

BERICHT

Auswirkungen des Alpentransitverkehrs auf die Luftbelastung in den Alpentälern



Urner Reusstal mit Nebelmeer: LUBETRAX I-Kampagne 1997

ökoscience Lufthygiene AG
Quellenstrasse 31
CH-8031 Zürich

Auftraggeber:
Alpen-Initiative, Postfach,
CH-6460 Altdorf
Tel. 0041-41-870 97 85,
Fax 0041-41-870 97 88,
mail: info@alpeninitiative.ch,
www.alpeninitiative.ch

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	1
2. Entwicklung des Alpentransitverkehrs	2
3. Heutige Immissionssituation an den Alpentransitachsen Gotthard und Brenner	3
3.1. Stickoxid NO _x -Belastung	3
3.2. PM10 (Particulate Matter 10 μm)	4
3.3. Ozon O ₃	5
4. Einfluss der Alpen Meteorologie	6
4.1. Vergleich von Ausbreitungsbedingungen	6
4.2. Inversionen	8
4.3. Messung von Inversionen	9
5. Zukünftige Entwicklung	10
6. Literatur	11

1. Zusammenfassung

Der gesamte alpenquerende Güterverkehr hat sich in den letzten 25 Jahren auf beinahe 160 Mio. t pro Jahr mehr als verdreifacht, wobei vor allem der Anteil der Strasse auf etwa insgesamt zwei Drittel zugenommen hat. Zudem kanalisieren sich die Güterströme auf wenige Alpenübergänge. Aufgrund dieses Verkehrsaufkommens auf der Strasse überschreitet die Luftbelastung entlang der Alpen-transitachsen die gesetzlich erlaubten Grenzwerte weiträumig. Zusätzlich wirkt sich die alpine Meteorologie mit Inversionen und den in den Tälern kanalisierten Winden nachteilig aus.

Der Vergleich der Luftbelastung im Schweizer Mittelland mit der Gotthard- bzw. Brenner-Alpentransit-achse zeigt, dass die **Immissionsbelastung eines Fahrzeuges** wegen der unterschiedlichen **meteorologischen Verhältnisse** an der **Gotthard-Transitachse dreimal höher ist als im Schweizer Mittelland**. Die alpine Meteorologie weist unter anderen die folgenden lufthygienisch wichtigen Charakteristika auf:

- Bei starker Abstrahlung, wie z.B. in der Nacht oder im Winter, bilden sich in den Alpentälern **Inversionen** aus, in welchen die Luftschadstoffe zurückhalten werden und akkumulieren. Der gesamte Talboden weist während Inversionslagen deutlich erhöhte Schadstoffkonzentrationen (z.B. NO_x und PM10) auf.
- An Sommertagen wirken die Alpen als Pumpe für die Luft aus den Alpentälern in 2000-4000 m ü.M. Dadurch werden Schadstoffe aus den Alpentälern effizient in die untere Troposphäre gehoben und sind für den Säureeintrag und besonders die Ozonbelastung von überregionaler Bedeutung.

Die Meteorologie hat aber auch im Verlaufe der Tages- und Jahreszeiten einen bedeutenden Einfluss auf die Lufthygiene. So ist die **Immissionsbelastung eines Fahrzeuges**

- im **Winter im Mittel mehr als zwei mal höher als im Sommer** und
- **in der Nacht im Mittel sechs mal höher als tagsüber**.

Daher ist das **Nachtfahrverbot lufthygienisch sinnvoll**.

Prognoseberechnungen für die Alpentransitachse Brenner zeigen, dass die heute übermässige NO_x-Belastung bis im Jahre 2010 auf etwa 2/3 der Schadstoffbelastung reduziert werden kann, wenn eine **konsequente Umlagerung des Schwerverkehrs auf die Schiene** stattfindet, d.h. der Transitgüterverkehr auf der Strasse halbiert und der Transitgüterverkehr auf der Schiene verdreifacht wird. Ohne Umlagerungspolitik wird die Zunahme des Verkehrs die technischen Verbesserungen in Bereich der NO_x-Abgasreduktion in etwa kompensieren.

Insgesamt sind die externen Kosten des Verkehrs im Alpenraum mit 4000 Fr. pro Einwohner und Jahr etwa viermal höher sind als in den übrigen Teilen der Schweiz.

Aufgrund dieser Charakteristika müssen die **Alpen als lufthygienisch sensible Region** bezeichnet werden.

2. Entwicklung des Alpentransitverkehrs

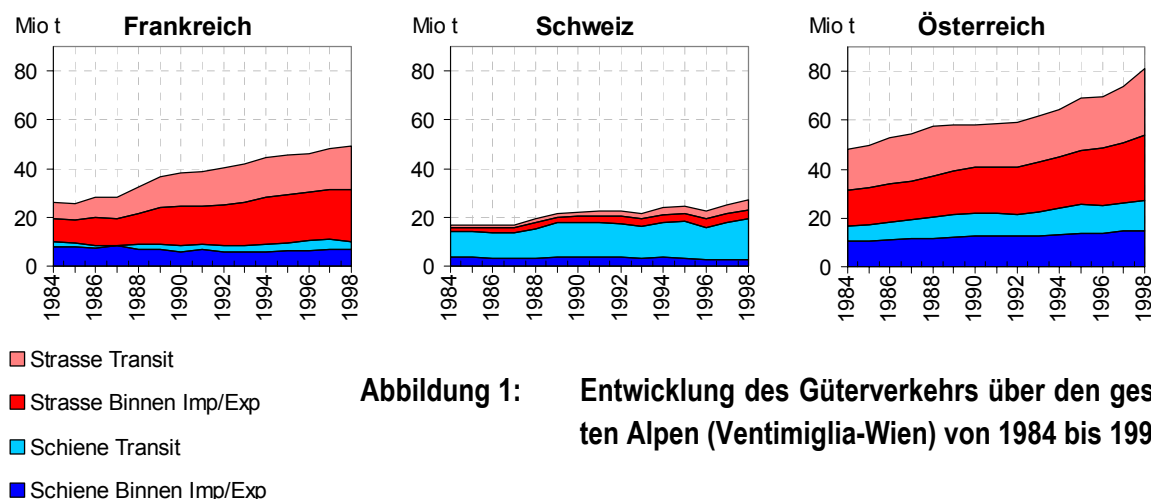
Der gesamte alpenquerende Güterverkehr hat sich in den letzten 25 Jahren mehr als verdreifacht (1). Die Daten von 1980-1998 sind in der Abbildung 1 wiedergegeben. Das Wachstum ist vorwiegend auf der Strasse zu verzeichnen, so dass heute 2/3 des Güterverkehrs über die Strasse rollen. Der gesamte alpenquerende Güterverkehr ist auf wenige Alpenübergänge kanalisiert. Zwei Drittel davon wird über die vier grossen Übergänge (Brenner, Gotthard, Mt. Blanc und Mt. Cenis) abgewickelt (1). So rollte beispielsweise in der Schweiz 84 % des Strassengüterverkehrs über den Gotthard (1998).

Beim gesamten alpenquerenden Güterverkehr ist der Grossteil der Transporte Transitverkehr (50 %), der die Alpen lediglich durchquert, während der Verkehr mit dem Ausland 35 % und der Binnverkehr 15 % ausmacht.

Der alpenquerende Personenverkehr hat in der Schweiz zwischen 1991 und 1996 lediglich um 4.4 % zugenommen. Davon entfällt 4/5 auf Ferien und Freizeitverkehr. Pendler- und Geschäftsverkehr sind von untergeordneter Bedeutung.

Der relative Anteil des PW- und LW-Verkehrs an der Luftverschmutzung (bezogen auf NO_x) beträgt in der Schweiz jeweils 50 %, auf den wichtigen Güter-Alpentransitachsen wie Brenner und Gotthard verschiebt sich der Anteil auf 2/3 zu Lasten des LW-Verkehrs.

Aufgrund dieses Verkehrsaufkommens und den Besonderheiten der alpinen Meteorologie hat die Luftbelastung entlang der Strassen-Alpentransitachsen ein Ausmass erreicht, das mit dem europäischen Ballungsräume vergleichbar ist (2). Dazu kommt, dass der Dauersiedlungsraum in den Alpen sehr begrenzt und daher dicht besiedelt ist. Ein Ausweichen ist für die Bevölkerung nicht möglich.



Mit dem Verkehr sind neben den volkswirtschaftlichen Nutzen auch Kosten verbunden. Die Monetarisierung der externen Kosten des Verkehrs zeigt (9), dass im Unterengadin abseits der Alpentransitachsen (Schweizer Alpen) mit 4000 Fr. pro Kopf und Jahr etwa die vierfachen ungedeckten Kosten anfallen, wie in der Region Schaffhausen (910 Fr. pro Kopf und Jahr). In den Alpentransittälern sind noch höhere externe Kosten als im Unterengadin zu erwarten.

3. Heutige Immissionssituation an den Alpen transitachsen Gotthard und Brenner

Die heutige Immissionssituation wird am Beispiel der beiden gut untersuchten Transitachsen Brenner und Gotthard dargestellt (2,5).

3.1. Stickoxid NO_x -Belastung

Stickoxide entstehen bei Verbrennung fossiler Brenn- und Treibstoffe bei hohen Temperaturen aus dem atmosphärischen Stickstoff und Sauerstoff. Die Emissionen (in der Schweiz) stammen zu 60 % aus dem Verkehr, zu 25 % aus Industrie und Gewerbe, zu 8 % aus Land- und Forstwirtschaft und zu 7 % aus den Haushalten (3). Die Stickoxide werden zu über 90 % als NO emittiert (4) und reagieren in der Atmosphäre mit Sauerstoff zum gesundheitlich gefährlicherem NO_2 , das durch Grenzwerte, wie z.B. dem Jahresmittel-Grenzwert von $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, reglementiert ist. Neben der Gefährdung der Gesundheit des Menschen belasten Stickoxide die Ökosysteme, insbesondere die alpinen Schutzwälder, durch Säureeintrag und Überdüngung.

Heute sind Stickoxide besonders wegen der chronisch erhöhten Belastung ein Problem. So ist beiderseits der **Brenner** Autobahn im Jahresmittel ein Streifen von etwa 1 km mit mehr als $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_2 , dem Jahresmittel-Grenzwert, belastet (2). Auf dem Talboden zeigt die NO_2 -Belastung lediglich einen geringen Abfall als Funktion des Abstandes von der Autobahn, weil während Inversionen die Schadstoffbelastung auf dem Talboden ausgesprochen homogen verteilt ist (2, 5). Für die Zukunft zeigen Prognosen (2), dass die heutige Luftbelastung nur durch konsequente Verlagerung des Verkehrs auf die Schiene reduziert werden kann, da die technischen Reduktionspotentiale das Wachstum der Verkehrsströme nicht zu kompensieren vermögen.

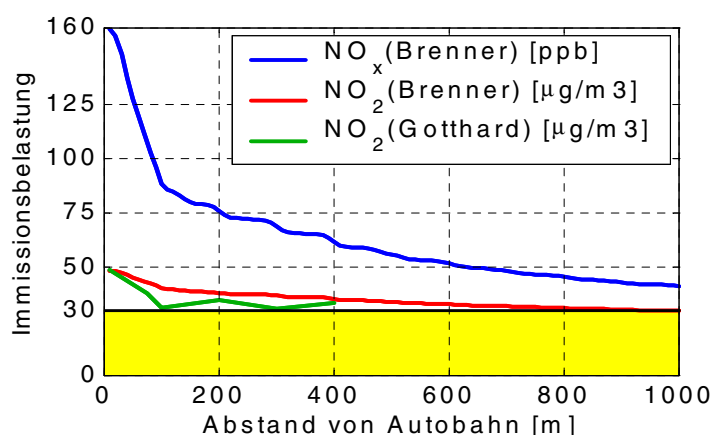


Abbildung 2: Stickoxidbelastung an den Alpen-transitachsen Brenner und Gotthard.

Im Nahbereich der Autobahn ist beim Brenner die NO_x -Konzentration ($\text{NO}_x = \text{NO}_2 + \text{NO}$) mehr als 5mal so hoch, wie die NO_2 -Konzentration (in ppb). Es wird mehr NO emittiert, als zu NO_2 umgewandelt werden kann. Die für die Umwandlung nötige Frischluft wird durch die häufigen Inversionen begrenzt. Damit tragen Inversionen dazu bei, dass die NO_2 -Konzentrationen, die gesetzlich reglementiert sind, niedriger sind, als sie aufgrund der NO_x -Emissionen zu erwarten wären.

Auch am **Gotthard** ist die NO_2 -Belastung durch die reduzierte Frischluftzufuhr aufgrund der Inversionen limitiert. So wird auf dem überwiegenden Teil des Talbodens im Urner Reusstal der NO_2 -

Jahresmittel-Grenzwert von $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ überschritten und dies mit schon nur etwa der Hälfte der Fahrzeugfrequenzen wie im Unterinntal (Zufahrt zu Brenner und Arlberg, vgl. Tabelle 3).

Neben der chronischen NO_2 -Überlastung sind am Gotthard auch die akuten Belastungen so hoch, dass der Tagesgrenzwert von $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mehrmals pro Jahr überschritten wird.

3.2. PM10 (Particulate Matter $10 \mu\text{m}$)

'PM10 ist zur Zeit das am besten geeignete Mass zur Erfassung des gesundheitlichen Risikos der Luftverschmutzung' (6). PM10 bezeichnet Staubteilchen von weniger als $10 \mu\text{m}$ Durchmesser, die über den Kehlkopf hinaus in die Lunge gelangen können. Auch die grossen epidemiologischen Studien der Schweiz (SAPALDIA 7 und SCARPOL 8) zeigen einen klaren linearen Zusammenhang zwischen der PM10-Konzentration und Atemwegserkrankungen. Diese Korrelation ist so stark, dass damit die Gesundheitskosten des Strassenverkehrs monetarisiert werden konnten (9).

In den beiden Abbildung 3 und Abbildung 4 sind die PM10-Emissionen und die PM10-Immissionen kategorisiert. Bei den Emissionen (Abbildung 3) dominiert der Anteil des Verkehrs mit etwa 50 % (blaue Sektoren). Generell ist PM10 räumlich relativ homogen verteilt, da 1/3 der PM10-Belastung aus sekundären Aerosolen besteht, die erst abseits der Quellen der Vorläuferstoffe gebildet werden und natürliche mineralische Partikel zur PM10-Belastung beitragen. Andererseits ist die grossräumige Hintergrundbelastung bei $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anzusiedeln. Darüber hinaus weist PM10 eine lange Verweilzeit in der Atmosphäre auf.

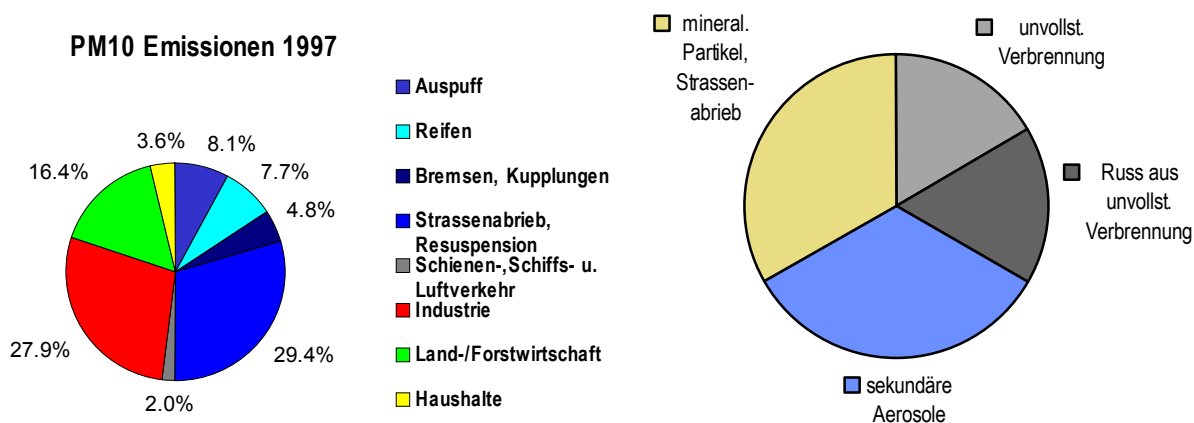


Abbildung 3: Antropogene PM10 Emissionen der Schweiz nach Verursacherkategorien (10). Abbildung 4: PM10-Immissionen nach Quellkategorien (11).

Etwa 2/3 der Schweizer Bevölkerung ist einer PM10 Belastung über dem Jahresmittel-Grenzwert von $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ausgesetzt. Es sind vor allem städtische Zentren und Hauptverkehrsachsen, die eine übermässige PM10-Belastung aufweisen (10). Entlang von Alpentransitachsen zeigen die noch spärlichen PM10-Messungen Konzentrationen, die mit den grossen Ballungsräumen vergleichbar sind. Neben dem Verkehrsaufkommen ist die Häufigkeit des Auftretens von winterlichen, windschwachen Hochdrucklagen mit Temperaturinversionen eine der bestimmenden Grössen für die Höhe der PM10-Belastung. So haben im Dezember 1998 mehrtägige mobile PM10-Messungen während Inversionen am Gotthard gezeigt, dass der gesamte Talboden von Altdorf bis Silenen entlang der Gotthardautobahn mit über $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, dem Tagesmittel-Grenzwert für PM10, belastet ist (12).

3.3. Ozon O₃

Das bodennahe Ozon entsteht aus den Vorläufersubstanzen NO_x und VOC durch komplexe Umwandlungsprozesse in der bodennahen Atmosphäre bei Sonnenlicht und besonders bei sommerlichen Temperaturen. Dabei ist die O₃-Belastung nicht direkt proportional zur Konzentration der Vorläufersubstanzen. Damit die Grenzwerte der Luftreinhalteverordnung einigermaßen eingehalten werden könnten, müssten die Vorläufersubstanzen NO_x und VOC um 70-80 % gegenüber Stand von 1980 reduziert werden (4). Bisher sind NO_x um 30 % und VOC um 42 % vermindert worden (VOC-Lenkungsabgabe in Schweiz ab 2000).

Für Mensch und Natur schädlich sind beim Ozon vor allem Spitzenwerte und die Überschreitung von Schwellwerten - wie der AOT40-Wert als kumulative Dosis über 40 ppb für Wald und landwirtschaftliche Kulturen. Die Ozonbelastung kann in die folgenden Herkunftskategorien aufgetrennt werden:

Tabelle 1: Beiträge zu typischen Ozonbelastungsspitzen nach Herkunftskategorien. Für die Beschreibung der einzelnen Kategorien wird auf (13) verwiesen.

	Alpennordseite	Alpensüdseite	typische Transportdistanzen [km]	
	µg/m ³	µg/m ³	geringer Wind	mittlerer Wind
lokales Ozon	40 (±20)	100 (±50)	10	50
Reservoir-Ozon	60 (±30)	100 (±50)	250	1'000
Hintergrund-Ozon	70 (±20)	70 (±20)	2'500	10'000
natürliches Ozon	30 (±10)	30 (±10)	global	
Total	200 µg/m ³	300 µg/m ³		

Die Alpensüdseite ist stärker von O₃-Belastung betroffen mit Maximalwerten über 300 µg/m³ (1998). Besonders **erhöhte Lagen in den Alpen** (um 1000 m ü. M.) sind chronisch von hohen O₃-Konzentrationen belastet. Dort lagen 1998 die **Ozonwerte während 700 bis 850 Stunden verteilt auf 80-100 Tage über dem 1-h-Grenzwert**. Es konnte gezeigt werden, dass hohe O₃-Konzentrationen auf der Alpensüdseite auftreten, wenn Luftmassen von Mailand herangeführt werden.

Transport und Bildung von Ozon in den Alpen wird durch das europäische Forschungsprojekt VOTALP (14) untersucht. Der Schwerpunkt des ersten Teiles lag bei Prozessen, welche erhöhte O₃-Konzentrationen verursachen, wie z.B. Heruntermischen von Luft aus der Stratosphäre, horizontales Heranführen von verschmutzter Luft aus Ballungsräumen und lokale O₃-Produktion aufgrund von Emissionen in den Alpentälern. Die **mittleren O₃-Konzentrationen** sind vorwiegend durch lokale Emissionen in den Alpentälern und das Heranführen von verschmutzter Luft aus Ballungsräumen verursacht, während **O₃-Spitzenwerte** vorwiegend durch horizontales Heranführen von verschmutzter Luft verursacht werden.

Die Alpen wirken einerseits netto als Ozon-Senke, da die Pflanzen an den Berghängen vermehrt O₃ aufnehmen. Damit hat O₃ eine grosse Wirkung im sensiblen alpinen Ökosystem.

Andererseits wirken Alpentäler bei starker Sonneneinstrahlung als Pumpen für Luft vom Boden auf 2000m-4000 m ü.M. Verschmutzte Luft wird effizient in die untere Troposphäre verfrachtet. Damit hat die Zunahme des Alpentranistverkehrs noch grössere ökologische Folgen, denn die Konzentration des Ozons steigt so weiträumig in der unteren freien Troposphäre (15).

4. Einfluss der Alpenen Meteorologie

4.1. Vergleich von Ausbreitungsbedingungen

Für die Immissionsbelastung spielt neben dem Verkehrsaufkommen die **alpine Meteorologie** eine zentrale Rolle. Um den Einfluss der Meteorologie darzustellen, werden Daten von der Brenner-Autobahn eines Jahres saisonal (Winter, Sommer und Zwischensaison) zu mittleren Tagesgängen zusammengefasst. In der Abbildung 5 sind die mittleren Tagesgänge für die Stickoxide NO_x (Fläche) und die Verkehrsdichte (Linie) dargestellt. Das Verkehrsaufkommen ist im Sommer etwa 1.4-mal

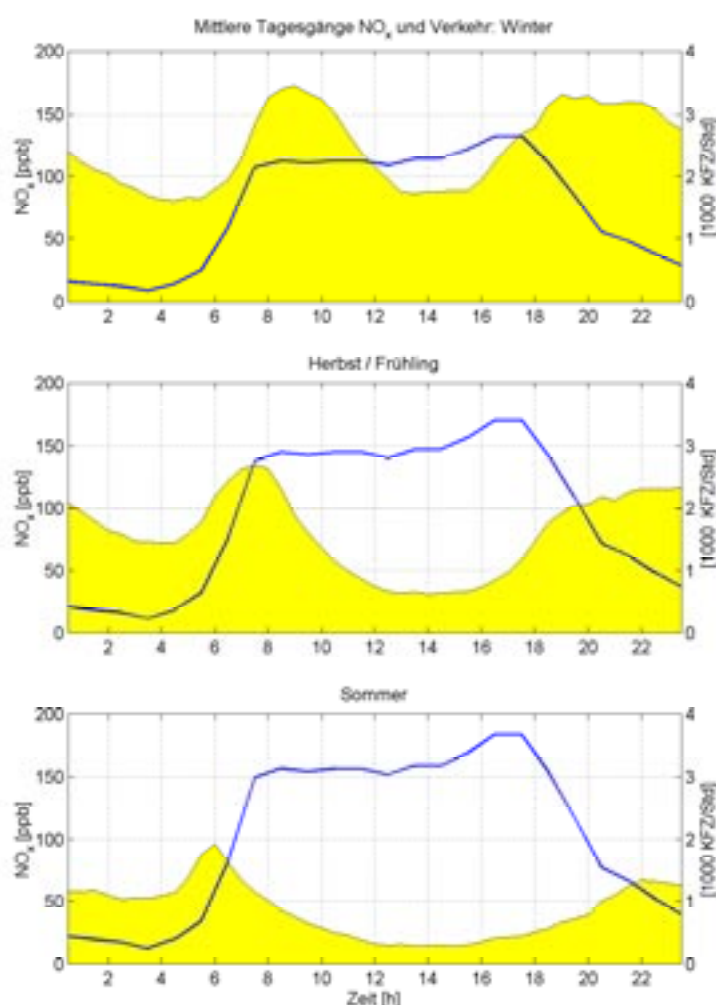


Abbildung 5: Einfluss der Meteorologie auf die Luftbelastung: mittlerer Tagesgang der Stickoxidbelastung (schattiert), Tagesgang des Verkehrs (Linie), Alpentransitachse Brenner: Hall 1995.

höher als im Winter und nachts etwa 10-mal geringer als tagsüber. Die NO_x -Konzentration ist im Sommer verglichen mit den anderen beiden Jahreszeiten gering. Eine leichte Zunahme um 6⁰⁰ und nach 22⁰⁰ ist festzustellen. Im hochbelasteten Winter findet sich ein ausgeprägtes Maximum um etwa 9-Uhr und zwischen 19-22-Uhr. Auch während der Mittagszeit liegt die NO_x -Belastung über 85 ppb. Trotz geringerem Verkehr sind im Winter die NO_x -Immissionen höher als im Sommer. Ebenso ist nachts generell die NO_x -Belastung höher als tagsüber, obwohl das nächtliche Verkehrsaufkommen deutlich geringer ist als tagsüber. Sowohl im Winter als auch nachts fehlt die Sonneneinstrahlung als treibende Kraft der Umwälzung und Durchlüftung der bodennahen Luftschichten. Die meteorologischen Ausbreitungsbedingungen, d.h. das Immissionsklima, spielen folglich für die Immissionsbelastung eine wichtige Rolle.

Um die Ausbreitungsverhältnisse quantifizieren zu können, werden die Immissionsbelastung und das Verkehrsaufkommen an zwei

vergleichbaren autobahnexponierten Standorten (Härkingen im Schweizer Mittelland und Altdorf Gross Ei im Urner Reusstal an der Gotthard Autobahn) miteinander verglichen.

Der Vergleich in der Tabelle 2 zeigt, dass die NO_x –Belastung zwar vergleichbar, die Verkehrsbelastung in Härkingen aber etwa dreimal so hoch ist wie im Urner Reusstal, so dass bei ähnlichen Ausbreitungsbedingungen eine dreifache Immissionsbelastung zu erwarten wäre. Ein Teil der dreifachen Verkehrsemissionen in Härkingen wird durch die 1.5-mal stärkeren Winde besser verfrachtet. Der Einfluss der Hintergrundsbelastung kann vernachlässigt werden, da die Standorte verkehrsexponiert sind und ein vergleichbares Vor- als auch Gesamtbelastungsniveau aufweisen.

Ein Mass für die Ausbreitungsbedingungen ist das Verhältnis der emittierten Luftschadstoffe zur gemessenen Luftbelastung. Das Emissions- zu Immissionsverhältnis wird saisonal über vier Tageszeiten gemittelt (5³⁰-10⁰⁰, 10⁰⁰-16⁰⁰, 16⁰⁰-22⁰⁰, 22⁰⁰-5³⁰) und ist in der Abbildung 6 wiedergegeben.

Tabelle 2: Vergleich der Luftschadstoffe, der Verkehrszahlen und der Winde an den Vergleichsstandorten Härkingen und Altdorf Gross Ei.
Pro LW ist die Schadstoffbelastung an der Gotthard-Achse dreimal so hoch wie an der Station im Mittelland.

Okt 97-Sep 98	Luftschadstoffe		Verkehrszahlen		Winde
	NO _x [ppb]	NO ₂ [µg/m ³]	PW[DTV]	LW [DTV]	WG [m/s]
Härkingen	76	35	49'500	9'300	2.1
Altdorf Gross Ei	68	42	14'800	3'400	1.4
Verhältnis Hä / UR	1.1	0.8	3.4	2.8	1.5

Erstaunlich sind die starken Unterschiede der Ausbreitungsbedingungen. So verursacht dasselbe Fahrzeug, in der Nacht über das Jahr gesehen die sechsfache Luftbelastung als tagsüber. Eine Aufhebung des Nachtfahrverbotes würde pro LW die sechsfache Luftbelastung als tagsüber verursachen. Das Nachtfahrverbot ist daher lufthygienisch sinnvoll.

Jahreszeitlich gesehen sind die Ausbreitungsbedingungen im Winter im Mittel mehr als zwei mal schlechter als im Sommer.

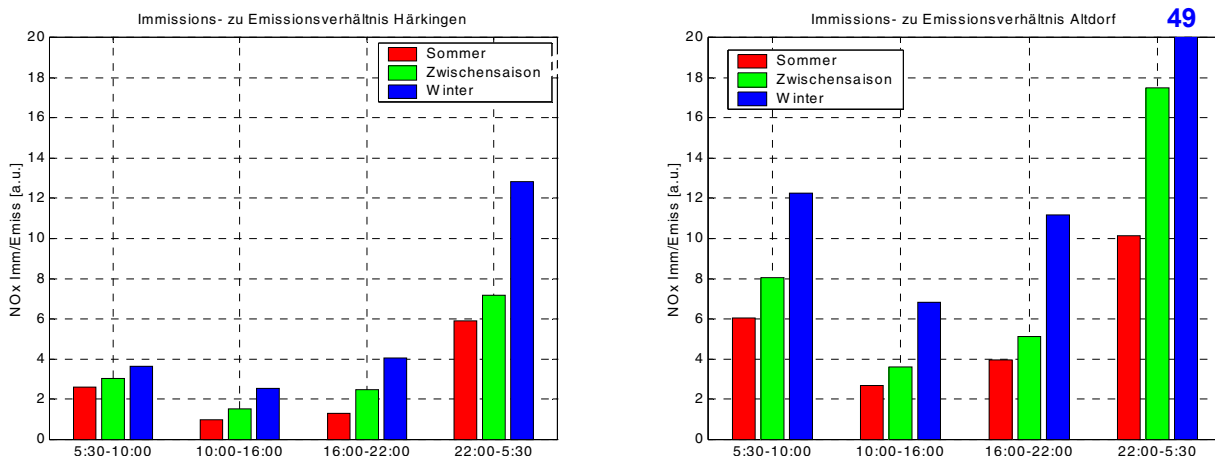


Abbildung 6: Vergleich der Ausbreitungsverhältnisse in Härkingen und Altdorf. Die Einheiten sind so normiert, dass die Ausbreitungsbedingungen in Härkingen tagsüber im Sommer 1 betragen. Besonders zu erwähnen ist das Immissions- zu Emissionsverhältnis im Winter in Altdorf 49 beträgt.

Dass das Urner Reusstal an der Gotthard-Autobahn kein Spezialfall ist, verdeutlicht der Vergleich der Gotthard-Autobahn mit der Brenner-Autobahn bei Vomp im Unterinntal (Tabelle 3). Sowohl die NO_x - als auch die Verkehrsbelastung ist im Unterinntal (Verkehr vom Brenner und lokaler Verkehr von Innsbruck) etwa doppelt so hoch wie an der Gotthard Achse, so dass die Ausbreitungsbedingungen am Gotthard und am Brenner ähnlich sind und sich gegen Härkingen im Schweizer Mittelland abheben. Das NO_2 widerspiegelt die Ausbreitungsverhältnisse nicht, da es als sekundärer Schadstoff O_3 -limitiert ist.

Tabelle 3: Vergleich der Verkehrszahlen, Emissionen und Stickoxidbelastung auf der – Unterinntal- und Gotthard-Autobahn.

		Unterinntal A12; 1995	Gotthard N2; 1996	Verhältnis A12/N2
Verkehrszahlen	LW [DTV]	6'300	3'500	1.8
	PW [DTV]	35'200	14'000	2.5
Emissionen	NO [kg/km Tag]	97.0	48.6	2.0
Stickoxidbelastung	NO_x [ppb]	163	74	2.2
	NO_2 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	49	49	1.0

Der Vergleich der drei fixen Immissionsstationen Härkingen (Schweizer Mittelland, an der Verzweigung A1/A2), Altdorf Gross Ei (Gotthard-Autobahn A2) und Vomp (Brenner/Arlberg-Achse im Unterinntal), basiert auf Einzelbeispielen, lässt aber einen Trend erkennen. Damit die Frage - *ob die Alpen als sensibler Raum eine spezielle Berücksichtigung bedürfen*- angemessen beantwortet werden kann, sollten die Immissionsmessstationen an Alpentransitachsen systematisch miteinander verglichen werden. Der oben dargestellte Vergleich gilt für den Nahbereich der Autobahn. Der Einfluss der Meteorologie auf die Immissionen nimmt mit Abstand von der Quelle zu. Die distanzabhängige Untersuchung mittels mobiler Messungen (5) würde es erlauben, den Aussagebereich auf die gesamten Alpentransittäler auszuweiten.

Ursachen der reduzierten Ausbreitungsbedingungen in den Alpen sind die **Alpine Topographie** - mit dem verminderten Luftvolumen in den engen Tälern – und v.a. die **Alpine Meteorologie** mit den Inversionen (16) und den entlang von Talachsen kanalisiert Winden.

4.2. Inversionen

Inversionen sind stabile Schichtungen der bodennahen Luftmassen. Die Entstehung von Inversionen wird anhand der Abbildung 7 erläutert. Wenn z.B. die Sonne scheint (Abbildung 7, obere Reihe) und den Boden bestrahlt, wird damit auch die bodennahe Luft erwärmt. Diese wird leichter als die darüber liegende kalte Luft und steigt auf, bis sich die Temperaturunterschiede ausgeglichen haben. Weil mit der Höhe auch der Barometerdruck abnimmt, nimmt die Temperatur mit der Höhe um ca. 1°C pro 100 m ab (trockene Luft; Abbildung 7, rechts oben).

Andererseits kühlt sich in der Nacht (Abbildung 7, untere Reihe) der Boden und damit auch die bodennahe Luft wegen der Abstrahlung ab. Sie wird dadurch schwer und *fließt* in die Mulden und Täler. Es bilden sich **Kaltluftseen**. Kalte, schwere Luft liegt stabil geschichtet unter warmer leichter Luft. Eine Temperatur-Inversion hat sich ausgebildet und bildet wegen der stabilen Schichtung eine

Schranke für den Austausch der Luftmassen. Bodennahe Emissionen können nicht über diese Schranke hinweg nach oben entweichen, bleiben im Kaltluftsee und akkumulieren.

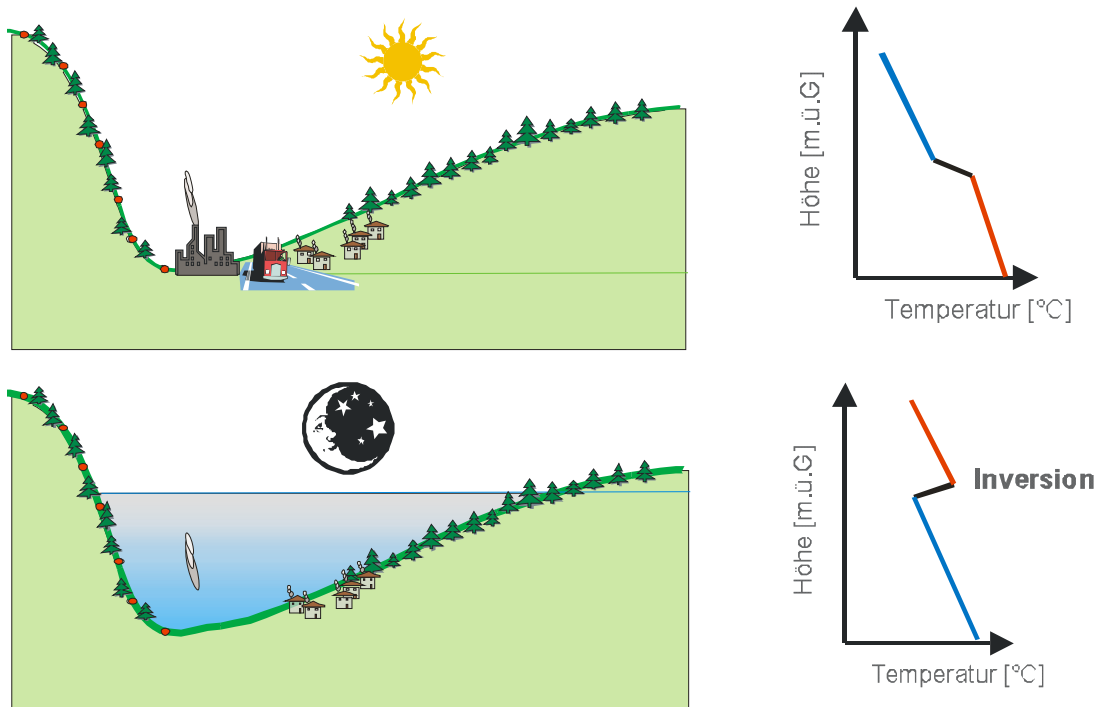


Abbildung 7: Inversionen entstehen bei Abstrahlung in der Nacht (untere Teil-Abbildung) und bilden Kaltluftseen, in welchen die Schadstoffe zurückgehalten und akkumuliert werden.

4.3. Messung von Inversionen

In der **Abbildung 8** zeigen mobile Messungen mit einer Luftseilbahn an der Gotthardachse, dass bei Inversionen (warme Luft über kalter Luft, **Abbildung 8**, links) die NO_x-Belastung (rechts) unterhalb der Inversion deutlich erhöht ist.

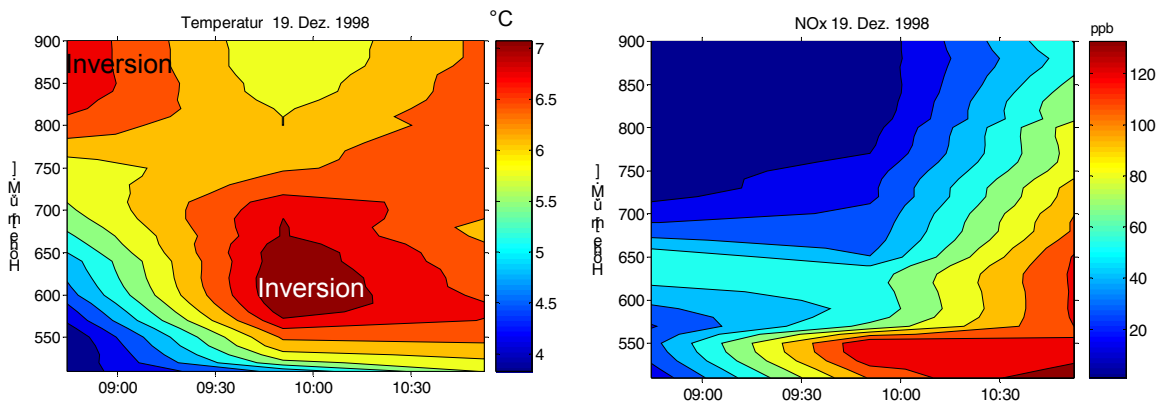


Abbildung 8: Mobile Messungen mit der Luftseilbahn Arnisee (an Gotthardautobahn A2 in Uri) zeigen anhand der Temperatur (links) die Inversion und als Konsequenz die hohe Konzentration der Stickoxide (rechts) unter der Inversionsschicht.

Um Aussagen über die Ausbreitungsbedingungen machen zu können, bedarf es langfristiger Daten, die von der Ökoscience Lufthygiene AG mittels Temperaturprofilen (17) gewonnen werden. Die daraus gewonnenen Inversionshöhen sind in der Abbildung 9 in farbcodierter Darstellung wiedergegeben.

Der Einfluss des Jahresganges der Sonne auf die Inversionen ist durch die weissen Linien hervorgehoben. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass

- Inversionen das ganze Jahr über auftreten
- im Winter auch tagsüber oft keine Auflösung der Inversion stattfindet

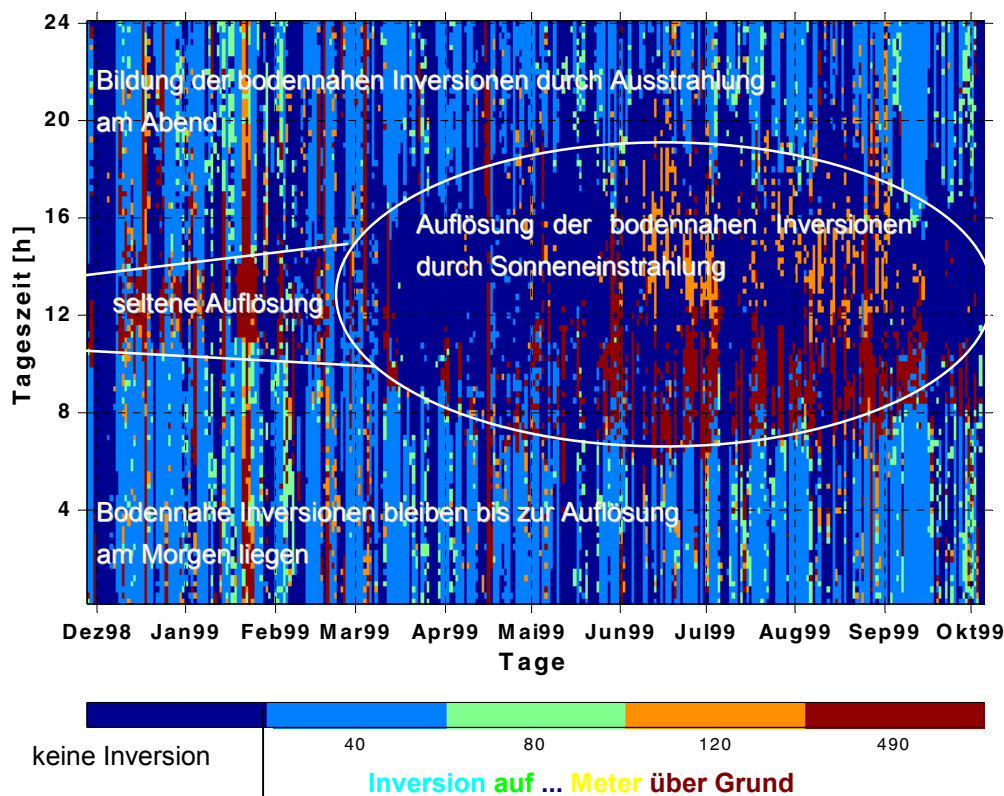


Abbildung 9: Farbcodierte Darstellung der Inversionshöhen: Die einzelnen ¼-Std.-Werte eines Tages sind vertikal übereinander, die Tage nebeneinander angeordnet. Dunkelblaue Felder markieren Zeiten ohne Inversion, während die anderen Farben Inversionen auf unterschiedlichen Höhen repräsentieren.

5. Zukünftige Entwicklung

Prognoseberechnungen für die Alpenstranstachse Brenner (2) zeigen, dass die heute übermäßige NO_x-Belastung bis im Jahre 2010 auf etwa 2/3 der Schadstoffbelastung reduziert werden kann, wenn eine **konsequente Umlagerung des Schwerverkehrs auf die Schiene** stattfindet, d.h. der Transitgüterverkehr auf der Strasse halbiert und der Transitgüterverkehr auf der Schiene verdreifacht wird. Ohne Umlagerungspolitik wird die Zunahme des Verkehrs die technischen Verbesserungen in Bereich der NO_x-Abgasreduktion in etwa kompensieren.

6. Literatur

- 1 Alpenquerender Güterverkehr auf Strasse und Schiene 1994, GVF 242, Bern 1995; *GVF-News* 50, 48/2, 48/1, 42, 39, 30; *GVF-Bericht 1/96 "Wege durch die Alpen"* (EDMZ-Nr. 801.560.d); *GVF-Auftrag 242, "Alpenquerender Güterverkehr auf Strasse und Schiene 1994"* (EDMZ-Nr. 801.557.d).
- 2 Brenner-Bericht: Immissionsklima und Ausbreitungsmodellierung, Endbericht Teil 1 Ökoscience auf Anordnung des Bundesministeriums für Wissenschaft und Verkehr Österreich, 1999.
- 3 BUWAL, Vom Menschen verursachte Luftschadstoffe-Emissionen in der Schweiz von 1900 bis 2010. Schriftenreihe Umwelt, 1995. 256.
- 4 BUWAL, *NABEL Luftbelastung 1998*. Schriftenreihe Umwelt Nr. 311. 1999.
- 5 Die Luftbelastung entlang der Alpentransitachsen A2 und A13 während der lawinenbedingten Sperrung der A2 im Februar 1999, Ökoscience in Zusammenarbeit mit BUWAL und AfU GR, UR, TE, Mai 1999.
- 6 Schwebestaub, Schriftenreihe Umwelt 270, BUWAL 1996.
- 7 SAPALDIA: Schweizerische Studie über Luftverschmutzung und Lungenkrankheiten bei Erwachsenen, Schlussbericht zu Handen des Schweizerischen Nationalfonds, Lausanne/Basel, 1995.
- 8 SCARPOL: Schweizerische Studie über Atemwegserkrankungen und Allergien bei Schulkindern, Schlussbericht zu Handen des Schweizerischen Nationalfonds, Basel/Bern, 1995.
- 9 Faire und effiziente Preise im Verkehr, Markus Maibach, Walter Ott, Christoph Schreyer; Rüegger Verlag, ISBN-Nr. 3 7253 0664 8, 1999.
- 10 Modellierung der PM10-Belastung in der Schweiz, Schriftenreihe Umwelt Nr. 310, BUWAL 1999.
- 11 NFP41 Pressemitteilung: Den Feinstaub-Quellen auf der Spur: <http://www.techedition.ch/virtu/nfp-feinstaub.html>, 1998.
- 12 Die räumliche Verteilung der Stickoxide und des Feinstaubes im Urner Reusstal während winterlichen Inversionslagen, Ökoscience im Auftrag es AfU Uri, 2000.
- 13 Troposphärisches Ozon, Schriftenreihe Umwelt Nr. 277, BUWAL 1996.
- 14 VOTALP, Vertical Ozone Transports in the Alps, Extended Abstracts of Open Workshop, 1998.
- 15 PSI-Jahresbericht 1998, Ozon - Woher? Wohin?
- 16 Stull: Introduction to Boundary Layer Meteorology, 1988.
- 17 LUBETRAX I, Luftbelastung entlang der Alpentransitachse A2 im Kanton Uri, Ökoscience im Auftrag des Amtes für Umweltschutz Uri, 1997.