwärts gebrochenen Schallstrahlen in diese Bereiche nicht eindringen können.



**Abb. 12b** Richtung der Schallausbreitung (Schallstrahlen) während der Nacht, wenn die Temperatur in einer Inversionsschicht mit der Höhe zunimmt und der Schall nach unten gebrochen wird. Akustische Schatten treten in diesem Fall nicht auf. Stattdessen wird der Schall am Boden reflektiert.

Brechung entsteht in Gegenwart von vertikalen Temperaturschichtungen oder durch Windeinflüsse. Brechung nach oben (Abb. 12a) wird vor allem untertags beobachtet, was mit der Erwärmung der bodennahen Luft zusammenhängt. Ursprünglich horizontal ausgesandte Schallwellen werden dadurch vom Boden weg nach oben abgelenkt. Unter diesen Bedingungen nimmt die bodennahe Intensität des Schalls sehr stark mit der Entfernung von der Quelle ab, mehr als in einer Atmosphäre ohne Temperaturschichtung.

Auf diese Art und Weise kann die Hörbarkeit von Autobahnen oder Bahnlinien auf einige 100 m Abstand beschränkt sein. Der gegensätzliche Fall, nämlich Brechung nach unten (Abb. 12b), tritt üblicherweise während der Nachtstunden und in Zusammenhang mit Temperaturinversionen auf. Ursprünglich horizontal ausgesandte Schallwellen werden nun zur Oberfläche hin abgelenkt, um dort wieder nach oben reflektiert zu werden, um dann in der Atmosphäre wieder eine Ablenkung nach unten zu erfahren, usw. Dadurch bleibt der Schall in den bodennahen Luftschichten gefangen und die Quelle ist über weite Distanzen gut hörbar. Schließlich wird Brechung auch durch den Wind bewirkt. Brechung nach oben mit entsprechend eingeschränkter Hörbarkeit wird beobachtet, wenn sich die Schallwellen gegen den Wind ausbreiten. Im Gegensatz dazu tritt Brechung nach unten (und entsprechend guter Hörbarkeit) im Fall von Schallausbreitung in Windrichtung auf. Naturgemäß überlagern sich die durch Temperatur- und Windeinflüsse entstehenden Effekte. Dabei können sich beide Effekte

gegenseitig verstärken (z.B. bei Schallausbreitung mit dem Wind innerhalb einer Inversionsschicht) oder sich aber gegenseitig kompensieren.

In Gebirgsgegenden sind einige Besonderheiten zu beachten. Diese beruhen auf der Tatsache, dass die von einer Schallquelle am Talboden in Richtung höher gelegener Gebiete (z.B. Siedlungen an einem Hang oder auf einem Plateau) abgestrahlten Schallwellen sich schräg durch die Talatmosphäre ausbreiten und nicht entlang des Bodens. Dadurch entfällt die oben beschriebene Bodendämpfung. Dies führt zu relativ hohen Schallpegeln in höher gelegenen Gebieten, wobei auf Berggipfeln sogar der Lärm von kilometerweit entfernt liegenden Verkehrsquellen gehört werden kann. In einigen Fällen erinnern die Talhänge an die runde Form der Ränge eines Amphitheaters (Abb. 13). Lebt man in einer solchen Hanglage, so kann man sich buchstäblich dieses Amphitheater-Effekts „erfreuen“, indem die Geräusche des Verkehrs unten im Tal besonders „gut“ zu hören sind.



**Abb. 13** Ein Kunstkopfmikrofon zeichnet den „Amphitheaterereffekt“ an der Ostseite des Wipptals (bei Steinach/Österreich) auf. Im Hintergrund ist eine Brücke der Brennerautobahn erkennbar.

## **Auswirkung von Luftverschmutzung und Lärm auf die Gesundheit**

Sowohl Luftverschmutzung als auch Lärm sind ihrer Natur nach schädliche Umweltfaktoren. Beide können nicht nur die menschliche Gesundheit selbst, sondern auch die allgemeine Lebensqualität an sich beeinträchtigen. Letztere kann nicht nur durch objektive Maßzahlen für Luftschadstoffe oder Lärm beurteilt werden, sondern es müssen auch subjektive Faktoren wie Erwartungshaltungen hinsichtlich einer bestimmten Umgebung wie z.B. einer bevorzugten Wohnlage, eines Erholungsgebietes oder einer Landschaft berücksichtigt werden.

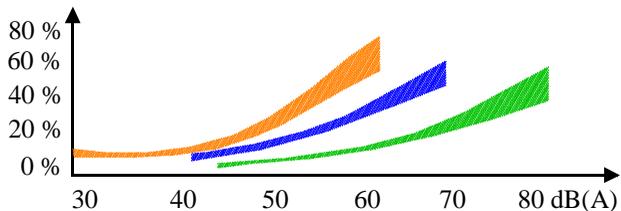
Verschmutzte Luft verursacht oder begünstigt Krankheiten wie Asthma, Bronchitis, Lungenemphyseme, Herz-Kreislaufkrankungen oder Allergien durch eingeatmete Substanzen. Andererseits können allein schon die Wahrnehmung von Luftverschmutzung und ihre persönliche Bewertung bereits gesundheitsschädigende Wirkungen auslösen. Es wird geschätzt, dass ungefähr 90 Prozent der schadstoffbedingten Gesundheitsprobleme durch direkte biologische Wirkung entstehen, während die verbleibenden 10 Prozent der indirekten Kausalkette zugeschrieben werden.

Hinsichtlich des Lärms stellt sich eine andere Sachlage dar. Lärm kann unter anderem direkt Herz-Kreislaufkrankungen verursachen, womit aber nur ca. 25 Prozent der lärmbezogenen Krankheitsfälle erklärt werden können. Für die restlichen 75 Prozent wird angenommen, dass sie auf indirektem Wege entstehen, hauptsächlich in Folge von Schlafstörungen, Verärgerung und entsprechendem Stress. Häufig wird dadurch auch die allgemeine Anfälligkeit für Krankheiten verstärkt.

Die Komplexität der Zusammenhänge zwischen Luftverschmutzung und Lärm einerseits, und ihre Wirkung auf die menschliche Gesundheit und das Wohlbefinden andererseits, verlangen einfache Maßzahlen, die die verschiedenen Effekte zusammenfassen. Diese Maßzahlen werden auch als „Indikatoren“ oder „Indizes“ bezeichnet und können als Kriterien für administrative oder technische Maßnahmen verwendet werden. Luftverschmutzungsindizes kombinieren schadstoffspezifische Konzentrationsklassen, welche je nach dem Schweregrad der ihnen zugeordneten Gesundheitsgefährdung unterschiedlich gewichtet werden. Lärmbezogene In-

dizes werden auf ähnliche Art und Weise hergeleitet, wobei hier die Gewichtung quellorientiert erfolgt (z.B. bezüglich Straßen- oder Bahnlärm). Universelle Lärmindikatoren sind unter anderem deswegen so schwierig zu definieren, weil manche Effekte eher mit langfristigen Hintergrundbelastungen zusammen hängen, während andere eher mit den auftretenden Maximalintensitäten oder der Häufigkeit des Überschreitens bestimmter Schwellwerte zu tun haben. Hier gibt es noch Forschungsbedarf, ebenso auch hinsichtlich der Verwendung kombinierter Lärm- und Schadstoffindizes, die den summarischen Effekt von Luftverschmutzung und Lärmbelastung zu beschreiben versuchen.

Es ist zudem üblich, so genannte „Gesundheitsindizes“ zu definieren, welche die Umweltindikatoren mit Risikofaktoren verschneiden. Letztere sind über demografische Parameter bestimmt, die Angaben über Bevölkerungsdichte, Geschlechterverteilung oder Alter berücksichtigen. Die so genannte „Expositions-



**Abb. 14** Beispiel einer Expositions-Wirkungsfunktion, die den Anteil der „stark belästigten“ Bevölkerung in Abhängigkeit von dem längerfristigen Lärmpegel einer Bundesstraße (rot), einer Autobahn (blau) und einer Eisenbahn (grün).

Wirkungsfunktion“ definiert einen Index, der als Maß für die Gesundheitsbeeinträchtigung (Wirkung) angesehen werden kann. Diese wird über das Produkt von Exposition oder einwirkender Dosis (von Luftschadstoffen und/oder Lärm) und dem relativen Krankheitsrisiko berechnet (Abb. 14), das über eine detaillierte Analyse im Einflussgebiet bestimmt wird. Die Dosisbelastung wird als Integral über die Expositionsdauer berechnet, die üblicherweise durch die mittlere Lebenszeit und die im Untersuchungsgebiet verbrachte Zeit berechnet wird.

Mit derartigen Expositions-Wirkungsfunktionen wird es zum Beispiel auch möglich, die Anzahl von zusätzlichen Krankenhausbelegtagen abzuschätzen, die auf Grund einer Zunahme von Luftverschmutzung zu erwarten sind. Eine weitere und oft verwendete Maßzahl wird als „years of life lost“ (YOLL) bezeichnet. Damit wird versucht, die durch die Luftverschmutzung verminderte Zunahme der Lebenserwartung zu quantifizieren.

Das Schlüsselwort „Monetarisierung“ umschreibt den Versuch, die finanziellen Auswirkungen von Gesundheitsschädigungen zu quantifizieren. Dies kann als Vorstufe zur Berechnung von „externen“ Kosten durch Luftverschmutzung und Lärm angesehen werden. Damit sind jene Ausgaben gemeint, die nicht gemäß dem Verursacherprinzip bezahlt werden, sondern von der Gesellschaft übernommen werden bzw. auf die nächste Generation übertragen werden.

## Lösungsansätze für Sanierung und Planung

Seit einigen Jahrzehnten nimmt sich die internationale Forschung der vielfältigen Aspekte von Luftverschmutzung und Lärm an. Dazu gehören die Entwicklung und Verbesserung entsprechender Messsysteme und Modelle, mit deren Hilfe Schadstoffkonzentrationen, Lärm und Gesundheitsaspekte besser analysiert und vorhergesagt werden können. Hierbei hat es in den letzten Jahren deutliche Fortschritte gegeben. Neue Sensortechnologien und der enorme Anstieg der Computerkapazitäten haben dabei völlig neue Möglichkeiten eröffnet. Insbesondere ist es zunehmend möglich, die komplexen atmosphärischen Strömungen in Gebirgen mit großer Genauigkeit zu erfassen. Dies ist wiederum die Grundlage besserer Vorhersagen der Schadstoffkonzentrationen und des Lärms, die beide sehr stark von den Wetterverhältnissen abhängen. Vorhersagen benötigen zudem möglichst gute Information über die räumliche und

zeitliche Verteilung der Emissionen. Dies betrifft Angaben über die Freisetzung von schädlichen chemischen Stoffen, die Erzeugung von Lärm in Abhängigkeit vom Verkehr bzw. dessen Zusammensetzung oder auch Angaben über den Zustand der Straßen- und Schieneninfrastruktur. Schließlich wurden umfassende Studien über den Einfluss der Luftverschmutzung und des Lärms auf die menschliche Gesundheit und die Belästigung durchgeführt.

### **Mess- und Beobachtungsmethoden**

Die Messung von Umweltbelastungen können auf zweifache Art und Weise durchgeführt werden:

1. Kontinuierliche Messungen (Monitoring) dienen der generellen Überwachung des Umweltzustandes an festgelegten Orten. Aus derartigen Daten können Statistiken abgeleitet werden, wie z.B. Tages- und Jahresmittelwerte, Extremwerte oder die Anzahl der Tage mit Überschreitung von Grenzwerten.
2. Sondermessungen, die für spezielle Untersuchungen, im Rahmen geplanter Messkampagnen bzw. auch auf Grund konkreter Beschwerden durchgeführt werden. Solche Messungen umfassen oft nur einige Tage oder Wochen, wobei auch mobile Messplattformen (Messwagen, Ballone, Flugzeuge) eingesetzt werden. Diese erlauben nicht nur punktuelle Aussagen, sondern auch die Beurteilung von Flächen- oder Volumenverteilungen. Derartige Sondermessungen ermöglichen es eine gegebene Situation mit größerer Genauigkeit zu erfassen, als mit Standardbeobachtungen. Als Beispiel seien gleichzeitige Messungen mehrerer Schadstoffkomponenten in einem dichten Messnetz erwähnt oder die Erfassung von meteorologischen Daten in Kombination mit Schadstoff- und Lärmparametern.

Der Verkehrsstrom (Anzahl der Fahrzeuge pro Stunde) und die Zusammensetzung der Fahrzeugflotte (z.B. PKW und LKW) werden routinemäßig an vielen Abschnitten des alpinen Straßennetzes erfasst, hauptsächlich an Autobahnen und Bundes- bzw. Staatsstraßen. Verkehrszählungen werden allerdings nicht hauptsächlich für Umweltuntersuchungen durchgeführt, sondern dienen eher der allgemeinen Verkehrssteuerung. Gelegentlich werden Verkehrsdaten auch an Nebenstrecken erfasst, wobei manchmal auch die Fahrer z.B. hinsichtlich ihrer Abfahrtsorte und Ziele befragt werden.

### ***Meteorologische Messungen***

Die grundlegenden meteorologischen Parameter (Luftdruck, Temperatur, Feuchte, sowie Windgeschwindigkeit und -richtung) werden heutzutage routinemäßig in stündlichen Intervallen gemessen (bemannte Beobachtungsstationen und automatische Wetterstationen). Der mittlere Abstand zwischen den Beobachtungsstationen der Wetterdienste liegt derzeit bei etwa 50 km, was für eine vollständige Erfassung der in Gebirgsräumen sehr komplexen meteorologischen Verhältnisse allerdings nicht ausreicht. Zudem liegen die meisten meteorologischen Stationen im Tal und es gibt nur wenige Hang- bzw. Bergstationen. Die Höhenverteilung von Temperatur, Feuchte, Luftdruck und Wind wird mit Hilfe von Wetterballonen (Radiosonden) gemessen. Allerdings gibt es im Alpenraum insgesamt nur ca. zehn derartige Radiosondenstationen, wovon nur eine im zentralen Alpenraum liegt (Innsbruck, Österreich). Die Sondierungen werden üblicherweise nur ein- bis zweimal täglich durchgeführt.

Das routinemäßig verfügbare Datenmaterial eignet sich somit nur beschränkt für Untersuchungen der komplexen meteorologischen Phänomene in den Alpen. Nach Möglichkeit werden daher im Rahmen koordinierter Messkampagnen spezielle Untersuchungen durchgeführt. In deren Zusammenhang werden auch hoch spezialisierte und komplexe Meßsysteme eingesetzt. Diese können in zwei grundlegende Typen unterteilt werden:

1. „in-situ“ Messungen

2. Fernerkundungsmessungen (“remote sensing”)

In-situ Instrumente messen den Verlauf der atmosphärischen Parameter am Punkt des jeweiligen Sensors, was normalerweise nur für die Untersuchung des Zustandes der bodennahen Messgrößen praktikabel ist (Abb. 15a). Profilmessungen sind jedoch entlang von Masten durchaus möglich, wengleich eher nur für kürzere Zeiträume und kaum höher reichend als bis 10 m über Grund (Abb. 15b). Entsprechend angepasste Sensoren können auch an Fesselballonen montiert werden, mit denen während der Auf- und Abstiege die Vertikalprofile in den unteren hundert Metern der bodennahen Atmosphäre erfasst werden können (Abb. 15c). Schließlich können in-situ Messungen auch mit speziell ausgerüsteten Forschungsflugzeugen durchgeführt werden. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, die dreidimensionale Struktur der Atmosphäre zu untersuchen. Weniger aufwändig und teuer sind Messungen mit Hilfe von instrumentierten Fahrzeugen, mit denen durch wiederholte Fahrten auf einer bestimmten Route die meteorologischen Verhältnisse entlang von Längs- und Querprofilen bzw. in verschiedenen Höhenlagen von Tälern untersucht werden können.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Abb. 15** (a) Automatische Wetterstation mit einem 2 m-Mast zur Messung der Temperatur (Mitte), des Windes (rechts) und der Strahlung (links); (b) automatische Wetterstation mit einem 10 m-Mast; (c) Fesselballon mit meteorologischer Sonde kurz vor dem Aufstieg; (d) Doppler-Sodar.

Fernerkundungsverfahren sind vor allem für die Messung von Höhenprofilen geeignet. In diesem Zusammenhang werden heutzutage Radar-, Lidar- oder Sodar-Technologien angewendet (Abb. 15d), mit denen über die Ausbreitung elektromagnetischer, optischer oder akustischer Wellen auf die Verteilung der Temperatur und des Windes entlang des Messstrahls geschlossen werden kann.

### **Luftschadstoffmessungen**

In vielen europäischen Ländern gehören langfristige Messungen von Luftschadstoffen bereits zum Standard. Routinemessungen werden vor allem in Städten durchgeführt, aber auch in ländlichen Gebieten bzw. im Umfeld großer Verkehrswege oder kritischer Industriebetriebe. Hauptsächlich werden diejenigen chemischen Komponenten gemessen, für die es gesetzlichen Überwachungsbedarf hinsichtlich der Einhaltung langfristiger Mittelwerte, kurzzeitiger Überschreitungen oder der Häufigkeit von Überschreitungen kritischer Werte über gewisse Zeiträume gibt. Es werden – wenn auch nicht an allen Messstationen – vor allem die folgenden Komponenten gemessen: Kohlenmonoxid (CO), Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>), Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), Ozon (O<sub>3</sub>), flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC) sowie Feinstaub mit einem Teilchendurchmesser kleiner 10 µm (PM10).

Natürlich werden neben diesen stationären Schadstoffmessungen noch weitere Messungen durchgeführt, z.B. routinemäßig über bestimmte Perioden laufende Untersuchungen mit mobilen Messsystemen, im Zusammenhang mit besonderen Vorkommnissen (wie besonders stark belastete Perioden) oder im Rahmen von Forschungsprojekten.

Auch hinsichtlich der Schadstoffmessungen können in-situ- und Fernerkundungsinstrumente Anwendung finden. In-situ Messgeräte sind für eine Vielfalt chemischer Komponenten erhältlich. Diese können je nach Verwendungszweck in Containern, Fahrzeugen (Abb. 16) oder auf Flugzeugen betrieben werden. Fernerkundungsinstrumente werden vor allem für die Untersuchung der Konzentrationsverläufe entlang bestimmter Messpfade verwendet.

### **Lärmmessungen**

Routinemäßige Lärmuntersuchungen werden häufig auf Grund von gesetzlichen Regelungen in der Nähe von Flughäfen durchgeführt, aber kaum entlang von Verkehrswegen. Entsprechende Daten liegen daher hauptsächlich als Ergebnis spezieller Messkampagnen und über unterschiedliche Zeiträume vor (von Stichproben bis hin zu einigen Wochen).

Standardinstrumente messen den A-bewerteten Schallpegel, meist in Sekundenintervallen. Weiter entwickelte Instrumente verfügen über eingebaute Analysemodule, die die spektrale Zusammensetzung des Lärms erfassen (z.B. die Anteile in Oktav- oder Terzbändern innerhalb des hörbaren Frequenzspektrums 20 Hz – 16 kHz). Lärmmessinstrumente verwenden hochempfindliche und windgeschützte Mikrofone, die in standardisierten Messhöhen von 1.5 m oder 4 m über Grund aufgestellt werden sollen.



**Abb. 16** Eine mobile Luftqualitätsmessstation der Landesagentur für Umwelt der Autonomen Provinz Bozen.

Für binaurale (Stereo-) Messungen werden zwei Mikrofone an einem dem menschlichen Kopf nachgebildeten Kunststoffkörper verwendet (Abb. 17). Über diese Messungen ist es möglich, auch die Richtung des einfallenden Schalls zu erfassen. Binaurale Schallmessungen werden hauptsächlich in Zusammenhang mit Lärmwirkungsstudien verwendet, da es möglich ist den Lärm so zu messen, wie er vom menschlichen Gehörsinn wahrgenommen wird.

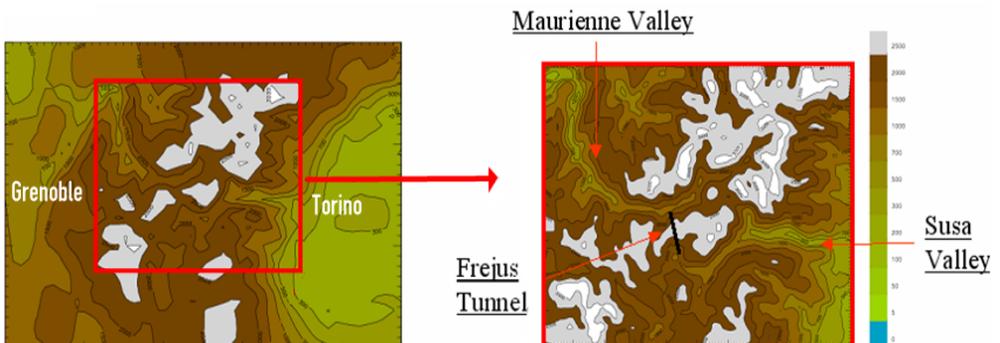


**Abb. 17** Ein binaurales Kopfmikrofon (links) und ein monaurales Mikrofon (rechts) registrieren den Verkehrslärm in einem Erholungsgebiet im Maurienne-Tal (F). Beide Sensoren sind mit Schaumstoff gegen Windgeräusche geschützt.

## Simulationen und Vorhersagen

Der Einfluss geplanter Verkehrswege (Autobahnen, Eisenbahnen), administrativer Maßnahmen (z.B. Geschwindigkeitsbegrenzungen, Nachfahrverbote), Verlagerungen von der Straße auf die Schiene und zukünftige Verkehrsszenarien (z.B. nach der Eröffnung von Eisenbahnbasistunneln, unter Berücksichtigung des Wirtschaftswachstum und der Touristenströme) auf Luftverschmutzung und Lärm und deren Auswirkungen kann nicht durch Beobachtungen ermittelt werden. Es ist hierfür vielmehr notwendig, Simulationswerkzeuge und Vorhersagetechniken anzuwenden.

Grundsätzlich sind die wesentlichen atmosphärischen Vorgänge, die die Winde, die Temperaturschichtungen, den Transport, die Ausbreitung, die chemische Umwandlung und die Deposition von Luftschadstoffen, sowie die Ausbreitung, Absorption, Reflektion, Brechung und Beugung von Schallwellen bestimmen, bekannt und können in Form von mathematischen Gleichungen formuliert werden („Modelle“). Die Lösung dieser Gleichungen liefert die zeitliche Entwicklung und/oder räumliche Verteilung von Schadstoffkonzentrationen und Lärmpegeln bei vorgegebenen Randbedingungen. Vorgeschnittene Emissionsmodelle werden benutzt, um Verkehrsdaten in Emissionsdaten umzuwandeln. Nachgeschaltete Auswertungen führen zu Beziehungen zwischen Belastungen und Auswirkungen, die die gesundheitlichen Effekte von Luftverschmutzung und Lärm beschreiben.



**Abb. 18** Auswirkung der räumlichen Auflösung eines Computermodells: Die Karte links zeigt einen Geländeausschnitt mit 4 km Auflösung. Das rotumrandete Teilgebiet ist rechts mit 1 km Auflösung dargestellt, wobei sehr viel mehr topografische Details sichtbar werden.

So können viele menschengemachte und natürliche Vorgänge, die zu verkehrsbedingten Umweltbelastungen führen, durch Computermodelle oder -modellsysteme simuliert werden. Jedoch muss man sich bewusst sein, dass Modelle gewisse Vereinfachungen beinhalten müssen. Die meisten Modelle haben beispielsweise eine bestimmte räumliche Auflösung, die vorgibt, bis zu welchem Grad kleinere Geländestrukturen aufgelöst werden (Abb. 18). Vorgänge, die kleiner sind als die gewählte räumliche Auflösung müssen in Näherungsformeln erfasst („parametrisiert“) werden.

In den letzten Jahrzehnten sind fortgeschrittene Computermodelle an den Universitäten und Forschungseinrichtungen entwickelt und anhand von Vergleichen mit Daten aus speziell hierfür durchgeführten Messkampagnen geprüft worden. Modelle, die diesen Test bestanden haben, können als Vorhersagewerkzeug für die belastbare Simulation von Zukunftsszenarien benutzt werden.

Da diese hoch auflösenden und umfassenden Computersimulationen einen hohen Rechenaufwand erfordern, sind einfachere Modelle für praktische Anwendungen in Gebrauch. Sie beziehen sich häufig auf ganz bestimmte Überwachungsaufgaben und werden vielfach in Behörden und Ingenieurbüros im Zusammenhang mit Genehmigungsverfahren zur Überprüfung der Einhaltung von Richt- und Grenzwerten benutzt. Ihr Hauptnachteil ist, dass sie meistens für Anwendungen im Flachland entwickelt wurden und daher die komplexe Topografie alpiner Regionen – insbesondere im Hinblick auf die Meteorologie – nicht ausreichend berücksichtigen. Dies kann zu erheblichen Fehlern führen.

Die fortschrittlichen Computermodelle können zwar nicht überall die einfachen Modelle ersetzen, sie sollten aber für bestimmte Aufgaben zusätzlich in Betracht gezogen werden

- die Untersuchung komplexer Situationen, in denen Standardmodelle nur unzureichende Lösungen liefern können,
- die Bewertung von Bedingungen, bei denen mit extremen Luftschadstoff- oder Lärmbelastungen zu rechnen ist und die Gegenmaßnahmen erfordern,
- die Optimierung von Vermeidungsmaßnahmen in speziellen geografischen Situationen,
- die Bewertung zukünftiger Szenarien, z.B. des Verkehrs.

In der Praxis wird der Einsatz von fortschrittlichen Computermodellen jedoch oft durch folgende Umstände erschwert:

- das Fehlen detaillierter Eingabedaten, sei es, dass sie nicht erhoben wurden, oder dass sie nicht zur Verfügung gestellt werden
- wirtschaftliche Überlegungen, die zwischen dem notwendigen Rechenaufwand und der zu erwartenden Genauigkeit abwägen.

Nichtsdestotrotz ist die Anwendung fortgeschrittener Computermodelle vielfach puren Abschätzungen und dem Einsatz einfacher Modelle weit überlegen.

### ***Emissionmodelle***

Emissionsmodelle werden zur Berechnung der Emissionsraten (beispielsweise der freigesetzten Masse von Luftschadstoffen pro Zeiteinheit oder der Schallenergie) entlang von Straßen- und Schienenwegen aus Verkehrsdaten (Anzahl und Zusammensetzung der Fahrzeuge, Geschwindigkeitsverteilung, Steigung und Oberflächenbedingungen der Verkehrswege) benutzt. Die Verkehrsdaten können dabei entweder beobachtet, geschätzt oder vorhergesagt sein.

Die Emissionen des Verkehrs und anderer Quellen (Hausbrand, Industrie) werden in Umweltbehörden in Form von Emissionskatastern katalogisiert.

### Meteorologische Modelle

Meteorologische Modelle werden zur Berechnung der atmosphärischen Parameter benutzt, die die Schadstoff- und Lärmausbreitung kontrollieren. Detaillierte Felder dieser atmosphärischen Parameter in Gebirgsgebieten werden durch die Simulation aller Vorgänge, die durch topografische Einflüsse (Geländehöhe, Landnutzung, aerodynamische and thermodynamische Eigenschaften der Erdoberfläche), den Sonnenstands und die großräumige Wetterlage (Luftmassen, Hoch- und Tiefdruckgebiete) beeinflusst sind, bestimmt. Insbesondere müssen die Modelle in der Lage sein, gebirgsbezogene Windsysteme (Hangwinde, Berg- und Talwind, Kanalisierungen, Föhn) und die Ausbildung von Inversionen zu reproduzieren. Typische meteorologische Modelle für den Alpenraum haben räumliche Auflösungen (Rasterweiten) von 100 m (fein) bis hin zu 10 km (grob). Modelle mit gröberer Auflösung können die Windfelder in engeren Tälern nicht berechnen, dafür decken sie aber größere Gebiete ab. Nestungsmethoden, bei denen mehrere, immer kleiner werdende Modellgebiete mit zunehmend höherer Auflösung ineinander geschachtelt werden, erlauben es jedoch, große Gebiete abzudecken und gleichzeitig ausgewählte kleinere Gebiete mit hoher räumlicher Auflösung zu betrachten (Abb. 19).

### Luftqualitätsmodelle

Luftqualitätsmodelle (auch Chemie-Transportmodelle genannt) berechnen den Transport, die Ausbreitung, die chemische Umwandlung, die Aerosolbildung und die Deposition von Luftschadstoffen für gegebene Emissionsraten und meteorologische Bedingungen. Vielfach kommen diese Randbedingungen aus Emissions- und Meteorologiemodellen (siehe oben). Wie in den Meteorologiemodellen werden topografische Daten benötigt. Luftqualitätsmodelle liefern die räumliche Verteilung von Schadstoff-

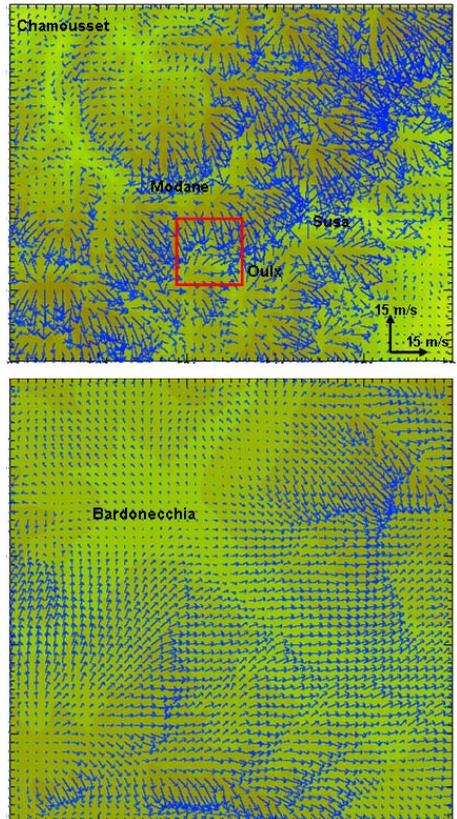


Abb. 19 Beispiel genesteter Simulationen des Windfeldes in 1 km Auflösung (oben) und innerhalb eines Teilgebiets (rotes Rechteck) mit 100 m Auflösung (unten).

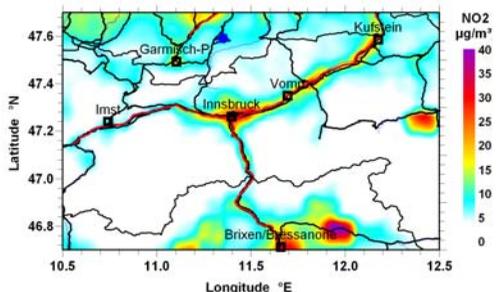


Abb. 20 Beispiel einer simulierten mittleren jährlichen  $\text{NO}_2$  Konzentration in einem größeren Gebiet der östlichen Alpen.

konzentrationen in der Luft (Immission) und die Menge der abgelagerten Stoffe am Boden oder auf der Vegetation (feuchte und trockene Deposition). Bezüglich der räumlichen Auflösung gilt dasselbe, was zuvor über die meteorologischen Modelle gesagt wurde (Abb. 20).

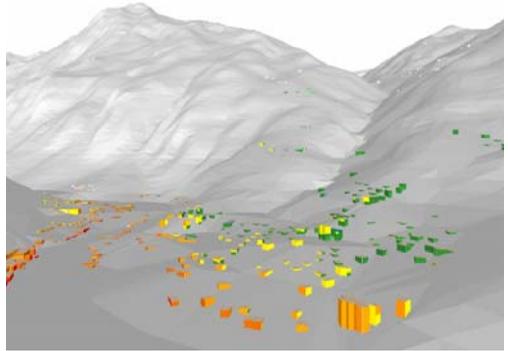
### Lärmmodelle

Abhängig von ihrem Komplexitätsgrad können Lärmmodelle die Schallausbreitung zwischen der Lärmquelle und den Empfängern (beispielsweise Wohngebiete) als Funktion der Quellstärke und der meteorologischen Bedingungen simulieren. Wie in Luftqualitätsmodellen können die Eingabedaten von vorgeschalteten Emissions- und Meteorologiemodellen genommen werden. Zusätzliche Eingabedaten beschreiben die Topografie (Gelände, Bodeneigenschaften, Gebäude). Diese Modelle liefern den Lärmpegel entweder an ausgewählten Positionen oder für größere Gebiete (Lärmkartierung; Abb. 21).

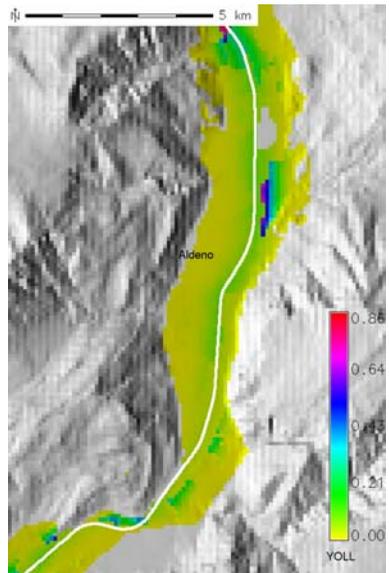
### Wirkungsmodelle

Wirkungsmodelle berechnen auf Grund gemessener oder simulierter Luftqualitäts- und Lärmkarten die Wirkung dieser Belastungen auf die menschliche Gesundheit, den Grad der Belästigung, den möglichen Anstieg der Einweisungsraten in Krankenhäuser, die Abnahme der Lebenserwartung oder die finanziellen Lasten der Umweltbelastungen. Wirkungsmodelle basieren auf Expositions-Wirkungsfunktionen. Zusätzlich benötigen sie demografische Daten (Bevölkerungsdichte, Altersverteilung, Aufenthaltszeiten in geschlossenen Räumen und im Freien, usw.).

Mit Hilfe geografischer Informationssysteme (GIS) ist es möglich, Karten der Bevölkerungsdichte und von Einflussparametern auf die Gesundheit zu kombinieren (Abb. 22).



**Abb. 21** Beispiel für eine Lärmkarte. Die Farben zeigen den berechneten Lärmpegel an den Fassaden der Gebäude in einem Teil des Maurienne-Tals (Frankreich). Rötliche und grünliche Farbtöne bezeichnen hohe bzw. niedrige Lärmpegel.



**Abb. 22** Abnahme der Lebenserwartung ("years of life lost", von Gelb nach Rot ansteigend) auf Grund der Luftverschmutzung in einem Abschnitt des italienischen Etschtals.

### Bildquellen:

J. Defrance (17), M. de Franceschi (16), D. Heimann (1, 2, 3, 4, 5, 19), P. Lercher (13), K. Schäfer (15d, 21), J. Vergeiner (7, 9, 10, 15a-c)

## ALPNAP Projektpartner

- (1) Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, 82234 Weßling, Deutschland (Leitpartner)  
<http://www.dlr.de/pa>
- (2) Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale del Piemonte (ARPA del Piemonte), corso Unione Sovietica, 216, 10134 Torino, Italien.  
<http://www.arpa.piemonte.it/>
- (3) Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement de Lyon (CETE de Lyon), 46, rue Saint-Théobald BP 128, 38081 L'Isle d'Abeau Cedex, Frankreich.  
<http://www.cete-lyon.equipement.gouv.fr>
- (4) Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), Département Acoustique et Éclairage, 24, rue Joseph Fourier, 38400 Saint-Martin-d'Hères, Frankreich.  
<http://www.cstb.fr>
- (5) Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK), Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Bereich Atmosphärische Umweltforschung (IMK-IFU), Kreuzeckbahnstr. 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen, Deutschland.  
<http://www.fzk.de>
- (6) Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima – CNR (ISAC-CNR), corso, Fiume 4, 10133 Torino, Italien.  
<http://www.isac.cnr.it>
- (7) Medizinische Universität Innsbruck (MUI), Department für Hygiene, Mikrobiologie und Sozialmedizin - Sektion für Sozialmedizin, Sonnenburgstr. 16, 6020 Innsbruck, Österreich.  
<http://www.i-med.ac.at/sozialmedizin>
- (8) Technische Universität Graz (TU Graz), Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Inffeldgasse 21a, 8010 Graz, Österreich.  
<http://fvkma.tu-graz.ac.at>
- (9) Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Gruppo di Fisica dell' Atmosfera, Via Mesiano 77, 38100 Trento, Italien.  
<http://apg.ing.unitn.it>
- (10) Universität für Bodenkultur Wien (BOKU), Department Wasser-Atmosphäre-Umwelt, Institut für Meteorologie, Peter Jordan Str. 82, 1190 Wien, Österreich.  
<http://www.wau.boku.ac.at/met.html>
- (11) Universität Innsbruck, Institut für Meteorologie und Geophysik, Innrain 52, 6020 Innsbruck, Österreich.  
<http://www2.uibk.ac.at/meteo>

