



Schweizerische Eidgenossenschaft

Confédération suisse

Confederazione Svizzera

Confederaziun svizra

Bundesamt für Raumentwicklung ARE

Office fédéral du développement territorial ARE

Ufficio federale dello sviluppo territoriale ARE

Uffizi federal da svilup dal territori ARE

études

Externe Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs 2000

Klima und bisher nicht erfasste
Umweltbereiche, städtische Räume
sowie vor- und nachgelagerte
Prozesse

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Raumentwicklung (ARE)
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Autoren

Ch. Schreyer (Projektleitung), Infras
D. Sutter, Infras
M. Maibach, Infras
N. Ackermann, Infras

Begleitung seitens des Auftraggebers

N. Carron (Leitung), Bundesamt für Raumentwicklung
Ch. Albrecht, Bundesamt für Raumentwicklung
S. Bader, MeteoSchweiz
P. Breuer, Bundesamt für Verkehr
R. Buri, Bundesamt für Zivilluftfahrt
L. Gutzwiller, Bundesamt für Energie
H. Hänni, Bundesamt für Landwirtschaft
A. Hauser, Bundesamt für Umwelt
D. Ochsner, Bundesamt für Umwelt
J.-M. Pittet, Bundesamt für Statistik
S. Riedener, Bundesamt für Umwelt
M. Zbinden, Bundesamt für Strassen
U. Ziegler, Bundesamt für Zivilluftfahrt

Produktion

R. Menzi, Stabsstelle Information ARE

Zitierweise

Bundesamt für Raumentwicklung (2006)
Externe Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs 2000, Klima und bisher
nicht erfasste Umweltbereiche, städtische Räume sowie vor- und nachgelagerte
Prozesse

Anmerkung

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur die von den Auftraggebern
beauftragten Autoren

Bezugsquelle

BBL, Verkauf Bundespublikationen, 3003 Bern
www.bbl.admin.ch/bundespublikationen, Art.-Nr.: 812.050.d

10.2006

ÜBERSICHT

ABSTRACT	7
ZUSAMMENFASSUNG	9
RÉSUMÉ	17
RIASSUNTO	28
SUMMARY	39
1. EINLEITUNG	47
2. KLIMAKOSTEN	52
3. BISHER NICHT ERFASSTE UMWELTBEREICHE	77
4. ZUSÄTZLICHE EXTERNE KOSTEN FÜR VERKEHRSTEILNEHMER IN STÄDTISCHEN RÄUMEN	141
5. ZUSÄTZLICHE KOSTEN DURCH VOR- UND NACHGELAGERTE PROZESSE	147
6. RESULTATÜBERSICHT	158
7. SCHLUSSFOLGERUNGEN	172
GLOSSAR	175
LITERATUR	182
ANNEX	199
A1. GRUNDLAGEN ZU DEN WIRKUNGSMUSTERN	199
A2. MENGengerüst	244

INHALT

ABSTRACT	7
ZUSAMMENFASSUNG	9
RÉSUMÉ	17
RIASSUNTO	28
SUMMARY	39
1. EINLEITUNG	47
1.1. AUSGANGSLAGE UND ZIEL	47
1.2. SYSTEMABGRENZUNG UND VORGEHEN	47
1.3. BERICHTSSTRUKTUR	51
2. KLIMAKOSTEN	52
2.1. QUANTIFIZIERUNGSMETHODIK	52
2.2. DATENGERÜST	73
2.3. BERECHNUNGEN UND RESULTATE	74
3. BISHER NICHT ERFASSTE UMWELTBEREICHE	77
3.1. ERNTEAUSFÄLLE AUFGRUND LUFTVERSCHMUTZUNG	77
3.1.1. Quantifizierungsmethodik	77
3.1.2. Datengerüst	80
3.1.3. Berechnungen und Resultate	87
3.2. SCHÄDEN DER LUFTVERSCHMUTZUNG IN DER BIOSPHÄRE (WALDSCHÄDEN)	90
3.2.1. Quantifizierungsmethodik	90
3.2.2. Datengerüst	96
3.2.3. Berechnungen und Resultate	102
3.3. SCHÄDEN FÜR GEWÄSSER	106
3.3.1. Quantifizierungsmethodik	106
3.3.2. Datengerüst	110
3.3.3. Berechnungen und Resultate	110
3.4. SCHÄDEN FÜR DIE BODENQUALITÄT	111
3.4.1. Quantifizierungsmethodik	111
3.4.2. Datengerüst	115
3.4.3. Berechnungen und Resultate	120
3.5. ERSCHÜTTERUNGEN	123
3.5.1. Quantifizierungsmethodik	123

3.5.2.	Datengerüst	128
3.5.3.	Berechnungen und Resultate	129
3.6.	ZUSÄTZLICHE UMWELTKOSTEN IN SENSIBLEN RÄUMEN (ALPENRAUM)	132
3.6.1.	Quantifizierungsmethodik	132
3.6.2.	Datengerüst	136
3.6.3.	Berechnungen und Resultate	136
4.	ZUSÄTZLICHE EXTERNE KOSTEN FÜR VERKEHRSTEILNEHMER IN STÄDTISCHEN RÄUMEN	141
4.1.	ZUSÄTZLICHE KOSTEN IN STÄDTISCHEN RÄUMEN: TRENNEFFEKTE UND RÄUMLICHE VERDRÄNGUNG FÜR LV	141
4.1.1.	Quantifizierungsmethodik	141
4.1.2.	Datengerüst	143
4.1.3.	Berechnungen und Resultate	143
5.	ZUSÄTZLICHE KOSTEN DURCH VOR- UND NACHGELAGERTE PROZESSE	147
5.1.	QUANTIFIZIERUNGSMETHODIK	147
5.2.	DATENGERÜST	149
5.3.	BERECHNUNGEN UND RESULTATE	150
5.3.1.	Treibhausgasemissionen vor- und nachgelagerter Prozesse	150
5.3.2.	Gesamtkosten vor- und nachgelagerter Prozesse	154
6.	RESULTATÜBERSICHT	158
6.1.	GESAMTKOSTEN	158
6.1.1.	Kosten pro Verkehrsträger	158
6.1.2.	Kosten pro Verkehrsmittel	163
6.1.3.	Durchschnittskosten pro Verkehrsmittel	164
6.2.	BEURTEILUNG DER RESULTATE/SCHWANKUNGSBEREICHE	168
7.	SCHLUSSFOLGERUNGEN	172
	GLOSSAR	175
	LITERATUR	182

ANNEX	199
A1. GRUNDLAGEN ZU DEN WIRKUNGSMUSTERN	199
1. KLIMAKOSTEN	199
2. ERNTEAUSFÄLLE	207
3. WALDSCHÄDEN	210
4. SCHÄDEN FÜR GEWÄSSER	221
5. SCHÄDEN FÜR DIE BODENQUALITÄT	230
6. ERSCHÜTTERUNGEN	233
7. ZUSÄTZLICHE UMWELTKOSTEN IN SENSIBLEN RÄUMEN	236
8. ZUSATZKOSTEN IN STÄDTISCHEN RÄUMEN	240
9. ZUSATZKOSTEN DURCH VOR- UND NACHGELAGERTE PROZESSE	242
A2. MENGengerüst	244

ABSTRACT

Diese Studie quantifiziert im Sinne einer Abschätzung weitere externe Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs in der Schweiz für das Jahr 2000. Im Zentrum stehen dabei die Klimakosten, weitere externe Umweltkosten (Ernteauffälle, Waldschäden, Gewässerschäden, Schäden für die Bodenqualität, Erschütterungen, Zusatzkosten in sensiblen Räumen), zusätzliche externe Kosten für Verkehrsteilnehmer in städtischen Räumen sowie zusätzliche, externe Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse.

Die Klimakosten des Verkehrs belaufen sich je nach Betrachtungsweise auf 500-2'000 Mio. CHF, auf den Strassenverkehr fallen dabei über 99% der Kosten. Die weiteren Umweltkosten betragen gesamthaft 300 Mio. CHF, wobei der Strassenverkehr dabei 92% der Kosten verursacht. Die zusätzlichen externen Kosten für Verkehrsteilnehmer in städtischen Räumen betragen ca. 90 Mio. CHF wovon ca. 79% dem Strassenverkehr und ca. 21% dem Schienenverkehr angelastet werden können. Zusatzkosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse belaufen sich je nach Betrachtungsweise auf 250-580 Mio. CHF, der Strassenverkehr ist für 92%, der Schienenverkehr für 8% dieser Kosten verantwortlich.

Cette étude procède à une estimation des domaines restants des coûts externes du trafic routier et ferroviaire de Suisse pour l'année 2000. Elle porte sur les coûts liés au changement climatique, sur les coûts externes relatifs aux autres domaines environnementaux non évalués à ce jour (pertes de récoltes, dégâts aux forêts, altération des eaux, atteintes à la qualité des sols, vibrations, coûts supplémentaires dans les espaces sensibles), les coûts externes supplémentaires pour les usagers des transports en milieu urbain, de même que les coûts externes additionnels engendrés par des processus en amont et en aval.

Suivant la perspective adoptée, les coûts du trafic liés au changement climatique se situent entre 500 et 2000 millions de francs suisses, dont plus de 99% sont imputables au trafic routier. Les autres coûts environnementaux s'élèvent globalement à 300 millions de francs suisses, dont 92% occasionnés par le trafic routier. Les coûts externes supplémentaires pour les usagers des transports en milieu urbain se montent à près de 90 millions de francs suisses, dont env. 79% peuvent être attribués au trafic routier. En fonction des hypothèses retenues, les coûts supplémentaires occasionnés par des processus en amont et en aval se situent entre 250 et 580 millions de francs suisses, dont 92% sont dus au trafic routier.

Il presente studio quantifica, come stima, gli ultimi costi esterni del traffico stradale e ferroviario analizzati in Svizzera per l'anno 2000. Le ricerche sono focalizzate sui costi riconducibili ai cambiamenti climatici, sui costi esterni dell'ambiente (perdite di raccolto, danni ai boschi, alle acque e alla qualità del suolo, vibrazioni, costi supplementari nelle aree sensibili), sui costi esterni supplementari per gli utenti del traffico nelle aree urbane, nonché sugli ulteriori costi esterni connessi ai processi collaterali e a monte.

I costi dei cambiamenti climatici dovuti al traffico, che si situano a seconda dell'approccio tra 500-2'000 milioni di franchi, sono imputabili al traffico stradale per più del 99%. Gli altri costi ambientali ammontano in totale a 300 milioni di franchi e il traffico stradale è all'origine del 92% di questi costi. I costi esterni supplementari per gli utenti del traffico nelle aree urbane sono dell'ordine di 90 milioni di franchi, di cui il 79% ca. è riconducibile al traffico stradale e il restante 21% ca. a quello ferroviario. I costi complementari connessi ai processi collaterali e a monte, a seconda dell'approccio, sono di 250-580 milioni di franchi; il traffico stradale è responsabile del 92% di questo tipo di costi e la ferrovia del restante 8%.

This study is an estimative quantification of additional external costs of road and rail transport in Switzerland for the year 2000. The subjects of this study are climate change costs, additional external environmental costs (harvest losses, forest damages, damages to waterbodies, damages for soil quality, vibrations, and additional environmental costs in sensitive areas), additional costs in urban areas and additional external cost of up- and downstream processes.

Climate change costs of road and rail transport amount – depending on the view – to 500–2'000 million CHF per year, almost 99% of these costs accrue in road transport. Additional external environmental costs of 300 million CHF result, whereof around 92% are caused by road transport. Additional external costs in urban areas run to some 90 million CHF a year, again, road transport is responsible for around 79% of these costs. External costs of up- and downstream processes related to road and rail transport amount to 250–580 million CHF, depending on the view. The share of road transport of these costs is 92%, the corresponding figure of rail transport around 8%.

ZUSAMMENFASSUNG

Ausgangslage und Ziel

Für die Schweiz liegen Berechnungen zu den externen Kosten des Verkehrs in den Bereichen Unfallfolgen, Luftverschmutzung (Gesundheit und Gebäudeschäden), Lärm sowie Natur und Landschaft vor.

Diese Studie quantifiziert im Sinne einer Abschätzung bisher nicht erfasste externe Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs in der Schweiz für das Jahr 2000. Damit ergibt sich ein vollständiges Bild der externen Kosten im Verkehrsbereich.

Aufgrund der Komplexität der einzelnen Kostenbereiche und teilweise unsicheren Grundlagen wird viel Wert auf einen differenzierten Umgang mit der Genauigkeit der Ergebnisse gelegt. Alle Schätzungen sind weniger robust als die bisher vorgenommenen Schätzungen zu den externen Kosten des Verkehrs.

Methodik

Für die verschiedenen Kostenbereiche bestanden bisher erste grobe methodische Ansätze. Diese wurden in dieser Studie verfeinert und wo nötig neu entwickelt. Die folgende Tabelle zeigt in einer Übersicht für jeden Kostenbereich die angewandte Methodik, wichtige Kostensätze sowie die Datengrundlagen.

ÜBERSICHT ÜBER DIE BERECHNUNGSMETHODIK UND INPUTDATEN			
Kostenkategorie	Berechnungsansatz	Kostensatz	Mengengerüst
Klimakosten	Methodik: Vermeidungskosten/Schattenpreise zur Erreichung einer Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration sowie verbleibende Schadenskosten Zielszenario: Kurzfristig: Erreichung Kyoto-Ziele Langfristige Betrachtungsweise: Stabilisierungsszenario S550e UNFCCC (max. Temperaturveränderung 2100 2°C) Berechnung: Emissionsmenge * Kostensatz	› Kurzfristige Betrachtungsweise: 35-70 CHF/t CO₂-eq. Die Kostensätze widerspiegeln den aktuellen Wert für den internationalen Zertifikatehandel zur Erreichung der Kyoto-Ziele (unterer Wert) und die Kosten für die Verwirklichung der verkehrsbezogenen Ziele in der Schweiz mit CH-Massnahmen im Verkehrsbereich (ob. Wert) › Langfristige Betrachtungsweise: 80-110 CHF/t CO₂-eq › Verbleibende Schadenskosten: 31 CHF/t CO₂-eq	› Emissionen aus Handbuch Emissionsfaktoren (Strasse) sowie Treibhausgasinventar + Ecoinvent-Datenbank (Bahn) › Territorial-Prinzip

Fortsetzung nächste Seite

ÜBERSICHT ÜBER DIE BERECHNUNGSMETHODIK UND INPUTDATEN			
Kostenkategorie	Berechnungsansatz	Kostensatz	Mengengerüst
Bisher nicht erfasste Umweltkosten			
Ernteaussfälle aufgrund Luftverschmutzung	Methodik: Schadenskosten Berechnung: (Ozon-) Immissionsmenge * Ernteverlustrate pro Immissionsmenge * jährliche Erntemenge * Produzentenpreis = Ernteverlust	› Für jede Pflanzenart wird mit einem spezifischen Produzentenpreis gerechnet.	Ozonimmissionen aus NABEL-Daten. NO _x -Emissionen aus Handbuch Emissionsfaktoren (Strasse) und Treibhausgasinventar (Schiene).
Schäden der Luftverschmutzung in der Biosphäre (Waldschäden)	Methodik: Schadenskosten Berechnung: <i>Erhöhter Windwurf:</i> Erhöhtes Windwurfrisiko bei Bodenversauerung * Anteil Wald mit Bodenversauerung * Häufigkeit von Sturmereignissen * Kostensatz für Sturmereignis <i>Holz-Minderertrag:</i> Immissionsmenge * Ernteverlustrate pro Immissionsmenge * jährliche Holzerntemenge * Produzentenpreis Holz	› Holzpreis: Für die verschiedenen Holzarten werden spezif. Produzentenpreise verwendet. Kostensätze variieren zwischen 55 CHF/m ³ und 168 CHF/m ³ . › Windwurfkosten: Gesamtkosten des Sturmereignis 'Lothar': 782 Mio. CHF (davon 389 Mio. CHF Einkommensverluste der Forstbetriebe plus 393 Mio. CHF Kosten für den Bund)	Für die Versauerung und Ozonbelastung bilden die NO _x -, NH ₃ - und SO ₂ -Emissionen das Mengengerüst: aus dem Handbuch Emissionsfaktoren
Schäden für Gewässer	Für die Gewässer werden keine Schäden berechnet. Der Verkehr hat zwar diverse Einflüsse auf die Gewässerqualität, doch sind alle diese Einflüsse entweder weitgehend unproblematisch (weil zu klein und unterhalb toxischem Niveau), die entstehenden Kosten sind interner Natur oder aber die entstehenden Kosten sind nicht quantifizierbar.		
Schäden für die Bodenqualität	Methodik: Reparatur-/Sanierungskosten ¹ Berechnung: <i>Jährliche Kosten:</i> Jährliche Emissionsmenge / Belastungsgrenzwert (Prüfwert) * Kostensatz für Bodensanierung	› Bodensanierungskosten: 100 CHF/m ² (Kosten für Entsorgung von belastetem Material und Ersatz mit unverschmutztem Material)	› <i>Jährliche Kosten:</i> Emissionen aus Handbuch Emissionsfaktoren (Schwermetalle Strasse) und Ecoinvent (PAK-Emissionen sowie Schwermetalle Bahn)

Fortsetzung nächste Seite

¹ Reparatur-/Sanierungskosten: Quantifizierungsansatz zur Abschätzung der Schadenskosten, falls diese nicht direkt berechenbar sind. Sie entsprechen den Kosten, die bei der Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands nach einer vom Verkehr verursachten Umweltbeeinträchtigung anfallen.

ÜBERSICHT ÜBER DIE BERECHNUNGSMETHODIK UND INPUTDATEN			
Kostenkategorie	Berechnungsansatz	Kostensatz	Mengengerüst
Erschütterungen	Methodik: Vermeidungskosten, als Alternative Schadenskosten Berechnung: <i>Vermeidungskosten:</i> Keine Neuberechnungen, Zahlen aus best. Studie <i>Schadenskosten:</i> Belastete Personen * Kostensatz für Schadenskosten (analog zu Lärmkostenstudie)	› Vermeidungskosten Schiene: Daten aus Studie von SBB/BAFU/BAV. › Schadenskosten für betroffene Personen: Mietzinsausfälle: 526 CHF pro Person und Jahr; Gesundheitskosten: 377 CHF/(P*a)	› Anzahl Betroffene Schienenverkehr: Zahlen aus bestehender Studie von SBB/BAFU/BAV. › Betroffene im Strassenverkehr: Keine Berechnungen vorgenommen.
Zusätzliche Umweltkosten in sensiblen Räumen (Alpenraum) › Lärmeinfluss › Sensible Naturräume, Landschaftsbild	Methodik: Zahlungsbereitschaftsansatz für unverbauete Landschaft Berechnung: Anzahl Übernachtungen * Anteil Verkehrsinfrastruktur an überbauter Fläche * Zahlungsbereitschaftsansatz	› 20-30 CHF pro Person + Woche (Studie NFP 48)	BFS Statistik (Logiernächte, Arealstatistik, Streckennetz)
Zusätzliche externe Kosten für Verkehrsteilnehmer in städtischen Räumen			
Zusätzliche Kosten in städtischen Räumen: Trenneffekte und räumliche Verdrängung für Langsamverkehr (LV)	Methodik: Zeitkosten für Fussgänger + Infrastrukturkosten zur Verkehrstrennung (LV/MIV) Berechnung: Monetarisierung von Wartezeiten für Strassenüberquerung + Infrastrukturkosten für Verkehrstrennung für höherklassige Strassen	› Zeitkostensätze aus Grundlagenstudie zur neuen VSS Norm. › Erstellungskosten Radweg-Infrastruktur auf Basis Studien und Expertenbefragung	› Bevölkerungsdaten- und Pendlerzahlen aus VZ2000 › Infrastrukturdaten Städte aus BFS-Statistik und Areal-Statistik und weiteren Quellen
Zusätzliche Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse			
Energieproduktion/Graue Energie Fahrzeuge/ Rollmaterial, Infrastruktur	Methodik: Berücksichtigung der Treibhausgas-Emissionen vor- und nachgelagerter Prozesse. Vermeidungskosten/ Schattenpreise zur Erreichung einer Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration. Berechnung: Emissionsmenge * Kostensatz	Analog Klimakosten: › Kurzfristige Betrachtungsweise: 35-70 CHF/t CO ₂ -eq › Langfristige Betrachtungsweise: 80-110 CHF/t CO ₂ -eq	› Emissionen aus Datenbank Ecoinvent und Handbuch Emissionsfaktoren › Gesamte Lebenszyklus-Emissionen an Treibhausgasen werden berücksichtigt.

Tabelle Z-1

Ergebnisse: Gesamtkosten

Die folgende Tabelle zeigt die Gesamtkosten für Strasse und Schiene (Zeitpunkt 2000). Bewusst werden die Ergebnisse nicht zusammengezählt, weil die Kosten unterschiedliche Bereiche umfassen und sich auf verschiedene Prozesse beziehen. Mit Abstand am bedeutendsten sind die Klimakosten (je nach Betrachtungsweise) und die mit demselben Ansatz bewerteten Kosten von vor- und nachgelagerten Prozessen. Eher geringe Grössenordnungen ergeben sich bei den bisher nicht erfassten Umweltkosten. Der grösste Teil der Kosten fällt auf den Strassenverkehr (über 95%). Dies liegt darin begründet, dass die meisten Kosten von den Klima- und Luftschadstoffemissionen direkt abhängig sind. Die wichtigsten Kostenblöcke für die Schiene stammen von Erschütterungen sowie vor- und nachgelagerter Prozesse (graue Energie von Fahrzeug- und Infrastrukturproduktion und -unterhalt).

ÜBERSICHT ZU DEN GESAMTKOSTEN PRO KOSTENBEREICH 2000 IN MIO. CHF PRO JAHR			
	Gesamtkosten	Strasse	Schiene
Klimakosten			
Kurzfristige Betrachtungsweise: Basiswert	504	503	1
Kurzfristige Betrachtungsweise: CH-Kostensatz im Verkehr	1'008	1'006	2
Langfristige Betrachtungsweise: Basiswert	1'152	1'149	2
Langfristige Betrachtungsweise: Oberer Wert	1'583	1'580	3
Maximalbetrachtung (inkl. ungedeckte Schadenskosten)	2'030	2'026	4
Bisher nicht erfasste Umweltkosten			
Ernteauffälle	74	74	1
Waldschäden	70	70	1
Schäden Gewässer	~0*	~0*	~0*
Schäden Boden	104	103	1
Erschütterungen	20	n.b.	20
Zusatzkosten in sensiblen Räumen (Alpen)	31	29	2
Zusätzliche Kosten für Verkehrsteilnehmer in städtischen Räumen			
Zusatzkosten in städtischen Räumen	89	70	18
Zusätzliche Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse			
Vor- und nachgelagerte Prozesse: Kurzfristige Betrachtungsweise	252	231	21
Vor- und nachgelagerte Prozesse: Langfristige Betrachtungsweise	577	529	48

Tabelle Z-2 Erläuterungen:

*: Die Gewässerschäden sind gemäss den vorliegenden Abschätzungen sehr gering bzw. nahe bei null. Die Einflüsse des Verkehrs auf die Gewässerqualität sind entweder weitgehend unproblematisch (weil zu klein und unterhalb toxischem Niveau) oder die entstehenden Kosten sind interner Natur oder aber die Kosten sind nicht quantifizierbar.

n.b.: nicht bestimmbar, weil wichtige Datengrundlagen fehlen.

Geringfügige Rundungsdifferenzen zwischen der Spalte 'Gesamtkosten' und der Summe der Spalten 'Strasse' und 'Schiene' möglich.

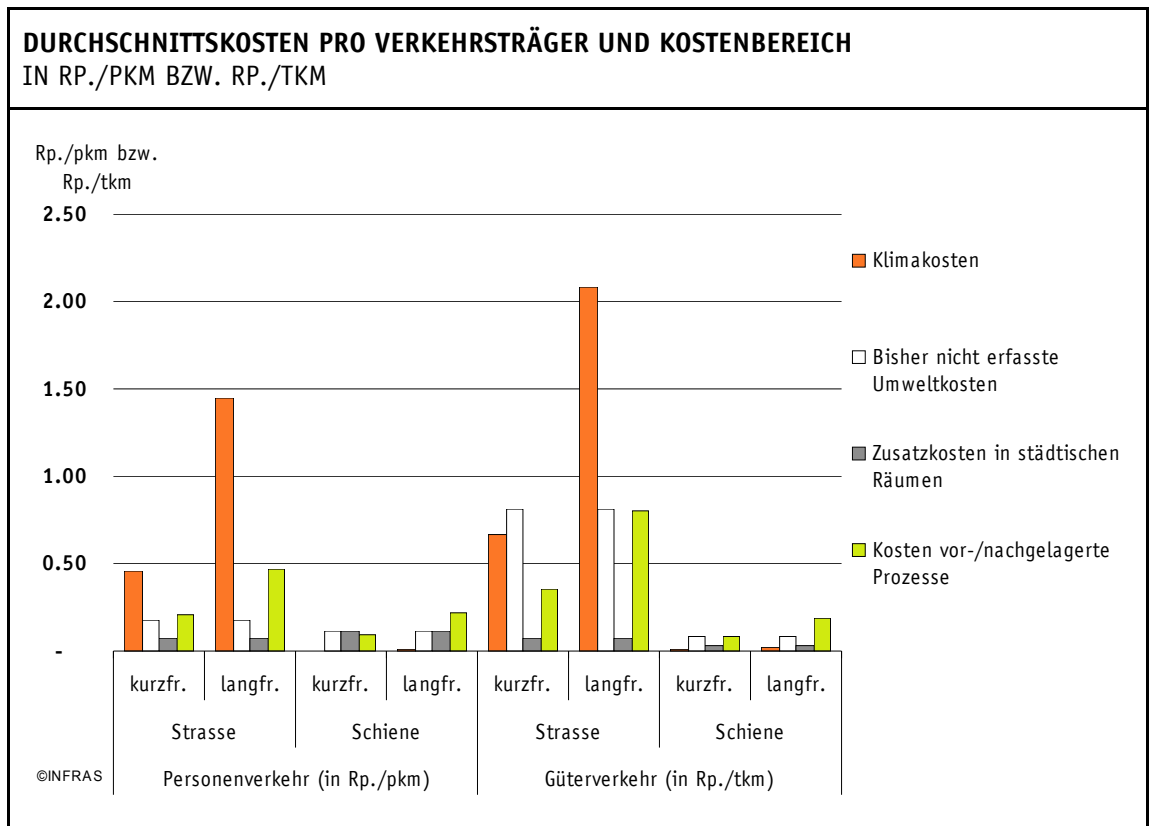
Ergebnisse: Durchschnittskosten

Die spezifischen Kosten lassen sich sowohl in Kosten pro Personen- resp. Tonnenkilometer wie auch in Kosten pro Fahrzeug- resp. Zugskilometer ausdrücken. Sie können als Näherungsgrösse für die für Preismassnahmen eigentlich relevanten Grenzkosten dienen. Tabelle Z-3 stellt in aggregierter Form die spezifischen Kosten von Strasse und Schiene einander gegenüber. Im Klimabereich sind die spezifischen Kosten im Strassenverkehr über 100mal höher als diejenigen des Schienenverkehrs, vor allem dank des günstigen Strommixes der Schiene. Bei den übrigen Kostenbereichen ist der Vorteil der Schiene deutlich geringer. Die durchschnittlichen bisher nicht erfassten Umweltkosten des Strassenverkehrs sind um einen Faktor 1.5 (Personenverkehr) bzw. 9.4 (Güterverkehr) höher als beim Schienenverkehr. Die Zusatzkosten des Strassenverkehrs in städtischen Räumen bezogen auf die Verkehrsleistung sind im Personenverkehr um einen Faktor 1.7 tiefer als im Schienenverkehr, beim Güterverkehr wiederum um einen Faktor 2.4 höher. Bei den vor- und nachgelagerten Prozessen hat der Strassenverkehr um einen Faktor 2.1 (Personenverkehr) bzw. 4.4 (Güterverkehr) höhere Kosten als der Schienenverkehr.

DURCHSCHNITTSKOSTEN PRO VERKEHRSTRÄGER UND KOSTENBEREICH IN RP./PKM BZW. RP./TKM				
	Personenverkehr (in Rp./pkm)		Güterverkehr (in Rp./tkm)	
	Strasse	Schiene	Strasse	Schiene
Klimakosten*	0.46-1.45	0.00-0.01	0.66-2.08	0.01-0.02
Bisher nicht erfasste Umweltkosten	0.17	0.12	0.82	0.09
Zusatzkosten in städtischen Räumen	0.07	0.12	0.07	0.03
Kosten durch vor-/nachgelagerte Prozesse	0.20-0.47	0.10-0.23	0.35-0.81	0.08-0.18

Tabelle Z-3 Bemerkungen: *: Durchschnittskosten im Klimabereich ohne verbleibende Schadenskosten (Maximalbetrachtung).

Die folgende Figur zeigt die Zahlen in einer Übersicht:



Figur Z-1 Durchschnittskosten in Rp. pro Personen-km bzw. Rp. pro Tonnen-km.

Hinweis: Es wurden jeweils die Kosten für die lang- bzw. kurzfristige Betrachtungsweise bei den Vermeidungskostensätzen im Klimabereich für die Verkehrsträger Strasse und Schiene dargestellt, differenziert nach Personen- und Güterverkehr. Die Vermeidungskostensätze im Klimabereich beeinflussen die Gesamtkosten der Kostenbereiche 'Klimakosten' und 'Kosten vor- und nachgelagerter Prozesse'.

Fazit der Schätzungen

- › Mit Ausnahme der Klimakosten sowie der Kosten vor- und nachgelagerter Prozesse liegt die Grössenordnung der bisher nicht erfassten externen Kosten tiefer als in den bisher quantifizierten externen Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs (Unfälle, Natur und Landschaft, Gesundheitskosten, Lärm und Gebäudeschäden).
- › Die mit Abstand wichtigste Kostenkategorie sind die 'Klimakosten'. Auch bei tiefen Ansätzen für Vermeidungs- oder Schadenskosten verursacht der Strassen- und Schienenverkehr jährliche Kosten in einer Grössenordnung von mindestens 0.5 - 1 Mrd. CHF. Eine differenzierte Betrachtungsweise (kurzfristig zur Erreichung der Zwischenziele gemäss Kyoto-Protokoll; langfristig zur Erreichung der Ziele bis 2050/2100) ist angesichts der grossen Unsicherheiten und Quantifizierungsschwierigkeiten unumgänglich. Gleichzeitig sind bei der kurzfristigen Betrachtungsweise eine internationale Optik über alle Sektoren und eine

Schweizer Optik (bezogen auf die CH-Verkehrsziele) möglich. Entsprechend ergibt sich eine grosse Streubreite bezüglich der Ergebnisse.

- › Ein weiterer wichtiger Kostenbereich sind die Kosten für vor- und nachgelagerte Prozesse. Hier wurden die bei der Produktion, beim Unterhalt und bei der Entsorgung der Fahrzeuge und des Rollmaterials sowie der Infrastruktur auftretenden Treibhausgasemissionen quantifiziert und mit Hilfe des Vermeidungskostenansatzes der Klimakosten bewertet. Ebenso wurde die Bereitstellung der Energieträger (Benzin und Diesel im Strassenverkehr bzw. Elektrizität im Schienenverkehr) bilanziert und bewertet.² Insgesamt ergeben sich Kosten in einer Grössenordnung von 250-580 Mio. CHF.
- › Die externen Kosten durch Ernteauffälle liegen in einer Grössenordnung von 74 Mio. CHF pro Jahr. Der berechnete Wert stellt einen nachvollziehbaren Durchschnittswert dar, da er auf der mittleren Ozonbelastung der vergangenen sechs Jahre sowie auf anerkannten Expositions-Wirkungs-Zusammenhängen beruht.
- › Die Bedeutung der Waldschäden liegt unter Berücksichtigung der heute vorliegenden Forschungsergebnisse mit ca. 70 Mio. CHF pro Jahr deutlich tiefer als in früheren Abschätzungen. Die kausalen Zusammenhänge sind im komplexen Ökosystem Wald aber noch immer nur unvollständig erforscht und quantifizierbar. Weil daher nur ein Teil der Schadensaspekte quantifiziert werden konnte, könnten die tatsächlichen Kosten auch deutlich über der vorliegenden Abschätzung liegen. In der Sensitivitätsanalyse wurde ein oberer Schwellenwert von maximal 250 Mio. CHF bestimmt.
- › Während die Schäden an Gewässern sehr gering bzw. nahe null sind, liegen die Schäden an der Bodenqualität in einem Bereich von rund 100 Mio. CHF pro Jahr.
- › Die zusätzlichen Schäden im alpinen Raum sind relativ schwierig zu quantifizieren (ca. 30 Mio. CHF). Die hier vorgenommene grobe Schätzung beruht auf einer Zahlungsbereitschaft für unberührte Natur, die als Proxygrösse dient. Sie kann als erster Anhaltspunkt für eine ungefähre Grössenordnung der erwarteten externen Kosten im Alpenraum dienen.
- › Zunehmende Raumkonflikte im urbanen Raum führen zu externen Kosten von rund 90 Mio. CHF jährlich für nicht motorisierte Verkehrsteilnehmer. Die Bedeutung dieser Kostenkategorie wird in Zukunft eher zunehmen.

² Das günstige Abschneiden der Bahn hängt eng zusammen mit dem umweltfreundlichen Schweizer Bahnstrommix (über 95% Wasserkraft). Würde zum Vergleich der internationale Strommix des europäischen Verbunds UCTE unterstellt, so würden sich die Kosten der Schiene in diesem Bereich verdoppeln bzw. verdreifachen.

Zukünftiger Umgang mit den weiteren externen Effekten

Die Berechnungen zu den einzelnen Bereichen haben deutlich gemacht, dass die Schätzmethoden aufgrund verschiedener Ursachen – vor allem infolge grosser Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftiger Auswirkungen heutiger Emissionen sowie teilweise unbekannter oder noch zu wenig erforschter Wirkungszusammenhänge – deutlich schwieriger umzusetzen sind als bei den standardmässig geschätzten Verkehrskosten für Unfallfolgen, Lärm oder Luftverschmutzung. Die hier vorgenommene Abschätzung lässt sich unseres Erachtens nicht in gleichem Masse standardisieren. Eine jährliche Aktualisierung ist im Bereich der Klimakosten sowie der Kosten für vor- und nachgelagerte Prozesse auf Basis des Treibhausgasinventars bzw. des Handbuchs Emissionsfaktoren sowie standardmässig erhobener verkehrstatistischer Daten möglich. Für die anderen Kostenbereiche müssten aufwändigere Aktualisierungsarbeiten, die vor allem aktuelle Forschungsergebnisse bzw. neue Datengrundlagen (insbesondere GIS-Datensätze) berücksichtigten, vorgenommen werden:

Für die einzelnen Kostenbereiche sind aus unserer Sicht einzelne vertiefte Analysen sinnvoll:

- › Im Klimabereich geht es darum, die aktuelle Diskussion um Kostensätze laufend zu verfolgen und mit den hier abgeleiteten Kostensätzen pro Tonne CO₂-Äquivalente zu vergleichen. Parallel lohnt sich eine Aufdatierung der in der Schweiz zu erwartenden Klimaschäden, die nicht Gegenstand dieser Studie waren. Sie sind aber nicht direkt mit den Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in Verbindung zu bringen, sondern als eigenständige Schätzung zu kommunizieren.
- › Bei den weiteren Umweltkosten lohnen sich Vertiefungen unseres Erachtens weniger. Am sinnvollsten ist eine Detailanalyse zu zusätzlichen Kosten im Alpenraum. Dabei handelt es sich teilweise auch um Kosten, die in den bisherigen Schätzungen (Lärm und Luftverschmutzung des Transitverkehrs, Natur und Landschaft) zu wenig differenziert behandelt werden konnten. Gleichzeitig ist aber für den Alpenraum zu konstatieren, dass der Berechnung von externen Kosten Grenzen gesetzt sind.
- › Die zusätzlichen Kosten im städtischen Raum sind nur mit indirekten Ansätzen grob quantifizierbar. Detailanalysen sind allenfalls denkbar bei der Ermittlung von Kapazitätskosten (Staukosten, Knappheitskosten) für den Strassen- und den Schienenverkehr.
- › Die Kosten von vor- und nachgelagerten Prozessen sind – aufgrund ihrer Stellung im Lebenszyklus – getrennt zu behandeln. Zu vertiefen wäre hier die Situation der Schiene bei verändertem Strommix (z.B. UCTE) sowie die Kosten weiterer Emissionen (Luftschadstoffe, Gewässerverschmutzung, etc.) aus diesen Prozessen.

RESUME

Contexte et objectif

La Suisse disposait jusqu'à ce jour d'évaluations des coûts externes des transports pour les domaines des accidents, de la pollution de l'air (santé et dégâts aux bâtiments), du bruit ainsi que de la nature et du paysage.

La présente étude procède à une estimation des coûts externes non encore répertoriés à ce jour du trafic routier et ferroviaire en Suisse pour l'année 2000. Elle permet ainsi d'avoir un tableau complet de tous les coûts externes des transports.

Vu la complexité inhérente aux nouveaux domaines et la difficulté à les évaluer (existence d'incertitudes), il est important de souligner que les résultats présentés dans cette étude ne sont pas aussi précis que ceux obtenus pour les domaines précédents. Toutes les estimations faites ici sont donc moins fiables que celles effectuées jusqu'à maintenant dans les autres domaines des coûts externes des transports.

Méthodologie

Il existait déjà pour les différents domaines de coûts des méthodes permettant d'obtenir une estimation sommaire. Cette étude les a perfectionnées et développées quand c'était nécessaire. Le tableau suivant présente une vue d'ensemble des méthodologies utilisées, des coûts unitaires importants et des bases de données consultées.

VUE D'ENSEMBLE DE LA METHODOLOGIE ET DES DONNEES UTILISEES			
Catégorie de coûts	Mode de calcul	Coûts unitaires	Elements quantitatifs
Coûts liés au changement climatique			
Climat	Méthodologie : coûts de réduction ou coûts d'opportunité pour atteindre une stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre et coûts subsistants des dommages Scénario cible : A court terme : atteindre les objectifs de Kyoto. A long terme : scénario de stabilisation S550e ³ UNFCCC (augmentation max. de la température en 2100 : 2°C) Calcul : quantité émise * coûts unitaires	> Perspective à court terme : 35 à 70 CHF/t éq. CO ₂ . Les coûts unitaires reflètent la valeur actuelle des certificats internationaux d'émission utilisés pour atteindre les objectifs de Kyoto (valeur inférieure) et les coûts de réalisation des objectifs en matière de trafic avec des mesures suisses dans le domaine des transports (valeur supérieure). > Perspective à long terme : 80 à 110 CHF/t éq. CO ₂ > Coûts subsistants des dommages : 31 CHF/t éq. CO ₂	> Emissions tirées du Manuel des coefficients d'émission (route) et de l'Inventaire des gaz à effet de serre + base de données Ecoinvent (rail) > Principe territorial
Coûts environnementaux non évalués à ce jour			
Pertes de récoltes dues à la pollution de l'air	Méthodologie : coûts des dommages Calcul : volume des immissions (d'ozone) * quote-part des récoltes perdues par volume d'immissions * quantité récoltée par an * prix à la production = perte de récolte	> Le calcul s'effectue avec un prix à la production spécifique pour chaque espèce végétale.	Immissions d'ozone tirées des données NABEL. Emissions de NO _x tirées du Manuel des coefficients d'émission (route) et de l'Inventaire des gaz à effet de serre (rail).

Suite du tableau à la page suivante

³ Niveau de concentration de CO₂ à 550 ppm (parties de l'atmosphère par million)

VUE D'ENSEMBLE DE LA METHODOLOGIE ET DES DONNEES UTILISEES			
Catégorie de coûts	Mode de calcul	Coûts unitaires	Elements quantitatifs
Atteintes à la biosphère dues à la pollution de l'air (dégâts aux forêts)	Méthodologie : coûts des dommages Calcul : « Chablis » (<i>nombre accru d'arbres tombés au sol, cassés ou déracinés et perturbation créée par leur chute</i>) : Risque d'arbres couchés accru en cas d'acidification du sol * part des forêts avec acidification du sol * fréquence des ouragans * coûts unitaires par ouragan <i>Diminution des revenus du bois</i> : Volume des immissions * quote-part des récoltes perdues par volume d'immissions * volume de bois récolté par an * prix du bois à la production	› Prix du bois : on utilise des prix à la production spécifiques pour les différentes essences. Les coûts unitaires varient entre 55 et 168 CHF/m. › Coûts des arbres couchés (« chablis ») : coûts globaux de l'ouragan « Lothar » : 782 millions de CHF (dont 389 millions de CHF de pertes de revenus des entreprises forestières + 393 millions de CHF de coûts pour la Confédération)	Les émissions de NO _x , de NH ₃ et de SO ₂ forment la structure quantitative pour l'acidification et la pollution par l'ozone (source: Manuel des coefficients d'émission).
Altération de la qualité des eaux	Aucun montant n'a été retenu pour la détérioration de la qualité de l'eau. Les transports ont certes diverses influences sur la qualité des eaux, mais soit toutes ces influences sont dans une large mesure non problématiques (parce que trop faibles et en dessous du niveau toxique), soit les coûts induits sont de nature interne, soit encore les coûts induits ne sont pas quantifiables.		
Atteintes à la qualité des sols	Méthodologie : coûts de réparation ou d'assainissement ⁴ Calcul : <i>Coûts annuels</i> : Quantité émise par an / valeur limite (seuil d'investigation) * coût unitaire pour l'assainissement du sol	› Coûts d'assainissement du sol : 100 CHF/m ² (coût pour éliminer la matière polluée et la remplacer par de la matière non polluée)	› <i>Coûts annuels</i> : émissions tirées du Manuel des coefficients d'émission (métaux lourds, route) et Ecoinvent (émissions d'hydrocarbures polycycliques aromatiques/PAK et métaux lourds, rail)

suite du tableau à la page suivante

⁴ Frais de réparation et d'assainissement : mode de quantification servant à estimer les coûts des dommages s'ils ne sont pas calculables directement. Ils correspondent aux coûts qui se présentent lors de la remise en état après un préjudice à l'environnement causé par les transports.

VUE D'ENSEMBLE DE LA METHODOLOGIE ET DES DONNEES UTILISEES			
Catégorie de coûts	Mode de calcul	Coûts unitaires	Elements quantitatifs
Vibrations	Méthodologie : coûts de réduction, coûts des dommages à titre d'alternative Calcul : <i>Coûts de réduction</i> : pas de nouveaux calculs, chiffres issus d'une étude existante <i>Coûts des dommages</i> : personnes affectées * coûts unitaires pour les coûts des dommages (idem étude sur les coûts relatifs au bruit)	› Coût de réduction pour le rail : données tirées de l'étude des CFF, de l'OFEFP/OFEV et de l'OFT. › Coûts des dommages pour les personnes affectées : pertes de loyers : 526 CHF par personne et par an ; frais médicaux : 377 CHF par personne et par an.	› Nombre de personnes affectées par le trafic ferroviaire : chiffres de l'étude existante des CFF, de l'OFEFP/OFEV et de l'OFT. › Personnes affectées par le trafic routier : aucun calcul effectué.
Coûts environnementaux supplémentaires dans des espaces sensibles (espace alpin) › Influence du bruit › Milieux naturels sensibles, atteinte au paysage	Méthodologie : approche par la disposition à payer pour un paysage non bâti Calcul : nombre de nuitées * part de l'infrastructure de transport dans la surface bâtie * disposition à payer	› 20 à 30 CHF par personne et par semaine (étude PNR 48)	Statistiques OFS (hébergement touristique, statistique de la superficie, voies de communication)
Coûts externes supplémentaires pour les usagers des transports en milieu urbain			
Coûts supplémentaires en milieu urbain : effets de coupure et éviction de la mobilité douce	Méthodologie : coûts en temps pour piétons + frais d'infrastructure pour la séparation du trafic (mobilité douce et trafic individuel motorisé) Calcul : monétarisation des délais d'attente pour traverser la route + coûts de séparation des trafics pour les routes de classe supérieure	› Coûts unitaires temporels tirés d'une étude de base sur la nouvelle norme VSS › Coûts pour la construction de pistes cyclables sur la base d'études et d'une enquête faites auprès d'experts	› Données démographiques et nombre de pendulaires tirés du recensement de la population 2000 › Données concernant les infrastructures urbaines tirées des statistiques OFS, de la statistique de la superficie et d'autres sources

suite du tableau à la page suivante

VUE D'ENSEMBLE DE LA METHODOLOGIE ET DES DONNEES UTILISEES			
Catégorie de coûts	Mode de calcul	Coûts unitaires	Elements quantitatifs
Coûts supplémentaires engendrés par des processus en amont et en aval			
Production d'énergie, énergie grise, véhicules/matériel roulant, infrastructure	Méthodologie : Prise en compte des émissions de gaz à effet de serre des processus en amont et en aval. Coûts de réduction ou coûts d'opportunité pour atteindre une stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre. Calcul : quantité émise * coûts unitaires	Idem coûts liés au changement climatique : > Perspective à court terme : 35 à 70 CHF/t éq. CO ₂ > Perspective à long terme : 80 à 110 CHF/t éq. CO ₂	> Emissions tirées de la base de données Ecoinvent et du Manuel des coefficients d'émission > Les émissions de gaz à effet de serre sont prises en compte sur l'ensemble du cycle de vie.

Tableau R-1

Résultats : coûts totaux

Le tableau suivant montre les coûts totaux pour la route et le rail (année 2000). C'est délibérément que les résultats ne sont pas additionnés, parce que les coûts concernent des domaines très différents et qu'ils se réfèrent à divers processus d'évaluation. Les coûts les plus importants sont de loin les coûts liés au changement climatique (suivant la perspective adoptée) et les coûts des processus en amont et en aval, calculés selon la même approche. Les résultats relatifs aux coûts environnementaux non évalués à ce jour présentent des montants moins importants. La majeure partie des coûts est imputable au trafic routier (plus de 95%). L'explication réside dans le fait que la plupart des coûts dépendent directement des émissions de polluants climatiques et atmosphériques. Les domaines de coûts les plus significatifs pour le rail sont les vibrations et les processus en amont et en aval (énergie grise consommée lors de la production et de l'entretien des véhicules et des infrastructures).

VUE D'ENSEMBLE DES COÛTS TOTAUX PAR DOMAINE DE COÛTS EN 2000 EN MILLIONS DE CHF PAR AN			
	Coûts totaux	Route	Rail
Coûts liés au changement climatique			
Perspective à court terme : valeur inférieure	504	503	1
Perspective à court terme : coûts unitaires suisses dans le domaine des transports	1008	1006	2
Perspective à long terme : valeur inférieure	1152	1149	2
Perspective à long terme : valeur supérieure	1583	1580	3
Estimation maximale (y compris coûts des dommages non couverts)	2030	2026	4
Coûts environnementaux non évalués à ce jour			
Pertes de récoltes	74	74	1
Dégâts aux forêts	70	70	1
Altération de la qualité des eaux	~0*	~0*	~0*
Atteintes à la qualité des sols	104	103	1
Vibrations	20	n. d.	20
Coûts supplémentaires dans les espaces sensibles (Alpes)	31	29	2
Coûts supplémentaires pour les usagers des transports en milieu urbain			
Coûts supplémentaires en milieu urbain	89	70	18
Coûts supplémentaires engendrés par des processus en amont et en aval			
Perspective à court terme	252	231	21
Perspective à long terme	577	529	48

Tableau R-2, explications :

* : Selon les estimations disponibles, l'altération de la qualité des eaux est minime ou proche de zéro. L'influence des transports sur la qualité des eaux est soit dans une large mesure non problématique (parce que trop faible et en dessous du niveau toxique), soit les coûts induits sont de nature interne, soit encore les coûts induits ne sont pas quantifiables.

n. d. : non déterminables parce qu'il manque d'importantes données de base

Des différences d'arrondi minimales sont possibles entre la colonne « coûts globaux » et la somme des colonnes « route » et « rail ».

Résultats : coûts moyens

Il est possible d'exprimer les coûts spécifiques tant en coûts par personne-kilomètre ou tonne-kilomètre qu'en coûts par véhicule-kilomètre ou train-kilomètre. Ils peuvent servir d'approximation pour les coûts marginaux qui sont réellement pertinents pour les mesures agissant sur les prix. Le tableau R-3 met en parallèle les coûts spécifiques de la route et du rail sous forme agrégée. Dans le domaine climatique, les coûts spécifiques du trafic routier sont plus de 100 fois supérieurs à ceux du trafic ferroviaire, cela vient surtout de la composition de son approvisionnement électrique qui lui est favorable. Pour les autres domaines de coûts, l'avantage du rail est nettement moindre. Les coûts environnementaux moyens non évalués à ce jour du trafic routier sont 1,5 (trafic voyageurs), resp. 9,4 (trafic marchandises) supérieurs à ceux du trafic ferroviaire. En ce qui concerne les coûts supplémentaires du trafic routier en milieu urbain, le trafic routier de voyageurs est inférieur d'un

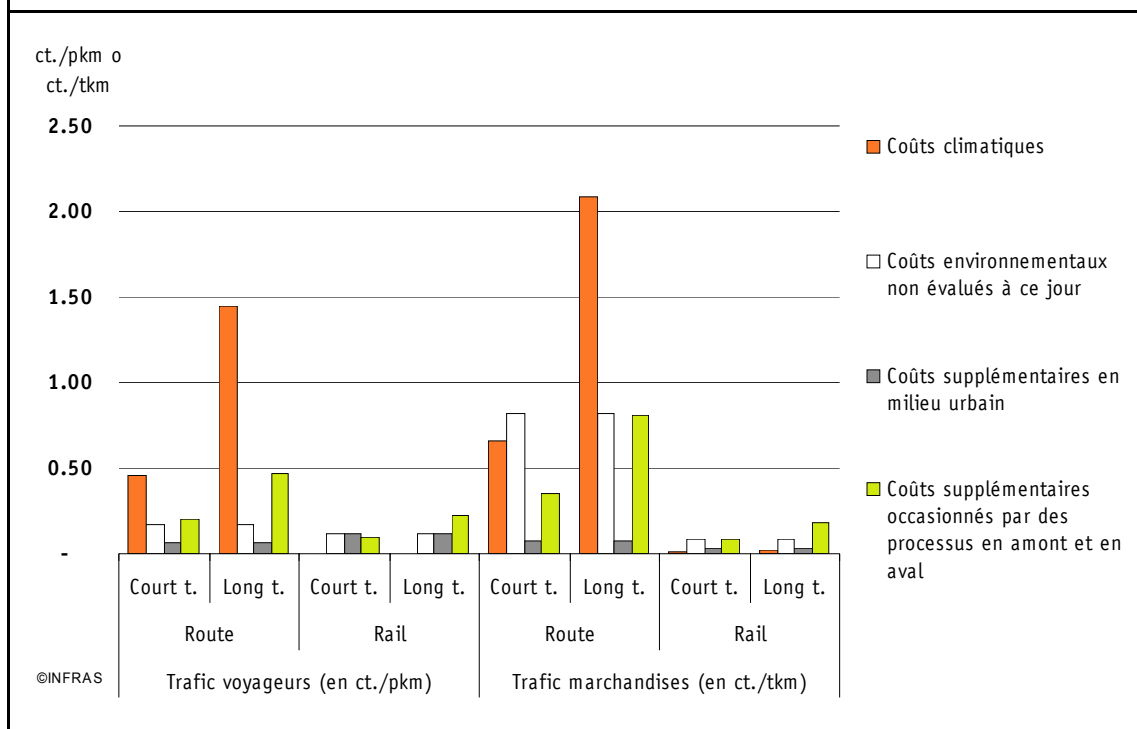
facteur 1,7 par rapport au rail alors que le trafic routier de marchandises lui est 2,4 fois supérieur. Pour ce qui est des processus en amont et en aval, le trafic routier présente des coûts supérieurs d'un facteur 2,1 (trafic voyageurs), resp. 4,4 (trafic marchandises) à ceux du trafic ferroviaire.

COÛTS MOYENS PAR MODE DE TRANSPORT ET PAR DOMAINE DE COÛTS EN CT./PKM, RESP. CT./TKM				
	Trafic voyageurs (en ct./pkm)		Trafic marchandises (en ct./tkm)	
	Route	Rail	Route	Rail
Coûts liés au changement climatique*	0.46 à 1.45	0.00 à 0.01	0.66 à 2.08	0.01 à 0.02
Coûts environnementaux non évalués à ce jour	0.17	0.12	0.82	0.09
Coûts supplémentaires en milieu urbain	0.07	0.12	0.07	0.03
Coûts engendrés par les processus en amont et en aval	0.20 à 0.47	0.10 à 0.23	0.35 à 0.81	0.08 à 0.18

Tableau R-3, explication * : coûts moyens dans le domaine climatique sans les coûts substantiels des dommages (perspective maximale).

Le graphique suivant donne une vue d'ensemble des résultats obtenus :

COÛTS MOYENS PAR MODE DE TRANSPORT ET PAR DOMAINE DE COÛTS EN CT./PKM, RESP. CT./TKM



Graphique R-1 Coûts moyens en ct. par personne-km et par tonne-km.

Précision : Les coûts concernant le domaine climatique sont présentés selon la perspective à court et à long terme conformément aux coûts de réduction, pour les modes de transport route et rail, avec une différenciation entre trafic voyageurs et marchandises. Les coûts unitaires de réduction influencent les coûts totaux des domaines « coûts climatiques » et « coûts des processus en amont et en aval ».

Evaluation des résultats

- › A l'exception des coûts liés au changement climatique et des coûts des processus en amont et en aval, le montant des autres coûts externes évalués dans la présente étude sont inférieurs aux domaines de coûts externes du trafic routier et ferroviaire déjà quantifiés (accidents, nature et paysage, santé, bruit et dommages aux bâtiments).
- › Les coûts climatiques représentent le domaine de coûts de loin le plus important de cette étude. Même en prenant des évaluations basses pour les coûts de réduction ou les dommages, le trafic routier et ferroviaire occasionne des coûts annuels qui se situent entre 0,5 à 1 milliard de francs suisses au minimum. Une perspective différenciée (à court terme pour atteindre les buts intermédiaires conformes au Protocole de Kyoto et à long terme pour atteindre les objectifs d'ici 2050 à 2100) est indispensable étant donné le niveau d'incertitude et les difficultés inhérentes à la quantification. La perspective à court terme permet d'avoir en même temps une vision internationale sur l'ensemble des secteurs et

une vision suisse (par rapport aux objectifs suisses en matière de transports). Il s'ensuit logiquement une grande dispersion des résultats.

- › Un autre domaine de coûts important est celui des processus en amont et en aval. Ici, les gaz à effet de serre émis lors de la production, de l'entretien et de l'élimination des véhicules et du matériel roulant ainsi que des infrastructures ont été quantifiés et évalués en utilisant l'approche des coûts de réduction des effets sur le climat. Les énergies consommées (essence et diesel par le trafic routier et électricité par le trafic ferroviaire) ont également été portées au bilan et évaluées⁵. Au total, il en résulte des coûts d'un ordre de grandeur de 250 à 580 millions de francs suisses.
- › Les coûts externes dus aux pertes de récoltes se montent à environ 74 millions de francs suisses par an. La valeur calculée représente une valeur moyenne, ce qui est compréhensible puisqu'elle repose sur la pollution moyenne par l'ozone au cours des six dernières années et sur des corrélations reconnues entre l'exposition à ce gaz et les dommages observés sur les récoltes.
- › Les dégâts aux forêts s'élèvent, compte tenu des résultats de recherche aujourd'hui disponibles, à env. 70 millions de francs suisses par an, donc nettement en dessous des estimations disponibles précédemment. Il est à noter que l'écosystème de la forêt est complexe et que les relations de cause à effet y relatives ne sont pas complètement élucidées à ce jour, ni quantifiables. Comme seuls certains aspects des dommages ont pu être évalués, les coûts effectifs pourraient aussi être nettement supérieurs à la présente estimation. L'analyse de sensibilité a déterminé que la valeur supérieure maximale est de 250 millions de francs suisses.
- › Tandis que l'altération des eaux est très faible ou quasi nulle, les atteintes à la qualité des sols se situent aux alentours de 100 millions de francs suisses par an.
- › Les atteintes supplémentaires dans l'espace alpin sont relativement difficiles à quantifier (env. 30 millions de francs suisses). L'estimation effectuée ici repose sur le montant que les gens seraient prêts à payer pour avoir une nature intacte (utilisation de la méthode de la disposition à payer), ce qui permet d'obtenir une valeur approximative. Celle-ci peut servir de première approche pour établir un ordre de grandeur des coûts externes auxquels il faut s'attendre dans l'espace alpin.

⁵ Le résultat favorable du rail dépend étroitement de la composition de son approvisionnement électrique : les chemins de fer suisses, respectueux de l'environnement, utilisent à plus de 95% de l'énergie hydraulique. Si la comparaison était fondée sur les sources d'approvisionnement électrique international de l'UCTE (Union for the Coordination of the Transmission of Electricity), les coûts du rail dans ce domaine doubleraient ou tripleraient.

- › Les conflits liés à l'occupation du sol en milieu urbain, toujours plus nombreux, occasionnent des coûts externes d'environ 90 millions de francs suisses par an pour les usagers non motorisés. Ce domaine de coûts aura plutôt tendance à prendre de l'importance à l'avenir.

Evaluation future des différents effets externes

Les travaux effectués dans le cadre de cette étude ont clairement montré que les méthodes d'évaluation disponibles pour les différents domaines étaient plus difficiles à utiliser que les méthodes employées pour quantifier les coûts externes des transports relatifs aux accidents, au bruit ou à la pollution de l'air (santé et bâtiments). Il existe plusieurs raisons à cela : on ne connaît pas avec certitude les effets futurs des émissions actuelles et les diverses relations de cause à effet ne sont que partiellement connues ou encore trop peu étudiées. A notre avis, l'estimation effectuée ici ne peut pas être standardisée dans les mêmes proportions. Une mise à jour annuelle est possible dans les domaines du changement climatique et des processus en amont et en aval sur la base de l'Inventaire des gaz à effet de serre, du Manuel des coefficients d'émission et de données statistiques sur le trafic collectées conformément aux normes. Les autres domaines de coûts nécessiteraient des travaux de mise à jour plus exigeants, tenant compte surtout des résultats de recherche actuels ou de nouvelles bases de données (en particulier des séries de données du système d'information géographique « GIS »).

Nous sommes d'avis qu'il serait judicieux de procéder à certaines analyses approfondies pour différents domaines de coûts :

- › Dans le domaine climatique, il s'agit de suivre en permanence la discussion sur les coûts unitaires et de les comparer avec les coûts unitaires par tonne équivalent CO₂ utilisés ici. En parallèle, il vaut la peine de mettre à jour les atteintes au climat auxquelles s'attend la Suisse et qui ne faisaient pas l'objet de cette étude. Il ne s'agit toutefois pas de les mettre en relation directe avec les émissions des transports en Suisse, mais de les communiquer comme une estimation autonome.
- › Les autres coûts environnementaux ont moins besoin d'être approfondis selon nous. Le plus approprié consisterait à faire une analyse détaillée des coûts supplémentaires dans l'espace alpin. Il s'agit en partie aussi des coûts qui n'ont pas pu être évalués de manière suffisamment différenciées dans les évaluations précédentes (bruit et pollution de l'air due au trafic de transit, nature et paysage). Mais il faut reconnaître en même temps qu'il y a des limites au calcul des coûts externes pour l'espace alpin.

- › Les coûts supplémentaires en milieu urbain ne peuvent être quantifiés que par des approches indirectes et de manière approximative. Des analyses de détail sont éventuellement envisageables pour déterminer les coûts relatifs aux problèmes de capacité (coûts de congestion, coûts liés à la rareté) pour le trafic routier et ferroviaire.
- › Il y a lieu de traiter séparément les coûts des processus en amont et en aval, étant donné leur position aux deux extrémités du cycle de vie. A ce sujet, il faudrait approfondir la situation du rail avec une répartition différente des sources en alimentation électrique (par ex. UCTE) ainsi que les coûts d'autres émissions (polluants atmosphériques, pollution des eaux, etc.) résultant de ces processus.

RIASSUNTO

Premessa ed obiettivi

Per la situazione in Svizzera, erano già disponibili i calcoli e i dati relativi ai costi esterni dei trasporti nei settori incidenti, inquinamento atmosferico (salute e danni agli edifici), rumore nonché natura e paesaggio.

Il presente studio quantifica, come stime, i costi esterni, non ancora analizzati, del traffico stradale e ferroviario in Svizzera per l'anno 2000. Con questa pubblicazione vengono così ultimati i calcoli dei costi esterni relativi al settore dei trasporti.

A causa della complessità dei singoli settori presi in considerazione e della parziale imprecisione dei dati a disposizione, occorre interpretare in modo differenziato e con la dovuta attenzione i risultati delle analisi. Tutte le stime presentano una base meno solida rispetto ai precedenti calcoli svolti negli ambiti dei costi esterni dei trasporti.

Metodo

Fino ad oggi, per i diversi settori dei costi, esistevano solo approcci metodologici rudimentali. Nel presente studio questi approcci sono stati migliorati, affinati e se necessario rielaborati. La seguente tabella presenta per ogni settore una panoramica del metodo utilizzato, dei principali costi unitari e dei dati di base.

PANORAMICA DEI METODI DI CALCOLO E DEI DATI DI BASE			
Categoria dei costi	Approccio	Costi unitari	Dati di base
Costi dovuti ai cambiamenti climatici	Metodo: costi di riduzione/prezzi ombra per raggiungere una stabilizzazione della concentrazione dei gas ad effetto serra e dei costi restanti dei danni. Scenario obiettivo: A breve termine: raggiungimento degli obiettivi del Protocollo di Kyoto Approccio a lungo termine: scenario di stabilizzazione S550e UNFCCC (variazione max. della temperatura nel 2100: 2°C). Calcolo: quantità delle emissioni * costi unitari	› Approccio a breve termine: 35-70 CHF/t eq. CO ₂ . I parametri dei costi rispecchiano il valore attuale dei certificati internazionali delle emissioni per il raggiungimento degli obiettivi previsti dal Protocollo di Kyoto (valore minore) e i costi per il soddisfacimento degli obiettivi specifici connessi ai trasporti in Svizzera con misure sul piano nazionale nel settore dei trasporti (valore maggiore). › Approccio a lungo termine: 80-110 CHF/t eq. CO ₂ . › Costi restanti dei danni: 31 CHF/t eq. CO ₂ .	› Emissioni secondo i dati del manuale dei fattori di emissione (strade) e dell'inventario dei gas ad effetto serra + banca dati Ecoinvent (ferrovia). › Principio territoriale.
Costi ambientali finora non analizzati			
Perdite di raccolto dovute all'inquinamento atmosferico	Metodo: costi dei danni Calcolo: immissioni di (ozono) * tasso di perdite di raccolto per quantità di immissione * quantità annuale dei raccolti * prezzo alla produzione = perdita di raccolto	› Per ogni specie vegetale viene calcolato uno prezzo specifico alla produzione.	Immissioni di ozono secondo i dati NABEL. Emissioni di NO _x secondo il manuale fattori di emissione (strade) e l'inventario dei gas ad effetto serra (ferrovia).
Danni dovuti all'inquinamento dell'aria nella biosfera (danni ai boschi)	Metodo: costi dei danni. Calcolo: <i>Maggiori rischi di sradicamenti:</i> maggiori rischi di sradicamenti a causa dell'acidificazione del suolo * quota di boschi con acidificazione del suolo * frequenza degli uragani * costi unitari dovuti agli uragani <i>Perdita dei ricavi dal legno:</i> quantità di immissioni * quota di perdita di raccolto per unità di immissione * quantità annuale di legno raccolto * prezzo del legno alla produzione	› Prezzo del legno: per i diversi tipi di legno vengono utilizzati prezzi specifici alla produzione. I parametri dei costi variano tra i 55 CHF/m ³ e i 168 CHF/m ³ . › Costi degli sradicamenti: costi complessivi dell'uragano "Lothar": 782 mio. CHF (di cui 389 mio. CHF per perdite di guadagno delle imprese forestali e 393 mio. CHF di costi per la Confederazione).	Per l'acidificazione e l'inquinamento da ozono, le emissioni di NO _x , NH ₃ e SO ₂ costituiscono la struttura di base dei calcoli: secondo i dati del manuale dei fattori di emissione.

continua alla pagina seguente

PANORAMICA DEI METODI DI CALCOLO E DEI DATI DI BASE			
Categoria dei costi	Approccio	Costi unitari	Dati di base
Danni al corpo idrico	Per il settore delle acque non vengono calcolati i danni. Il traffico ha sì diverse influenze sulla qualità delle acque, tuttavia tutte queste ripercussioni sono in buona parte non problematiche (perché risultano limitate e al di sotto del livello tossico), i costi indotti sono di natura interna oppure non sono quantificabili.		
Danni alla qualità del suolo	Metodo: costi di riparazione o di risanamento ⁶ Calcolo: <i>costi annuali:</i> quantità d'emissioni annuale / valore soglia dell'inquinamento (valori di guardia) * parametri dei costi per il risanamento del suolo	Costi di risanamento del suolo: 100 CHF/m (costi per lo smaltimento di materiali inquinati e per la sostituzione con materiali non inquinati).	<i>Costi annuali:</i> emissioni secondo i dati del manuale dei fattori di emissione (materiali pesanti, strada) e di E-coinvent (idrocarburi policiclici aromatici IPA e materiali pesanti, ferrovia).
Vibrazioni	Metodo: costi di riduzione, costi dei danni come alternativa. Calcolo: <i>costi di riduzione:</i> non vi sono nuovi calcoli, dati da studi già esistenti. <i>Costi dei danni:</i> persone interessate * indice per i costi dei danni (analogia con i costi esterni relativi al rumore).	Costi di riduzione per la ferrovia: dati dallo studio FFS/UFAFP/UFT. Costi dei danni alle persone interessate: perdite degli affitti: 526 CHF per persona all'anno; costi della salute: 377 CHF/(per persona all'anno).	Numero di persone interessate dal traffico ferroviario: dati dallo studio congiunto FFS/UFAFP/UFT. Numero di persone interessate dal traffico stradale: non è stato effettuato nessun calcolo.
Costi ambientali supplementari nelle aree sensibili (spazio alpino) › Influenza del rumore › Aree naturali sensibili, paesaggio	Metodo: disponibilità a pagare per paesaggi non edificati. Calcolo: numero di pernottamenti * quota dell'infrastruttura dei trasporti rispetto alla superficie non edificata * quota della disponibilità a pagare.	20-30 CHF per persona a settimana (studio PNR 48).	Statistica UST (pernottamenti, statistica della superficie, vie di comunicazione).

continua alla pagina seguente

⁶ Costi di riparazione o di risanamento: modo di quantificazione utile per stimare i costi dei danni, qualora questi ultimi non fossero calcolabili direttamente. I costi di riparazione o di risanamento corrispondono ai costi calcolati per il ripristino della situazione iniziale dopo un deterioramento dell'ambiente dovuto al traffico.

Costi esterni supplementari per gli utenti del traffico nelle aree urbane			
Costi supplementari nelle aree urbane: effetto divisorio e dislocamento territoriale per il traffico lento	Metodo: costi in tempo per i pedoni + costi infrastrutturali per la separazione del traffico (TL/TPM) Calcolo: monetizzazione dei tempi di attesa per attraversare la strada + costi infrastrutturali di separazione del traffico per le strade di classe superiore	› Indice dei costi temporali scaturiti dallo studio di base sulla nuova norma dell'Unione dei professionisti svizzeri della strada. › Costi per la costruzione di piste ciclabili sulla base di studi e di un'inchiesta presso esperti del settore.	› Dati demografici e numero di pendolari secondo il censimento della popolazione 2000 › Dati concernenti le infrastrutture urbane, secondo le statistiche UST, la statistica della superficie e altre fonti.
Ulteriori costi dovuti ai processi collaterali e a monte			
Produzione di energia, energia grigia veicoli/materiale rotabile, infrastruttura	Metodo: presa in considerazione dei gas ad effetto serra nei processi collaterali e a monte. Costi di riduzione/ prezzi ombra per il raggiungimento di una stabilizzazione della concentrazione dei gas ad effetto serra. Calcolo: quantità di emissioni * costi unitari	Analoghi ai costi dovuti ai cambiamenti climatici: › Approccio a breve termine: 35-70 CHF/t eq. CO ₂ › Approccio a lungo termine: 80-110 CHF/t eq. CO ₂	› Emissioni secondo la banca dati Ecoinvent e il manuale dei fattori di emissione › Le emissioni di gas ad effetto serra sono considerate per l'insieme del ciclo vitale.

Tabella R-1

Risultati: costi globali

La seguente tabella presenta i costi globali riconducibili al traffico stradale e ferroviario (stato: anno 2000). I risultati non sono stati sommati appositamente, poiché i costi abbracciano diversi settori e si riferiscono a numerosi processi. Il settore che causa i maggiori costi esterni è di gran lunga il clima (a seconda dell'approccio) e il settore (calcolato con il medesimo approccio) dei processi collaterali e a monte. Per i costi ambientali finora non ancora calcolati emergono dati piuttosto contenuti. La maggior parte dei costi ricade sul traffico stradale (più del 95%). Ciò si spiega con il fatto che buona parte dei costi dipendono direttamente dalle emissioni di sostanze nocive per l'aria e per il clima. Le voci più rilevanti che concernono la ferrovia sono le vibrazioni nonché i processi collaterali e a monte (energia grigia per la produzione e la manutenzione di veicoli e infrastruttura).

PANORAMICA DEI COSTI GLOBALI PER SETTORE NEL 2000 IN MIO. CHF ALL'ANNO			
	Costi globali	Strada	Ferrovia
Costi dovuti ai cambiamenti climatici			
Approccio a breve termine: valore di base	504	503	1
Approccio a breve termine: costi unitari in CH nell'ambito dei trasporti	1'008	1'006	2
Approccio a lungo termine: valore di base	1'152	1'149	2
Approccio a lungo termine: valore superiore	1'583	1'580	3
Valutazione massima (incl. i costi dei danni non coperti)	2'030	2'026	4
Costi ambientali finora non analizzati			
Perdite di raccolto	74	74	1
Danni ai boschi	70	70	1
Danni al corpo idrico	~0*	~0*	~0*
Danni alla qualità del suolo	104	103	1
Vibrazioni	20	n.d.	20
Costi supplementari nelle aree sensibili (Alpi)	31	29	2
Costi esterni supplementari per gli utenti del traffico nelle aree urbane			
Costi supplementari nelle aree urbane	89	70	18
Costi supplementari connessi ai processi a monte e collaterali			
Approccio a breve termine	252	231	21
Approccio a lungo termine	577	529	48

Tabella R-2, spiegazioni:

*: Secondo le stime disponibili, i danni al corpo idrico sono molto contenuti o tendenti a zero. L'influenza dei trasporti sulla qualità dell'acqua risulta o in larga misura non problematica (perché troppo limitata e al di sotto del livello tossico) oppure i costi che ne derivano sono di natura interna o non quantificabili.

n.d.: costi non determinabili, poiché mancano importanti dati di base.

Sono possibili minime differenze d'arrotondamento tra la colonna 'costi globali' e la somma delle colonne 'strada' e 'ferrovia'.

Risultati: costi medi

È possibile esprimere i costi specifici sia in costi per persone-chilometro o tonnellate-chilometro che in costi per veicoli-chilometro o treni-chilometro. Questi costi possono servire come approssimazione relativa ai costi marginali che sono effettivamente rilevanti per le misure connesse ai prezzi. La tabella R-3 mette a confronto, sotto forma aggregata, i costi specifici della strada e quelli della ferrovia. Per quel che concerne il settore dei costi relativi al clima, il traffico stradale presenta costi specifici di oltre 100 volte superiori a quelli del traffico ferroviario; ciò è dovuto soprattutto alle fonti di approvvigionamento energetico più favorevoli della ferrovia. Per gli altri settori di costo, i vantaggi della ferrovia risultano molto più contenuti. I costi ambientali medi del traffico stradale finora non analizzati sono rispettivamente di 1,5 punti (traffico viaggiatori) e di 9,4 punti (traffico merci) superiori rispetto a quello ferroviario. I costi supplementari della strada nelle aree urbane, riferiti alle

prestazioni di trasporto, nel traffico viaggiatori risultano inferiori di 1,7 punti rispetto al traffico ferroviario; mentre nel traffico merci sono superiori di 2,4 punti. Per i processi collaterali e a monte, il traffico stradale registra costi più elevati di 2,1 punti (traffico viaggiatori) e di 4,4 punti (traffico merci).

COSTI MEDI PER MODO DI TRASPORTO E SETTORE DEI COSTI IN CTS./PKM OPPURE IN CTS./TKM				
	Traffico viaggiatori (in cts./pkm)		Traffico merci (in cts./tkm)	
	Strada	Ferrovia	Strada	Ferrovia
Costi dovuti ai cambiamenti climatici*	0,46-1,45	0,00-0,01	0,66-2,08	0,01-0,02
Costi ambientali finora non analizzati	0,17	0,12	0,82	0,09
Costi supplementari nelle aree urbane	0,07	0,12	0,07	0,03
Costi dovuti ai processi collaterali e a monte	0,20-0,47	0,10-0,23	0,35-0,81	0,08-0,18

Tabella R-3 osservazioni: * costi medi nel settore ambientale senza i costi restanti dei danni (prospettiva massima).

Il seguente grafico presenta una visione d'insieme dei dati emersi:

COSTI MEDI PER MODO DI TRASPORTO E SETTORE DI COSTO IN CTS./PKM OPPURE IN CTS./TKM

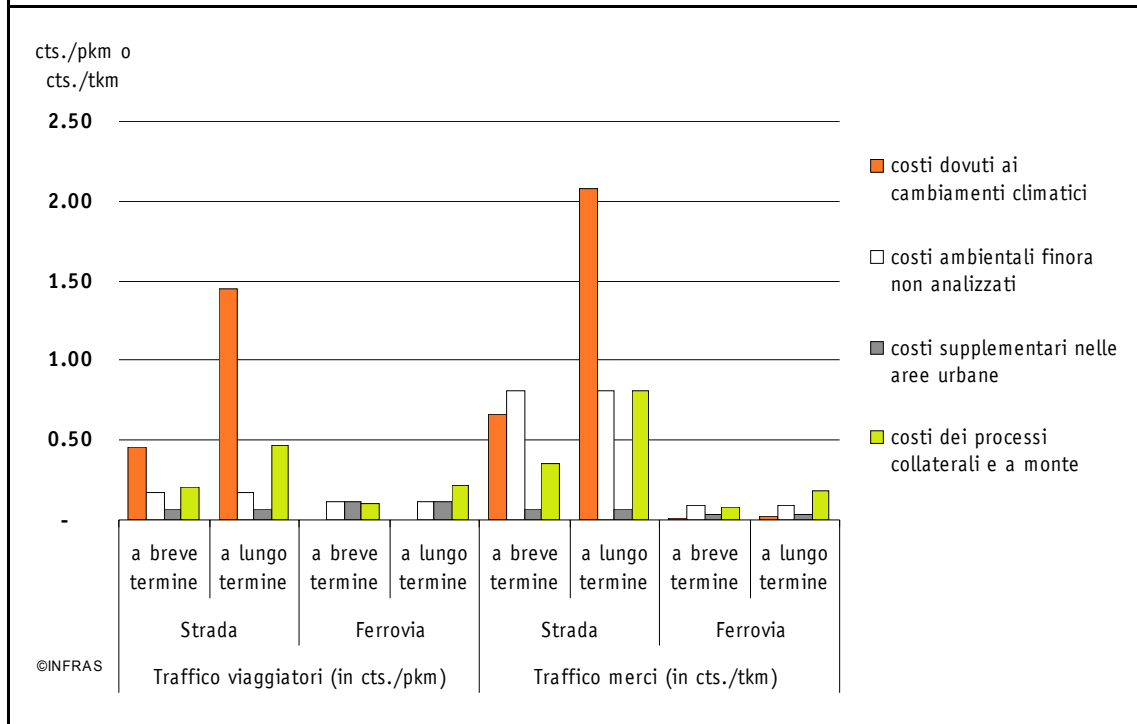


Grafico R-1 Costi medi in centesimi per persona-km o in centesimi per tonnellata-km.

Precisazione: i costi per gli approcci a lungo e a breve termine in relazione ai costi unitari di riduzione nel settore ambientale sono stati rappresentati per i vettori di trasporto strada e ferrovia, differenziando il traffico viaggiatori dal traffico merci. I costi unitari di riduzione influenzano i costi globali dei settori 'costi climatici' e 'costi dei processi collaterali e a monte'.

Conclusioni

- › Ad eccezione dei costi dovuti ai cambiamenti climatici e dei costi concernenti i processi collaterali e a monte, i costi esterni finora non analizzati si situano al di sotto delle cifre finora quantificate per il traffico stradale e ferroviario (incidenti, natura e paesaggio, costi della salute, rumore e danni agli edifici).
- › Il settore dei costi esterni nettamente più importante è quello dovuto ai 'cambiamenti climatici'. Anche se si considerano parametri bassi per i costi di riduzione o dei danni, il traffico stradale e ferroviario è all'origine di costi annuali pari ad almeno 0,5 - 1 miliardo di franchi. In considerazione del livello di inesattezza e delle difficoltà di quantificazione, risulta indispensabile un approccio differenziato (a breve termine per soddisfare gli obiettivi intermedi secondo il Protocollo di Kyoto; a lungo termine per soddisfare gli obiettivi entro il 2050/2100). Nel contempo, un approccio a breve termine permette di formulare una prospettiva internazionale su tutti i settori dei costi esterni e una prospettiva svizzera

(riferita agli obiettivi svizzeri in materia di politica dei trasporti). Ne consegue però una grande dispersione di risultati.

- › Un ulteriore ed importante settore dei costi è rappresentato dai processi collaterali e a monte. In questo ambito, grazie ai costi di riduzione connessi ai cambiamenti climatici, sono state quantificate e valutate le emissioni dei gas ad effetto serra per la produzione, la manutenzione e l'eliminazione dei veicoli, dei materiali e dell'infrastruttura. Nel presente studio si sono pure messi in bilancio e valutati i consumi di energia (benzina e diesel per il traffico stradale, elettricità per quello ferroviario).⁷ In totale, i costi si situano tra 250 e 580 milioni di franchi.
 - › I costi esterni dovuti alle perdite di raccolto sono dell'ordine di 74 milioni di franchi all'anno. Il valore calcolato rappresenta un valore medio attendibile, poiché si basa sulle emissioni medie di ozono degli ultimi sei anni e sulle comprovate correlazioni tra l'esposizione a questo tipo di gas e gli effetti osservati sui raccolti.
 - › Tenendo in considerazione i risultati delle ricerche oggi disponibili, i danni alle foreste pari a circa 70 milioni di franchi all'anno, sono nettamente inferiori a quelli emersi dalle stime precedenti. Gli studi sui rapporti causa-effetto, nel complesso ecosistema delle foreste, risultano tuttavia ancora incompleti e quantificabili solo parzialmente. Di conseguenza, i costi effettivi potrebbero essere anche molto più elevati rispetto ai dati delle presenti stime. L'analisi di sensibilità ha determinato un valore soglia massimo di 250 milioni di franchi.
 - › Se i danni riscontrati al corpo idrico risultano molto contenuti o tendenti a zero, quelli concernenti la qualità del suolo si situano intorno ai 100 milioni di franchi all'anno.
 - › I costi supplementari per lo spazio alpino sono relativamente difficili da quantificare (ca. 30 milioni di franchi). Le stime fatte per questo studio si basano sul metodo teorico della disponibilità a pagare per una natura incontaminata e permettono di ottenere solo un valore approssimativo. I relativi dati sono quindi da considerare come un primo approccio inteso a definire l'ordine di grandezza dei costi esterni da attendersi nello spazio alpino.
 - › I crescenti conflitti connessi all'utilizzazione del suolo nelle aree urbane comportano costi esterni pari a circa 90 milioni di franchi all'anno per gli utenti non motorizzati.
- L'importanza di questa categoria di costo registrerà in futuro una tendenza al rialzo.

⁷ I risultati vantaggiosi registrati dalla ferrovia sono strettamente connessi alle fonti rispettose dell'ambiente da cui proviene l'energia per le ferrovie svizzere (più del 95% dall'energia idrica). Se per il confronto si fosse fatto ricorso alle fonti d'approvvigionamento energetico internazionale registrate dall'UCTE, i costi della ferrovia risulterebbero in questo settore di due o tre volte superiori.

Futuro approccio con gli ulteriori effetti esterni

I calcoli effettuati per i singoli settori di costo hanno mostrato chiaramente che i metodi di valutazione disponibili per questo studio erano più difficili da utilizzare rispetto a quelli impiegati per l'analisi dei costi esterni dei trasporti dovuti agli incidenti, al rumore o all'inquinamento atmosferico. Le ragioni di questa disparità sono molteplici: non si conoscono con esattezza i futuri effetti delle emissioni odierne e i rapporti di causa effetto sono in parte ancora poco conosciuti o poco studiati. A nostro avviso, le stime adottate per questo studio non possono essere standardizzate in ugual misura. Un aggiornamento annuale è possibile nei settori di costo dovuti ai cambiamenti climatici e nei costi riconducibili ai processi collaterali e a monte grazie ai dati dell'inventario dei gas ad effetto serra, al manuale dei fattori di emissione e ai dati statistici sul traffico rilevati secondo le norme standard. Per gli altri settori di costo occorrerebbero aggiornamenti più dispendiosi, che dovrebbero tenere in considerazione soprattutto i risultati delle ricerche più recenti e i nuovi dati di base (in particolare i dati del sistema d'informazione geografico GIS).

Secondo noi, per diversi settori di costo sarebbe opportuno e sensato procedere ad alcune analisi approfondite:

- › Nell'ambito dei cambiamenti climatici si tratta di seguire costantemente le attuali discussioni sui costi e di compararli con i costi unitari per tonnellata equivalente di CO₂ utilizzati nel presente studio. Parallelamente, vale la pena aggiornare i danni riconducibili al clima da attendersi in Svizzera, che non sono stati analizzati in questo studio. Essi non si devono tuttavia mettere in relazione diretta con le emissioni del traffico in Svizzera, ma vanno presentati come stima indipendente ed autonoma.
- › A nostro avviso, gli altri costi dovuti ai cambiamenti climatici necessitano meno di essere approfonditi. L'analisi più sensata sarebbe uno studio approfondito dei costi supplementari nello spazio alpino. Si tratterebbe in parte anche di costi che non sono stati trattati in maniera sufficientemente differenziata negli studi precedenti (rumore e inquinamento atmosferico dovuto al traffico di transito, natura e paesaggio). Nel contempo, si constata però che per lo spazio alpino vi sono dei limiti di calcolo per quel che concerne i costi esterni.
- › I costi supplementari a carico delle aree urbane possono essere quantificati solo in modo approssimativo e attraverso approcci indiretti. Analisi dettagliate sono semmai auspicabili per determinare i costi dovuti ai problemi di capacità (costi dovuti alle code e alla ristrettezza degli spazi disponibili) per il traffico stradale e ferroviario.

- › I costi dei processi collaterali e a monte, a causa della loro posizione agli estremi nel ciclo vitale, vanno trattati separatamente. In questo settore, si dovrebbero approfondire la situazione della ferrovia, con una ripartizione diversa delle fonti d'approvvigionamento dell'elettricità (per es. UCTE) e con i costi di altre emissioni (sostanze nocive, inquinanti dell'acqua, ecc.) riconducibili a questi processi.

SUMMARY

Starting position and targets

Calculations of external costs of transport in Switzerland have been made for several cost categories: road and rail accidents, air pollution (health impacts and building damages), noise as well as nature and landscape.

This study is an estimative quantification of previously not quantified external costs of road and rail transport in Switzerland for the year 2000 and completes the picture of external costs of transport.

Due to the complexity of certain cost categories and the uncertainty of some data and assumptions, the precise and differentiated handling of results plays an important role. All estimations of this study are less robust than the existing calculations of the other external costs of transport categories.

Methodology

So far, there have been only rough methodological approaches for the different cost categories. These have now been fine-tuned in this study and, whenever necessary, newly developed. The following table gives an overview of the methodology used, important cost rates as well as basic data.

OVERVIEW ON CALCULATION METHODOLOGY AND INPUT			
Cost category	Calculation method	Cost Rate	Quantity Structure
Climate change costs	Methodology: avoidance costs/shadow prices to stabilise greenhouse gas concentration as well as remaining damage costs. Target scenario: Short term: achieving Kyoto targets Long term view: stabilising scenario S550e UNFCC (max. temperature change 2100 2°C) Calculation: Emissions quantity * cost rate	› Short term view: 35–70 CHF/t CO ₂ -eq. Cost rates reflect the actual value for the international trade of certificates needed for the achievement of the Kyoto targets (lower value) as well as the costs for the implementation of the transport-related targets in Switzerland, together with Swiss measures in the transport sector (upper value). › Long term view: 80–110 CHF/t CO ₂ -eq › Remaining damage costs: 31 CHF/t CO ₂ -eq	› Emissions from the handbook emission factors for road transport and greenhouse gas inventory Switzerland and database Ecoinvent (Rail) › Territorial principle

continued on next page

OVERVIEW ON CALCULATION METHODOLOGY AND INPUT			
Cost category	Calculation method	Cost Rate	Quantity Structure
Previously not quantified environmental costs			
Harvest losses due to air pollution	Methodology: damage costs Calculation: (ozone-) immission quantity * rate of harvest loss per immission quantity * yearly harvest quantity * manufacturer price = harvest loss	› Each plant species is being calculated with a specific manufacturing price.	Ozone immissions from NABEL-data. NO _x -emissions from handbook emission factors (road) and greenhouse gas inventory (rail).
Damages of air pollution in the biosphere (damage to forests)	Methodology: damage costs Calculation: <i>Increased windfall:</i> Increased risk of windfall with acidity of soil acidification * share of forest with soil acidification * frequency of storms * cost rate <i>Timber revenue:</i> Immission quantity * harvest loss rate per immission quantity * yearly timber quantity * manufacturing price of timber	› Wood price: Specific manufacturing prices are being used for the various wood species. Cost rates differ between 55 CHF/m ³ and 168 CHF/m ³ . › Windfall costs: Total costs of the storm 'Lothar': 782 m. CHF (of which 389 m. CHF revenue losses of the forestries plus 393 m. CHF costs for the state)	NO _x -, NH ₃ - und SO ₂ -emissions form the quantity structure for soil acidification and ozone load: from the handbook emission factors for road transport.
Damages to waterbodies	No damages are calculated for bodies of water. Transport does indeed have a certain impact on water quality, but these impacts are largely unproblematic (because they are too small and below toxic level), or the resulting costs are internal or not quantifiable.		
Damages for soil quality	Methodology: Reparation-/restoration costs ⁸ Calculation: <i>Annual costs:</i> Annual emissions / critical load * cost rate for soil restoration	› Soil restoration costs: 100 CHF/m ² (costs of disposal for polluted soil material and replacement with clean soil material.	› <i>Annual costs:</i> Emissions from handbook emission factors (heavy metals road) and Ecoinvent (PAK-emissions as well as heavy metals rail)

continued on next page

8 Reparation/restoration costs: quantification approach for the estimation of damage costs in case costs cannot be calculated. Correspond to costs of restoration of original condition after impact of transport.

OVERVIEW ON CALCULATION METHODOLOGY AND INPUT			
Cost category	Calculation method	Cost Rate	Quantity Structure
Vibrations	Methodology: Restoration costs, alternatively damage costs Calculation: <i>Restoration costs:</i> no recalculations, figures from existing study <i>Damage costs:</i> affected persons * cost rate for damage costs (analogue to noise cost study)	› Restoration costs rail: data from study of SFR/SAEFL/FOT. › Damaged costs for affected persons: rent losses: 526 CHF annually per person; health costs: 377 CHF/(P*a).	› Number of persons affected in rail transport: figures from existing study of SFR/SAEFL/FOT. › Number of persons affected in road transport: no calculations.
Additional environmental costs in sensitive areas (alpine region) › Noise impact › Sensitive natural spaces, characteristic landscapes	Methodology: Willingness to pay-approach for undeveloped landscape Calculation: number of lodgings * share of transport infrastructure on developed space * Willingness to pay-approach	› 20–30 CHF per person + week (NRPstudy 48)	FOS statistic (lodgings, spatial statistics, transport network)
Additional external costs for transport users in urban areas			
Additional costs in urban areas: separation effects and spatial suppression for human powered mobility (HPM)	Methodology: Time costs for pedestrian and infrastructure costs for transport separation (HPM/individual motorised transport) Calculation: monetary valuation of waiting times for crossing streets + infrastructure costs for the separation of transport for higher level roads.	› time cost approach from fundamental study of the new VSS-norm. › construction costs bicycle lane-infrastructure based on studies and expert surveys.	› Population data and commuter data from population census 2000 (BFS 2005a) › Urban Infrastructure data from FOS statistics und spatial statistics, additional sources
Additional external costs of up- and downstream processes			
Energy production /grey energy infrastructure, vehicles+rolling stock	Methodology: Inclusion of greenhouse gas emission of up- and downstream processes. avoidance costs/shadow prices to stabilise greenhouse gas concentration Calculation: Emission quantity * cost rate	Analog climate change costs: › Short term view: 35-70 CHF/t CO ₂ -eq › Long term view: 80-110 CHF/t CO ₂ -eq	› Emissions from database Ecoinvent and handbook Emission factors › Total life cycle emissions of greenhouse gases are included.

Tabelle S-1

Results: total costs

The following table shows total costs of road and rail transport (in 2000). The results are purposely not added up, because the costs cover different areas and relate to different processes. The most important costs are climate change costs (depending on the approach) and the costs of up- and downstream processes valued with the same approach. Slightly lower dimensions result from previously not quantified environmental cost categories. Road transport is responsible for the biggest part of costs (over 95%). The reason for this is the fact, that most of these costs are directly dependent on climate and air pollution emissions. The most important rail costs originate from vibrations and up- and downstream processes (grey energy of infrastructure and vehicle production, maintenance and disposal).

OVERVIEW OF TOTAL COSTS PER COST SECTOR 2000 IN MILLION CHF PER YEAR			
	Total costs	Road	Rail
Climate change cost			
Short term view: basic value	504	503	1
Short term view: CH-cost rate in transport	1'008	1'006	2
Long term view: basic value	1'152	1'149	2
Long term view: upper value	1'583	1'580	3
Maximum view (incl. damage costs)	2'030	2'026	4
Previously not quantified environmental costs			
Harvest losses	74	74	1
Forest damages	70	70	1
Damages to waterbodies	~0*	~0*	~0*
Soil damages	104	103	1
Vibrations	20	n.q.	20
Additional costs for sensitive regions	31	29	2
Additional costs for transport users			
Additional costs for urban regions	89	70	18
Additional costs through up- and downstream processes			
Up- and downstream processes: short term	252	231	21
Up- and downstream processes: long term	577	529	48

Table S-2 Explanations:

*: Damages to water bodies are very low (close to zero) acc. to the existing estimations. Transport impact on water quality is either fairly unproblematic (because too small and below toxic level) or the costs are internal or cannot be quantified.

n.q.: not quantifiable because important basic data is missing.

Slight rounding differences between column 'Total costs' and sum of columns 'Road' and 'Rail' are possible.

Results: average costs

Specific costs can either be described as costs per passenger resp. tonne kilometre as well as in costs per vehicle resp. train kilometres. They can be expressed as approximations to the

marginal costs relevant for pricing measures. Table S-3 is an aggregation of a comparison of the average costs of road and rail. In the area of climate change costs, average costs of road transport are more than 100 times higher than those of rail transport, esp. because of the favourable electricity mix of rail. In the other cost areas the advantage of rail transport is significantly lower. Previously not quantified average environmental costs of road transport are higher by a factor of 1.5 (passenger transport) resp. 9.4 (freight transport) than rail transport. Additional costs of transport in urban areas, related to transport performance, are lower in passenger transport by a factor of 1.7 than rail transport, but freight transport is higher by a factor of 2.4. In up- and downstream processes road transport has higher costs by a factor of 2.1 (passenger transport) resp. 4.4 (freight transport) than rail transport.

AVERAGE COSTS BY TRANSPORT MODE AND COST CATEGORY IN RP./PKM RESP. RP./TKM				
	Passenger transport (in Rp./pkm)		freight transport (in Rp./tkm)	
	Road	Rail	Road	Rail
Climate change costs*	0.46-1.45	0.00-0.01	0.66-2.08	0.01-0.02
Previously not quantified environmental costs	0.17	0.12	0.82	0.09
Additional costs in urban areas	0.07	0.12	0.07	0.03
Costs by up- and downstream processes	0.20-0.47	0.10-0.23	0.35-0.81	0.08-0.18

Table S-3 Explanation: *: Climate change costs w/o remaining damage costs.

The following graphic is an overview of the figures:

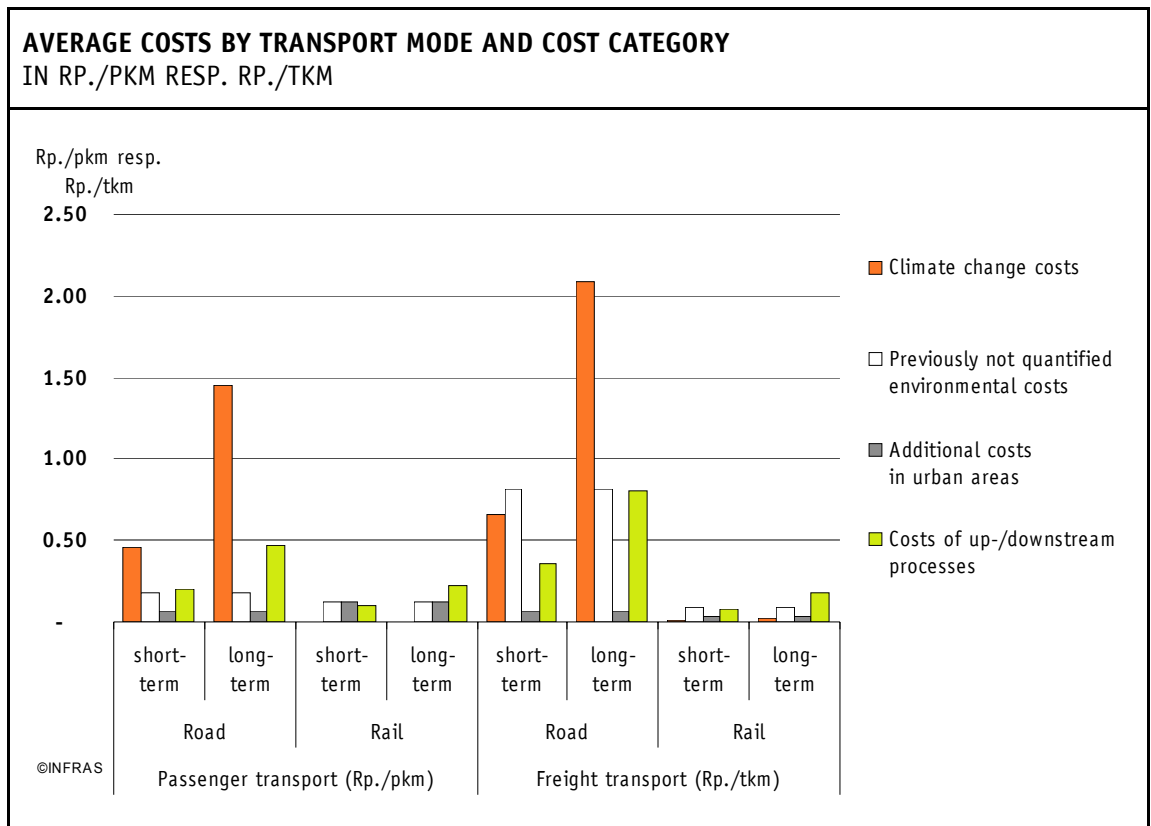


Figure S-1 Average costs

Note: average costs for the short- and long-term perspective of avoidance cost rates within the field of climate change cost for passenger and freight transport on road and rail. Avoidance cost rates for CO₂ affect climate change costs as well as costs of up- and downstream processes.

Conclusion of estimations

- › With the exception of climate change costs as well as costs of up- and downstream processes, the dimensions of the additional external costs are lower than the quantified external costs to date of road and rail transport (accidents, nature and landscape, health costs, noise and building damages).
- › The most important cost category is climate change costs. Even when using low factors for avoidance or damage costs road and rail transport causes annual costs of approximately 0.5 to 1 billion CHF. A differentiated view (short term in order to achieve interim targets acc. to Kyoto-Protocol; long term to achieve targets until 2050/2010) is necessary in order to comply with the vast uncertainties. At the same time it is possible to have an international view on all sectors as well as a solely Swiss view (related to Swiss transport targets). This leads to a wide range of results in this cost category.

- › Another important category is the category of costs of up- and downstream processes. In this area, greenhouse gas emissions caused by production, maintenance and disposal processes of infrastructure, vehicles and rolling stock were quantified and valued with the help of the avoidance cost rates of the climate change cost approach. In the same manner emissions of greenhouse gases caused by the provision of energy sources (petrol and diesel in road transport resp. electricity in rail transport) were quantified and valued.⁹ Total costs are approximately 250–580 million CHF p.a.
- › External costs due to harvest losses are approx. 74 million CHF p.a. The calculated value is a comprehensible average value, because it is based on the mean ozone load of the past six years as well as on recognized dose-response-functions.
- › The importance of forest damages is significantly lower than earlier estimations, approx. 70 million CHF p.a. But causal relations in the complex forest ecosystem are still not completely researched and therefore only partially quantifiable. It is therefore very possible that actual costs might be significantly higher than those of the present estimation because only part of the damage aspects could be quantified. In the sensitivity analysis an upper cost level of max. 250 million CHF p.a. was determined.
- › Whereas damage costs to waterbodies are only marginal, damage to soil quality is about 100 million CHF p.a.
- › Additional damages in the alpine region are fairly difficult to quantify (approx. 30 million CHF p.a.) The rough estimation in this study is based on a willingness-to-pay approach for untouched nature. It serves as an indication for an approximation of the expected external costs in the alpine region.
- › Increasing spatial conflicts in urban areas lead to external costs of about 90 million CHF p.a. for non-motorised transport users. The significance of this cost category is likely to increase in future.

Future estimations of additional external costs of transport

The calculations of the various areas have pointed out that the estimation methods due to different causes – esp. due to vast uncertainties with regard to future impacts of today's emissions as well as partially unknown or hardly researched impact relations – are significantly more difficult to implement than standardised estimated external transport costs of

⁹ The favourable result of rail transport is closely related to the environmental-friendly Swiss rail electricity mix (over 95% hydropower). If the comparison would be made with the European electricity mix of the European Union for the co-ordination of the Transmission of Electricity (UCTE), costs in this area would double or triple.

accidents, noise or air pollution. We are of the opinion that the estimation made in this study cannot be standardised the same way. An annual update is possible for climate change costs and costs for up- and downstream processes on the basis of the Swiss greenhouse gas inventory resp. handbook emission factors for road transport as well as standardised transport statistics data. The other cost areas need more intensive updating which will notably include current research results resp. new basic data (in particular GIS- data sets).

We think that for certain cost areas in-depth analyses are expedient:

- › In the climate area it is important to follow the current discussions on cost rates and to compare them with cost rates per tonne CO₂-equivalent in this study. Parallel it is worthwhile to update the climate change costs which are to be expected in Switzerland (damage costs). These costs are not analyzed in this study and they should not be linked directly with Swiss transport emissions but should be communicated as an own estimation.
- › For the additional environmental costs we consider in-depth estimations as less rewarding. A detailed analysis of additional costs in the alpine region makes most sense. This means to some extent an analysis of additional costs are looked at which were not differentiated enough in the already existing estimations of external costs of transport in Switzerland (noise and air pollution of transit transport, nature and landscape). But at the same time it has to be noted that there are limits to the calculations of external costs in the alpine region.
- › Additional costs in urban areas can only be quantified roughly with indirect approaches. Detailed analyses are possible when determining capacity costs (congestion costs, scarcity costs) for road and rail transport.
- › Costs of up- and downstream processes are to be looked at separately due to their status in the life cycle. To be looked at more closely would be the rail situation with a changed electricity mix (e.g. UCTE electricity mix) as well as external costs of additional emissions (air pollutants, water pollutants, etc.) of these processes.

1. EINLEITUNG

1.1. AUSGANGSLAGE UND ZIEL

Ausgangslage

Das Gesetz für eine leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe verlangt die kontinuierliche Aufdatierung der externen Kosten im Verkehrsbereich, als eine Grundlage (u.a.) zur Bemessung des LSVA-Abgabensatzes. Zu diesem Zweck hat das ARE verschiedene Aktualisierungsstudien in Auftrag gegeben, die mittlerweile alle abgeschlossen sind:

- › Externe Unfallkosten
- › Lärmkosten
- › Gebäudeschäden
- › Gesundheitskosten
- › Kosten für Natur und Landschaft

Neben diesen bereits mehrfach berechneten und aktualisierten Kostenbereichen gibt es weitere Folgekosten des Verkehrs, die bisher nur sehr grob im Rahmen von internationalen Studien quantifiziert wurden.

Ziel der Studie

Diese Studie soll Abschätzungen über weitere externe Kosten des Verkehrs liefern, um ein möglichst vollständiges Bild über die Kostensituation im Verkehr zu erhalten. Wir konzentrieren uns auf diejenigen Kosten, die der motorisierte Strassen- und Schienenverkehr zulasten der Allgemeinheit verursacht. Im Zentrum stehen dabei die **Klimakosten, bisher nicht erfasste externe Umweltkosten, zusätzliche externe Kosten für Verkehrsteilnehmer in städtischen Räumen** sowie **zusätzliche, externe Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse**. Nicht berücksichtigt sind hingegen die Staukosten, da es sich dabei um Kosten handelt, die innerhalb des Verkehrssystems (v.a. Strasse) anfallen.

1.2. SYSTEMABGRENZUNG UND VORGEHEN

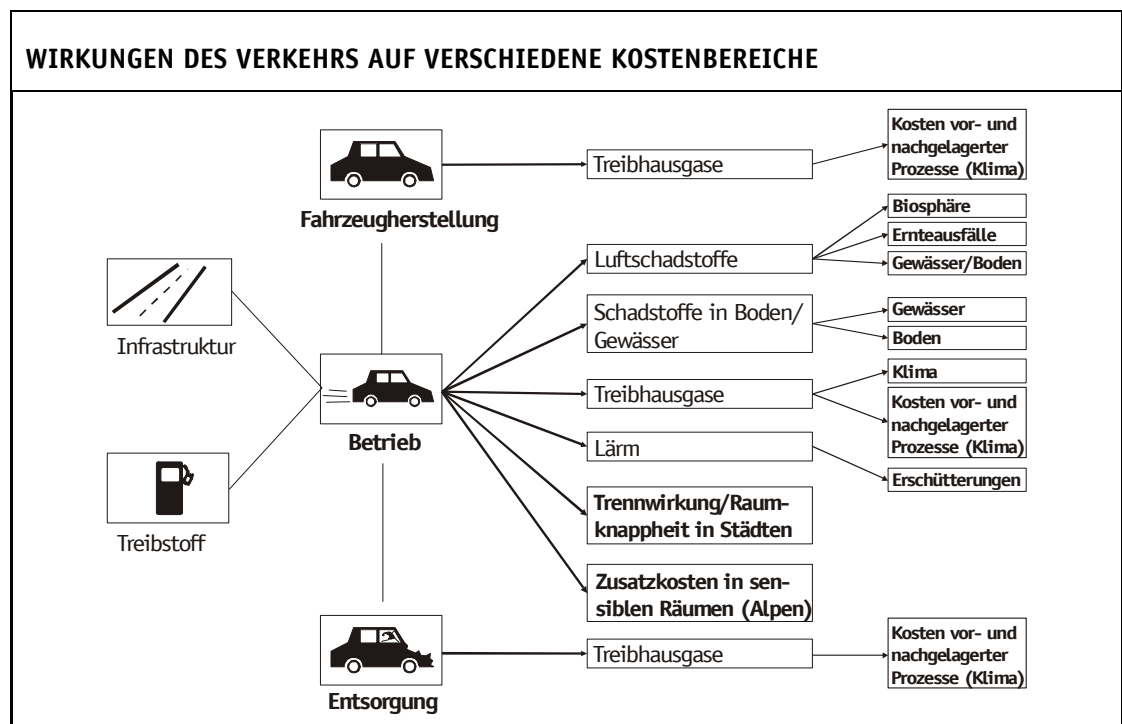
Berücksichtigte Kosten

Im Einzelnen fallen unter die verschiedenen Kategorien folgende Kostenbereiche:

- › **Klimakosten**
- › **Bisher nicht erfasste externe Umweltkosten:**

- › Ernteaufälle aufgrund Luftverschmutzung (v.a. Ozon)
- › Schäden der Luftverschmutzung in der Biosphäre (Waldschäden)
- › Schäden für Gewässer (Beeinträchtigung der Wasserqualität durch Luftschadstoffe)
- › Schäden für die Bodenqualität
- › Erschütterungen
- › Zusätzliche Umweltkosten in sensiblen Räumen (Alpenraum)
- › **Zusätzliche externe Kosten für Verkehrsteilnehmer in städtischen Räumen**
 - › Zusätzliche Kosten in städtischen Räumen: Trenneffekte und räumliche Verdrängung für Langsamverkehr (LV)
- › **Zusätzliche Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse**
 - › Up- und Downstream-Effekte: Energieproduktion
 - › Up- and Downstream-Effekte: Graue Energie Fahrzeuge/Rollmaterial, Infrastruktur.

Die folgende Grafik illustriert am Beispiel eines Personenwagens die verschiedenen Wirkungen auf Mensch und Umwelt eines Verkehrsmittels über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Die fett gedruckten Schadenseinwirkungen auf Mensch und Umwelt sind Gegenstand der vorliegenden Studie.



Figur 1 Die **fett** gedruckten Umwelt- und Gesundheitsschäden sind Gegenstand dieser Studie. Quelle: eigene Darstellung.

Berücksichtigte Verkehrsmittel und Bezugszeitpunkt

Die externen Kosten werden für folgende **Verkehrsträger und –mittel** bestimmt:¹⁰

- › Strassenverkehr
 - › Motorräder
 - › Personenwagen (PW)
 - › Lieferwagen
 - › LKW
 - › Regionalbusse
 - › Linienbusse
- › Schienenverkehr:
 - › Personenverkehr
 - › Güterverkehr

Die Resultate werden in folgender **Differenzierung** dargestellt:

- › Gesamtkosten
- › Kosten pro Fahrzeug-km
- › Kosten pro pkm/tkm

Stichjahr für alle Berechnung ist das Jahr 2000. Damit kann eine Vergleichbarkeit mit den bereits vorhandenen Kostenschätzungen hergestellt werden.

Gewählter Ansatz

Für die in dieser Studie zu quantifizierenden Kosten gibt es – im Unterschied zu Unfallkosten, Gesundheitskosten, Gebäudeschäden oder Lärmkosten – keine standardisierten Bewertungsgrundlagen. Dies hat verschiedene Gründe:

- › Erstens ist die Relevanz der Kosten in der Regel geringer, d.h. die Grössenordnungen sind relativ gering. Ausnahme sind die Klimakosten, die – je nach Schätzansatz – bedeutend sein können.
- › Zweitens sind die Dosis-Wirkungs-Beziehungen relativ komplex und nicht überall erhärtet (d.h. die Kosten können in bestimmten Bereichen auch Null oder nur sehr gering sein).
- › Drittens ist die Datenlage teilweise unvollständig.
- › Viertens ist der Schätzansatz (Relevanz der volkswirtschaftlichen Kosten) teilweise schwierig umzusetzen.

¹⁰ Explizit ausgeklammert ist der Luftverkehr, weil er auch in den bereits vorliegenden Studien des ARE nicht einbezogen ist und weil dessen Eigenheiten eigene Schätzmethoden bedingen würden.

Vor diesem Hintergrund ist es deshalb unabdingbar, dass sich eine Abschätzung dieser Kosten von Anfang an mit den Unsicherheiten auseinandersetzt, um keine scheinengenauen Ergebnisse vorzutäuschen. Wir haben deshalb für das Vorgehen in den einzelnen Bereichen folgende Grundsätze angewendet:

- › Aufarbeitung der aktuellen Forschung: Für alle Kostenbereiche wurden relevante aktuelle Forschungsergebnisse und Literaturquellen analysiert. Dabei zeigen wir auch die Gemeinsamkeiten und Unterschiede auf.
- › Zusammenarbeit mit den Fachämtern und Forschungsstellen: Die einzelnen Grundlagen sind in intensiver Zusammenarbeit mit Unterstützung von Fachexperten der einzelnen Bundesämtern (v.a. BAFU) sowie diversen Forschungsanstalten entstanden. Nebst den Mitgliedern der Begleitgruppe wurde auch mit einer Reihe weiterer Experten Kontakt aufgenommen¹¹. Für ihre Unterstützung sei den Begleitgruppenmitgliedern und allen weiteren Experten herzlich gedankt.
- › Relevanzanalyse: Da nicht alle Themenbereiche in der gleichen fachlichen Tiefe bearbeitet werden können, wurde mit Hilfe einer Relevanzanalyse auf Basis vorhandener Studien (u.a. UNITE 2002a, INFRAS/IWW 2004) eine Priorisierung der verschiedenen Kostenbereiche vorgenommen. Dies betrifft v.a. Kostenbereiche, für die bisher schon umfangreiche Schätzungen zumindest in internationalen Studien (UNITE 2002a, INFRAS/IWW 2004) vorliegen (Klimaschäden, Kosten von vor- und nachgelagerten Prozessen) bzw. für Kostenbereiche, für die aktuelle Untersuchungen die Höhe der bisher berechneten Schäden in Frage stellen (Waldschäden).
- › Detailliertes Vorgehen: Für jeden Kostenbereich haben wir die einzelnen Berechnungsschritte detailliert dargestellt, um Transparenz zu schaffen.
- › Darstellung der Unsicherheiten und Streubreiten: Je nach Kostenbereich haben wir die verschiedenen Unsicherheiten entweder in Form von Szenarien (v.a. im Klimabereich) oder in Form von Streubreiten (mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen) dargestellt.
- › Folgerungen für die weitere Behandlung des Kostenbereichs: Diese Studie hat explizit den Auftrag, eine Abschätzung durchzuführen. Deshalb zeigen wir am Schluss auf, wie mit den

¹¹ Weitere kontaktierte Experten: Heidi Meyer (ASTRA), Jürg Zihler (BAFU, Sektion Boden), Ulrich Sieber (BAFU, Sektion Oberflächengewässer), Reto Murali (BAFU, Sektion Grundwasserschutz), Richard Volz (BAFU, Sektion Waldnutzung und Holzwirtschaft), Tommaso Meloni (BAFU, Abteilung Lärmbekämpfung), Rudolf Weber (BAFU, Sektion Luftqualität), Peter Straehl BAFU (Sektion Luftqualität), Manfred Tschumi (Bundesamt für Landwirtschaft, BLW), Markus Steger (Fachstelle Bodenschutz, Kanton Zürich), Adrienne Grêt-Regamey (Institut für Raum- und Landschaftsentwicklung, ETH Zürich), Sabine Braun (Institut für angewandte Pflanzenphysiologie, IAP), Anna Roschewitz (Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, WSL), Jürg Fuhrer (Landwirtschaftliche Forschungsanstalt Reckenholz, FAL).

einzelnen Kostenbereichen umzugehen ist und bei welchen Bereichen sich eine allfällige Vertiefung lohnen könnte.

1.3. BERICHTSSTRUKTUR

Im **Kapitel 2** werden die methodischen Grundlagen, Berechnungsschritte und Resultate für die Klimakosten im Verkehr dargestellt. **Kapitel 3** umfasst Methodik, Berechnungsschritte und Resultate für die bisher nicht erfassten externen Umweltkosten des Verkehrs (Ernte, Wald, Gewässer, Boden, Erschütterungen, Alpen). **Kapitel 4** umfasst die Berechnungsmethodik, Kostensätze, Datengerüste und Resultate für die zusätzlichen externen Kosten für weitere Verkehrsteilnehmer (insbesondere Langsamverkehr im städtischen Raum). In **Kapitel 5** schliesslich werden die Quantifizierungsmethodik sowie die Resultate der Kosten von vor- und nachgelagerten Prozessen zusammengefasst.

Kapitel 6 zeigt in einer Übersicht die Resultate sämtlicher Kostenbereiche und zeigt Schwankungsbereiche und Unsicherheiten auf. Die Schlussfolgerungen aus den Analysen werden schliesslich im **Kapitel 7** präsentiert.

Im **Anhang** wird für jeden Kostenbereich die Art der Umweltwirkung detailliert beschrieben. Ausserdem wird das Verkehrs- und Emissionsmengengerüst detailliert aufgeführt.

2. KLIMAKOSTEN

2.1. QUANTIFIZIERUNGSMETHODIK

Die Art der Umweltwirkung von Treibhausgasen wird im Anhang A1 detailliert dargestellt. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse über die Zusammenhänge der Klimaerwärmung und daraus abgeleitet über die zu ergreifenden Massnahmen zu einer Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre bilden die Grundlage für die Berechnung der externen Klimakosten des Verkehrs. Insbesondere tragen sie dazu bei, die notwendigen Reduktionsziele zu formulieren sowie die Kosten der Klimaschäden bzw. die Kosten zu deren Vermeidung zu quantifizieren.

Folgende Schritte stehen im Zentrum:

- › **Festlegen von Reduktionszielen:** Bestimmung von tolerierbaren Konzentrationen und Zeiträumen mit Hilfe wissenschaftlicher Grundlagen. Der heutige Wissensstand macht deutlich, dass zu einer Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre signifikant niedrigere Emissionen in den Industrienationen notwendig sein werden.
- › **Bestimmung der Vermeidungs- und Schadenskosten:** die aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse geben Hinweise zu den Vermeidungskosten für Treibhausgase sowie den Schadenskosten für Klimaschäden, die selbst bei einer Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration auftreten werden. Grundsätzlich existieren zwei verschiedene Berechnungsansätze, um die Kosten der Klimaveränderung abzuschätzen:
 - › Schadenskostenansatz: Es wird ein Zusammenhang zwischen emittierten CO₂-Mengen und den auftretenden Schäden hergestellt.
 - › Vermeidungskosten: Diese Kostensätze zeigen auf, was die Vermeidung der Emission einer bestimmten Menge CO₂ kostet. Sie variieren in Abhängigkeit des Reduktionsziels, der betrachteten Zeitperiode, des regionalen und sektoralen Perimeters.

Angesichts der Komplexität der Thematik leiten wir für die Quantifizierung die folgenden Grundsätze ab:

- › Die Folgewirkungen einer Erwärmung der Erdatmosphäre sind ein **globales Problem**. Der Verkehr ist mit seinen Emissionen von Treibhausgasen daran beteiligt. Eine Abschätzung der Klimaschäden in der Schweiz ist zwar interessant für die Positionierung der Schweiz in der internationalen Klimapolitik, insbesondere für die verwundbaren Sektoren wie Land-

wirtschaft, Siedlung und Verkehr im Berggebiet oder Tourismus. Sie erlaubt aber keine Zurechnung auf den Schweizer Verkehr.

- › Die Klimaschäden und der Verkehrsanteil können nur mit Hilfe eines globalen Ansatzes abgeleitet werden.
- › Die Klimaproblematik ist mit diversen **Unsicherheiten** verbunden. Die Wirkungszusammenhänge in der Kausalkette anthropogene Emissionen, Treibhausgas-Konzentration in der Atmosphäre und Temperaturanstieg/Klimawandel sind komplex¹². Eine detaillierte Abschätzung der weltweiten Folgewirkungen ist mit den heute zur Verfügung stehenden wissenschaftlichen Grundlagen nur in Form von Szenarien möglich. Die Abschätzung der zu erwartenden Schäden ist deshalb als Risikoanalyse zu verstehen.
 - › Eine monetäre Abschätzung der Schäden ist deutlich komplexer als eine Berechnung der Kosten für mögliche Vermeidungsstrategien; letztere ist auch einfacher auf den Verkehrsbereich allozierbar;
 - › Die Ergebnisse sind angesichts der Unsicherheiten nur in Form von Streubreiten kommunizierbar. Insbesondere sind eine kurzfristige und eine längerfristige Betrachtungsweise zu unterscheiden.
- › Die Klimaproblematik, insbesondere die Bestimmung von Reduktionszielen und -strategien für einzelne Länder, weist eine bedeutende **politische Komponente** auf. Die Wissenschaft ist heute in der Lage, die Konsequenzen einzelner Emissionsszenarien für die globale Temperaturentwicklung und die damit verbundenen Risiken aufzuzeigen. Auf dieser Grundlage können Reduktionspfade definiert und in Beziehung zu Vermeidungsszenarien (und deren Kosten) gesetzt werden. Wer aber (welche Quelle, welches Land, welche Generation) wie viel zu reduzieren hat, ist sowohl eine ökonomische (gemäss Effizienzkriterien) wie auch eine politische (gemäss Gerechtigkeitskriterien) Frage. Dies zeigt insbesondere die aktuelle Diskussion über die Umsetzung des Kyoto-Protokolls.
 - › Die Ergebnisszenarien müssen auch die politische Komponente berücksichtigen. Insbesondere ist zwischen einer nationalen (Reduktionsziele Verkehr) und einer internationalen Sichtweise zu unterscheiden.

Reduktionsziele

Zentral für die Frage der zukünftigen Klimaschäden wie auch der Kosten für ihre Vermeidung durch Emissionsreduktionen sind die anzustrebenden Reduktionsziele. Im Annex wird

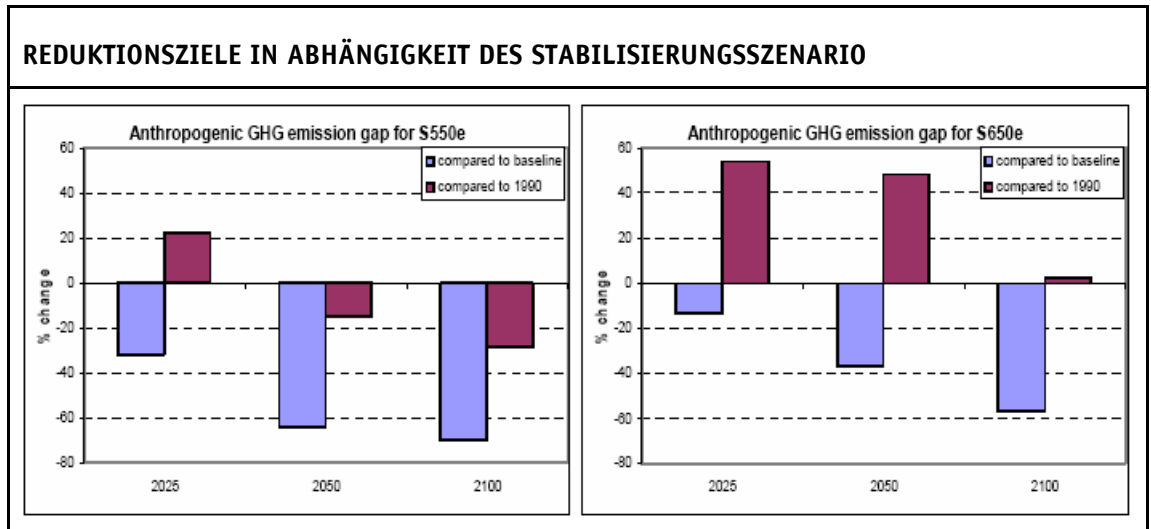
¹² Es gibt verschiedene Rückkoppelungsmechanismen zwischen den Kohlenstoffspeichern 'Atmosphäre', 'Ozeane' und 'Land-ökosysteme'.

die Herleitung der Reduktionsziele detailliert diskutiert. Zunächst relevant sind dabei die Reduktionsziele gemäss Kyoto-Protokoll. Im Kyoto-Protokoll, das am 16. Februar 2005 in Kraft getreten ist, verpflichtet sich die Schweiz, ihre Treibhausgasemissionen bis zur ersten Verpflichtungsperiode 2008-2012 um 8 Prozent gegenüber 1990 zu reduzieren. Dieses Reduktionsziel kann vor dem Hintergrund der aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnisse allerdings nur einen ersten, kurzfristigen Zwischenschritt zur Stabilisierung des Klimas darstellen (siehe hierzu Annex A1, Kapitel 1).

Die langfristigen Reduktionsziele sind vom Niveau, auf welchem die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre stabilisiert werden soll, abhängig. Aus diesem Niveau ergibt sich das Ausmass der Erwärmung des Klimas gegenüber der vorindustriellen Zeit. In der Literatur werden dabei insbesondere die beiden sog. S550e und S650e Szenarien diskutiert. Diesen Stabilisierungsszenarien liegt eine weltweite Soll-Emissionsentwicklung zugrunde, die notwendig ist, um die zukünftige Konzentration an Treibhausgasen (ausgedrückt in sog. CO₂-Äquivalenten) auf maximal 550 ppm bzw. 650 ppm ansteigen zu lassen. Diese Stabilisierungsszenarien entsprechen einer Temperaturzunahme von ca. +2°C bzw. +2.3°C bis 2100 gegenüber der vorindustriellen Zeit. Abgeleitet aus dieser Sollentwicklung ergeben sich globale Reduktionsziele gegenüber einer business-as-usual Entwicklung bzw. gegenüber den Emissionen des Jahres 1990 (Vergleichsperiode des Kyoto-Protokolls).

Nach der Festlegung eines globalen Reduktionsziels müssen die Beiträge der einzelnen Länder und Regionen zur Erreichung des Reduktionsziels bestimmt bzw. verhandelt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bestimmte Ländergruppen aufgrund ihrer Entwicklung in den nächsten Dekaden ihre Emissionen noch deutlich erhöhen werden (China, Indien, Schwellen- und Entwicklungsländer) um erst dann auf einen nachhaltigen Reduktionspfad einzuschwenken. Weiterhin sind bei der Bestimmung des Beitrags von bestimmten Ländern an die angestrebte Gesamtreduktion von Treibhausgasen auch Effizienzgesichtspunkte zu berücksichtigen: Die Emissionen sollen dort reduziert werden, wo dies ökonomisch am günstigsten zu bewerkstelligen ist, genauer: wo die Summe aus Kosten und Nutzen einer Emissionsminderung am Vorteilhaftesten ist.

In EC (2003a) und EC (2005c) werden globale, langfristige Reduktionsziele für die beiden im Anhang A1 dargestellten und diskutierten Stabilisierungsszenarien S550e bzw. S650e dargestellt. Die nachfolgende Figur zeigt, in welchem Ausmass die weltweiten Emissionen – in Abhängigkeit des Szenarios – einerseits gegenüber 1990 und andererseits gegenüber einer business-as-usual Entwicklung reduziert werden müssen. Diese Reduktionsziele werden für die Jahre 2025, 2050 und 2100 dargestellt:



Figur 2 Quelle: EC 2003a/b.

Figur 2 zeigt, dass für das Stabilisierungsszenario S550e, das auch mit den EU-Zielsetzung übereinstimmt (EC 2005a), die globalen Treibhausgasemissionen gegenüber der Basisentwicklung (=business-as-usual, baseline), die eine Erreichung der Kyoto-Ziele bereits unterstellt, um 37% in 2025 bis ca. 70% im Jahr 2100 reduziert werden. Im Jahr 2100 entspricht dies einer Reduktion der globalen Emissionen im Vergleich zu 1990 um ca. 34%.

Die Herausforderung einer zukünftigen internationalen Klimapolitik wird sein, einen Kyoto-ähnlichen Prozess mit verbindlichen Emissionszielen, Verpflichtungsperioden und flexiblen Instrumenten des Emissionshandels zur effizienteren Erreichung der Emissionsziele anzutreiben. Dabei sind vor allem Gerechtigkeitsaspekte¹³, die Frage des Timings der Beteiligung der einzelnen Regionen und Länder am Prozess, die Art der Verpflichtung und die Festsetzung von Emissionszielen relevant. Eine Vielzahl von möglichen Modellen existiert bereits. Insbesondere folgende zwei Ansätze sind im Fokus:

- › "Per Capita Convergence": Die Modelle gehen von einer zukünftigen Konvergenz der Pro-Kopf-Emissionen aus. Sie unterscheiden sich insbesondere hinsichtlich des Zeithorizonts bis zur Erreichung identischer Pro-Kopf-Emissionen und werden auch als 'full participation'

¹³ In EC (2003a) werden folgende Aspekte explizit als Grundpfeiler des Gerechtigkeitsprinzips genannt: Gleiche Rechte aller an der Atmosphäre (dies führt zu Pro-Kopf-Emissionszielen), Beitrag zur Reduktion in Abhängigkeit der wirtschaftlichen und technischen Möglichkeiten, Verursacherprinzip (polluter-pays principle.), gegenwärtige Emissionen konstituieren Status-quo Rechte (dies führt zu Regelungen mit "Grossvaterrechten", relevant vor allem für den Emissionshandel).

Ansätze bezeichnet. In EC (2003a) werden als Zeithorizont die Jahre 2050 bzw. 2100 unterstellt für die volle Konvergenz der Pro-Kopf-Emissionen.

- › "Multi-Stage" approach: In diesen Modellen werden Ländergruppen gebildet. Die Ländergruppen unterscheiden sich hinsichtlich der Übernahme von Verantwortung und der Art der Verpflichtungen für die Erreichung der Klimaziele. Die Anzahl der sich verpflichtenden Länder wie auch das Ausmass der Verpflichtung steigt graduell im Zeitverlauf an. Dies würde – analog zu den Regelungen des Kyoto-Protokolls – zu einer zunehmenden Anzahl von Annex 1 Ländern führen. Diese Modelle werden auch als sog. 'increasing participation' Ansätze bezeichnet. In EC (2003a) werden dabei insgesamt 3 'Stages' unterschieden:

- › Stage 1: Keine quantitativen Verpflichtungen
- › Stage 2: Emissionsbegrenzungs-Ziele (zum Beispiel Emissionsintensitäts-Ziele¹⁴)
- › Stage 3: Emissionsreduktions-Ziele (analog zu den Zielen der Annex 1 Staaten).

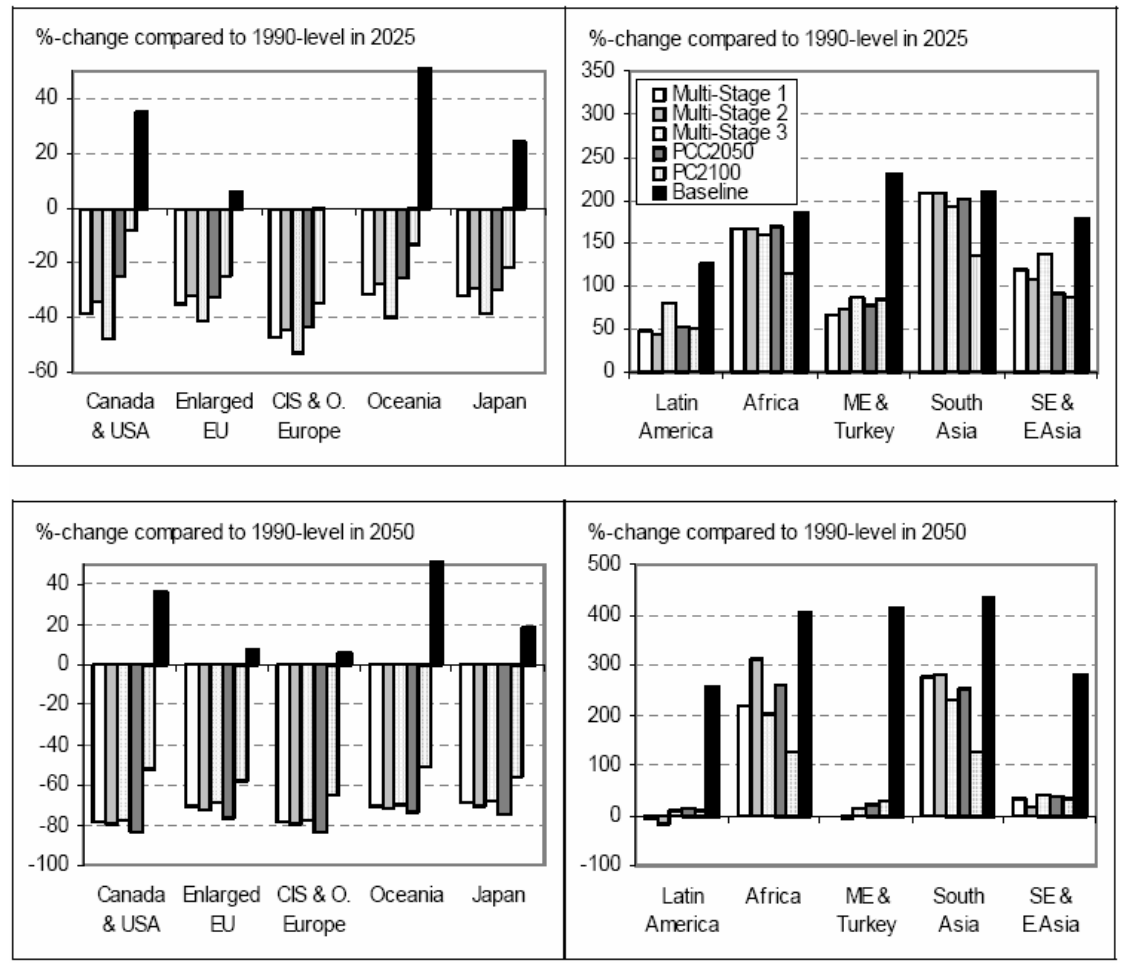
Der Übergang von Nicht-Annex 1 Staaten in einen nächsten Stage erfolgt anhand eines sog. Capacity-Responsibility Index, der als gewichtete Summe des Pro-Kopf-Einkommens sowie der Pro-Kopf-Emissionen definiert ist.

Aus obigen Modellen lassen sich schliesslich Reduktionsziele für verschiedene Weltregionen für die Jahre 2025 und 2050 festlegen: EC (2003a) unterscheidet insgesamt 13 Regionen, die Schweiz ist wie alle westeuropäischen Staaten in der Region 'Enlarged EU' enthalten.¹⁵

¹⁴ Emissionsintensität: Faktor, der die Emission von Treibhausgasen in Abhängigkeit des Brutto-Inland-Produkts ausdrückt.

¹⁵ China befindet sich in der Region 'SE&EAsia', Indien in der Region 'South Asia'. Details siehe EC 2003a.

REDUKTIONSZIELE FÜR DAS STABILITÄTSSZENARIO S550E FÜR DIE JAHRE 2025 UND 2050



Figur 3 Reduktionsziele (in % CO₂eq) je Region im Vergleich zu 1990 zur Erreichung eines Stabilisierungsszenarios 2100 mit 550 ppm CO₂-Äquivalenten. Quelle: EC 2003a. Erläuterungen: Multi-Stage 1 bis Multi-Stage 3 beziehen sich auf die oben diskutierten 'increasing participation'-Modelle. PCC 2050 und PCC 2100 zeigt die Reduktionsziele für die Ansätze der vollen Konvergenz der Pro-Kopf-Emissionen bis 2050 bzw. 2100.

Für die Schweiz ergeben sich Reduktionsziele für den Zeitraum 2025 von -22% bis hin zu -41% gegenüber 1990, für den Zeitraum 2050 je nach Ansatz -60% bis zu knapp -80% gegenüber den Emissionen 1990. Aktuelle Studien (UBA 2005) zeigen ähnliche Resultate, wobei dort mit CO₂-Stabilisierungszielen argumentiert wird und nicht mit CO₂-Äquivalenten¹⁶:

¹⁶ Das S550e Stabilisierungsszenario entspricht in etwa dem 450 ppm CO₂-Konzentrationszenario aus UBA (2005). Die Differenz zu den 550 ppm CO₂-eq entspricht ca. 100 ppm CO₂-eq der weiteren Treibhausgase (Methan, Lachgas, etc.)

REDUKTIONSZIELE FÜR TREIBHAUSGASE IN % GEGENÜBER 1990		
Reduktionsziel	Zeitraum	Quelle/Erläuterungen
-8%	2008-2012	Schweizer Treibhausgasreduktionsziel für die 1. Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls (CO ₂ -Äquivalente),
-10%	2008-2012	Schweizer Reduktionsziel gemäss CO ₂ -Gesetz: Treibstoffe: minus 8% (ohne internationaler Luftverkehr) Brennstoffe: minus 15%
-8%	2008-2012	Durchschnitt EU-Raum: Treibhausgasreduktionsziel für die 1. Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls (unterschiedliche Reduktionsziele für die einzelnen Länder) (CO ₂ -Äquivalente)
- 22% bis - 41%	2025	EC 2003a, Stabilisierungsszenario S550e (CO ₂ -Äquivalente)
- 60% bis - 80%	2050	EC 2003a, Stabilisierungsszenario S550e (CO ₂ -Äquivalente)
-10% bis -30%	2020	UBA 2005; Stabilisierungsszenario 450 ppm CO ₂
- 70% bis -90%	2050	UBA 2005; Stabilisierungsszenario 450 ppm CO ₂

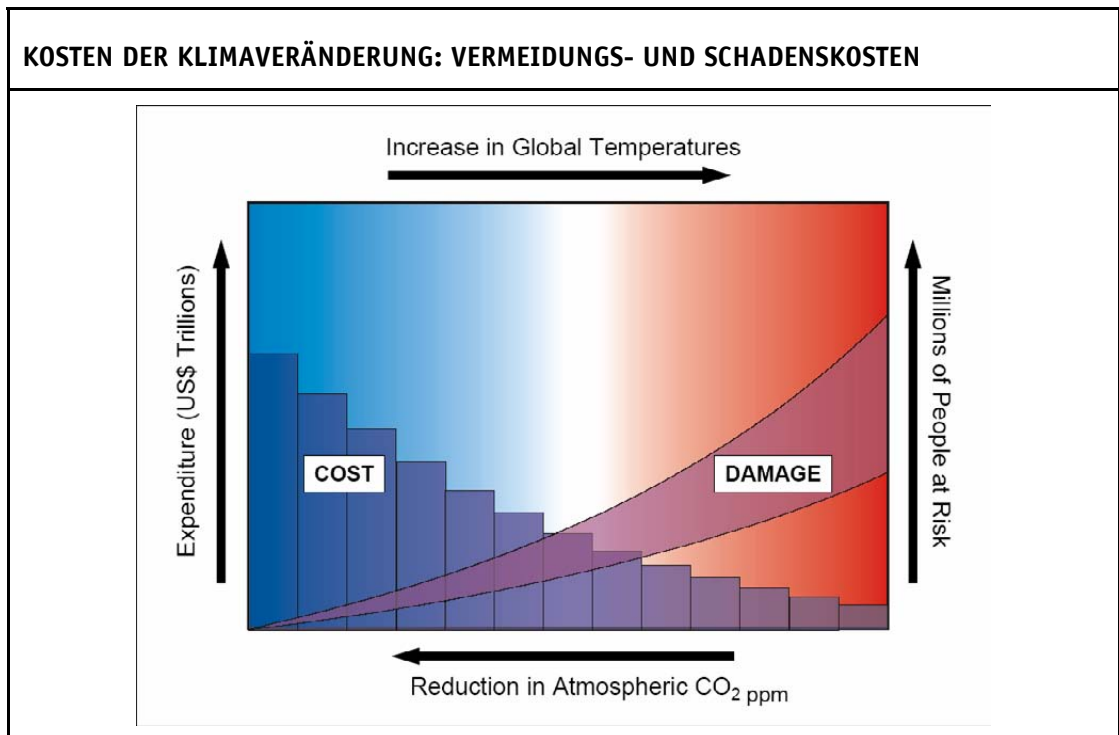
Tabelle 1 Reduktionsziele für CO₂-Äquivalente bzw. CO₂ für den Zeitraum 2008/2012-2050.

Es ist offensichtlich¹⁷, dass die Erreichung der Kyoto-Ziele keinesfalls ausreichend für die Einhaltung der Klimaziele (< 2°C) ist. Bis Mitte dieses Jahrhunderts – das ist die klare Folgerung aus allen heutigen Modell-Rechnungen – müssen die Emissionen der Industriestaaten gegenüber 1990 um 60-90% sinken. Die Höhe der Reduktionsziele ist wiederum entscheidend für die Schadens- und Vermeidungskosten. Diese werden im folgenden Abschnitt diskutiert.

Kosten der Klimaerwärmung

Die folgende Darstellung zeigt den Zusammenhang zwischen Vermeidungskosten und Klimaschäden (Schadenskosten):

¹⁷ Die aggregierte Emissionsreduktion der Kyoto-Vertragsparteien von 5.2% bis 2012 wird durch Emissionswachstum in den andern Ländern mehr als kompensiert. Die Kyoto-Minderung auf den BAU Emissionspfad bis 2100 geht im Rauschen anderer Unsicherheitsfaktoren der Emissionsentwicklung im 21. Jahrhundert unter.



Figur 4 Schematische Darstellung. Quelle: UNFCCC (<http://unfccc.int/>).

Die Kosten der Klimaerwärmung setzen sich zusammen aus den Kosten zur Vermeidung von Treibhausgas-Emissionen zur Erreichung eines Stabilitätsszenarios und den verbleibenden Schadenskosten. Denn selbst wenn mit dem Erreichen des Stabilitätsszenarios S550e die Klimaerwärmung bis 2100 nur knapp +2°C gegenüber der vorindustriellen Zeit beträgt, ist von Schadenskosten (inkl. Anpassungskosten der Volkswirtschaften an den Klimawandel) von einer schwer quantifizierbaren Grössenordnung auszugehen. Könnte man alle bestehenden Unsicherheiten ausklammern und die marginalen Vermeidungs- und Schadenskosten präzise bestimmen, so könnte daraus das ökonomisch optimale Reduktionsziel hergeleitet werden. Die an diesem Punkt verbleibenden Schäden zu vermeiden wäre aus ökonomischer Sicht nicht effizient. Für die Bestimmung einer ökonomisch optimalen Abgabe gemäss Grenzkostenprinzip wären diese deshalb nicht zu berücksichtigen. Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten bei der Quantifizierung der Kosten ist eine solche Berechnung in der Praxis allerdings nicht möglich. Trotzdem sind es Schäden, die die Volkswirtschaft und Gesellschaft belasten. Im Sinne eines Maximalszenarios sollen deshalb zu den Vermeidungskosten auch die verbleibenden Schäden dazugezählt werden.

Die Kosten einer weiteren Klimaerwärmung bzw. die ökonomischen Nutzen durch vermiedene Schadenskosten durch eine Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der

Atmosphäre sind im Moment kaum umfassend quantitativ zu bestimmen (IPCC 2001e). Die potenziellen Nutzen der Stabilisierung hängen in grossem Mass von Annahmen hinsichtlich der Verfügbarkeit und Kosten zukünftiger (Vermeidungs-)Technologien sowie zur Sensitivität des Klimasystems ab (EC 2005a). Die wichtigsten Gründe für die grossen Unsicherheiten sind:

- › Miteinander verkettete Unsicherheiten, beginnend von der zukünftigen BIP- und Bevölkerungsentwicklung, über die zukünftigen Emissionen von Treibhausgasen, über die lokal und regional variierenden Klimaveränderungen bis hin zu deren Auswirkungen bzw. deren Timing.
- › Unsicherheit über das Ausmass des "aufgeschobenen" Temperaturanstiegs durch die Schwebstaubbelastung über den Industrieländern des Nordens (Sulfataerosole) sowie durch den Abbau der Ozonschicht¹⁸.
- › Zukünftige Schäden können nicht vollständig monetarisiert werden (Schwierigkeiten bei der Bewertung des Werts menschlichen Lebens, dem Verlust von Biodiversität etc.).
- › Die Nutzen der Klimaschutzpolitik werden erst in weiter Zukunft realisiert werden können. Die Wahl der langfristigen Diskont-Rate ist ethisch komplex und berührt insbesondere die Frage der inter-generationellen Verteilungsgerechtigkeit.

Basierend auf neuen Studien wurden folgende indikativen Werte für die Schadenskosten (Gesamthaft und pro Tonne CO₂) geschätzt (nach EC 2005a und weiteren Quellen):

¹⁸ Durch die Lufthygienemassnahmen in den Industrieländern (nach dem 'Waldsterben' und durch die Transformation nach dem Zerfall der Sowjetunion) sinkt die Schwebstaubfracht in die Atmosphäre über der Nordhalbkugel, welche vermutlich zwischen 1960 und 1990 einen Teil der anthropogenen Erwärmung abgewendet hat. In gleicher Weise hat der stratosphärische Ozonabbau (Ozonloch) einen Teil des "radiative forcings" der anthropogenen Treibhausgas Emissionen kompensiert. Diese aufgeschobene Wirkung wird bei Erholung der Ozonschicht bis 2050 wieder spürbar.

SCHADENSKOSTEN DER KLIMAERWÄRMUNG KOSTEN IN €/T CO ₂ BZW. IN € TOTAL		
Kosten/ Kostensatz	Quelle	Bemerkungen
Gesamtkosten		
74 T€ (115 TCHF)	EC 2005a, basierend auf Hope 2005	Kumulierte weltweite Schadenskosten der Klimaerwärmung 1990-2200, abdiskontiert auf einen Netto-Barwert (NPV) 2000. Klimaszenario: Business-as-usual (935 ppm CO₂-Äquivalente 2100)
43 T€ (67 TCHF)	EC 2005a, basierend auf Hope 2005	Kumulierte weltweite Schadenskosten der Klimaerwärmung 1990-2200, abdiskontiert auf einen Netto-Barwert (NPV) 2000. Klimaszenario: 650 ppm Stabilisierungskonzentration (CO₂-Äquivalente)
32 T€ (50 TCHF)	EC 2005a, basierend auf Hope 2005	Kumulierte weltweite Schadenskosten der Klimaerwärmung 1990-2200, abdiskontiert auf einen Netto-Barwert (NPV) 2000. Klimaszenario: 550 ppm Stabilisierungskonzentration (CO₂-Äquivalente)
Kostensätze in €/CHF pro Tonne CO₂-Äquivalente		
14-20 € (22-31 CHF)	EC 2005a, basierend auf OECD 2004 und Downing/Watkiss 2003	unterer Schätzwert, für eine Klimaerwärmung von unter 2°C.
80 € (125 CHF)	EC 2005a, basierend auf OECD 2004 und Downing/Watkiss 2003	mittlerer Schätzwert, höhere Schadenskosten sehr wahrscheinlich, basierend auf gegenwärtigen Emissionen
80-140€ (125-218 CHF)	EC 2005a und Downing/Watkiss 2003	oberer Schätzwert, für Klimaerwärmung von mehr als 4°C.

Tabelle 2 Erläuterungen: 1 Billion = 10¹² = Tera (T), Wechselkurs €/CHF: 1 € = 1.56 CHF (SNB 2005). Die Kostensätze in €/CHF pro Tonne sind nicht genau spezifiziert, ob es sich um Kosten pro Tonne CO₂-Äquivalent handelt oder um Kosten pro Tonne CO₂. Da im Verkehr weitere Treibhausgase bis auf wenige Ausnahmen keine grosse Rolle spielen (Anteil deutlich unter 3%, siehe Resultatkapitel), verwenden wir bei Berechnungen die Kostensätze als CHF/t CO₂-Äquivalente.

Exkurs: Die Kosten der Klimaänderung in der Schweiz

Nicht im Fokus dieser Studie stehen die Kosten, die eine Klimaänderung in der Schweiz verursacht. In Meier (1998) wurden letztmals integral die Schadenskosten für die Schweiz für den Zeitraum 2030-2050 berechnet. Diese Berechnungen basieren noch auf dem 1. Assessment Report des IPCC aus dem Jahr 1992 (Szenario A, BAU, Regionalszenario Schweiz des NFP 31) und gehen bis 2030 von einer durchschnittlichen Erwärmung in der Schweiz von +1.9-2.7°C und bis 2100 von +3.9-4.9°C aus. Diese Klimaerwärmung ist – wie oben gezeigt wird – weit vom angestrebten Stabilitätsszenario S550e entfernt (weltweite Erwärmung um durchschnittlich ca. 2°C bis 2100, wobei noch keine Regionalszenarien für die Schweiz für dieses Szenario vorliegen). Die Sensitivität des Klimasystems ist auch nach Vorliegen des 3. Assessment Reports des IPCC für ein Regionalszenario Schweiz noch zuwenig gesichert.

Die in Meier (1998) ausgewiesenen jährlichen Kosten für die Jahre 2030-2050 betragen ca. 2.3-3.2 Mrd. CHF (Preise 1995), ein Grossteil der Schäden fällt dabei beim Tourismus durch entgangene Einnahmen und Schäden an der Infrastruktur an (1.8-2.3 Mrd. CHF), weitere grosse Schäden werden durch Hochwasser und Überschwemmungen verursacht (0.14-0.45 Mrd. CHF). Umgerechnet auf einen Kostensatz in CHF/Tonne CO₂ betragen die Kosten ca. 60-80 CHF pro Tonne CO₂.

Eine Aufdatierung dieser Kosten für die Schweiz ist insbesondere hinsichtlich der Post-Kyoto-Prozesse notwendig, um Kosten- und Nutzen von weiteren Reduktionsverpflichtungen seriös beurteilen zu können. Für die Quantifizierung der externen Kosten des Verkehrs sind die spezifisch schweizerischen Schadenskosten im Rahmen dieser Untersuchung nur von begrenztem Interesse, da Treibhausgase global verfrachtet werden und nicht direkt mit lokalen Schäden in Verbindung gebracht werden können/dürfen. Deshalb wird für die Quantifizierung der externen Kosten des Verkehrs mit globalen Schadenskosten bzw. Vermeidungskosten pro Tonne CO₂ gerechnet.

Im Zusammenhang mit zur Berechnung der externen Kosten des Verkehrs notwendigen Vermeidungskostensätzen sind grundsätzlich ebenfalls globale Vermeidungskosten von Interesse, die durch den Einsatz der flexiblen Mechanismen (JI, CDM, IET)¹⁹ auf einem least-cost-Pfad erreicht werden können. Für Sensitivitätsrechnungen sind jedoch durchaus auch die nationalen Vermeidungskosten oder sektorspezifische Vermeidungskosten anwendbar.

¹⁹ Flexible Mechanismen: siehe Glossar.

Die Höhe der Kosten für die Erreichung des Klimaziels (Vermeidungskosten) ist ebenfalls mit grossen Unsicherheiten behaftet. Entsprechend sind die Streubreiten gross. Sie unterscheiden sich in der Literatur um Grössenordnungen und sind hauptsächlich abhängig vom angestrebten Stabilisierungsziel, dem Zeitraum zur Erreichung des Ziels, der regionalen Verteilung der Reduktionsverpflichtungen, der einbezogenen Sektoren wie auch der Berechnung der 'ancillary benefits', den sog. Neben- oder Sekundärnutzen, die mit einer Reduktion der Emission von Treibhausgasen einhergehen.²⁰

VOLKSWIRTSCHAFTLICHE KOSTEN EINER STABILISIERUNG DER CO₂-EQ KONZENTRATION KOSTEN IN % DES BSP BZW. GESAMTKOSTEN		
Kosten/ Kostensatz	Quelle	Bemerkungen
Kosten in % des Bruttosozialprodukts		
0.9-1.8%	EC 2005a, EC 2003a	Volkswirtschaftliche Kosten EU-25 in 2025 zur Erreichung des S550e Szenarios mit Hilfe eines Partiellen Gleichgewichtsmodells (POLES)
0.5%	EC 2005a, EC 2003a	Volkswirtschaftliche Kosten EU-25 in 2025 zur Erreichung des S550e Szenarios mit Hilfe eines Allgemeinen Gleichgewichtsmodells
0.6-1.1%	EC 2005a	Volkswirtschaftliche Kosten 2025 weltweit zur Erreichung eines 400 ppm CO ₂ -Konzentrationsniveaus (entspricht ca. 500 ppm CO₂-eq Szenarios)
0.2-1.8%	IPCC 2001a-e, zitiert nach EC 2005a	Volkswirtschaftliche Kosten 2050 weltweit zur Stabilisierung der CO ₂ -Konzentration auf 550 ppm (entspricht ca. 650 ppm CO₂-Äquivalenten)
1-4%	IPCC 2001a-e, zitiert nach EC 2005a	Volkswirtschaftliche Kosten 2050 weltweit zur Stabilisierung der CO ₂ -Konzentration auf 450 ppm (entspricht ca. 550 ppm CO₂-Äquivalenten)
Gesamtkosten		
1-8 Billionen US\$	IPCC 2001a-e, zitiert nach EC 2005a	Diskontierte weltweite Kosten 2100 im Zeitraum 1990-2100 zur Stabilisierung der CO ₂ -Konzentration auf 550 ppm (entspricht ca. 650 ppm CO₂-Äquivalenten), Schwankungsbereich in Abhängigkeit der verwendeten Modelle und der zugrunde liegenden Referenzszenarien.
2.5-18 Billionen US\$	IPCC 2001a-e, zitiert nach EC 2005a	Diskontierte weltweite Kosten 2100 im Zeitraum 1990-2100 zur Stabilisierung der CO ₂ -Konzentration auf 450 ppm (entspricht ca. 550 ppm CO₂-Äquivalenten), Schwankungsbereich in Abhängigkeit der verwendeten Modelle und der zugrunde liegenden Referenzszenarien.

Tabelle 3 Erläuterungen: 1 Billion = 10¹² = Tera (T), Wechselkurs €/CHF 2000: 1 € = 1.5578 CHF (SNB 2005).

Als Grundlage für die Berechnung der externen Klimakosten des Verkehrs sind Kostensätze in CHF pro Tonne vermiedenes CO₂-Äquivalent bzw. vermiedenen Kohlenstoff notwendig.

²⁰ Sekundärnutzen ergeben sich, falls durch die Reduktion der Treibhausgase z.B. weitere lokale Luftschadstoffe reduziert werden, durch fiskalische oder gesetzliche Massnahmen (z.B. Lenkungsabgaben auf Treibstoffe, Geschwindigkeitsbeschränkungen, etc.) die Zahl der Unfälle bzw. die Häufigkeit von Staus zurückgeht bzw. durch die flexiblen Instrumente Beiträge zur Entwicklung von Volkswirtschaften geleistet werden.

Diese variieren in verschiedenen Szenarien ebenfalls sehr stark. Teilweise ist aus den vorhandenen Literaturquellen auch nicht genau zu bestimmen, welche Reduktionsziele bzw. welche Zeiträume den Kostensätzen zugrunde liegen. Tendenziell liegen weit mehr Schätzungen zu Vermeidungskosten zur Erreichung der Kyoto-Ziele vor als für die Erreichung eines Post-Kyoto Stabilisierungsszenarios. Auch sind die Vermeidungskostensätze für die Post-Kyoto Phase naturgemäss mit grösseren Unsicherheiten und Streubreiten behaftet. Generell lassen sich vor allem technologie-basierte Bottom-up Modelle sowie Resultate von Gleichgewichtsmodellen (Top-down) unterscheiden (Details hierzu u.a. in Blok et al. 2001).

Die folgende Tabelle zeigt eine umfangreiche Zusammenstellung der wichtigsten Vermeidungskostensätze:

VERMEIDUNGSKOSTEN €/CHF PRO TONNE CO ₂ /CO ₂ -ÄQUIVALENT			
Kosten €	Kostensatz CHF	Bemerkungen	Quelle
Vermeidungskosten zur Erreichung der Kyoto Ziele			
ca. 22.5€	35CHF	EUA Carbon Market Indicator, Europäischer Handel für Emissionsrechte, Preise Sept. 2005, Preise verdreifachten sich seit Ratifikation des Kyoto-Protokolls Februar 2005 von ca. 7-9€ auf ca. 22€. Preise bis 2008/2010 lt. Experten im Bereich 20-30€/t CO ₂ . Annahme eines Mittelwerts von 22.5€/t CO₂	Point Carbon, Carbon Market Europe, Sept 30, 2005.
8-18 €	20-30 CHF	Preise für CER ²¹ Gutschriften aus CDM Projekten. Marktbeobachter gehen davon aus, dass die Preise für produzierte und marktverfügbare CERs sich den EUA Preisen annähern werden und in der Periode 2006-2009 im Bereich von 10-20 € liegen werden. Für die Jahre 2010-2012 sind Versorgungsengpässe mit höhern Preisen denkbar	Point Carbon CDM/JI Monitor, 6. und 20. September, 2005
19€-25€	31 CHF	Vermeidungskosten 1998, um Kyoto-Ziele in Deutschland bzw. Belgien zu erreichen, verwendet in Friedrich/Bickel (2001) und UNITE 2002b (Pilot accounts for Germany)	UNITE 2002b, Fahl et al. 1999, Duerinck et al. 1999
20€	32 CHF	Europäischer Durchschnittswert 1998 zur Erreichung der Kyoto-Ziele 2008-2012	UNITE The pilot accounts for Switzerland, UNITE 2002a
20€	32 CHF	Grenzvermeidungskosten 1999 für Europa (EU15) mit Handel zwischen den EU Staaten zur Erreichung der Kyoto-Ziele in Europa ('full flexibility case')	Blok et al. 2001, Downing/Watkiss 2003
38€	67 CHF	Vermeidungskosten (Preisbasis 1990) ohne Handel zwischen EU-Staaten (Kyoto-Ziele)	Capros/Mantzos 2000a

Fortsetzung nächste Seite

21 CER: Certified Emission Reduction: Zertifizierte Reduktion von Treibhausgasen im Rahmen von CDM Projekten.

VERMEIDUNGSKOSTEN €/CHF PRO TONNE CO ₂ BZW. PRO TONNE CO ₂ -ÄQUIVALENT			
Kosten €	Kostensatz CHF	Bemerkungen	Quelle
42€	67 CHF	Grenzvermeidungskosten 1999 für Europa (EU15) ohne Handel zwischen den EU Staaten zur Erreichung der länderspezifischen Kyoto-Ziele . Grosse Unterschiede bestehen zwischen den einzelnen Staaten: von 1.3€/t Frankreich bis zu 106€/t Niederlande	Blok et al. 2001
80€	130 CHF	Schweizerischer Wert 1998 für Sensitivitätsrechnung in UNITE basierend auf Maibach et al. (1999). Erreichung der Kyoto-Ziele durch Massnahmen in der Schweiz	UNITE 2002a
150€	240 CHF	Vermeidungskosten 1999 in den Sektoren 'Capture&Disposal', 'Renewables' (Erreichung Kyoto-Ziele)	zitiert nach Downing/Watkiss 2003, basierend auf Blok et al. 2001
-72€ - 327€	-115 CHF - 523 CHF	Vermeidungskosten (Preisbasis 1999) im Verkehrsbereich (Strassenverkehr). Bereich verschiedener Einzelmassnahmen mit insgesamt eingeschränktem maximalem Reduktionspotenzial, teilweise negative Vermeidungskosten bei Massnahmen, die zu Einsparungen führen. Vermeidungskosten für wichtigste Massnahmen zwischen 19€ und 92€ pro Tonne CO ₂ .	Bates et al. 2001
-	70 CHF	Vermeidungskostensatz im Verkehrsbereich für die Schweiz bei Einführung einer CO ₂ -Abgabe von 20 Rappen pro Liter zur Deckung der Ziellücke für die Erreichung des Kyoto-Ziels in der Schweiz.	INFRAS 2003
Vermeidungskosten zur Erreichung von Post Kyoto Zielen			
-	135-160 CHF	Vermeidungskosten Schweiz für eine CO ₂ Reduktion von -55% bis -79% gegenüber Schweizer Referenzszenario (Zielszenario 2.2t bzw. 1t CO ₂ /Kopf), kompatibel mit dem Stabilitätsszenario S550e des UNFCCC , nicht diskontierte durchschnittliche jährliche Kosten 2003-2050	INFRAS 2004c
	178-221 CHF	Vermeidungskosten Schweiz im Verkehrsbereich für eine Reduktion der gesamtschweizerischen CO ₂ Emissionen von -55% bis -79% gegenüber Schweizer Referenzszenario (Zielszenario 2.2t bzw. 1t CO ₂ /Kopf) kompatibel mit dem Stabilitätsszenario S550e des UNFCCC , nicht abdiskontierte durchschnittliche jährliche Kosten 2003-2050	INFRAS 2004c
120€-150€	192 CHF – 240 CHF	(Schatten-)Preis für internationale Emissionsrechte 2050 zur Erreichung des S550e Stabilitätsszenarios (Preis pro Tonne CO ₂ -Äquivalent). Sensitivitätsanalysen zeigen Schwankungsbreiten 2050 von 25-200€/Tonne CO ₂ -eq.	den Elzen 2004 et al. 2004

Tabelle 4 Erläuterungen: Die oben dargestellten Preise beziehen sich auf verschiedene Bezugsjahre. Die Umrechnung in Schweizer Franken (CHF) beziehen sich jeweils auf das genannte Basisjahr der jeweiligen Studie. Sie wurden mit dem jeweiligen Durchschnittskurs (SNB 2005) umgerechnet und sind nicht kaufkraftbereinigt.

Von besonderem Interesse sind Vermeidungskosten zur Erreichung der Kyoto-Ziele sowie für die Reduktionsanforderungen im Rahmen der Stabilisierungsszenarien S550e. Für diese be-

stehen im Moment erst Grobschätzungen auf Basis von Kostenmodellen (z.B. FAIR 2.0), die insbesondere auch den Emissionshandel berücksichtigen (Detaillierte Diskussion in: den Elzen et al. (2004)). Die folgende Darstellung zeigt die Entwicklung der Schatten-Preise von Emissionszertifikaten im Zeitraum 2000-2050 zur Erreichung des Stabilitätsszenario S550e für verschiedene Vermeidungsstrategien und -modelle (siehe oben).

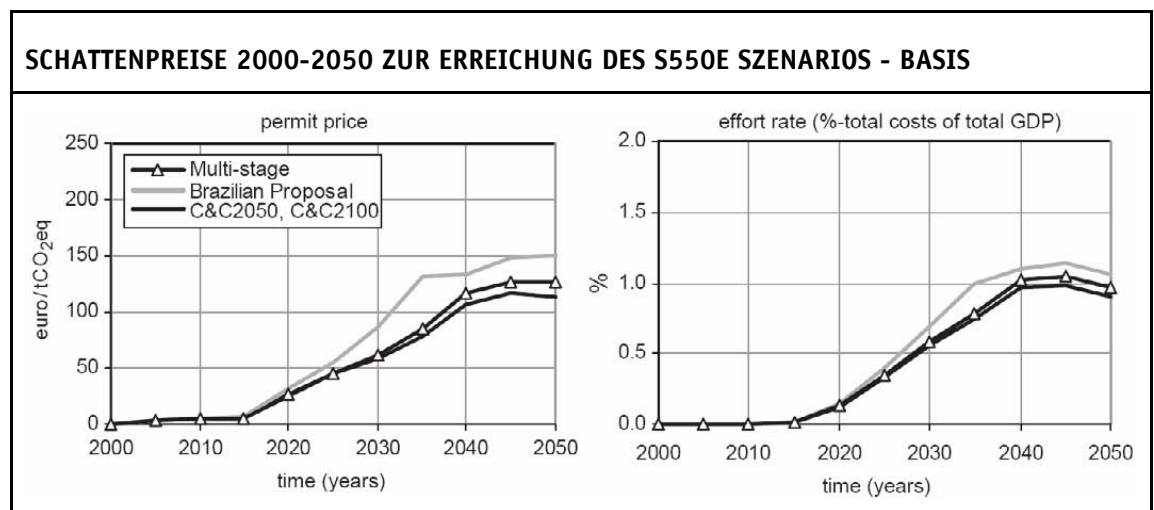
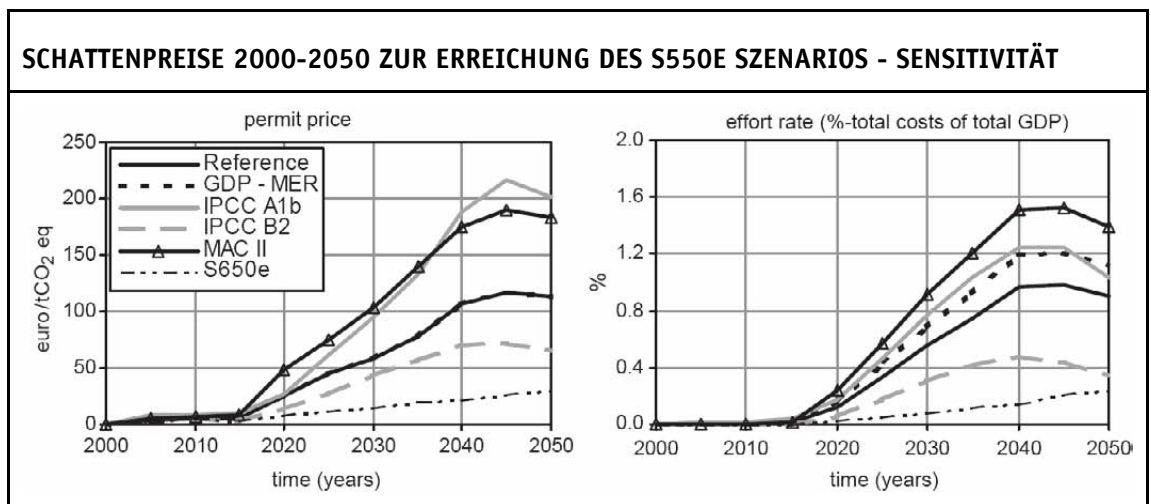


Figure 5 Erläuterungen: links die Preise in €/t CO₂-eq, rechts der Prozentsatz der jährlichen Vermeidungskosten am gesamten weltweiten BIP. Quelle: den Elzen et al. 2004.²²

Sensitivitätsrechnungen, bei denen die Grenzkosten-Kurven der Treibhausgasvermeidung, die Referenzszenarien der Klimamodelle und die Stabilisierungskonzentrationen variiert werden, führen zu einer grösseren Spannweite der möglichen zukünftigen Schattenpreise mit einem Schwankungsbereich von 25-200 €/t CO₂-eq:

²² Multi-stage: Bildung von Ländergruppen, die sich hinsichtlich der Übernahmen von Verantwortung und der Art der Verpflichtung unterscheiden. Die Anzahl der sich verpflichtenden Länder steigt graduell im Zeitverlauf und in Abhängigkeit des Pro-Kopf-Einkommens und der Pro-Kopf-Emissionen an.
Brazilian Proposal: die Beiträge einzelner Länder zur Reduktion von Treibhausgasen erfolgt proportional zu ihrem jeweiligen Betrage zur Klimaerwärmung.
C&C2050/C&C2100: Konvergenz der Pro-Kopf-Emissionen bis zum Jahr 2050 bzw. 2100.



Figur 6 Resultate für das Sensitivitätsszenario. Der Referenzfall entspricht den der Reduktionsvariante °C&C2050/2100 des Basisszenarios. Erläuterungen: links die Preise in €/t CO₂-eq, rechts der Prozentsatz der jährlichen Vermeidungskosten am gesamten weltweiten BIP. Quelle: den Elzen et al. 2004.

Fazit Kosten der Klimaerwärmung

Die Analyse der Literatur hat gezeigt, dass sich die beobachteten Vermeidungskosten überwiegend in einem Bereich von 20-200€/t CO₂-eq bewegen²³. Folgende Erkenntnisse leiten wir daraus für die Berechnung der externen Klimakosten des Verkehrs ab:

- › Ein Grossteil der Studien weist für die erste Verpflichtungsperiode (2008-2012) des Kyoto-Protokolls Vermeidungskosten in der Grössenordnung von 20-40€/t CO₂-eq auf. Die Schwankungsbreite ist insbesondere durch das Vorhandensein bzw. Nicht-Vorhandensein eines Emissionshandels zwischen den einzelnen Staaten begründet. Beim Nicht-Zulassen des Handels von Emissionsrechten zwischen Staaten (der EU) resultieren für bestimmte Länder auch wesentliche höhere Vermeidungskosten.
- › Aufgrund von Modellanalysen gibt es in Entwicklungs- und Transformationsländern ein grosses Potenzial, Treibhausgase zu wesentlich tieferen Kosten zu vermeiden. Erste Erfahrung mit den sich entwickelnden Zertifikatsmärkten (CDM/JI) zeigen aber, dass sich mit den flexiblen Mechanismen gemäss Marrakesch Accord innerhalb begrenzter Zeitspannen wesentlich weniger Zertifikate produzieren lassen, als aufgrund der Modellanalysen vermutet und aktuell nachgefragt werden. Die Preise sind entsprechend im Laufe von 2005 erheblich angestiegen. Für die fehlende Liquidität der Märkte sind verschiedene Barrieren verantwortlich. Die fehlende Liquidität führt zu höheren Preisen.

²³ Der genannte Kostenbereich bezieht sich auf Studien aus verschiedenen Jahren. Für die Umrechnung in CHF wurde jeweils der aktuelle Jahresmittelkurs verwendet.

- › Die Vermeidungskosten variieren innerhalb der verschiedenen Sektoren einer Volkswirtschaft erheblich. Insbesondere im Verkehrsbereich sind bereits zur Erreichung der Kyoto-Ziele wesentlich höhere Vermeidungskosten wahrscheinlich (im Bereich von teilweise bis zu ca. 100€/t CO₂-eq). In der EU werden die Treibhausgas-Emissionen des Verkehrs bis 2008-2012 voraussichtlich auch bei der Einhaltung des Kyoto-Ziels um ca. 25-30% gegenüber 1990 ansteigen. Damit das Kyoto-Ziel trotzdem erreicht wird, sind daher in den Sektoren 'Private Haushalte' und 'Industrie + Dienstleistungen' und zum Teil 'Private Haushalte' wesentlich höhere Treibhausgas-Reduktionen notwendig (Details dazu Blok et al. 2001, zu Vermeidungskosten im Verkehr Bates et al. 2001).
- › Die Analyse der Klimaszenarien zeigt auch, dass die quantitativen Kyoto-Ziele erst einen kleinen Zwischenschritt zur Stabilisierung des Klimas des Planeten und damit der Vermeidung möglicherweise katastrophaler Auswirkungen darstellen und sie nicht ausreichen, die bestehenden Risiken deutlich zu verringern. Insofern müssen sich die längerfristigen Vermeidungskosten vor allem am Stabilisierungsziel der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre gemäss Klimakonvention (Post-Kyoto-Phasen) orientieren. Für die Einhaltung der allgemein zu einer Stabilisierung des Klimas (<2°C) als notwendig erachteten Zielkonzentration von 550 ppm CO₂-Äquivalenten steigen die Vermeidungskosten im Zeitverlauf bis 2050 stetig an und betragen dann ca. 120-150 €/t CO₂-eq (ausgedrückt als Schattenpreise für Emissionsrechte).
- › Die verwendeten Vermeidungskostensätze schliessen die im Rahmen des Kyoto-Prozesses entwickelten flexiblen Instrumente ausdrücklich ein. Nur im Rahmen von Sensitivitätsrechnungen werden nationale bzw. sektorale Vermeidungskosten berücksichtigt.
- › Selbst wenn die Emissionen zeitgerecht auf den Pfad gemäss dem ambitionierten S550e Szenario gesenkt werden können²⁴, lassen die IPCC Analysen eine Klimaerwärmung von ca. 2°C als wahrscheinlich erscheinen. Diese Klimaerwärmung wird zu Schäden und zusätzlichen volkswirtschaftlichen Kosten führen, die in im Sinne einer Maximalbetrachtung bei der Berechnung der externen Klimakosten berücksichtigt werden. Bei einer Temperaturerhöhung um 2°C ist von Schadenskosten einer noch unbekannten Grössenordnung auszugehen. Mangels besserer Daten ist dafür eine konservative Schätzung von mindestens 20€/t CO₂ anzusetzen. Im Sinne dieser Maximalbetrachtung können die Gesamtkosten der Klimaerwärmung als die Summe der Vermeidungskosten zur Erreichung eines nachhaltigen Entwicklungspfades der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre und der dann noch verblei-

²⁴ Voraussetzung dafür ist, dass die globalen Treibhausgasemissionen bereits um 2020 ihren maximalen Peak erreichen und danach deutlich zurückgehen.

benden Schadenskosten der Klimaerwärmung ausgedrückt werden. (Details siehe Abschnitt 'Kosten der Klimaerwärmung', Seite 58)

Wenn wir nun diese Überlegungen und Kostensätze auf die Klimakosten des Verkehrs in der Schweiz beziehen, ist folgendes zu beachten:

- › Nur ein langfristiges Klimaszenario widerspiegelt die wahren Kosten einer möglichen Klimaveränderung. Deshalb ist es u.E. nicht zulässig, nur die Kyoto-Ziele als Basis für mögliche Kostensätze beizuziehen. Letzten Endes stecken hinter den Überlegungen zur Veränderung der Kostensätze nebst Effizienzüberlegungen über die Zeit auch Verteilaspekte zwischen Generationen.²⁵ Ein optimales Preisszenario verteilt daher die anfallenden Kosten der Transformation in eine Gesellschaft und Wirtschaft mit stark reduziertem Verbrauch fossilen Energieträger möglichst gleichmässig. Wir gehen davon aus, dass dies in den oben dargestellten Preisszenarien zugrunde gelegt worden ist. Da die Kosten für die zukünftigen Generationen nicht nur ökonomisch, sondern auch gesellschaftlich zu interpretieren sind, wählen wir einen Diskontsatz von 0%.²⁶ Dies bedeutet, dass Schäden in der Zukunft gleich hoch gewichtet werden wie heute anfallende Schäden. Dies ist aufgrund des Problemausmasses und des Risikos unseres Erachtens gerechtfertigt. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wird ein Kostensatz von 3% geprüft (vgl. Tabelle 5). Die Wahl des Diskontsatzes wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Je tiefer der Diskontsatz gewählt wird, umso stärker werden die Kosten zukünftiger Treibhausgasreduktionen gewichtet.
- › Eine sinnvolle Periodisierung (optimaler Kostensatz pro Jahr) lässt einen gewissen Spielraum offen. Grundsätzlich gibt es zwei Argumentationslinien:
 - › Wenn jedes Jahr immer die jeweils notwendigen und aus ökonomischer Sicht effizienten Reduktionsmassnahmen umgesetzt werden (also die Dynamisierung der Preise tatsächlich stattfindet), dann wäre der für den heutigen Zeitpunkt resultierenden Schattenpreis der richtige. Dieser ist – gemäss den vorhandenen Preisszenarien relativ tief (siehe Figur 5). Erst die zukünftigen Generationen werden höhere Kosten erfahren. Damit ergäben sich laufend steigende Klimakosten. Sie müssten entsprechend jedes Jahr aktualisiert werden.

²⁵ Muss die heutige oder die zukünftige Generation die laufend steigenden Kosten zur Umstellung auf andere Energieträger bzw. die zunehmenden Kosten von potenziellen Schäden übernehmen?

²⁶ Dies bedeutet, dass Schäden in der Zukunft gleich wichtig sind wie heute anfallende Schäden. Dies ist aufgrund des Problemausmasses und des Risikos unseres Erachtens gerechtfertigt. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wird ein Kostensatz von 3% geprüft (vgl. Tabelle 5). Die Wahl des Diskontsatzes wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Je tiefer der Diskontsatz gewählt wird, umso stärker werden die Kosten zukünftiger Treibhausgasreduktionen gewichtet.

- › Die in den Preisszenarien unterstellte Strategie impliziert, dass die zukünftigen Generationen mehr an die Vermeidungsstrategie zahlen müssen als die heutige. Gleichzeitig wird unterstellt, dass die Preisstrategie auch tatsächlich umgesetzt wird. Wenn Gerechtigkeitskriterien verwendet werden (heutige und zukünftige Generation soll gleich viel bezahlen) ist die Wahl eines durchschnittlichen Kostensatzes gerechtfertigt, der die Preisunterschiede ausgleicht.

Für die Berechnung gehen wir von einem differenzierten Ansatz aus. Wir verwenden sowohl einen kurzfristigen, auf die Kyoto-Ziele ausgerichteten Kostensatz, als auch für ein langfristiges Szenario einen durchschnittlichen, für die nächsten 50 Jahre zu erwartenden Kostensatz.

- › Nebst einer kurz- und langfristigen Betrachtung sind eine nationale und eine internationale Betrachtung möglich. Grundsätzlich ist es aus Effizienzgründen irrelevant, wo und in welchem Sektor die Treibhausgas-Emissionen reduziert werden. Gerechtigkeitsaspekte führen aber zur Überlegung, dass auch die Industriestaaten (mit höheren Vermeidungskosten) ihren Beitrag leisten sollten. Die vor dem Bundesratsentscheid²⁷ im Rahmen der Vernehmlassung zu "Massnahmen zur Einhaltung der Reduktionsziele nach dem CO₂-Gesetz"²⁸ geführte Diskussion um die Einführung einer CO₂-Abgabe auf Treibstoffe versus der Einführung eines Klimarappens auf Treibstoffen als freiwillige Massnahme zeigt dies deutlich: Die CO₂-Abgabe orientiert sich an den Schweizer Sektorzielen und möchte bewirken, dass durch die Lenkungswirkung die Emissionen der Schweiz sinken, nicht zuletzt aus dem Interesse der Schweiz, damit gleichzeitig externe Kosten in anderen Bereichen (z.B. luftschadstoffbedingte Gesundheitskosten, Lärmkosten) zu senken. Der Klimarappen hingegen setzt auf eine internationale Strategie: Mit einem Teil der Einnahmen aus dem Klimarappen sollen internationale Vermeidungsprojekte finanziert werden. Diese durch den Schweizer Verkehr indirekt finanzierten internationalen Projekte sollen die Treibhausgas-Emissionen zu tieferen Kosten reduzieren.²⁹ Ähnlich wie bei der kurz- und langfristigen Betrachtungsweise fallen Effizienz- und Gerechtigkeitsaspekte zusammen. Deshalb werden

²⁷ Der Bundesrat hat am 23. März 2005 aufgrund der Vernehmlassungsergebnisse entschieden, eine CO₂-Abgabe auf Brennstoffe einzuführen und im Treibstoffbereich dem Klimarappen als freiwillige Massnahme eine befristete Chance zu geben.

²⁸ Die Vernehmlassung dauerte vom 20. Oktober 2004 bis zum 20. Januar 2005. Der Vernehmlassungsbericht zu den vier Varianten zur Einhaltung der Reduktionsziele nach dem CO₂-Gesetz findet sich unter: <http://www.umwelt-schweiz.ch/imperia/md/content/buwalcontent/folder/04-10-20co2/d-vernehmlassungsbericht.pdf>

²⁹ Es ist in diesem Zusammenhang zu erwähnen, dass die mit einer Reduktion der Treibhausgas-Emissionen im Inland einhergehenden Sekundärnutzen zusätzlich berücksichtigt werden müssten.

wir beide Ansätze (internationales Szenario als Basiswert; nationaler Wert zur Reduktion der Verkehrsemission in der Schweiz³⁰) berücksichtigen.

Daraus ergeben sich folgende Betrachtungsweisen und Szenarien für die Bestimmung der spezifischen Kostensätze:

VERMEIDUNGSKOSTENSÄTZE IN DER SCHWEIZ VERGLEICH DER VERSCHIEDENEN SICHTWEISEN		
Räumlicher Perimeter	Kurzfristige Betrachtungsweise: Erreichung der Kyoto Ziele in der Schweiz	Langfristiges Szenario: Erreichung einer Stabilitätskonzentration von 550 ppm CO ₂ -Äquivalenten
Nationaler Ansatz: Vermeidung in der Schweiz	70 CHF/t CO₂-Äquivalent im Verkehrsbereich (Kosten von nationalen Massnahmen zur Erreichung der Reduktionsziele für Treibstoffe)	135-221 CHF/t CO₂-Äquivalent (tiefe Werte für Vermeidung in allen Sektoren, höhere Werte für CO ₂ -Vermeidung im Verkehrsbereich)
Internationaler Ansatz: Vermeidung basierend auf Emissionshandel und flexiblen Mechanismen	35 CHF/t CO₂-Äquivalent (Kosten für internationale Strategie zur Erreichung der CH-Verpflichtungen gemäss Kyoto)	80-110 CHF/t CO₂-Äquivalent (Weltweites Preisszenario) (Diskontrate 0%) 27-40 CHF/t CO ₂ -Äquivalent (Diskontrate 3%)

Tabelle 5

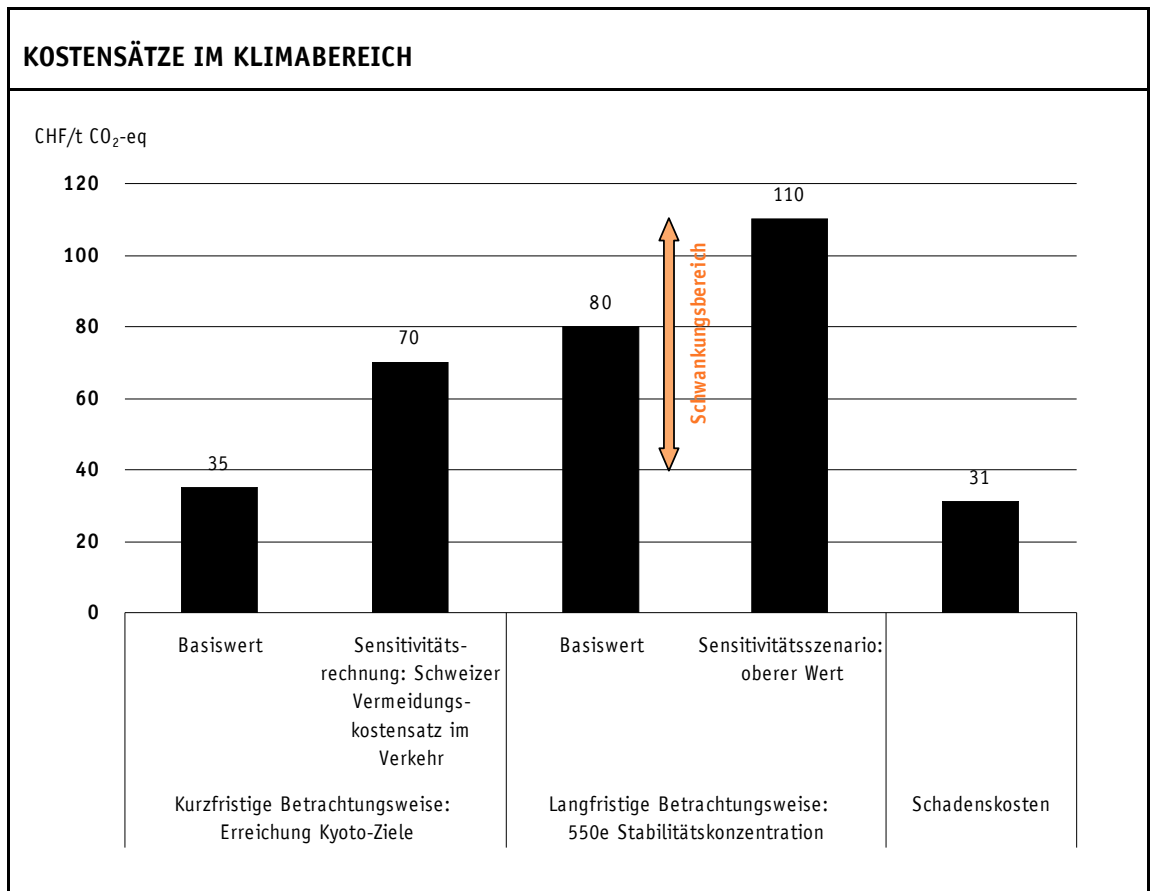
Wir leiten daraus die folgenden Kostensätze ab:

³⁰ Keine Berücksichtigung der Sekundärnutzen durch die im Inland vermiedenen Emissionen.

FÜR DIESE STUDIE VERWENDETE KOSTENSÄTZE	
Szenario	Kostensatz CHF (2000)
Vermeidungskostensätze	
Kurzfristige Betrachtungsweise (Basiswert): Erreichung Kyoto-Ziele: Vermeidungskostensatz basierend auf internationalem Emissionshandel sowie den flexiblen Kyoto-Mechanismen (diverse Literaturquellen und insbesondere aktuelle Entwicklung EUA Carbon Market Indicator): 22.5 €/t CO ₂ -Äquivalent.	35 CHF pro Tonne CO₂-eq
Langfristige Betrachtungsweise (Basiswert): Erreichung des S550e Stabilitätsszenarios Vermeidungskosten entsprechen Schattenpreisen, ausgedrückt als internationale Emissionsrechte: ca. 51€/t CO₂-Äquivalent (Preisbasis 2000) Quelle: den Elzen et al. 2004 Abdiskontierte Schattenpreise für CO ₂ -Emissionsrechte im Zeitraum 2000-2050 (Diskontrate 0%). Der Wert stellt einen Mittelwert verschiedener Klima- und Vermeidungskostenszenarien aus den Elzen et al. (2004) dar.	80 CHF pro Tonne CO₂-eq
Sensitivitätsrechnungen: Alternative Vermeidungskostensätze	
Kurzfristige Betrachtungsweise (Schweizer Wert): Erreichung Kyoto-Ziele durch Massnahmen im Verkehrsbereich in der Schweiz 70 CHF/t CO ₂ -Äquivalent: Kosten des Lenkungseffekts einer CO ₂ -Abgabe von 20 Rp./l (ohne Berücksichtigung des Tanktourismuseffekts), Details in INFRAS (2003).	70 CHF pro Tonne CO₂-eq
Langfristige Betrachtungsweise (oberer Wert): Erreichung des S550e Stabilitätsszenarios Vermeidungskosten entsprechen Schattenpreisen, ausgedrückt als internationale Emissionsrechte: 70€/t CO₂-Äquivalent (Preisbasis 2000) Quelle: den Elzen et al. 2004 (oberer Schwellenwert Basisrechnung) Abdiskontierte Schattenpreise für CO ₂ -Emissionsrechte im Zeitraum 2000-2050 (Diskontrate 0%).	110 CHF pro Tonne CO₂-eq
Ansatz für Kosten der verbleibenden Schäden bei der Umsetzung von Vermeidungsstrategien	
verbleibende Schadenskosten bei einer weltweiten Klimaerwärmung um max. 2°C: 20 €/t CO₂-Äquivalent Quelle: EC 2005a, basierend auf OECD 2004 Schadenskostensatz wird für alle Sensitivitäts-Szenarien konstant belassen.	31 CHF pro Tonne CO₂-eq

Tabelle 6

Die folgende Figur zeigt die relevanten Kostensätze im Überblick:



Figur 7 Bemerkungen: Der Schwankungsbereich beim Langfristszenario bezeichnet die Variabilität der Schattenpreise für eine Tonne CO₂-Äquivalent für unterschiedliche Klimaszenarien, Vermeidungsstrategien und Diskonraten. Bei den Schadenskosten handelt es sich um die Kosten der verbleibenden Schäden, wenn die Vermeidungsstrategien umgesetzt werden. Sie können – im Sinne einer Maximalbetrachtung – zu den Vermeidungskosten dazu gezählt werden.

Die Klimakosten werden auf Basis des differenzierten Mengengerüsts (siehe unten) und der verkehrsmittelspezifischen Treibhausgasemissionen berechnet. Die Gesamtkosten sind das Produkt der pro Jahr emittierten Treibhausgase und der verwendeten Kostensätze. Die Allokation der Gesamtkosten ergibt sich direkt aus dem Anteil des jeweiligen Verkehrsträgers und –mittels an den Gesamtemissionen.

2.2. DATENGERÜST

Im Unterschied zu den Kostensätzen weist das Datengerüst eine hohe Qualität auf:

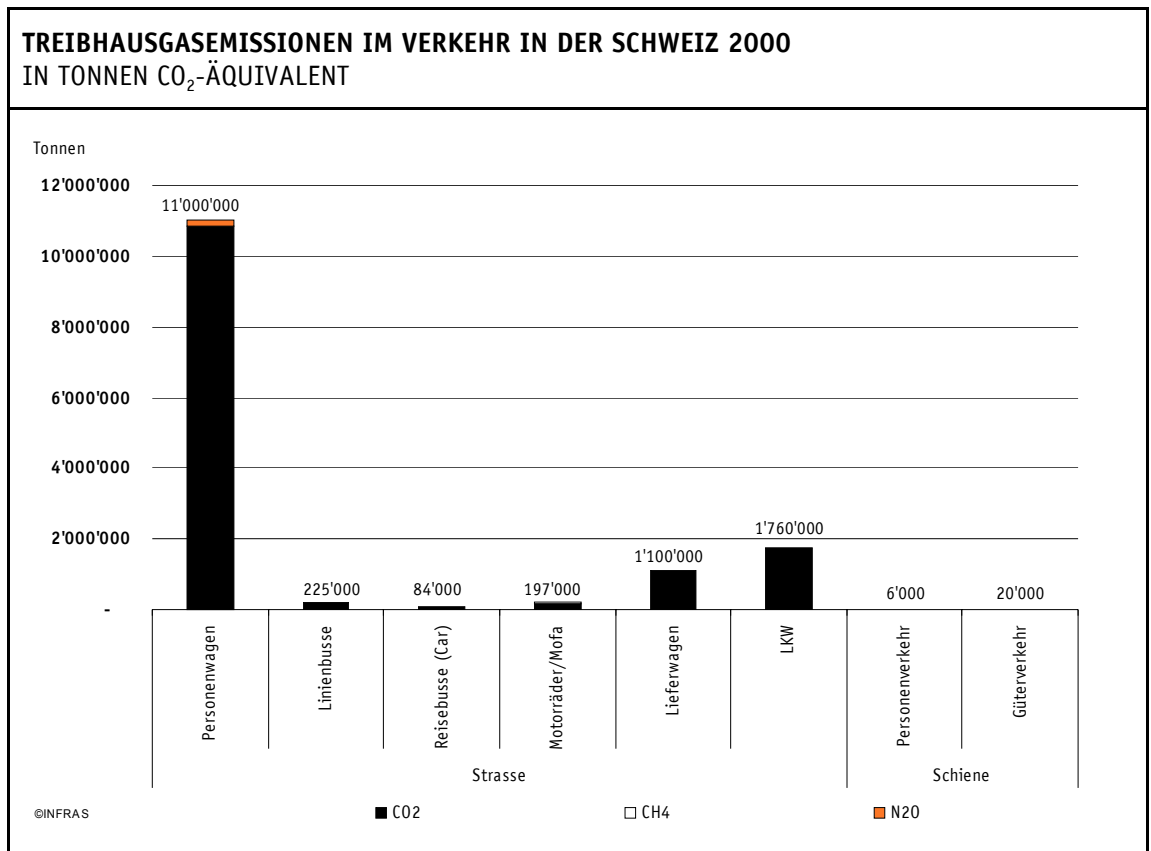
- › Folgende Quellen wurden für die Quantifizierung der Treibhausgas-Emissionen des Verkehrs verwendet:
 - › Strasse: Handbuch Emissionsfaktoren (INFRAS 2004a, BUWAL 2004c)
 - › Schiene: Treibhausgasinventar Schweiz (SAEFL 2004a+b)

- › Berücksichtigt werden alle 6 unter dem Kyoto-Protokoll zusammengefasste Treibhausgase: CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, HFC, PFC (soweit differenzierte Daten vorhanden). Die weiteren Treibhausgase werden mit Hilfe des Global Warming Potentials GWP (100 Jahre) zu CO₂-Äquivalenten aggregiert.
- › Die Allokation der Gesamtkosten erfolgt anhand der Emissionsanteile der verschiedenen Verkehrsträger.

2.3. BERECHNUNGEN UND RESULTATE

Gesamtemissionen

Die folgende Figur zeigt die Treibhausgas-Emissionen des Verkehrs in der Schweiz für das Jahr 2004. Sie fokussiert auf die Emissionen aus der Verbrennung von Treibstoffen und berücksichtigt daher für die Schiene im Güterverkehr lediglich die Emissionen der wenigen Diesel-Rangierlokomotiven und Rangiertraktoren der SBB. Emissionen der Treibstoffbereitstellung, der Infrastrukturerstellung bzw. der Fahrzeugherstellung werden im Kostenbereich 'Vor- und nachgelagerte Prozesse' quantifiziert und bewertet.



Figur 8 Quellen: Strasse: INFRAS 2004a, Schiene und Luftverkehr: SAEFL 2004, 2004a, 2004b. Bemerkung: Die Emissionen der weiteren Treibhausgase aus der Verbrennung wurden mit den Global Warming Potential (100 Jahre) gewichtet. Allokation der Schienenverkehrsemissionen (Diesellokomotiven) auf Personen- und Güterverkehr erfolgte auf Basis des Diesellokomotivenbestands der SBB im Jahr 2000 (Personen- und Güterverkehr).

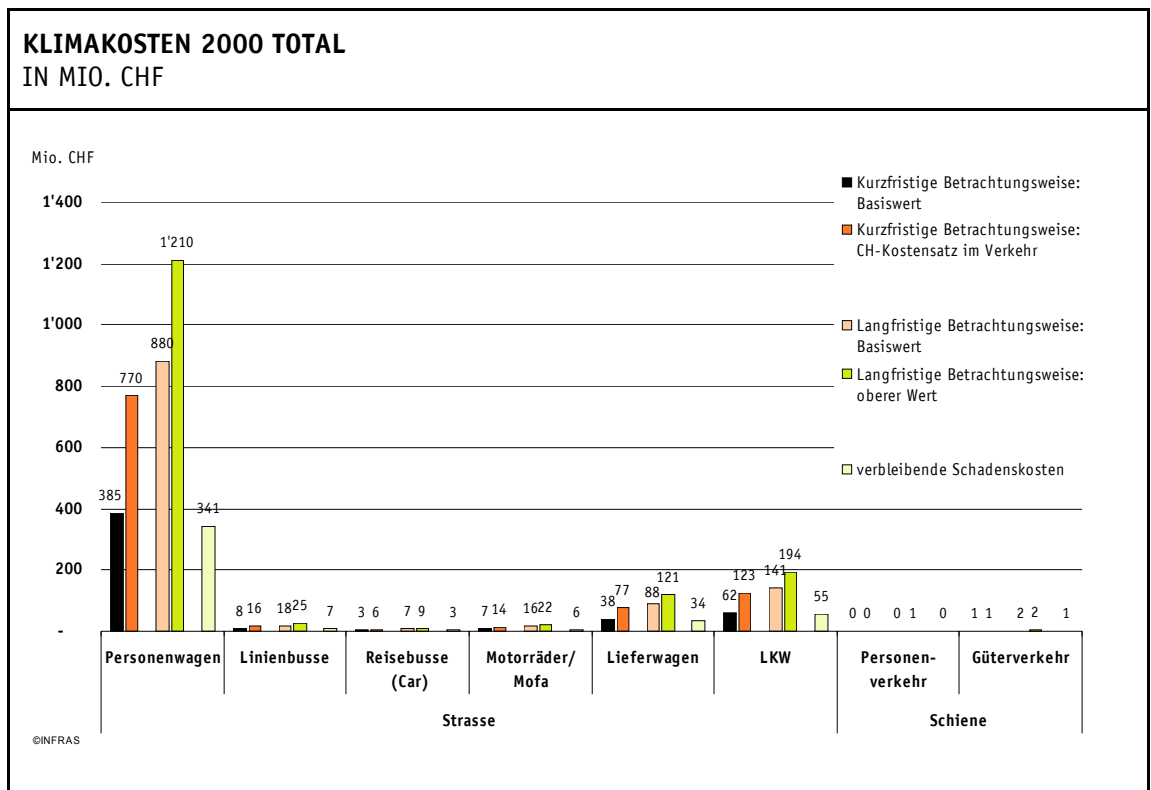
Obige Figur zeigt, dass fast ausschliesslich CO₂ als Treibhausgas im Verkehr relevant ist (im Betrieb). Personenwagen sind mit Abstand die wichtigsten Hauptemittenten.

Gesamtkosten

Die Kosten beziehen sich auf den Strassen- und den Schienenverkehr. Der Luftverkehr wird ausgeklammert, analog zu den bereits vorliegenden Studien des ARE. Basierend auf den oben diskutierten Vermeidungs- und Schadenskostensätzen ergeben sich folgende Kosten. Die Allokation auf die einzelnen Verkehrsträger und -mittel erfolgt anhand deren spezifischen Emissionen.

KLIMAKOSTEN DES VERKEHRS 2000 IN MIO. CHF			
Szenario	Total	Strasse	Schiene
Kurzfristige Betrachtungsweise			
Basiswert	504	503	0.9
Oberer Wert: CH-Kostensatz im Verkehr	1'008	1'006	1.8
Langfristige Betrachtungsweise			
Basiswert	1'151	1'149	2.1
Oberer Wert	1'583	1'580	2.9
Maximalbetrachtung			
Langfristiger oberer Wert plus Kosten der verbleibenden Schäden	2'030	2'026	3.8

Tabelle 7 Erläuterungen: Geringfügige Rundungsdifferenzen zwischen der Spalte 'Total' und der Summe der Spalten 'Strasse' und 'Schiene' möglich.



Figur 9

3. BISHER NICHT ERFASSTE UMWELTBEREICHE

3.1. ERNTEAUSFÄLLE AUFGRUND LUFTVERSCHMUTZUNG

3.1.1. QUANTIFIZIERUNGSMETHODIK

Luftschadstoffe aus dem Verkehr können unterschiedliche negative Wirkungen auf Nutzpflanzen haben. Besonders ausgeprägt und gut untersucht sind die Schädigungen, welche bodennahe Ozon (O_3) bei Nutzpflanzen hervorruft³¹. Die Schädigung von Ozon auf Pflanzen ist – im Unterschied zu den meisten anderen Luftschadstoffen – sehr direkt und überdies gut quantifizierbar. Ozon ist ein starkes Oxidationsmittel, das in den Pflanzen zu Membranschäden führen kann. Diese Membranschäden hemmen Photosynthese und Transpiration der Pflanze und führen zu einer Reihe von Folgeschäden (u.a. beschleunigte Blattalterung, erhöhte Krankheitsanfälligkeit, Vitalitätsverlust). Insgesamt führt dies bei vielen Pflanzenarten zu einem verminderten Wachstum. Ein detaillierter Überblick zu den Wirkungen von Luftschadstoffen (insbesondere Ozon) auf Nutzpflanzen ist im Annex A1 zu finden.

Die durch den Verkehr verursachten Kosten durch Ernteauffälle in der Landwirtschaft werden mit Hilfe von bestehenden Expositions-Wirkungsbeziehungen berechnet. Dazu wird auf Grundlage der Ozonbelastung (AOT40³² einer Vegetationsperiode) sowie aus wissenschaftlichen Studien bekannten Beziehungen zwischen Ozondosis und Ernteertrag der prozentuale Rückgang der Ernteerträge der verschiedenen Nutzpflanzenarten berechnet. Werden die aktuellen Ernteerträge der entsprechenden Kulturpflanzen mit berücksichtigt, können die mengenmässigen Ernteverluste berechnet werden, die durch das Ozon verursacht worden sind. Diese mengenmässigen Ernteverluste werden monetarisiert, indem die Mengen mit den Preisen (Produzenten- bzw. Faktorpreise) der entsprechenden Nutzpflanzen multipliziert werden³³. Um schliesslich den Verkehrsanteil dieser durch das Ozon verursachten Erntever-

31 Zur Bildung von bodennahe Ozon tragen unter anderem Emissionen von Stickoxiden (NO_x) und flüchtigen Kohlenwasserstoffen (VOC) bei. Der Verkehr trägt insbesondere einen grossen Anteil an den Stickoxidemissionen.

32 Der AOT40 ist ein Index, der die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen über 40 ppb während einer gewissen Periode darstellt. Berücksichtigt werden nur die Tagesstunden mit einer Strahlung von über 50 W/m^2 . Einheit: ppm*h oder ppb*h. (AOT: accumulated exposure over threshold)

33 Um den effektiven volkswirtschaftlichen Schaden (z.B. Rückgang des BIP) zu berechnen, müssen die Produktionspreise (Faktorpreise) für ein Produkt verwendet werden. Eigentlich müssten von diesen Produktionspreisen die Subventionen abgezogen werden. In der Schweiz zahlt jedoch der Staat auf die betroffenen, pflanzlichen Landwirtschaftsprodukte keine Subventionen mehr, sondern gilt die Landwirte für ihre gemeinwirtschaftlichen Leistungen mit Direktzahlungen ab. Weil diese Direktzahlungen an die Bauern nicht an die Produktion von bestimmten landwirtschaftlichen Gütern gebunden sind (sondern an Leistungen wie dezentrale Besiedelung und Ökologie, die unabhängig von der Güterproduktion ist), entsprechen die Produktionspreise den effektiven Faktorpreisen.

Mit einem alternativen Ansatz, einer Art Reparaturkostenansatz, könnten auch die Kosten für den Ersatz der Ernteauf-

luste zu bestimmen, muss entsprechend der Beitrag des Verkehrs zur Ozonbelastung bekannt sein. Für eine solche Abschätzung wird der Verkehrsanteil an den Emissionen der Ozon-Vorläufersubstanzen NO_x und VOC zu Hilfe genommen. Figur 10 zeigt das detaillierte Vorgehen bei der Berechnung der Kosten durch Ernteauffälle.

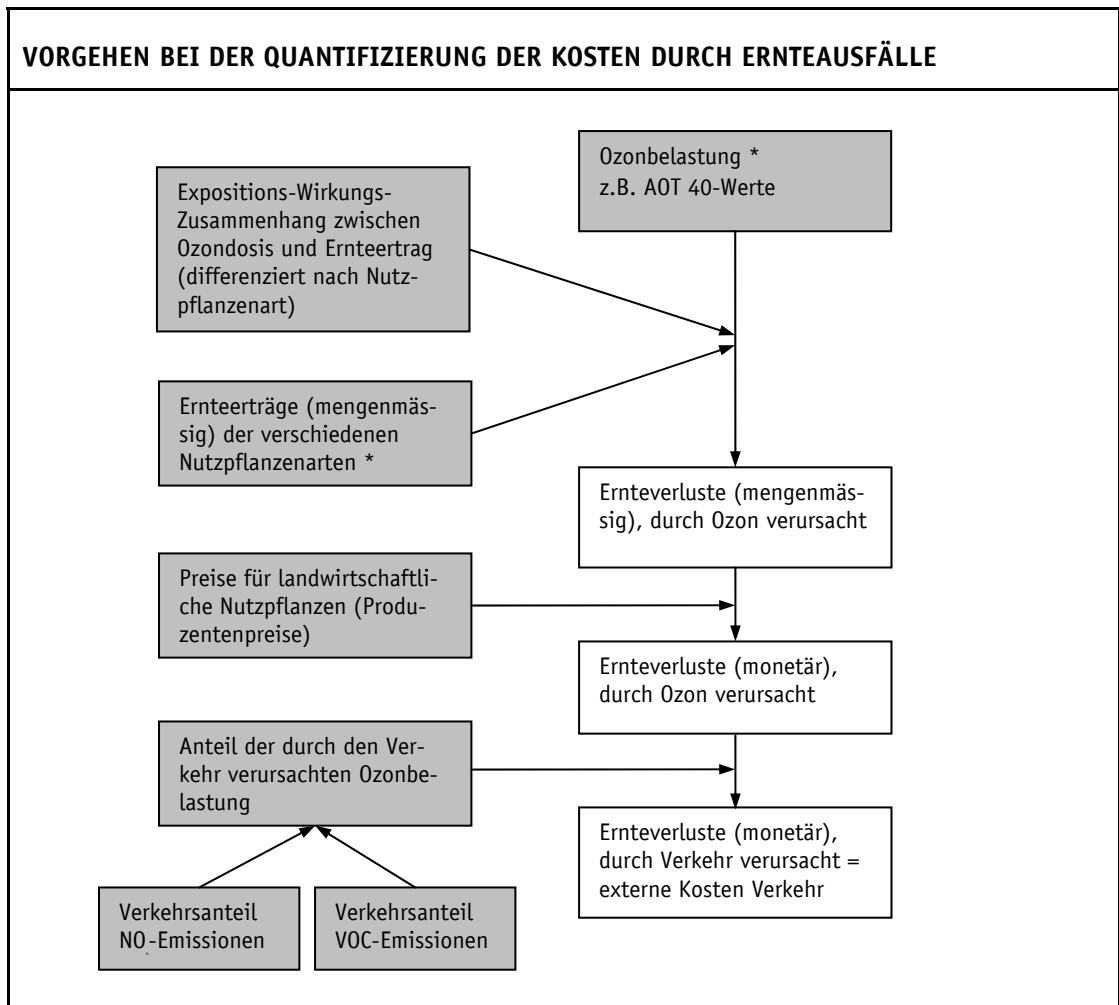
Regionale Differenzierung:

Um den unterschiedlichen Ozonbelastungen in den verschiedenen Regionen der Schweiz gerecht zu werden, muss die Berechnung regional differenziert vorgenommen werden. Im Extremfall könnte man die Berechnung mit Daten durchführen, die bis auf Gemeindeebene differenziert sind. Im Rahmen dieser Studie wäre aber ein solches Vorgehen zu aufwändig. Deshalb wird die Berechnung nur mit einer einfachen Differenzierung in zwei Regionen vorgenommen: die gesamte Alpennordseite (Mittelland, Jura, Nordalpen) sowie das Tessin. Durch die separate Behandlung des Tessins wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die Ozonimmissionen im Tessin deutlich höher liegen als im Rest der Schweiz. Eine zusätzliche, separate Kategorie „Alpen“ macht wenig Sinn, weil in diesem Gebiet nur in sehr geringem Masse Nutzpflanzen angebaut werden. Um diese regional differenzierte Berechnung vorzunehmen, müssen für diese zwei Regionen die durchschnittlichen Ozonbelastungen auf Landwirtschaftsflächen sowie die Ernteerträge der verschiedenen Nutzpflanzen bekannt sein.

Auswahl der Nutzpflanzen:

Für die Berechnung der Ernteauffälle werden folgende in der Schweiz mengenmässig relevanten landwirtschaftlichen Nutzpflanzen berücksichtigt: Weizen, Gerste, Hafer, Roggen, Körnermais, Zuckerrüben, Kartoffeln, Raps, Sonnenblumen, Trauben/Reben, Karotten, Tomaten, anderes Frischgemüse, Früchte.

fälle durch den Import von landwirtschaftlichen Produkten aus dem Ausland berechnet werden. Dazu müssten die ausländischen Marktpreise (EU-Markt- oder Weltmarktpreise) für ein landwirtschaftliches Produkt verwendet werden.



Figur 10 Die grauen Felder zeigen die nötigen Inputdaten, die weissen Felder repräsentieren Outputdaten. Die Berechnung geschieht differenziert nach zwei Regionen (Mittelland/Alpennordseite, Tessin). Die mit einem * gekennzeichneten Inputdaten werden regional differenziert.

Mit der oben beschriebenen Quantifizierungsmethodik wird nur der direkte Schaden für die Volkswirtschaft aufgrund verminderter Ernteerträge der Landwirtschaft berechnet. Zu diesem Wert kämen noch zusätzliche Kosten für die Konsumenten, da durch die geringere Menge an produzierten landwirtschaftlichen Gütern die Produktpreise höher liegen. Dies ist aber nur bei jenen Produkten der Fall, welche nicht einfach zu billigeren Preisen aus dem Ausland importiert werden können. Diese Kosten für Konsumenten wurden deshalb nicht berechnet.

Bisherige Quantifizierungen der Kosten

- › Fuhrer 2001 bzw. Näf 1991: Jährliche Ernteverluste durch das Ozon (nicht nur verkehrsbedingtes Ozon) in der Schweiz: ca. 210 Mio. CHF.
- › Holland 2002: Jährliche Schäden von Ozon (nicht nur verkehrsbedingtes Ozon) bei Ackerkulturen in der Schweiz: ca. 38 Mio. CHF (1990).
- › INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS 1996: Gesamte jährliche Kosten der ozonbedingten Ertragsausfälle in der Schweiz: 70-160 Mio. CHF, davon ca. 30-66 Mio. CHF durch den Verkehr verursacht.
- › PLANCO 1990: Jährliche Kosten durch Luftverschmutzungsschäden an Nutzpflanzen in Deutschland: ca. 1 Mia. DM, davon ca. 0.45 Mia. DM durch den Verkehr verursacht.

Weitere, nicht berücksichtigte Effekte des Verkehrs auf Nutzpflanzen

- › Einfluss des Ozons auf Weiden und Grassland: Mindererträge bei Weiden und Grassland können bei Tierhaltung einen Einfluss auf die Milch- und Fleischproduktion haben. Gemäss Fuhrer (2001) hat das Ozon jedoch keinen grossen Einfluss auf den mengenmässigen Ernteertrag von Kunstwiesen, der Einfluss auf die Artenzusammensetzung ist jedoch beträchtlich (z.B. mehr Gräser aber weniger Klee). Ein negativer Einfluss auf Produktionsmengen von Milch und Fleisch als Folge einer eventuell schlechteren Futterqualität ist denkbar.
- › Direkter Einfluss der Stickstoffemissionen auf die Nutzpflanzen (Stickoxide als Oxidantien wirken ähnlich wie Ozon) → Problem deutlich kleiner als bei Ozon. Überdies können Stickoxide in kleinen Mengen auch als Dünger wirken und damit gar einen leicht positiven Effekt haben.
- › Einfluss der Bodenversauerung (infolge Stickoxid- und Schwefeldioxidemissionen) auf die Nutzpflanzen → Problem in der Schweiz unbedeutend.

3.1.2. DATENGERÜST

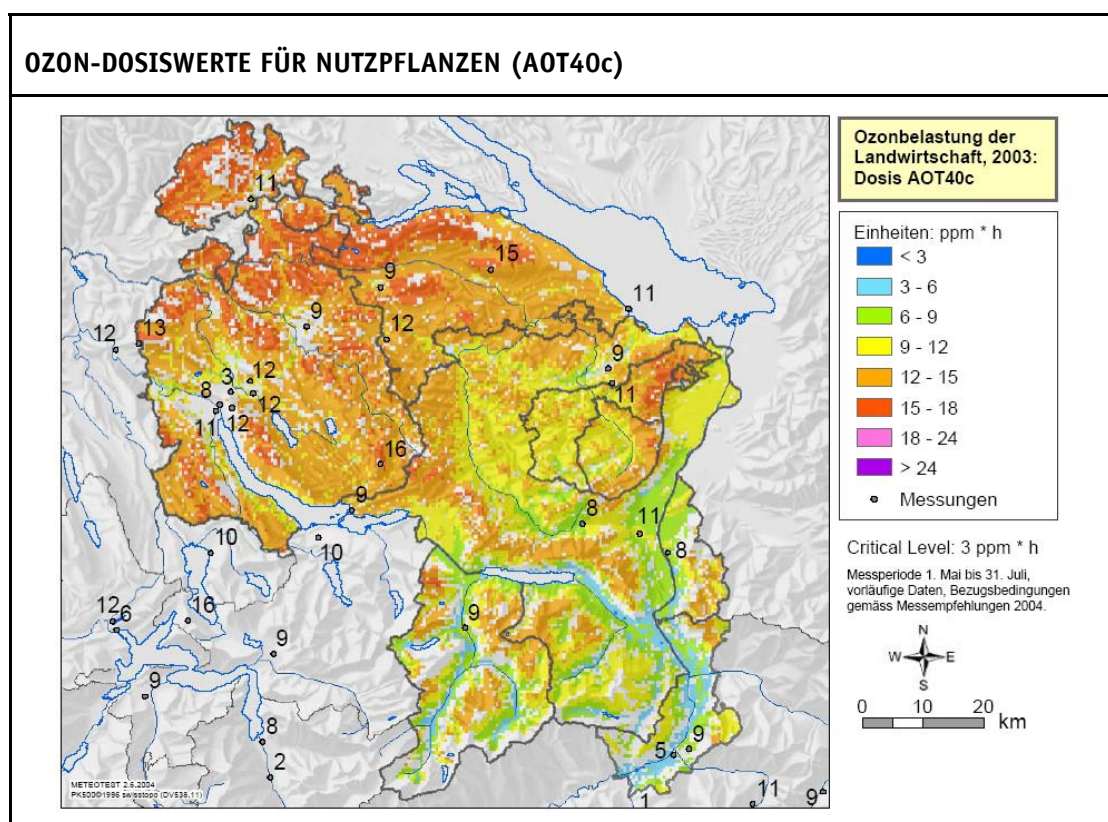
Für die Berechnungen werden die folgenden Daten benötigt:

- › Ozonbelastung (Ozonimmissionen) im Jahr 2000 an ausgewählten Standorten in den zwei Regionen als Durchschnittswert für Landwirtschaftsland.
- › Expositions-Wirkungszusammenhänge zwischen Ozondosis und Ernteerträge für verschiedene Nutzpflanzen.
- › Ernteerträge bzw. Anbaudaten von landwirtschaftlichen Nutzpflanzen in den zwei Regionen im Jahr 2000.

- › Produktionspreise (Faktorpreise) der landwirtschaftlichen Produkte im Jahr 2000.
- › Anteil des Verkehrs an der Ozonbelastung im Jahr 2000: Berechnung über den Verkehrsanteil an den gesamten NO_x - bzw. VOC-Emissionen.

a. Ozonbelastung

Als Grundlage für die Ozonbelastung werden Ozonimmissionsmesswerte aus dem nationalen Messprogramm NABEL (Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe) verwendet. Entscheidend ist dabei der so genannte AOT40c-Wert, das heisst der AOT-Wert für landwirtschaftliche Nutzpflanzen (crop). Figur 11 zeigt beispielhaft die durchschnittlichen AOT40c-Werte im Jahr 2003 in der Ostschweiz.



Figur 11 AOT40-Werte für landwirtschaftliche Nutzpflanzen (AOT40c) im Jahr 2003. Dieser Wert zeigt die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen über 40 ppb, welche zwischen 1. Mai und 31. Juli, also der Wachstumsperiode der Pflanzen, gemessen werden. Der kritische AOT40-Wert (critical level) für Nutzpflanzen beträgt 3 ppm*h, jener für den Wald 5 ppm*h (Quelle: Ostluft, www.ostluft.ch).

Da die Ozonimmissionen der einzelnen Jahre zum Teil stark variieren, wird ein Durchschnittswert der Jahre 1999 bis 2004 verwendet (wobei das Jahr 2000 in etwa durchschnittliche Immissionswerte aufwies). Entscheidend sind die Immissionen in ländlichen, verkehrs-

fernen Gebieten in tieferen Höhenlagen (d.h. dort wo Landwirtschaft betrieben wird). Von den 14 NABEL-Messstationen der Alpennordseite erfüllen Tänikon (TG) und Payerne (VD) diese Vorgaben für Landwirtschaftsland am besten. Deshalb wird der Mittelwert dieser beiden Messstationen für die Berechnung verwendet. Für die Alpensüdseite (Tessin) werden die Messwerte der beiden Stationen Magadino und Lugano verwendet. Tabelle 8 zeigt die entsprechenden durchschnittlichen Ozonbelastungen (AOT40c) an den genannten Messstationen.

OZONIMMISSIONEN (AOT40C) AN AUSGEWÄHLTEN NABEL-MESSSTATIONEN: DURCHSCHNITTWERTE DER JAHRE 1999-2004	
	Ozonimmissionen: AOT40c (in ppm*h)
Alpennordseite	
Messstation Tänikon	12.16
Messstation Payerne	11.76
Durchschnitt Alpennordseite	11.96
Tessin	
Messstation Magadino	17.48
Messstation Lugano	20.63
Durchschnitt Tessin	19.06

Tabelle 8 Quelle: NABEL-Messwerte. Spezifische Datenbereitstellung durch das BAFU (Juni 2005). Die Daten beziehen sich auf eine Messhöhe von 4m über Boden. Für die Berechnung der Schadenswirkung auf Nutzpflanzen müssen die Werte noch auf die Pflanzenhöhe (in der Regel 0-1m) korrigiert werden, weil die Ozonimmissionen auf Pflanzenhöhe etwas tiefer sind. Für die Korrektur der Werte wird gemäss den Angaben im europäischen Mapping Manual vorgegangen (UNECE 2004b, S. III-23). Der Korrekturwert von 4m auf 1m Höhe beträgt 0.92.

Die NABEL-Daten für die Alpennordseite stimmen sehr gut mit anderen Vergleichsdaten überein (z.B. Daten aus den Programmen OSTLUFT und in-Luft) und können daher als repräsentativ bezeichnet werden.

Wichtig ist der Hinweis, dass die Ozonimmissionen nicht nur durch inländische Schadstoffemissionen verursacht werden, sondern in grenznahen Gebieten zum Teil auch „importiert“ werden. Gleichzeitig tragen auch in der Schweiz emittierte Schadstoffe, die ins nahe Ausland verfrachtet werden, dort zur Ozonbildung bei. Weil der Anteil der „importierten“ bzw. „exportierten“ Ozonimmissionen äusserst schwierig zu quantifizieren ist, wird in dieser Studie der Einfachheit halber von einem ausgeglichen „Ozon-Saldo“ zwischen der Schweiz und dem angrenzenden Ausland ausgegangen. Vor allem im Tessin ist diese Annahme aber nicht ganz korrekt, da ein beträchtlicher Teil der Ozonbildung auf die importierten Schadstoffe (v.a. Stickoxide, aber auch VOC) aus Norditalien zurückzuführen ist. Dennoch wird auch hier vereinfachend von einem „Nullsaldo“ ausgegangen. Weil der Anteil des Tessins an

den landwirtschaftlichen Erzeugnissen der Schweiz aber nur gering ist, fällt diese Vereinfachung praktisch nicht ins Gewicht.

b. Expositions-Wirkungsbeziehungen

› Beispiel einer Expositions-Wirkungsbeziehung: Zusammenhang zwischen dem Ernteertrag von Weizen und der Ozonkonzentration (in AOT40 ³⁴):

Relativer Ernteertrag (in %) = $99.5 - 1.7 \cdot \text{AOT40}$ (Fuhrer 1997)

Critical Level für Ozon in der Landwirtschaft (AOT40c): $3 \text{ ppm} \cdot \text{h} = 3000 \text{ ppb} \cdot \text{h}$ ³⁵

Rechnungsbeispiel: Bei einem AOT40 von $15 \text{ ppm} \cdot \text{h}$ beträgt der Ernteertrag von Weizen nur noch 74% verglichen mit einem gänzlich unbeeinflussten Standort bzw. 78% verglichen mit einem Standort mit der Belastung des kritischen Levels ($3 \text{ ppm} \cdot \text{h}$).

Analoge Dosis-Wirkungsbeziehungen existieren auch für andere Pflanzen (Fuhrer 1989, Fuhrer 2001, Holland 2002). In der vorliegenden Studie werden die anerkannten Dosis-Wirkungsbeziehungen aus der Studie der UNECE (Holland 2002) verwendet (siehe Tabelle 9). Diese Zahlen unterscheiden sich zwar etwas von den Werten, die in der EU-Studie Externe verwendet wurden (Friedrich, Bickel 2001, S. 298). Die Werte der UNECE-Studie (Holland 2002) sind aber deutlich stärker differenziert und stimmen überdies relativ gut mit Angaben von Fuhrer (2001) überein.

Wichtig ist jedoch der Hinweis, dass alle diese erwähnten Expositions-Wirkungsbeziehungen aus speziellen Versuchen mit Begasungsanlagen gewonnen wurden. Die effektiven Beziehungen in der freien Natur können daher auch von diesen Werten abweichen. Beispielsweise spielen in der Natur auch noch andere Faktoren (wie z.B. Wasserlimitierung, etc.) eine wichtige Rolle. Im Weiteren ist zu beachten, dass es zum Teil bedeutende Unterschiede in der Ozonanfälligkeit von einzelnen Sorten einer Pflanzenart gibt. Damit gibt es bei den einzelnen Expositions-Wirkungsbeziehungen zum Teil Schwankungsbreiten.

Die Grundformel für den Zusammenhang zwischen dem Ernteertrag von Nutzpflanzen und der Ozonkonzentration lautet der Einfachheit halber für alle Pflanzen gleich. Die einzelnen Pflanzen unterscheiden sich einzig im Wert der Steigung (m):

³⁴ Der AOT40 ist ein Index, der die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen über 40 ppb während einer gewissen Periode darstellt. Berücksichtigt werden nur die Tagesstunden mit einer Strahlung von über 50 W/m^2 . Einheit: $\text{ppm} \cdot \text{h}$ oder $\text{ppb} \cdot \text{h}$. (AOT: accumulated exposure over threshold)

³⁵ Die sog. "Critical Levels" für Ozon wurden von der UNECE 1996 festgelegt. Sie beziehen sich bei landwirtschaftlichen Kulturpflanzen auf den AOT40 von drei Monaten der Wachstumsperiode von Pflanzen (in der Regel von Mai bis Juli).

$$\text{Relativer Ernteertrag (in \%)} = 100 + m * \text{AOT40c (in ppm*h)}$$

Der Ernterückgang bei einer bestimmten Ozonbelastung (AOT40c) wird in dieser Studie relativ zum Ernteertrag einer Pflanze an einem unbelasteten Standort berechnet. Ein unbelasteter Standort mit einer natürlichen Hintergrundbelastung an Ozon weist einen AOT40c-Wert von 0 ppm*h auf. Ein unbelasteter Standort, an dem das Wachstum einer Nutzpflanze nicht durch Ozon beeinflusst wird, bildet also den Referenzwert. Die folgende Tabelle zeigt die Expositions-Wirkungsbeziehungen verschiedener Nutzpflanzen.

DATEN ZUR EXPOSITIONS-WIRKUNGSBEZIEHUNG ZWISCHEN OZONBELASTUNG UND ERNTE-ERTRAG BEI VERSCHIEDENEN NUTZPFLANZEN	
Nutzpflanzenart	Prozentuale Reduktion des Ernteertrags pro zusätzlicher ppm*h Ozonbelastung (Steigung m)
Weizen	-1.1
Gerste	0.0, d.h. keine negative Beeinflussung des Wachstums durch Ozon
Hafer	0.0, d.h. keine negative Beeinflussung des Wachstums durch Ozon
Roggen	0.0, d.h. keine negative Beeinflussung des Wachstums durch Ozon
Körnermais	-0.36
Zuckerrüben	-0.58
Kartoffeln	-0.56
Raps	-0.55
Sonnenblumen	-1.2
Trauben	-0.30
Karotten	-0.92
Tomaten	-1.4
Frischgemüse allgemein	-0.95
Früchte	0.0, d.h. keine negative Beeinflussung des Wachstums durch Ozon
Werte aus ExterneE (Friedrich, Bickel 2001)	
Sehr sensitive Pflanzen (Tabak)	-3.4
Sensitive Pflanzen (Weizen, Kartoffeln, Sonnenblumen)	-1.7
Schwach sensitive Pflazen (Reis, Roggen, Gerste)	-0.85

Tabelle 9 Die Werte m beziehen sich auf die Dosis-Wirkungsbeziehung: Relativer Ernteertrag (in %) = 100 – m*AOT40c (in ppm*h). Quelle für diese Werte: Holland 2002.

c. Ernteerträge von Nutzpflanzen in der Schweiz

Für die Berechnung werden die Ernteerträge der entsprechenden Nutzpflanzen im Jahr 2000 verwendet (differenziert nach den beiden Regionen Alpennordseite und Tessin). In Tabelle 10 sind diese Schweizer Gesamterträge des Jahres 2000 nach Pflanzenart aufgeführt (nicht

differenziert nach Region; Quelle: Schweizerischer Bauernverband SBV 2004 und Bundesamt für Landwirtschaft BLW 2001).

Für die Regionalisierung der Daten konnte auf Kantonsdaten des BFS (BLW) über die Nutzflächen zurückgegriffen werden, welche für das Jahr 2000 ebenfalls nach Pflanzenart unterteilt vorhanden sind (Quelle: BFS 2004a, Ergebnisse Branchenkonti des Primärsektors 1997-2003).

d. Produzentenpreise von Nutzpflanzen in der Schweiz

Die für die Berechnung verwendeten Produzentenpreise der einzelnen Pflanzenarten im Jahr 2000 in der Schweiz sind in der Tabelle 10 aufgeführt. Datenquellen:

- › Schweizerischer Bauernverband: Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung, 2003 (SBV 2004)
- › Bundesamt für Landwirtschaft: Agrarbericht 2001 (BLW 2001).

ERNTETERTRÄGE UND PRODUZENTENPREISE FÜR VERSCHIEDENE NUTZPFLANZEN 2000		
Nutzpflanzenart	Ernteterträge 2000 (in Tonnen)	Produzentenpreise (in CHF/100kg)
Weizen (Weichweizen)	561'164	66.35
Körnermais	212'391	47.65
Zuckerrüben	1'408'448	11.58
Kartoffeln	600'600	36.12
Raps	39'060	68.92
Sonnenblumen	11'666	62.98
Trauben	166'825	250.0
Karotten	51'389	115.0
Tomaten	30'932	215.0
Restliches Frischgemüse (ohne Karotten und Tomaten)	69'619	200.0 (Bereich: 150-300)

Tabelle 10 Quellen: Schweizerischer Bauernverband: Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung 2003 (SBV 2004), Bundesamt für Landwirtschaft: Agrarbericht 2001 (BLW 2001). Alle Daten für das Jahr 2000.

e. Verkehrsanteil an der Ozonbelastung bzw. an NO_x- und VOC-Emissionen

Daten zum Verkehrsanteil an den Emissionen der Ozonvorläufersubstanzen NO_x sowie VOC sind vorhanden (SAEFL 2005a, BUWAL 2004c, BUWAL 2005b, BUWAL 2003c). Der Anteil des Strassen- und Schienenverkehrs an den gesamten, anthropogenen NO_x-Emissionen beträgt 55%³⁶, der Verkehrsanteil an den VOC-Emissionen 18%.

³⁶ Zur Herleitung dieses Werts: Im Jahr 2000 betrugen die NO_x-Emissionen des Strassenverkehrs in der Schweiz 55'198 t (Quelle: BUWAL 2004c), jene des Schienenverkehrs 410 t (Quelle: SAEFL 2005a). Die gesamten anthropogenen NO_x-

Die Problematik bei der Festlegung des Verkehrsanteils liegt jedoch an folgender Stelle: Die Bestimmung des Anteils bzw. der „Verantwortlichkeit“ von VOC- bzw. NO_x -Emissionen an der Ozonbildung ist sehr schwierig. Grundsätzlich müssen für die Bildung von grösseren Mengen Ozon beide Stoffe vorhanden sein. Je nach Region und Entstehungspfad des Ozons können aber das VOC oder das NO_x der limitierende Faktor und damit die Hauptursache für die Ozonbildung sein. Der Verkehrsanteil an der Ozonbelastung kann theoretisch also zwischen dem Verkehrsanteil an den VOC-Emissionen (18%) und dem Anteil an den NO_x -Emissionen (55%) variieren.

Entscheidend für die Frage nach dem limitierenden Faktor ist das Konzentrationsverhältnis dieser beiden Ozonvorläufersubstanzen VOC und NO_x in der Luft (BUWAL 1996b). Liegt das VOC/ NO_x -Verhältnis über 15, so ist die Luftmasse in einem NO_x -limitierten Zustand. Die Ozonproduktion ist dann direkt proportional zur Stickoxidkonzentration und nur leicht von den VOC abhängig. In diesem Fall sind die NO_x -Emissionen hauptverantwortlich für die Ozonbildung. Liegt das VOC/ NO_x -Verhältnis unter 5, so ist die Luftmasse in einem VOC-limitierten Zustand. Die Ozonproduktion ist dann direkt proportional zur VOC-Konzentration und nur leicht von den Stickoxiden abhängig. In diesem Fall sind die VOC-Emissionen die hauptverantwortlich für die Ozonbildung. Liegt das VOC/ NO_x -Verhältnis zwischen 5 und 15, ist die Frage der Limitierung nicht eindeutig zu beantworten. (Angaben aus BUWAL 1996b, zu ähnlichen Ergebnissen gelangten auch Spirig et al. 2002.

Messungen in der Schweiz haben ergeben, dass in ländlichen Gebieten der Alpennord- und -südschweiz die Ozonbildung NO_x -limitiert ist, während in grösseren Städten eine VOC-Limitierung herrscht (BUWAL 1996b). Diese Analysen konnten auch mit Modellrechnungen bestätigt werden. Deshalb nimmt man heute an, dass die Luftmassen über weiten Teilen der ländlichen Schweiz während Sommersmoglagen NO_x -limitiert sind.

Da für die Ernteverluste durch Ozon die Ozonbelastung in ländlichen Gebieten interessiert, wird in der vorliegenden Studie **das Stickoxid (NO_x) als hauptverantwortliche Substanz** für die Ozonbildung betrachtet und als **Leitschadstoff für die Allokation des Verkehrsanteils an den Ernteaussfällen** verwendet. Der Anteil des Strassen- und Schienenverkehrs an der Ozonbelastung beträgt demnach 55% (= Verkehrsanteil der NO_x -Emissionen).

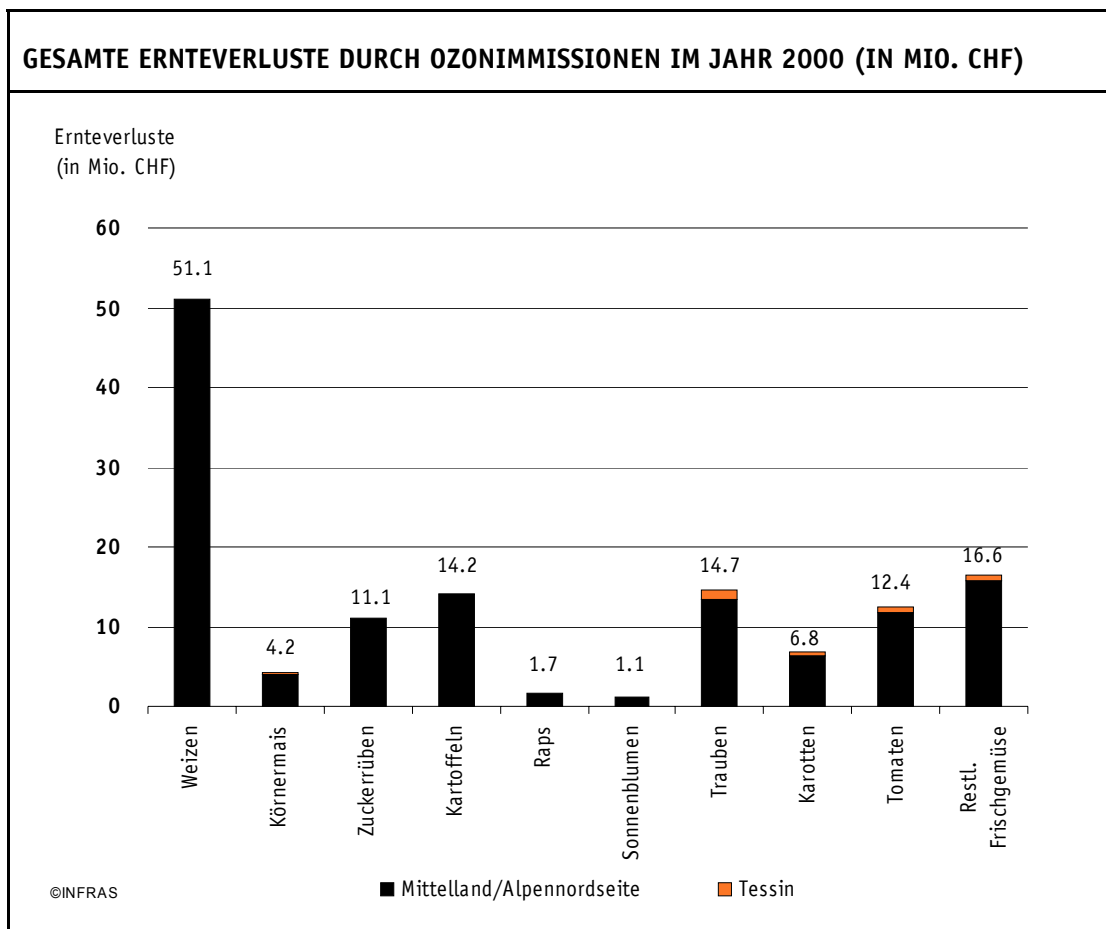
Emissionen in der Schweiz betrugen im Jahr 2000 100'308 t. Damit beträgt der relative Anteil des Strassen- und Schienenverkehrs in der Summe 55.4%.

Weitere Emittenten von NO_x sind nebst dem Verkehr vor allem die privaten Haushalte (Heizungen) und die Industrie (Verbrennungsprozesse und Heizungen) sowie die Landwirtschaft und die Abfallverbrennung.

3.1.3. BERECHNUNGEN UND RESULTATE

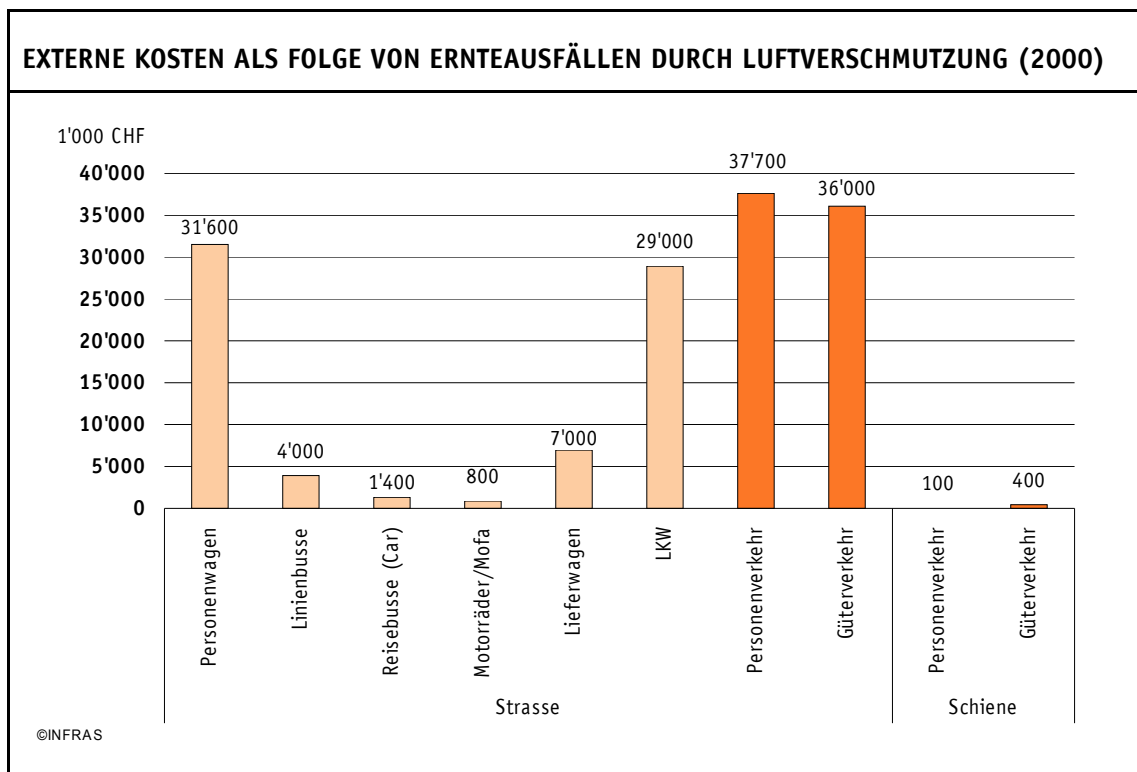
Wie in Figur 10 erläutert, können die durch Ozonimmissionen verursachten monetären Ernteverluste der verschiedenen Nutzpflanzenarten aus der Ozonbelastung (Ozonimmissionen), den Expositions-Wirkungsbeziehungen zwischen Ozonimmissionen und Ernteertrag, den jährlichen, mengenmässigen Ernteerträgen sowie den Produzentenpreisen berechnet werden. Figur 12 zeigt die gesamten, durch das Ozon verursachten monetären Ernteverluste der einzelnen Nutzpflanzenarten. Nur ein Teil dieser Verluste ist jedoch auf die Emissionen des Verkehrs zurückzuführen.

Figur 12 zeigt deutlich, dass die Ernteverluste von Weizen die grösste Bedeutung haben. Sie sind für fast 40% der monetären Ernteverluste verantwortlich. Zu erheblichen Verlusten führen auch die Ernteauffälle bei den Zuckerrüben, Kartoffeln, sowie bei Trauben und Gemüse. Auch wenn die Ozonimmissionen im Tessin deutlich höher liegen als im Rest der Schweiz, machen die Ernteverluste im Tessin weniger als 3% der gesamtschweizerischen Ernteverluste aus. Dies liegt daran, dass z.B. nur knapp ein Promille des Schweizer Weizens aus dem Tessin stammt und auch von anderen Nutzpflanzenarten nur ein kleiner Anteil im Tessin produziert wird. Einzig beim Gemüse sowie den Trauben fällt ein nennenswerter Anteil der Verluste (zwischen 5 und 10%) im Tessin an.



Figur 12 Es ist zu beachten, dass die gesamten, durch Ozonimmissionen verursachten Ernteverluste angegeben sind. Nur ein Teil davon ist jedoch auf die Emissionen des Verkehrs zurückzuführen. Daten für das Jahr 2000.

Insgesamt gab es im Jahr 2000 Ernteverluste durch Ozon von knapp 134 Mio. CHF. Von diesen Verlusten wurden **74 Mio. CHF oder gut 55% vom Verkehr verursacht**. Da in ländlichen Gebieten das Stickoxid die limitierende und damit hauptverantwortliche Substanz für die Ozonbildung ist, werden die durch den Verkehr verursachten Ernteverluste gemäss den Stickoxid-Emissionen auf die einzelnen Verkehrsträger aufgeteilt. Figur 13 zeigt diese durch Ernteverluste bedingten externen Kosten der einzelnen Verkehrsträger.



Figur 13

Der überwiegende Teil der externen Kosten (mehr als 99%) fällt im Strassenverkehr an. Dabei machen der Personen- und der Güterverkehr ungefähr je die Hälfte der Kosten des Strassenverkehrs aus. Die Hauptverursacher der Schäden und damit externen Kosten sind die Personenwagen und die LKW. Der Schienenverkehr trägt nur marginal zu den externen Kosten durch Ernteaussfälle bei.

3.2. SCHÄDEN DER LUFTVERSCHMUTZUNG IN DER BIOSPHÄRE (WALDSCHÄDEN)

3.2.1. QUANTIFIZIERUNGSMETHODIK

Anthropogen verursachte Luftschadstoffemissionen können in der Biosphäre zu unterschiedlichen Schäden führen. Im vorliegenden Kapitel stehen die durch Luftverschmutzung verursachten Waldschäden im Zentrum. Luftschadstoffe aus dem Verkehr können den Wald auf verschiedene Arten schädigen. Negative Effekte auf den Wald können beispielsweise übermässiger Stickstoffeintrag, Bodenversauerung sowie Ozonbelastung haben. Die Folgen für den Wald sind divers. Unter anderem können die erwähnten Effekte zu einem veränderten Wachstum von Stamm, Trieben oder Wurzeln sowie zu einem gestörten Nährstoffhaushalt führen. Insgesamt sind die Luftschadstoffe für den Wald ein zusätzlicher Stressfaktor. Sekundäre Folgen der anthropogenen Luftschadstoffe sind beispielsweise verminderte Standfestigkeit der Bäume (kann zu erhöhtem Windwurfrisiko führen), Kronenverlichtungen, vermindertes Stammwachstum sowie erhöhte Anfälligkeit auf Schädlinge. Detaillierte, quantifizierbare Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkungen sind heute aber erst teilweise bekannt. Eine Schwierigkeit liegt darin, dass das hoch komplexe Ökosystem Wald nebst menschlichen Einflüssen auch von einer Vielzahl anderer äusserer Faktoren (z.B. Klima, natürliche Bodenbeschaffenheit, etc.) beeinflusst wird. Eine detaillierte Zusammenstellung über die Umweltwirkungen von Luftschadstoffen auf den Wald ist im Anhang A1 dargestellt.

Über die ökonomische Bewertung von Waldschäden infolge Luftverschmutzung wurden in den achtziger Jahren diverse Studien erstellt. Diese beruhen jedoch auf Schadensszenarien, welche sich rückblickend als deutlich zu pessimistisch erwiesen haben (EBP 1986, Altwegg 1988, Altwegg 1989, Pfister 1987, Ewers 1986).

In jüngster Zeit wurden für die Schweiz keine vergleichbaren Studien erstellt. Nur für besondere Schadensereignisse wie den Sturm ‚Lothar‘ wurden noch ökonomische Folgekosten berechnet (BUWAL 2003d). Für Grossbritannien wurden 1996 in einer wissenschaftlichen Studie die Waldschäden infolge der Emission von Säure bildenden Substanzen ermittelt und monetarisiert (Gregory et al. 1996). Dabei lag jedoch der Fokus auf den Emissionen aus Kohlekraftwerken.

Die Grössenordnungen der bisherigen Quantifizierungen lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

- › EBP 1986: Durchschnittliche jährliche Schadenskosten durch das Waldsterben in den nächsten 20-40 Jahren in der Schweiz: 1.2 – 1.8 Mia. CHF.
- › Ewers 1986: Durchschnittliche jährliche Schadenskosten durch das Waldsterben in den nächsten 70-80 Jahren in Deutschland (inkl. Schädigung der Erholungs- und Freizeitfunktion sowie der Wasserwirtschaft): 11.5 – 18.3 Mia. DM (ohne Diskontierung).
- › Altwegg 1989: Durchschnittliche jährliche Schadenskosten (infolge Lawinen) durch das Waldsterben in den nächsten 30 Jahren in der Schweiz: 1.0 – 1.9 Mia. CHF (ohne Diskontierung). Jährliche Ersatzkosten für Lawinenschutzwälder und -verbauungen: 0.7 – 2.2 Mia. CHF (ohne Diskontierung).
- › PLANCO 1990: Jährliche Waldschäden in Deutschland (auf Grundlage von Ewers (1986) berechnet): ca. 9 Mia. DM, davon ca. 4.1 Mia. DM (=46%) durch den Verkehr verursacht.
- › INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS 1996: Gesamte jährliche Kosten der immissionsbedingten Waldschäden in der Schweiz: 1.2 – 3.3 Mia. CHF (wovon 65% der Landwirtschaft zugerechnet wird), davon ca. 330-860 Mio. CHF durch den Verkehr verursacht.

Alle diese bisherigen Quantifizierungen beruhten auf Waldsterbensszenarien bzw. der Befürchtung, dass die Funktion der Wälder zu einem grossen Teil ausfallen könnte. Diese Befürchtungen haben sich glücklicherweise bis heute nicht bestätigt, nicht zuletzt auch deshalb, weil als Folge der Debatte um das Waldsterben sowohl auf nationaler wie internationaler Ebene effektive Massnahmen zur Reduktion der Luftverschmutzung eingeführt wurden. Nach aktuellem Kenntnisstand ist ein solches Waldsterbeszenario nicht mehr zu befürchten.

Weil heute – auch als Folge der ergriffenen Massnahmen – deshalb nicht mehr von einem generellen 'Sterben' des Waldes ausgegangen wird, sondern höchstens von mehrheitlich reparablen Schäden, dürfte heutzutage eine Bewertung der aktuellen Waldschäden deutlich moderater ausfallen als in den achtziger Jahren: „Die Bewertung der Waldschäden kann eine planvoll nachhaltig betriebene Forstwirtschaft voraussetzen, in der alle stark beschädigten Wälder rechtzeitig neu begründet (angepflanzt) werden. Da sie in der Praxis auch überall neu begründet werden können (die Bodenversauerung verhindert dies nicht), droht nirgends eine dauerhafte Waldflächen-Vernichtung sondern allenfalls ein Waldbau ohne alte Bäume. (...) Auch diese Auswirkung ist ein vorzeitiges Waldsterben, allerdings ganz anderer Art und Dynamik als bisher unterstellt wurde.“ (Wentzel 2001)

Kostenaspekte

In früheren Studien (EBP 1986, INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS 1996) wurden folgende Aspekte von Waldschadenskosten berücksichtigt:

- › Ertragsausfälle in der Forstwirtschaft, infolge geringeren Holzertrags bzw. Zusatzaufwand für Waldpflege und Wiederaufforstung
- › Kosten zusätzlicher Naturgefahren (v.a. im Gebirge): Schadenskosten oder Vermeidungskosten für zusätzliche Schutzmassnahmen
- › Einnahmeausfälle im Tourismus (durch Verarmung der Landschaft bzw. Störung durch Pflege- und Schutzmassnahmen)
- › Einnahmeausfälle in der Berglandwirtschaft
- › Beeinträchtigung des Erholungs- und Existenznutzens agglomerationsnaher Wälder infolge der Waldschäden

Diese Schadensaspekte stammen jedoch noch aus Szenarien eines flächendeckenden Waldsterbens. Gemäss heutigem Wissen und aktueller Einschätzung der Waldschäden bzw. des Einflusses der Luftverschmutzung fallen die meisten dieser Kostenaspekte weg. Vor allem die Beeinträchtigung des Erholungs- und Existenznutzens der Wälder sowie Einnahmeausfälle im Tourismus sind heute kein Thema mehr. Ähnliches gilt für die Einnahmeausfälle in der Berglandwirtschaft.

Bei den Kosten zusätzlicher Naturgefahren (Lawinen, Murgänge/Erosion) spricht ebenfalls einiges dafür, dass diese Kosten deutlich niedriger sind. Bis heute konnten keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen Schädigungen des Waldes und der Zunahme von Naturgefahren nachgewiesen werden. Zwar können die negativen menschlichen Einflüsse durch die Luftverschmutzung bei Wäldern das Windwurfisiko erhöhen, doch konnte in der Schweiz gerade nach den Stürmen Vivian und Lothar gezeigt werden, dass selbst bei flächigen Sturmschäden das Lawinenrisiko nicht höher wurde, sofern das Totholz liegen gelassen wurde (WSL 2003, Baur 2004)³⁷. Vom Wind geworfene Waldflächen können also ihre Schutzwirkung (gegen Lawinen und Erosionen) immer noch erbringen, selbst wenn diese durch Borkenkäferbefall abgestorben sind (Baur 2004). Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass an solchen Stellen zu einem späteren Zeitpunkt zusätzliche Schutzmassnahmen nötig sein werden.

³⁷ Allerdings kann das liegen gelassene Totholz wiederum andere Gefahren nach sich ziehen (z.B. Schwemmholtzbildung bei starken Niederschlägen), weshalb es zumindest aus Gerinneabhängigkeiten von Gewässern entfernt werden muss.

Gemäss diesen Überlegungen können die direkten Schadenskosten durch zusätzliche Naturgefahren praktisch vernachlässigt werden. Dagegen bleiben aber als negative Folgen die Kosten, die unter anderem durch zusätzlichen Pflegeaufwand in der Forstwirtschaft entstehen. Zudem sind durch den Borkenkäferbefall auf ungeräumten Windwurfflächen ebenfalls gewisse Zusatzkosten für die Forstwirtschaft zu erwarten.

Insgesamt bleiben damit einzig die Schadenskosten für die Forstwirtschaft. Diese forstwirtschaftlichen Schäden umfassen drei Teilaspekte:

- a. Aufgrund von reduziertem Holzwachstum (infolge der Ozonbelastung sowie der Bodenversauerung) sinkt der Holzertrag. Dies kann in der Forstwirtschaft zu Ertragsausfällen führen. Das Ausmass dieser Kosten hängt jedoch sehr stark vom Holzpreis ab.
- b. Aufgrund des erhöhten Windwurfrisikos und den damit verbundenen häufigeren Sturmschäden fallen für die Forstwirtschaft Zusatzkosten für die Räumung und Wiederaufforstung sowie Mindererträge bei der Holzverwertung an. Die infolge Luftverunreinigungen gesunkene Stabilität unserer Wälder führt nicht nur zu einem Zusatzaufwand infolge zunehmender Sturmschäden sondern erhöht ganz allgemein den Aufwand für Forstschutz-, Verjüngungs- und Waldpflegemassnahmen.
- c. Ein weiterer Kostenaspekt ist überdies der erhöhte Pflegeaufwand der Forstwirtschaft zur Prävention von Naturgefahren bzw. zur Wiederaufforstung als Folge der erhöhten Anzahl an geschädigten Bäumen (Bäume auf versauerten Böden, mit geringerem Feinwurzelwachstum, mit verstärktem Parasiten- bzw. Krankheitsbefall, etc.). Diese möglicherweise ziemlich bedeutenden Kosten lassen sich jedoch zum heutigen Zeitpunkt nicht quantifizieren, weil gemäss heutigem Wissensstand nicht gesagt werden kann, welcher Anteil der geschädigten Bäume durch negative, menschliche Einflüsse zurückzuführen ist. Es verbleiben somit die beiden oben beschriebenen Teilaspekte a und b.

Vorgehen bei der Quantifizierung

Grundsätzlich muss festgehalten werden, dass die zurzeit bekannten Zusammenhänge zwischen menschlichen Einflüssen (v.a. über die Luftverschmutzung) und den Waldschäden zuwenig robust erforscht sind, um eine solide Quantifizierung der Waldschadenskosten vornehmen zu können. Einige Zusammenhänge sind zwar zumindest qualitativ bekannt, doch

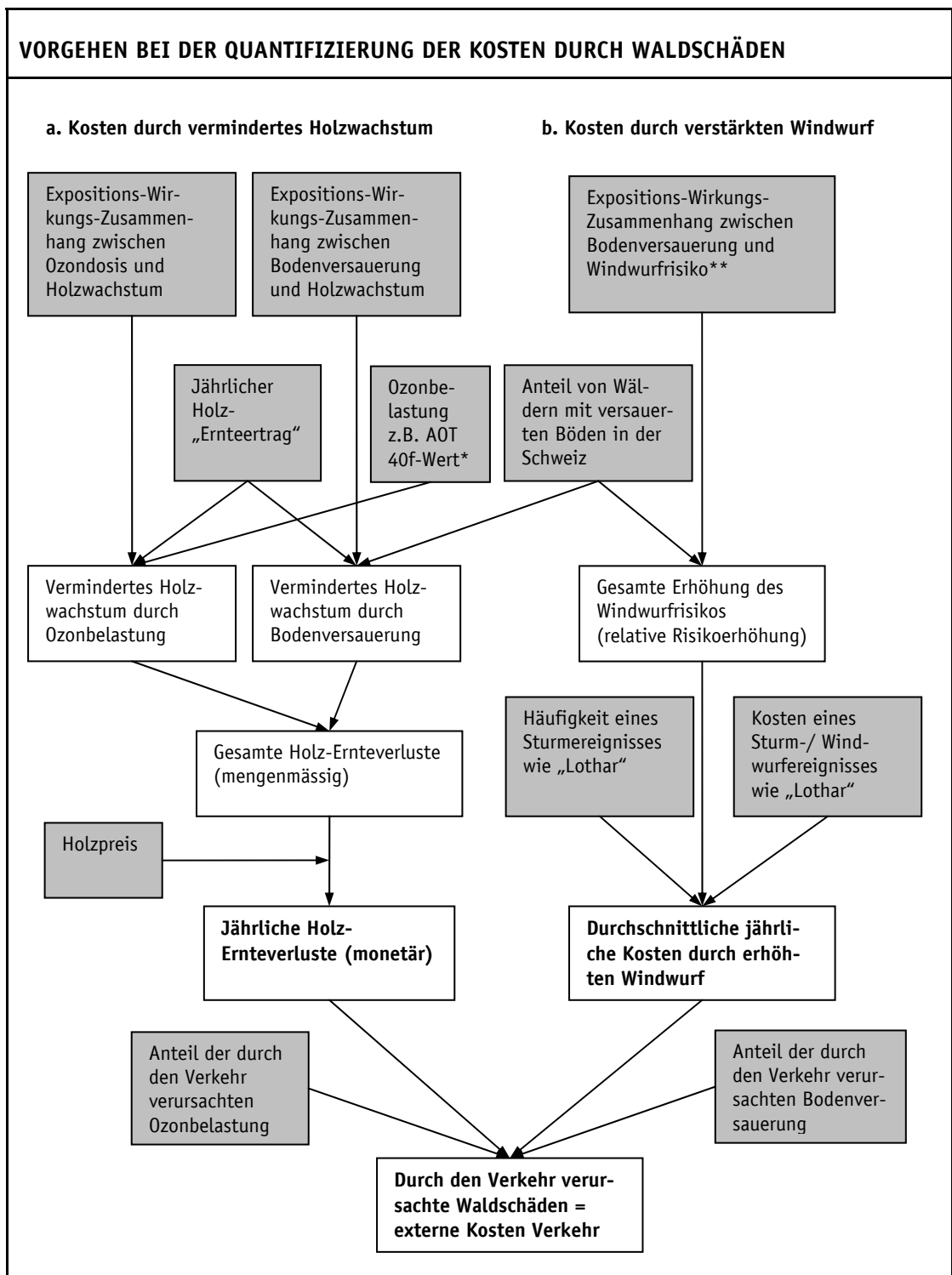
gibt es bis jetzt nur sehr wenige verlässliche, quantitative Expositions-Wirkungsbeziehungen³⁸.

Ein weiterer kritischer Punkt bezüglich Quantifizierung der Schäden liegt bei der Bewertung des Holzpreises. Dieser hat einen entscheidenden Einfluss auf die Schadenskosten für die Forstwirtschaft. In einer Studie des BAFU in Zusammenarbeit mit der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) über die ökonomischen Auswirkungen des Sturmes „Lothar“ wird festgehalten, dass sowohl die Einkommens- als auch die Vermögensverluste der Schweizer Forstwirtschaft bei sehr konservativen Annahmen möglicherweise null oder zumindest nahe null sein könnten (BUWAL 2003d). Falls angenommen wird, dass die Holzproduktion heute nicht wirtschaftlich betrieben werden kann, wären die Ertragsverluste für die Forstwirtschaft durch erhöhten Windwurf oder verminderten Holzzuwachs gar null³⁹. Allerdings blieben auch in diesem Fall die Zusatzkosten durch erhöhte Pflegemassnahmen (Teilaspekt c, siehe oben), sodass die Gesamtkosten selbst in dieser absoluten Minimalschätzung nicht null wären. Die vorliegende Studie geht allerdings von der Annahme aus, dass die reine Holzwirtschaft (ohne Pflegemassnahmen) in der Schweiz nach wie vor rentabel betrieben werden kann und deshalb der Holzpreis nicht null ist, sondern durch den Marktpreis adäquat widerspiegelt wird.

Verschiedene Experten sind überzeugt, dass eine fundierte Berechnung der Waldschäden zum heutigen Zeitpunkt nicht möglich ist. Dennoch wird in dieser Studie versucht, eine grobe Schätzung eines zweiten, höheren Wertes vorzunehmen und damit eine Bandbreite der möglichen Waldschadenskosten zu erhalten. Für diese Schätzung wird versucht, die Kosten mit Hilfe der vorhandenen, jedoch noch auf dünner Datenlage basierenden und z.T. nicht definitiv erhärteten, Dosis-Wirkungsbeziehungen zu berechnen. Dabei werden die oben erwähnten zwei Schadensaspekte (a. vermindertes Holzwachstum, b. erhöhtes Windwurfisiko) berücksichtigt. Die Zusatzkosten durch den erhöhten Pflegeaufwand hingegen werden infolge fehlender Grundlagen nicht quantifiziert. Das Vorgehen bei der Quantifizierung ist in Figur 14 dargestellt.

38 Dieser Umstand ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Waldschadensforschung nach dem Abflachen der Waldsterbedebatte umfangmässig klar reduziert wurde. Zum anderen sind fehlende quantitative Zusammenhänge vor allem ein Zeichen für die grosse Komplexität des Ökosystems Wald, das sich praktisch nicht mit einfachen Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen erklären lässt.

39 Allerdings muss angefügt werden, dass die Forstwirtschaft heute vor allem wegen des hohen und teuren Pflegeaufwands nicht wirtschaftlich betrieben werden kann. Die reine Holzernte dagegen ist in der Regel wirtschaftlich.



Figur 14 Die grauen Felder zeigen die nötigen Inputdaten, die weissen Felder repräsentieren Outputdaten. Die Berechnung geschieht differenziert nach drei Regionen (Mittelland/Jura, Alpen/Voralpen, Tessin). Die mit einem * gekennzeichneten Inputdaten werden regional differenziert.

** : Nebst der Versauerung hat auch der übermässige Stickstoffeintrag (Bodeneutrophierung) einen negativen Einfluss auf das Windwurfisiko (siehe Figur 54 im Annex A1). Dieser Effekt lässt sich aber nicht quantifizieren.

Wichtig ist die Anmerkung, dass die auf diese Weise berechneten Kosten durch vermindertes Holzwachstum zum heutigen Zeitpunkt einen etwas theoretischeren Wert darstellen, da ein vermindertes Holzwachstum nicht unbedingt zu Holz-Ernteverlusten führt, weil in der Schweiz der gesamte Wald- und Holzbestand jährlich zunimmt. Allerdings käme dafür noch ein weiterer Zusatzaspekt des reduzierten Holzwachstums ins Spiel: Wenn das verminderte Holzwachstum nicht zu einer Reduktion der Holzernte führt, weil es sowieso nicht gefällt würde, dann hätte dies eine geringere Zunahme der Senkenfunktion des Schweizer Waldes zur Folge, was via Kyoto-Mechanismen ebenfalls wieder zu Kosten führte. Dieser Aspekt wird in den folgenden Berechnungen aber nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass sich das reduzierte Holzwachstum zumindest im Umfang der jährlichen Holzproduktionsmenge direkt auf einen Rückgang im Holzertrag auswirkt.

3.2.2. DATENGERÜST

Für die Berechnungen werden die folgenden Daten benötigt:

a. Kosten durch vermindertes Holzwachstum

› Durchschnittliche Ozonbelastung im Jahr 2000 in Wäldern:

Als Grundlage für die Ozonbelastung werden Ozonimmissionsmesswerte aus dem nationalen Messprogramm NABEL (Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe) verwendet. Entscheidend ist dabei der so genannte AOT40f-Wert, das heisst der AOT-Wert für Wälder (forests)⁴⁰.

Da die Ozonimmissionen der einzelnen Jahre zum Teil stark variieren, wird ein Durchschnittswert der Jahre 1999 bis 2004 verwendet (wobei das Jahr 2000 in etwa durchschnittliche Immissionswerte aufwies). Entscheidend sind die Immissionen in ländlichen, verkehrsfernen Gebieten in allen Höhenlagen. Weil Holzwirtschaft auch in den Bergregionen betrieben wird und dort die Ozonimmissionen teilweise sehr unterschiedlich sind, geschieht die Berechnung differenziert nach den drei Regionen Mittelland/Jura, Alpen/Voralpen sowie Tessin (Alpensüdseite). Wiederum werden die Messwerte derjenigen NABEL-Stationen als Grundlage genommen, welche die Vorgaben (ländliche Gebiete, verkehrsfern) am besten erfüllen. Für die Region Mittelland/Jura wird der Mittelwert der vier Stationen Tänikon (TG), Payerne (VD), Lägeren (ZH) und Chaumont (NE) verwendet, für die Region Alpen/Voralpen der Mittelwert der Stationen Rigi (SZ) und Davos (GR) und für

⁴⁰ Der AOT40-Wert für den Wald (AOT40f) zeigt die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen über 40 ppb, welche zwischen 1. April und 30. September gemessen werden.

die Alpensüdseite (Tessin) wiederum die Messwerte der beiden Stationen Magadino und Lugano. Tabelle 11 zeigt die entsprechenden durchschnittlichen Ozonbelastungen (AOT 40f) an den genannten Messstationen.

OZONIMMISSIONEN (AOT40F) AN AUSGEWÄHLTEN NABEL-MESSSTATIONEN: DURCHSCHNITTSWERTE DER JAHRE 1999-2004	
	Ozonimmissionen: AOT40f (in ppm*h)
Mittelland/Jura	
Messstation Tänikon	17.17
Messstation Payerne	17.65
Messstation Lägeren	16.62
Messstation Chaumont	22.22
Durchschnitt Mittelland/Jura	18.78
Voralpen/Alpen	
Messstation Rigi	24.49
Messstation Davos	19.54
Durchschnitt Voralpen/Alpen	22.02
Alpensüdseite/Tessin	
Messstation Magadino	24.96
Messstation Lugano	27.81
Durchschnitt Tessin	26.39

Tabelle 11 Quelle: NABEL-Messwerte. Die Daten beziehen sich auf eine Messhöhe von 4m über Boden. Für die Berechnung der Schadenswirkung auf Wälder müssen die Werte noch auf die mittlere Baumhöhe (ca. 20 m) korrigiert werden, weil die Ozonimmissionen auf Baumhöhe etwas höher sind. Für die Korrektur der Werte wird gemäss den Angaben im europäischen Mapping Manual vorgegangen (UNECE 2004b, S. III-23). Der Korrekturwert von 4m auf 20m Höhe beträgt 1.04.

Die NABEL-Daten für die Region Mittelland/Jura stimmen sehr gut mit anderen Vergleichsdaten überein (z.B. Daten aus den Programmen OSTLUFT und in-Luft) und können daher als repräsentativ bezeichnet werden. Ein Blick auf Figur 55 im Anhang zeigt ebenfalls, dass die AOT40f-Werte des Jahres 2000 im Mittelland grösstenteils im Bereich von 15-20 ppm*h, in den Voralpen/Alpen bei rund 20-25 ppm*h und im Tessin bei rund 20-30 ppm*h lagen. Wie bereits im Kapitel „Ernteaufälle“ durch Ozon erwähnt, können Ozonimmissionen auch „importiert“ oder „exportiert“ werden. Bei den vorliegenden Berechnungen wird jedoch der Einfachheit halber von einem ausgeglichen „Ozon-Saldo“ zwischen der Schweiz und dem angrenzenden Ausland ausgegangen.

› **Expositions-Wirkungszusammenhänge zwischen Ozondosis und Holzwachstum:**

Wie bei den Ernteaufällen durch Ozon in der Landwirtschaft werden auch beim Holzwachstum analoge Expositions-Wirkungsbeziehungen verwendet. Die Formel für den Zusammenhang zwischen dem Stammvolumen (und damit dem Holzertrag) und der Ozonkon-

zentration lautet folgendermassen:

$$\text{Relatives Stammvolumen (in \%)} = 100 + m * \text{AOT40f (in ppm*h)}$$

Der Rückgang des Stammvolumens bei einer bestimmten Ozonbelastung (AOT40f) wird in dieser Studie relativ zum Ernteertrag eines Baumes an einem unbelasteten Standort berechnet. Ein unbelasteter Standort mit einer natürlichen Hintergrundbelastung an Ozon weist einen AOT40f-Wert von 0 ppm*h auf. Ein unbelasteter Standort, an dem das Wachstum eines Baumes nicht durch Ozon beeinflusst wird, bildet also den Referenzwert. Die folgende Tabelle zeigt die Expositions-Wirkungsbeziehungen verschiedener Baumarten.

DATEN ZUR EXPOSITIONS-WIRKUNGSBEZIEHUNG ZWISCHEN OZONBELASTUNG UND STAMMVOLUMEN (=ERNTETERTRAG) BEI VERSCHIEDENEN BAUMARTEN	
Baumart	Prozentuale Reduktion des Stammvolumens pro zusätzlicher ppm*h Ozonbelastung (Steigung m)
Buche (<i>Fagus silvatica</i>)	-3.51%
Eiche (<i>Quercus petraea</i>)	-0.38%
Birke (<i>Betula pendula</i>)	-0.49%
Fichte (<i>Picea abies</i>)	-0.26%
Föhre (<i>Pinus silvestris</i>)	-0.48%

Tabelle 12 Die Werte m beziehen sich auf die Dosis-Wirkungsbeziehung: Relatives Stammvolumen (in %) = 100 – m*AOT40f (in ppm*h). Quelle für diese Werte: Braun et al. 1999 (Buche) sowie Karlsson et al. 2005 (restl. Baumarten). * Die Durchschnittswerte für Laub- bzw. Nadelbäume wurden gewichtet nach der Häufigkeit.

Die Berechnung der Holzverluste wird nach Laubbäumen und Nadelbäumen differenziert durchgeführt. Deshalb werden aus den vorhandenen Daten für einzelne Baumarten (siehe obige Tabelle) gewichtete Mittelwerte (gemäss dem relativen Anteil der Bäume in den Schweizer Wäldern) für alle Laub- bzw. Nadelbäume gebildet.

› **Expositions-Wirkungszusammenhang zwischen Bodenversauerung und Holzwachstum:**

Die Basis für den quantitativen Zusammenhang zwischen Bodenversauerung und Holzwachstum bildet die Figur 52 (siehe Anhang) mit den Erkenntnissen von Ouimet et al. 2001. Aufgrund dieser Daten ist die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von Holz (Volumenzunahme in m³/(ha*a)) auf versauerten Böden um 33% (Laubbäume) bzw. 49% (Nadelbäume) reduziert.

› **Anteil von Wäldern mit versauerten Böden in der Schweiz:**

13% der Schweizer Waldflächen weisen eine Basensättigung von ≤15% auf, weitere 20% der Flächen zeigen eine Basensättigung von zwischen 15 und 40%. Insgesamt liegen die

Basensättigung also in 33% aller Flächen unter 40% (Quelle: IAP 2004). Der Anteil der Böden mit einem pH-Wert von ≤ 4 liegt in der gleichen Grössenordnung, nämlich bei 32% aller Flächen. In dieser Studie wird mit einem Anteil an versauerten Waldböden von 33% gerechnet.

› **Jährlicher Holzernteertrag:**

Die Holznutzung in der Schweiz lag in den Jahren 1995 bis 1999 zwischen 4.0 und 4.8 Mio. m³ Rundholzäquivalenten (der Durchschnitt dieser Jahre lag bei 4.5 Mio. m³). Im Jahr 2000 war die Holznutzung infolge des Sturmes „Lothar“ von Ende 1999 massiv höher: Es wurden in der Schweiz 9.2 Mio. m³ Holz genutzt. Um keine durch dieses einmalige Ereignis verzerrten Werte zu erhalten, werden für diese Studie Durchschnittswerte der fünf Jahre vor Lothar (also 1995-1999) verwendet. Es werden für die Berechnung differenzierte Holznutzungsdaten verwendet: Einerseits wird unterschieden zwischen Laub- und Nadelhölzern, andererseits zwischen der Verwendung des Holzes (Stamm-/Rundholz, Industrieholz, Energieholz). Überdies werden wie bei den landwirtschaftlichen Ernteaussfällen regionalisierte Daten für die drei Kategorien Mittelland/Jura, Alpen/Voralpen und Tessin verwendet. Die verwendeten Daten sind in Tabelle 13 dargestellt.

› **Holzpreise:**

Wie bei den Ernteaussfällen in der Landwirtschaft werden ebenfalls die Produzentenpreise verwendet. Dabei werden nach Holzart differenzierte Daten angewandt: Es wird unterschieden zwischen Stamm-/Rundholz, Industrieholz sowie Energieholz (siehe Tabelle 13). Weil das Jahr 2000 sowie die folgenden Jahre wegen der grossen Holzerntemengen als Folge des Sturms Lothar und des damit verbundenen Preiszerfalls nicht repräsentativ sind, werden bei den Holzpreisen wie bei den Ertragsmengen die Durchschnittswerte der fünf Jahre vor Lothar (1995-1999) verwendet.

JÄHRLICHE ERNTEERTRÄGE UND PRODUZENTENPREISE FÜR VERSCHIEDENE HOLZARTEN		
	Jährliche Holznutzung (Ernte- erträge) (in 1'000 m)	Produzentenpreise Holz (in CHF/m)
Stamm-/Rundholz		
Nadelholz	2'656	108.6
Laubholz	472	167.8
Total	3'127	-
Industrieholz		
Nadelholz	301	58.0
Laubholz	178	55.2
Total	479	-
Energie-/Brennholz		
Nadelholz	304	70.5
Laubholz	618	85.4
Total	921	-
Gesamttotal	4'528	-

Tabelle 13 Sowohl bei den Ernteerträgen (jährl. Holznutzung) als auch bei den Produzentenpreisen handelt es sich um Durchschnittswerte der Jahre 1995-1999. Die Werte beziehen sich jeweils auf Rohholz, d.h. die Produzentenpreise für Industrie- und Energieholz wurden jeweils auf einen m³ Rohholz umgerechnet. Quellen: BFS 2004b und BFS 2005b (Erträge und Preise) sowie BFE 2004 (für Umrechnung).

› Anteil des Verkehrs an der Ozonbelastung im Jahr 2000:

Datengrundlage und Vorgehen analog wie in Kapitel 3.1 (Ernteauffälle in der Landwirtschaft). Der Anteil des Strassen- und Schienenverkehrs an der Ozonbelastung beträgt demnach 55% (= Verkehrsanteil der NO_x-Emissionen).

b. Kosten durch verstärkten Windwurf

› Expositions-Wirkungszusammenhänge zwischen Bodenversauerung und Windwurfri- siko:

Für den Sturm Lothar konnten grobe Dosis-Wirkungszusammenhänge zwischen Bodenversauerung und Windwurfisiko aufgezeigt werden (Braun et al. 2002, Mayer et al. 2005, IAP 2004). Demnach ist das Windwurfisiko beim Sturm „Lothar“ auf versauerten Böden (Basis-sättigung ≤40%) bei Fichten 3.6 Mal und bei Buchen 4.8 Mal höher als auf unversauerten Böden. In dieser Studie wird deshalb für Nadelbäume der Wert von 3.6 und für Laubbäume der Wert von 4.8 verwendet. Geht man von einem Anteil an versauerten Waldböden von 33% aus und berücksichtigt man den Umstand, dass beim Sturm Lothar 77% der betroffenen Bäume Nadelhölzer waren und 23% Laubhölzer (Quelle: BUWAL 2003d), dann ergibt sich eine durch die Versauerung bedingte Risikoerhöhung von 95% (d.h. das Risiko steigt von 1.00 auf 1.95).

› **Häufigkeit eines Sturmereignisses wie „Lothar“:**

Mit Methoden der Extremstatistik lässt sich der Wiederkehrwert (d.h. die Häufigkeit) eines Sturms wie Lothar ermitteln. Demnach gibt es einen Sturm wie Lothar im Durchschnitt ungefähr alle 15 Jahre (Quelle: BUWAL 2005a, WSL/BUWAL 2001). Die Wahrscheinlichkeit eines Sturms wie Lothar beträgt also 0.067 pro Jahr.

› **Kosten eines Sturmereignisses wie „Lothar“:**

Gemäss der Studie zu den ökonomischen Folgen von „Lothar“ (BUWAL 2003d) betrug der durch Lothar verursachte Einkommensverlust der öffentlichen Waldeigentümer rund 284 Mio. CHF. Hochgerechnet auf alle Waldeigentümer (73% des Waldes ist in öffentlichem, 27% in privatem Besitz, BUWAL 2002c) ergibt dies Einkommensverluste als Folge des Sturmes Lothar von 389 Mio. CHF. Ein bedeutender Teil dieser Einkommensverluste ist auf den Holzpreiszerfall zurückzuführen. Diese durch Einkommensverluste der Forstbetriebe verursachten Kosten sind übrigens deutlich tiefer als in ersten Abschätzungen nach dem Sturm Lothar angenommen wurde (WSL/BUWAL 2001). Zusätzlich zu den Einkommensverlusten führte der Sturm Lothar bei den Schweizer Waldeigentümern (öffentliche und private) zu einem Vermögensverlust von etwa 225 Mio. CHF. Dieser Wert darf jedoch aus methodischen Gründen nicht zu den Einkommensverlusten addiert werden.

Zu berücksichtigen sind jedoch zusätzlich zu den Einkommensverlusten der Waldeigentümer auch die Ausgaben der öffentlichen Hand für Pflege- und Aufrüstmassnahmen, Folgeschäden von Lothar (z.B. Borkenkäferschäden), etc. Gemäss dem ‚Lothar-Rechenschaftsbericht‘ (BUWAL 2004f) betrugen die Ausgaben des Bundes zwischen 2000 und 2003 für die Lotharfolgen 393 Mio. CHF.

Zusammen mit den Einkommensverlusten ergeben sich damit Gesamtkosten des Lothar-Sturmes von 782 Mio. CHF.

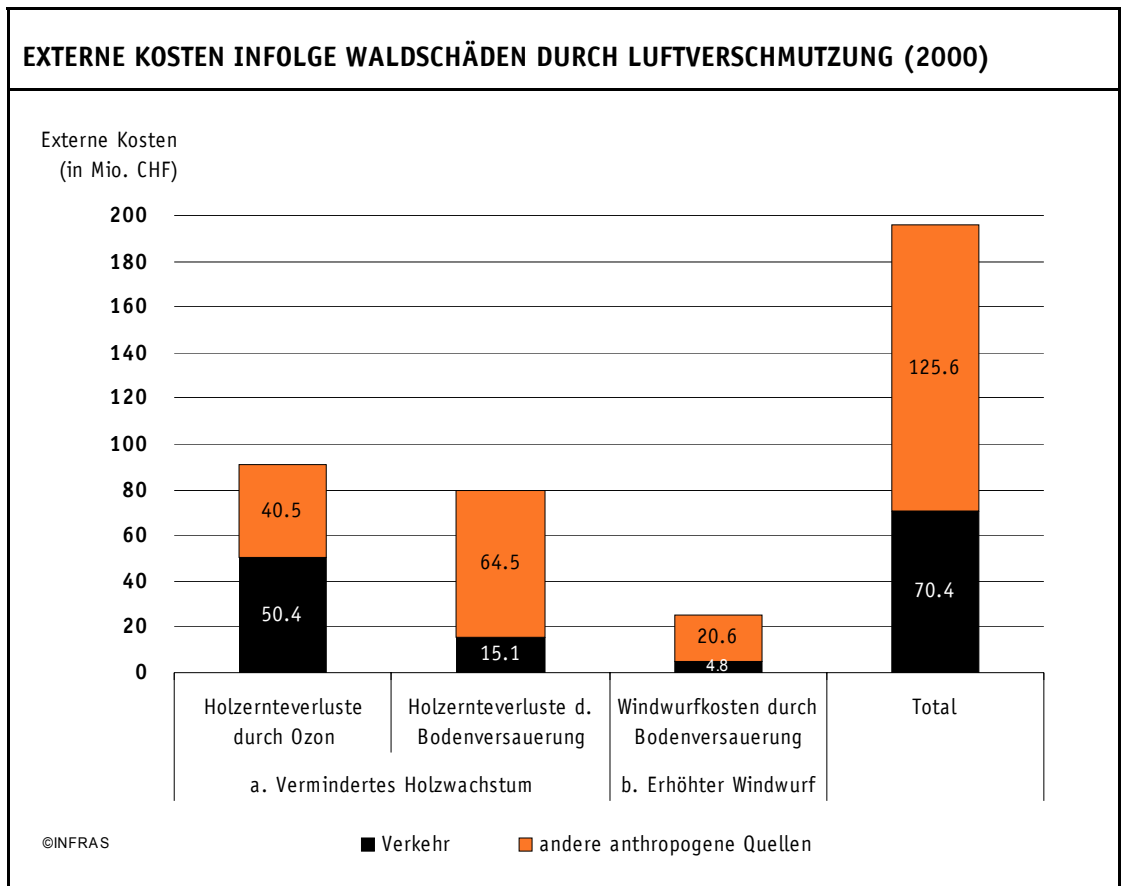
› **Anteil des Verkehrs an der Bodenversauerung:**

Für die Versauerung von Böden sind folgende anthropogenen Schadstoffe verantwortlich: Stickoxide (NO_x), Ammoniak (NH_3), Schwefeldioxid (SO_2). Gemäss Angaben des BAFU beträgt in der Schweiz der relative Beitrag dieser drei Stoffe zur Bodenversauerung bei den Stickoxiden 28%, beim Ammoniak 47% und beim Schwefeldioxid 25% (BUWAL 2005b). Der Verkehrsanteil (Strassen- und Schienenverkehr) an diesen drei Schadstoffen wiederum beträgt bei den Stickoxiden gut 55%, beim Ammoniak knapp 3% und beim Schwefeldioxid 9% (Datengrundlagen: SAEFL 2005a und BUWAL 2004c). Somit beträgt der Gesamtanteil des Strassen- und Schienenverkehrs an der Bodenversauerung 19.0%.

3.2.3. BERECHNUNGEN UND RESULTATE

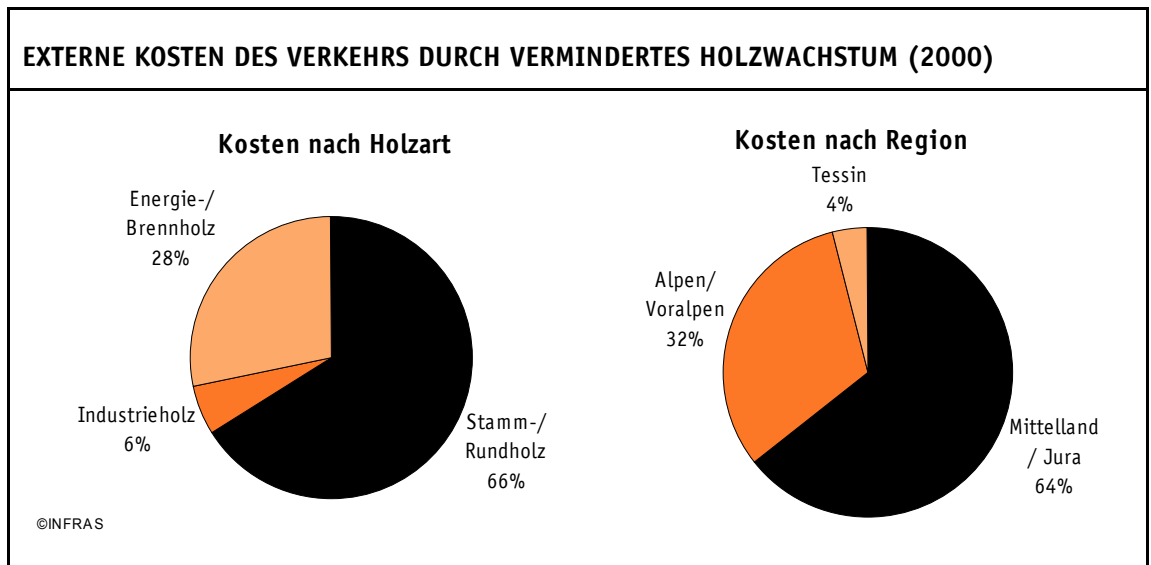
Die externen Kosten durch Waldschäden infolge Luftverschmutzung umfassen die folgenden drei Teilaspekte: Holzernteverluste durch Ozon, Holzernteverluste durch Bodenversauerung, Windwurfkosten durch Bodenversauerung. Für diese drei Schadensaspekte existieren Expositions-Wirkungs-Zusammenhänge. Für mögliche weitere Waldschäden durch Luftverschmutzung existieren (noch) keine solchen Zusammenhänge, weshalb diese Schäden hier nicht berechnet werden können.

In der Figur 15 sind die externen Kosten der einzelnen Schadensaspekte dargestellt. Die Zahlen umfassen nicht nur die durch den Verkehr verursachten Schäden, sondern die gesamten Kosten. Insgesamt betrugen die externen Kosten im Jahr 2000 196 Mio. CHF. Davon ist **der Verkehr für rund 36% oder gut 70 Mio. CHF verantwortlich**. Am bedeutendsten sind die Kosten durch reduziertes Holzwachstum infolge der Ozonbelastung bzw. der Bodenversauerung. Der Verkehr verursacht Schäden durch vermindertes Holzwachstum von 65.5 Mio. CHF pro Jahr. Der grösste Teil davon (50.4 Mio. CHF) ist auf Ozonimmissionen zurückzuführen, der Rest auf die Bodenversauerung (15.1 Mio. CHF). Die Gesamtkosten durch erhöhten Windwurf als Folge der Bodenversauerung betragen gut 25 Mio. CHF pro Jahr. Davon werden aber nur 4.8 Mio. CHF durch den Verkehr verursacht.

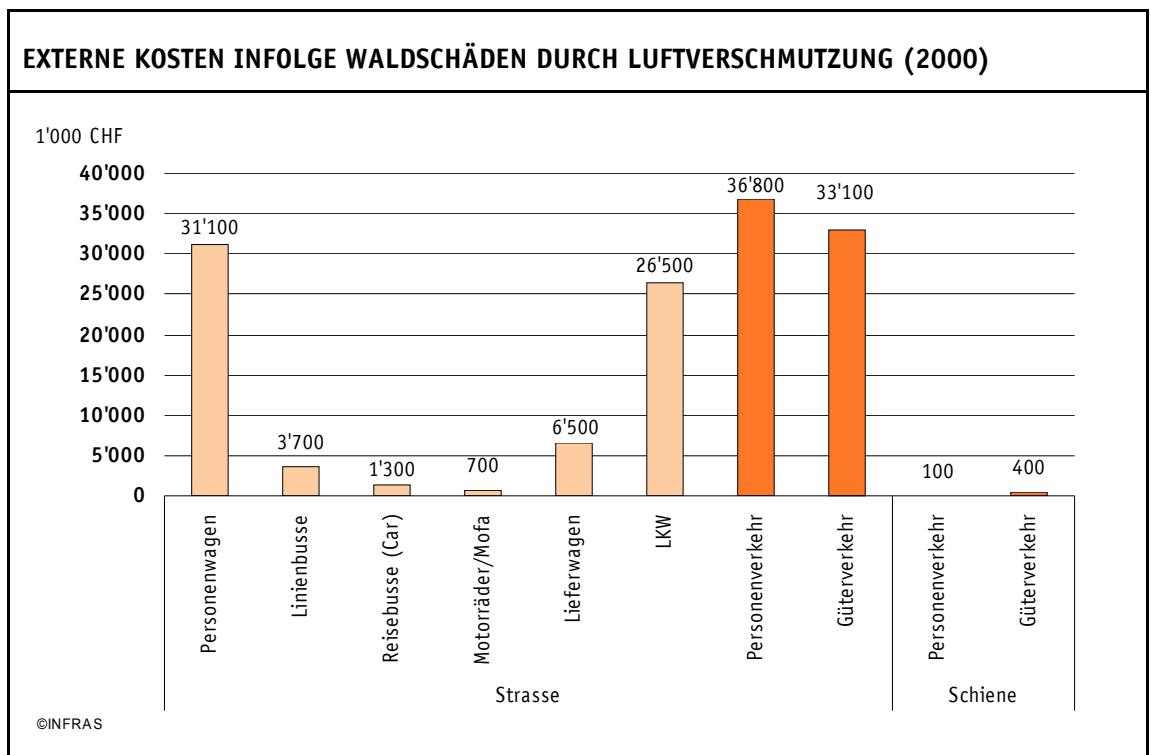


Figur 15 Anteil des Verkehrs an den externen Kosten durch Waldschäden.

Figur 16 zeigt die Aufteilung der Kosten infolge verminderten Holzwachstums durch Ozon und Bodenversauerung (Kostenaspekt a). Dabei wird einerseits unterschieden nach dem Anteil der verschiedenen Holzarten an diesen Kosten, andererseits nach der Region, in der die Kosten anfallen. Rund zwei Drittel der Kosten fallen dabei durch Mindererträge bei der Gewinnung von Stamm-/Rundholz an, 28% beim Energieholz und die restlichen 6% der Verluste beim Industrieholz. Regional gesehen fallen 64% der Kosten im Mittelland und Jura an, knapp ein Drittel in den Alpen und Voralpen sowie lediglich 4% im Tessin.



Figur 16



Figur 17

Figur 17 zeigt die Aufteilung der 70 Mio. CHF externen Kosten des Verkehrs infolge Waldschäden auf die einzelnen Verkehrsträger. Die Allokation auf die einzelnen Verkehrsträger

erfolgte gemäss deren Anteil an den Ozonimmissionen (via NO_x -Emissionen) bzw. an der Bodenversauerung (via NO_x -, SO_2 - und NH_3 -Emissionen).

Auch bei den Waldschäden wird der grösste Teil der externen Kosten (>99%) durch den Strassenverkehr verursacht. Der Strassenpersonenverkehr verursacht dabei insgesamt etwas höhere Kosten als der Strassengüterverkehr. Die höchsten Kosten verursachen die Personenwagen sowie die LKW. Der Anteil des Schienenverkehrs an den Waldschadenskosten ist sehr klein (0.7%).

An dieser Stelle sei nochmals angemerkt, dass in den obigen Quantifizierungen einige Kostenelemente fehlen, weil die entsprechenden Schadensaspekte nicht quantifizierbar waren. Dies betrifft insbesondere den erhöhten Pflegeaufwand für die Forstwirtschaft als Folge der erhöhten Anzahl an geschädigten Bäumen. Ebenfalls nicht quantifiziert wurden die Kosten durch die Verminderung der CO_2 -Senkenleistung des Waldes infolge verminderten Wachstums.

3.3. SCHÄDEN FÜR GEWÄSSER

3.3.1. QUANTIFIZIERUNGSMETHODIK

Im Anhang A1 sind die möglichen Umweltwirkungen des Verkehrs auf die Gewässerqualität ausführlich beschrieben. Jene Ausführungen zeigen, dass der Verkehr – zumindest theoretisch – auf viele verschiedene Arten zu Schäden in Gewässern führen kann. Es zeigt sich jedoch nach genauerer Betrachtung auch, dass bei vielen Schadensaspekten keine oder nur vernachlässigbar kleine Kosten anfallen. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass einige der Schäden zu Kosten führen, welcher interner Art sind, das heisst von den Verkehrsteilnehmern direkt oder indirekt getragen werden. Zum anderen sind diverse Schadenswirkungen des Verkehrs auf die Gewässer vernachlässigbar klein. Das heisst, es findet zwar eine messbare Beeinflussung der Gewässer statt; die Einflüsse sind aber auf so tiefem Niveau, dass daraus – zumindest heute – keine erheblichen negativen Folgen für den Mensch und die Umwelt zu erwarten sind. Zudem gibt es Schadensbereiche, bei denen zwar Kosten anfallen, eine Quantifizierung dieser Kosten aber nicht möglich ist.

Für die einzelnen Schadensaspekte werden als Folge der Analyse der Umweltwirkungen (siehe Kapitel im Annex) folgende Schlüsse gezogen:

- › Die **Schäden an Gewässern durch Luftschadstoffe** aus dem Verkehr werden als vernachlässigbar klein eingestuft und damit nicht quantifiziert. Die Schäden durch von Verkehrsemissionen verursachten Versauerungen von Gewässern sowie dadurch erfolgten Auswaschung von Schwermetallen sind in der Schweiz praktisch keine vorhanden. Bei der Überdüngung von Gewässern spielt der Verkehr nur eine marginale Rolle. Es fallen deshalb nur äusserst geringe Kosten an. Weitere Schadstoffe wie MTBE oder die BTEX können zwar über die Luft in Gewässer gelangen und dort nachgewiesen werden, jedoch in so kleinen Konzentrationen, dass zum heutigen Zeitpunkt keine Schäden zu erwarten sind.
- › Die **Schäden an Gewässern, welche durch den Einsatz von chemischen Hilfsmitteln** im Verkehr (Herbizide bzw. Streusalz) verursacht werden, sind ebenfalls sehr klein oder sogar gleich null. Diese Kosten werden deshalb nicht quantifiziert.

Die Schäden durch den heutigen Einsatz von Herbiziden sind praktisch gleich null. Relevante Kosten können einzig noch durch Verschmutzungen aus früheren, übermässigen Herbizideinsätzen stammen. Diese Schäden betreffen jedoch hauptsächlich die Böden entlang von Verkehrswegen, die bereits im Kapitel 3.4 abgedeckt sind. Möglich sind aber auch gewisse Folgekosten durch Auswaschung von Herbizidresten aus früheren Anwendungen in das Grundwasser. Damit können Kosten für Trinkwasserkontrollen oder gar Schliessun-

gen von Trinkwasserfassungen verbunden sein. Diese Kosten lassen sich allerdings mangels Datengrundlage nicht quantifizieren. Hinzu kommt, dass in der vorliegenden Studie vor allem die heutigen externen Kosten des Verkehrs quantifiziert werden sollen und weniger die früheren Schäden.

Der Einsatz von Streusalz führt zwar vor allem an Fahrzeugen und Verkehrsanlagen zu Schäden. Diese Schäden werden aber von den Verkehrsteilnehmern getragen und verursachen deshalb keine externen Kosten. In Grund- und Oberflächengewässern kann das Streusalz zwar gemessen werden, hat aber keinerlei Schäden zur Folge. Hingegen könnte der Einsatz von Streusalz bei Installationen der Trinkwasserversorgung Korrosionsschäden zur Folge haben. Über solche Schäden ist jedoch nichts Genaueres bekannt, sodass sie sich ebenfalls nicht quantifizieren lassen. Schäden kann das Streusalz zudem im Boden sowie den Pflanzen entlang von Verkehrswegen verursachen. Diese Schäden werden jedoch mit dem Kapitel 3.4 abgedeckt, wo Bodenschäden entlang Verkehrswegen diskutiert und mit Hilfe eines Reparaturkostenansatzes quantifiziert werden.

- › Bei den **durch Unfälle bzw. Lecks verursachten Gewässerschäden** wird davon ausgegangen, dass sie – wie gesetzlich vorgeschrieben – vollständig vom Verursacher getragen werden. Diese Kosten werden deshalb als vollständig intern betrachtet. In der Praxis ist dieser Schluss sicher für alle grösseren Unfälle gültig. Bei vielen kleineren Treibstoffverlusten dagegen (z.B. Benzinverlust am Auto wegen lecken Benzintanks, Verschütten von Benzin beim Tanken, illegaler Ölwechsel, etc.) ist der Verursacher sehr oft nicht bekannt. Auch solche Ereignisse können aber beispielsweise im Grundwasser zu Schäden führen, die mit Kosten verbunden sind (z.B. verschmutzte Trinkwasserfassung). Da jedoch keine Meldepflicht über derartige Verschmutzungsunfälle besteht, fehlt jegliche Datengrundlage zur Beurteilung der Häufigkeit solcher Schäden. Damit ist auch keine Quantifizierung der Schäden möglich. Es ist jedoch anzunehmen, dass die mit solchen kleineren Unfällen verbundenen Kosten verhältnismässig gering sind.
- › Da das **Meteorwasser von Verkehrswegen** in der Regel nur leicht verschmutzt ist und für die Umwelt keine übermässige Belastung darstellt, muss es nicht separat gereinigt werden, womit auch keine Kosten anfallen⁴¹. Weil heute in den bewohnten Gebieten das Meteorwasser von Strassen grösstenteils immer noch in die Kanalisation und anschliessend in die

⁴¹ Bei besonders stark belasteten Verkehrswegen (hohes Verkehrsaufkommen, viel Güterverkehr) kann das Meteorwasser unter Umständen jedoch als stark belastet gelten. Die Belastungen fallen dann allerdings vor allem in den Böden entlang der Verkehrswege an, wo das Meteorwasser versickert. Die damit verbundenen Kosten sind im Kapitel 3.4 (Bodenschäden) abgedeckt.

Abwasserreinigungsanlage geleitet wird, können dennoch Kosten anfallen. Diese Kosten betreffen jedoch weniger die Reinigung des Wassers, weil dieses relativ unverschmutzt ist, sondern die zusätzlichen Abwassermengen. Diese zusätzlichen Wasserfrachten aus dem Meteorwasser von Verkehrswegen können Mehrkosten zur Folge haben, weil Abwasserreinigungsanlagen beim Bau grösser dimensioniert werden müssen. Diese Kosten zu quantifizieren ist aber äusserst schwierig. Deshalb wird in dieser Studie auf eine Quantifizierung dieser Kosten verzichtet.

- › Mögliche Kosten, die durch **Nutzungskonflikte zwischen Verkehrswegen und Trinkwasserfassungen** entstehen, werden in dieser Studie als vollständig interne Kosten betrachtet, die vom Verursacher getragen werden. Mit dieser Vereinfachung bleiben gewisse Einzelfälle unberücksichtigt, in denen Kosten infolge Schliessung von Trinkwasserfassungen von der Allgemeinheit getragen werden müssen.
- › Der Einfluss des Verkehrs auf die **Versiegelung** ist aus Gründen des Gewässerschutzes kaum relevant und wird daher nicht betrachtet⁴². Durch **Kontrollen und Beobachtung der Wasserqualität** fallen Kosten an, doch bildet der Verkehr insgesamt für die Gewässerbeobachtung, mit wenigen Ausnahmen (z.B. MTBE, BTEX), eine eher untergeordnete Rolle, sodass ein grosser Teil der Kosten der Wasserbeobachtung nicht dem Verkehr angelastet werden kann (sondern der Landwirtschaft und den Siedlungs- und Industrieabwässern). Dennoch fallen gemäss Schätzungen von BAFU-Fachleuten (Sektion Grundwasserschutz) von den gesamten Kosten für die Beobachtung und Überwachung des Grundwassers in der Schweiz jährlich rund 1 bis 1.5 Mio. CHF an, die dem Verkehr anzulasten sind⁴³ und nicht von diesem getragen werden, sondern über allgemeine Steuermittel oder den Trinkwasserpreis finanziert sind. Diese Kosten werden jedoch aus methodischen Gründen in dieser Studie nicht zu den Gesamtkosten addiert, um mit den bisherigen Studien zu den externen Kosten des Verkehrs methodisch kompatibel zu bleiben. In sämtlichen bisherigen Studien wurde der Kontrollaufwand der öffentlichen Hand bei den Kostenschätzungen vernachlässigt.

⁴² Die Bodenversiegelung hat zwar auf die Gewässer keinen wesentlichen Einfluss, hat aber andere, sehr relevante Wirkungen auf die Umwelt. Beispielsweise führt Bodenversiegelung zu Habitatsverlusten und damit auch zu einer Reduktion der Biodiversität. Diese Schadensaspekte wurden jedoch bereits in der Studie zu den externen Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft behandelt und quantifiziert (Econcept/Nateco 2003).

⁴³ Vor allem Untersuchungen der Gewässer auf MTBE (Methyl-tertiär-Butylether; Benzinadditiv) und BTEX (Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylole; leicht flüchtige Inhaltsstoffe von Treibstoffen) gehen zu Lasten des Verkehrs.

Gemäss obigen Überlegungen wird davon ausgegangen, dass die durch den Verkehr verursachten Gewässerschäden eher gering sind und die aus diesen Schäden entstehenden Kosten zu einem grossen Teil durch den Verkehr selbst bezahlt werden und damit verkehrsintern sind. Die restlichen Einflüsse des Verkehrs sind entweder weitgehend unproblematisch (weil zu klein und unterhalb toxischem Niveau) oder aber aus methodischen Gründen nicht quantifizierbar.

Aus diesen Gründen wird in der vorliegenden Studie auf eine Quantifizierung der Kosten verzichtet.

Bisherige Quantifizierungen der Kosten

Die meisten verfügbaren Kostenschätzungen für die Schäden im Gewässerbereich basieren zur Hauptsache auf den Reinigungskosten des Niederschlagswassers auf Verkehrsflächen. Dieser Kostenaspekt dürfte wohl vor allem deshalb in allen Studien quantifiziert werden, weil er mittels Reparaturkostenansatz ziemlich leicht zu berechnen ist. Weil die Verschmutzung des Meteorwassers wie oben erwähnt nur schwach ist, erscheint der Einbezug dieser Kosten eher fragwürdig. Nebst den Reinigungskosten des Meteorwassers werden meist auch die jährlichen Kosten des Streusalzes quantifiziert. Auch diese Kosten sind relativ leicht zu monetarisieren. Hier stellt sich jedoch die Frage, welche Kosten interner Natur sind (z.B. Korrosionsschäden) und ob es keine Doppelzählung mit den Schäden durch Schwermetalle entlang von Verkehrswegen gibt.

Eine Monetarisierung der Schadwirkung des Verkehrs auf Gewässer hat für den nord-amerikanischen Raum Litman (2003) vorgenommen. Für die USA werden die externen Kosten des Verkehrs infolge Gewässerverschmutzung auf 29 Mia. USD geschätzt bzw. auf 0.013 USD pro Fahrzeugmeile für einen durchschnittlichen Personenwagen (= 0.008 USD pro Fahrzeugkilometer). Die Kosten setzen sich zusammen aus Kosten für die Reinigung des Niederschlagswassers auf Verkehrsflächen (22 Mia. USD), den Kosten durch Öl- und Treibstoffunfälle (2 Mia. USD) sowie den jährlichen Kosten durch Streusalz (4.7 Mia. USD).

Im deutschsprachigen Raum wurden die externen Kosten des Verkehrs in Gewässern und Böden auf der Basis von Reinigungskosten für Niederschläge auf Verkehrsflächen im Jahr 1990 auf 2.5 Mia. DM pro Jahr geschätzt (PLANCO 1990). Eine Aktualisierung der Kosten des deutschen Umweltbundesamtes (UBA) im Jahr 1996 (Huckestein 1996) schätzt diese Reinigungskosten auf 4.2 Mia. DM pro Jahr. Zudem schätzt die Studie die zusätzlichen Wasser- und Bodensanierungskosten durch den Herbizideinsatz bei der Bahn auf 1.1 Mia. DM. Als weiteren Kostenpunkt schätzt die Studie des UBA die externen Kosten von Streusalzschäden

auf 0.9 Mia. DM pro Jahr (Huckestein 1996). Beide erwähnten deutschen Studien (PLANCO 1990, Huckestein 1996) machen keinen Unterschied zwischen den Boden- und Wasserbelastungen, sondern berechnen die externen Kosten für diese beiden Schadensbereiche zusammen, weil die Schäden auf Gewässer und Böden schwierig zu trennen sind.

Bisherige Kostenschätzung für die Schweiz:

- › INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS 1996: Abschätzung der jährlichen externen Kosten des Verkehrs im Bereich Wasser und Böden auf Grundlage der Studie von PLANCO 1990: 100-200 Mio. CHF.
- › UNITE 2002: Es wurde keine separate Berechnung der Gewässerschäden vorgenommen, sondern lediglich eine Abschätzung der externen Kosten des Verkehrs im Bereich Boden und Grundwasser: jährliche Kosten für die Dekontaminierung von Boden und Grundwasser (Reparaturkostenansatz) infolge Verkehrsschäden in der Schweiz: 10.2 Mio. CHF im Jahr 1998 (8.8 Mio. CHF Strassenverkehr, 1.4 Mio. CHF Schienenverkehr) bzw. 8.3 Mio. CHF im Jahr 2005 (Prognose).

3.3.2. DATENGERÜST

Weil im Bereich der Gewässerschäden keine Kosten quantifiziert werden, erübrigt sich die Frage nach dem Datengerüst.

3.3.3. BERECHNUNGEN UND RESULTATE

Die **externen Kosten des Verkehrs durch Gewässerschäden** sind gemäss vorliegenden Abschätzungen **sehr gering bzw. nahe bei null**. Allerdings werden damit die effektiven Kosten möglicherweise unterschätzt, weil einige Schadensaspekte – zum heutigen Zeitpunkt – nicht quantifizierbar sind und damit nicht monetarisiert werden können.

3.4. SCHÄDEN FÜR DIE BODENQUALITÄT

3.4.1. QUANTIFIZIERUNGSMETHODIK

Die wichtigsten Umweltwirkungen des Verkehrs auf den Boden umfassen die Bodenverschmutzung entlang Verkehrswegen durch Schwermetalle und PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe), Bodenversauerung, Überdüngung des Bodens mit Stickstoff sowie Bodenbelastungen beim Bau von Verkehrswegen sowie bei Unfällen und Lecks. Im Detail werden diese Umweltwirkungen im Annex A1 erläutert.

Die Überdüngung und Versauerung von Böden ist in der Schweiz hauptsächlich bei Waldböden ein Problem. Diese Schadensaspekte wurde bereits im Kapitel 3.2 behandelt. Bei Bodenverschmutzungen, die beim Bau von Strassen und Schienen sowie durch Lecks und Unfälle entstehen, handelt es sich grundsätzlich um interne Kosten, die vom Verursacher getragen werden müssen. Selbstverständlich ist dies in der Praxis nicht immer der Fall, z.B. wenn Schäden nicht entdeckt werden. Das Ausmass dieser unbemerkten, nicht vom Verursacher getragenen Schäden lässt sich jedoch nicht quantifizieren. Somit bleiben die Bodenverschmutzungen entlang von Verkehrswegen durch Schwermetalle und PAK als relevante Kostenaspekte.

Weil genaue Expositions-Wirkungsbeziehungen fehlen und damit die Schadenskosten nicht verlässlich bestimmt werden können, bietet sich bei der Berechnung der durch den Verkehr verursachten externen Kosten im Bereich Boden der Reparaturkostenansatz an. Dazu werden die Kosten für die Sanierung der mit Schwermetallen bzw. PAK verschmutzten Böden berechnet. Diese Berechnungsmethodik basiert auf der Überlegung, dass Böden mit einer Schadstoffbelastung oberhalb eines bestimmten Grenzwertes nicht mehr langfristig fruchtbar sind und gar eine potenzielle Gefährdung für Pflanzen, Tiere sowie allenfalls auch Menschen darstellen.

Grundsätzlich gilt es im Verkehr zwischen den über die Jahre akkumulierten Bodenbelastungen und -schäden und den aktuellen, jährlichen Schäden zu unterscheiden. Gerade im Strassenverkehr sind die alten Belastungen in Böden entlang Verkehrswegen gross, weil in den Zeiten vor der Einführung des bleifreien Benzins sehr grossen Mengen an Blei in die Böden gelangten. Die meisten Böden entlang von Strassen sind trotz der stark verminderten Bleiemissionen immer noch mit Bleikonzentrationen über dem Grenzwert belastet und werden es auch bleiben.

Auf Grundlage der heutigen Belastungslage der Böden entlang von Verkehrswegen können die gesamten Kosten für die Sanierung berechnet werden (I: Gesamtkosten). Mit einem alternativen Berechnungsansatz können aber auch die heutigen, jährlichen Kosten berech-

net werden, indem von den aktuellen, jährlichen Emissionen ausgegangen wird und die Belastungen aus früherer Zeit nicht berücksichtigt werden (II: Jahreskosten). Für die Bestimmung der aktuellen, externen Kosten des Verkehrs sind die Jahreskosten entscheidend.

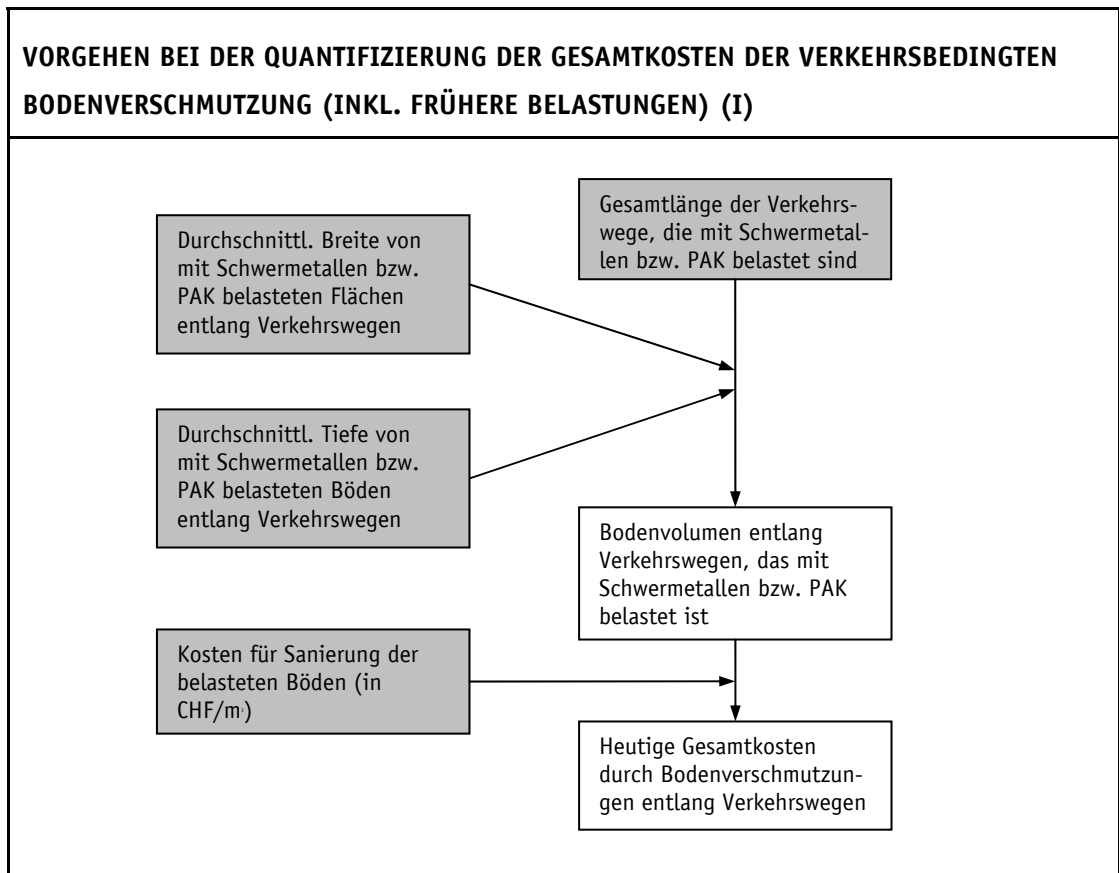
I: Gesamtkosten der Bodenverschmutzung durch den Verkehr, inkl. frühere Belastungen

Figur 18 zeigt das Vorgehen bei der Quantifizierung der durch den Verkehr verursachten Schäden an der Bodenqualität, die zum heutigen Zeitpunkt insgesamt anfallen (also inkl. der früheren Verschmutzungen). Die erste entscheidende Grösse bei der Monetarisierung der Bodenschäden ist das Bodenvolumen, welches entlang Verkehrswegen übermässig mit Schwermetallen und PAK belastet ist. Für die Berechnung dieses Volumens müssen folgende drei Faktoren bekannt sein: 1. Gesamtlänge der Verkehrswege (Strassen, Schienen) entlang derer die Böden belastet sind; 2. Durchschnittliche Breite der mit Schwermetallen bzw. PAK belasteten Flächen entlang Verkehrswegen; 3. Durchschnittliche Tiefe der mit Schwermetallen bzw. PAK belasteten Flächen.

Für die Bestimmung der Gesamtlänge des Verkehrsnetzes mit belasteten Böden muss bekannt sein, ab welcher Befahrungsintensität mit stark belasteten Böden zu rechnen ist. Die Bestimmung dieser Expositions-Wirkungsbeziehung ist relativ schwierig.

Um die gesamten Reparaturkosten zu bestimmen, muss das verschmutzte Bodenvolumen mit einem Kostensatz für den Aushub, den Ersatz und die Reinigung bzw. Entsorgung des belasteten Bodenvolumens multipliziert werden. Mangels Alternativen kommt als Sanierungsmethode lediglich der Ersatz des belasteten Bodenmaterials durch sauberes in Frage.

Diese Berechnungen werden für die wichtigsten Schwermetalle (Zink, Cadmium, Blei und Kupfer) sowie die PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) vorgenommen. Die Schadenskosten müssen jedoch nicht addiert werden, weil ein Boden nur einmal saniert werden muss, auch wenn er unterschiedliche Schadstoffe enthält. Am Ende ist für die Kostenberechnung also jener Stoff relevant, der das grösste Bodenvolumen belastet und damit die grössten Kosten verursacht.



Figur 18 Die grauen Felder zeigen die nötigen Inputdaten, die weissen Felder repräsentieren Outputdaten.

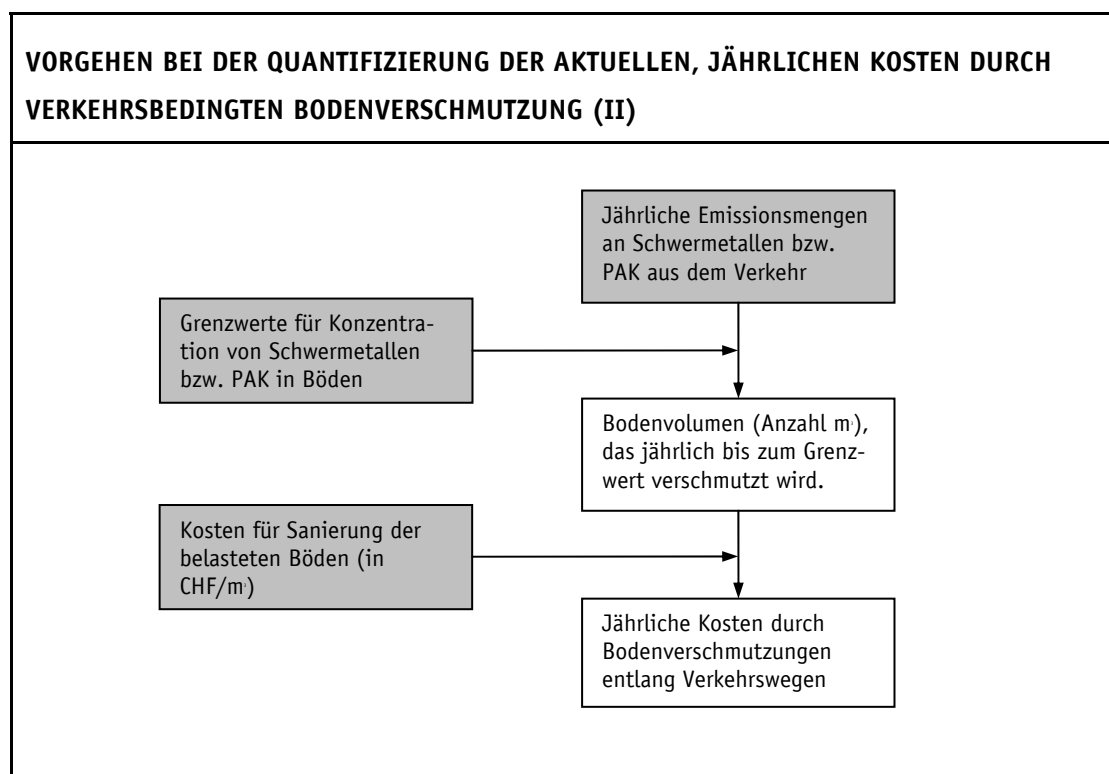
II: Aktuelle jährliche Kosten der Bodenverschmutzung durch den Verkehr

Figur 19 zeigt das detaillierte Vorgehen bei der Quantifizierung der aktuellen, jährlichen verkehrsbedingten Schäden an der Bodenqualität. Im Gegensatz zur Berechnung der Gesamtschäden inklusive der früheren Belastungen müssen in diesem Fall keine Angaben zu Länge, Breite und Tiefe der belasteten Böden bekannt sein. Dafür werden die jährlich emittierten Mengen an Schwermetallen und PAK als Inputgrösse benötigt. Werden diese Emissionsmengen den Grenzwerten für die maximal zulässigen Schwermetall- bzw. PAK-Konzentrationen gegenüber gestellt, kann das Volumen des Bodens berechnet werden, das durch diese Emissionsmenge jährlich bis zu einem bestimmten Grenzwert verschmutzt wird. Dieses Bodenvolumen muss jährlich saniert werden. Um die jährlichen Sanierungskosten zu berechnen, muss dieses verschmutzte Bodenvolumen daher mit einem Kostensatz für den Aushub, den Ersatz und die Entsorgung des belasteten Bodenvolumens multipliziert werden.

Diese Berechnungen werden für die wichtigsten Schwermetalle (Zink, Cadmium, Blei, Kupfer) sowie die PAK vorgenommen. Die Schadenskosten für die einzelnen Schadstoffe

werden jedoch auch hier nicht addiert, weil angenommen wird, dass die entsprechenden Belastungen auf demselben Bodenkompartment anfallen. Dies ist insofern realistisch, als dass z.B. beim Strassenverkehr die Schwermetalle zum allergrössten Teil aus dem Abrieb von Reifen und Strassenbelag stammen und damit die verschiedenen Stoffe in etwa an denselben Stellen auftreten. Somit muss ein Boden nur einmal saniert werden, auch wenn er unterschiedliche Schadstoffe enthält. Am Ende ist für die Kostenberechnung also jener Stoff relevant, der jährlich das grösste Bodenvolumen bis zur kritischen Konzentration (Grenzwert) belastet und damit die grössten Kosten verursacht.

Im Forschungsprogramm UNITE wurde die Kostenabschätzung auf dieselbe Weise vorgenommen. Mittels Reparaturkostenkostenansatz wurden die Boden- und Wasserverschmutzungskosten berechnet. Dabei wurde mit einem Kostensatz von 36 EUR/m³ verschmutzten Bodens gerechnet (UNITE 2000). Es wurde zudem angenommen, dass der Boden durchschnittlich bis zu einer Tiefe von 20 cm verschmutzt ist.



Figur 19 Die grauen Felder zeigen die nötigen Inputdaten, die weissen Felder repräsentieren Outputdaten.

Bisherige Quantifizierungen der Kosten

- › INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS 1996: Abschätzung der jährlichen externen Kosten des Verkehrs im Bereich Wasser und Böden auf Grundlage der Studie von PLANCO 1990: 100-200 Mio. CHF.
- › UNITE 2002: Abschätzung der externen Kosten des Verkehrs im Bereich Boden und Grundwasser: jährliche Kosten für die Dekontaminierung von Boden und Grundwasser (Reparaturkostenansatz) infolge Verkehrsschäden in der Schweiz: 10.2 Mio. CHF im Jahr 1998 (8.8 Mio. CHF Strassenverkehr, 1.4 Mio. CHF Schienenverkehr) bzw. 8.3 Mio. CHF im Jahr 2005 (Prognose).

3.4.2. DATENGERÜST

Für die Berechnungen werden die folgenden Daten benötigt:

I: Gesamtkosten (inkl. frühere Belastungen)

- › Gesamtlänge der Verkehrswege (Strassen-, Schienennetz), deren angrenzenden Böden mit Schwermetallen (Cadmium, Zink, Blei, Kupfer) belastet sind (für das Jahr 2000).
- › Durchschnittliche Breite der mit Schwermetallen bzw. PAK belasteten Flächenstreifen entlang Verkehrswegen.
- › Durchschnittliche Tiefe, bis zu welcher die Böden entlang Verkehrswegen mit Schwermetallen bzw. PAK belastet sind.
- › Spezifische Kosten für die Sanierung von belasteten Böden (Sanierungskosten pro Bodenvolumen).

a. Länge der belasteten Verkehrswege

In Rücksprache mit Fachleuten des BAFU wurde die Länge der belasteten Verkehrswege folgendermassen bestimmt: Es wird angenommen, dass Emissionen von Schwermetallen und PAK in grösseren Mengen vor allem an Verkehrswegen mit hohem Verkehrsaufkommen vorkommen. Es wird davon ausgegangen, dass entlang allen gut ausgebauten Strassen bzw. Schienen relevante Belastungen der Böden vorliegen. Beim Strassenverkehr wird deshalb vereinfachend die Länge des belasteten Strassennetzes aus der Länge des Nationalstrassensowie des Kantonsstrassennetzes (1'638 km bzw. 18'097 km, BFS 2005a) plus 10% für stark belastete Abschnitte kleinerer Strassen berechnet. Auf diese Weise erhält man eine Länge von belasteten Strassen von gut 21'700 km.

Beim Schienenverkehr wird angenommen, dass alle mehrspurigen Abschnitte stark befahren und damit auch die Böden entlang der Schienen stark belastet sind. Das Schweizer Schienennetz weist 1'752 km mehrspurige Abschnitte auf (BFS 2005a).

Als Alternative dazu könnte die Streckenlänge auch etwas differenzierter berechnet werden: In Holenstein 2000 sowie Wegelin, Gsponer 1997 sind für den Strassenverkehr grobe Daten über den Zusammenhang zwischen der Verkehrsmenge (z.B. durchschnittlicher täglicher Verkehr, DTV) und den Schadstoffmissionen sowie den Breiten der belasteten Flächen zu finden. Mit Hilfe dieser Angaben könnten verschiedene Kategorien mit unterschiedlich stark belasteten Strassen gebildet werden und mit den entsprechenden Breiten der belasteten Flächen multipliziert werden. Die Schwierigkeit besteht darin, die gesamte Länge von Strassen mit einer bestimmten täglichen Verkehrsmenge (z.B. DTV zwischen 15'000 und 25'000 Fahrzeugen) zu eruieren. Die Ermittlung dieser Daten wäre sehr aufwändig und ist aufgrund der relativ schwachen Datenlage kaum zu realisieren.

b. Breite der belasteten Flächenstreifen

Die Breite der mit Schwermetallen bzw. PAK belasteten Flächenstreifen entlang von Strassen oder Schienen sind in Tabelle 14 dargestellt. Die Werte wurden anhand von Messungen (Bodenproben) bestimmt (Angaben aus BUWAL 1992 und Holenstein 2000). Je nach Stoff werden bis zu einem gewissen Abstand vom Verkehrsweg systematische oder einzelne Überschreitungen der Richtwerte beobachtet. Für die Berechnung sind gemäss Rücksprache mit BAFU-Experten (Sektion Boden) die *einzelnen* Richtwertüberschreitungen relevant, da dies auch in der normalen Bodenschutzpraxis so gehandhabt wird.

KONTAMINATIONSBEREICHE FÜR SCHWERMETALLE UND PAK ENTLANG VERKEHRSWEGEN			
Schadstoff	Systematische Richtwertüberschreitungen	Einzelne Richtwertüberschreitungen	Feststellbare Erhöhungen
Strassenverkehr			
Cadmium	bis 1 m	bis 6 m	bis 10 m
Zink	keine	bis 5 m	bis 10 m
Blei	bis 8 m	bis 12 m	bis 18 m
PAK	5-10 m	15-25 m	50-100 m
Schienenverkehr			
Kupfer	bis 7 m	bis 10 m	Keine Angaben

Tabelle 14 Quelle: Schwermetalle: BUWAL 1992, PAK: Holenstein 2000.

c. Tiefe der belasteten Böden

Die „Verordnung über Belastungen des Bodens“ (VBBo) besagt, dass die Belastung mit Schwermetallen bis in eine **Tiefe von 20 cm** relevant ist. Dieser Wert wird in diversen Studien (BUWAL 1992, Holenstein 2000, Wegelin & Gsponer 1997) sowie auf Nachfragen von Experten (Sektion Boden) bestätigt.

d. Spezifische Sanierungskosten

Ein erster Referenzwert für Bodensanierungskosten liefert die EU-Studie UNITE (UNITE 2000a). Darin wird mit einem Sanierungskostensatz von 36 EUR/m³ (entspricht etwa 58 CHF/m³) gerechnet. In der vorliegenden Studie wird aber ein aktuellerer, spezifisch schweizerischer Wert verwendet.

Gemäss den Angaben eines auf Bodensanierungen spezialisierten Ingenieurbüros beträgt der Kostensatz für die Entsorgung von belastetem Boden 65 CHF/m³. Hinzu kommen die Kosten für den Aushub sowie den Ersatz des Bodens durch unbelastetes Material.

Die Nachfrage bei einer kantonalen Bodenschutzfachstelle (Zürich) zu spezifischen Bodensanierungskosten sowie eine Recherche bei einem Unternehmen, das Bodenentsorgungen vornimmt (HASTAG), ergab folgende Kostensätze:

- › Belastete Böden entlang von Verkehrswegen, die mit Schwermetallen oberhalb des Prüfwertes belastet sind, müssen auf einer Inertstoffdeponie entsorgt werden (siehe auch BUWAL 2001b).
- › Für die Entsorgung von verschmutztem Humus auf in einer Inertstoffdeponie fallen Kosten von 65 CHF/m³ an (www.hastag.ch). Der Wert ist also gleich gross wie der vom Ingenieurbüro angegebene Wert. Hinzu kommen noch die Transportkosten sowie die Kosten für das unverschmutzte Bodenmaterial. Unverschmutzter Humusboden kostet zwischen 5 und 80 CHF/m³. Für Landwirtschaftsböden entlang von Strassen muss gemäss Experten (kantonale Bodenschutzfachstelle ZH) mit Kosten von etwa gerechnet 20 CHF/m³ werden.

Für die Entsorgung (Deponierung) von verschmutztem Bodenmaterial sowie dem Ersatz durch unbelastetes Material fallen also Kosten von rund 85 CHF/m³ an. Dazu kommen noch die Kosten für den Aushub sowie den Transport. Insgesamt dürften die spezifischen Kosten für Aushub, Wegtransport, Entsorgung sowie Beschaffung und Zuführung von unverschmutztem Material bei **rund 100 CHF/m³** liegen (Entsorgung 65 CHF, Neumaterial 20 CHF, Transport und Aushub 15 CHF). Mit diesem Wert wird in der vorliegenden Studie gerechnet.

II: Aktuelle jährliche Kosten

- › Jährliche Emissionsmengen an Schwermetallen bzw. PAK aus dem Verkehr.
- › Grenzwerte (Richt-, Prüf- und Sanierungswerte) für Schwermetallen bzw. PAK in Böden.
- › Spezifische Kosten für die Sanierung von belasteten Böden (Sanierungskosten pro Bodenvolumen). Es kann der identische Sanierungskostensatz wie oben (I: Gesamtkosten) verwendet werden.

a. Jährliche Emissionsmengen

Die Datengrundlage für die jährlichen Emissionsmengen von Schwermetallen (Zink, Cadmium, Kupfer, Blei) und PAK aus dem Strassen- und Schienenverkehr bilden, soweit vorhanden, die Emissionsfaktoren aus dem Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (INFRAS 2004a, BUWAL 2004c). Die anderen Daten stammen aus der Datenbank ECOINVENT (Ecoinvent 2004). Indem die spezifischen Emissionsfaktoren aus diesen Quellen mit den entsprechenden Fahrleistungen multipliziert werden, erhält man die gesamten Jahresemissionsmengen (siehe Tabelle 15).

JÄHRLICHE EMISSIONSMENGEN VON SCHWERMETALLEN UND PAK IN BÖDEN DURCH DEN STRASSEN- UND SCHIENENVERKEHR		
	Gesamtemissionen pro Jahr (in kg/a)	Datenquelle
Strassenverkehr		
Cadmium	77	Infras 2004a, BUWAL 2004c
Zink	308'597	Infras 2004a, BUWAL 2004c
Blei	4'568	Infras 2004a, BUWAL 2004c
Kupfer	20'805	Ecoinvent 2004
PAK	1'836	Ecoinvent 2004
Schienenverkehr		
Cadmium	22.6	Ecoinvent 2004
Zink	523.3	Ecoinvent 2004
Blei	206.7	Ecoinvent 2004
Kupfer	148.2	Ecoinvent 2004
PAK	12.6	Ecoinvent 2004

Tabelle 15

b. Grenzwerte

Die verschiedenen Grenzwerte (Richt-, Prüf- und Sanierungswerte) von Schwermetallen und PAK in Böden sind in der eidgenössischen „Verordnung über Belastungen des Bodens“ (VBBo) festgehalten (siehe Tabelle 16).

Die entscheidende Frage ist, welcher der Grenzwerte (Richt-, Prüf- oder Sanierungswert) für die Berechnung des belasteten Bodenvolumens verwendet wird. Aus naturwissenschaftlicher Sicht müsste es der Richtwert sein. Denn ab einer Schadstoffbelastung des Bodens über dem Richtwert muss mit Schäden an der Bodenökologie gerechnet werden. Praktisch dürfte aber der Prüfwert relevanter sein, weil ab diesem Wert die Bodenfruchtbarkeit eingeschränkt ist und solcher Boden eine potenziell Gefährdung für Pflanzen, Tiere sowie allenfalls auch Menschen darstellt. Gemäss Wegleitung „Bodenaushub“ des BAFU (BUWAL 2001b) müssen Böden mit Schadstoffbelastungen oberhalb des Prüfwertes im Übrigen als Abfall in Deponien entsorgt werden. In der Praxis werden Böden natürlich in der Regel erst bei einer Belastung oberhalb des Sanierungswertes effektiv saniert. Doch in dieser Studie sollen nicht die effektiven Sanierungskosten berechnet werden, sondern die *gesamten* Schadenskosten, welche durch die Belastung von Böden mit Schadstoffen aus dem Verkehr entstehen. Und weil die Schädigung der Böden bereits ab Erreichen der Richtwerte, spätestens oberhalb der Prüfwerte vorliegt, sind diese Werte für die Berechnung der Schadenskosten relevant. Deshalb wird – auch auf Empfehlung von Fachleuten – in der vorliegenden Studie für die Kostenberechnung der Prüfwert verwendet. Als Sensitivität können zusätzlich auch Bodenvolumen und Kosten berechnet werden, die sich bei der Verwendung des Richtwertes als Grenzwert ergeben.

GRENZWERTE VON SCHWERMETALLEN UND PAK IN BÖDEN			
Schadstoff	Richtwert	Prüfwert *	Sanierungswert **
Cadmium	0.8	2	30
Zink	150	300	2000
Blei	50	200	2000
Kupfer	40	150	1000
PAK (Summe der 16 Leitsubstanzen)	1	20	100

Tabelle 16 Die Werte geben die Totalgehalte der Schadstoffe an. Die Werte sind in mg/kg Trockensubstanz (für Böden bis 15% Humus) bzw. in mg/dm³ Boden (für Böden über 15% Humus) angegeben. *: Werte für den Nahrungs- bzw. Futterpflanzenanbau. **: Werte für die Landwirtschaft. Quelle: Prüfwert für Zink aus BUWAL 2001b, alle restlichen Grenzwerte stammen aus der Eidgenössische „Verordnung über Belastungen des Bodens“ (VBBo).

3.4.3. BERECHNUNGEN UND RESULTATE

I: Gesamtkosten (inkl. frühere Belastungen)

Mit Hilfe der Daten zur Länge der belasteten Verkehrswege, sowie der durchschnittlichen Breite und Tiefe der belasteten Böden kann das gesamte, mit Schwermetallen bzw. PAK belastete Bodenvolumen abgeschätzt werden. Tabelle 17 zeigt die Grösse der belasteten Bodenvolumina.

INSGESAMT BELASTETES BODENVOLUMEN ENTLANG STRASSEN BZW. SCHIENEN (IN MIO. M ³)			
	Systematische Richtwert-Überschreitungen	Einzelne Richtwert-Überschreitungen	Feststellbare Erhöhungen der Konzentrationen
Strasse			
Cadmium	4.3	26.1	43.4
Zink	0.0	21.7	43.4
Blei	34.7	52.1	78.2
PAK	21.7	65.1	217.1
Schiene			
Kupfer	2.5	3.5	k.A.

Tabelle 17

Das grösste Bodenvolumen wird also durch die PAK (einzelne Überschreitungen, Feststellbare Erhöhungen) bzw. das Blei (systematische Überschreitungen) verschmutzt. Für die Berechnung der Kosten müssen die einzelnen Richtwertüberschreitungen betrachtet werden, weil dies auch in der normalen Bodenschutzpraxis so geschieht (BAFU, Sektion Boden). Demnach betragen die heutigen **Gesamtkosten durch Bodenschäden des Verkehrs bei der Strasse 6'510 Mio. CHF und bei der Schiene 350 Mio. CHF**. Würden nur jene Böden mit systematischen Richtwertüberschreitungen betrachtet, lägen die Gesamtkosten rund 30 bis 50% tiefer, nämlich bei 3'470 Mio. CHF beim Strassenverkehr bzw. 250 Mio. CHF beim Schienenverkehr.

Auf eine Allokation der Gesamtkosten (inkl. der früheren Belastungen) wird an dieser Stelle verzichtet. Diese wird bei den jährlichen Kosten durch Bodenschäden vorgenommen, welche für die Berechnung der aktuellen externen Kosten die entscheidende Grösse darstellen.

II: Aktuelle jährliche Kosten

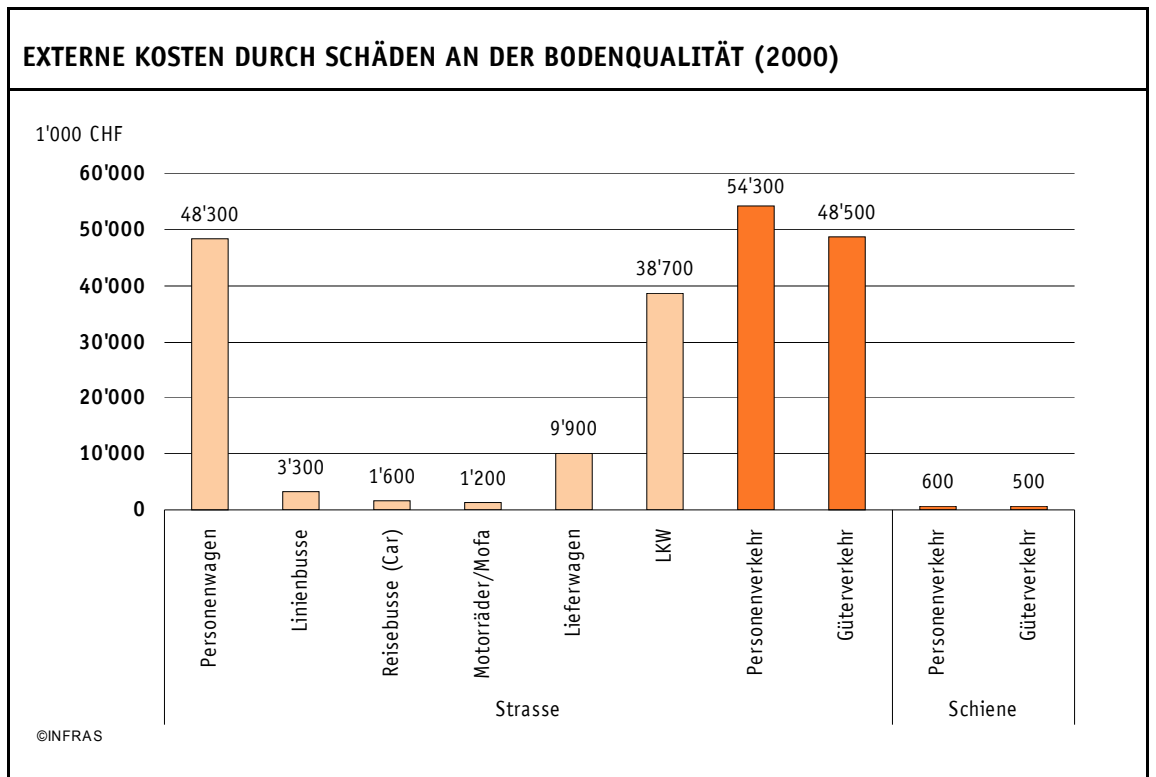
In Tabelle 18 ist das Bodenvolumen dargestellt, welches durch die Emission von Schwermetallen bzw. PAK aus dem Verkehr jährlich bis zu einer kritischen Belastung (Prüfwert) verschmutzt wird. Die Berechnung erfolgt auf der Basis der jährlichen Emissionsmengen der entsprechenden Stoffe. Die Tabelle zeigt ebenfalls die daraus resultierenden jährlichen Kosten der Bodenschäden.

JÄHRLICH BELASTETES BODENVOLUMEN UND AKTUELLE JÄHRLICHE KOSTEN DURCH BODENSCHÄDEN (IM JAHR 2000)		
	Bodenvolumen, das jährlich bis zum Prüfwert belastet wird (in 1'000 m)	Jährliche Kosten durch Bodenverschmutzungen (in Mio. CHF)
Strasse		
Cadmium	38.5	3.8
Zink	1'028.7	103.0
Blei	22.8	2.3
Kupfer	138.7	14.0
PAK	91.8	9.2
Schiene		
Kupfer	1.0	0.1
Cadmium	11.3	1.1

Tabelle 18

Beim Strassenverkehr führen die Zinkemissionen zu den grössten verschmutzten Bodenvolumen, beim Schienenverkehr sind es die Cadmiumemissionen. Weil für die Bestimmung der Kosten jener Stoff relevant ist, der das grösste Bodenvolumen belastet, bilden die Verschmutzungskosten durch Zink (Strasse) bzw. Cadmium (Schiene) die Werte für die jährlichen, externen Kosten durch Bodenschäden aus dem Verkehr. Demnach betrugen im Jahr 2000 die **jährlichen externen Kosten durch Bodenschäden des Verkehrs 104 Mio. CHF**. Davon ist der Strassenverkehr für knapp 103 Mio. CHF (99%) verantwortlich, der Schienenverkehr für rund 1.1 Mio. CHF (1%).

In Figur 20 sind die durch Schäden an der Bodenqualität bedingten externen Kosten der einzelnen Verkehrsträger im Detail dargestellt.



Figur 20

Am meisten Kosten verursachen die Personenwagen und die LKWs. Ebenfalls bedeutend sind die Schäden, die durch Emissionen der Lieferwagen verursacht werden. Der Schienenverkehr trägt nur zu etwa einem Prozent an die Kosten infolge Schädigungen der Bodenqualität bei.

3.5. ERSCHÜTTERUNGEN

3.5.1. QUANTIFIZIERUNGSMETHODIK

Grundsätzlich sind zwei Wirkungsarten von verkehrsbedingten Erschütterungen zu unterscheiden. Zum einen können Erschütterungen an Gebäuden Wert mindernde Sachschäden hervorrufen. Zum anderen sind negative Wirkungen von Erschütterungen auf Menschen in Gebäuden möglich, indem die Erschütterungen als zusätzliche Belästigung empfunden werden. Letzteres gilt vor allem beim Aufenthalt in Wohngebäuden, im Speziellen bei nächtlichen Schlafstörungen. Eine genauere Beschreibung der Wirkung von Erschütterungen auf Menschen und Gebäude ist im Anhang A1 zu finden.

a. Ermittlung der Gesamtkosten mittels Vermeidungskostenansatz

Die externen Kosten der Erschütterungen des Verkehrs können aus den Kosten baulicher Massnahmen zu ihrer Vermeidung abgeschätzt werden. Diese Vorgehensweise entspricht einem Vermeidungskostenansatz. Mit Hilfe dieses Ansatzes lassen sich insbesondere für den Schienenverkehr die Erschütterungskosten relativ gut quantifizieren. Dazu werden die spezifischen Sanierungskosten für die Vermeidung von Erschütterungen durch den Bau besserer Bahntrassen (bzw. den Einbau von so genannten Unterschottermatten, die Erschütterungen dämpfen) abgeschätzt und mit der Streckenlänge der Gebiete mit betroffenen Gebäuden bzw. Menschen multipliziert.

Eine auf diesem Ansatz beruhende Berechnung der gesamten „Erschütterungs-Sanierungskosten“ auf dem Schweizer Schienennetz hat die SBB in Zusammenarbeit mit dem BAFU sowie dem Bundesamt für Verkehr (BAV) in einer Studie kürzlich berechnet. Die entsprechende Studie ist zurzeit noch nicht veröffentlicht, grobe Angaben über die Grössenordnung der Sanierungskosten zur Vermeidung von Erschütterungen sind aber bekannt. Die gesamten „Erschütterungs-Sanierungskosten“ des Schienenverkehrs liegen gemäss diesen Berechnungen im Bereich von 500 Mio. bis einer Milliarde Franken⁴⁴. Diese Gesamtkosten müssen selbstverständlich unter Berücksichtigung der Sanierungsfrist auf einen Jahreswert herunter gebrochen werden. Auf diese Weise ergeben sich effektive jährliche Kosten durch Erschütterungen aus dem Schienenverkehr von 20 bis 30 Mio. CHF.

Obschon die Sanierung den Schutz der von Erschütterungen betroffenen Menschen zum Ziel hat, kann gemäss Experten (BAFU, Abteilung Lärmbekämpfung) davon ausgegangen werden, dass mit dieser Sanierung auch die Gebäude von Erschütterungsschäden geschützt

⁴⁴ Gemäss Angaben der Abteilung Lärmbekämpfung des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).

sind. Damit umfassen die erwähnten Kosten von 20 bis 30 Mio. CHF pro Jahr sowohl die Vermeidungskosten für Schäden an Menschen als auch an Gebäuden.

Weil für den Schienenverkehr in Kürze die erwähnte aktuelle und detaillierte Studie zu den baulichen Kosten für die Vermeidung von Erschütterungen vorliegen wird, werden diese Kosten nicht mehr neu berechnet, sondern auf die Werte aus dieser Studie zurück gegriffen.

Für den Strassenverkehr kennt man gemäss Aussagen des BAFU zurzeit die analogen baulichen Kosten für die Vermeidung von Erschütterungen nicht. Das Problem beim Strassenverkehr liegt darin, dass man im Gegensatz zum Schienenverkehr keine Angaben zur Anzahl betroffener Personen bzw. Gebäude bekannt sind. Hinzu kommt, dass es im Strassenverkehr, im Gegensatz zum Schienenverkehr, keine technisch erprobte bauliche Massnahme gibt, welche die Erschütterungen zu dämpfen vermag. Bei den Strassen können diverse Arten von Fahrbahnunebenheiten die Ursache von Erschütterungen sein. Im Strassenverkehr ist zudem insgesamt viel weniger Wissen vorhanden zum Thema Erschütterungen, dies sowohl im technischen Bereich der Entstehung und Vermeidung von Erschütterungen als auch im sozio-psychologischen Bereich der Wahrnehmung von Erschütterungen. Aus all diesen Gründen ist es im Strassenverkehr nicht möglich, eine Berechnung der Vermeidungskosten der Erschütterungen vorzunehmen. Experten des BAFU (Abteilung Lärmbekämpfung) schätzen jedoch, dass die Anzahl Betroffener beim Strassenverkehr bezüglich Erschütterungen deutlich tiefer liegt als beim Schienenverkehr. Über die spezifischen Kosten zur Vermeidung von Erschütterungen (Kosten pro betroffene Person oder pro Kilometer Strasse) beim Strassenverkehr ist aber nichts bekannt, sodass selbst eine Grobschätzung der Kosten unmöglich ist. Auf eine Berechnung der Vermeidungskosten im Strassenverkehr wird mangels Datengrundlagen deshalb verzichtet.

b. Berechnung der Schadenskosten

Als Alternative zum Vermeidungskostenansatz können die externen Kosten von Erschütterungen auch über die Schadenskosten berechnet werden. Um zusätzlich zu den Vermeidungskosten aus der Studie von SBB/BAFU/BAV einen Vergleichswert zu erhalten wird deshalb auch eine Grobschätzung der Schadenskosten durch Erschütterungen vorgenommen.

Wenn die externen Kosten über die Schadenskosten berechnet werden, müssen die Kosten von beiden Schadenswirkungen berücksichtigt werden: die Schäden an Gebäuden und die Schädwirkungen auf Menschen.

Berechnung der Schädwirkung auf Gebäude (Schadenskosten):

Die Abschätzung der Schadwirkung auf Gebäude ist äusserst schwierig, da keine Abschätzungen zu den Schadenskosten bekannt sind. Insgesamt treten Schäden an Gebäuden durch Erschütterungen aus dem Verkehr nur selten auf. Wenn Gebäudeschäden als Folge von Erschütterungen vorkommen, dann am ehesten im Schienenverkehr. Für den Schienenverkehr liessen sich Zahlen möglicherweise aus Schadenersatzklagen ableiten. Meist beziehen sich diese Klagen aber nicht auf Gebäudeschäden, sondern auf die negativen Wirkungen der Erschütterung auf die Menschen.

In der vorliegenden Studie wird mangels Datengrundlagen auf die Berechnung der Schadenskosten von Erschütterungen auf Gebäude verzichtet. Es wird davon ausgegangen, dass diese Kosten im Vergleich mit den Kosten infolge Schadwirkungen auf Menschen vernachlässigbar sind.

Berechnung der Schadenswirkung auf Menschen (Schadenskosten):

Zwar sind aus neueren Studien die Expositions-Wirkungsbeziehungen zwischen der Erschütterungsstärke und dem Grad der Störwirkung auf Menschen bekannt (Klaeboe et al. 2003, Öhrström 1996, Öhrström 1997, Knall 1996). Weil sich diese Zusammenhänge jedoch nur auf die allgemeine Störwirkung von Menschen (z.B. leichte, mittlere, starke, sehr starke Störwirkung) beziehen, jedoch keine quantifizierbaren Gesundheitsschäden oder Wertvermindierungen von betroffenen Immobilien bekannt sind, ist eine exakte Monetarisierung der Schadwirkung von Menschen durch Erschütterungen nicht möglich.

Eine behelfsmässige und ziemlich grobe Abschätzung der Kosten kann jedoch vorgenommen werden, indem der in einer Untersuchung gefundene, quantitative Zusammenhang zwischen Lärm- und Erschütterungsbelastung angewandt wird (Öhrström 1996). In dieser Studie wurde die kombinierte Empfindung von Erschütterungen und Lärm untersucht. Gemäss den Ergebnissen der Studie bewirkt eine Erschütterungsbelastung, die zusätzlich zum Lärm auftritt, bei Menschen den gleichen Effekt wie eine Lärmzunahme um 10 dB⁴⁵. Unter der Annahme, dass die Kosten der Erschütterung auf diese Weise ebenfalls aus den Lärmkosten übertragbar sind, können also für jeden Lärmbetroffenen, der auch Erschütterungen ausgesetzt ist, zusätzliche Kosten analog zu zusätzlichen 10 dB berechnet werden.

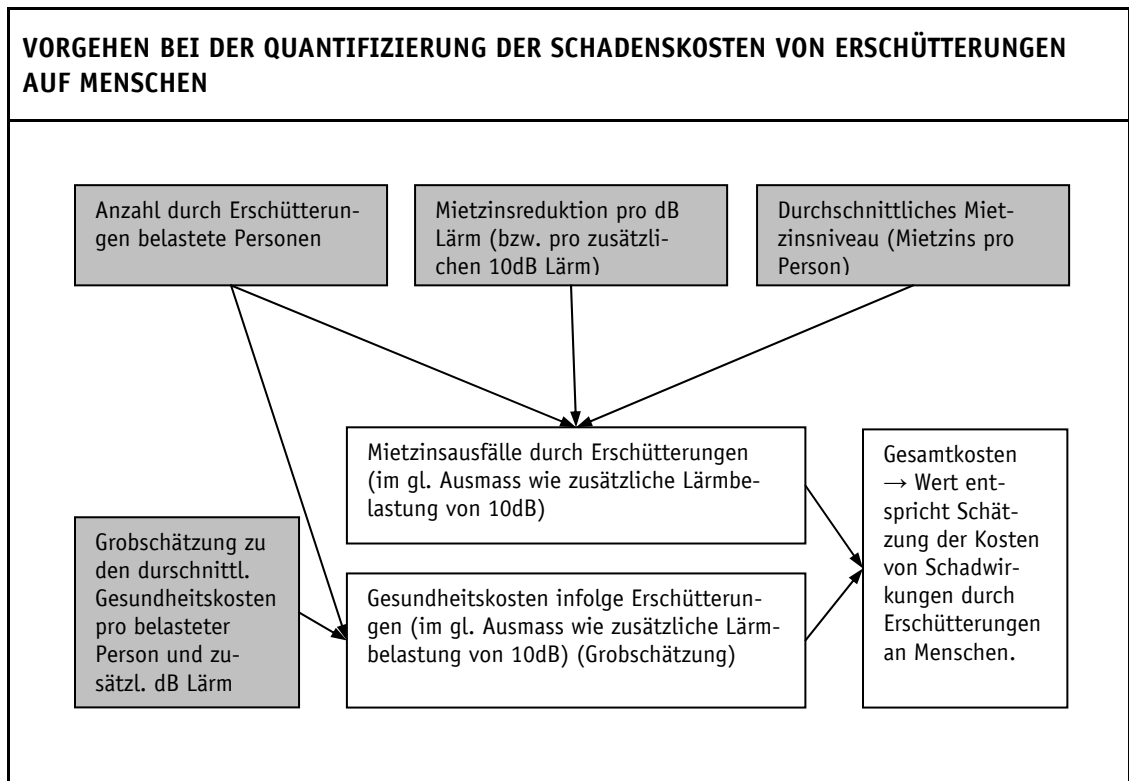
Aus den neuesten Studien zu den externen Kosten des Verkehrslärms (Ecoplan 2004b) sind die Zusatzkosten pro Dezibel (Inkrement) bekannt. Wenn also die Anzahl von über-

⁴⁵ Eine Erhöhung der Lärmintensität um 10dB bewirkt eine Verdoppelung des subjektiv wahrgenommenen Lärms. Das bedeutet, dass eine gleichzeitig zu einer Lärmimmission auftretende Erschütterungswirkung die Störwirkung des Lärms verdoppelt.

mässigen Erschütterungen betroffener Personen bekannt ist (z.B. Belastung höher als ein bestimmter Wert), können die Effekte von Erschütterungen auf den Menschen nach der gleichen Methodik wie bei den Lärmkosten abgeschätzt und monetarisiert werden. Allerdings erlaubt dieses Vorgehen nur eine Grobabschätzung, denn die Übertragbarkeit der erwähnten Berechnungsmethodik vom Lärm auf die Erschütterungen ist nicht vollständig gegeben.

Bei der Berechnung der externen Kosten des Verkehrslärms werden die Kosten aus Mietzinsausfällen (als Indikator für die allgemeine Belästigungswirkung von Lärm) sowie die durch den Lärm verursachten Gesundheitskosten (infolge ischämischer Herzkrankheiten und durch Bluthochdruck bedingte Krankheiten) berücksichtigt (Ecoplan 2004b). Dieses Vorgehen wird auch hier angewandt. Exakt kann die Berechnung jedoch nur bei den Mietpreisausfällen vorgenommen werden. Bei den Gesundheitskosten kann nur eine Grobschätzung gemacht werden, weil das absolute Belastungsniveau nicht bekannt ist, sondern nur die Differenz (10 dB).

Figur 21 zeigt das in der vorliegenden Studie gewählte Vorgehen für die Abschätzung der Schadenskosten von Erschütterungswirkungen auf Menschen. Da den Zahlen jedoch keine fundierte Expositions-Wirkungsbeziehung zugrunde liegt, handelt es sich bei der dargestellten Methodik aber nur um eine grobe Abschätzung zur Verifizierung der Werte gemäss Vermeidungskostenansatz.



Figur 21 Die grauen Felder zeigen die nötigen Inputdaten, die weissen Felder repräsentieren Outputdaten.

Bei der Quantifizierung der Schadenskosten ergibt sich möglicherweise ein Überlagerungsproblem mit den Lärmkosten. Gerade bei den Schäden durch Mietzinsausfälle stellt sich die Frage einer Doppelzählung. Es wäre nämlich denkbar, dass in Studien über den Einfluss des Lärms auf das Mietzinsniveau implizit auch die negativen Effekte allfälliger Erschütterungen mitgezählt worden sind, womit die Erschütterungskosten eigentlich schon mit den Lärmkosten abgedeckt wären. Diese Frage lässt sich nicht abschliessend klären.

Bisherige Quantifizierungen der Kosten

Zu den externen Kosten von Erschütterungen aus dem Verkehr sind bis anhin – mit Ausnahme der oben erwähnten, noch unveröffentlichten Studie zu den Sanierungskosten zur Vermeidung von Erschütterungen beim Schienenverkehr – keine umfassenden Zahlen für die Schweiz oder ein anderes Land vorhanden.

3.5.2. DATENGERÜST

a. Ermittlung der Gesamtkosten mittels Vermeidungskostenansatz

Für die Vermeidungskosten im Schienenverkehr werden die Werte aus der Studie von SBB, BAFU und BAV über die Gesamtkosten für die Erschütterungssanierung des Schweizer Schienennetzes verwendet. Aufgrund dieser fundierten Datengrundlage wird keine Neuberechnung vorgenommen. Für den Strassenverkehr wird mangels Datengrundlage auf eine Quantifizierung verzichtet.

b. Berechnung der Schadenskosten

Auf die Berechnung der Schadenskosten von Erschütterungen auf Gebäude wird mangels Datengrundlage verzichtet.

Für die Berechnungen der Schadenskosten auf den Mensch werden die folgenden Daten benötigt:

› Anzahl durch Erschütterungen belastete Personen:

Für den Schienenverkehr ist aus der Sanierungsstudie von SBB/BAFU/BAV eine grobe Schätzung zur Anzahl betroffenen Personen bekannt: Rund 20'000 Personen wohnen entlang von Bahnstrecken, an welchen übermässige Belästigungen durch Erschütterungen auftreten.

Für den Strassenverkehr ist keine solche detaillierte Zahl vorhanden. Eine auch nur halbwegs verlässliche Grobschätzung der Betroffenenzahl im Strassenverkehr wagen selbst Experten nicht. Aus diesem Grund muss auf eine Berechnung der Schadenskosten durch Erschütterungen im Strassenverkehr verzichtet werden.

› Mietzinsreduktion pro dB Lärm (bzw. pro zusätzlichen 10dB Lärm):

Analog zur Lärmkostenstudie (Ecoplan 2004b) wird mit einem inkrementellen Mietzinsverlust von 0.8% pro zusätzlichem dB(A) Lärm gerechnet. Weil davon ausgegangen wird, dass Erschütterungen wie eine zusätzliche Lärmbelastung von 10 dB(A) wirken, erleidet also jeder Betroffene einen Schaden in der Höhe von 8% Mietzinsverlust.

› Durchschnittliches Mietzinsniveau in der Schweiz:

Auch hier wird der Wert aus der Lärmkostenstudie (Ecoplan 2004b) verwendet. Dort wird die durchschnittliche Miete in der Schweiz auf 1'107 CHF pro Monat geschätzt. Bei einer Gesamtzahl Wohnungen in der Schweiz von 3.569 Mio. und einer gesamten Wohnbevölke-

rung von 7.209 Mio.⁴⁶ ergibt sich somit ein durchschnittlicher Mietzins von 6'580 CHF pro Person und Jahr. Bei einer Schadenshöhe im Ausmass von 8% des Mietzinses ergibt dies ein Schadenskostensatz von 526 CHF pro betroffener Person und Jahr.

› **Durschnittl. Gesundheitskosten pro belasteter Person und zusätzlichem dB Lärm (Grobschätzung):**

Auf Basis eines einfachen, internen Excel-Tools für die Berechnung von Gesundheitskosten durch Verkehrslärm (basierend auf der Methodik von Ecoplan 2004b) wurde ein Kostensatz für die Gesundheitskosten von jährlich 377 CHF pro betroffener Person und zusätzlichen 10 dB Lärm berechnet. Pro dB Lärm ergibt dies ein Wert von 38 CHF pro Person und Jahr. Der Wert ist jedoch stark abhängig vom absoluten Lärmniveau, zu welchem die Erschütterung hinzukommt. Deshalb entspricht der Wert nur einer Grobschätzung.

3.5.3. BERECHNUNGEN UND RESULTATE

a. Ermittlung der Gesamtkosten mittels Vermeidungskostenansatz

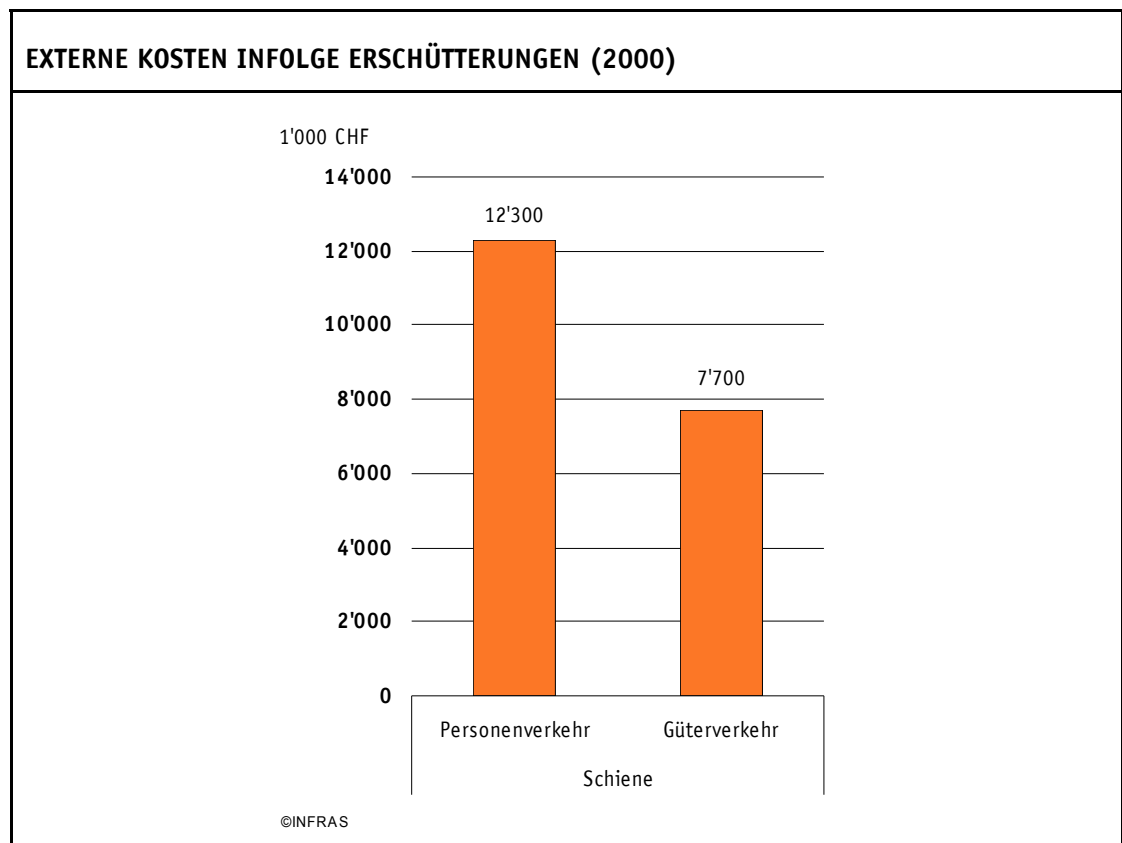
Die beste und verlässlichste Datengrundlage für die Abschätzung der externen Kosten durch Erschütterungen im Schienenverkehr stellt die Studie von SBB, BAFU und BAV dar, in welcher die Kosten baulicher Massnahmen zur Eindämmung der Erschütterungen berechnet wurden (siehe voriges Kapitel). Gemäss dieser Studie betragen die durchschnittlichen jährlichen Kosten für die Vermeidung von Erschütterungen aus dem Schienenverkehr rund 20 bis 30 Mio. CHF. Weil in der vorliegenden Studie immer alle Kostenberechnungen auf konservativen Annahmen beruhen, wird also von **jährlichen externen Kosten durch Erschütterungen aus dem Schienenverkehr von 20 Mio. CHF** ausgegangen.

Für den Strassenverkehr liegen leider keine adäquaten Zahlen zu der Höhe möglicher Vermeidungskosten vor. Eine einigermaßen genaue Abschätzung lässt sich nicht machen. Experten schätzen jedoch, dass diese Kosten beim Strassenverkehr höchstens gleich gross, wohl eher aber kleiner sind als beim Schienenverkehr.

Figur 22 zeigt die mittels Vermeidungskostenansatz ermittelten externen Kosten durch Erschütterungen des Schienenverkehrs. Die Allokation auf den Personen- bzw. Güterverkehr erfolgt über die Verkehrsleistung (Brutto-Tonnenkilometer). Auf diese Weise ergeben sich

46 Quelle: Daten des BFS aus der Volkszählung 2000 (BFS 2005a)

für den Schienenpersonenverkehr externe Kosten infolge Erschütterungen von knapp 12.3 Mio. CHF pro Jahr, für den Schienengüterverkehr sind es gut 7.7 Mio. CHF pro Jahr.



Figur 22

b. Ermittlung der Kosten via Schadenskosten

Als Alternative zu den Vermeidungskosten können die externen Kosten durch Erschütterung auch via Schadenskosten berechnet werden. Mangels Datengrundlagen lässt sich jedoch eine solche Abschätzung nur für den Schienenverkehr, nicht aber für den Strassenverkehr vornehmen. Dieser Berechnungsweg beruht aber auf zum Teil sehr groben Abschätzungen und dient deshalb nur der Verifizierung der ersten Berechnungsmethode (via Vermeidungskosten). Das Vorgehen ist in der Figur 21 dargestellt.

Gemäss der Studie von SBB/BAFU/BAV sind rund 20'000 Personen durch Erschütterungen des Schienenverkehrs betroffen. Auf Basis dieser Zahl ergeben sich für das Jahr 2000 Mietzinsausfälle infolge Erschütterungen im Umfang von etwa 10.5 Mio. CHF. Zu den Schäden durch Mietzinsausfälle kommen noch die Gesundheitskosten infolge der Erschütterungswirkungen hinzu. Eine Grobschätzung dieser Gesundheitskosten ergibt einen Wert von

rund 7.5 Mio. CHF pro Jahr. Damit betragen die gesamten Schadenskosten durch Erschütterungen des Schienenverkehrs gemäss dieser Grobrechnung jährlich rund 18 Mio. CHF. Diese Abschätzung der Schadenskosten liegt also in der gleichen Grössenordnung wie der Wert von 20 Mio. CHF Vermeidungskosten pro Jahr.

3.6. ZUSÄTZLICHE UMWELTKOSTEN IN SENSIBLEN RÄUMEN (ALPEN- RAUM)

3.6.1. QUANTIFIZIERUNGSMETHODIK

Im Anhang A1 werden die verschiedenen zusätzlichen Kosten des Verkehrs im Alpenraum diskutiert. Um eventuelle Doppelzählungen mit den bereits vorliegenden Studien zu den externen Verkehrskosten in den Bereichen Natur und Landschaft, Lärm und Gesundheit zu vermeiden sowie aus Gründen der Datenverfügbarkeit werden für diesen Kostenbereich lediglich die aufgrund der Verkehrsinfrastruktur quantifizierbaren Nutzenverluste der Feriengorte abgeschätzt. Es handelt sich dabei um eine erste Pilotrechnung, die Resultate haben einen indikativen Charakter und dienen als erste Orientierung über die mögliche Grössenordnung dieser Kosten.

Natur und Landschaft

Der folgende Abschnitt erläutert das Vorgehen zur Quantifizierung der zusätzlichen Kosten in sensiblen Räumen:

- › Zusätzliche Kosten im Bereich Natur und Landschaft können mit Zahlungsbereitschaftsansätzen geschätzt werden. Für die spezifische Situation in den Alpen müssten die entsprechenden Kostensätze für Verkehrsinfrastrukturen angepasst werden. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die wichtigsten Verkehrsachsen bereits in der Natur- und Landschaftsstudie erfasst worden und bewertet worden sind. Deshalb sind nur die zusätzlichen Kosten im Alpenraum aufgrund der Nutzeneinbussen für touristische Zwecke zu quantifizieren. Folgende Zahlungsbereitschaften wurden in Schweizer Studien ermittelt:
 - › Grêt-Regamey/Bepi 2004: Zahlungsbereitschaft für unverbaute Berglandschaft (keine Siedlungsbauten): CHF 27.- pro Woche; Zahlungsbereitschaft für unberührte Berglandschaft (keine Skipiste): CHF 20.- pro Woche.
 - › Tangerini/Soguel 2004: Keine konkrete Zahlungsbereitschaft ausgewiesen, sondern mittels einer multiplen Regression implizite Mietpreise für Ferienwohnungen geschätzt: Eine relative Erhöhung in der Qualität natürlicher Landschaft um 0.1 Punkte, führt zu einer positiven Veränderung des Mietpreises um 2%. Die Qualität der natürlichen Landschaft wird in zwei Schritten ermittelt: Zuerst werden verschiedene Landschaftstypen in einer Ordinalskala angeordnet (mit Reihenfolge der Typen von "am Besten" bis "am Schlechtesten" und mit Abständen zwischen den Typen von "Abstand null" bis "Abstand extrem"), dann wird diese Anordnung mittels MACBETH (measuring attractiveness by a categorical-based evaluation technique) in eine Intervallskala von 0

bis 1 überführt. In einer Grobschätzung ergibt sich aus dieser Regression eine ähnliche Grössenordnung für die Zahlungsbereitschaft wie bei der Studie von Grêt-Regamey/Bepi (2004).

- › Egger 1999: Zahlungsbereitschaft für Natur- und Landschaftsschutz in der Schweiz: CHF 30.- pro Person und Monat. Diese Studie bezieht sich jedoch nur auf die Präferenz für Natur- und Landschaftsschutz und nicht auf die Präferenz für natürliche, unverbaute Landschaft per se.
- › Als Grundgesamtheit der Quantifizierung werden aus allen Schweizer Gemeinden diejenigen Gemeinden aus der Alpenkonvention⁴⁷ bestimmt, die mit Infrastruktur des höheren Verkehrsnetzes ausgestattet sind. Zum höheren Strassennetz zählen Nationalstrassen (Autobahnen) und Kantonsstrassen, zum höheren Schienennetz Normalspurbahnlinien. Dieser Einschränkung auf das höhere Verkehrsnetz liegt die Annahme zu Grunde, dass nicht alle Verkehrsinfrastrukturen im Landschaftsbild als störend empfunden werden⁴⁸.
- › Mit dem Indikator „Anteil Verkehrsfläche an gesamter Siedlungsfläche“ ist ein Zusammenhang zwischen der Zahlungsbereitschaft für nicht durch Verkehrsinfrastruktur verbaute Fläche und dem Verkehrsnetz⁴⁹ gegeben.
- › Aus der Schweizerischen Tourismus-Statistik (BFS 2001) wird die Anzahl der Feriengäste (Logiernächte pro Gemeinde im Jahr 2000) der Hotellerie und Parahotellerie bestimmt und den Gemeinden der Alpenkonvention mit Infrastruktur des höheren Verkehrsnetzes zugeordnet.
- › Für die Quantifizierung der zusätzlichen Kosten im Alpenraum wird die Zahlungsbereitschaft für unverbaute Landschaft nicht auf einen bestimmten Betrag fixiert, sondern ein Wertebereich zwischen CHF 20.- und CHF 30.- gewählt (vgl. Grêt-Regamey/Bepi 2004, Tangerini/Soguel 2004). Aus dieser minimalen und maximalen Zahlungsbereitschaft für unverbaute Landschaft kann eine Untergrenze und Obergrenze der zusätzlichen Kosten im Alpenraum ermittelt werden.
- › Für die betroffenen Gemeinden wird mittels des Indikators „Anteil Verkehrsfläche an gesamter Siedlungsfläche“, der Anzahl Feriengäste und der Zahlungsbereitschaft für nicht

⁴⁷ Die Alpenkonvention ist ein völkerrechtlicher Vertrag zwischen den acht Alpenländern (Deutschland, Frankreich, Italien, Liechtenstein, Monaco, Österreich, Schweiz, Slowenien) und der Europäischen Gemeinschaft zum Schutz des besonders sensiblen und verwundbaren Ökosystems und zur Förderung der nachhaltigen Nutzung und Entwicklung des Alpenraumes. In der Schweiz gehören Gemeinden folgender Kantone der Alpenkonvention an: Appenzell I. Rh., Appenzell A. Rh., Bern, Fribourg, Glarus, Graubünden, Luzern, Nidwalden, Obwalden, St. Gallen, Schwyz, Ticino, Uri, Vaud und Valais.

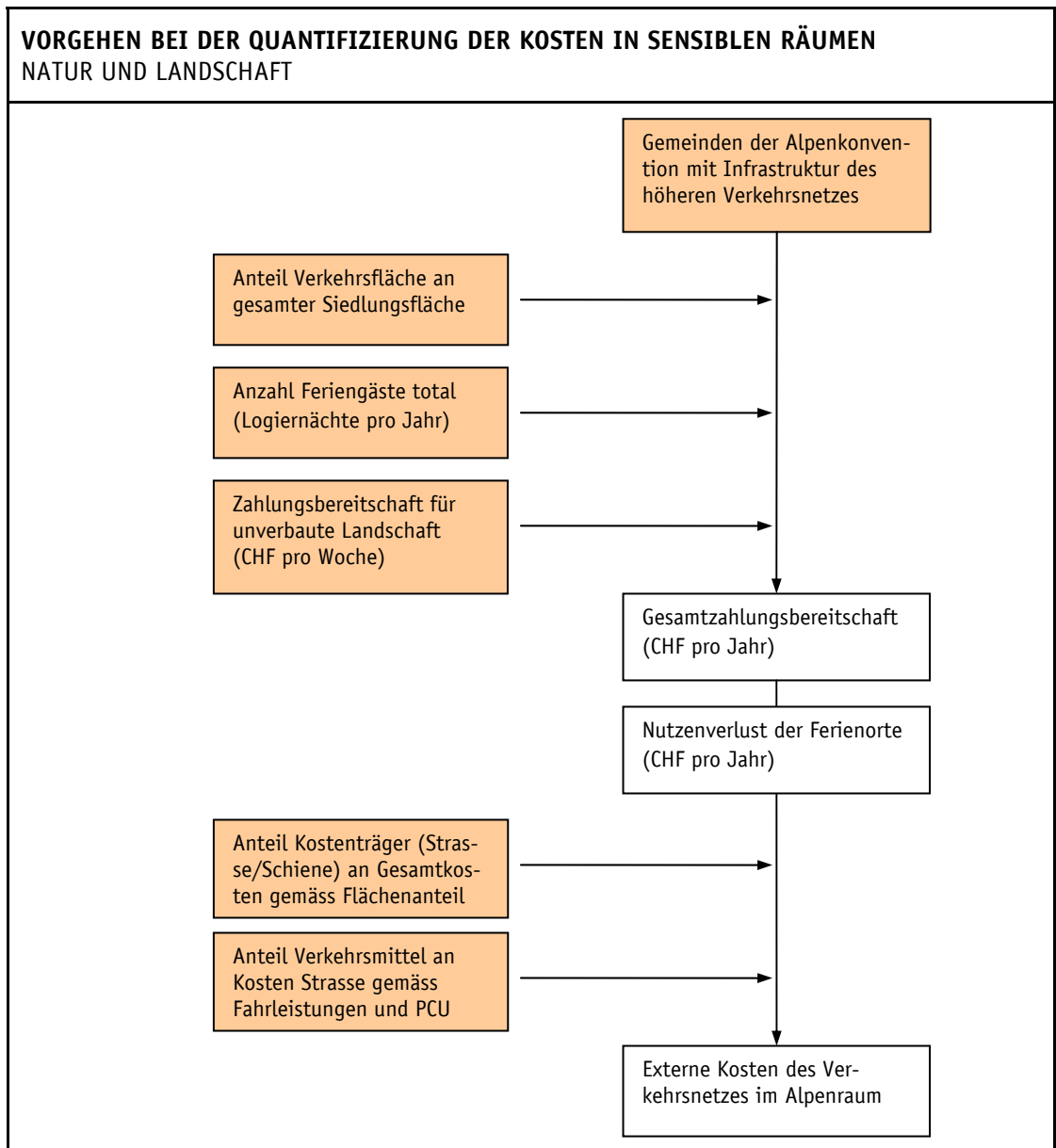
⁴⁸ Die im alpinen und voralpinen Raum (v.a. GR, VS) vorhandenen Meterspurbahnen stellen für viele Besucher oft eine touristische Attraktion dar, die das Landschaftsbild eher bereichert denn beeinträchtigt.

⁴⁹ Streng genommen wurden in der Studie Grêt-Regamey/Bepi (2004) nur Zahlungsbereitschaften für nicht durch Gebäude überbaute Landschaften in den Alpen ermittelt.

durch Verkehrsinfrastruktur verbaute Landschaft die Gesamtzahlungsbereitschaft für natürliche, unverbaute Landschaft im Alpenraum berechnet. Diese Gesamtzahlungsbereitschaft entspricht den zusätzlichen Umweltkosten im Alpenraum.

- › Die Allokation der Gesamtkosten auf die Verkehrsträger Strasse und Schiene erfolgt auf Basis der Flächenanteile der beiden Verkehrsträger. Die Allokation der Kosten innerhalb des Verkehrsträgers Strasse auf die verschiedenen Verkehrsmittel erfolgt auf Basis der mit Personenwagen-Einheiten (PCU) gewichteten Fahrleistungen im Strassenverkehr (Fahrleistungen multipliziert mit PCU).

Figur 23 zeigt das methodische Vorgehen bei der Quantifizierung der Kosten grafisch auf.



Figur 23 Die grauen Felder zeigen die nötigen Inputdaten, die weissen Felder repräsentieren Outputdaten.

Lärm:

› Beim Lärm sind zwei Vorgehensweisen denkbar.

- › Bewertung der weiteren Kosten, falls die Empfindlichkeitsstufe im Berggebiet tags und nachts um jeweils 5 dB(A) gesenkt wird.
- › Bewertung der weiteren Kosten anhand eines Zahlungsbereitschaftsansatzes. Für die Anwendung dieses Ansatzes ist eine Zahlungsbereitschaft für mehr Ruhe bzw. eine ruhigere Umgebung notwendig. Die Berechnung der externen Kosten würde dann ana-

log zum Ansatz für Eingriffe in Natur- und Landschaft erfolgen. Allerdings fehlen im Moment jegliche Grundlagen hinsichtlich der Zahlungsbereitschaft für eine ruhigere Umgebung. Indirekt führen diese vermutlich schon heute zu niedrigeren Übernachtungszahlen in Gemeinden, die durch Verkehrslärm übermässig belastet sind.

- › Allerdings fehlen hier klar differenzierte Mengengerüste für den alpinen Raum. Ausserdem besteht die Gefahr, dass zumindest ein Teil dieser Kosten im Rahmen der Studie zu den externen Lärmkosten bereits berücksichtigt wurde. Auf eine Anwendung dieses Ansatzes im Sinne einer vorsichtigen Abschätzung wird deshalb verzichtet.

3.6.2. DATENGERÜST

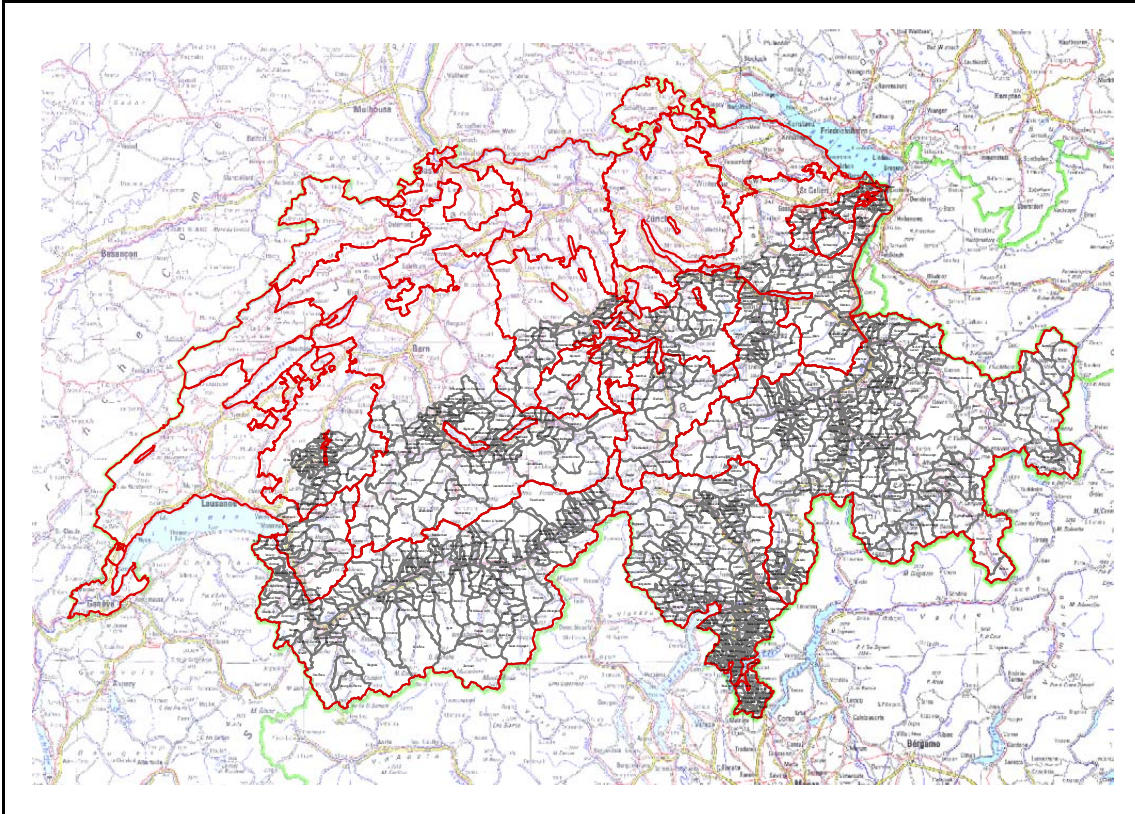
Natur und Landschaft

- › Übernachtungszahlen (Logiernächte pro Gemeinde im Jahr 2000) auf Basis BFS (BFS 2001)
- › Anteil Verkehrsflächen an gesamter Siedlungsfläche auf Basis Arealstatistik BFS (BFS/GEOSTAT 2001 und BFS/GEOSTAT 2005)
- › Wertgerüst: Zahlungsbereitschaftssätze aus aktuellem NFP 48 Forschungsprojekt (Grêt-Regamey/Bepi 2004, Tangerini/Soguel 2004)

3.6.3. BERECHNUNGEN UND RESULTATE

Figur 24 zeigt die Gemeinden der Alpenkonvention, welche als Grundlage für die Berechnung der zusätzlichen Umweltkosten in sensiblen Räumen dienen.

GEMEINDEN DER ALPENKONVENTION



Figur 24 Darstellung ArcView. Die grau umrandeten Gemeinden gehören zur Alpenkonvention.

Von den dargestellten Gemeinden der Alpenkonvention werden diejenigen bestimmt, welche einerseits mit Infrastruktur des höheren Verkehrsnetzes ausgestattet sind und andererseits Übernachtungszahlen von Feriengästen aus dem Inland und Ausland aufweisen. Die betroffenen Gemeinden sind in Tabelle 19 nach Kanton zusammengefasst und ihre Siedlungsflächen, Verkehrsflächen des höheren Strassen- und Schienennetzes sowie Logiernächte aggregiert aufgeführt.

SIEDLUNGS- UND VERKEHRSFLÄCHEN UND LOGIERNÄCHTE GEMEINDEN DER ALPENKONVENTION NACH KANTON IN HA				
Kanton	Siedlungsflächen	Flächen Strasse	Flächen Schiene	Logiernächte
Bern	3'335	341	47	2'444'013
Luzern	1'277	140	26	1'474'727
Uri	951	345	35	187'570
Schwyz	1'727	264	58	581'232
Obwalden	792	60	0	326'575
Nidwalden	561	82	0	289'239
Glarus	444	73	4	83'099
Fribourg	291	35	1	51'135
Appenzell Ausserrhoden	704	197	0	201'054
Appenzell Innerrhoden	97	16	0	45'376
St. Gallen	2'914	534	64	590'231
Graubünden	3'772	856	13	4'781'028
Ticino	2'841	508	59	2'519'060
Vaud	1'586	304	27	1'040'310
Valais	4'447	892	83	1'608'446
Total Alpenkonvention	25'739	4'648	417	16'223'100

Tabelle 19 Siedlungsflächen und Verkehrsflächen in ha. Quelle: BFS/GEOSTAT 2001 und 2005). Logiernächte: im Jahr 2000 von Gästen aus Inland und Ausland (Quelle: BFS 2001). Dargestellt sind nur Siedlungs- und Verkehrsinfrastrukturflächen sowie Logiernächte von denjenigen Gemeinden, bei denen National- oder Kantonsstrassen bzw. Normalspurbahnen auf Gemeindegebiet verlaufen.

Aus der oben definierten minimalen und maximalen Zahlungsbereitschaft (CHF 20 bzw. 30 pro Person und Woche) für unverbauete Landschaft wird eine Untergrenze und Obergrenze für die Gesamtzahlungsbereitschaft für nicht durch Verkehrsfläche verbauete Landschaft ermittelt. Die Gesamtzahlungsbereitschaft berechnet sich nach folgender Formel:

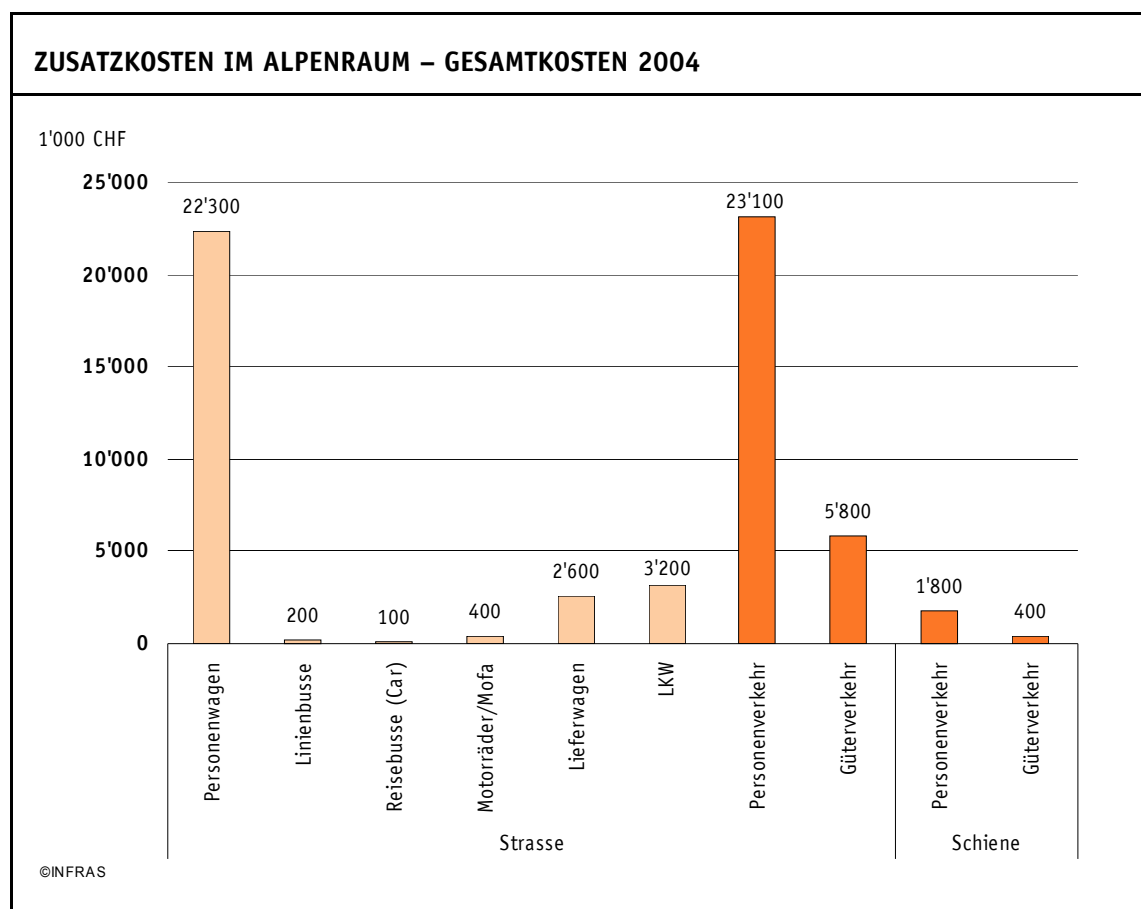
$$\frac{\text{Verkehrsfläche}}{\text{Siedlungsfläche}} \times \text{Logiernächte pro Jahr} \times \text{Zahlungsbereitschaft pro Tag}$$

Tabelle 20 veranschaulicht diese Gesamtzahlungsbereitschaft als externe Kosten des höheren Verkehrsnetzes für die beiden Verkehrsträger Strasse und Schiene und im Total.

KOSTEN DES HÖHEREN VERKEHRSNETZES			
Zahlungsbereitschaft	Kosten Strasse	Kosten Schiene	Kosten Total
CHF 20.-	19'200	1'500	20'700
CHF 30.-	28'900	2'200	31'100

Tabelle 20 Verkehrskosten in 1'000 CHF.

Für die nachfolgenden Berechnungen und Ausführungen werden die Resultate für die obere Bandbreite der Zahlungsbereitschaft (CHF 30 pro Woche) verwendet. Figur 25 zeigt die zusätzlichen Kosten im Alpenraum für die Verkehrsträger Strasse und Schiene und innerhalb des Verkehrsträgers Strasse für die Verkehrsmittel Personenwagen, Linienbusse, Reisebusse, Motorräder/Mofa, Lieferwagen und LKW.



Figur 25 Kosten in 1'000 CHF.

Beurteilung der Resultate:

- › Die resultierenden zusätzlichen Kosten im Alpenraum stellen vermutlich eine Untergrenze der tatsächlichen Kosten dar. Insbesondere wurden folgende Effekte nicht in die Quantifizierung einbezogen, da entsprechende Daten und Modelle fehlen:
 - › Auch die ganzjährigen Bewohner von Gemeinden im Alpenraum haben eine gewisse Zahlungsbereitschaft für unverbaute Landschaft. Diese Zahlungsbereitschaft wurde in

der Quantifizierung nicht berücksichtigt, weil es bisher erst wenige Studien gibt, die eine solche Zahlungsbereitschaft direkt ausweisen.

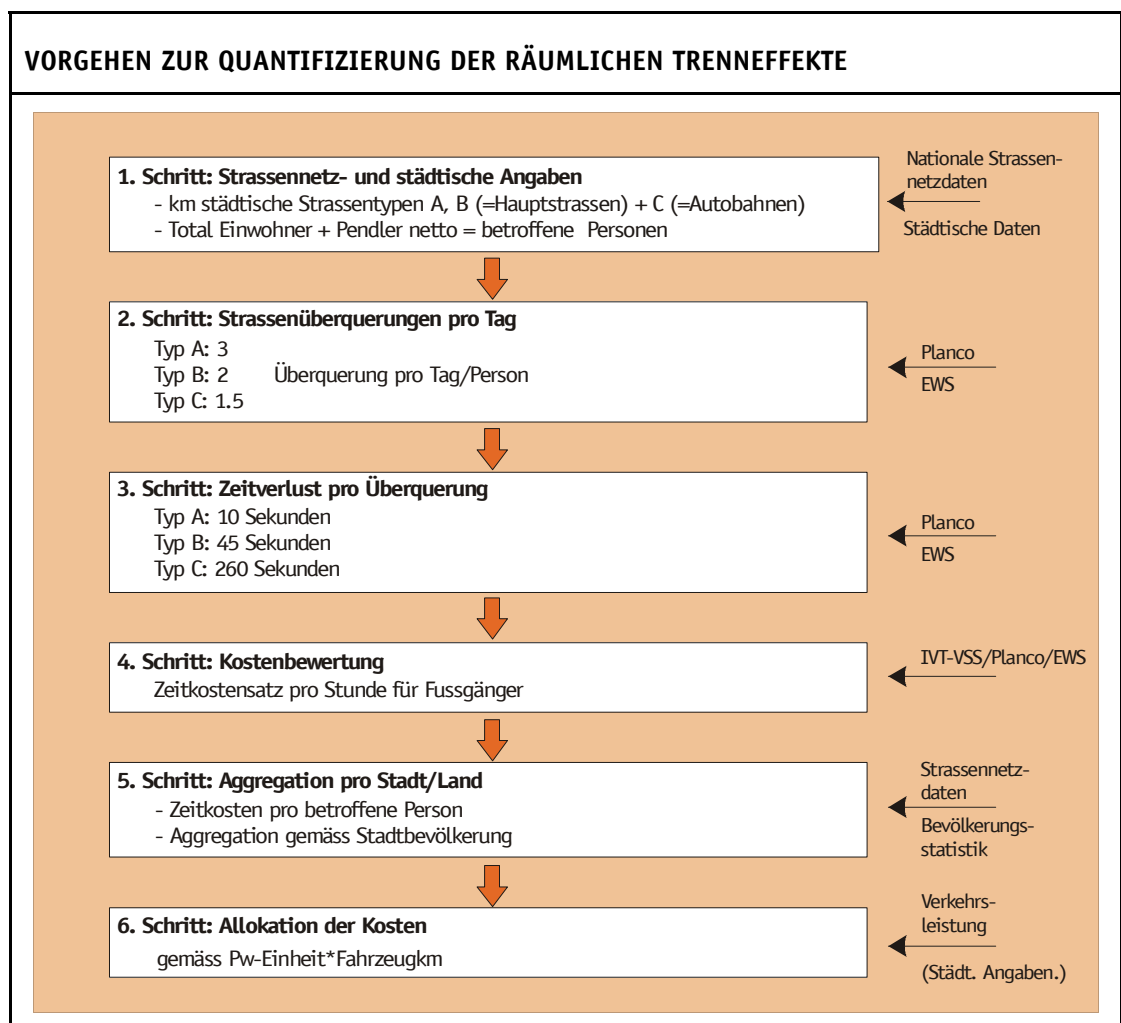
- › Gemeinden mit einem hohen Anteil an Verkehrsinfrastruktur auf Gemeindegebiet sind per se nicht sehr attraktiv für den Tourismus und weisen deshalb in der Tourismus-Statistik weniger oder gar keine Logiernächte auf. Die entgangenen Einnahmen der Tourismusbranche in solchen Gemeinden stellen ebenfalls externe Kosten dar, können aber nicht quantifiziert werden.
- › Der Einbezug von Zahlungsbereitschaftsansätzen für weniger Lärm würde allenfalls höhere Kosten zur Folge haben, hierzu fehlen allerdings die Grundlagen und es besteht die Gefahr von Doppelzählungen mit den bereits quantifizierten Lärmkosten.
- › Die gewählte Methodik basiert auf Zahlungsbereitschaftsansätzen, die streng genommen nur für mit Gebäuden überbaute Gebiete gelten. Strassen stellen als reine Infrastruktur betrachtet vermutlich geringere Eingriffe in das Landschaftsbild dar als Gebäude (Ausnahme: Kunstbauten wie Brücken etc.) und würden eine eher geringere Zahlungsbereitschaft nach sich ziehen. Umgekehrt sind mit der Verkehrsinfrastruktur zusätzliche Emissionen (Lärm, Luftschadstoffe etc.) verbunden, die zu höheren externen Kosten führen.

4. ZUSÄTZLICHE EXTERNE KOSTEN FÜR VERKEHRSTEILNEHMER IN STÄDTISCHEN RÄUMEN

4.1. ZUSÄTZLICHE KOSTEN IN STÄDTISCHEN RÄUMEN: TRENNEFFEKTE UND RÄUMLICHE VERDRÄNGUNG FÜR LV

4.1.1. QUANTIFIZIERUNGSMETHODIK

In INFRAS/IWW 2000 wurde eine detaillierte Vorgehensweise entwickelt, die wir nach wie vor als zweckmässig erachten und für die Abschätzung der Kosten im städtischen Raum heranziehen. Die folgende Übersicht zeigt das Vorgehen für die **Trenneffekte im städtischen Raum**:



Figur 26 Quelle: nach INFRAS/IWW (2000).

Zentrale nicht bekannte Inputdaten sind insbesondere die Anzahl der betroffenen Personen sowie die Anzahl der Überquerungen pro Person, Strasse und Tag. Voraussetzung ist ausserdem die Charakterisierung des städtischen Strassennetzes hinsichtlich der Trennwirkung. Diese ist von der Verkehrsmenge, der Anzahl Spuren, der zulässigen Höchstgeschwindigkeit sowie baulicher Rahmenbedingungen (Gehwege, Leitplanken, etc.) abhängig. Zur Quantifizierung der Zeitverluste wurden Werte aus EWS (1997) verwendet. Diese Quantifizierung wurde in Anlehnung an internationale Studien für Städte mit 50'000 und mehr Einwohnerinnen und Einwohner angewendet. In der Schweiz fallen hierunter insgesamt 8 Städte (Zürich, Genève, Basel, Bern, Lausanne, Winterthur, St. Gallen, Luzern).

Für die Abschätzung der Raumknappheit im Ballungsgebiet schlagen wir folgendes Schema vor (nach INFRAS/IWW 2000):



Figur 27 nach INFRAS/IWW (2000).

Die Quantifizierung beschränkt sich wiederum auf grosse Städte ab 50'000 Einwohnern.

4.1.2. DATENGERÜST

Für die Abschätzung der Kosten standen folgende Datengrundlagen zur Verfügung:

- › Infrastrukturnetz im städtischen Raum (Strasse, Schiene, Velo): Arealstatistik BFS (BFS/GEOSTAT 2001), BFS Verkehrsstatistik.
 - › Strassennetz relativ gut erfasst
 - › keine integrierte Statistik der Fahrradwege im öffentlichen Raum.
- › Bevölkerungszahlen: BFS Bevölkerungszahlen
- › Pendlerzahlen: Auswertungen Volkszählung 2000 (VZ2000)
- › Verkehrszahlen im städtischen Raum: Aufteilung gem. Handbuch Emissionsfaktoren

Für fehlende Daten mussten Annahmen gemacht werden. Dies betrifft insbesondere die Ausgestaltung der städtischen Velowegnetze sowie der Anzahl Strassenquerung pro Person und Tag. Grösstenteils wurde auf vorhandene ausländische Quellen (Planco (1990), EWS (1997)) zurückgegriffen und die Indikatoren auf Schweizer Verhältnisse angepasst.

4.1.3. BERECHNUNGEN UND RESULTATE

Quantifizierung der räumlichen Trenneffekte

Die folgende Tabelle zeigt die Referenzgrössen für alle Städte mit mehr als 50'000 BewohnernInnen.

BASISDATEN STÄDTISCHE STRASSENNETZE STÄDTE > 50'000 EINWOHNERINNEN							
	Strassenlänge	Einwohner	Pendler-saldo	Total betroffene Bevölkerung	Strassen-Typ A	Strassen-Typ B	Strassen-Typ C
	km	in 1000	in 1000	in 1000	km	km	km
Zürich	790	363	170	533	559.8	123.2	9.8
Genève	182	178	64	242	129.0	28.4	2.3
Basel	314	167	78	245	222.3	48.9	3.9
Bern	350	129	86	214	248.2	54.6	4.3
Lausanne	217	125	46	170	153.8	33.8	2.7
Winterthur	295	90	9	100	208.9	46.0	3.7
St. Gallen	171	73	26	99	121.4	26.7	2.1
Luzern	136	59	27	86	96.6	21.3	1.7

Tabelle 21 Quellen: BFS 2005, Stand 5.8.2005 (Einwohner, Pendler, Strassenlänge). Bemerkungen: Pendlersaldo ist die Summe der Zupendler abzüglich aller Wegpendler. Die Aufteilung in Strassen-Typ A, B und C erfolgt anhand der Pilotrechnung für die Stadt Zürich. Es wurde zusätzlich angenommen, dass 10% der Strassen des Typs A, 20% des Typs B und 30% des Typs C keine Trennwirkung aufweisen, da diese Anteile abseits von Fussgängerwunschnlinien liegen. Diese Anteile wurden in der Tabelle oben bereits abgezogen.

Die folgenden Annahmen wurden hinsichtlich der Zahl der Überquerungen pro Tag sowie der Zeitverluste getroffen:

ANZAHL ÜBERQUERUNGEN UND ZEITVERLUSTE			
	Strassen-Typ A	Strassen-Typ B	Strassen-Typ C
Charakterisierung	Gemeindestrasse	städtische Hauptstrasse 2- max. 3-spurig	Stadtautobahn (Nationalstrasse), 4-spurig
Überquerungen pro Tag	3	2	1.5
Zeitverluste beim Überqueren in Sekunden	10	45	260

Tabelle 22 Quelle: EWS (1997), eigene Schätzungen und Annahmen.

Berechnet man die gesamten Zeitverluste der betroffenen Bevölkerung pro Tag ergibt sich ein plausibler Wert von ca. 40 Sekunden pro Person und Tag. Insgesamt errechnen sich jährliche Zeitverluste von ca. 6.8 Mio. Stunden für die 8 grössten Schweizer Städte.

Die gesamten Zeitverluste werden mit einem Zeitkostensatz gewichtet. Für den Fussgängerverkehr existieren in der Schweiz nach Rücksprache mit dem ASTRA zurzeit noch keine standardisierten Zeitkostenansätze. In den soeben abgeschlossenen Aktualisierungsarbeiten zur neuen VSS Norm 671 800 wurden allerdings für Personenwagen und den öffentlichen Verkehr Zeitwerte für das Jahr 2003 bestimmt (König et al. 2004). Diese bewegen sich je nach Fahrtzweck und Verkehrsmittel zwischen CHF 9.70 (Freizeitfahrt) und CHF 32.50 (Geschäftsfahrt). Angesichts der Tatsache, dass die täglichen Zeitverluste in aller Regel sehr tief sind und teilweise nicht stark wahrgenommen werden dürften (insbesondere bei Querungen von Strassen des Typs A) wird der ein Zeitkostensatz am unteren Rand der Bandbreite ausgewählt (CHF 10 pro Stunde).

Für das städtische Bahnnetz wurde ein analoges Vorgehen gewählt. In einer Pilotrechnung (INFRAS/IWW 2000) wurden in der Stadt alle trennungswirksamen Bahnlinien erhoben. Insgesamt fallen ca. 21.5 km Bahnlinien in diese Kategorie. Diese Strecken wurden wie Strassen des Typs C behandelt. Die Hochrechnung ergibt aggregierte Zeitverluste in der Grössenordnung von 1.8 Mio. Stunden pro Jahr. Die Bewertung erfolgte mit dem gleichen Bewertungsansatz.

Quantifizierung der Raumknappheitseffekte

Für die Quantifizierung der Knappheitseffekte wurde auf das gleiche Strassennetz zurückgegriffen. Folgenden Annahmen wurden gemacht:

- › Für Strassen des Typs C (städtische mehrspurige Autostrassen, Nationalstrassen) werden baulich abgegrenzte Velowege erstellt. Für ca. 25% der Strassen dieses Typs existieren diese bereits.
 - › Für Strassen des Typs B (städtische Hauptstrassen) wird ein Veloweg im Strassenraum markiert (sog. "Velostreifen"). Für ca. 25% der Strassen dieses Typs existieren diese bereits.
 - › Es werden die jeweiligen Jahreskosten für Velowege bzw. Velospuren angerechnet.
- Die folgende Tabelle zeigt die wesentlichen Kostendaten und die entsprechenden Quellen:

KOSTENDATEN FÜR DIE QUANTIFIZIERUNG VON RAUMKNAPPHEITSEFFEKTEN			
	Einheit	Wert	Quelle
Veloweg (baulich abgetrennt)			
Breite	m	1.5	Durchschnittswert
Länge	m	1'000	
Kosten pro m ²	CHF/m ²	350	mündliche Auskunft TBA Zürich
Investitionskosten pro km	CHF	525'000	
Jahreskosten (Annuität)	CHF/km*a	34'200	30 Jahre, 5%
Unterhaltskosten	CHF/km*a	3'000	ASTRA (2003)
Total jährliche Kosten	CHF/km*a	37'200	
Velospur – Markierung und Unterhalt			
Jahreskosten pro km	CHF/km*a	3'000	ASTRA (2003)

Tabelle 23

Resultate aggregiert

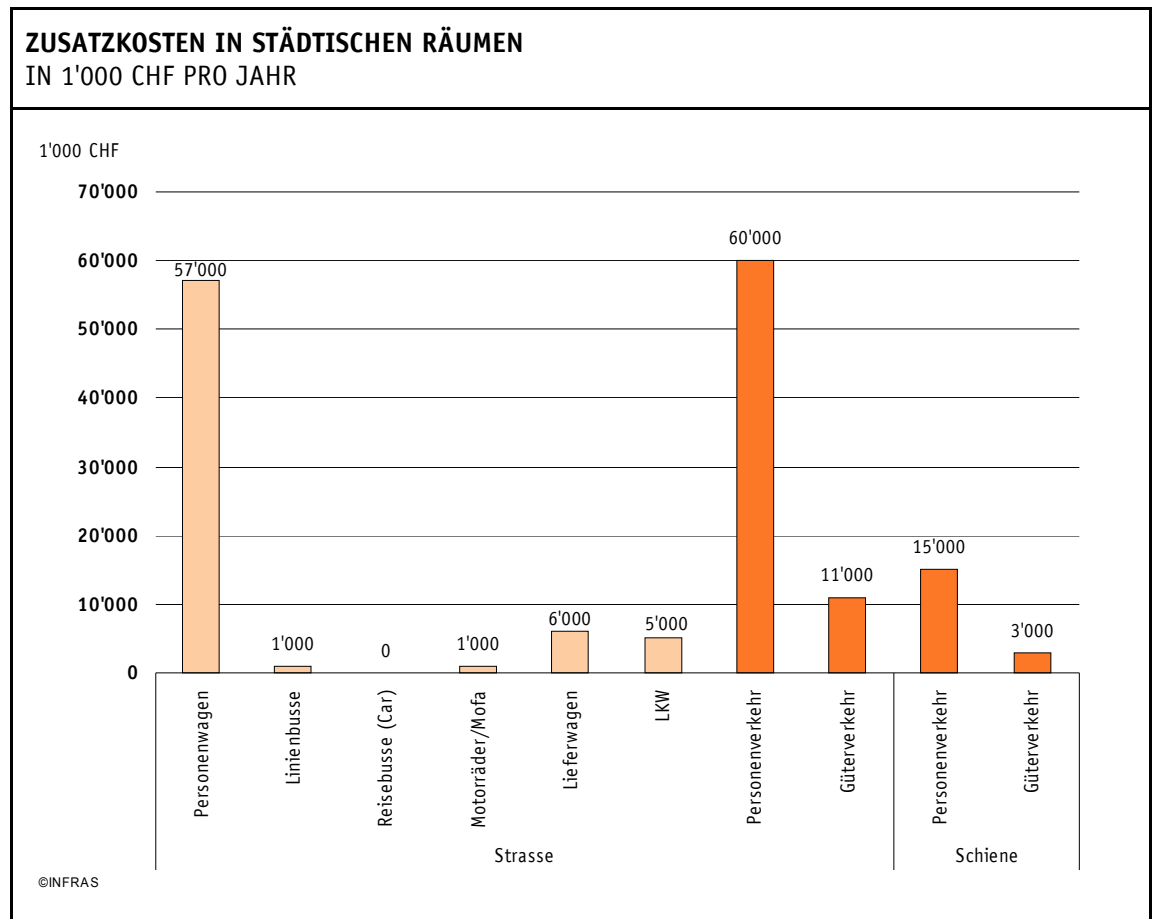
Die folgende Tabelle zeigt die aggregierten Resultate der Berechnungen:

ZUSATZKOSTEN IN STÄDTISCHEN RÄUMEN IN 1'000 CHF PRO JAHR		
	Strasse	Schiene
Trenn-/Zerschneidungseffekte	69'000	18'000
Raumknappheitseffekte	1'700	0
Total	70'700	18'000

Tabelle 24

Obige Tabelle zeigt klar, dass insbesondere die Zeitverluste beim Überqueren von Strassen zu hohen Zusatzkosten im städtischen Raum führen. Demgegenüber sind die Kosten der Raumknappheitseffekte, ausgedrückt in Zusatzkosten für das Erstellen von Velowegen und Velostreifen fast vernachlässigbar.

Die Kostenallokation erfolgte anhand der mit sog. PW-Einheiten (PCU) gewichteten Innerorts-Fahrleistungen (Details siehe Anhang Mengengerüst).



Figur 28

Im innerstädtischen Verkehr sind insbesondere die Personenwagen für den Grossteil der Zusatzkosten verantwortlich.

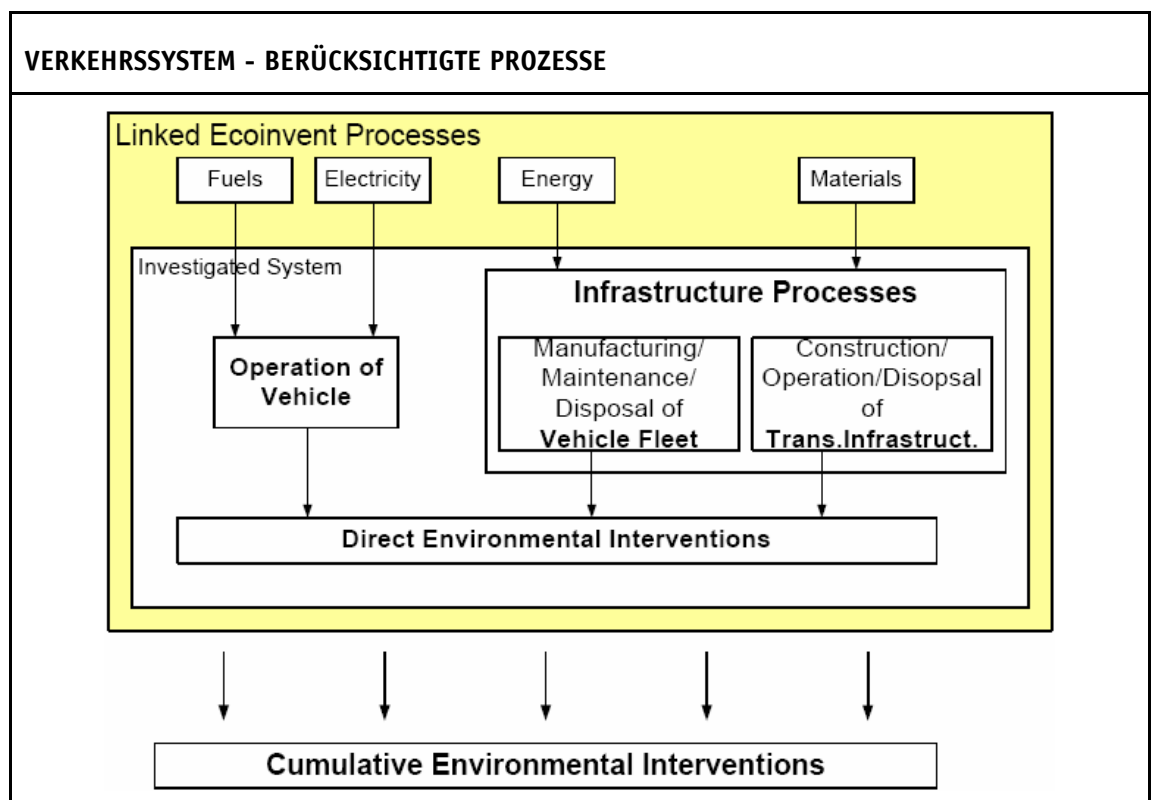
5. ZUSÄTZLICHE KOSTEN DURCH VOR- UND NACHGELAGERTE PROZESSE

5.1. QUANTIFIZIERUNGSMETHODIK

Mit Hilfe von Ökoinventardaten (insbesondere Ecoinvent 2004a+b sowie INFRAS 1995b) können die Treibhausgasemissionen der vor- und nachgelagerten Prozesse sowie der Energieproduktion bzw. Bereitstellung der Treibstoffe (sog. Precombustion) bestimmt werden. Die Bewertung dieser Treibhausgasemissionen erfolgt mit Hilfe der Kostensätze zu den Klimakosten (siehe Kapitel 2.1). Dabei ist auf die Verwendung der gleichen Szenarien für Vermeidungs- bzw. Schadenskostensätze zu achten.

Im Rahmen der Bahnstromproduktion ist der verwendete Strommix von zentraler Bedeutung. In der Basisrechnung wird der für die Schweiz relevante Bahnstrommix verwendet. In einer Sensitivitätsrechnung wird im Sinne einer sog. Grenzstrombetrachtung mit Hilfe des europäischen Durchschnittsmixes (UCTE-Mix) eine Alternativrechnung durchgeführt.

Das folgende Schaubild gibt einen Überblick über die betrachteten vor- und nachgelagerten Prozesse:



Figur 29 Quelle: Ecoinvent 2004b.

In diesem Abschnitt werden bis auf den Fahrzeugbetrieb ('Operation of Vehicle') sämtliche vor- und nachgelagerte Prozesse hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Emission von Treibhausgasen erfasst und die daraus entstehenden Kosten ausgewiesen.

Up- and Downstream-Prozesse im Strassenverkehr

Die folgende Tabelle zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Prozesse im Bereich des Strassenverkehrs:

UP- UND DOWNSTREAM-PROZESSE STRASSENVERKEHR				
Kategorie	Prozess	Funktionale Einheit	Differenzierungen	Allokation
Fahrzeuge	Herstellung	Gesamtemissionen pro Fahrzeug	PW, LW, SGF, Reisebus (Car), Linienbus, Trolleybus, Tram	Auf Basis von Emissionsfaktoren pro km Lebensfahrleistung je Fahrzeugkategorie
	Unterhalt			
	Entsorgung			
Energiebereitstellung (sog. Pre-combustion)	Herstellung Treibstoff	Gesamtemissionen pro l Treibstoff	Benzin + Diesel, Stromproduktion ÖV	Auf Basis Verbrauchsdaten (Handbuch Emissionsfaktoren, Verbrauchsdaten ÖV)
	Transport	bzw. pro kWh		
	Feinverteilung bis Tankstelle	Strom		
Infrastruktur	Bau und Erneuerung	Gesamtemissionen pro m Strasse und Jahr	Gewichteter Durchschnitt Schweizer Strassennetz	Allokation zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln anhand Brutto-tkm
	Unterhalt und Betrieb			
	Entsorgung			

Tabelle 25

Up- and Downstream-Prozesse im Schienenverkehr

Die folgende Tabelle zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Prozesse im Bereich des Schienenverkehrs:

UP- UND DOWNSTREAM-PROZESSE SCHIENENVERKEHR				
Kategorie	Prozess	Funktionale Einheit	Differenzierungen	Allokation
Fahrzeuge/ Rollmaterial	Herstellung	Gesamtemissionen pro Fahrzeug	Lokomotive, Güterwagen, Personenwagen (Fernverkehr, Regionalverkehr)	Anzahl Fzg. in der Schweiz und durchschnittliche Lebensdauer, Allokation Personen-/ Güterverkehr auf Basis Rollmaterialpark
	Unterhalt			
	Entsorgung			
Energiebereitstellung (sog. Pre-combustion)	Herstellung Treibstoff/Stromproduktion	Gesamtemissionen pro l Treibstoff (Diesel) bzw. pro kWh Strom	Diesel, Stromproduktion SBB (Sensitivitätsrechnung mit UCTE Mix)	Auf Basis Verbrauchsdaten SBB, Allokation Personen-/ Güterverkehr auf Basis Bruttotkm
	Transport/Übertragung			
	Feinverteilung bis Tankstelle/ Unterwerk			
Infrastruktur	Bau und Erneuerung	Gesamtemissionen pro m Schiene und Jahr	Gewichteter Durchschnitt Schweizer Schienennetz	Allokation zwischen Personen- und Güterverkehr auf Basis Bruttotkm
	Unterhalt und Betrieb			
	Entsorgung			

Tabelle 26

5.2. DATENGERÜST

Die notwendigen Daten sind in den Ökoinventaren (Ecoinvent 2004a+b) sowie für den Treibstoffverbrauch im Strassenverkehr im Handbuch Emissionsfaktoren (INFRAS 2004b) vorhanden. Aus lizenzrechtlichen Gründen dürfen die Output-Daten aus Ecoinvent nicht in einer Weise dargestellt werden, die eine Nachberechnung ohne kostenpflichtige Nutzung der Ecoinvent Datenbank ermöglichen würde. Deshalb werden für die verschiedenen Verkehrsmittel und -träger nur aggregierte Treibhausgasemissionen aus vor- und nachgelagerten Prozessen dargestellt.

Die folgenden Treibhausgasemissionen aus vor- und nachgelagerten Prozessen sind relevant: CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, HFC (hydrofluorocarbons), PFC (perfluorocarbons). Die weiteren Treibhausgase werden mit Hilfe des sog. Global Warming Potential (GWP) in CO₂-Äquivalente umgerechnet.

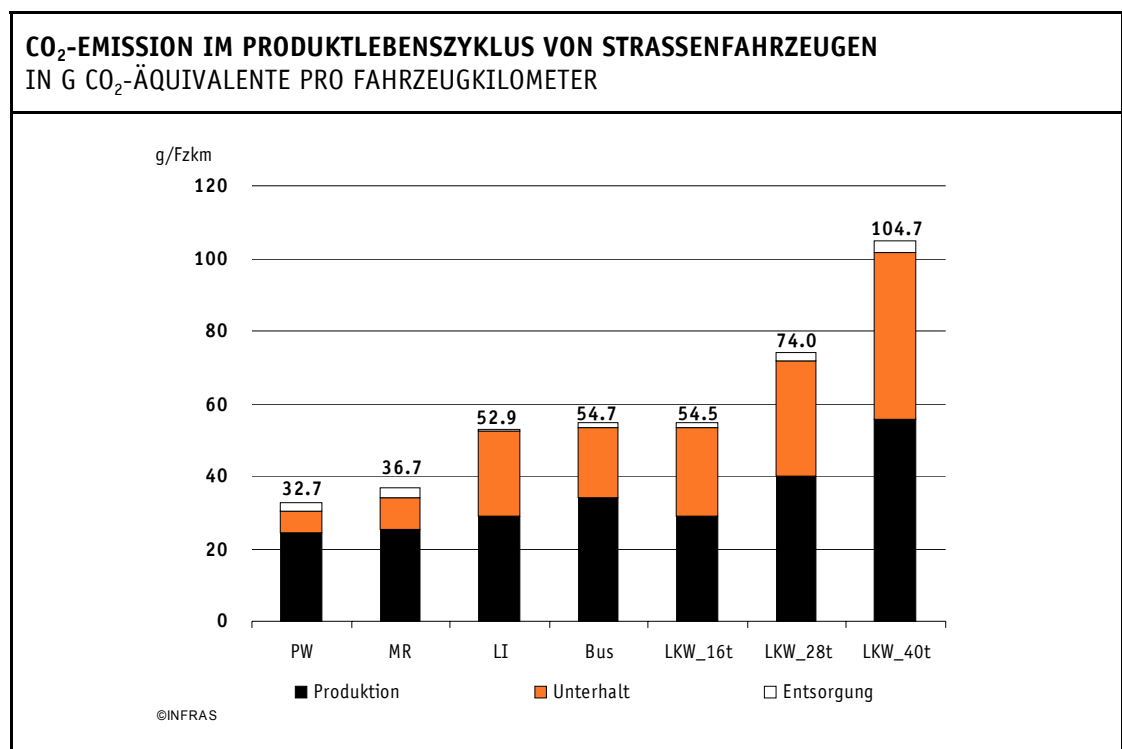
5.3. BERECHNUNGEN UND RESULTATE

5.3.1. TREIBHAUSGASEMISSIONEN VOR- UND NACHGELAGERTER PROZESSE

Die folgende Zusammenstellung zeigt die wichtigsten Berechnungsschritte sowie Zwischenergebnisse der Kostenschätzung.

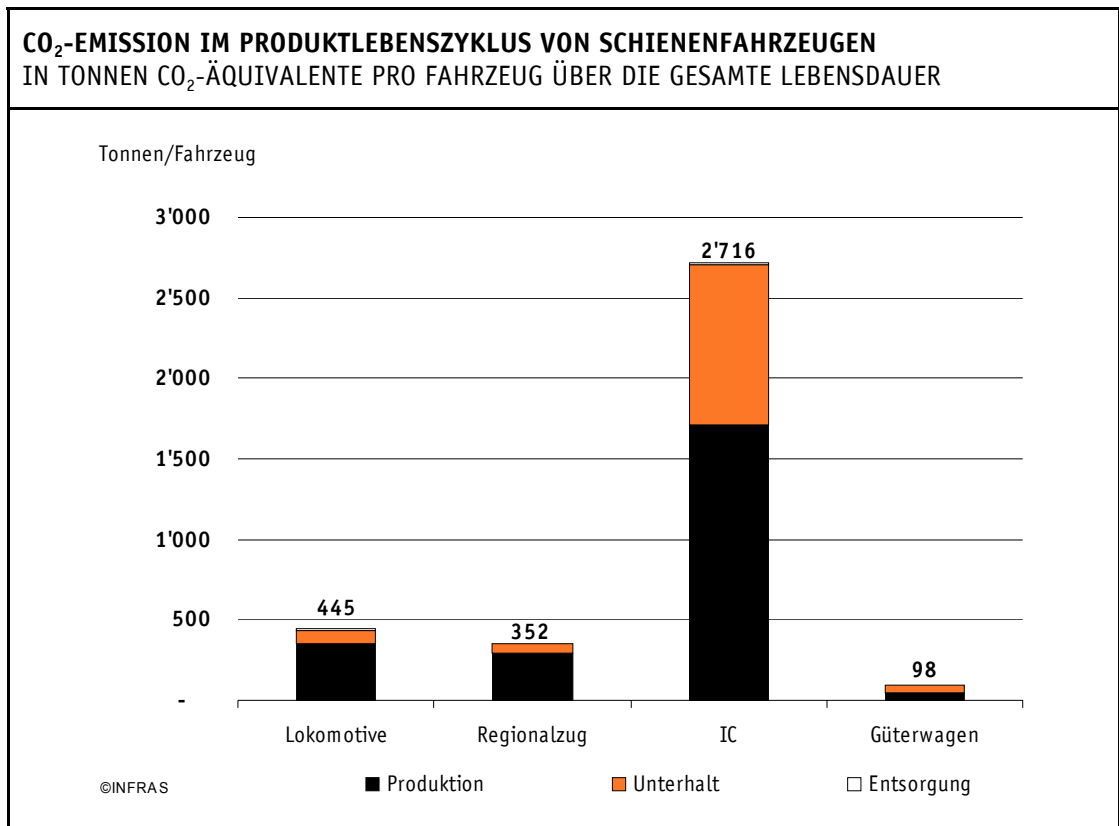
Herstellung, Unterhalt und Entsorgung der Fahrzeuge

Insbesondere bei der Produktion und dem Unterhalt von Fahrzeugen werden Treibhausgase emittiert. Die folgende Figur zeigt die Emissionen von CO₂-Äquivalenten pro Fahrzeug-km von verschiedenen Fahrzeugtypen:



Figur 30 Quelle: Darstellung basiert auf Ecoinvent (2004), Datensatz 1.1.

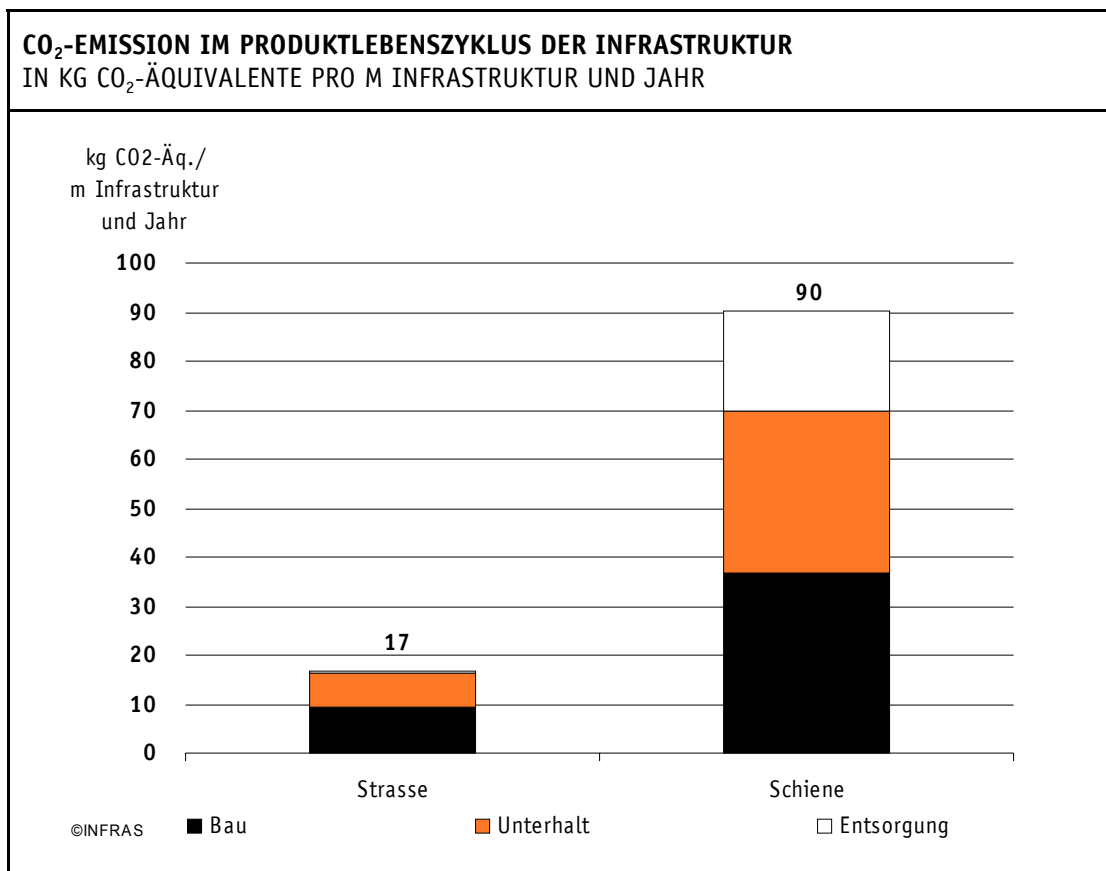
Insbesondere die Produktion sowie der Unterhalt von Strassenfahrzeugen führen zu Emissionen von Treibhausgasen. Die Entsorgung hingegen ist dabei eher unbedeutend. Im Schienenverkehr zeigt sich ein ähnliches Bild:



Figur 31 Quelle: Darstellung basiert auf Ecoinvent (2004), Datensatz 1.1. Bemerkungen: Regionalzug: Komposition mit 4 Wagen. IC: IC2000 Komposition der SBB.

Bau, Unterhalt und Entsorgung der Infrastruktur

Insbesondere beim Bau sowie beim Unterhalt der Infrastruktur werden Treibhausgase ausgestossen. Die folgende Grafik zeigt die auf ein Jahr umgerechnete jährliche Emission von Treibhausgasen aus dem Bau, dem Unterhalt und der Entsorgung der Strassen- und Schieneninfrastruktur (pro m Infrastruktur). Grundlage für die Berechnung ist ein durchschnittlicher Meter Strassen- und Schieneninfrastruktur, der sämtlichen Strassenklassen sowie Streckentypen anteilmässig repräsentiert.



Figur 32 Quelle: Darstellung basiert auf Ecoinvent (2004), Datensatz 1.1. Bemerkungen: Die Darstellung bezieht sich auf die jährlichen Emissionen pro Meter einer durchschnittlichen Strasse- bzw. Schienenstrecke in der Schweiz.

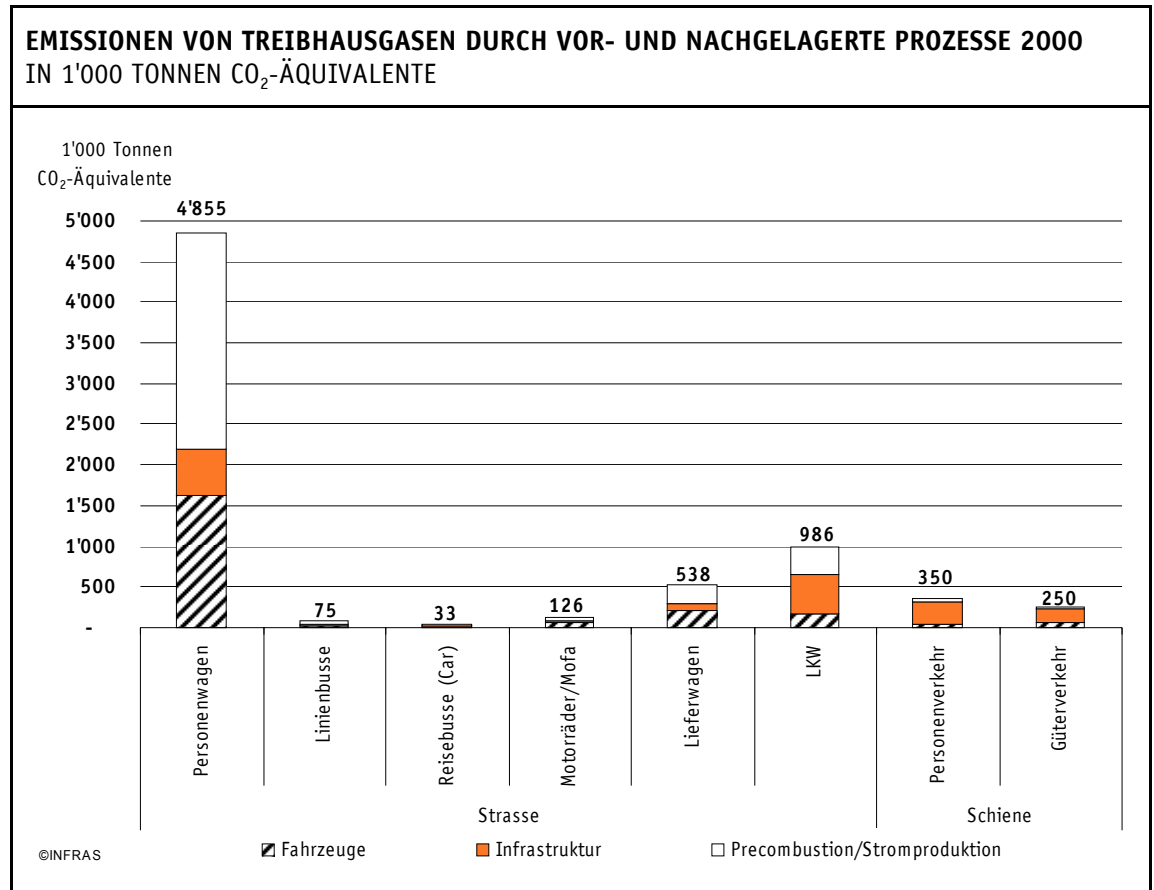
Precombustion bzw. Emissionen der Stromproduktion

Auch bei der Gewinnung, dem Transport sowie der Bearbeitung von Treibstoffen wird Energie verbraucht. Dementsprechend werden Treibhausgase freigesetzt. Insgesamt werden pro l Benzin an der Tankstelle ca. 580 g CO₂-Äquivalente und pro l Diesel ca. 500 g CO₂-Äquivalente freigesetzt.⁵⁰ Die Stromproduktion führt ebenfalls zur Emission von Treibhausgasen. Für die Quantifizierung der Treibhausgasemissionen ist der verwendete Strommix von zentraler Bedeutung. In Ecoinvent (2004) stehen die Ökoinventare für verschiedene nationale und internationale Strom-Produktionszusammensetzungen zur Verfügung. Da die SBB den Strom hauptsächlich aus eigenen Wasserkraftwerken bezieht, wird der sog. SBB-Mix für die Quantifizierung der Emissionen der Stromproduktion herangezogen. Dieser zeichnet sich durch sehr tiefe Emissionsfaktoren für CO₂ und weitere Treibhausgase aus.

⁵⁰ Zum Vergleich: Bei der Verbrennung von 1 l Benzin/1 l Diesel werden 2.34 kg CO₂/2.61 kg CO₂ freigesetzt.

Zusammenfassung

Die folgende Figur zeigt zusammenfassend die Gesamtemissionen von Treibhausgasen im Strassen- und Schienenverkehr in der Schweiz 2000.



Figur 33 Bemerkung: Für LKW wurden die Treibhausgasemissionen eines 28-t-LKW berücksichtigt.

Im Strassenverkehr dominieren bei den vor- und nachgelagerten Prozessen insbesondere die sog. Precombustion der Treibstoffe sowie die bei der Fahrzeugproduktion und dem Fahrzeugunterhalt anfallenden Treibhausgasemissionen. Beim Schienenverkehr zeigt sich, dass vor allem die Infrastruktur für den Grossteil der Treibhausgasemissionen verantwortlich ist. Die nahezu 100% auf Wasserkraft basierte Stromproduktion der Bahnen führt zu sehr geringen Treibhausgasemissionen in der Schweiz.

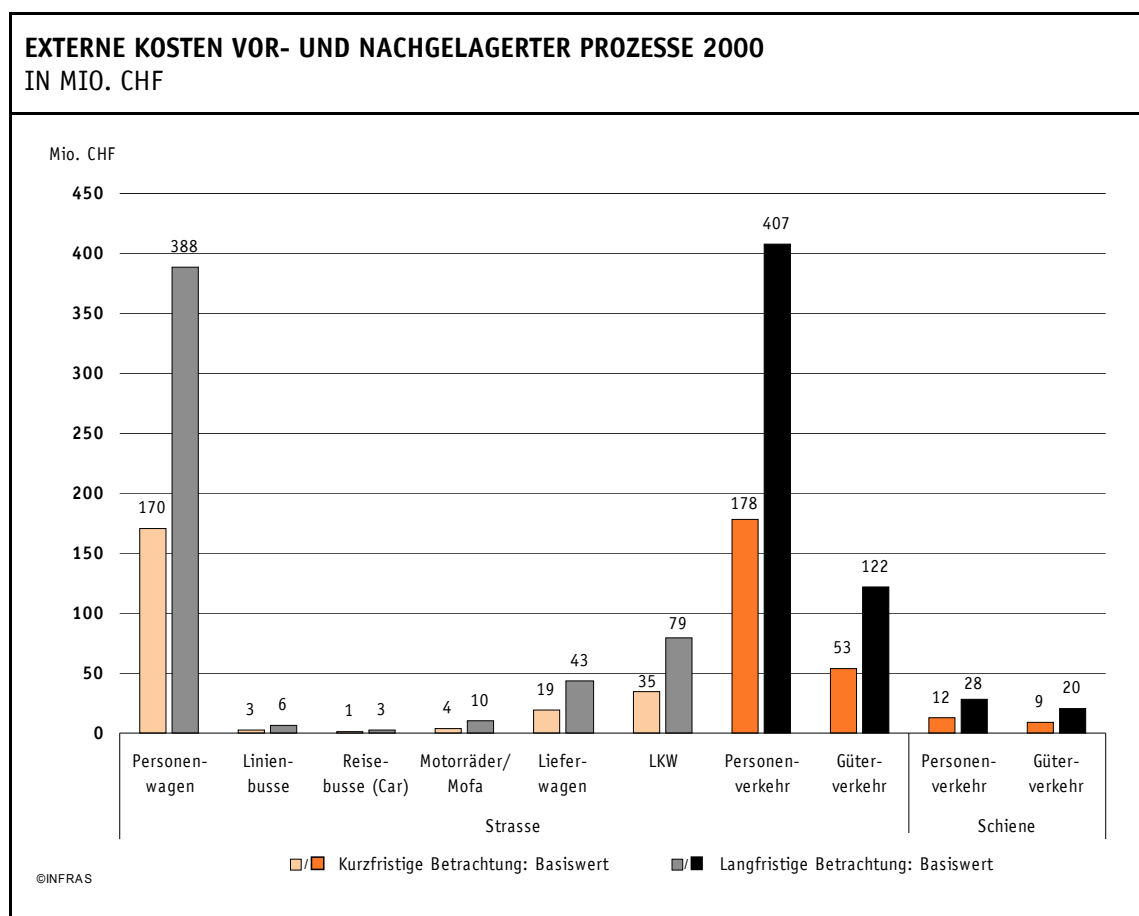
5.3.2. GESAMTKOSTEN VOR- UND NACHGELAGERTER PROZESSE

Basisrechnung

Die Bewertung der Treibhausgasemissionen der vor- und nachgelagerten Prozesse erfolgt mit einem zu den Klimakosten analogen Bewertungsansatz. Um die Komplexität etwas zu reduzieren, wird je ein Satz für eine kurzfristige und eine langfristige Betrachtung verwendet:

- › Kurzfristige Betrachtungsweise: 35 CHF pro Tonne CO₂-Äquivalent (Basiswert). Angesichts der internationalen Dimension der vor- und nachgelagerten Prozesse erscheint hier die Anwendung der nationalen Ansätze für den Verkehr nicht als opportun.
- › Langfristige Betrachtungsweise: 80 CHF pro Tonne CO₂-Äquivalent (Basiswert).

Die folgende Figur gibt einen Überblick über die Gesamtkosten, basierend auf den beiden Ansätzen.



Figur 34

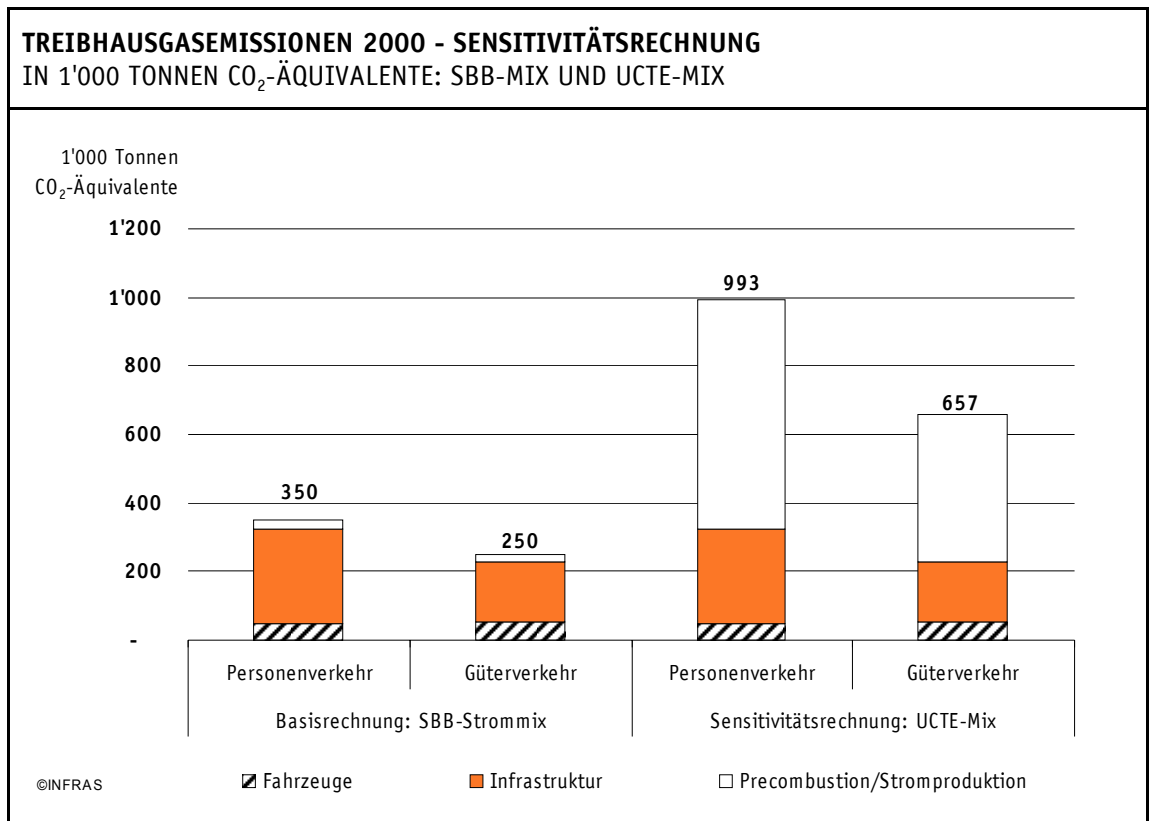
Mit Abstand am Grössten sind die Emissionen von Treibhausgasen in den vor- und nachgelagerten Prozessen bei den Personenwagen, gefolgt vom LKW. Die Schiene weist vergleichsweise tiefe Gesamtkosten auf.

Sensitivitätsrechnung mit UCTE-Mix für die Bahn

In einer kurzen Sensitivitätsrechnung werden die Auswirkungen auf die Kosten vor- und nachgelagerter Prozesse analysiert, wenn an Stelle des nahezu CO₂-freien SBB-Strommix ein europäischer Strommix, der dem des europäischen UCTE-Verbunds⁵¹ entspricht, verwendet wird. Die Ökobilanzierung mit Hilfe des UCTE-Mix wäre beispielsweise dann angebracht, wenn die Bahnen einen allfällig steigenden Energiebedarf auf dem europäischen Strommarkt abdecken würden (Grenzstrombetrachtung) oder beispielsweise den hochwertigen Strom des eigenen Kraftwerkparks verkaufen und dafür Strom auf dem europäischen Spotmarkt beziehen würden.

Der UCTE-Verbund weist hohe fossile Produktionsanteile auf, die Emissionen von Treibhausgasen pro bezogener Kilowattstunde (Mittelspannung) sind dementsprechend um einen Faktor 26 höher als beim SBB-Strom. Die folgende Figur zeigt die Auswirkungen eines veränderten Strommix auf die durch den Schweizer Schienenverkehr verursachten Treibhausgasemissionen:

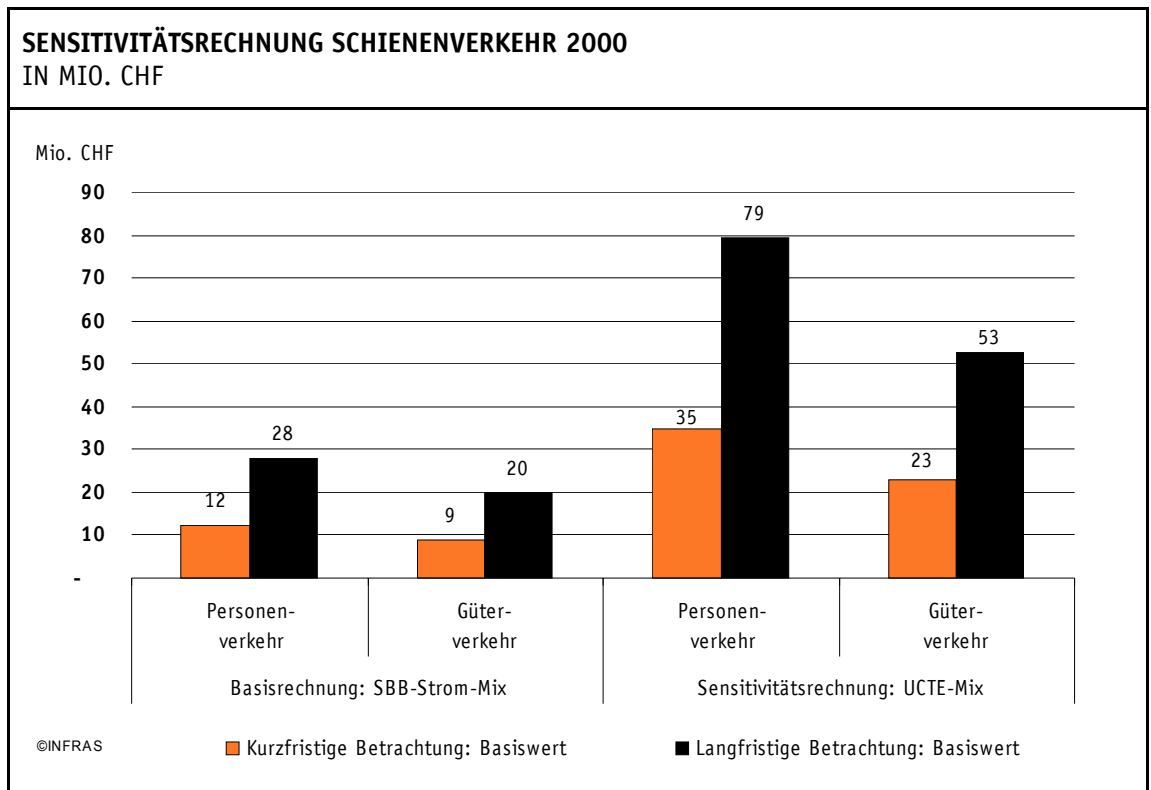
⁵¹ UCTE: Union for the co-ordination of the Transmission of Electricity. Der UCTE-Verbund umfasst folgende Länder: Belgien, Deutschland, Spanien, Frankreich, Griechenland, Slowenien, Kroatien, Bosnien Herzegowina, Republik Jugoslawien (Serbien und Montenegro), Mazedonien, Luxemburg, Niederlande, Portugal, Schweiz.



Figur 35 Quelle: Eigene Berechnungen auf Basis Ecoinvent (2004a+b). UCTE Mittelspannung ab Netz (Produktionsmix).

Durch die Verwendung des UCTE-Mixes erhöhen sich die Treibhausgasemissionen des Schienenverkehrs aus vor- und nachgelagerten Prozessen um über 1 Mio. t CO₂-Äquivalente pro Jahr.

Entsprechend erhöhen sich dann auch die Klimakosten dieser Prozesse, wie folgende Grafik verdeutlicht:



Figur 36

Die externen Klimakosten des Schienenverkehrs erhöhen sich bei der Bilanzierung des Stromverbrauchs mit dem UCTE-Mix in der kurzfristigen Betrachtungsweise (35 CHF/t CO₂-Äquivalent) um über 200% auf 58 Mio. CHF, in der langfristigen Betrachtungsweise um knapp 175% auf ca. 132 Mio. CHF.

6. RESULTATÜBERSICHT

6.1. GESAMTKOSTEN

6.1.1. KOSTEN PRO VERKEHRSTRÄGER

Die folgende Tabelle zeigt die Gesamtkosten für Strasse und Schiene. Bewusst werden die Ergebnisse nicht zusammengezählt, weil die Kosten unterschiedliche Bereiche umfassen und sich auf verschiedene Prozesse beziehen. Mit Abstand am bedeutendsten sind die Klimakosten (je nach Betrachtungsweise) und die mit demselben Ansatz bewerteten Kosten von vor- und nachgelagerten Prozessen. Eher geringe Grössenordnungen ergeben sich bei den weiteren Umweltkosten. Im Bereich Gewässer sind keine Kosten nachweisbar.

Der grösste Teil der Kosten fällt auf den Strassenverkehr (über 95%). Dies liegt darin begründet, dass die meisten Kosten direkt abhängig sind von den Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen. Die wichtigsten Kostenblöcke für die Schiene sind die Erschütterungen sowie die Kosten vor- und nachgelagerter Prozesse (graue Energie von Fahrzeug- und Infrastrukturproduktion und -unterhalt).

ÜBERSICHT ZU DEN GESAMTKOSTEN PRO KOSTENBEREICH 2000 IN MIO. CHF PRO JAHR			
	Gesamtkosten	Strasse	Schiene
Klimakosten			
Kurzfristige Betrachtungsweise: Basiswert	504	503	1
Kurzfristige Betrachtungsweise: CH-Kostensatz im Verkehr	1'008	1'006	2
Langfristige Betrachtungsweise: Basiswert	1'152	1'149	2
Langfristige Betrachtungsweise: Oberer Wert	1'583	1'580	3
Maximalbetrachtung (inkl. ungedeckte Schadenskosten)	2'030	2'026	4
Bisher nicht erfasste Umweltkosten			
Ernteauffälle	74	74	1
Waldschäden	70	70	1
Schäden Gewässer	~0*	~0*	~0*
Schäden Boden	104	103	1
Erschütterungen	20	n.b.	20
Zusatzkosten in sensiblen Räumen (Alpen)	31	29	2
Zusätzliche Kosten für Verkehrsteilnehmer in städtischen Räumen			
Zusatzkosten in städtischen Räumen	89	70	18
Zusätzliche Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse			
Vor- und nachgelagerte Prozesse: Kurzfristige Betrachtungsweise	252	231	21
Vor- und nachgelagerte Prozesse: Langfristige Betrachtungsweise	577	529	48

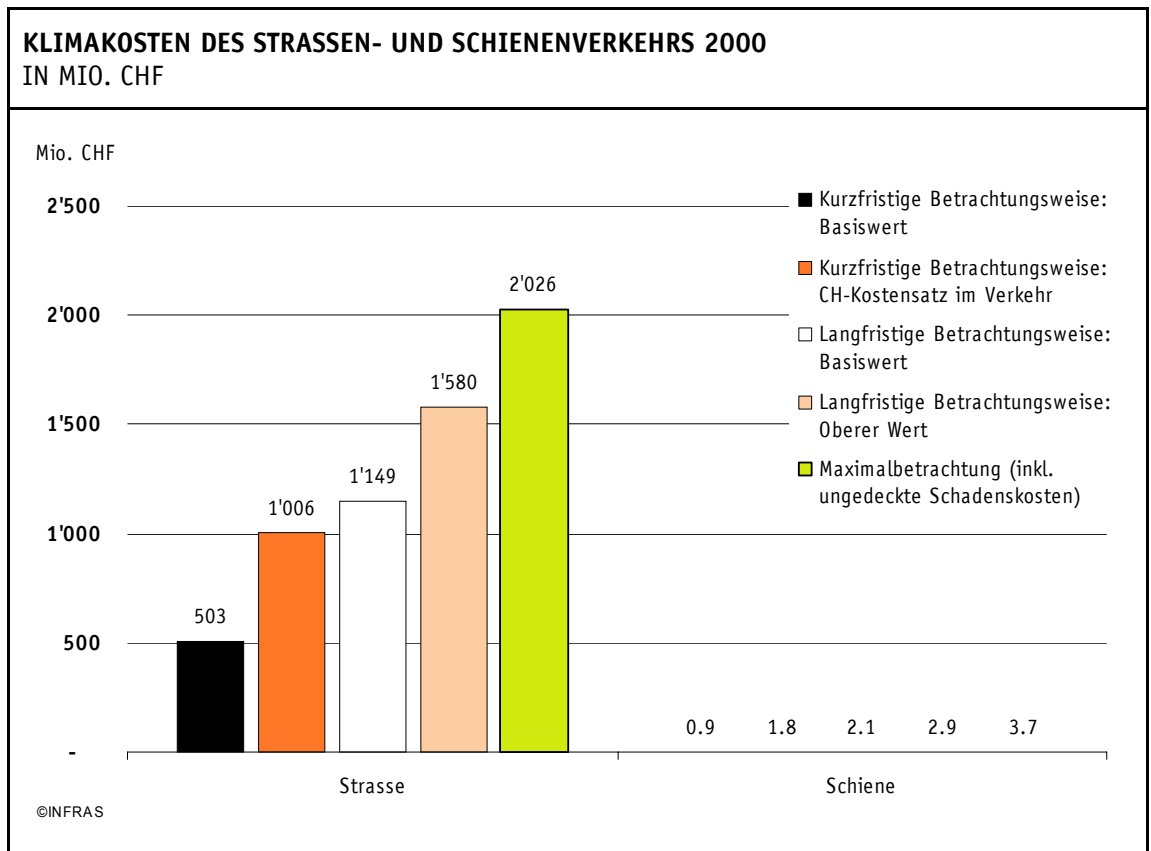
Tabelle 27 Erläuterungen:

*: Die Gewässerschäden sind gemäss den vorliegenden Abschätzungen sehr gering bzw. nahe bei null. Die Einflüsse des Verkehrs auf die Gewässerqualität sind entweder weitgehend unproblematisch (weil zu klein und unterhalb toxischem Niveau), oder die entstehenden Kosten sind interner Natur oder aber die Kosten sind nicht quantifizierbar.

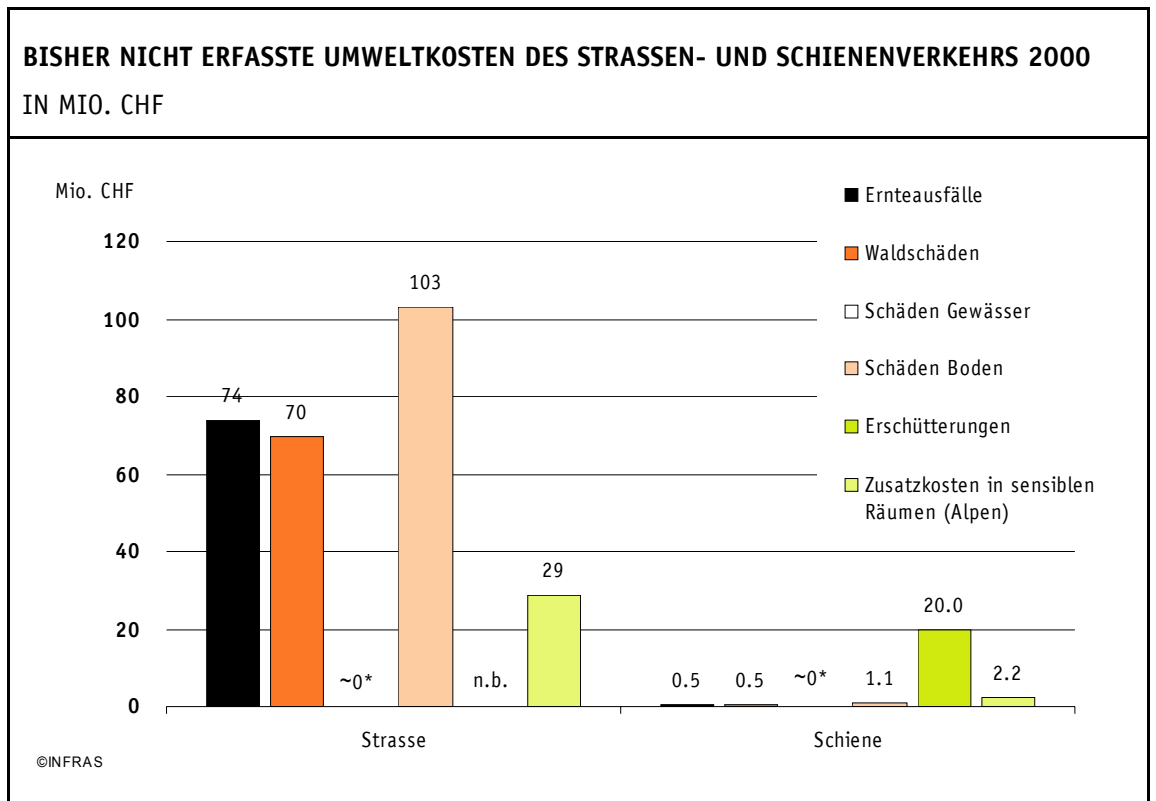
n.b.: nicht bestimmbar, weil wichtige Datengrundlagen fehlen.

Geringfügige Rundungsdifferenzen zwischen der Spalte 'Gesamtkosten' und der Summe der Spalten 'Strasse' und 'Schiene' möglich.

Eine detaillierte Diskussion der Schwankungsbreite obiger Resultate befindet sich im Abschnitt 6.2.



Figur 37 Je nach Betrachtungsweise schwanken die Gesamtkosten für den Klimabereich zwischen 500 Mio. und 1.6 Mrd. CHF.

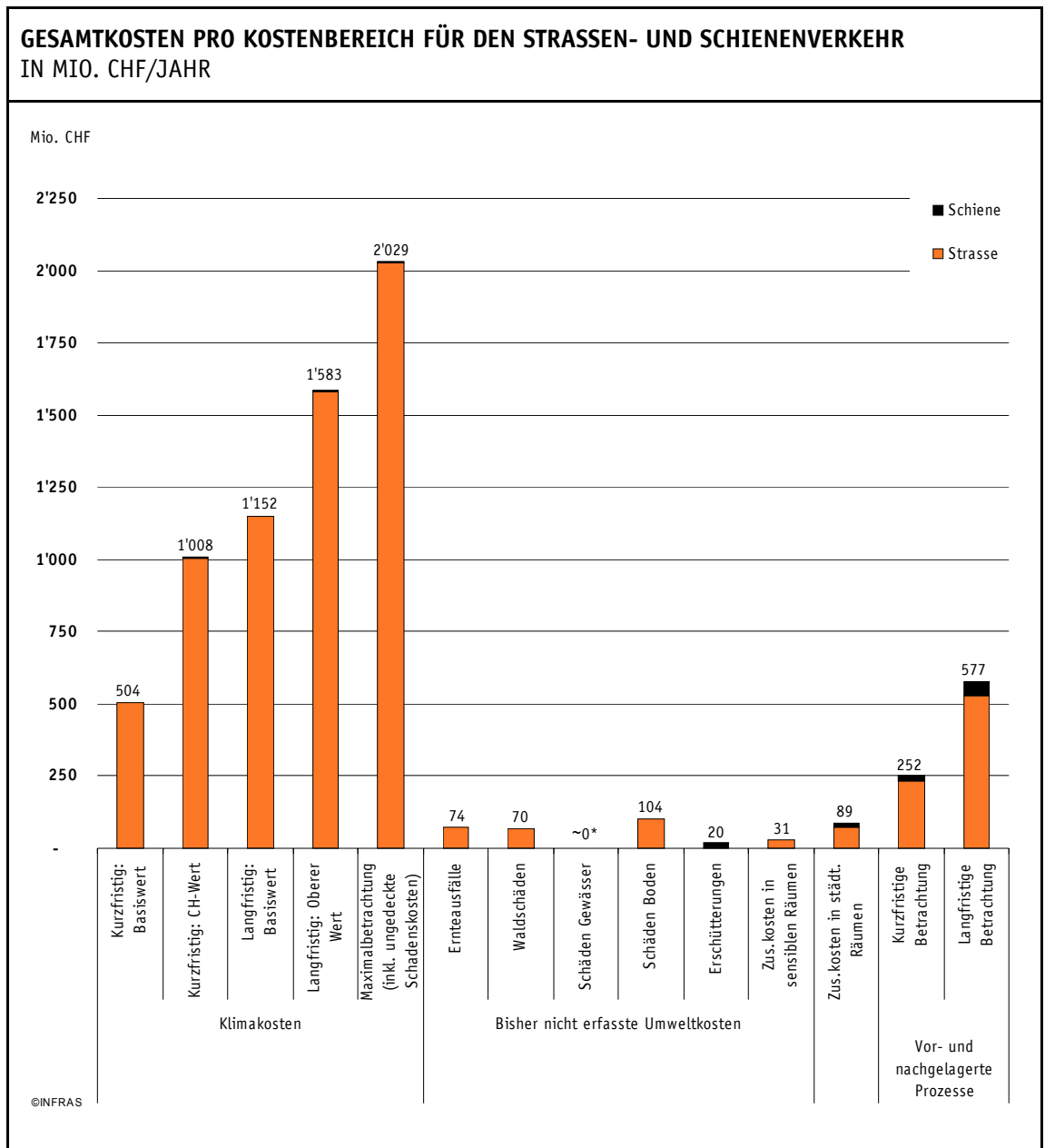


Figur 38 Der bedeutendste Kostenblock der weiteren Umweltkosten sind die Schäden für die Böden, gefolgt von den Ernteaussfällen für die Landwirtschaft.

Erläuterungen:

*: Die Gewässerschäden sind gemäss den vorliegenden Abschätzungen sehr gering bzw. nahe bei null.

n.b.: nicht bestimmbar, weil wichtige Datengrundlagen fehlen.



Figur 39 Erläuterungen:

*: Die Gewässerschäden sind gemäss den vorliegenden Abschätzungen sehr gering bzw. nahe bei null.

6.1.2. KOSTEN PRO VERKEHRSMITTEL

Die folgende Tabelle zeigt die Kosten für die einzelnen Verkehrsmittel, alloziert gemäss den in den einzelnen Kapiteln dargestellten Schlüsseln.

GESAMTKOSTEN PRO VERKEHRSMITTEL UND KOSTENBEREICH 2000 IN MIO. CHF											
	Total	Strasse								Schiene	
	Gesamt-kosten	PW	Linien-busse	Reise-busse	MR	LW	LKW	Pers.-verkehr total	Güter-verkehr total	Pers.-verkehr	Güter-verkehr
Klimakosten											
Kurzfristige Betrachtung: Basiswert	504	385	8	3	7	38	62	403	100	0.2	0.7
Kurzfristige Betrachtung: CH-Kostensatz im Verkehr	1'008	770	16	6	14	77	123	805	200	0.4	1.4
Langfristige Betrachtung: Basiswert	1'152	880	18	7	16	88	141	920	229	0.5	1.6
Langfristige Betrachtung: Oberer Wert	1'583	1'210	25	9	22	121	194	1'266	315	0.7	2.2
Maximalbetrachtung (inkl. Schadenskosten)	2'030	1'551	32	12	28	155	249	1'622	404	0.9	2.9
Bisher nicht erfasste Umweltkosten											
Ernteausfälle	74	32	4	1	1	7	29	38	36	0.1	0.4
Waldschäden	70	31	4	1	1	7	27	37	33	0.1	0.4
Schäden Gewässer	~0	~0	~0	~0	~0	~0	~0	~0	~0	~0	~0
Schäden Boden	104	48	3	2	1	10	39	54	49	0.6	0.5
Erschütterungen	20	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	12.3	7.7
Zusatzkosten in sensiblen Räumen (Alpen)	31	22	0	0	0	3	3	23	6	1.8	0.4
Zusätzliche Kosten für Verkehrsteilnehmer in städtischen Räumen											
Zusatzkosten in städtischen Räumen	89	57	1	0	1	6	5	60	11	14.9	3.3
Zusätzliche Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse											
Vor-/ nachgel. Prozesse: Kurzfristige Betr.	252	170	3	1	4	19	35	178	53	12.2	8.8
Vor-/ nachgel. Prozesse: Langfristige Betr.	577	388	6	3	10	43	79	407	122	28.0	20.0

Tabelle 28 Gesamtkosten in Mio. CHF pro Jahr. n.b.: nicht bestimmbar.

6.1.3. DURCHSCHNITTSKOSTEN PRO VERKEHRSMITTEL

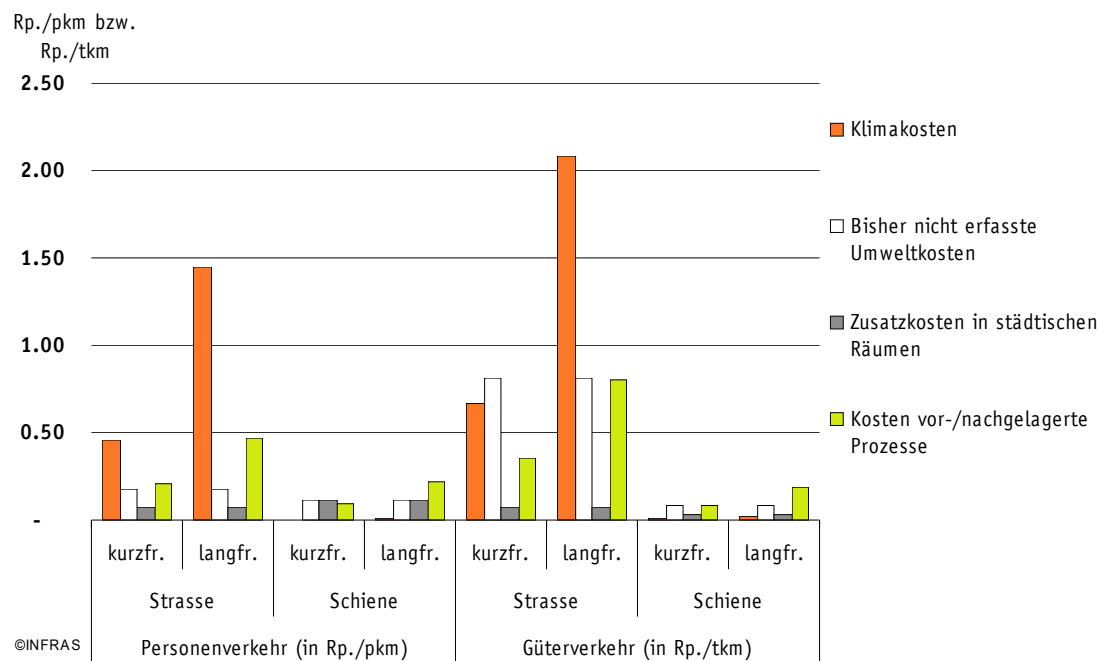
Die spezifischen Kosten lassen sich sowohl in Kosten pro Personen- resp. Tonnenkilometer wie auch in Kosten pro Fahrzeug- resp. Zugskilometer ausdrücken. Sie können als Näherungsgrösse für die aus Bepreisungsoptik eigentlich relevanten Grenzkosten dienen. Tabelle 29 stellt in aggregierter Form die spezifischen Kosten von Strasse und Schiene einander gegenüber. Im Klimabereich sind die spezifischen Kosten im Strassenverkehr über 100mal höher als diejenigen des Schienenverkehrs, vor allem dank des günstigen Strommixes der Schiene. Bei den übrigen Kostenbereichen ist der Vorteil der Schiene deutlich geringer. Die durchschnittlichen weiteren Umweltkosten des Strassenverkehrs sind um einen Faktor 1.5 (Personenverkehr) bzw. 9.4 (Güterverkehr) höher als beim Schienenverkehr. Die Zusatzkosten des Strassenverkehrs in städtischen Räumen bezogen auf die Verkehrsleistung sind im Personenverkehr um einen Faktor 1.7 tiefer als im Schienenverkehr, beim Güterverkehr wiederum einen Faktor 2.4 höher. Bei den vor- und nachgelagerten Prozessen hat der Strassenverkehr um einen Faktor 2.1 (Personenverkehr) bzw. 4.4 (Güterverkehr) höhere Kosten als der Schienenverkehr.

DURCHSCHNITTSKOSTEN PRO VERKEHRSTRÄGER UND KOSTENBEREICH (IN RP./PKM BZW. RP./TKM)				
	Personenverkehr (in Rp./pkm)		Güterverkehr (in Rp./tkm)	
	Strasse	Schiene	Strasse	Schiene
Klimakosten*	0.46-1.45	0.00-0.01	0.66-2.08	0.01-0.02
Bisher nicht erfasste Umweltkosten	0.17	0.12	0.82	0.09
Zusatzkosten in städtischen Räumen	0.07	0.12	0.07	0.03
Kosten durch vor-/nachgelagerte Prozesse	0.20-0.47	0.10-0.23	0.35-0.81	0.08-0.18

Tabelle 29 Bemerkungen: *: Durchschnittskosten im Klimabereich ohne verbleibende Schadenskosten (Maximalbetrachtung).

Die folgende Figur zeigt die Zahlen in einer Übersicht:

DURCHSCHNITTSKOSTEN PRO VERKEHRSTRÄGER UND KOSTENBEREICH IN RP./PKM BZW. RP./TKM



Figur 40 Durchschnittskosten in Rp. pro Personen-km bzw. Rp. pro Tonnen-km.

Hinweis: Es wurden jeweils die Kosten für die lang- bzw. kurzfristige Betrachtungsweise bei den Vermeidungskostensätzen im Klimabereich für die Verkehrsträger Strasse und Schiene dargestellt, differenziert nach Personen- und Güterverkehr. Die Vermeidungskostensätze im Klimabereich beeinflussen die Gesamtkosten der Kostenbereiche 'Klimakosten' und 'Kosten vor- und nachgelagerter Prozesse'.

DURCHSCHNITTSKOSTEN PRO VERKEHRSMITTEL UND KOSTENBEREICH IM PERSONENVERKEHR IN RP./PKM							
	Strasse				Total	Schiene	Total
	Personen- wagen	Linien- busse	Reisebusse (Car)	Motorrä- der/ Mofa	Personen- verkehr Strasse	Personen- verkehr	Personen- verkehr
	<i>Rp./pkm</i>	<i>Rp./pkm</i>	<i>Rp./pkm</i>	<i>Rp./pkm</i>	<i>Rp./pkm</i>	<i>Rp./pkm</i>	<i>Rp./pkm</i>
Klimakosten							
Kurzfristige Betrachtungsweise: Basiswert	0.48	0.33	0.14	0.28	0.46	0.002	0.40
Kurzfristige Betrachtungsweise: CH-Kostensatz im Verkehr	0.96	0.65	0.28	0.56	0.92	0.003	0.80
Langfristige Betrachtungswei- se: Basiswert	1.09	0.75	0.32	0.65	1.05	0.004	0.92
Langfristige Betrachtungs- weise: oberer Wert	1.50	1.03	0.44	0.89	1.45	0.005	1.26
Bisher nicht erfasste Um- weltkosten							
Ernteaussfälle	0.04	0.17	0.07	0.03	0.04	0.00	0.04
Waldschäden	0.04	0.15	0.06	0.03	0.04	0.00	0.04
Schäden Gewässer	~0.00	~0.00	~0.00	~0.00	~0.00	~0.00	~0.00
Schäden Boden	0.06	0.14	0.08	0.05	0.06	0.01	0.05
Erschütterungen	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	0.10	0.01
Zusatzkosten in sensiblen Räumen (Alpen)	0.03	0.01	0.01	0.02	0.03	0.01	0.02
Zusätzliche Kosten für Ver- kehrsteilnehmer in städti- schen Räumen							
Zusatzkosten in städtischen Räumen	0.07	0.05	0.01	0.06	0.07	0.12	0.07
Zusätzliche Kosten durch vor- und nachgel. Prozesse							
Vor- und nachgelagerte Prozes- se: Kurzfristig	0.21	0.11	0.05	0.18	0.20	0.10	0.19
Vor- und nachgelagerte Prozes- se: Langfristig	0.48	0.25	0.12	0.41	0.47	0.22	0.43

Tabelle 30 Durchschnittskosten Personenverkehr (in Rp./pkm). n.b.: nicht bestimmbar.

DURCHSCHNITTSKOSTEN PRO VERKEHRSMITTEL UND KOSTENBEREICH IM GÜTERVERKEHR IN RP./TKM					
	Strasse		Total Güterverkehr Strasse	Schiene Güterverkehr	Total Güterverkehr
	Lieferwagen	LKW			
	<i>Rp./tkm</i>	<i>Rp./tkm</i>	<i>Rp./tkm</i>	<i>Rp./tkm</i>	<i>Rp./tkm</i>
Klimakosten					
Kurzfristige Betrachtungsweise: Basiswert	2.59	0.45	0.66	0.01	0.39
Kurzfristige Betrachtungsweise: CH-Kostensatz im Verkehr	5.17	0.91	1.33	0.01	0.78
Langfristige Betrachtungsweise: Basiswert	5.91	1.03	1.51	0.01	0.89
Langfristige Betrachtungsweise: Oberer Wert	8.12	1.42	2.08	0.02	1.22
Bisher nicht erfasste Umweltkosten					
Ernteaussfälle	0.47	0.21	0.24	0.00	0.14
Waldschäden	0.44	0.19	0.22	0.00	0.13
Schäden Gewässer	~0.00	~0.00	~0.00	~0.00	~0.00
Schäden Boden	0.66	0.28	0.32	0.00	0.19
Erschütterungen	n.b.	n.b.	n.b.	0.07	0.03
Zusatzkosten in sensiblen Räumen (Alpen)	0.17	0.02	0.04	0.00	0.02
Zusätzliche Kosten für Verkehrsteilnehmer in städtischen Räumen					
Zusatzkosten in städtischen Räumen	0.42	0.03	0.07	0.03	0.05
Zusätzliche Kosten durch vor- und nachgel. Prozesse					
Vor- und nachgelagerte Prozesse: Kurzfristig	1.26	0.25	0.35	0.08	0.24
Vor- und nachgelagerte Prozesse: Langfristig	2.89	0.58	0.81	0.18	0.55

Tabelle 31 Durchschnittskosten Güterverkehr (in Rp./tkm). n.b.: nicht bestimmbar.

DURCHSCHNITTSKOSTEN PRO VERKEHRSMITTEL UND KOSTENBEREICH IN RP./FZKM BZW. RP./ZUGS-KM								
	Strasse						Schiene	
	Personen- wagen	Linien- busse	Reise- busse (Car)	Motorrä- der/ Mofa	Liefer- wagen	LKW	Personen- verkehr	Güter- verkehr
	Rp./Fzkm	Rp./Fzkm	Rp./Fzkm	Rp./Fzkm	Rp./Fzkm	Rp./Fzkm	Rp./Zugs- km	Rp./Zugs- km
Klimakosten								
Kurzfristige Betrachtungsweise: Basiswert	0.78	3.99	2.91	0.34	1.01	2.59	0.15	2.27
Kurzfristige Betrachtungsweise: CH-Kostensatz im Verkehr	1.55	7.98	5.83	0.69	2.03	5.18	0.30	4.53
Langfristige Betrachtungsweise: Basiswert	1.78	9.13	6.66	0.79	2.32	5.92	0.34	5.18
Langfristige Betrachtungsweise: oberer Wert	2.44	12.55	9.16	1.08	3.19	8.13	0.47	7.12
Bisher nicht erfasste Umweltkosten								
Ernteaussfälle	0.06	2.04	1.36	0.04	0.18	1.22	0.09	1.34
Waldschäden	0.06	1.86	1.25	0.04	0.17	1.11	0.08	1.24
Schäden Gewässer	~0.00	~0.00	~0.00	~0.00	~0.00	~0.00	~0.00	~0.00
Schäden Boden	0.10	1.65	1.63	0.06	0.26	1.62	0.45	1.57
Erschütterungen	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	8.71	24.60
Zusatzkosten in sensiblen Räumen (Alpen)	0.04	0.11	0.11	0.02	0.07	0.13	1.30	1.30
Zusätzliche Kosten für Ver- kehrsteilnehmer in städti- schen Räumen								
Zusatzkosten in städtischen Räumen	0.11	0.57	0.18	0.07	0.17	0.19	10.60	10.60
Zusätzliche Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse								
Vor- und nachgelagerte Prozes- se: Kurzfristig	0.34	1.33	1.13	0.22	0.50	1.45	8.71	27.90
Vor- und nachgelagerte Prozes- se: Langfristig	0.78	3.04	2.58	0.50	1.13	3.31	19.90	63.70

Tabelle 32 Durchschnittskosten in Rp./Fahrzeug-km bzw. Rp./Zugs-km.

6.2. BEURTEILUNG DER RESULTATE/SCHWANKUNGSBEREICHE

Anders als in den bisherigen Studien zur Quantifizierung der externen Kosten des Verkehrs sind die Unsicherheiten bei den weiteren externen Kosten des Verkehrs in einigen Bereichen deutlich grösser. Vielfach nicht eindeutige Dosis-Wirkungsbeziehungen, grosse Spannbreiten der Kostensätze und unvollständige Datengerüste und Kausalketten führen dazu, dass die Resultate wesentlich "weicher" sind als die bereits quantifizierten Kostenbereiche

(Unfälle, Lärm, Gesundheitskosten, Gebäudeschäden, Natur und Landschaft). Dies ist für die Kommunikation der Resultate zu berücksichtigen. Die Berechnungen für die Vielzahl äusserst komplexer Schadensmechanismen müssen zwangsweise auf der Ebene von Abschätzungen erfolgen, deren Resultate generell weniger robust und belastbar sind. Dies schränkt die empirische Evidenz und politische Relevanz des Vorhandenseins weiterer externer Kosten beispielsweise im Klimabereich allerdings keineswegs ein.

In der folgenden Tabelle findet sich eine Einschätzung zu den Unsicherheiten und Streubreiten der Resultate:

EINSCHÄTZUNG DER ROBUSTHEIT DER RESULTATE			
Kostenkategorie	Unsicherheiten	Streubreiten	Sensitivitätsrechnungen
Klimakosten	› bzgl. Schadens- und Vermeidungskostensätzen gross, aktuelle Forschungsergebnisse konvergieren hinsichtlich Kostensätzen	› mittel bis gross, in Abhängigkeit der Schadens- bzw. Vermeidungskostensätze und den zugrunde liegenden Reduktionsszenarien	› abgebildet in den verschiedenen Szenarien › Min: Kostensatz 35 CHF/t CO ₂ -eq › Max: Kostensatz 110 CHF/t CO ₂ -eq
Weitere externe Umweltkosten			
Ernteaufschläge aufgrund Luftverschmutzung	› bzgl. Dosis-Wirkungsbeziehungen eher klein › bzgl. Verkehrsanteil mittel	› klein bis mittel	› Schwankung des Resultats um -20% bzw. +60% möglich, d.h. zwischen 50 und 120 Mio. CHF/a
Schäden der Luftverschmutzung in der Biosphäre (Waldschäden)	› sehr gross bzgl. Dosis-Wirkungsbeziehungen und Kostensätzen › bzgl. Verkehrsanteil mittel	› gross	› Kostenuntergrenze: ca. 20 Mio. CHF/a (Annahme: Holzwirtschaft unrentabel) › Realistischer Wert: 70 Mio. CHF/a › Kostenobergrenze maximal im tiefen dreistelligen Millionenbereich
Schäden für Gewässer	› nicht sehr gross, weil Zusammenhänge fast überall null bzw. vernachlässigbar sind	› mittel	› Kostenuntergrenze: 0 Mio. CHF/a › Kostenobergrenze maximal im tiefen zweistelligen Millionenbereich

EINSCHÄTZUNG DER ROBUSTHEIT DER RESULTATE			
Kostenkategorie	Unsicherheiten	Streubreiten	Sensitivitätsrechnungen
Schäden für die Bodenqualität	› sehr gross bzgl. Dosis-Wirkungsbeziehungen, deshalb wird Reparaturkostenansatz angewandt: dort ist Unsicherheit mittel (v.a. beim Sanierungskostenansatz und Festsetzung des Grenzwerts) › bezgl. Verkehrsanteil klein	› mittel	› Schwankung des Resultats um -50% bzw. +100% möglich (wenn Richtwert als Grenzwert verwendet wird bzw. Kostensatz variiert wird), d.h. zwischen 50 und 200 Mio. CHF/a
Erschütterungen	› beim Vermeidungskostenansatz (Schienenverkehr) mittel › bei Schadenskostenansatz sehr gross bzgl. Dosis-Wirkungsbeziehungen und Mengengerüsten › Strassenverkehr: keine Berechnung möglich › Überlagerung mit Lärmimmissionen möglich	› Schiene: mittel › Strasse: sehr gross, da gar keine Berechnung möglich war	› Schiene: Sanierungskosten zu Vermeidung von Erschütterungen liegen zwischen 20 und 30 Mio. CHF/a › Strasse: Kosten könnten zwischen 0 und 30 Mio. CHF/a liegen (je nach Anzahl Betroffener)
Zusätzliche Umweltkosten in sensiblen Räumen (Alpenraum) - Sensible Naturräume, Landschaftsbild	› mittel bis gross, v.a. bei Zahlungsbereitschaftsansatz › Nichteinbezug der ständigen Bevölkerung führt vermutlich zu deutlicher Unterschätzung	› gross	› Variation des Zahlungsbereitschaftssatzes führt zu Variationen von +/- 10 Mio. CHF
Zusätzliche externe Kosten für Verkehrsteilnehmer			
Zusätzliche Kosten in städtischen Räumen: Trenneffekte und räumliche Verdrängung für LV	› mittel bis gross hinsichtlich Bewertungsansatz wie auch Verkehrsmengengerüst (Que- rungen pro Strassentyp und Strasse)	› in Abhängigkeit der Kostensätze, v.a. Zeitkostensatz › Mengengerüst Fussverkehr › Mengengerüst Strassenkategorie	› Variation Zeitkostensätze › Variation der Strassenque- rungen pro Person, Strassentyp und Tag › Schwankungsbereich 50- 250 Mio. CHF/a
Zusätzliche Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse			
Up- and Downstream-Effekte: Energieproduktion/Graue Energie Fahrzeuge/Rollmaterial, Infrastruktur	› mittel bis geringe Unsicherheiten, da detaillierte Ökoinventare vorhanden sind	› in Abhängigkeit der Bewertung von Klimaschäden	› in Abhängigkeit der Bewertung von Klimaschäden (verschiedene Szenarien) › Min: Kostensatz 35 CHF/t CO₂-eq › Max: Kostensatz 80 CHF/t CO₂-eq (Basiswert langfristige Betrachtungsweise)

Tabelle 33

Die folgende Tabelle zeigt die Schwankungsbereiche der quantifizierten weiteren externen Kosten des Verkehrs nochmals detailliert:

SCHWANKUNGSBEREICH DER GESAMTKOSTEN PRO KOSTENBEREICH IN MIO. CHF PRO JAHR		
	Schätzung der Gesamtkosten	Abschätzung der Schwankungs- breite
Klimakosten *	Vier Szenarien: 504 – 1'583	
Ernteaufschläge	74	50 - 120
Waldschäden	70	20 - 250
Gewässer	~0	0 - 20
Schäden für die Bodenqualität	104	50 - 200
Erschütterungen	20	20 - 50
Zusätzliche Umweltkosten in sensiblen Räumen (Alpenraum)	31	20 - 40
Zusatzkosten in städtischen Räumen	89	50 - 250
Kosten durch vor- und nachgelagerte Prozesse	Zwei Szenarien: 252 – 577	

Tabelle 34 Erläuterung *: Klimakosten ohne verbleibende Schadenskosten (Maximalbetrachtung).

7. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Fazit der Schätzungen

- › Mit Ausnahme der Klimakosten sowie der Kosten vor- und nachgelagerter Prozesse liegt die Grössenordnung der weiteren externen Kosten tiefer als in den bisher quantifizierten externen Kosten des Strassen- und Schienenverkehrs (Unfälle, Natur und Landschaft, Gesundheitskosten, Lärm und Gebäudeschäden).
- › Die mit Abstand wichtigste Kostenkategorie sind die 'Klimakosten'. Auch bei tiefen Ansätzen für Vermeidungs- oder Schadenskosten verursacht der Strassen- und Schienenverkehr jährliche Kosten in einer Grössenordnung von mindestens 0.5 - 1 Mrd. CHF. Eine differenzierte Betrachtungsweise (kurzfristig zur Erreichung der Zwischenziele gemäss Kyoto-Protokoll; langfristig zur Erreichung der Ziele bis 2050) ist angesichts der grossen Unsicherheiten und Quantifizierungsschwierigkeiten unumgänglich. Gleichzeitig ist bei der kurzfristigen Betrachtungsweise eine internationale Optik über alle Sektoren und eine Schweizer Optik (bezogen auf die CH-Verkehrsziele) möglich. Entsprechend ergibt sich eine grosse Streubreite bezüglich der Ergebnisse.
- › Ein weiterer wichtiger Kostenbereich sind die Kosten für vor- und nachgelagerte Prozesse. Hier wurden die bei der Produktion, beim Unterhalt und bei der Entsorgung der Fahrzeuge und des Rollmaterials sowie der Infrastruktur auftretenden Treibhausgasemissionen quantifiziert und mit Hilfe des Vermeidungskostenansatzes der Klimakosten bewertet. Ebenso wurde die Bereitstellung der Energieträger (Benzin und Diesel im Strassenverkehr bzw. Elektrizität im Schienenverkehr) bilanziert und bewertet.⁵²
- › Die externen Kosten durch Ernteauffälle liegen in einer Grössenordnung von 74 Mio. CHF pro Jahr. Der berechnete Wert stellt einen nachvollziehbaren Durchschnittswert dar, da er auf der mittleren Ozonbelastung der vergangenen sechs Jahren sowie auf anerkannten Expositions-Wirkungs-Zusammenhängen beruht.
- › Die Bedeutung der Waldschäden liegt unter Berücksichtigung der heute vorliegenden Forschungsergebnisse deutlich tiefer als in früheren Abschätzungen (ca. 70 Mio. CHF pro Jahr). Die kausalen Zusammenhänge sind im komplexen Ökosystem Wald aber noch immer nur unvollständig erforscht und quantifizierbar. Weil daher nur ein Teil der Schadensaspekte quantifiziert werden konnte, könnten die tatsächlichen Kosten auch deutlich über der

⁵² Das günstige Abschneiden der Bahn hängt eng zusammen mit dem umweltfreundlichen Schweizer Bahnstrommix (über 95% Wasserkraft). Würde zum Vergleich der internationale Strom-Mix des europäischen Verbunds UCTE unterstellt, so würden sich die Kosten der Schiene in diesem Bereich verdoppeln bzw. verdreifachen.

vorliegenden Abschätzung liegen. In der Sensitivitätsanalyse wurde ein oberer Schwellenwert von maximal 250 Mio. CHF bestimmt.

- › Während die Schäden an Gewässern sehr gering bzw. nahe null sind, liegen die Schäden an der Bodenqualität in einem Bereich von rund 100 Mio. CHF pro Jahr.
- › Die zusätzlichen Schäden im alpinen Raum sind relativ schwierig zu quantifizieren (ca. 30 Mio. CHF). Die hier vorgenommene grobe Schätzung beruht auf einer Zahlungsbereitschaft für unberührte Natur, die als Proxygrösse dient. Sie kann als erster Anhaltspunkt für eine ungefähre Grössenordnung der erwarteten externen Kosten im Alpenraum dienen.
- › Zunehmende Raumkonflikte im urbanen Raum führen zu externen Kosten von rund 90 Mio. CHF jährlich für nicht motorisierte Verkehrsteilnehmer. Die Bedeutung dieser Kostenkategorie wird in Zukunft eher zunehmen.

Vergleich mit bisherigen Schätzungen

Die hier vorgenommenen Schätzungen weichen zum Teil erheblich von bisherigen Schätzungen ab. Dies hat verschiedene Gründe:

- › Differenzierte Betrachtungsweise, wie zum Beispiel im Klimabereich,
- › Neue Erkenntnisse von Dosis-Wirkungszusammenhängen, z.B. in den Bereichen Wald, Gewässer und Boden,
- › Neue und verbesserte Mengengerüste, wie bei den vor- und nachgelagerten Prozessen oder bei den Verkehrskosten in städtischen Räumen.

Zukünftiger Umgang mit den weiteren externen Effekten

Die Berechnungen zu den einzelnen Bereichen haben deutlich gemacht, dass die Schätzmethoden aufgrund verschiedener Ursachen – vor allem infolge grosser Unsicherheiten hinsichtlich zukünftiger Auswirkungen heutiger Emissionen sowie teilweise unbekannter oder noch zu wenig erforschter Wirkungszusammenhänge – deutlich schwieriger umzusetzen sind als bei den standardmässig geschätzten Verkehrskosten für Unfallfolgen, Lärm oder Luftverschmutzung. Die hier vorgenommene Abschätzung lässt sich unseres Erachtens nicht in gleichem Masse standardisieren. Eine jährliche Aktualisierung ist im Bereich der Klimakosten sowie der Kosten für vor- und nachgelagerte Prozesse auf Basis des Treibhausgasinventars bzw. des Handbuchs Emissionsfaktoren sowie standardmässig erhobener verkehrsstatistischer Daten möglich. Für die anderen Kostenbereiche müssten aufwändigere Aktualisierungsarbeiten, die vor allem aktuelle Forschungsergebnisse bzw. neue Datengrundlagen (insbesondere GIS-Datensätze) berücksichtigten, vorgenommen werden:

Für die einzelnen Kostenbereiche sind aus unserer Sicht einzelne vertiefte Analysen sinnvoll:

- › Im Klimabereich geht es darum, die aktuelle Diskussion um Kostensätze laufend zu verfolgen und mit den hier abgeleiteten Kostensätzen pro Tonne CO₂-Äquivalente zu vergleichen. Parallel lohnt sich eine Aufdatierung der in der Schweiz zu erwartenden Klimaschäden, die nicht Gegenstand dieser Studie waren. Sie sind aber nicht direkt mit den Emissionen des Verkehrs in der Schweiz in Verbindung zu bringen, sondern als eigenständige Schätzung zu kommunizieren.
- › Bei den weiteren Umweltkosten lohnen sich Vertiefungen unseres Erachtens weniger. Am sinnvollsten ist eine Detailanalyse zu zusätzlichen Kosten im Alpenraum. Dabei handelt es sich teilweise auch um zusätzliche Kosten, die in den bisherigen Schätzungen (Lärm und Luftverschmutzung des Transitverkehrs, Natur und Landschaft) zu wenig differenziert behandelt werden konnten. Gleichzeitig ist aber für den Alpenraum zu konstatieren, dass der Berechnung von externen Kosten Grenzen gesetzt sind.
- › Die zusätzlichen Kosten im städtischen Raum sind nur mit indirekten Ansätzen grob quantifizierbar. Detailanalysen sind allenfalls denkbar bei der Ermittlung von Kapazitätskosten (Staukosten, Knappheitskosten) für den Strassen- und den Schienenverkehr.
- › Die Kosten von vor- und nachgelagerten Prozessen sind – aufgrund ihrer Stellung im Lebenszyklus – getrennt zu behandeln. Zu vertiefen wäre hier die Situation der Schiene bei verändertem Strommix (z.B. UCTE) sowie die Kosten weiterer Emissionen (Luftschadstoffe, Gewässerverschmutzung, etc.) aus vor- und nachgelagerten Prozessen.

GLOSSAR

AOT40	Der AOT40 ist ein Mass für die akkumulierte Ozondosis über einem Schwellenwert von 40 ppb. Der AOT40 umfasst also die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen über einem Schwellenwert von 40 ppb während einer gewissen Periode. Der AOT40-Wert gilt als Mass für die chronische Langzeitbelastung der Ozonkonzentration während der Vegetationszeit von Pflanzen. Einheit: ppm*h oder ppb*h. (AOT: accumulated exposure over threshold). Der AOT40 für den Wald (AOT40f) kumuliert alle Ozonkonzentrationen oberhalb 40 ppb zwischen dem 1. April und dem 30. September (Wachstumsphase der Bäume), jeweils zwischen 6 und 20 Uhr. Der AOT40 für Kulturpflanzen (AOT40c) kumuliert alle Ozonkonzentrationen oberhalb 40 ppb zwischen dem 1. Mai und dem 31. Juli (Hauptwachstumsphase von Kulturpflanzen, während derer sie besonders anfällig auf hohe Ozonwerte sind), jeweils zwischen 6 und 20 Uhr.
ARA	Abwasserreinigungsanlage
ARE	Bundesamt für Raumentwicklung
ASTRA	Bundesamt für Strassen
BAFU	Bundesamt für Umwelt
BAV	Bundesamt für Verkehr
BFE	Bundesamt für Energie
BFS	Bundesamt für Statistik
BUWAL	ehemals Bundesamt für Umwelt, Wald & Landschaft, seit 1.1.2006 BAFU
BTEX	BTEX ist eine Abkürzung für die monozyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffverbindungen Benzol, Toluol, Ethylbenzol und die Xylole. BTEX dienen im Benzin zur Erhöhung der Oktanzahl und werden ausserdem als Lösungs- und Entfettungsmittel oder als Rohstoff in der chemischen Industrie eingesetzt. BTEX sind leichtflüchtig und gelangen aus dem Verkehr durch Verdunstung sowie infolge unvollständiger Verbrennung von Treibstoffen in die Luft. BTEX sind to-

	xisch, insbesondere das Benzol, das sowohl Blut schädigend als auch krebserregend wirkt.
CDM	siehe <i>Clean Development Mechanism</i>
CER	Certified Emissions Reduction. Zertifizierte Reduktion von Treibhausgasen im Rahmen von CDM Projekten.
CHF	Schweizer Franken
CH ₄	siehe <i>Methan</i>
Clean Development Mechanism	Einer der drei „flexiblen Mechanismen“ des Kyoto-Protokolls. Der Clean Development Mechanism ermöglicht Industrie- und Entwicklungsländern, gemeinsam Klimaschutz-Projekte in den Entwicklungsländern durchzuführen. Dabei wird das Projekt (z.B. die Errichtung einer Windkraftanlage) vom Industrieland finanziert. Die dadurch im Entwicklungsland vermiedenen Treibhausgasemissionen darf das Industrieland in seiner Treibhausgasbilanz verbuchen. Ein Teil des Finanztransfers im Rahmen der CDM-Projekte fließt in einen Fonds zugunsten der am meisten vom Klimawandel betroffenen Staaten.
CO ₂	siehe <i>Kohlendioxid</i>
CO ₂ -Äquivalente	Mit dem jeweiligen Treibhauspotenzial gewichtete Summe der Treibhausgase CH ₄ , N ₂ O, SF ₆ , PFC und HFC.
CO ₂ -eq	siehe <i>CO₂-Äquivalente</i>
Emission	Schadstoffausstoss am Ort der Entstehung, i.d.R. als Fracht in Tonnen pro Jahr angegeben
Emissionshandel	Emissionsreduktionen können in Form von Emissionszertifikaten gehandelt und an Länder verkauft werden, die ihr Reduktionsziel nicht erreichen. Der Handel kann innerhalb eines Unternehmens, innerhalb eines Landes oder zwischen den Ländern stattfinden. Der internationale Emissionshandel (International Emission Trading – IET) ist einer der drei „flexiblen Mechanismen“ des Kyoto-Protokolls
Externe Kosten	Kosten, die nicht vom Verursacher sondern von Dritten getragen werden.
Flexible Mechanismen	Die drei flexiblen Mechanismen des Kyoto-Protokolls sind Clean Development Mechanism (CDM), Emissionshandel (IET) und Joint Implementation (JI). Der Grundgedanke der drei Instrumente ist die

	Steigerung der Kosteneffizienz von klimapolitischen Massnahmen, indem Emissionsreduktionen dort erfolgen, wo sie am billigsten sind.
FOEN	Federal Office for the Environment, siehe auch <i>BAFU</i>
Fzkm	Fahrzeugkilometer
GtC	Gigatonnen Kohlenstoff. $1 \text{ GtC} = 10^{12} \text{ kg Kohlenstoff} = 3.67 \cdot 10^{12} \text{ kg CO}_2$.
HFC	siehe <i>Wasserstoffhaltige Fluor-Kohlenwasserstoffe</i>
Immission	Schadstoffe am Ort des Einwirkens, z.B. als Luftschadstoffkonzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$
IPCC	Zwischenstaatlicher Ausschuss über Klimaänderung (Intergovernmental Panel on Climate Change)
Joint Implementation	Einer der drei „flexiblen Mechanismen“ des Kyoto-Protokolls. Joint Implementation erlaubt es industrialisierten Ländern oder Unternehmen aus diesen Ländern, Projekte zur Verminderung von Emissionen oder zum Ausbau von Senken gemeinsam mit anderen Industrieländern gemäss Anhang B des Kyoto-Protokolls umzusetzen und die dabei entstehenden Emissionsreduktionen zu teilen.
Kohlendioxid (CO ₂)	Ein natürlich vorkommendes Gas, das u.a. bei der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Materialien entsteht. Es ist das wichtigste vom Menschen produzierte Treibhausgas, da es die Strahlungsbilanz der Erde gesamthaft am stärksten beeinflusst. Kohlendioxid ist eines der sechs Treibhausgase, die gemäss Kyoto-Protokoll reduziert werden sollen.
Kyoto-Protokoll	Das Kyoto-Protokoll wurde 1997 an der dritten Vertragsparteienkonferenz (COP – Conference of the Parties) des Rahmenübereinkommens der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (UNFCCC) in Kyoto, Japan, verabschiedet. Die Länder, die in Anhang B des Protokolls aufgeführt sind (die meisten OECD-Staaten und Länder im Übergang von Planwirtschaft zu Marktwirtschaft), vereinbarten eine Reduktion der Emission der wichtigsten Treibhausgase (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O, HFCs, PFCs und SF ₆) um mindestens 5% unter den Stand von 1990 innerhalb des Verpflichtungszeitraums von 2008 bis 2012. Das Kyoto-Protokoll tritt in Kraft, sobald es mindestens 55 Länder ratifi-

	ziert haben, die zusammen für mindestens 55% der Treibhausgasemissionen der Industrieländer im Jahr 1990 verantwortlich sind. Mit der Ratifikation des Protokolls durch Russland im November 2004 trat das Protokoll im Februar 2005 in Kraft.
Lachgas (N_2O)	Lachgas oder Distickstoffoxid ist eines der sechs Treibhausgase, die gemäss Kyoto-Protokoll reduziert werden sollen.
LKW	Lastkraftwagen
LV	Langsamverkehr
Methan (CH_4)	Ein Treibhausgas, das unter anderem aus Sumpfgebieten oder durch landwirtschaftliche Tätigkeiten (Reisanbau und Viehzucht) in die Atmosphäre gelangt. Es ist eines der sechs Treibhausgase, die gemäss Kyoto-Protokoll reduziert werden sollen.
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MTBE	Methyl-tertiär-Butylether. Organische Verbindung, die dem Benzin seit Mitte der achtziger Jahre als Antiklopfmittel zugegeben wird und damit das Blei abgelöst hat. MTBE ist heute in vielen Gewässern nachweisbar. Über die Toxizität von MTBE ist sich die Wissenschaft nicht einig. Heute wird jedoch angenommen, dass MTBE für den Menschen nur schwach toxisch ist.
NABEL	Nationales Beobachtungsnetz für Luftfremdstoffe
NAQUA	Nationales Netz zu Qualitätsbeobachtung des Grundwassers
N_2O	siehe <i>Lachgas</i>
NO_x	siehe <i>Stickoxide</i>
Ozon (O_3)	Molekül aus drei Sauerstoffatomen. In der Troposphäre wird Ozon sowohl natürlich als auch unter Einbezug von Gasen menschlichen Ursprungs gebildet. In hohen Konzentrationen kann troposphärisches Ozon auf viele Organismen (z.B. auf den Menschen) schädigend wirken. Troposphärisches Ozon wirkt als Treibhausgas. In der Stratosphäre wird Ozon durch das Zusammenwirken von solarer Ultraviolettstrahlung und molekularem Sauerstoff (O_2) gebildet. Stratosphärisches Ozon spielt eine entscheidende Rolle in der Strahlungsbilanz der Erde. Der Abbau stratosphärischen Ozons infolge chemischer Reaktionen, die durch die Klimaänderung verstärkt werden

	können, hat eine Zunahme der ultravioletten (UV-) B - Strahlung in Bodennähe zur Folge.
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe; Gruppe von organischen Substanzen, die bis zu 250 verschiedene Verbindungen umfasst. PAK entstehen hauptsächlich bei Verbrennungsprozessen von organischen Materialien (u.a. bei der Treibstoffverbrennung). Viele PAK sind toxisch, einige wirken beim Menschen krebserregend, u.a. das bekannteste PAK „Benzo(a)pyren“.
Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (PFC)	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (z.B. CF_4 und C_2F_6) sind Treibhausgase, die laut dem Kyoto-Protokoll reduziert werden sollen. PFCs sind sehr langlebige und haben ein grosses Treibhauspotential. Sie entstehen vorwiegend bei der Aluminium- und Halbleiterproduktion.
pkm	Personenkilometer
ppm, ppb	Verhältnis der Anzahl Teilchen einer Komponente (z.B. eines Treibhausgases) zur Anzahl Teilchen aller Komponenten innerhalb eines gegebenen Volumens. ppm, parts per million: Teile pro Million. ppb, parts per billion: Teile pro Milliarde.
PW	Personenwagen
Reparaturkosten	Quantifizierungsansatz zur Abschätzung der <i>Schadenskosten</i> , falls diese nicht direkt berechenbar sind. Sie entsprechen den Kosten, die bei der Wiederherstellung des ursprünglichen Zustands nach einer vom Verkehr verursachten Umweltbeeinträchtigung anfallen.
Rp	Rappen (100 Rappen = 1 CHF)
SAEFL	Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, siehe auch <i>BUWAL</i> , seit 1.1.2006 <i>BAFU</i>
Sanierungskosten	siehe <i>Reparaturkosten</i>
Schadenkosten	Bewertung der Schäden durch externe Effekte anhand der Ressourcenbeanspruchung (z.B. materielle Schäden an Pflanzen, Bauwerken, etc.)
SF_6	siehe <i>Schwefelhexafluorid</i>
SO_2	siehe <i>Schwefeldioxid</i>
Stickoxide (NO_x)	Zu den Stickoxiden gehören das Stickstoffmonoxid (NO) sowie das Stickstoffdioxid (NO_2). Stickoxide entstehen bei allen Verbrennungsprozessen mit Luft unter hohen Temperaturen. Dabei wird Luftstick-

	stoff (N_2) mit Sauerstoff oxidiert. Stickoxide entstehen unter anderem als Nebenprodukt bei der Verbrennung von Treib- und Brennstoffen. Stickoxide sind unter anderem für die Bildung von bodennahem Ozon verantwortlich.
Schwefeldioxid (SO_2)	Schwefeldioxid entsteht u.a. bei der Verbrennung schwefelhaltiger Treibstoffe wie z.B. Diesel, aber auch bei der Verbrennung anderer schwefelhaltiger Brennstoffe (Kohle, Holz, etc.)
Schwefelhexafluorid (SF_6)	Schwefelhexafluorid ist eines der sechs Treibhausgase, die gemäss Kyoto-Protokoll reduziert werden sollen. Es wird vorwiegend vom Menschen produziert und als Isolier- und Kühlgas verwendet. SF_6 ist langlebig (3200 Jahre) und hat das grösste Treibhauspotential der bekannten Gase.
tkm	Tonnenkilometer
Troposphäre	Unterste Schicht der Atmosphäre. Ihre Mächtigkeit beträgt ungefähr 10 km (9 km in hohen Breitengraden und 16 km in den Tropen). In der Troposphäre spielt sich das Wetter ab. Die Temperatur nimmt normalerweise mit zunehmender Höhe ab.
Treibhausgas	Gasförmige Bestandteile der Atmosphäre, die die langwellige (Infrarot-) Strahlung von Erdoberfläche, Atmosphäre und Wolken absorbieren und ihrerseits langwellige Strahlung in alle Richtungen ausstrahlen. Dadurch erwärmt sich die Atmosphäre. Wasserdampf (H_2O), Kohlendioxid (CO_2), Lachgas (N_2O), Methan (CH_4) und Ozon (O_3) sind die wichtigsten Treibhausgase in der Erdatmosphäre. Ihre Konzentrationen werden durch menschliche Aktivitäten erhöht. Ausserdem gibt es Treibhausgase, die vorwiegend vom Menschen produziert sind, wie PFCs, HFCs und SF_6 .
UCTE	Union for the co-ordination of the Transmission of Electricity (Europäischer Stromverbund). Der UCTE-Verbund umfasst folgende Länder: Belgien, Deutschland, Spanien, Frankreich, Griechenland, Slowenien, Kroatien, Bosnien Herzegowina, Republik Jugoslawien (Serbien und Montenegro), Mazedonien, Luxemburg, Niederlande, Portugal, Schweiz.
UNFCCC	UN Framework Convention on Climate Change

UNITE	UNification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency (EU-Forschungsprojekt im 5. Rahmenprogramm)
Vermeidungskosten	Konzept zur Bewertung der externen Kosten. Es werden Kosten erfasst, die bei der Vermeidung von externen Kosten anfallen.
VOC	Volatile Organic Compounds: flüchtige organische Verbindungen. Zu den VOC gehören alle organischen Verbindungen, die sich bei den jeweils herrschenden Umgebungsbedingungen (Temperatur und Druck) von selbst verflüchtigen. VOC gelten in der Luft als Schadstoffe, weil sie einerseits die Atemwege reizen und andererseits für die Bildung von bodennahem Ozon mit verantwortlich sind. VOC stammen hauptsächlich aus Lösungsmitteln und verschiedenen Produktionsprozessen der Industrie. Zudem gelangen auch im Verkehr durch Verdunstung sowie Verbrennung von Treibstoffen VOC in die Umwelt.
VSS	Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute
VZ	Volkszählung
Wasserstoffhaltige Fluor-Kohlenwasserstoffe (HFC)	Wasserstoffhaltige Fluor-Kohlenwasserstoffe (hydrofluorocarbons) gehören zu den sechs Treibhausgasen, die gemäss Kyoto-Protokoll reduziert werden sollen. HFCs haben ein grosses Treibhauspotential. Sie werden vorwiegend als Kühlmittel verwendet.
Wissensstandsberichte des IPCC	Die umfassenden Wissensstandsberichte des IPCC erscheinen ca. alle 5 Jahre. Der erste Bericht (First Assessment Report) erschien 1990, der zweite Bericht (SAR – Second Assessment Report) 1996 und der dritte (TAR – Third Assessment Report) im Jahr 2001.

LITERATUR

- Altwegg 1988:** Volkswirtschaftliche Auswirkungen einer Zerstörung alpiner Schutzwälder durch Luftverunreinigungen: Mögliche Bewertungsmethoden und deren Grenzen, D. Altwegg, Verlag Haupt, Bern und Stuttgart, 1988.
- Altwegg 1989:** Die Folgekosten von Waldschäden: Bewertungsansätze für die volkswirtschaftlichen Auswirkungen bei einer Beeinträchtigung der Schutzfunktion von Gebirgswäldern, D. Altwegg, Forstwissenschaftliche Beiträge (8) des Fachbereichs Forstökonomie und Forstpolitik der ETH Zürich, Zürich, 1989.
- ARE 2004a:** Aktualisierung der verkehrlichen Auswirkungen von LSVA und 40t-Limite, Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Bern, August 2004.
- ARE 2004b:** Perspektiven des schweizerischen Güterverkehrs bis 2030, Hypothesen und Szenarien, Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), Bern, Oktober 2004.
- ASTRA 1997:** Einfluss der Ausbringung von Streusalz auf das benachbarte und entferntere Grundwasser, Publikation der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS) 386, Bundesamt für Strassen (ASTRA), Zürich 1997.
- ASTRA 1999:** Jahresstaubericht 1998, Gemeldete Staus auf den Nationalstrassen, Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bern 1999.
- ASTRA 2003:** Effizienz von öffentlichen Investitionen in den Langsamverkehr, Frick, R., Wüthrich, P., Keller, M. (INFRAS), im Auftrag des ASTRA, Schlussbericht, Bern, März 2003.
- Bates et al. 2001:** Economic Evaluation of Emissions Reductions in the Transport Sector of the EU, Bottom-up Analysis, Economic Evaluation of Sectoral Emission Reduction Objectives for Climate Change, Judith Bates, Christian Brand, Paul Davison, Nikolas Hill, Final Report (updated version), March 2001.
- Baur 2004:** Sind Stürme im Wald eine wirtschaftliche Katastrophe?, P. Baur, Neue Zürcher Zeitung (NZZ), Ausgabe vom 9. 9. 2004.
- BFE 2003:** Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2003, Bundesamt für Energie (BFE), Bern.
- BFE 2004:** Schweizerische Holzenergiestatistik: Folgerhebung für das Jahr 2003, Bundesamt für Energie (BFE), Bern 2004.
- BFS 2000:** Schweizerische Verkehrsstatistik 1996/2000, Bundesamt für Statistik (BFS), Neuchâtel 2000.
- BFS 2002:** Statistisches Jahrbuch der Schweiz 2002, Bundesamt für Statistik (BFS), Verlag Neue Zürcher Zeitung, Zürich 2002.

- BFS 2004a:** Landwirtschaftliche Strukturerhebung 2000: Bodennutzung, Statistik zum Bereich Land- und Forstwirtschaft, Bundesamt für Statistik (BFS), 2004, www.agr-bfs.ch
- BFS 2004b:** Wald und Holz: Jahrbuch 2004, Bundesamt für Statistik (BFS) und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Neuchâtel 2004.
- BFS 2005a:** Homepage 'Statistik Schweiz', Bundesamt für Statistik, www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index.html
- BFS 2005b:** Holzpreise, Januar – April 2005, Bundesamt für Statistik (BFS), Neuchâtel 2005.
- BFS/GEOSTAT 2001:** Arealstatistik 1992/97, Elektronischer GIS-Datensatz, Bundesamt für Statistik (BFS), Neuenburg 2001.
- BFS/GEOSTAT 2005:** Arealstatistik 1992/97 (74 Kategorien), Detailauswertung nach 37 Nutzungskategorien (Siedlungs- und Verkehrsflächen), elektronischer Datensatz, Bundesamt für Statistik (BFS), Neuenburg 2005.
- BLFW 1999:** Salzstreuung – Auswirkungen auf die Gewässer, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (BLW), Merkblatt Nr. 3.1.-1, München 1999. www.bayern.de/lfw
- BLW 2001:** Agrarbericht 2001, Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Bern 2001.
- Blok et al. 2001:** Economic Evaluation of Sectoral Emission Reduction Objectives for Climate Change, Summary Report for Policy Makers, Updated March 2001, Kornelis Blok, David de Jager, Chris Hendriks, ECOFYS Energy and Environment – Netherlands, AEA Technology Environment – United Kingdom, National Technical University of Athens – Greece, <http://europa.eu.int/comm/environment/enveco>, http://europa.eu.int/comm/environment/enveco/climate_change/sectoral_objectives.htm
- Boiteux/Baumstark 2001:** Transport: choix des investissements et coûts des nuisances, Commissariat Général du Plan, Paris 2001.
- Bosch & Partner 1993:** Faktische Grundlagen für die Ausgleichsabgabenregelung (Wiederherstellungskosten), Forschungsvorhaben i. A. d. BFANL (BfN), 1993.
- Brang 1998:** Sanasilva-Bericht 1997: Zustand und Gefährdung des Schweizer Waldes – eine Zwischenbilanz nach 15 Jahren Waldschadensforschung, Peter Brang (Hrsg.), BUWAL und WSL, Bern und Birmensdorf 1998.
- Braun et al. 1999:** Growth of mature beech in relation to ozone and nitrogen deposition: an epidemiological approach, S. Braun, B. Rihm, C. Schindler, W. Flückiger, Water, Air, and Soil Pollution 116 (1999), pp. 357-364.
- Braun et al. 2002:** Forest damages by the storm 'Lothar' in permanent observation plots in Switzerland: The signification of soil acidification and nitrogen deposition, S. Braun, C. Schindler, R. Volz, W. Flückiger, Water, Air and Soil Pollution 142 (2002), pp. 327-340.

- BUWAL 1992:** Bodenverschmutzung durch den Strassen- und Schienenverkehr in der Schweiz, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Schriftenreihe Umwelt Nr. 185, Bern 1992.
- BUWAL 1996a:** Umwelt-Materialien Nr. 49 - Schadstoffemissionen und Treibstoffverbrauch des Offroad-Sektor, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 1996.
- BUWAL 1996b:** Troposphärisches Ozon: aktuelle Forschungsergebnisse und ihre Konsequenzen für die Luftreinhaltung, Schriftenreihe Umwelt Nr. 277, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 1996
- BUWAL 1999a:** Weisung für die Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Verkehr (BAV), Bern 1999.
- BUWAL 1999b:** Critical levels for ozone - level II, Workshop under the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution of the United Nations Economic Commission for Europe (UN/ECE), Gerzensee, Switzerland, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 11-15 April 1999.
- BUWAL 2000a:** Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1950-2020, Nachtrag, Schriftenreihe Umwelt, Nr. 255 Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 2000.
- BUWAL 2000b:** NABO, nationales Boden-Beobachtungsnetz, Veränderungen von Schadstoffgehalten nach 5 und 10 Jahren, Schriftenreihe Umwelt Nr. 320, Boden, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 2000.
- BUWAL 2001a:** Massnahmen zur Reduktion der PM10-Emissionen, Umwelt-Materialien Nr. 136, Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 2001.
- BUWAL 2001b:** Verwertung von ausgehobenem Boden (Wegleitung Bodenaushub), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 2001.
- BUWAL 2002a:** NABEL, Luftbelastung, Schriftenreihe Umwelt, Nr. 343, Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 2002.
- BUWAL 2002b:** PM10-Emissionen des Verkehrs, Statusbericht, Teil Schienenverkehr, Umweltmaterialien Nr. 144, Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 2002.
- BUWAL 2002c:** Umwelt Schweiz 2002 – Politik und Perspektiven, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 2002.
- BUWAL 2003a:** Landschaft 2020, Analysen und Trends, Grundlagen zum Leitbild des BUWAL für Natur und Landschaft, Schriftenreihe Umwelt SRU-352-D, Bern 2003.

- BUWAL 2003b:** Pressemitteilung zur Sanasilva-Inventur 2002, BUWAL und WSL, Bern, Januar 2003.
- BUWAL 2003c:** Anthropogene VOC-Emissionen Schweiz 1998 und 2001, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Internetpublikation, 2003.
- BUWAL 2003d:** LOTHAR – Ökonomische Auswirkungen, Wald- und Gesamtwirtschaft, Umwelt-Materialien Nr. 157, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 2003.
- BUWAL 2004a:** NAQUA - Grundwasserqualität in der Schweiz 2002/2003, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Bern 2004.
- BUWAL 2004b:** Kenngrößen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz (1990-2002), Stand Sommer 2004, Datenbasis Treibhausgasinventar 2002, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 2004.
- BUWAL 2004c:** Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1980-2030, Schriftenreihe Umwelt Nr. 355, Luft, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 2004.
- BUWAL 2004d:** UMWELT, Magazin der Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Ausgabe 2/2004, Bern 2004.
- BUWAL 2004e:** Erkenntnisse aus der Sturmschadenbewältigung, Synthese des Lothar-Grundlagenprogramms, Schriftenreihe Umwelt Nr. 367, Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 2004.
- BUWAL 2004f:** LOTHAR – Rechenschaftsbericht, Materielle und finanzielle Bilanz 2000-2003, Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 2004.
- BUWAL 2005a:** LOTHAR – Ursächliche Zusammenhänge und Risikoentwicklung, Umwelt-Materialien Nr. 184, Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 2005.
- BUWAL 2005b:** Stickstoffhaltige Luftschadstoffe in der Schweiz, Status-Bericht der Eidg. Kommission für Lufthygiene (EKL), Schriftenreihe Umwelt Nr. 384, Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern 2005.
- BUWAL/BWG 2004:** NAQUA – Grundwasserqualität in der Schweiz 2002/2003, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG), Bern 2004.

- BUWAL/SAEFL 2003:** Modelling of PM10 and PM2.5 ambient concentrations in Switzerland 2000 and 2010, Environmental Documentation No. 169, Air, Published by the Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL/BUWAL), Berne 2003.
- BUWAL/SAEFL 2004:** NO₂ concentrations in Switzerland 2000-2020 and benzene concentrations 2000-2010, INFRAS/METEOTEST, to be published in Environment Series by the Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL/BUWAL), Berne 2004.
- BUWAL/WSL 2005:** Waldbericht 2005 – Zahlen und Fakten zum Zustand des Schweizer Waldes, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Bern/Birmensdorf 2005.
- CAEP 2003:** Estimates of the external costs and abatement costs of carbon dioxide emissions, Appendix, Committee on Aviation and Environmental Protection (CAEP), Forecast and economic analysis support group, March 2003.
- Capros/Mantzos 2000a:** Kyoto and technology at the European Union: costs of emission reduction under flexibility mechanism and technology progress, Capros P., Mantzos L., Int. J. Global Energy Issues, 14, pp. 169-183.
- Capros/Mantzos 2000b:** European Union post-Kyoto scenarios: benefits from accelerated technology progress, Capros P., Mantzos L., Int. J. Global Energy Issues, 14, pp. 204-221.
- Clarkson/Deyes 2002:** Estimating the Social cost of Carbon emissions, Clarkson, R., Deyes, K., Government Economic Service Working Paper 140, Environment Protection Economics Division, Department of Environment, Food and Rural Affairs, London 2002.
- Criqui/Viguier 2000:** Kyoto and technology at world level: costs of CO₂ reduction under flexibility mechanism and technical progress, Int. J. Global Energy Issues, 14, pp. 155-168.
- Crispino 2001:** Measurement and prediction of traffic-induced vibrations in a heritage building, M. Crispino, M. D'Apuzzo, Journal of Sound and Vibration (2001), 246(2), pp. 319-335.
- DIW 2004:** Die ökonomischen Kosten des Klimawandels, Kemfert, C., in: DIW Wochenbericht Nr. 42/2004, 71. Jahrgang, Berlin, 14. Oktober 2004.
- Downing/Watkiss 2003:** The Social Costs of Carbon in Policy Making: Applications, Uncertainty and a Possible Risk Based Approach, Paper presented at the International Seminar on the Social Cost of Carbon, 7th July 2003.
(www.defra.gov.uk/environment/climatechange/carbonseminar/)

- Duerinck et al. 1999:** Prospective study of emissions in Belgium until 2008/2012 of the greenhouse gases included in the Kyoto Protocol. Costs and potential measures and policy instruments to reduce GHG emissions, Vito & KU-Leuven.
- EBP 1986:** Die volkswirtschaftlichen Folgen des Waldsterbens in der Schweiz, Ernst Basler & Partner in Zusammenarbeit mit Brugger, Hanser & Partner, Schweizerische Gesellschaft für Umweltschutz (SGU), Zürich 1986.
- EC 1999:** ExternE Externalities of Energy, Vol 10 – National Implementation, a report produced for the EC – DG XII, Luxembourg, Office of Publications for the European Communities, Luxembourg 1999.
- EC 2003a:** Greenhouse Gas Reduction Pathways in the UNFCCC Process up to 2025 – Technical Report, Authors: P. Criqui, A. Kitous, M. Berk, M. den Elzen, B. Eickhout, P. Lucas, D. van Vuuren, N. Kouvaritakis and D. Vanregemorter, Study Contract: B4-3040/2001/325703/MAR/E.1 for the DG Environment, October 2003.
- EC 2003b:** Greenhouse Gas Reduction Pathways in the UNFCCC Process up to 2025 – Policy-makers Summary, CNRS/LEPII-EPE (France), RIVM/MNP (Netherlands), ICCS-NTUA (Greece), CES-KUL (Belgium), Study Contract: B4-3040/2001/325703/MAR/E.1 for the DG Environment, October 2003.
- EC 2005a:** Strategie für eine erfolgreiche Bekämpfung der globalen Klimaänderung, Mitteilung der Kommission an den Rat, an das Europäische Parlament, an den Europäischen wirtschafts- und Sozialausschuss und an den Ausschuss der Regionen, KOM(2005)35, Kommission der Europäischen Gemeinschaften, Brüssel, 9.2.2005.
- EC 2005b:** Winning the battle against global climate change, Background paper, Commission Staff Working Paper, Commission of the European Communities, Brussel, 9.2.2005.
- ECMT 2003:** External and Infrastructure Costs of Road and Rail Traffic – Analysing European Studies, European Conference of Ministers of Transport – Committee of Deputies (CEMT/CS / FIFI), Delft 2003.
- Ecoinvent 2004a:** Ecoinvent Data v1.1., Final reports ecoinvent 2000 No. 1-15, ecoinvent Centre (2004), Swiss Centre for Life Cycle Inventories, retrieved from: www.ecoinvent.ch, Dübendorf 2004.
- Ecoinvent 2004b:** Life Cycle Inventories of Transport Services, Data v1.1 (2004), Spielmann, M., Kägi, T., Stadler, P., Tietje, O., ETH Zürich, econinvent report No. 14, Dübendorf, Mai 2004.

- Econcept/Nateco 2003:** Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft, Econcept Zürich und Nateco Gelterkinden, im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung, Bern 2003.
- Ecoplan 1992:** Externe Kosten Verkehr Region Bern, Bern 1992.
- Ecoplan 1998:** Externalitäten im Verkehr - methodische Grundlagen, GVF-Auftrag Nr. 281a, Bern 1998.
- Ecoplan 2002:** Unfallkosten im Strassen- und Schienenverkehr der Schweiz 1998. Im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung. Bern 2002.
- Ecoplan 2004a:** Externe Gesundheitskosten durch verkehrsbedingte Luftverschmutzung. Aktualisierung für das Jahr 2000, Ecoplan, Infras, ISPM Institut für Sozial- und Präventivmedizin. Im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung, des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft, des Bundesamtes für Energie sowie des Bundesamtes für Gesundheit, Bern 2004.
- Ecoplan 2004b:** Externe Lärmkosten des Strassen- und Schienenverkehrs. Aktualisierung für das Jahr 2000. Ecoplan, Planteam, IHA-ETH Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie. Im Auftrag des Bundesamtes für Raumentwicklung, des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft, des Bundesamtes für Energie, des Bundesamtes für Statistik sowie des Bundesamtes für Gesundheit, Bern 2004.
- Ecoplan 2004c:** Zahlen die Agglomerationen für die Alpen?, Auswertung der Finanzströme zwischen Alpenraum und übriger Schweiz im Rahmen des Projektes ALPAYS im Nationalen Forschungsprogramm 48 „Landschaften und Lebensräume der Alpen“, Bern 2004.
- Egger 1999:** Kosten und Nutzen im Natur- und Landschaftsschutz, Monetarisierungs- und Beurteilungsmodell für Schutzmassnahmen im Verkehr, NFP 41 "Verkehr und Umwelt", Bericht C1, Egger, M. (Infraconsult), Bern 1999.
- EKL 2003:** Ozon in der Schweiz 2003, Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL), Bern 2003.
- EKL 2004:** Sommersmog, Eidgenössische Kommission für Lufthygiene (EKL), Bern, 2004.
- den Elzen et al. 2004:** Abatement costs of post-Kyoto climate regimes, Michel den Elzen, Paul Lucas, Detlef van Vuuren, Energy Policy, Volume 33, Issue 16, November 2005, Pages 2138-2151.
- den Elzen/Berk 2004:** Bottom-up approaches for defining future climate mitigation commitments, M.G.J. den Elzen, M.M. Berk, RIVM report 728001029/2004, Bilthoven 2004.
- den Elzen/Meinshausen 2005:** Meeting the EU 2°C climate target: global and regional emission implications, M.G.J. den Elzen, M. Meinshausen, Report 728001031/2005,

- Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP associated with the RIVM), website: www.mnp.nl, Bilthoven 2005.
- ETSAP 1996:** Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) of Energy Research Center of the Netherlands, Petten - NL, 1996.
- Ewers 1986:** Zur monetären Bewertung von Umweltschäden – Methodische Untersuchung am Beispiel der Waldschäden, H. J. Ewers, M. Kemper, Umweltbundesamt-Bericht 4/86, Berlin 1986.
- EWS 1997:** Kommentar zum Entwurf "Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Strassen (EWS)", Aktualisierung der RAS-W'86, Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen, Köln 1997
- Fahl et al. 1999:** E³Net. In: Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen in Deutschland Hrsg.) (1999) Energiemodelle zum Klimaschutz in Deutschland. Physica –Verlag, Heidelberg 1999.
- Flückiger/Braun 1998:** Nitrogen deposition in Swiss forests and its possible relevance for leaf nutrient status, parasite attacks and soil acidification, W. Flückiger, S. Braun, Environmental Pollution, Vol. 102, Issue 1, Supplement 1 (1998), pp. 69-76.
- Friedrich/Bickel 2001:** Environmental External Costs of Transport, Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy (IER), Stuttgart 2001.
- Fuhrer 1989:** Luftverschmutzung und landwirtschaftliche Kulturpflanzen in der Schweiz, J. Fuhrer, B. Lehnherr, F. X. Stadelmann, Nationales Forschungsprogramm 14 „Lufthaus-halt und Luftverschmutzung in der Schweiz“, Herausgeber: Eidgenössische Forschungs-anstalt für Agrikulturchemie und Umwelthygiene, Liebefeld-Bern 1989.
- Fuhrer 1997:** Critical Levels for ozone effects on vegetation in Europe, J. Fuhrer, L. Skärby, M. R. Ashmore, Environmental Pollution, Vol. 97, No. 1-2: 91-97, 1997.
- Fuhrer 2001:** Unterlagen zur Vorlesung "Wirkung von Chemikalien auf Umwelt und Mensch und ihre Vernetzung" am Departement Umweltnaturwissenschaften der ETH Zürich, Prof. Jürg Fuhrer, Eidgenössische Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau Liebefeld-Bern, Wintersemester 2000/2001.
- Fuhrer 2002:** Ozon impacts on vegetation. Ozone Science & Engineering 24, 69-74.
- Fuhrer 2003:** Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change, J. Fuhrer, Agriculture Ecosystems & Environment 97, 1-20, 2003.
- Fuhrer 2004:** Von der Ozonmessung zur Risikobeurteilung für Nutzpflanzen, Fuhrer, J., Fachtagung 25 Jahre NABEL Dübendorf, 16.1.2004, BUWAL Umwelt-Materialien Nr. 171 Luft 2004, 51-54.

- Gregory 1996:** Estimates of damage to forests in Europe due to emissions of acidifying pollutants, K. Gregory, C. Webster, S. Durk, Energy Policy, Vol. 24, No. 7, pp. 655-664, 1996.
- Grêt-Regamey/Bebi 2004:** Ökonomische Bewertung von jetzigen und zukünftigen Landschaften in Tourismusregionen, Proj.:18/Modul 3, Landschaftliche und ökonomische Zukunftsszenarien für alpine Regionen: Simulation von zukünftigen Landschaften und Entwicklung von regionalen Entscheidungshilfesystemen, NFP 48, Arbeitspapier v. 7.6.2004, Davos 2004.
- Grêt-Regamey/Bishop/Bebi 2005:** Predicting the scenic beauty value of mapped landscape changes in a mountainous region using GIS, Zurich 2005, (in submission).
- Hare/Meinshausen 2004:** How much warming are we committed to and how much can be avoided?, Hare, B., Meinshausen, M., PIK Report No. 93, Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK), Potsdam, Oktober 2004.
- Herry/INFRAS/PROGNOS:** Externe Kosten des Verkehrs im Gotthard Korridor, Schlussbericht Phase II (Teil Schweiz), im Auftrag des Bundesministeriums für öffentliche Wirtschaft und Verkehr (Wien) und des Dienstes für Gesamtverkehrsfragen (GVF) im Eidgenössischen Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement (Bern), Zürich 1995.
- Holenstein 2000:** Die Belastung mit PAK und Blei an Strassen im Kanton Zürich, J. Holenstein, Beratung für Umwelt und Boden, im Auftrag der Fachstelle Bodenschutz, Amt für Umwelt und Natur des Kantons Zürich, St. Gallen 2000.
- Holland 2002:** Economic Assessment of Crop Yield Lossess from Ozone Exposure, M. Holland, G. Mills, F. Hayes, A. Buse, L. Emberson, H. Cambridge, S. Cinderby, A. Terry, M. Ashmore, The UNECE International Cooperative Programme on Vegetation, Contract EPG 1/3/170, University of Wales, Bangor (UK) 2002.
- Hope 2005:** Chris Hope, Cambridge University, using the PAGE model as part of the support contract to DG Environment for Modelling support for Future Actions - Benefits and Cost of Climate Change, zitiert in EC 2005.
- Huckestein 1996:** Externe Effekte des Verkehrs in Deutschland, B. Huckestein, H. Verron, Studie im Rahmen des Workshops „Mobilität um jeden Preis? – Expertenworkshop zu den externen Kosten des Verkehrs und den Möglichkeiten sie zu verringern“, UBA-Texte 66/96, Berlin 1996.
- IAP 1999:** Wie geht es unserem Wald? Untersuchungen in Walddauerbeobachtungsflächen von 1984 bis 1998, W. Flückiger, S. Braun, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (I-AP), Schönenbuch 1999.

- IAP 2004:** Wie geht es unserem Wald? Ergebnisse aus Dauerbeobachtungsflächen von 1984 bis 2004, Bericht 2, W. Flückiger, S. Braun, Institut für Angewandte Pflanzenbiologie (IAP), Schönenbuch 2004.
- INFRAS 1992:** Externe Kosten im Verkehr Region Zürich, Zürich 1992
- INFRAS 1995a:** Zahlungsbereitschaften für eine Verringerung des Klimarisikos, Zürich 1995
- INFRAS 1995b:** Ökoinventar Transporte – Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Transportsystemen und für den Einbezug von Transportsystemen in Ökobilanzen, SPP Umwelt, Zürich 1995.
- INFRAS 1997:** Umweltindikatoren im Verkehr, ökologische Kennziffern für die Ermittlung der Umwelteffizienz verschiedener Verkehrsmittel, Zürich 1997.
- INFRAS 1998:** Staukosten in der Schweiz, Bern 1998.
- INFRAS 2001:** Staukosten und weitere externe Kosten des Verkehrs im Kanton Zug, im Auftrag des Amts für Raumplanung Kanton Zug, Zürich 2001.
- INFRAS 2003:** CO₂-Abgabe/Klimarappen bei Treibstoffen, Schlussbericht, Keller, Mario, Zbinden, René, im Auftrag des BUWAL, Bern 2003.
- INFRAS 2004a:** Handbuch Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs (HBEFA), Version 2.1, Bern 2004.
- INFRAS 2004b:** Verkehrsbedingte Gebäudeschäden in der Schweiz, Aktualisierung der externen Kosten 2000, im Auftrag des Bundesamts für Raumentwicklung (ARE), Zürich 2004.
- INFRAS 2004c:** Vision 2050, Aufdatierung 2004, Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich AWEL, Synthesebericht, Stefan Kessler, Christian Schneider, Rolf I-ten INFRAS, mit Beiträgen von Martin Jakob, CEPE (ETH Zürich), Zürich, 21. Dezember 2004 (nicht veröffentlicht).
- INFRAS 2005:** Energieverbrauch Sektor Verkehr, Ergebnisse der Szenarien Ia und Ib, energieperspektiven 2035/2050, Energienachfrage, Stand 30.4. 2005, Bearbeiter: Mario Keller (INFRAS), im Auftrag des BFE, Bern 2005.
- INFRAS, Econcept & Prognos 1996:** Die vergessenen Milliarden: externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich, Bern: Paul Haupt, 1996
- INFRAS/BEW 1992:** CO₂-Verminderung im Verkehr, Zürich 1992
- INFRAS/EBP 2004:** Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990-2002, National Inventory report 2004, Submission to the United nations Framework Convention on Climate Change, Swiss Confederation, Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape SAEFL, Berne, April 2004.

- INFRAS/ECONCEPT/PROGNOS 1996:** Die vergessenen Milliarden: Externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich in der Schweiz, Paul Haupt Verlag, Zürich 1997.
- INFRAS/IWW 1995:** External effects of transport, UIC, Karlsruhe, Zurich, Paris 1995.
- INFRAS/IWW 2000:** External Costs of Transport: Accident, Environmental and Congestion Costs of Transport in Western Europe, Zürich/Karlsruhe 2000.
- INFRAS/IWW 2004:** External costs of transport, Update study, Final report, Zürich/Karlsruhe 2004.
- IPCC 2001a:** Climate Change 2001: The scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp., 2001.
- IPCC 2001b:** Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, A., Dokken, D.J., White, K.S. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.
- IPCC 2001c:** Climate Change 2001: Impacts, Adaption, and Vulnerability, Summary for Policymakers, A Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on climate Change IPCC, 2001.
- IPCC 2001d:** Climate Change 2001: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2001.
- IPCC 2001e:** Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Watson, R.T. and the Core Writing Team, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 398 pp., 2002.
- IRER 1993:** Institut de Recherches Economiques et Régionales (Neuchâtel): Die sozialen Kosten des Verkehrs in der Schweiz (GVF-Auftrag Nr. 174), Bern 1993.
- Jakob et al. 2002:** Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienzmassnahmen in Wohngebäuden, M. Jakob, E. Jochem, Centre for Energy Policy and Economics (CEPE), K. Christen, Architektur und Baurealisation, ETH Zürich, im Auftrag des Bundesamtes für Energie BFE, Bern 2002.

- Jentschke et al. 2001:** Does soil acidity reduce subsoil rooting in Norway spruce (*Picea abies*)?, G. Jentschke, M. Drexhage, H.-W. Fritz, E. Fritz, B. Schella, D.-H. Lee, F. Gruber, J. Heimann, M. Kuhr, J. Schmidt, S. Schmidt, R. Zimmermann, D. L. Godbold, *Plant and Soil*, Vol. 237, No. 1, pp. 91-108, 2001.
- JIQ 2002a:** Joint Implementation Quarterly – April 2002.
- JIQ 2002b:** Joint Implementation Quarterly – July 2002.
- JIQ 2002c:** Joint Implementation Quarterly – December 2002.
- Karlsson et al. 2005:** Economic Assessment of the Negative Impacts of Ozone on Crop Yields and Forest Production: A Case Study of the Estate Östads Säteri in Southwestern Sweden, P. E. Karlsson, H. Pleijel, M. Belhaj, H. Danielsson, B. Dahlin, M. Andersson, M. Hansson, J. Munthe, P. Grennfelt, *Ambio*, Vol. 34, No. 1, p. 32-40, Februar 2005.
- Kaufmann et al. 2000:** Luftverkehr - eine wachsende Herausforderung für die Umwelt, Fakten und Trends für die Schweiz, Kaufmann Y., Meier R., Ott W., Materialienband M25 des Nationalen Forschungsprogramms 41 Verkehr und Umwelt, Wechselwirkungen Schweiz – Europa, Bern 2000.
- Klaeboe et al. 2003a:** Vibration in dwellings from road and rail traffic – Part II: exposure-effect relationships based on ordinal logit and logistic regression models, R. Klaeboe, I. H. Turunen-Rise, L. Hårvik, C. Madshus, *Applied acoustics* 64 (2003), pp. 89-109.
- Klaeboe et al. 2003b:** Vibration in dwellings from road and rail traffic – Part III: towards a common methodology for socio-vibrational surveys, R. Klaeboe, E. Öhrström, I. H. Turunen-Rise, H. Bendtsen, H. Nykänen, *Applied acoustics* 64 (2003), pp. 111-120.
- Knall 1996:** Railway noise and vibration: effects and criteria, V. Knall, *Journal of Sound and Vibration* (1996), 193 (1), pp. 9-20.
- König et al. 2004:** Zeitkostenansätze im Personenverkehr, König, A., Axhausen, K.W., Abay, G., Forschungsauftrag Nr. 2001/534 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Verkehrsingenieure (SVI), im Auftrag von: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen, Februar 2004.
- LINK 1997:** Einfluss der Ausbringung von Streusalz auf das benachbarte und entfernte Grundwasser, Peter Link AG, P. Blaser, P. Link, P. Lüdin, W. Ryf, Forschungsauftrag 18/92 der Vereinigung Schweizer Strassenfachleute (VSS), Zürich 1997.
- Litman 2003:** Transportation Cost and Benefit Analysis: Techniques, Estimates and Implications, T. A. Litman, Victoria Transport Policy Institute, Victoria (Canada), 2003. www.vtpi.org.

- Maibach et al. 1999:** Faire und effiziente Preise im Verkehr, Ansätze für eine verursachergerechte Verkehrspolitik in der Schweiz, Maibach M., Schreyer C., Banfi S., Iten R., de Haan P., Bericht D3 und Materialienband M3 des Nationalen Forschungsprogramms 41 Verkehr und Umwelt, Wechselwirkungen Schweiz – Europa, Bern 1999.
- Mayer et al. 2005:** Forest storm damage is more frequent on acidic soils, P. Mayer, P. Brang, M. Dobbertin, D. Hallenbarter, J.-P. Renaud, L. Walthert, S. Zimmermann, *Annals of Forest Science* 62 (2005), pp. 303-311.
- Meier 1998:** Sozioökonomische Aspekte von Klimaänderungen und Naturkatastrophen in der Schweiz, Ruedi Meier, vdf Zürich, Zürich 1998.
- Meloni, Krueger 1990:** Wahrnehmung und Empfindung von kombinierten Belastungen durch Lärm und Vibration, T. Meloni, H. Krueger, *Zeitschrift für Lärmbekämpfung* V37 (1990), S. 170-175.
- Müller-BBM 2001:** Lärm im Alpenraum durch Strassen- und Schienenverkehr, Müller-BBM Schalltechnisches Beratungsbüro/Dr.-Ing. U.J. Kurze, im Auftrag der Alpen-Initiative, Planegg bei München, Oktober 2001.
- Murphy et al. 1999:** The cost of crop damage caused by ozone air pollution from motor vehicles, J. J. Murphy, M. A. Delucchi, D. R. McCubbin, H. J. Kim, *Journal of Environmental Management* (1999) 55, S. 273-289.
- Näf 1991:** Ökonomische Konsequenzen der Luftverschmutzung für die schweizerische Landwirtschaft, W. Näf, Dissertation Universität Fribourg, Fribourg 1991.
- Nellthorp et al. 2001:** Valuation Conventions for UNITE, Nellthorp J, Sansom T, Bickel P, Doll C and Lindberg G, UNITE (UNification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency) Working fundet by 5th Framework RTD Programme, ITS, University of Leeds, Leeds, April 2001.
- NRW 2000:** Messung, Beurteilung und Verminderung von Erschütterungsimmissionen, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (Landesumweltamt NRW), 2000.
- OcCC 2002:** Das Klima ändert – auch in der Schweiz, Die wichtigsten Ergebnisse des dritten Wissensstandsberichts des IPCC aus der Sicht der Schweiz, Organe consultative sur les changements climatiques OcCC (Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung), Bern 2002.
- OECD 2003:** External Costs of Transport in Central and Eastern Europe, Final Report, Working Party on National Environmental Policy, Working Group on Transport,

ENV/EPOC/WPNEP/T(2002)5/FINAL, OECD Organisation for Economic Co-operation and Development, 8 August 2003.

OECD 2004: The Benefits of Climate Change Policies: Analytical and Framework Issues, Paris 2004.

OECD 2005: OECD Factbook, Economic, Environmental and Social Statistics, Paris 2005.

Öhrström 1996: A field survey on effects of exposure to noise and vibration from railway traffic, part I: Annoyance and activity disturbance effects, E. Öhrström, A. B. Skånberg, *Journal of Sound and Vibration* (1996), 193 (1), pp. 39-47.

Öhrström 1997: Effects of exposure to railway noise – a comparison between areas with and without vibration, E. Öhrström, *Journal of Sound and Vibration* (1997), 205 (4), pp. 555-560.

Ökoscience 2000: Auswirkungen des Alpentransitverkehrs auf die Luftbelastung in den Alpentälern, März 2000, Zürich.

Ott et al. 1999: Externe Kosten im Verkehr: Regionale Verteilungswirkungen, Ott, W., Seiler, B., Kälin, R., Bericht D4 des NFP 41 'Verkehr und Umwelt', Bern 1999.

Ouimet et al. 2001: Critical Loads and Exceedances of Acid Deposition and Associated Forest Growth in the Northern Hardwood and Boreal Coniferous Forests in Québec, Canada, R. Ouimet, L. Duchesne, D. Houle, P. A. Arp, *Water, Air and Soil Pollution (Focus)*, Vol. 1, pp. 119-134, 2001.

Pfister 1987: Walderhaltung und Schutzaufgaben im Berggebiet, F. Pfister, H. Walther, V. Erni, M. Candrian, Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen, Bericht Nr. 294, Birmensdorf 1987.

PLANCO 1990: Externe Kosten des Verkehrs: Schiene, Strasse, Binnenschifffahrt, PLANCO Consulting GmbH, Essen 1990.

PSI 1993: Modell Markal (OECD/IEA), Paul Scherer Institut, Villigen 1993

SAEFL 1998: Acidification of Swiss Forest Soils, Development of a Regional Dynamic Assessment, Environmental Documentation (Umwelt-Materialien) No. 89, Swiss Agency for The environment, Forests and Landscape SAEFL, Berne 1998.

SAEFL 2004: Swiss Greenhouse Gas Inventory 2002, Submission 2004, Common Reporting Format, UN Framework Convention on Climate Change, Swiss Confederation, Swiss Agency for The environment, Forests and Landscape SAEFL, Berne, April 2004.

SAEFL 2004a: Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2002, National Inventory Report 2004, Submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change, Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern 2004.

- SAEFL 2005a:** Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 2000, Submission 2005, common Reporting Format, Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern 2005.
- SAEFL 2005b:** Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 2002, Submission 2005, common Reporting Format, Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Bern 2005.
- SBB 2001:** Energieverbrauchsdaten für verschiedene Jahre und Zugstypen (inkl. Prognosen), Schweizerische Bundesbahnen SBB, unveröffentlicht, Bern 2001.
- SBV 2004:** Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung 2003, Schweizerischer Bauernverband (SBV), Brugg 2004.
- SNB 2005:** Schweizerische Nationalbank, Statistisches Monatsheft, April 2005, 80. Jahrgang, Zürich 2005.
- Spirig et al. 2002:** NO_x versus VOC limitation of O₃ production in the Po valley: Local and integrated view based on observations, C. Spirig, A. Neftel, L. I. Kleinmann, J. Hjorth, Journal of geophysical research, Vol. 107, No. D22, 8191, pp. 4.1 – 4.19, September 2002.
- Tangerini/Soguel 2004:** Evaluation monétaire de la qualité du paysage, Alexandre Tangerini, Nils Soguel, Working paper de l'IDHEAP 6/2004.
- Turunen-Rise et al. 2003:** Vibration in dwellings from road and rail traffic – Part I: a new Norwegian measurement standard and classification system, I. H. Turunen-Rise, A. Brekke, L. Hårvik, C. Madshus, R. Klaeboe, Applied acoustics 64 (2003), pp. 71-87.
- UBA 2005:** Options for the second commitment period of the Kyoto Protocol, Höhne, N., Phylipsen, D., Ullrich, S., Blok, K., ECOFYS GmbH, Cologne, Herausgeber: Umweltbundesamt, Berlin, Februar 2005.
- UNECE 2003:** Der Waldzustand in Europa (Kurzbericht 2003), Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE, United Nations Economic Commission for Europe) und Europäische Kommission (EC, European Commission), Genf und Brüssel 2003.
- UNECE 2004a:** Air Pollution and Vegetation, UNECE ICP Vegetation Annual Report 2003/2004, The United Nations Economic Commission for Europe International Cooperative Programme on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops, Centre for Ecology and Hydrology, University of Wales, Bangor (UK) 2004.
- UNECE 2004b:** Mapping Manual 2004, UNECE Convention on long-range transboundary air pollution, Manual on methodologies and criteria for modelling and mapping critical

loads & levels and air pollution effects, risks and trends, International Cooperative Programme (ICP) on Effects of Air Pollution on Natural Vegetation and Crops, 2004.

UNITE 2000a: Unification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency (UNITE), Interim Report 9.2: Accounts Approach for Environmental Costs, Peter Bickel, Stephan Schmid, Rainer Friedrich (IER), Markus Maibach (INFRAS), Claus Doll (IWW), Juha Ter-
vonen (Electrowatt-Ekono), Riccardo Enei (ISIS), Version 0.6, 6 October 2000, Leeds
(UK) 2000.

UNITE 2000b: Accounts Methodology for User Costs and Benefits. Interim Report IR7.2 of
the project UNITE (Unification of Accounts and Marginal Costs for Transport Efficiency)
financed by the 5th framework program of the European Commission. Leeds (UK), 2002.

UNITE 2002a: Unification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency (UNITE),
Deliverable 5, Appendix 2: The Pilot Accounts for Switzerland, Stefan Suter, Heini
Sommer, Michael Marti, Marcel Wickart (Ecoplan), Christoph Schreyer, Martin Peter,
Sonja Gehrig, Markus Maibach, Philipp Wütrich (INFRAS), Peter Bickel, Stephan Schmid
(IER), 28 January 2002 Version 2.0, Leeds (UK) 2002.

UNITE 2002b: Deliverable 5, Appendix 1: The pilot accounts for Germany, Heike Link,
Louise Helen Stewart (DIW), Claus Doll (IWW), Peter Bickel, Stephan Schmid, Rainer
Friedrich, Roland Krüger, Bert Droste-Franke, Wolfgang Krewitz (IER), 27 March 2002
Version 2.5, Leeds (UK) 2002.

UNITE 2003: Policy perspectives, Deliverable 16, Leeds 2003.

van Vuren et al. 2003: Regional costs and benefits of alternative post-Kyoto climate re-
gimes, van Vuuren, D.P., den Elzen, M.G.J., Berk, M.M., Lucas, P., Eickhout, B., Eerens,
H., Oostenrijk, R., , RIVMReport 728001025, National Institute for Public Health and the
Environment, Bilthoven, The Netherlands 2003.

Wegelin/Gsponer 1997: PAK und Schwermetalle in Böden entlang stark befahrener Stras-
sen, T. Wegelin, R. Gsponer, Umweltpraxis, Nr. 11, Februar 1997, S. 27-29.

Wentzel 2001: Was bleibt vom Waldsterben? Bilanz und Denkanstösse zur Neubewertung
der derzeitigen Reaktion der Wälder auf Luftschadstoffe, K. F. Wetzel, Schriftenreihe
des Instituts für Forstpolitik der Universität Freiburg, HochschulVerlag, Hamburg 2001.

Wiedmann et al. 2000: Art und Menge von stofflichen Emissionen aus dem Verkehrsbe-
reich, T. Wiedmann, J. Kersten, K. Ballschmiter, Akademie für Technikfolgenabschät-
zung in Baden-Württemberg, Arbeitsbericht Nr. 146/2000, Stuttgart 2000.

- WGE 2004:** Review and assessment of air pollution effects and their recorded trends, Working Group on Effects (WGE), UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution, National Environmental Research Council, United Kingdom 2004.
- WSL/BUWAL 2001:** Lothar - Der Orkan 1999: Ereignisanalyse, Herausgeber: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) sowie Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Birmensdorf und Bern 2001.
- WSL 2003a:** Vivians Erbe: Waldentwicklung nach Windwurf im Gebirge; Merkblatt für die Praxis, Herausgeber: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf 2003.
- WSL 2003b:** Lothar's Folgen: Der Holzpreis als Schlüsselgrösse, P. Baur, A. Roschewitz, N. Holtshausen, K. Bernath, Beitrag im Informationsblatt Forschungsbereich Wald, Herausgeber: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Ausgabe 14 (2003), S. 1-3.
- WSL 2004:** Sturmschäden auf sauren Standorten häufiger, P. Mayer, P. Brang, M. Dobbertin, S. Zimmermann, Beitrag im Informationsblatt Forschungsbereich Wald, Herausgeber: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Ausgabe 16 (2004), S. 1-4.
- Zach 2000:** Vibration insulation research results in Switzerland, A. Zach, Journal of Sound and Vibration (2000), 231 (3), pp. 877-882.

ANNEX

A1. GRUNDLAGEN ZU DEN WIRKUNGSMUSTERN

1. KLIMAKOSTEN

Im Verlauf des 20. Jahrhunderts stieg die durchschnittliche Temperatur auf der Erde um ca. 0.6°C, die Durchschnittstemperatur in Europa stieg gleichzeitig um mehr als 0.9°C. In der Schweiz ist der Anstieg der mittleren Temperatur noch grösser: In der Deutsch- und Westschweiz stieg die mittlere Temperatur um 1.3-1.6°C, auf der Alpensüdseite um 1°C (OcCC 2002). Das vergangene Jahrzehnt (1990er Jahre) war wahrscheinlich das wärmste Jahrzehnt und 1998 das wärmste Jahr der letzten 1000 Jahre (IPCC 2001e, OcCC 2002). Ursache für die Temperaturerhöhung ist insbesondere der Anstieg von anthropogenen Treibhausgasen wie Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O). Natürliche Faktoren (Sonneneinstrahlung und vulkanische Aerosole) haben dabei nur wenig zur Veränderung der Strahlungsbilanz der Erde beigetragen. Seit 1750 sind die CO₂-Konzentration um 31% und die Methan-Konzentration um 151% angestiegen und liegen damit höher als je zuvor in den letzten 420'000 Jahren. Etwa 75% der CO₂-Emissionen der letzten 20 Jahre sind auf die Verbrennung fossiler Energieträger (Erdöl, Kohle, Gas) zurückzuführen, die restlichen 25% auf eine veränderte Landnutzung, insbesondere der Abholzung von Wäldern (OcCC 2002, IPCC 2001a, IPCC 2001e). Insgesamt erhöhte sich die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre zwischen vorindustrieller Zeit (1000-1750) und heute von ca. 280 ppm auf 368 ppm (+31%).

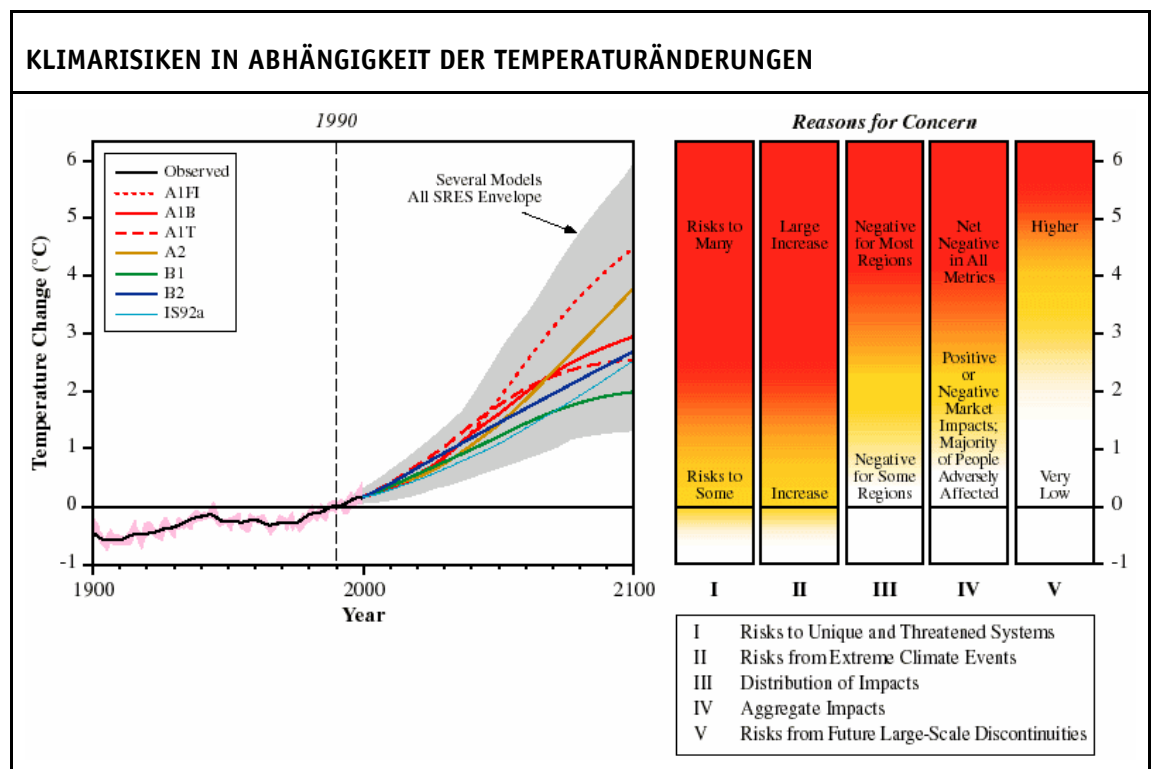
Im Jahr 2000 wurden allein durch den Energieverbrauch weltweit 21.6Gt CO₂-Äquivalente emittiert (Giga = 10⁹) (EC 2003a). In der Schweiz betrugen die gesamten Emissionen netto, d.h. unter Berücksichtigung von Senken und Landnutzungsveränderungen ca. 51.4 Mio. t CO₂eq⁵³, dies entspricht ca. 2.4 Promille des weltweiten CO₂-Ausstosses (EC 2003a, SAEFL 2004a, BUWAL 2004b). In der Schweiz sind dem Verkehr dabei ca. 30% der gesamten Treibhausgas-Emissionen bzw. knapp 35% der CO₂-Emissionen zuzuschreiben, der Grossteil davon dem motorisierten Strassenverkehr (BUWAL 2004b).

Die Experten des IPCC sehen es inzwischen als "wahrscheinlich" an, dass der grösste Teil des Temperaturanstiegs der letzten 50 Jahre auf den Aktivitäten des Menschen zurückzuführen ist (IPCC 2001e, OcCC 2002). Die Folgen einer weiteren Klimaerwärmung können weitreichend sein. In IPCC (2001b) wurde in Abhängigkeit der durchschnittlichen Temperaturerhöhungen gegenüber 1990 mit verschiedenen Klimamodellen sowie Szenarien das Ausmass

⁵³ Beim internationalen Luftverkehr ist dabei gem. UNFCCC nur der im Inland emittierte Anteil berücksichtigt.

von Klimarisiken im Jahr 2100 abgeschätzt. Die folgende Figur zeigt auf der linken Seite den prognostizierten Temperaturanstieg bis 2100 und auf der rechten Seite ein Konzept mit fünf Gründen "zur Besorgnis" über Klimaänderungsrisiken (IPCC 2001b):

- › Risiken für einzigartige und bedrohte Systeme
- › Risiken aufgrund extremer Klimaereignisse
- › Verteilung der regionalen Auswirkungen
- › Aggregierte Auswirkungen (Nettoeffekte aus negativen und positiven Effekten der Klimaänderung)
- › Risiken aus künftigen grossskaligen Umregelmässigkeiten.



Figur 41 Das Risiko von nachteiligen Auswirkungen der Klimaänderungen steigt mit dem Ausmass der Klimaänderungen. Der linke Teil der Abbildung zeigt den beobachteten Temperaturanstieg bezogen auf 1990 und den Streubereich der abgeschätzten Temperaturzunahme nach 1990, wie er von der Arbeitsgruppe I des IPCC für die Szenarien aus dem Spezialbericht über Emissionsszenarien geschätzt worden ist. Der rechte Teil zeigt ein Konzept mit fünf Gründen zur Besorgnis über Klimaänderungsrisiken. Weisse und hellgraue/gelbe Bereiche kennzeichnen neutrale bzw. schwach negative oder positive Folgen oder Risiken, graue/orange und dunkelgraue/rote Bereiche bezeichnen negative Folgen für einige Systeme oder geringe Risiken und dunkelgrau/rot bedeutet negative Folgen oder Risiken mit grösserer räumlicher Ausdehnung und/oder grösserem Ausmass. Die Beurteilung der Folgen oder Risiken berücksichtigt nur das Ausmass der Änderung, nicht aber die Änderungsrate. Die Änderung der mittleren globalen Temperatur wird in der Abbildung stellvertretend für das Ausmass der Klimaänderungen verwendet, die errechneten Folgen werden jedoch unter anderem eine Funktion von Ausmass und Geschwindigkeit von globalen und regionalen Änderungen des mittleren Klimas, von Klimaschwankungen und extremen Klimaphänomenen, sozialen und ökonomischen Voraussetzungen sowie der Anpassung sein (IPCC 2001b).

Es kann als gesichert gelten, dass Temperaturerhöhungen von über 2°C gegenüber der vorindustriellen Periode schwer abschätzbare bis kaum mehr kontrollierbare Auswirkungen auf das Klima haben werden und zu möglicherweise katastrophalen Schäden an Ökosystemen, Siedlungsräumen wie auch der menschlichen Gesundheit führen könnten. Die EU setzt sich deshalb auch zum Ziel, eine Erhöhung um mehr als 2°C gegenüber der vorindustriellen Periode zu verhindern (EC 2005a/b). Auch bereits bei einer Temperaturerhöhung zwischen 1 und 2°C werden signifikante Auswirkungen auf Ökosysteme und Wasserressourcen erwartet. Das Risiko für die weltweite Nahrungsmittelproduktion steigt ab einer Temperaturerhöhung von 2-3°C markant an. Aufgrund dieser Klimaziele sollte im globalen Mittel der Temperaturanstieg 0.2°C pro Dekade nicht übersteigen. Bei Vergleichen des beobachteten Temperaturanstiegs mit der Evidenz für in historischen Epochen beobachteten Klimavariabilität (kleine Eiszeit 1600-1850, mittelalterliche Warmzeit, kleine Eiszeit der Zeit der Völkerwanderung, Warmzeit während der Antike) ist für die Bewertung der Auswirkungen zu beachten, dass die Bevölkerungsdichte in vorindustrieller Zeit nur ein Bruchteil des heutigen Wertes erreicht hat.

Die möglichen Schäden einer unkontrollierten weiteren Klimaerwärmung sind vielfältig. Die folgende Zusammenstellung zeigt die wichtigsten Effekte auf globaler Ebene (basierend auf EC 2005a und IPCC 2001a-e). Es zeigen sich deutliche regionale Unterschiede bei der Verteilung von Schäden und Klimaeffekten:

- › **Anstieg Meeresspiegel:** Der dritte IPCC Assessment Report (IPCC 2001a-e) geht von einem Anstieg des Meeresspiegels von 0.09-0.88 m bis 2100 aus mit einem wahrscheinlichen Wert von ca. 0.5 m. Überflutungen, Küstenerosion, Verlust von küstennahen, tiefliegenden Gebieten sind nur einige der möglichen Auswirkungen. Zwar können durch Küstenschutzmassnahmen (insbesondere Erhöhungen der Deiche) die Folgen des Anstiegs beschränkt werden, dies führt jedoch zu hohen Anpassungskosten. Schätzungen für Europa zeigen, dass bei einer Küstenlinie von ca. 89'000 km bis zu 68 Millionen Menschen durch einen Anstieg des Meeresspiegels betroffen werden. Globale Effekte eines Meeresspiegelanstiegs sind vermutlich noch extremer mit kaum quantifizierbaren sozialen und ökonomischen Folgen.
- › **Landwirtschaft:** Zwar können einige Gebiete in Mittel- und Nordeuropa bei einer Klimaerwärmung von höheren Erträgen profitieren, die sich aufgrund der verlängerten Vegetationsperiode und einer Nordverschiebung der Anbauggebiete ergeben. Allerdings wird die Landwirtschaft in weiten Teilen Südeuropas durch Wasserknappheit bedroht werden. Der Hitzesommer 2003 führte dort bereits zu Ernteeinbussen von bis zu 30%. Allgemein wird

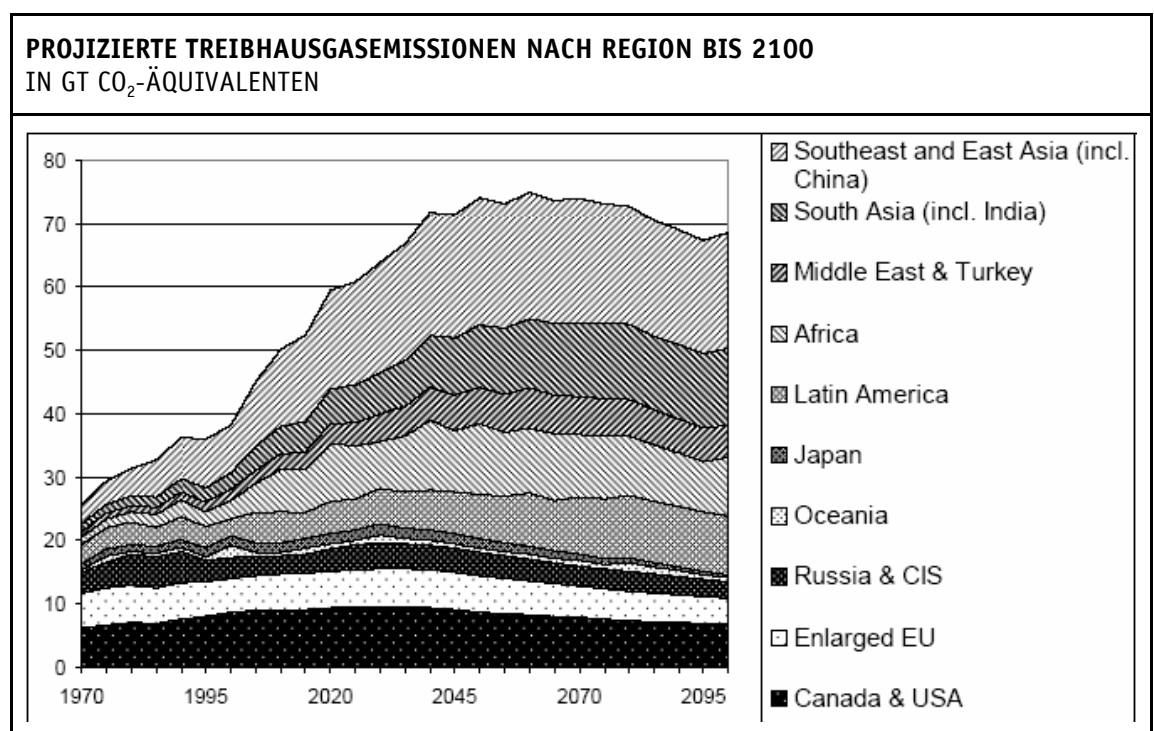
die Landwirtschaft zusätzlich durch vermehrtes Auftreten von Wetterextremen (Trockenheit, Überflutung, Stürme, Hagel, etc.) sowie einer weiteren Verbreitung von Pflanzenkrankheiten und Unkräutern negativ betroffen werden.

- › **Energieverbrauch:** Zwar reduzieren höhere Temperaturen im Winter den Heizenergieverbrauch, demgegenüber stehen jedoch der erhöhte Energiebedarf für Air Conditioning im Sommer sowie bei Wasserknappheit Probleme bei der Kühlung von Kraftwerken (insbesondere Kernenergie) und damit einer Gefährdung der Energieversorgung.
- › **Gesundheit:**
 - › Hitzestress führt zu einer erhöhten Mortalität besonders bei der älteren Bevölkerung. Im Hitzesommer 2003 wurden über 20'000 zusätzliche Todesfälle in West- und Südeuropa auf die extreme Hitze zurückgeführt. Auf globaler Ebene wird geschätzt, dass ein Anstieg der Durchschnittstemperatur um mehr als 1.2°C zu vorzeitigen Todesfällen in der Grössenordnung von mehreren hunderttausend Menschen führt.
 - › Steigende Temperaturen tragen zu einer weiteren Verbreitung von Infektionskrankheiten bei. Insbesondere auf globaler Ebene werden steigende Temperaturen viele Menschen zusätzlichen Krankheitsrisiken durch Malaria, Dengue-Fieber etc. aussetzen. Prognosen gehen bei einem Anstieg um 2°C davon aus, dass ca. 210 Millionen Menschen neu Risiken durch Malaria ausgesetzt sein werden.
- › **Ökosysteme:** Signifikante Auswirkungen auf Ökosysteme und Wasserressourcen werden bei Temperaturerhöhung zwischen 1 und 2°C erwartet. Negative Auswirkungen auf die Weltnahrungsproduktion werden bei einer Temperaturerhöhung von 2-3°C befürchtet. Neuere Studien zeigen, dass bereits bei einem Anstieg der Durchschnittstemperatur um 1°C bis zu 10% aller Ökosysteme Veränderungen erfahren. Wälder werden eine höhere Netto-Produktion ausweisen, die Häufigkeit von Waldbränden und die Ausbreitung von Krankheiten und Schädlingen werden deutlich zunehmen. Besonders betroffen werden auch sensible Ökosysteme mit grosser Artenvielfalt wie Korallenriffe oder Küstenfeuchtgebiete. Dort werden viele Arten gefährdet, ein völliges Verschwinden bzw. eine komplette Zerstörung dieser Systeme wird allerdings ausgeschlossen, die Artenvielfalt allerdings stark eingeschränkt.
- › **Wasserressourcen, Wasserversorgung und Wasserqualität:** Wasserressourcen sind besonders empfindlich gegenüber klimatischen Veränderungen in fast allen Regionen der Erde. Ein Temperaturanstieg von 2-2.5°C würde zu ernsthafter Wasserknappheit für 2.4-3.1 Milliarden Menschen führen. Zusätzlich würde ca. 10% der Erdoberfläche unter akutem Wassermangel leiden. Auch die Wasserqualität verschlechtert sich bei einer Temperaturer-

höhung (geringer Fliessgeschwindigkeiten von Flüssen, Versalzungsgefahr durch Meeresspiegelanstieg sowie reduzierte Sauerstoffbindungsfähigkeit).

- › **Dürre:** Die durch die Klimaerwärmung häufigeren und länger andauernden Dürre-Perioden sind eine der folgeschwersten Auswirkungen der höheren Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre. Wasserknappheit, Nahrungsmittelknappheit, gebremstes Pflanzenwachstum sind die direkten Folgen, die Bedrohung von sensiblen Ökosystemen sowie die Zunahme von Konflikten um die Ressource Wasser weitere indirekte Konsequenzen.
- › **Überflutung:** Zunahme der Überflutungshäufigkeiten (z.B. wurden in Europa zw. 1975 und 2001 insgesamt 238 Überflutungsereignisse registriert mit einer deutlichen jährlichen Zunahme im Zeitraum 1990-2001).
- › **Sturmschäden und Auswirkungen von Extremereignissen:** Mit der Klimaerwärmung nimmt die Häufigkeit und das Ausmass extremer Wetterereignisse wie Hitzewellen, Kälteperioden, Dürren, Flutkatastrophen, Stürme und tropische Zyklone zu, wenn auch nicht linear mit der Veränderung der Durchschnittstemperatur. In Europa sind 64% aller Katastrophenereignisse seit 1980 direkt auf Wetterextreme zurückzuführen. Die jährlichen wirtschaftlichen Verluste nahmen in diesem Zeitraum von 6.5 Mrd. € auf 14.3 Mrd. € zu. Die Zunahme liegt in häufigeren Ereignissen und höheren Sachwerten begründet. Vier der fünf schwerwiegendsten Katastrophenereignisse wurden seit 1997 registriert. Die durchschnittliche jährliche Anzahl von Wetterkatastrophen hat sich in den 90er Jahren gegenüber den Vorjahresperioden verdoppelt.
- › **Soziale Konflikte und sekundäre Effekte:** Auswirkungen von Klimaschäden sind regional stark unterschiedlich verteilt, ausserdem sind verschiedene Regionen – vornehmlich Entwicklungsländer – weit anfälliger für Klimaeffekte als beispielsweise Europa. Durch Auswirkungen des Klimawandels wird es dort vermehrt zu Konflikten aufgrund von Wassermangel, Nahrungsmittelknappheit und Armut kommen, wodurch ein verstärkter Migrationsdruck in Annex 1 Staaten entstehen wird.
- › **Beschleunigter Klimawandel/katastrophale Grossereignisse:** Klimafeedbacks durch die Überschreitung bestimmter Temperatur-Grenzen können relativ kurzfristig zu einem beschleunigten Klimawandel, der kurzfristige und irreversible Schäden verursachen kann, führen. Die Temperatur-Grenzen, ab denen eine erhöhte Wahrscheinlichkeit solcher verstärkten Risiken auftreten kann, sind wissenschaftlich noch unsicher. Allerdings sind sich Experten einig, dass ab einer durchschnittlichen Erhöhung über 2°C das Risiko eines beschleunigten Klimawandels stark zunehmen wird.

Die Erreichung des 2°C-Ziels (gegenüber der vorindustriellen Periode) erfordert grosse Anstrengungen. Die folgende Figur zeigt die vorhergesagten Baseline-Emissionen basierend auf einem Business-as-usual Szenario. Darin verdoppeln sich nahezu die heutigen Emissionen bis 2050. Der starke Anstieg ist auf die stark zunehmenden Emissionen in einigen wenigen Ländern zurückzuführen, insbesondere in Asien (v.a. China und Indien), während dessen die Emissionen in Nordeuropa wie auch der EU stabil bzw. rückläufig sein werden.

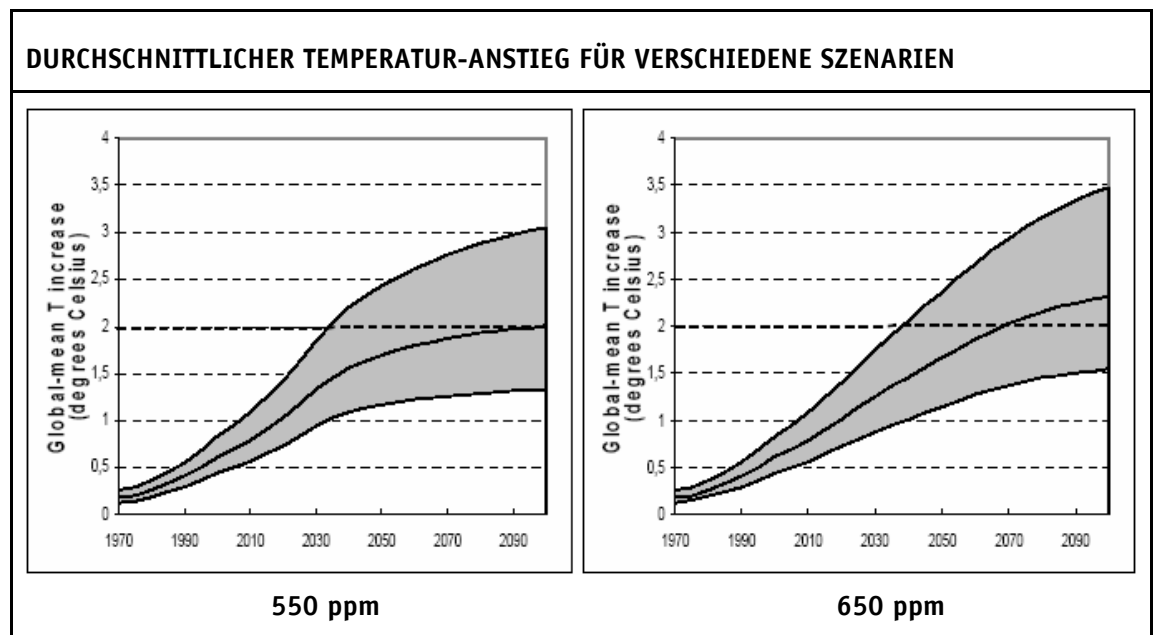


Figur 42 Quelle: EC 2005a, BAU Szenario basierend auf IPCC.

Um die EU-Ziele einer maximalen Temperaturerhöhung um 2°C gegenüber der vorindustriellen Periode einhalten zu können, kann mit Hilfe von Klimamodellen die dafür maximal zulässige CO₂-Äquivalenz-Konzentration in der Atmosphäre bestimmt werden. Bei obigem Verlauf der globalen Treibhausgas-Emissionen würde die Konzentration von heute 425 ppm CO₂-Äquivalenten bis 2100 auf ca. 935 ppm ansteigen. Dies würde selbst bei niedrigster Klimasensitivität⁵⁴ zu einem Anstieg von deutlich mehr als 3°C bis 2100 führen. Die folgenden Abbildungen zeigen zwei Temperaturverläufe für unterschiedliche Zielkonzentrationen von

⁵⁴ Unter Klimasensitivität versteht das IPCC den Temperaturanstieg bei einer Verdopplung der atmosphärischen CO₂-Äquivalenz-Konzentration (CO₂ und weitere Treibhausgase). Das IPCC erachtet einen Bereich von 1.5 bis 4°C mit einem Mittelwert von 2.5°C als realistisch.

Treibhausgasen in der Atmosphäre (550 ppm bzw. 650 ppm⁵⁵) in Abhängigkeit unterschiedlicher Klimasensitivitäten.

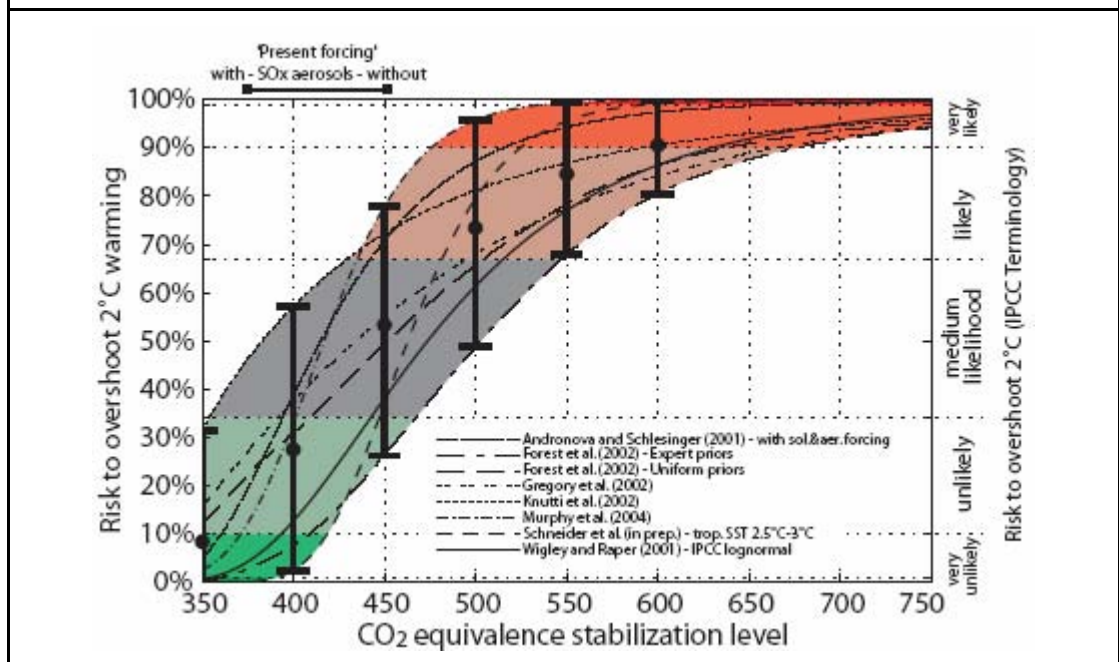


Figur 43 links: Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur gegenüber vorindustriellen Temperaturen für ein Stabilisierungsszenario mit einer CO₂-Konzentration von 550 ppm, rechts der Anstieg für ein Szenario mit einer CO₂-Konzentration von 650 ppm. Quelle: EC 2003a.

Es wird deutlich, dass bereits bei einer Konzentration von 650 ppm das Ziel einer maximalen Temperaturerhöhung um 2°C deutlich verfehlt wird. Auch für das Zielszenario 550 ppm ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Temperatur mehr als 2°C zunimmt, erheblich. Das Ziel wird nur für niedrige bzw. maximal mittlere Klimasensitivitäten erreicht werden können. Die folgende Figur 44 zeigt – in Abhängigkeit der Stabilisierungskonzentration an CO₂-Äquivalenten – die jeweilige Wahrscheinlichkeit, das 2°C-Ziel zu erreichen. Grundlage sind neuere Modellrechnungen zur Klimasensitivität.

⁵⁵ Die beiden Stabilisierungsszenarien sind in ppm CO₂-Äquivalenten angegeben. Sie umfassen die gewichteten Konzentrationen der 6 Kyoto-Treibhausgase CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, HFC (hydrofluorocarbons), PFC (perfluorocarbons). Sie werden in den Darstellungen des IPCC bzw. UNFCCC als S550e (für 550 ppm CO₂-Äquivalente) bzw. S650e (für 650 ppm CO₂-Äquivalente). Diese Bezeichnungen werden im weiteren Text verwendet.

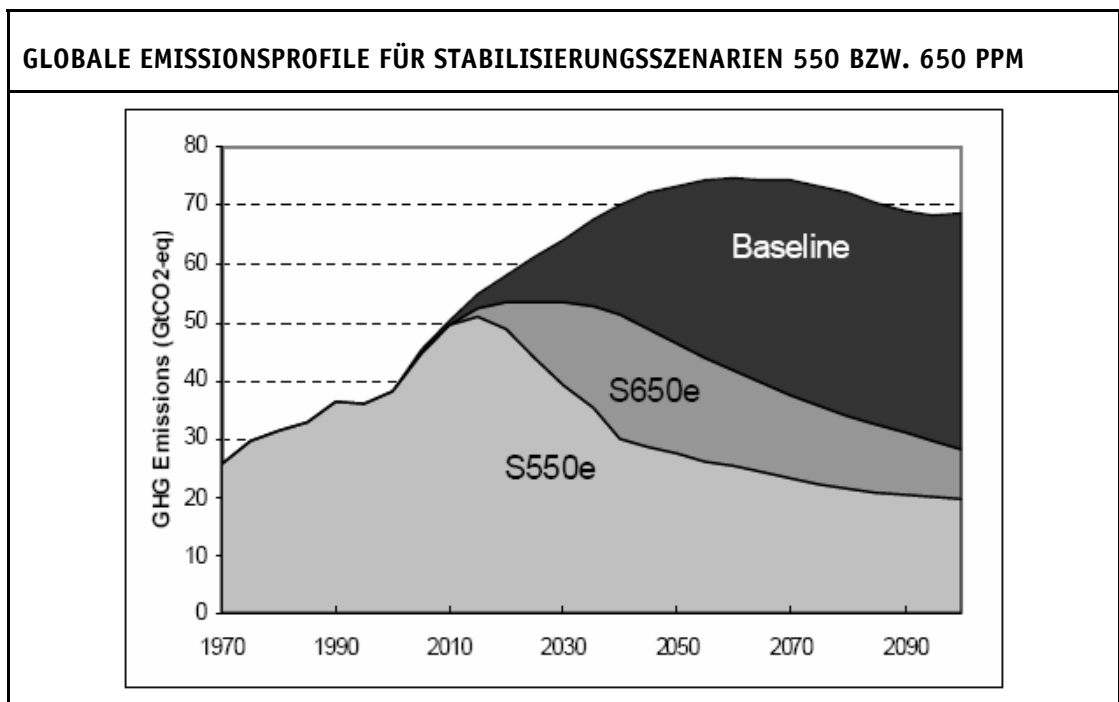
**RISIKO EINER KLIMAERWÄRMUNG > 2°C
IN ABHÄNGIGKEIT DER KONZENTRATION AN CO₂-ÄQUIVALENTEN**



Figur 44 Quelle: Hare/Meinshausen 2004.

Hare/Meinshausen (2004) zeigen deutlich, dass für Stabilisierungskonzentrationen jenseits von 450 ppm CO₂-Äquivalenten die Wahrscheinlichkeit, das Temperaturziel zu erreichen, deutlich abnimmt. Bei einer Konzentration von 550 ppm ist die Wahrscheinlichkeit nur noch ca. 1 zu 6, dass ein Temperaturanstieg von maximal 2°C erreicht wird.

Um auf einen nachhaltigen Entwicklungspfad einzuschwenken, sind daher weit reichende Emissionsreduktionen notwendig. In EC (2003a) werden für die beiden Zielszenarien (S550e bzw. S650e) die maximal zulässigen Emissionen von CO₂-Äquivalenten dargestellt:



Figur 45 Globale Emissionsprofile für Stabilisierungsszenarien 550 bzw. 650 ppm CO₂-Äquivalente (S550e bzw. S650e). Alle Emissionsprofile gehen davon aus, dass die Annex 1 Staaten die Kyoto-Ziele erreichen und dass die USA ihre Emissions-Intensitätsziele erreicht. Quelle: EC 2003a.

Obige Figur macht deutlich, dass zu einer Stabilisierung auf 550 ppm die globalen Treibhausgasemissionen bereits im Jahr 2020 ihren maximalen Peak erreichen sollten und danach deutlich absinken müssen. Gegenüber der Basisentwicklung sind 2100 für das 650 ppm Szenario eine Reduktion von ca. 50% der Emissionen notwendig, für die Erreichung des 550 ppm Szenarios gar eine Reduktion um 70% gegenüber der Basisentwicklung.

2. ERNTEAUSFÄLLE

Anthropogene Luftschadstoffe haben diverse negative Wirkungen auf Nutzpflanzen. Schädigungen werden vor allem durch bodennahes Ozon (O₃), Stickoxide (NO_x), Ammoniak (NH₃) und Schwefeldioxid (SO₂) verursacht. Der Verkehr ist dabei vor allem die dominante Quelle der NO_x-Emissionen sowie dem anthropogen verursachten Ozon. Weiter ist der Verkehr auch eine wichtige Quelle der VOC-Emissionen, während die Schwefeldioxidemissionen des Verkehrs in der Schweiz unbedeutend sind.

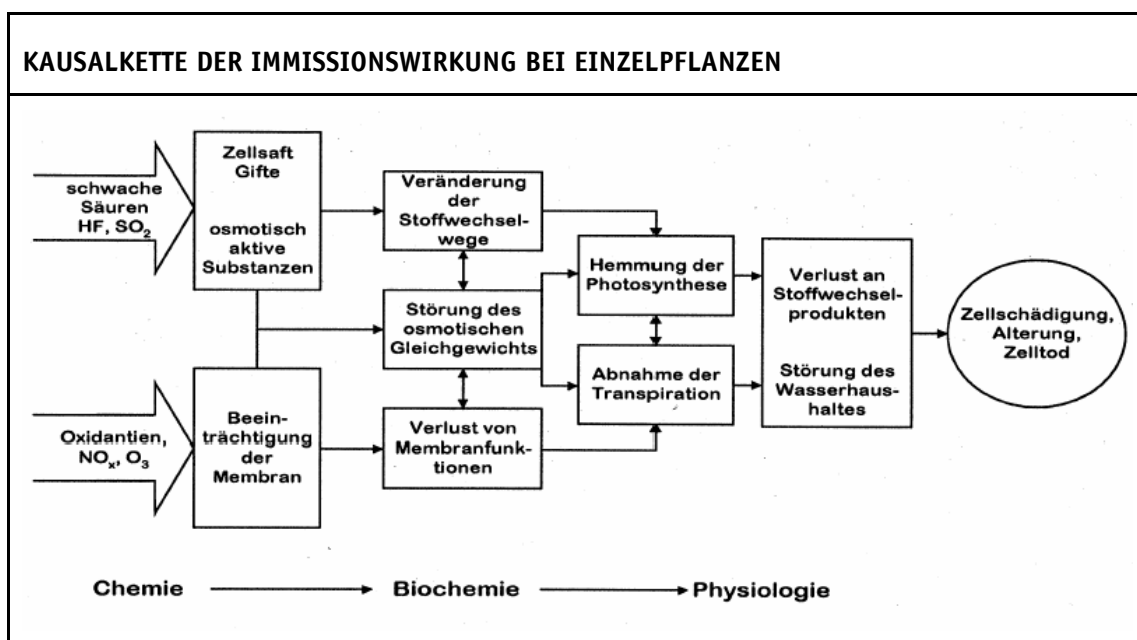
Die Wirkung von Luftschadstoffen – insbesondere Ozon – auf Kulturpflanzen ist gut erforscht. Die bedeutendsten Schädigungen durch Luftschadstoffe gehen vom Ozon aus. Zwar können auch Stickoxide (NO_x: Stickstoffmonoxid, NO sowie Stickstoffdioxid, NO₂) sowie Schwefeldioxid (SO₂) Nutzpflanzen direkt schädigen. Aufgrund des starken Rückgangs der

Schwefeldioxidemissionen in den letzten Jahren wird jedoch davon ausgegangen, dass es in der Schweiz keine Direktwirkung von Schwefeldioxid auf die Pflanzen (mehr) gibt (Fuhrer 2001). Eine direkte Schadwirkung von Stickoxiden auf die Pflanzen kann zwar nachgewiesen werden, ist jedoch verglichen mit dem Effekt von Ozon deutlich weniger bedeutsam (Fuhrer 2001). Zudem ist die Dosis bzw. Konzentration der Stickoxide entscheidend, denn in kleinen Mengen können sich Stickoxide auch positiv auf den Pflanzenertrag auswirken.

Die Emissionen von Schwefeloxid und vor allem von Stickoxiden haben dagegen wie auch das Ammoniak (NH_3) vor allem indirekte Schadwirkungen für Pflanzen zur Folge, indem sie zur Überdüngung der Böden durch Stickstoff-Deposition sowie zur Versauerung von Niederschlägen, Boden sowie Grundwasser führen. Diese Effekte sind vor allem für natürliche Ökosysteme wie den Wald oder Wiesenlandschaften von Bedeutung. Bei Kulturpflanzen dagegen sind oberhalb eines Boden-pH-Wertes von 3 bis 3.5 keine negativen Auswirkungen auf den Ertrag feststellbar (Fuhrer 1989, S. 38).

Bodennahes Ozon entsteht als Teil von komplexen, photochemischen Reaktionszyklen, an denen auch NO_x (Stickoxide) und VOC (volatile organic compounds = flüchtige organische Verbindungen) beteiligt sind. Aus diesem Grund werden diese beiden anthropogen emittierten Stoffe (NO_x und VOC) Vorläufersubstanzen des Ozons genannt. Während Stickoxide fast ausschliesslich bei Verbrennungsprozessen entstehen, stammen die flüchtigen organischen Kohlenwasserstoffe (VOC) zu gut zwei Dritteln aus der Verdunstung von Lösungsmitteln und anderen flüchtigen organischen Verbindungen in der Industrie und den privaten Haushalten. Verbrennungsprozesse im Verkehr sind jedoch ebenfalls eine bedeutende Quelle für VOC-Emissionen (18% der gesamten VOC-Emissionen im Jahr 2001, BUWAL 2003c).

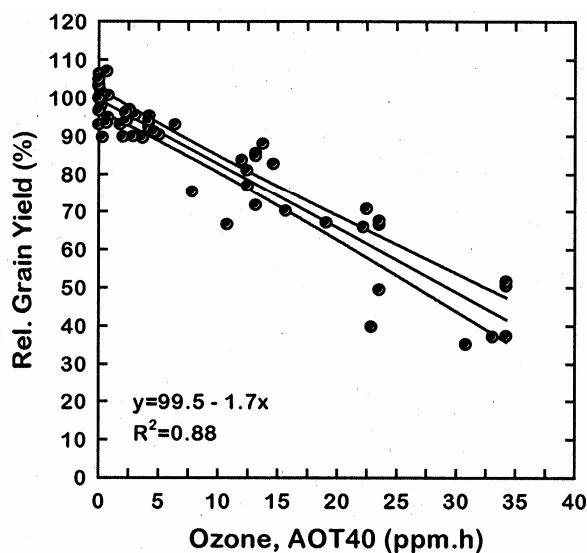
Ozon ist ein starkes Oxidationsmittel und schädigt als solches in der Pflanze primär die Membranfunktion. Dies wiederum hemmt Photosynthese und Transpiration und führt so zu Stoffwechselstörungen, die sich in einer beschleunigten Blattalterung sowie einer Zunahme der Krankheitsanfälligkeit äussern. Langfristig führt das Ozon bei Pflanzen zudem zu einem Vitalitätsverlust sowie zu geringerem Wachstum und als Folge davon zu einer geringeren Biomasse (UNECE 2004, WEG 2004, Fuhrer 2001, Fuhrer 2003). Beim Weizen beispielsweise führt eine chronische Einwirkung von Ozon zu einer verringerten Korngrösse und Kornzahl sowie zu einer erhöhten Anfälligkeit auf gewisse Krankheiten (z.B. Infektion mit Schwächeparasiten: Spelzenbräune). Andere Krankheiten (wie z.B. Mehltaubefall) können jedoch bei steigender Ozonbelastung sogar abnehmen (Fuhrer 2001).



Figur 46 Schadstoffe wie Ozon beeinträchtigen die Membranfunktion der Pflanzen, was zu einer Hemmung der Photosynthese sowie der Transpiration führt. Dies wiederum kann zu Zellschädigungen sowie zu beschleunigter Zellalterung führen, was sich bei der gesamten Pflanze in Form von reduziertem Wachstum äussert. Quelle: Fuhrer 2001.

Insgesamt bewirkt Ozon bei umweltrelevanten Konzentrationen bei sehr vielen Nutzpflanzen eine Reduktion der Biomasse und damit des Ernteertrages (WGE 2004, EKL 2003, EKL 2004, Fuhrer 2001; siehe auch Figur 47). Ausnahmen sind u.a. gewisse Grasarten auf Kunstwiesen, welche gegenüber Ozon tolerant sind und infolge der Schwächung anderer, gegenüber Ozon nicht toleranten Pflanzenarten (z.B. Klee) sogar profitieren können (Fuhrer 2001). Besonders anfällig auf erhöhte Ozonkonzentrationen sind unter anderem Weizen, Soja, Kartoffeln, Zuckerrüben, Mais, Raps, Sonnenblumen, Klee, Tomaten, Karotten sowie weitere Gemüsearten (Fuhrer 1989, EKL 2004, Holland 2002, WGE 2004). Bei Kunstwiesen wurde im Weiteren festgestellt, dass Ozon einen Einfluss auf die Artenzusammensetzung hat (EKL 2004, Fuhrer 2001). So weisen Kunstwiesen bei erhöhtem Ozongehalt geringere Mengen an Klee und gewissen anderen Kräutern auf, welche besonders sensitiv auf Ozon reagieren. Andere Pflanzen, welche gegenüber Ozon toleranter sind (z.B. viele Grasarten), kommen in solchen Wiesen mit erhöhtem Ozongehalt jedoch in grösseren Anteilen vor, weil sie vom Rückgang der anderen Arten (z.B. des Klees) profitieren.

ZUSAMMENHANG ZWISCHEN OZONDOSIS (AOT40) UND ERNTEERTRAG BEI WEIZEN



Figur 47 AOT40-Werte⁵⁶ für landwirtschaftliche Nutzpflanzen (AOT40 for crops: AOT40c) im Jahr 2003. Der AOT40-Wert für Nutzpflanzen umfasst die drei Monate Mai bis Juli. Der kritische AOT40-Wert (critical level) für Nutzpflanzen beträgt 3 ppm*h. (Quelle: Fuhrer 1997).

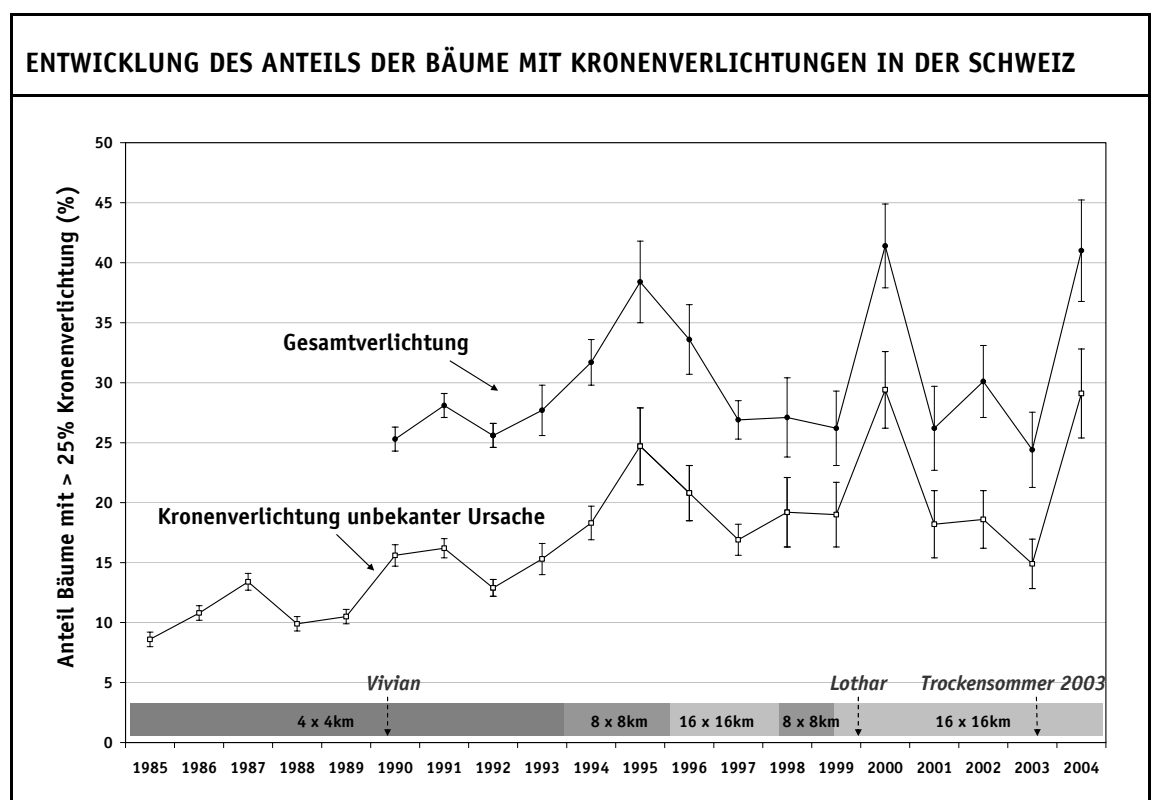
3. WALDSCHÄDEN

Luftschadstoffe aus dem Verkehr führen in der natürlichen Umwelt zu verschiedenen negativen Effekten. Die Einflüsse auf Nutzpflanzen wurden bereits im vorherigen Kapitel beschrieben. In der natürlichen Biosphäre ist es vor allem der Wald, welcher durch Luftschadstoffe negative Folgen zu tragen hat.

In den achtziger Jahren des letzten Jahrhunderts war das so genannte Waldsterben ein grosses Thema in der Öffentlichkeit und der Forschung. Die Zunahme an geschädigten Bäumen in Wäldern liess aufhorchen und führte zu düsteren Szenarien für die Wälder: es wurde ein grossflächiges Waldsterben prognostiziert. Zwar sind Wälder in gewissen Regionen tatsächlich besonders stark geschädigt worden, ein effektives Waldsterben ist aber nicht eingetroffen. Auch wenn es nicht zu einem grossflächigen Baum- oder Waldsterben gekommen ist, haben sich die Lebensbedingungen des Waldes in den letzten zwanzig Jahren in der Schweiz zusehends verschlechtert (IAP 2004, BUWAL 2003b).

⁵⁶ Der AOT40 ist ein Index, der die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen über 40 ppb während einer gewissen Periode darstellt. Berücksichtigt werden nur die Tagesstunden mit einer Strahlung von über 50 W/m². Einheit: ppm*h oder ppb*h. (AOT: accumulated exposure over threshold)

Ein wichtiger Indikator für die Messung des Waldzustandes sind die Kronenverlichtungen unbekannter Ursache. Kronenverlichtungen (= Nadel-/Blattverlust der Baumkronen) werden als Indikator für die Stressbelastung von Bäumen verwendet. In der Regel wird eine Kronenverlichtung unbekannter Ursache von >25% als Schwellenwert für eine Stressbelastung des Baumes betrachtet. Die Kronenverlichtung kann als nützliche Richtgrösse betrachtet werden, die es erlaubt, den Waldzustand über einen längeren Zeitraum mit einer relativ einfachen und schnellen Methode abzuschätzen. Obwohl es im Schweizer Wald in den letzten Jahren immer wieder Stress- und Erholungsphasen gab, kann insgesamt kein Trend zur Verschlechterung oder Verbesserung festgestellt werden (WSL: Sanasilva-Inventur 2004, BUWAL/WSL 2005, IAP 2004, siehe auch Figur 48). Statistische Auswertungen haben gezeigt, dass das Ausmass der Kronenverlichtungen bei Buchen und Fichten vor allem durch Witterungsextreme und den Fruchtbehang beeinflusst wird.



Figur 48 Anteil der Bäume mit einer Kronenverlichtung von >25%. Entscheidend sind die Kronenverlichtungen unbekannter Ursache, d.h. jene Verlichtungen, die nicht dem natürlichen Alterungsprozess oder einer anderen bekannten Ursache zugeordnet werden können. Quelle: WSL, Sanasilva-Inventur 2004; www.wsl.ch.

Heute liegt der Fokus bei der Waldschadensforschung nebst den Kronenverlichtungen vermehrt auch auf anderen Aspekten wie z.B. dem Wachstum (Triebwachstum, Stammzu-

wachs), dem Ernährungszustand (Nährstoffgleichgewichte in Blättern und Nadeln), der Fruchtbildung sowie dem (Fein-)Wurzelwachstum. Im Weiteren werden vor allem die durch den Mensch verursachten Belastungsfaktoren wie Einflüsse auf die Bodenchemie (Versauerung, Stickstoffbelastung, Nährstoffverhältnisse und -auswaschung), erhöhte Ozonkonzentrationen und mechanische Bodenverdichtung sowie deren Einfluss auf den Waldzustand untersucht.

Der exakte Zusammenhang zwischen der Luftschadstoffbelastung und den Waldschäden ist trotz langjähriger Forschung immer noch nicht gänzlich geklärt: Dass Luftverunreinigungen einen negativen Einfluss auf die Bäume (z.B. Kronenverlichtungen) haben, ist zwar bewiesen (IAP 2004, UNECE 2003, IAP 1999, Brang 1998); die genaue Wirkungsweise konnte jedoch noch nicht im Detail erklärt werden. Die Ursachen für die Waldschäden sind vielschichtig und komplex. Einerseits spielen natürliche Faktoren wie das Alter der Bäume, die klimatische Bedingungen (z.B. starke/schwache Niederschläge, Stürme) sowie Schädlingsbefall (Insekten, Pilze, Misteln) eine Rolle. Einen Einfluss haben jedoch auch die anthropogenen Faktoren wie Luftschadstoffe. Dabei gibt es oft auch Interaktionen zwischen anthropogenen Einflüssen und anderen Faktoren, z.B. indem Schadstoffeinträge einen Einfluss auf die Häufigkeit von Schädlingsbefall haben können.

Insgesamt dürften die beobachteten Waldschäden wie z.B. die Kronenverlichtungen oder das verminderte Stammwachstum ein Zeichen von zunehmendem Stress sein.

Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge

Das von Luftschadstoffen ausgehende Langzeitrisiko geht hauptsächlich von den erhöhten Säure- und Stickstoffeinträgen in den Boden aus, welche im Boden zu Versauerung, Nährstoffauswaschung und Nährstoffungleichgewichten führen können. Nebst der Versauerung und dem übermässigen Stickstoffeintrag in die Böden stellen auch erhöhte Ozonkonzentrationen eine Belastung für den Wald dar.

Bodenversauerung

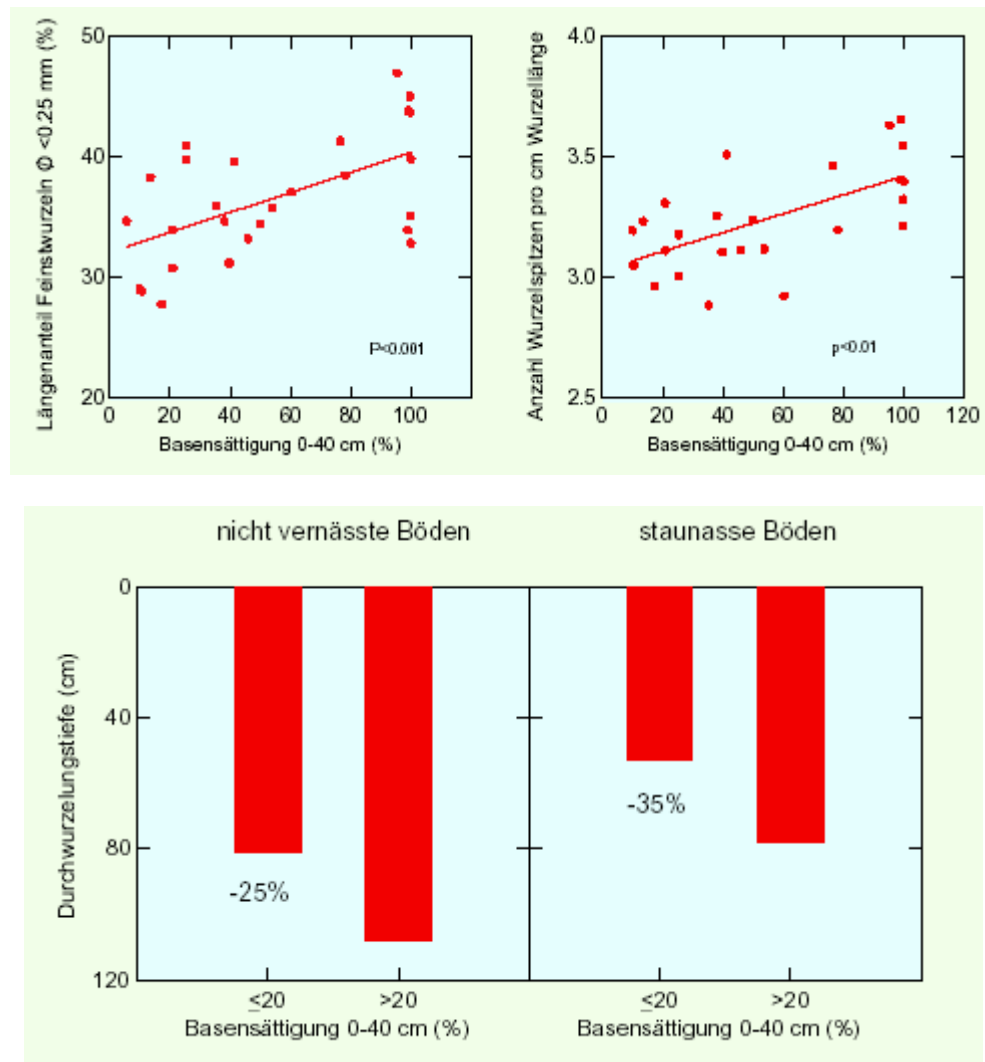
Die Bodenversauerung ist eigentlich ein natürlicher Prozess. Durch anthropogene Einträge von versauernd wirkenden Luftschadstoffen (in der Schweiz v.a. Stickstoffverbindungen) wird dieser natürliche Prozess jedoch erheblich beschleunigt und verstärkt (Flückiger/Braun 1998). Die fortschreitende Bodenversauerung stellt für den Wald eines der Hauptprobleme dar. Die Versauerung von Böden führt einerseits zum Verlust von Nährstoffen in den Böden

(v.a. von basischen Kationen wie Kalium, Kalzium, Magnesium) und andererseits zur Freisetzung von giftigen Metallionen (z.B. Aluminium-Ionen).

Für die Bodenversauerung sind vor allem die Stickoxide (NO_x), das Ammoniak (NH_3) und das Schwefeldioxid (SO_2) verantwortlich. In den achtziger Jahren waren die Schwefeldioxidemissionen der Hauptgrund für die Bodenversauerung und auch ein wichtiger Grund für die teilweise flächendeckend auftretenden Kronenverlichtungen, die zur Waldsterbensdebatte beitrugen. Der Zusammenhang zwischen Schwefeleintrag und Nadel-/Blattverlust wurde für die wichtigsten Baumarten wissenschaftlich bestätigt (UNECE 2003). Es wird angenommen, dass die Stabilisierung des Waldzustandes in Europa seit Mitte der neunziger Jahre auf die starke Reduktion der Schwefeldioxidemissionen sowie die Stabilisierung der Stickoxidemissionen zurückzuführen ist. Ein solcher Zusammenhang konnte beispielsweise für die besonders stark geschädigte und auf Luftschadstoffe anfällige Weisstanne bewiesen werden (UNECE 2003).

In der Schweiz hat in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts der Anteil der Waldfläche mit einem Boden-pH unterhalb 4 stark zugenommen (der pH 4 gilt in Waldböden als kritischer Wert). Lag dieser Anteil gemäss Modellrechnungen im Jahr 1950 noch bei 5.5%, stieg er bis 1980 auf 56% und blieb seither in etwa stabil bei diesem Wert (BUWAL 2004d). Diese Stabilisierung der Bodenversauerung ist auf die drastische Reduktion der Schwefeldioxidemissionen sowie die Stabilisierung der Stickoxidemissionen zurückzuführen. Nebst dem pH-Wert gilt auch die Basensättigung als Mass für die Versauerung eines Bodens. Böden mit tiefer Basensättigung gelten als versauert. Eine Basensättigung von $\leq 15\%$ wird als kritisch angesehen; bei einer Basensättigung von zwischen 15% und 40% gilt ein Boden bereits als versauert und hat eine deutlich verminderte Pufferfähigkeit. Gemäss einer neuen Schweizer Studie (IAP 2004) wiesen 13% der beobachteten Waldflächen eine kritische Basensättigung auf ($\leq 15\%$), bei weiteren 20% der Flächen lag die Basensättigung bei $>15-40\%$.

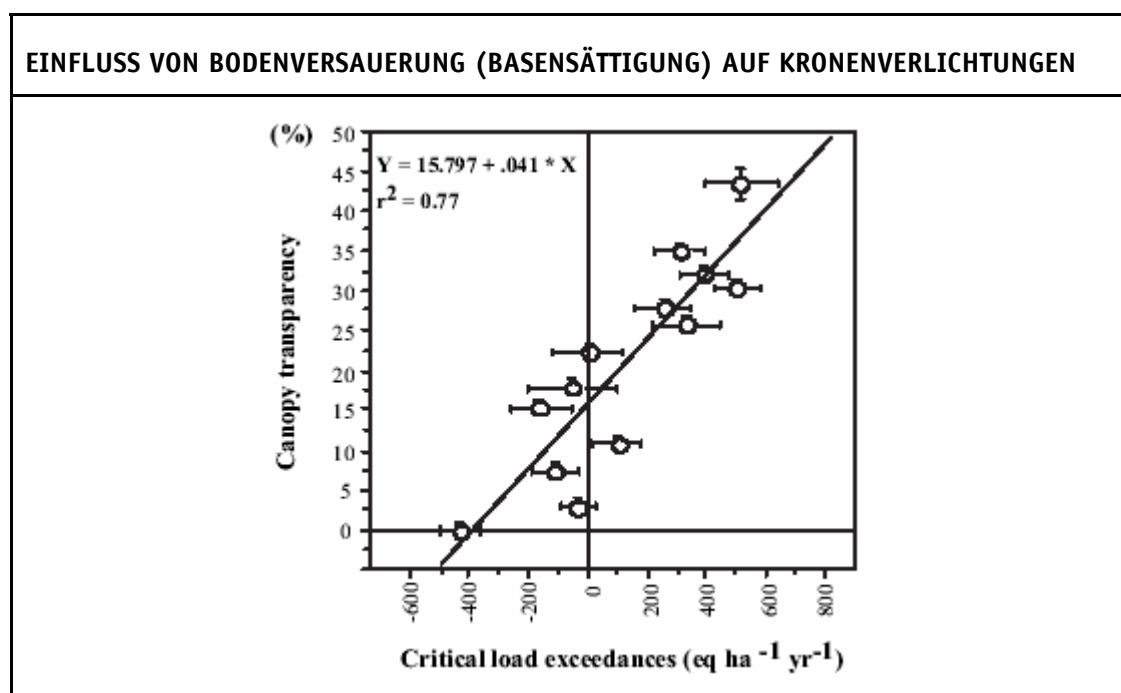
EINFLUSS VON BODENVERSAUERUNG (BASENSÄTTIGUNG) AUF DAS WACHSTUM DER FEINSTWURZELN BZW. DIE DURCHWURZELUNGSTIEFE



Figur 49 Oben: Je tiefer die Basensättigung (d.h. je saurer der Boden), desto kleiner ist der Anteil der Feinstwurzeln an der gesamten Wurzellänge und desto weniger Wurzelspitzen werden ausgebildet. Unten: Eine tiefere Basensättigung bewirkt zudem eine kleinere Durchwurzelungstiefe der Bäume. Weniger bzw. kürzere Feinstwurzeln sowie eine kleinere Durchwurzelungstiefe haben einen negativen Einfluss auf die Nährstoffversorgung sowie die Standfestigkeit des Baumes. Quelle: IAP 2004.

Versauerte Böden können Waldbäume auf verschiedene Arten schädigen. Beispielsweise beeinträchtigen sie den Nährstoffhaushalt der Bäume, unter anderem weil die Konzentration der basischen Kationen in den Böden abnimmt (IAP 2004, Brang 1998). Zudem führen saure Böden zu vermindertem (Fein-)Wurzelwachstum (IAP 2004, Jentschke et al. 2001, siehe auch Figur 49), was sich unter anderem negativ auf die Standfestigkeit der Bäume

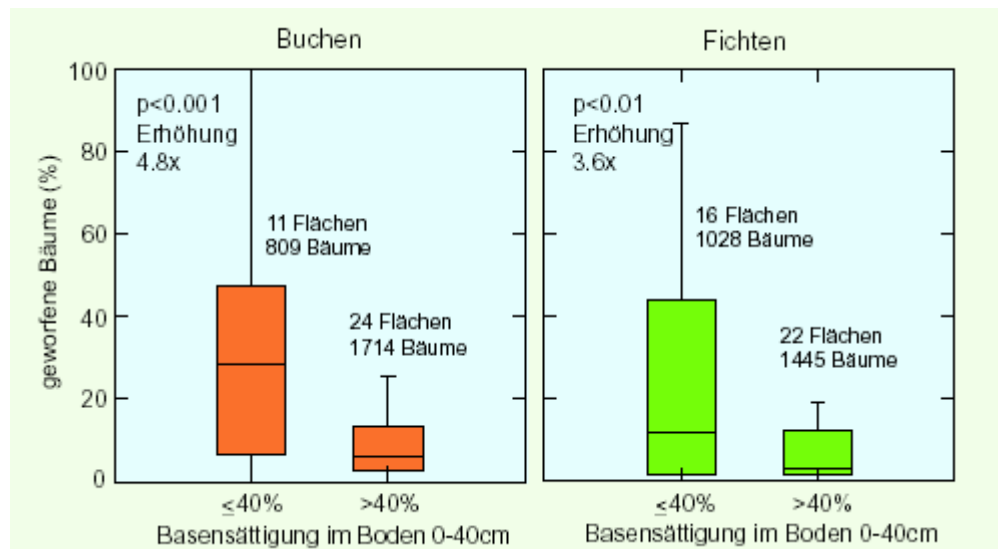
auswirkt und damit das Windwurfisiko erhöht (Figur 51, Braun et al. 2002, Mayer et al. 2005, IAP 2004, WSL 2004). Überdies konnte in internationalen Studien auch eine Korrelation zwischen der Bodenversauerung und den Kronenverlichtungen von Bäumen nachgewiesen werden (WEG 2004, Ouimet 2001, siehe Figur 50). Als weiterer Negativeffekt führen versauerte Böden überdies zu einem verringerten Stammwachstum (WEG 2004, Ouimet 2001, siehe Figur 52).



Figur 50 Beziehung zwischen dem Anteil an Bäumen mit Kronenverlichtungen (y-Achse) und dem Ausmass der Überschreitung des „critical load“ für Säureeinträge (in „Säure-Äquivalenten“). Die Grafik zeigt einen strengen Zusammenhang zwischen der Bodenversauerung und Kronenverlichtungen. Quelle: WGE 2004.

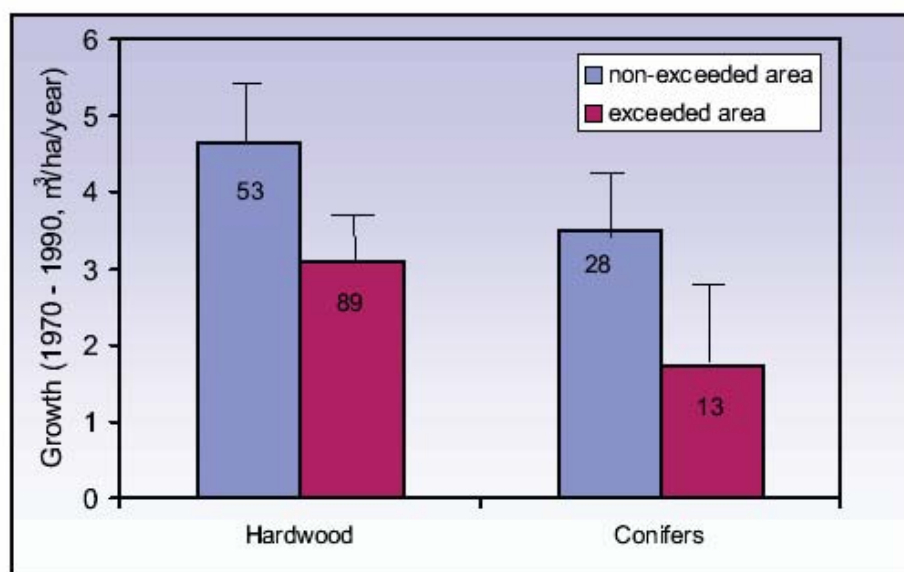
Obwohl nachgewiesen werden kann, dass die Bodenversauerung einen negativen Einfluss auf den Wald hat, ist es bis jetzt noch nicht gelungen, den anthropogenen Einfluss an diesen Einflüssen exakt zu quantifizieren. Für das Auftreten von Bodenversauerungen ist nämlich die Bodenbeschaffenheit (Geologie, Humuszusammensetzung, natürliche Pufferung des Bodens) nebst dem Eintrag von Säure bildenden Substanzen ebenfalls ein wichtiger Einflussfaktor. Weil aber noch vor 50 Jahren fast keine Waldböden versauert waren (d.h. pH<4, siehe oben), heute dagegen mehr als die Hälfte der Waldböden einen pH von unter 4 aufweisen, kann angenommen werden, dass diese Zunahme an versauerten Waldböden fast vollständig anthropogen verursacht ist.

EINFLUSS DER VERSAUERUNG AUF DAS WINDWURFRISIKO (AM BEISPIEL „LOTHAR“)



Figur 51 Auf saueren Böden (mit tiefer Basensättigung von <40%) wurden sowohl Buchen als auch Fichten sehr viel häufiger von „Lothar“ geworfen als auf Böden mit mittlerer bis hoher Basensättigung. Quelle: IAP 2004.

EINFLUSS DER VERSAUERUNG AUF DAS STAMMWACHSTUM



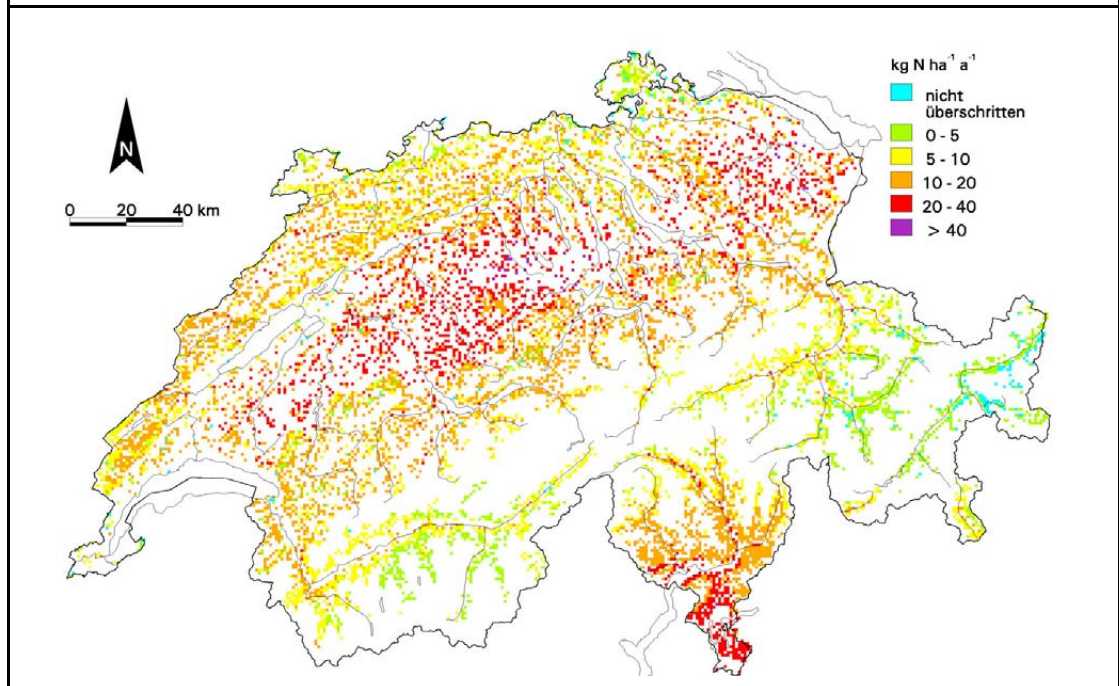
Figur 52 Die Ergebnisse zeigen eine signifikant verringerte Wachstumsrate von Bäumen, die auf übermäßig versauerten Böden („exceeded area“) stehen. Quelle: WGE 2004, Ouimet 2001.

Übermässiger Stickstoffeintrag

Durch die Luft werden erhebliche Mengen an Stickstoffimmissionen in die Wälder eingetragen. Diese Stickstoffe umfassen vor allem das Ammoniak (NH_3), welches grösstenteils aus der Landwirtschaft stammt, sowie Stickoxide (NO_x) aus Verbrennungsprozessen. Am meisten Stickstoff stammt insgesamt aus der Landwirtschaft, welche für rund 61% der gesamten Stickstoffemissionen verantwortlich ist (BUWAL 2004d). Der Verkehr ist ebenfalls ein wichtiger Stickstoffemittent und für rund 24% der gesamten N-Emissionen verantwortlich (BUWAL 2004d).

Der kritische Eintragswert von Stickstoff in Waldböden liegt zwischen 10 und 20 kg Stickstoff pro Hektare und Jahr. Wird dieser Wert überschritten, so sind negative Auswirkungen auf das Ökosystem Wald zu befürchten. In der Schweiz liegt der Stickstoffeintrag gemäss Modellrechnungen in 78% (IAP 2004) bis 90% (BUWAL 2004d) der Waldflächen über diesem kritischen Wert. Im Mittelland, den Voralpen und im Südtessin liegt dieser Wert vielerorts sogar über $30 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (siehe Figur 53). Aus Böden mit erhöhtem Stickstoffeintrag wird in der Regel Nitrat ins Grundwasser ausgewaschen, was dazu führen kann, dass der Nitratgehalt im Grundwasser den Grenzwert überschreitet.

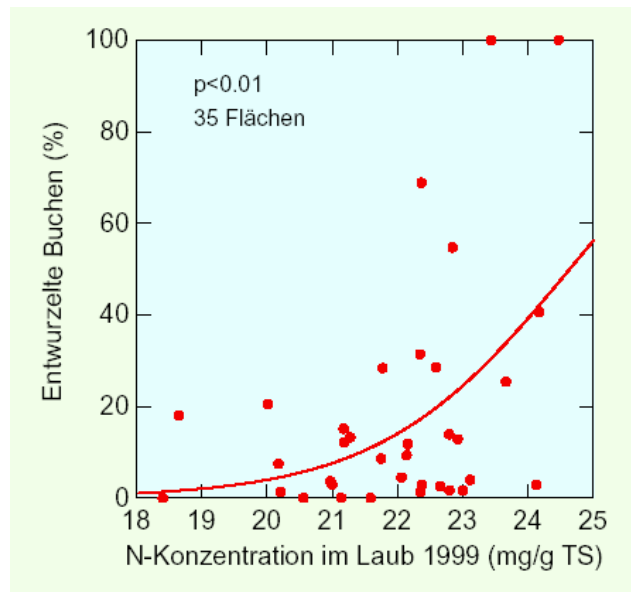
ÜBERSCHREITUNG DER CRITICAL LOADS FÜR STICKSTOFF AN WALDSTANDORTEN IN DER SCHWEIZ, 2000



Figur 53 Der kritische Eintrag („critical load“) von Stickstoff liegt bei Wäldern bei 10-20 kg Stickstoff pro ha und Jahr. Quelle: BUWAL 2004.

Bei geringen Stickstoffgehalten der Böden bewirkt ein zusätzlicher Stickstoffeintrag eine Förderung des Wachstums. Doch sobald der Boden stickstoffgesättigt ist und andere Nährstoffe limitierend sind, wirkt der Stickstoffeintrag nicht mehr wachstumsfördernd. Der übermässige Stickstoffeintrag kann Bäume schädigen, indem die Versorgung mit anderen Nährstoffen (z.B. Phosphor, Kalium, Magnesium) verschlechtert wird (IAP 2004). Zudem werden durch Stickstoffdüngung das Triebwachstum sowie der Anteil der Feinstwurzeln verringert, was einen negativen Einfluss auf die Standfestigkeit der Bäume hat und damit das Windwurfisiko erhöht (Figur 54). Im Weiteren sind Bäume an Standorten mit langjähriger Stickstoffdüngung wesentlich anfälliger auf Trockenstress (IAP 2004). Stickstoff scheint zudem bei einigen Baumarten die Abwehrkraft gegenüber Pilzbefall zu verringern (IAP 2004, Flückiger/Braun 1998).

EINFLUSS DER STICKSTOFFBELASTUNG AUF DAS WINDWURFRISIKO (AM BEISPIEL DES STURMES „LOTHAR“)

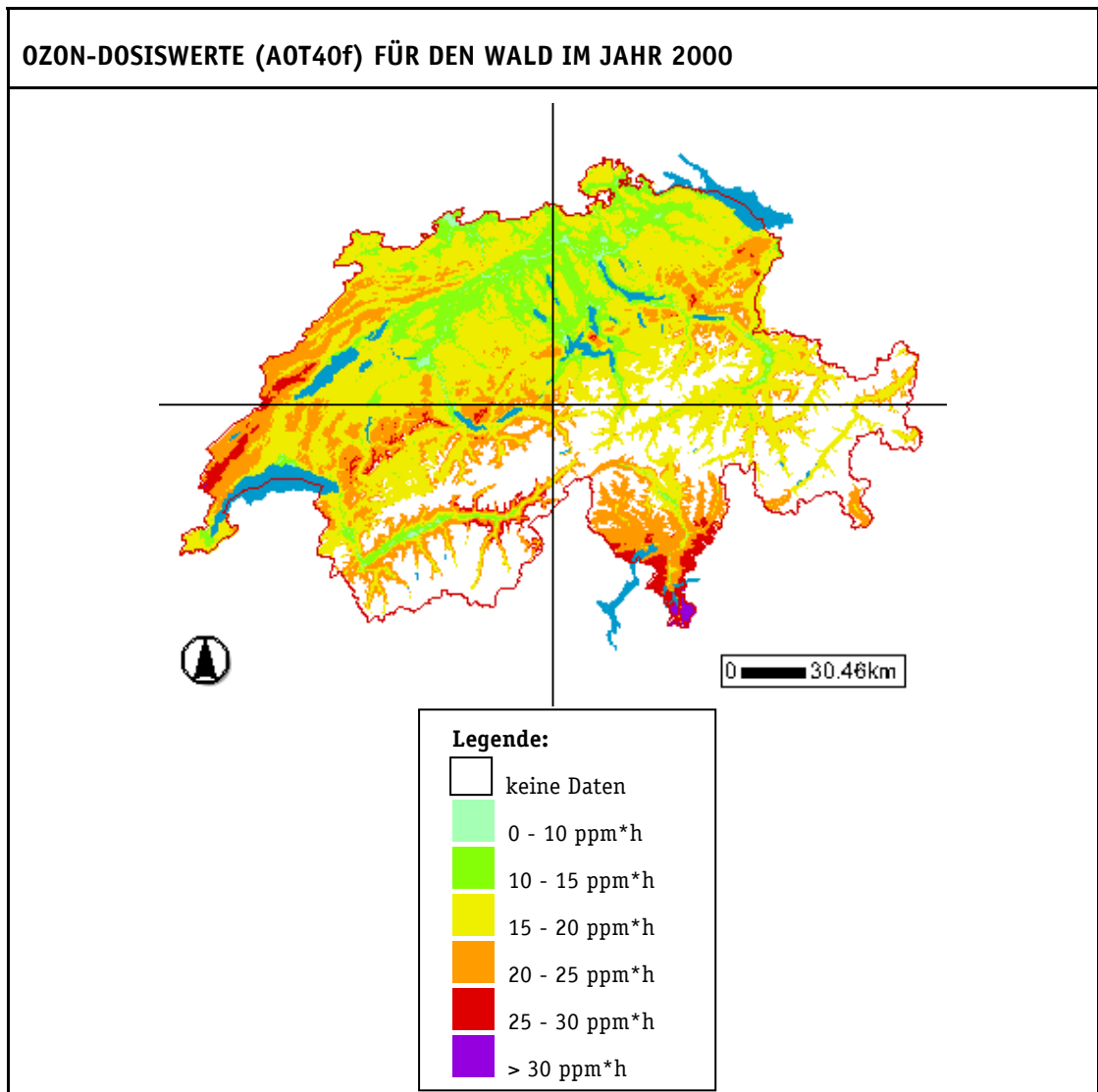


Figur 54 Der Anteil der durch „Lothar“ entwurzelten Buchen war umso höher, je höher im Sommer zuvor die Stickstoffkonzentration im Laub gewesen war. Quelle: IAP 2004.

Ozonbelastung

Nebst der Bodenversauerung sowie dem Stickstoffeintrag gilt heute auch das bodennahe Ozon als einer der wichtigsten Luftschadstoffe für den Wald (IAP 2004, WEG 2004, UNECE 2003). Während die Stickoxide und Schwefeldioxyde hauptsächlich indirekt über den Boden schädigend auf die Bäume einwirken, wirkt die Ozonbelastung direkt auf das Blattwerk und führt dabei zu Zellschädigungen und Stoffwechselstörungen. Dies wiederum kann zu diversen Schädigungen der Bäume führen, welche jedoch je nach Baumart unterschiedlich stark und unterschiedlicher Art sind. Nebst einer Reduktion des Wachstums wurde vor allem auch ein verringertes Feinwurzelwachstum beobachtet (IAP 2004, Brang 1998). Zudem führt die Ozonbelastung zu einem verminderten Dickenwachstum der Waldbäume (Braun et al. 1999). Heute wird Ozon als einer der Schadstoffe betrachtet, die Wälder am stärksten schädigen. Die kritische Ozondosis (critical level), oberhalb welcher Schäden an Waldbäumen zu erwarten sind (AOT40 von 5 ppm·h⁵⁷), wird in fast allen ländlichen Gebieten der Schweiz überschritten (Brang 1998).

⁵⁷ Die sog. „Critical Levels“ für Ozon wurden von der UNECE 1996 festgelegt. Sie beziehen sich bei Waldbäumen auf den AOT40 für die Tagesstunden von anfangs April bis Ende September.



Figur 55 AOT40-Werte für den Wald (AOT40f) im Jahr 2000. Dieser Wert (AOT40f) zeigt die Summe aller 1-Stunden-Ozonkonzentrationen über 40 ppb, welche zwischen 1. April und 30. September gemessen werden. Der kritische AOT40-Wert (critical level) für den Wald beträgt 5 ppm*h (Quelle: Meteotest).

Fazit

Obwohl heute nicht mehr ein generelles ‚Sterben‘ des Waldes prognostiziert wird, so können die durch die Luftverschmutzung mit verursachten Schäden an den Bäumen doch bedeutende Konsequenzen haben. Eine der wichtigsten Folgen der Waldschädigung betrifft die Anfälligkeit der Bäume gegenüber extremen Wetterereignissen wie beispielsweise Stürmen. So konnte in der Schweiz wie bereits erwähnt (nach den Stürmen „Vivian“ und „Lothar“) nachgewiesen werden, dass Bäume mit verlichteten Kronen bzw. Bäume auf versauerten oder überdüngten Böden weit häufiger durch Stürme geschädigt werden. Die Ursache für

das erhöhte Windwurfrisiko liegt darin, dass Bäume mit Kronenverlichtungen bzw. Bäume auf sauren bzw. überdüngten Standorten im Boden weniger fest verankert sind, weil ihr Wurzelwerk entsprechend „verlichtet“ bzw. zurückgebildet ist (Wentzel 2001, IAP 2004).

Nebst dem erhöhten Windwurfrisiko bleibt als zweites wichtiges Schadenselement das verringerte Wachstum von Waldbäumen, welches vor allem durch erhöhte Ozonkonzentrationen, aber auch versauerte Böden verursacht wird.

Insgesamt kennt man heute zwar viele kausale Zusammenhänge zwischen Umweltschäden, die durch Luftschadstoffe mit verursacht werden und Schäden bei Bäumen. Doch eine Quantifizierung der Zusammenhänge sowie genaue Dosis-Wirkungsbeziehungen konnten noch nicht ermittelt werden. Ein Grund für die Schwierigkeit bei der Quantifizierung der Dosis-Wirkungsbeziehungen liegt in der Tatsache, dass das komplexe Ökosystem Wald nebst den menschlichen Einflüssen noch einer Vielzahl anderer äusserer Faktoren ausgesetzt ist und von diesen beeinflusst wird.

Ein grosses Problem stellt vor allem die Quantifizierung des anthropogenen Anteils an den Schäden dar. Wenn beispielsweise der Zusammenhang zwischen dem Grad der Bodenversauerung und dem Windwurfrisiko einmal eindeutig nachgewiesen sein sollte, fehlt für eine komplette Expositions-Wirkungsbeziehung nach wie vor der quantitative Zusammenhang zwischen dem Ausmass der Luftschadstoffimmissionen und dem Versauerungsgrad der Böden. Erst wenn dieser Zusammenhang quantifiziert werden kann, lassen sich die anthropogen verursachten Waldschäden zuverlässig quantifizieren.

4. SCHÄDEN FÜR GEWÄSSER

Der Verkehr kann auf diversen Wegen schädigend auf Gewässer einwirken. Erstens können die durch den Verkehr emittierten Luftschadstoffe über Niederschläge in Oberflächengewässer oder über die Auswaschung aus Böden ins Grundwasser gelangen, wo es zu übermässiger Stickstoffbelastung, Versauerung sowie Auswaschung von Schwermetallen kommen kann. Zweitens kann auch der Einsatz von chemischen Hilfsmitteln im Verkehr wie Streusalz (Strassenverkehr) oder Unkrautvertilgungsmitteln (v.a. Schienenverkehr) zu einer Belastung von Gewässern führen. Drittens stellen auch Verkehrsunfälle sowie Lecks an Tankstellen bzw. Tanklagern ein Risiko für Gewässer dar. Einerseits können durch Gefahrguttransporte Schadstoffe in Gewässer gelangen, andererseits können auslaufende Treibstoffe (Benzin, Öl, Diesel) in Gewässern zu Verschmutzungen führen. Viertens führen die versiegelten Verkehrswege (z.B. Teerstrassen) zu zusätzlichen Mengen an Abwasser, die in die

Kanalisation gelangen (v.a. innerorts). Obwohl der Grad der Verunreinigungen nicht sehr gross ist (Treib- und Schmierstoffemissionen, Abrieb von Bremsen und Reifen sowie natürlicher „Strassenstaub“), werden diese zusätzlichen Abwassermengen zumindest in Städten und Dörfern noch in die Kanalisation geleitet und anschliessend in der Kläranlage gereinigt. Fünftens können zwischen Verkehrswegen und Trinkwasserfassungen Raumnutzungskonflikte entstehen. Diese entstehen dadurch, dass Verkehrsflächen (Strassen, Schienen, Parkplätze, etc.) oft in Grundwasserschutzzonen liegen bzw. gebaut werden, wo das Grundwasser als Trinkwasserressource verwendet wird und durch mögliche Verschmutzungen gefährdet ist. Damit können Verkehrsflächen an gewissen Orten die potenzielle Nutzung von Grundwasser verhindern bzw. es müssen gar Trinkwasserfassungen geschlossen werden.

a. Schäden aus Luftschadstoffen

Versauerung und Mobilisierung/Auswaschung von Schwermetallen:

Luftschadstoffe können negativ auf Gewässer wirken, indem sie über sauren Regen bzw. Auswaschung von sauren Substanzen aus dem Boden dem Gewässer Säure zuführen. Als Folge einer Versauerung können zudem Schwermetalle aus saurer werdenden Böden (d.h. Böden mit sinkendem pH-Wert) mobilisiert und ausgewaschen werden und so ins Grundwasser gelangen.

Die Versauerung von Gewässern spielt jedoch im grössten Teil der Schweiz keine Rolle. Aufgrund der Geologie sind die meisten unserer Gewässer (sowohl Oberflächengewässer als auch Grundwasser) durch den relativ hohen Kalk- bzw. Carbonatgehalt stark gepuffert. In gewissen Gebieten der Zentralalpen (Gotthardregion, Tessin), wo der Untergrund kristallin ist und das Gestein kein Kalk enthält, sind Böden und Gewässer natürlicherweise sauer. An diesen Orten können zusätzliche Einträge von Säure bildenden Substanzen Grund- und Oberflächengewässer (z.B. gewisse alpine Bergseen) noch weiter versauern. Dies birgt dann die Gefahr, dass Schwermetalle mobilisiert und ausgewaschen werden können, was theoretische gar zu Trinkwasserproblemen führen kann. In der Realität sind bis jetzt jedoch keine Probleme bekannt, die durch mit Schwermetallen verschmutzte Gewässer entstanden sind. Hinzuzufügen ist, dass die Emissionen an Säure bildenden Substanzen (Stickoxide und Schwefeldioxid) sowohl insgesamt als auch der Anteil des Verkehrs in der Schweiz rückläufig sind. Deshalb muss nicht erwartet werden, dass die Versauerungsproblematik zunehmen wird. Insgesamt bildet also der Verkehr bezüglich der Versauerung von Gewässern praktisch keine nennenswerte Gefahr.

Überdüngung durch erhöhten Stickstoffeintrag:

Wie bereits im obigen Kapitel zu den Waldschäden (3.1) erwähnt, tragen gasförmige Stickstoffemissionen (Stickoxide) zu einem erhöhten Eintrag an Stickstoff in die Umwelt bei. Was im Wald zu Problemen führt (Überdüngung des Waldbodens mit negativen Folgen für die Vegetation), birgt jedoch bei den Gewässern keine nennenswerte Gefahr. Zwar können Stickoxide aus der Luft entweder direkt durch Niederschläge in Oberflächengewässer oder über Auswaschung aus dem Boden ins Grundwasser gelangen. Zum immer noch aktuellen Problem der Überdüngung (Eutrophierung) von Gewässern (v.a. Seen) in der Schweiz trägt dieser Stickstoffeintrag jedoch nicht wesentlich bei, weil nicht die Stickstoff- sondern die Phosphoremissionen die Hauptursache der Eutrophierung der Gewässer darstellen. Die Zufuhr von Phosphor ist für die Überdüngung der Gewässer verantwortlich, weil dieser Stoff in Gewässern der wachstumslimitierende Faktor ist. Aus diesem Grund spielt der Eintrag von Stickstoff in die Gewässer zumindest in der Schweiz keine wesentliche Rolle⁵⁸.

Hinzu kommt, dass atmosphärische Stickoxide aus dem Verkehr mengenmässig nur eine sekundäre Rolle spielen beim Stickstoffeintrag in Gewässer. Der klar grösste Stickstoffeintrag in die Gewässer stammt in der Schweiz aus der Landwirtschaft sowie dem Siedlungsabwasser.

Weitere Schadstoffe:

Der Verkehr verursacht eine Reihe weiterer Schadstoffe, die später in die Gewässer gelangen. Ein solcher Schadstoff aus dem Verkehr ist das MTBE (Methyl-tertiär-Butylether), welches im Benzin seit 1985 das Blei als Antiklopfmittel abgelöst hat. Das MTBE wird in der Umwelt unter Einfluss von Sonnenlicht ziemlich gut abgebaut. Dennoch gelangt MTBE über Auswaschung durch Niederschläge aus der Luft in die Gewässer (Grundwasser und Oberflächengewässer). Vor allem im Grundwasser findet infolge der Abwesenheit von Sonnenlicht nur noch ein sehr langsamer Abbau statt. Nach heutigem Kenntnisstand ist das MTBE nur gering toxisch. Eine allfällige kanzerogene Wirkung kann aber nicht mit letzter Sicherheit ausgeschlossen werden. Überdies können schon kleine Konzentrationen das Trinkwasser ungeniessbar machen, weil das MTBE eine sehr niedrige Geruchs- und Geschmacksgrenze besitzt. In der Schweiz werden heute jährlich fast 100'000 Tonnen MTBE verbraucht. Das MTBE wird heute in der Schweiz in vielen Grundwasservorkommen gefunden (im Projekt

⁵⁸ Im Ausland dagegen (z.B. in der Nordsee) tragen Stickstoffimmissionen zur Eutrophierung und Algenblüte bei. Damit trägt auch der Verkehr einen (kleinen) Teil an diesen Schäden, wenn gleich auch die Emissionen aus der Landwirtschaft dominierend sind.

NAQUA bei rund 20% der Messstellen; BUWAL/BWG 2004). Die gemessenen Konzentrationen liegen aber deutlich unter den kritischen Werten. Dennoch muss die Entwicklung der MTBE-Gehalte in den Gewässern kritisch weiter verfolgt werden (u.a. mit dem Grundwasserbeobachtungsprogramm NAQUA), damit eine allfällige Verschlechterung der Situation rasch erkannt werden kann.

Eine weitere Gruppe von Schadstoffen, die aus dem Verkehr stammen und in Gewässern zu Verschmutzungen führen können, sind die sogenannten BTEX (die Gruppe umfasst die Stoffe Benzol, Toluol, Ethylbenzol und Xylol). Diese monozyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe sind im Benzin und in geringerem Ausmass auch in Diesel enthalten. BTEX können über Verdunstung sowie infolge unvollständiger Verbrennung von Treibstoffen in die Luft und anschliessend via Regen in ober- und unterirdische Gewässer gelangen (BUWAL 2004a). Für das Grundwasser dürfte aber der Eintrag von BTEX aus ausgelaufenen Treibstoffen (leckende Tanks, Verschütten beim Betanken, Auslaufen bei Unfällen) eine grössere Rolle spielen. Zusätzlich können BTEX auch aus verkehrsfremden Quellen stammen, nämlich aus der Lagerung und dem Gebrauch von organischen Lösungsmitteln. In der Schweiz werden BTEX (v.a. Toluol) in gut 10% der Grundwassermessungen gefunden (BUWAL/BWG 2004). Die Messwerte liegen jedoch unterhalb den numerischen Anforderungen gemäss Gewässerschutzgesetz (= kritischer Wert).

b. Chemische Hilfsmittel: Streusalz bzw. Unkrautvertilgungsmittel

Einsatz von Unkrautvertilgungsmitteln:

Der Einsatz von Unkrautvertilgungsmitteln (Herbiziden) im Strassenverkehr ist in der Schweiz seit einiger Zeit auf und an Strassen, Wegen und Plätzen (öffentliche und private) sowie auf Böschungen und Grünstreifen entlang von Strassen, Gleisanlagen und Gewässern grundsätzlich verboten (gemäss eidgenössischer Stoffverordnung). Ausgenommen sind Einzelstockbehandlungen von Problempflanzen bei National- und Kantonsstrassen sowie an Böschungen und Grünstreifen entlang von Strassen jeder Klasse, sofern diese mit anderen Massnahmen, wie regelmässiges Mähen, nicht erfolgreich bekämpft werden können. In diesen Ausnahmefällen müssen Herbizide jedoch äusserst zurückhaltend eingesetzt werden. In Grundwasserschutz-zonen dürfen Herbizide in keinem Fall angewandt werden. Unter der Annahme, dass diese Verordnung auch beachtet und durchgesetzt wird, stellen also Herbizide im Strassenverkehr kein Umweltproblem mehr dar.

Erlaubt ist der Einsatz von Herbiziden dagegen noch auf Bahntrassen. Der Einsatz dieser Herbizide durch Bahnunternehmen wird durch das BAV geregelt. Seit 1992 verwendet die

SBB auf den Gleisanlagen nur noch weniger umweltbelastende Blattherbizide (Glyphosat und Sulfosat). Das Bodenherbizid Atrazin wird seit 1990 nicht mehr eingesetzt. Die heute eingesetzten Blattherbizide werden nicht vorbeugend, sondern nur bei bereits bestehendem Bewuchs direkt auf die Pflanze angewendet. Glyphosat und Sulfosat binden relativ gut an das Schotter- und Bankettmaterial. Bis heute wurden in Grundwasserproben keine relevanten Mengen an Glyphosat nachgewiesen. Dies hängt aber auch damit zusammen, dass dieser Stoff analytisch bis jetzt nicht gut messbar ist. Es sind bis heute keine toxischen Wirkungen von Glyphosat auf Mensch oder Tiere bekannt. Ob von diesen Herbiziden eine effektive Schadwirkung auf die Umwelt ausgeht, ist beim momentanen Stand der Forschung schwierig zu sagen. Hinzu kommt, dass der Herbizideinsatz im Verkehr verglichen mit dem Einsatz von Unkrautvertilgungsmitteln in der Landwirtschaft vernachlässigbar ist: Der gesamte Herbizideintrag aus dem Schienenverkehr beträgt heute nur etwa 4% desjenigen der Landwirtschaft.

Einsatz von Streusalz:

Im Gegensatz zu den Herbiziden spielt beim Streusalz der Strassenverkehr die Hauptrolle. Nebst der direkten Auswaschung von Streusalz in die Kanalisation gelangt ein erheblicher Anteil des Streusalzes durch Fahrzeug- und Windverfrachtungen sowie diffuses Versickern des Schmelzwassers von Pflugschnee in die Umwelt (LINK 1997).

Das Chlorid aus dem Streusalz kann auf diese Weise in das Grundwasser oder in Oberflächengewässer gelangen. Während des Winters können denn auch in Oberflächengewässern erhöhte Chloridkonzentrationen beobachtet werden. Die gemessenen Werte sind aber immer noch sehr viel tiefer als die kritischen Werte, ab welchen mit negativen Folgen für die aquatischen Lebensgemeinschaften oder den Menschen zu rechnen sind (BAFU). Oberflächengewässer haben also kein Chloridproblem. Da der Einsatz von Streusalz im Durchschnitt der letzten Jahre rückläufig gewesen ist⁵⁹, dürften in nächster Zukunft auch keine solchen Probleme auftauchen.

Auch im Grundwasser führt der Einsatz von Streusalz zu einem wahrnehmbaren Anstieg der Chloridkonzentration. In einer Forschungsarbeit für die Schweiz (LINK 1997) konnte jedoch gezeigt werden, dass dieser durch den Winterdienst verursachte Eintrag von Chlorid bei quantitativ bedeutenden Grundwasservorkommen und selbst bei lokalen Grundwasservorkommen mässiger Ergiebigkeit keine nennenswerten Probleme für die Grundwasserquali-

⁵⁹ Heute werden in der Schweiz pro Jahr im Durchschnitt etwa 85'000 Tonnen Streusalz verbraucht (LINK 1997).

tät verursacht. Nur bei lokalen Grundwasservorkommen bescheidener Ergiebigkeit und bei unmittelbar am Verkehrsträger gelegenen Quellwasservorkommen bescheidener Ergiebigkeit ist eine Belastung des Grundwassers nicht auszuschliessen, sofern das Verkehrsaufkommen sehr hoch ist, bzw. wenn der Winterdienst sehr intensiv erfolgt (z.B. in höheren Lagen). Erhöhte Chloridkonzentrationen im Grund- bzw. Trinkwasser stellen also für die Umwelt ebenfalls kein nennenswertes Problem dar. Hingegen können erhöhte Chloridkonzentrationen im Trinkwasser zu einem Korrosionsproblem führen, indem Installationen der Trinkwasserversorgung (Pumpen, Leitungen) korrodieren und damit Kosten generieren. Obwohl sind solche Schäden vorstellbar sind, gibt es keine Angaben über tatsächlich aufgetretene Korrosionsschäden infolge erhöhter Chloridkonzentration.

Streusalz aus dem Winterdienst gelangt nicht nur in die Gewässer, sondern wird auch in Böden sowie an Pflanzen entlang von Strassen verfrachtet.

Eine erhöhte Salzkonzentration in Böden sowie im Bodenwasser kann bei Pflanzen zu Störungen des Wasserhaushalts führen. Salzhaltige Aerosole können zudem über die Luft verfrachtet werden, sich an Pflanzen ablagern und dort zu Kontaktschäden führen (z.B. Absterben von Blättern).

Während der Phase erhöhter Salzbelastung unmittelbar nach der Schneeschmelze können die Lebensbedingungen von Boden bewohnenden Kleintieren und Mikroorganismen, aber auch von Pflanzen so verändert werden, dass gewisse Schädigungen möglich sind. Über das Ausmass der Schäden von Pflanzen entlang von Verkehrswegen durch das Streusalz ist bis anhin wenig bekannt. Weil Streusalz jedoch vor allem innerorts sowie auf Autobahnen eingesetzt wird, wo die Bepflanzungen entlang der Strassen (Alleen, Rabatten, Wiesenstreifen, etc.) grösstenteils zur Strassenfläche gehören und auch von den Tiefbauämtern bzw. öffentlichen Diensten bewirtschaftet werden, ist ein bedeutender Teil dieser Kosten als intern zu betrachten, weil ein allfälliger Ersatz von geschädigten Pflanzen von der Strassenrechnung getragen wird. Selbstverständlich gilt dies nicht für mögliche Verluste an landwirtschaftlichen Pflanzungen entlang von Strassen. Diese Kosten dürften sich jedoch in einem sehr engen Rahmen halten, weil sich der Salzeintrag auf den Spritzwasserbereich (bis ca. 1-2m) beschränkt. Die Schäden an den Böden entlang der Verkehrswege werden zudem bereits durch das folgende Kapitel abgedeckt (Schäden für die Bodenqualität).

Die grössten und gut quantifizierbaren Schadenswirkungen hat das Streusalz auf die Fahrzeuge sowie die Verkehrsanlagen selbst (Brückenpfeiler, Armierungen, Fundamente, Stützmauern, etc.). Weil diese Kosten jedoch von den Fahrzeugbesitzern selbst bzw. der Strassenrechnung getragen werden, handelt es sich um interne Kosten.

c. Verschmutzungen durch Unfälle bzw. Lecks (auslaufende Treibstoffe sowie Gefahren- gut)

Zu punktuellen Verschmutzungen von Gewässern kann es bei Unfällen durch auslaufende Treib- oder Schmierstoffe sowie entweichendes Gefahrengut kommen. Auch Lecks an Tankstellen, Tanklagern oder Verschüttungen beim Betanken von Fahrzeugen können zum Eintrag von Treibstoffen in Gewässer führen. Diese Stoffe können in die Kanalisation oder aber ins Grundwasser oder gar in Oberflächengewässer gelangen und dort zu Verschmutzungen führen.

Solche Verschmutzungen durch Unfälle und Lecks können zu erheblichen Sanierungskosten führen (z.B. Bodensanierung durch Aushub, Reinigung oder Deponierung; Grundwassersanierung durch Abpumpen, Belüften, Strippen, etc.). Gemäss dem in der Schweiz gültigen Verursacherprinzip müssen solche Schäden vom Verursacher getragen werden. Somit handelt es sich bei den Schäden durch Gefahrengutunfälle und Lecks in der Schweiz um interne Kosten. Selbstverständlich werden in der Praxis nicht alle dieser Schäden bemerkt bzw. effektiv auf den Verursacher überwält. Es ist jedoch nicht möglich eine Abschätzung vorzunehmen, welcher Anteil der Schäden nicht vom Verursacher getragen wird und damit ein externer Schaden bleibt⁶⁰.

d. Meteorwasser auf Verkehrsflächen und allfällige Reinigung

Das auf Verkehrswegen gesammelte Abwasser ist nur wenig verschmutzt. Es enthält gewisse Mengen an Schwermetallen und organischen Schadstoffen (z.B. polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe, PAK) aus den Abgasen sowie dem Reifen-, Strassen- und Bremsbelagsabrieb. Der Verschmutzungsgrad ist insgesamt so klein, dass eine Reinigung des Meteorwassers in Abwasserreinigungsanlagen nicht nötig ist. Gemäss heutiger Praxis wird das von Verkehrsflächen abfliessende Niederschlagswasser, wenn immer möglich, von der Kanalisation getrennt entwässert (Prinzip der „Trennentwässerung“). Die Einleitung von Meteorwasser in die Kläranlage wird also vermieden, weil dadurch die Reinigungskapazität einer ARA eingeschränkt wird. Das Prinzip der „Trennentwässerung“ stützt sich auf den Artikel 7 des Gewässerschutzgesetzes, gemäss welchem nicht verschmutztes Abwasser versickern zu lassen ist oder, falls dies die örtlichen Verhältnisse nicht erlauben, in ein oberirdisches Gewässer zu leiten ist.

⁶⁰ Eine Abschätzung ist u.a. auch deshalb schwierig, weil es in der Schweiz keine zentrale Registrierung von Gefahrengutunfällen gibt.

Die „Trennentwässerung“ des Meteorwassers von Verkehrsflächen kann auf verschiedene Arten geschehen. Die einfachste und prioritäre Entwässerungsmöglichkeit ist das blosse Versickern des Niederschlagswassers. Wenn eine Versickerung nicht möglich ist, bietet sich als Alternative auch eine Sammlung des Niederschlagswassers in separaten Reinwasserkanälen mit anschliessender Einleitung des gesammelten Wassers in einen Vorfluter (Oberflächengewässer) an. Bei Autobahnen oder bestimmten anderen Strassen wird das Niederschlagswasser von der Strasse zuerst gesammelt und in einen Ölabscheider geleitet. Dort können Treibstoff- oder Ölrückstände entfernt werden und das restliche Wasser anschliessend zur Versickerung oder in den Vorfluter geleitet werden. Mit dem Einsatz der Trennentwässerung fallen keine nennenswerten externen Kosten durch Gewässerschäden an, weil das Meteorwasser nur schwach verschmutzt ist. Gewisse Schäden können jedoch in den Böden entlang der Verkehrswege entstehen, wo das Meteorwasser versickert und dadurch die Böden mit gewissen Schadstoffen (v.a. Schwermetallen und PAK) belastet werden. Diese Belastung und die damit verbundenen Kosten werden im nächsten Kapitel behandelt (Schäden für Bodenqualität).

Heute wird das Meteorwasser von Strassen ausserhalb Ortschaften gemäss dem Prinzip der Trennentwässerung versickert oder in einen Vorfluter geleitet. Innerorts wird die Trennentwässerung bei Strassenneubauten soweit möglich ebenfalls durchgeführt. Bei der überwiegenden Mehrheit der Strassen innerhalb von Städten und Dörfern wird das Meteorwasser von Strassen aber immer noch in der Kanalisation gesammelt und anschliessend in die Kläranlage geleitet. Die in den Abwasserreinigungsanlagen zusätzlich anfallende Wasserfracht stellt aus qualitativer Hinsicht aufgrund des geringen Verschmutzungsgrades für die Abwasserreinigungsanlagen kein Problem dar. Hingegen hat das Meteorwasser in quantitativer Hinsicht erhebliche Folgen. Die nach Regenfällen anfallenden hohen Wasserfrachten aus dem Abfluss von Strassenmeteorwasser können die Abwasserreinigungsanlagen an die Kapazitätsgrenze bringen. Deshalb müssen Kläranlagen, in deren Einzugsgebiet sich viele über die Kanalisation entwässerte Verkehrswege befinden, grösser dimensioniert werden, was zusätzlichen Kosten für die Allgemeinheit zur Folge hat.

e. Nutzungskonflikte zwischen Verkehrswegen und Trinkwasserfassungen

Zwischen Verkehrsflächen (v.a. Autobahnen, Eisenbahnlinien, Tunnels, Parkplätzen, etc.) und Trinkwasserfassungen können teilweise wesentliche Nutzungskonflikte entstehen. Diese Raumnutzungskonflikte können dann auftreten, wenn Verkehrsflächen in Grundwasserschutz-zonen liegen oder gebaut werden, wo das Grundwasser als Trinkwasserressource ge-

nutzt wird und durch potenzielle Verschmutzungen gefährdet ist. Damit können Verkehrsflächen an gewissen Orten die Nutzung von Grundwasser verhindern bzw. es müssen gar Trinkwasserfassungen geschlossen werden. Als Folge davon ist möglicherweise eine neue Trinkwasserfassung zu bauen. Gemäss Aussagen des BAFU gibt es solche Fälle gerade entlang neuer Eisenbahnlinien und Autobahnteilstücken immer wieder (BAFU). Die Quantifizierung der durch diese Nutzungskonflikte entstehenden Kosten ist praktisch unmöglich. Oft sind die anfallenden Kosten auch keine externen Kosten, weil allfällige neue Trinkwasserfassung vom Bauherr eines neuen Verkehrsweges (SBB, öffentliche Hand als Bauherrin von Strassen) (mit-)finanziert werden.

f. Weitere Kostenaspekte im Zusammenhang mit Gewässern

Im Zusammenhang mit den Wirkungen des Verkehrs auf Gewässer können auch weitere Kostenaspekte eine Rolle spielen:

- › *Versiegelung*: Die Versiegelung von Verkehrswegen kann – zumindest theoretisch – zu einer verminderten Grundwasserneubildung und damit veränderten Grundwasserverhältnissen führen. Dies kann sich wiederum negativ auf die Trinkwassernutzung des Grundwassers auswirken. Die Folgen sind aber theoretischer Art und in der Praxis kaum relevant. Gerade dank der Trennentwässerung beim grössten Teil der Verkehrswege das Meteorwasser von der Strasse versickert, womit auch keine negativen Folgen für das Grundwasser zu erwarten sind.
- › *Kontrolle/Beobachtung der Wasserqualität*: Um mögliche Risiken durch Schadstoffe in Gewässern abschätzen und frühzeitig erkennen zu können, ist eine flächendeckende Beobachtung der Wasserqualität nötig. In der Schweiz existieren verschiedene solcher Umweltbeobachtungsprogramme für Gewässer (u.a. die Bundesprogramme NAQUA (Nationales Netz zur Qualitätsbeobachtung des Grundwassers), NADUF (Nationale Daueruntersuchung der schweizerischen Fliessgewässer) und NABESS (Nationales Netz zur Beobachtung der Grundwasserstände und Quellschüttungen), daneben weitere kantonale Überwachungsprogramme). Diese Kontrollen haben natürlich ebenfalls Kosten zur Folge, für welche zumindest teilweise der Verkehr verantwortlich ist. Gemäss Schätzung von BAFU-Fachleuten (Sektion Grundwasserschutz) fallen von den gesamten Kosten für die Beobachtung und Überwachung des Grundwassers in der Schweiz (Bund und Kantone) jährlich rund 1 bis 1.5 Mio. CHF an, welche dem Verkehr anzulasten sind und nicht von diesem getragen werden, sondern über allgemeine Steuermittel oder den Trinkwasserpreis finanziert sind.

5. SCHÄDEN FÜR DIE BODENQUALITÄT

Die wichtigsten Umweltwirkungen des Verkehrs auf den Boden umfassen die folgenden vier Aspekte:

a. Bodenversauerung

Die Emission von Stickoxiden (NO_x) und in unbedeutenderem Masse Schwefeldioxid (SO_2) durch den Verkehr kann durch den Eintrag dieser Stoffe in den Boden zusammen mit Wasser zur Versauerung des Bodens führen. Dies ist vor allem bei schlecht gepufferten Böden ein Problem, da der pH-Wert des Bodens stark absinken kann. Dies kann zur Auswaschung von wertvollen Nährstoffen aus dem Boden sowie zur Freisetzung und Mobilisierung von Schwermetallen führen. Dadurch können auch Grund- und Oberflächengewässer in Mitleidschaft gezogen werden (siehe Kapitel Waldschäden). Versauerte Böden haben vor allem negative Auswirkungen auf die Pflanzen, z.B. die Waldbäume (BUWAL 2004d). Das Problem der Versauerung ist vor allem für Waldböden relevant, da diese nur schwach gepuffert sind. Landwirtschaftliche genutzte Böden dagegen sind in der Schweiz – auch dank der Bewirtschaftung – viel weniger anfällig auf Versauerung.

Die Bodenversauerung hat vor allem indirekte Folgen für die Biosphäre (Wald) sowie die Gewässer. Diese wichtigsten Effekte der Bodenversauerung wurden bereits in den obigen Kapiteln berücksichtigt – bei den Schäden in der Biosphäre (Waldschäden) sowie den Gewässerschäden.

b. Überdüngung (durch Stickstoff)

Der Eintrag von Stickstoff durch den Verkehr (über die Luft aus Stickoxiden) kann im Boden zur Überdüngung beitragen. Insbesondere auf Waldböden kann die Überdüngung mit Stickstoffen negative Folgen haben. Auch der Effekt der Überdüngung des Bodens wurde im obigen Kapitel über die Schäden in der Biosphäre (Waldschäden) bereits berücksichtigt. Im Weiteren gilt es festzuhalten, dass der Verkehr in der Schweiz nur rund ein Viertel der gesamten Stickstoffemissionen verursacht (BUWAL 2004d, BUWAL 2005b) und damit verglichen mit der Landwirtschaft eine eher sekundäre Rolle spielt.

c. Belastung des Bodens beim Bau von Strassen/Schienen sowie bei Unfällen und Lecks

Wie bereits im obigen Kapitel der Gewässerschäden erwähnt, können Unfälle mit Gefahrgütern sowie Lecks sowohl Grundwasser als auch Böden verschmutzen. Ähnliches gilt für den Bau von Verkehrswegen, wo ebenfalls Bodenverschmutzungen auftreten können. Beim

Bau von Verkehrsanlagen kann es zudem zu physikalischen Belastungen, z.B. Verdichtungen des Bodens kommen. Bei unsachgemäsem Vorgehen können Böden so langfristig geschädigt werden (z.B. mit Ertragseinbussen als Folge). Die Schäden, die beim Bau von Verkehrswegen sowie bei Unfällen mit Gefahrgut entstehen, bzw. die Kosten für deren Vermeidung durch Beizug von Fachleuten, müssen in der Schweiz gemäss geltendem Recht vom Verursacher getragen werden (Transportunternehmen, Bahnunternehmen, Bauherr (z.B. Bund, Kanton), etc.). Aus diesem Grund handelt es sich hier um interne Kosten, welche in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt werden müssen. Es muss jedoch angemerkt werden, dass in der Praxis längst nicht alle Kosten effektiv vom Verursacher getragen werden. Eine Reihe von Schäden oder Verschmutzungen des Bodens werden zum Beispiel gar nicht rechtzeitig bemerkt und daher auch nicht vom Verursacher getragen. Das Ausmass dieser unbekannten unbemerkten Schäden zu quantifizieren ist praktisch nicht möglich.

d. Verschmutzung des Bodens entlang Verkehrswegen durch Schwermetalle und PAK

Der Verkehr führt auch zu Verunreinigungen des Bodens mit Schwermetallen sowie polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) (Wegelin, Gsponer 1997, BUWAL 1992). Die Blei emissionen sind in den letzten Jahren (ab etwa 1985) dank der Einführung von bleifreiem Benzin massiv zurückgegangen. Viele Böden entlang von Strassen sind zwar weiterhin stark mit Blei belastet, doch neue wesentliche Einträge gibt es heute kaum mehr. Allfällige Einträge sind weitgehend unbedeutend. Dagegen bleiben Emissionen anderer Schwermetalle (z.B. Zink, Cadmium, Kupfer) weiterhin ein Problem (Holenstein 2000, Wegelin, Gsponer 1997). Zink und Cadmium fallen vorab beim Reifen- und Bremsenabrieb durch den Strassenverkehr an. Mengenmässig am bedeutendsten ist Zink, das im Strassenverkehr zu 67% durch den Reifenabrieb und zu 33% durch den Strassenabrieb verursacht wird (BUWAL 1992). Cadmium stammt vor allem aus dem Reifenabrieb. Der Schienenverkehr verursacht wesentliche Kupferemissionen (Abrieb von Bremsbelägen und Fahrleitungsdrähten). Der grösste Teil der durch den Verkehr verursachten chemischen Bodenbelastungen tritt örtlich begrenzt entlang der Verkehrswege auf (BUWAL 1992).

Nebst Schwermetallen wurden in letzter Zeit entlang von stark befahrenen Strassen auch vermehrt erhöhte Konzentrationen an PAK (polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) nachgewiesen. PAK sind organische Schadstoffe, die bei Verbrennungsprozessen entstehen und vor allem aus dem Russ von Dieselmotoren stammen. Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) gelangen über Russpartikel in den Boden und werden aufgrund ihrer schlechten Wasserlöslichkeit mehrheitlich in der Bodenmatrix eingelagert. PAK

können aber auch aus dem Abrieb der Fahrbahn stammen, da vor allem ältere Teerbeläge oft bedeutende Mengen an PAK enthalten. PAK sind krebserregend und in der Umwelt schlecht abbaubar. Bodenverschmutzungen durch Schwermetalle und PAK treten nur sehr lokal entlang von Verkehrswegen auf, können aber starke negative Einflüsse auf die Bodenfruchtbarkeit sowie die Bodenfauna haben (BUWAL 1992, Holenstein 2000, Wegelin & Gsponer 1997). Zudem können auch Pflanzen entlang von Verkehrswegen durch den Eintrag von Schwermetallen und PAK geschädigt werden, wodurch beispielsweise die landwirtschaftliche Nutzung auf solchen Böden eingeschränkt sein kann.

Verschmutzungen von Böden entlang von Verkehrswegen haben zudem indirekte Schädwirkungen, wenn belastete Böden ausgehoben werden und dieser Aushub nicht fachgerecht verwertet wird (BUWAL 2001). Belasteter Bodenaushub ist nicht beliebig verwertbar. Wird belasteter Aushub z.B. für Terrainveränderungen, Gartenanlagen oder zur Umgebungsgestaltung von Bauten verwendet, können bisher saubere Standorte plötzlich starke Verschmutzungen aufweisen (Metastaseneffekt).

Forschung zu den Folgen von Bodenverschmutzungen mit Schwermetallen und PAK:

Der Einfluss des Verkehrs auf den Boden ist abgesehen vom Flächenverbrauch insgesamt erst wenig erforscht. Während die negativen Einflüsse durch Versauerung und Stickstoff-Einträge etwas besser bekannt sind (siehe Waldschäden), ist der Wissensstand bezüglich des Eintrags von Schwermetallen aus dem Verkehr noch lückenhaft. Zwar weiss man, dass einige Schwermetalle (und PAK) entlang von Strassen in erhöhten Konzentrationen vorkommen, doch genau Dosis-Wirkungsbeziehungen zwischen Verkehrsaufkommen bzw. Emissionen und Schadstoffbelastung in Böden (Immissionen) sind kaum bekannt. Das Ausmass und die räumliche Ausdehnung der Schadstoffbelastung sind stark stoffspezifisch und nebst den blossen Emissionsmengen auch von zahlreichen anderen Faktoren wie Emissionscharakteristika, Klima, Topographie, Vegetation und Bodeneigenschaften abhängig. Expositions-Wirkungsbeziehungen zwischen Bodenbelastung und Umweltschäden sind ebenfalls nur teilweise bekannt. Angesichts dieser Wissenslücken und der Irreversibilität der meisten Belastungen arbeitet der Bodenschutz schwergewichtig nach dem Vorsorgeprinzip („Belastungen vermeiden“). In der Schweiz bilden die in der „Verordnung über Belastungen des Bodens“ (VBBo) festgehaltenen Richt-, Prüf- und Sanierungswerte die Messlatte für die Beurteilung von Bodenbelastungen mit Schwermetallen und organischen Schadstoffen.

Die Belastungen der Böden durch Schwermetalle und PAK aus dem Verkehr gefährden die Gesundheit der Bevölkerung in der Regel nicht direkt, es sei denn bei stark betroffenen

Kinderspielplätzen und Hausgärten. Stark belastete Böden schädigen aber Pflanzen und Tiere (z.B. Wachstumsstörungen). Auf diese Weise entstehen beispielsweise Zusatzkosten für die Landwirtschaft, indem entlang von belasteten Verkehrswegen die Bodenfruchtbarkeit vermindert ist bzw. ein Teil des Bodens gar nicht mehr bearbeitet werden kann, weil die Belastung mit Schwermetallen bzw. PAK zu hoch ist. Im Weiteren können auch Zusatzkosten für andere Landbesitzer entstehen, wenn deren Grundstücke entlang von Strassen oder Bahnschienen mit Schwermetallen oder PAK belastet sind und somit an Wert verlieren oder gar sanierungsbedürftig werden.

Fazit für die Berechnung der externen Kosten

Von den erwähnten vier Aspekten der Bodenverschmutzung bleibt gemäss den vorherigen Ausführungen also einzig der letzte Schadensaspekt (Bodenverschmutzung entlang Verkehrswegen durch Schwermetalle und PAK) offen und damit zu quantifizieren. Die anderen Aspekte wurden bereits in den vorherigen Kapiteln behandelt oder spielen eine untergeordnete bzw. keine Rolle. Im Bericht ist immer dieser eine, relevante Schadensaspekt gemeint, wenn von Schadenskosten im Bereich Bodenverschmutzungen durch den Verkehr die Rede ist.

6. ERSCHÜTTERUNGEN

Verkehrsbedingte Erschütterungen werden primär durch vorbeifahrende Fahrzeuge erzeugt. Erschütterungen verursachen vor allem schienengebundene Fahrzeuge sowie strassengebundene Schwerverkehrsfahrzeuge, wenn sie über Fahrbahnunebenheiten, Weichen, Schlaglöcher oder Kopfsteinpflaster fahren. Der Zustand resp. die Beschaffenheit der Räder spielt dabei ebenfalls eine wichtige Rolle. Zusätzlich wirken dynamische Eigenschaften der Fahrzeuge mit, insbesondere wenn Eigenschwingungen im Spiel sind. Bestimmend für das Ausmass der Erschütterungen sind daher neben Art, Qualität und Anzahl der vorbeifahrenden Fahrzeuge auch Art und Umfang der störenden Eigenschaften des Fahrweges. Zudem wird die Erschütterung bei der Übertragung durch den Boden in der Stärke und dem Frequenzgehalt verändert. Ebenso verändert das dynamische Verhalten des Gebäudes selbst die Erschütterung.

Grundsätzlich sind zwei Wirkungsarten von Erschütterungen zu unterscheiden, nämlich solche auf Gebäude, was Wert mindernde Sachschäden hervorrufen kann, und solche auf Menschen in Gebäuden, die die Erschütterungen als zusätzliche Belästigung empfinden. Letzteres gilt vor allem beim Aufenthalt in Wohngebäuden, im Speziellen bei nächtlichen

Schlafstörungen. Erschütterungseinwirkungen auf Gebäude können diverse negative Folgen haben:

- › Risse im Verputz von Decken und/oder Wänden;
- › Vergrösserung von bereits vorhandenen Rissen in Gebäuden;
- › Abreissen von Trenn- und Zwischenwänden von tragenden Wänden oder Decken.

Belästigungswirkungen durch Erschütterungen auf Menschen in Gebäuden können direkt und indirekt - über das Fühlen am ganzen Körper oder über hörbares Klappern oder Klirren von Gegenständen (Sekundärphänomene genannt) - wirken. Menschen sind vor allem empfindlich auf Erschütterungen im Bereich von 1 bis 80 Hz. Nebst ihrem direkten und indirekten Effekt führen Erschütterungen auch zum Phänomen des abgestrahlten Körperschalls von den Wänden und Decken. Wenn zum Beispiel die Vorbeifahrt eines Zuges als dumpfes Grollen gehört wird, spricht man von abgestrahltem Körperschall. Erschütterungseinwirkungen aus der Umwelt können beim Menschen vor allem zu Störungen des Wohlbefindens führen.

Gesetze und Regulative zur Begrenzung von Erschütterungen

Aktuell angewendete Bestimmungen aus der Normierung sind die Schweizer Norm SN 640 312a "Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke" (herausgegeben durch den Schweizerischen Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute, VSS) sowie die deutsche Norm DIN 4150 "Erschütterungen im Bauwesen". Das technische Regelwerk für die Beurteilung von Erschütterungseinwirkungen auf Menschen in Gebäuden ist der Teil 2 der DIN 4150. Die Einwirkung von Erschütterungen auf Gebäude ist Gegenstand des dritten Teils dieser Norm (DIN 4150, Teil 3).

Das Schweizer Umweltschutzgesetz bezweckt auch den Schutz des Menschen vor Erschütterungen. Das Regelungskonzept entspricht mehrheitlich jenem zum Schutz gegen Lärm. Die schweizerische Umweltschutzgesetzgebung enthält jedoch noch keine Verordnung zur Begrenzung der Erschütterungsemissionen. Im Sinne einer Vollzugshilfe gibt es eine Weisung des BAFU (in Zusammenarbeit mit dem BAV) zur Beurteilung von Erschütterungen und Körperschall bei Schienenverkehrsanlagen (BEKS) (BUWAL 1999a). Gemäss dieser Weisung gelten bei Schienenverkehrsanlagen für die Erschütterungseinwirkung auf Menschen die Anhaltswerte (als Immissionsrichtwerte) der DIN 4150 Teil 2 und für den Körperschall die in der Weisung des BAFU (BEKS) aufgeführten Richtwerte. Die Erschütterungen werden mittels der dimensionslosen „Beurteilungs-Schwingstärke KB“ und der abgestrahlte Körperschall, wie beim Lärm, mittels eines Beurteilungspegels L_r in dB(A) z.B. L_{eq16} ermittelt. Im-

missionsrichtwerte für Erschütterungen liegen gemäss der DIN 4150 Teil 2 für Wohnen unter 0.1. Die Immissionsrichtwerte für Körperschall betragen in Wohnzonen 30 dB(A) in der Nacht für den 1-Stunden-Lärmpegel (L_{eq1}) bzw. 40 dB(A) für den Tageswert (L_{eq16}). Gemäss der Weisung des BAFU können mit der Einhaltung der DIN 4150 Teil 2 Menschen vor erheblichen Störungen geschützt werden.

Zusammenhang zwischen Belastungshöhe und Schadensausmass

Über den Einfluss von Erschütterungen auf Gebäude und die Beziehung zwischen Belastungshöhe und Schadensausmass ist wenig bekannt. Es konnte nachgewiesen werden, dass zwischen dem Niveau der Erschütterung und der Geschwindigkeit des Verkehrs keine strenge Korrelation besteht (Crispino 2001). Wichtig sind vielmehr die Beschaffenheit der Verkehrswege (Schiene, Strasse) sowie der einzelnen Fahrzeuge (Lokomotiven, Lastkraftwagen etc.).

Die Auswirkungen von verkehrsbedingten Erschütterungen auf den Menschen sind nur wenig erforscht. Wegen dem gemeinsamen Quellenbezug existieren Studien, welche das Ausmass der erlebten Störwirkung von Erschütterungen erheben und mit jenem des Lärms vergleichen. Dabei besteht in diesen Situationen das Problem, dass der erlebte Lärm meistens sowohl auf den abgestrahlten Körperschall wie auch auf den Aussenlärm zurückzuführen ist. Die saubere Trennung beider Anteile ist schwierig. Die Beziehung zwischen der Stärke der Erschütterung und dem Ausmass der Störung erklärt ähnlich wie beim Lärm höchstens 30% der Varianz. Entlang von Bahnlinien konnte beispielsweise kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Anzahl durchfahrender Züge und dem Grad der Störung gefunden werden (Knall 1996). Nachgewiesen werden konnte dagegen der Umstand, dass bei Lärmemissionen aus dem Schienenverkehr der negative Einfluss auf die Befindlichkeit durch gleichzeitiges Auftreten von Erschütterungen verstärkt wird (Öhrström 1996, Öhrström 1997, Klaeboe et al. 2003a, Klaeboe et al. 2003b, Turunen-Rise et al. 2003). Die monokausale Erhebung der Störung durch Erschütterungen ist schwierig, weil die Menschen die negativen Folgen von Lärm und Erschütterungen oft nicht trennen können. Verdeckungseffekte können bewirken, dass die Erschütterungen bei kleineren quellenbezogenen Lärmbelastungen negativer wahrgenommen werden als bei grossen Lärmbelastungen. Bei höheren Lärmbelastungen steigt die Schwelle, bei der Erschütterungen negativ wahrgenommen werden (Meloni, Krueger 1990, Knall 1996). Der Unterschied zwischen der kombiniert wahrgenommenen Störwirkung durch Lärm und Erschütterungen entlang einer Bahnlinie mit und ohne Erschütterungen (bei gleicher Lärmbelastung) entspricht ungefähr 10

dB(A). Das bedeutet, dass in einem Gebiet, in dem der Bahnverkehr auch Erschütterungen erzeugt, das Lärmniveau 10 dB(A) tiefer sein müsste als in Gebieten ohne Erschütterungen, damit die gleiche Störwirkung erzeugt wird (Öhrström 1996).

7. ZUSÄTZLICHE UMWELTKOSTEN IN SENSIBLEN RÄUMEN

Art der Umweltwirkungen

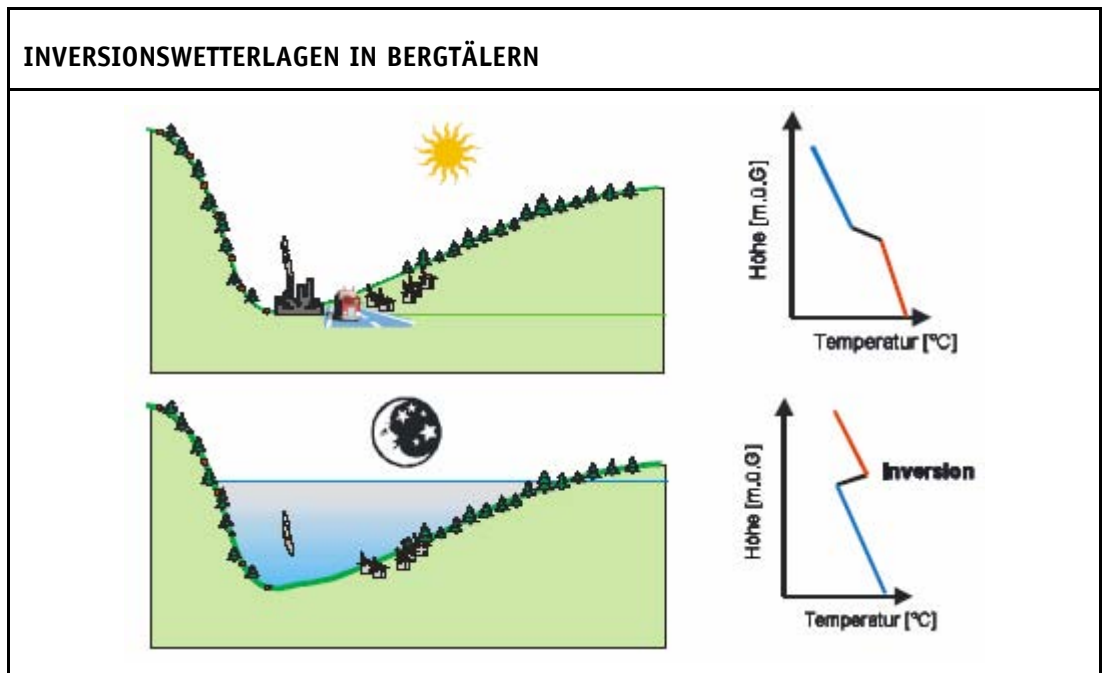
Im Rahmen der laufenden und bereits abgeschlossenen Aktualisierungsarbeiten der externen Kosten des Verkehrs in den Bereichen Natur- und Landschaft, Unfälle, Gesundheitschäden und Gebäudeschäden sind die wichtigsten externen Kosten im Verkehr schweizweit berechnet worden (siehe u.a. Econcept/Nateco (2003), Infras (2004b), Ecoplan (2004a+b)). Dabei stellt sich die Frage, ob bei diesen Berechnungen die besondere Situation Alpen ausreichend berücksichtigt wurde, oder ob in diesen Bereichen zusätzliche externe Kosten entstehen. Darüber hinaus werden gerade in den Alpen Umweltschäden auch an der Biosphäre beobachtet, die in den bisherigen Aktualisierungsstudien noch nicht berücksichtigt wurden. Diese werden im Kapitel 3.1 und 3.2 des Berichts genauer analysiert. Zusammenfassend lässt sich die spezifische Situation in den Alpen wie folgt charakterisieren:

- › Eventuelle generelle Unterschätzung der quantifizierten externen Kosten (Gesundheit, Lärm, Gebäudeschäden, Natur- und Landschaft) im alpinen Raum
- › Grössere Empfindlichkeit gegenüber verkehrsbedingten Umweltschädigungen aufgrund spezifischen Nutzungen (Tourismus) bzw. sensibleren Ökosystemen (Schutzwälder etc.) führen zu zusätzlichen externen Kosten.
- › Im Vergleich zum Mittelland ist der Alpenraum vergleichsweise dünn besiedelt, von den Umwelteinwirkungen sind daher weniger Menschen betroffen, als im Mittelland.
- › Generell ist die Gefahr von Doppelerfassung/-zählungen mit anderen Kostenbereichen vorhanden und bei Berechnungen zu berücksichtigen.

Die folgende Zusammenstellung zeigt die wichtigsten verkehrsbedingten Umweltprobleme im Alpenraum auf:

- › Bergtäler mit spezifischen meteorologischen Bedingungen: Aufgrund der häufigen Inversionswetterlagen kommt es zu einer Akkumulation von verkehrsbedingten Luftschadstoffen in Bodennähe, die freie Zirkulation der untersten Troposphärenschicht ist eingeschränkt und die im Flachland übliche Diffusion und Transmission der Schadstoffe ist eingeschränkt. Dadurch sind Menschen, Pflanzen und Tieren bei vergleichbaren Verkehrsmengen höheren Immissionen ausgesetzt. Die folgende Grafik zeigt das Phänomen der Inversi-

onswetterlage sowie eine typische Belastungssituation einer Flachlandautobahn im Vergleich mit der N2 am Gotthard.



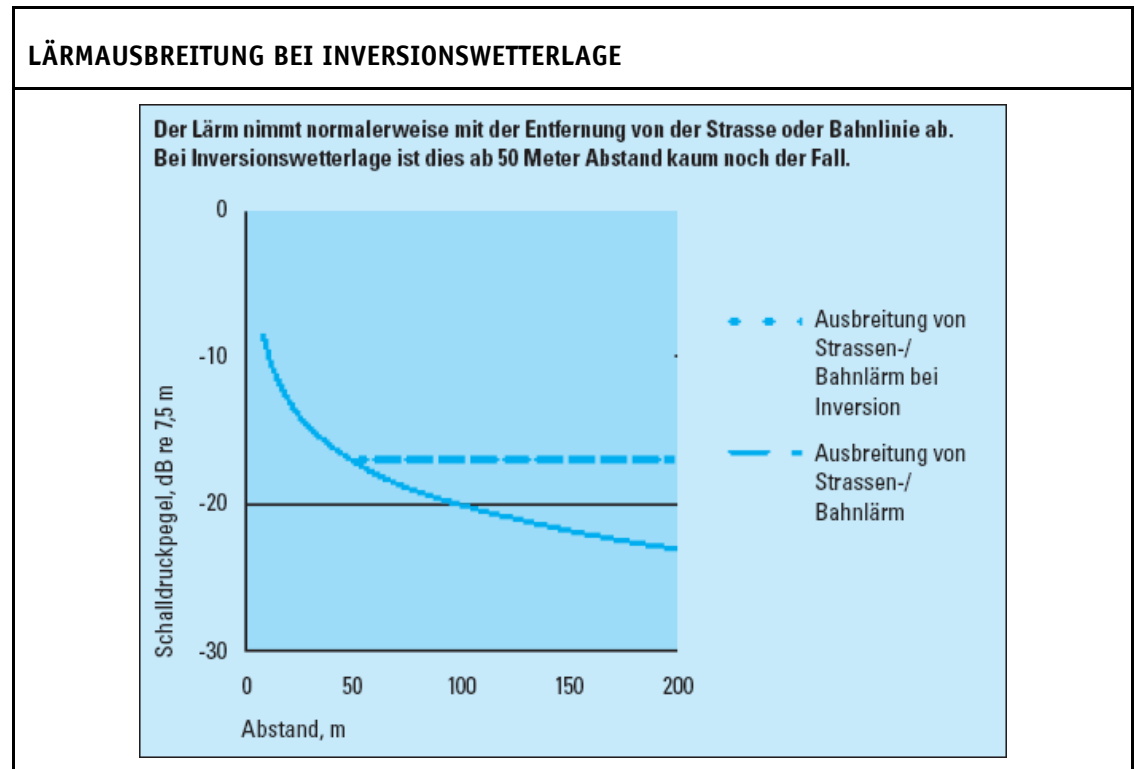
Figur 56 Quelle: Ökosience 2000.

LUFTBELASTUNG NO _x UND NO ₂ IM FLACHLAND UND IN DEN ALPEN					
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

Figur 57 Obwohl die Verkehrsmengen um einen Faktor 3-4 geringer sind, ist die Luftbelastung im Raum Altdorf quasi gleich gross wie im Flachland. Quelle: Ökosience 2000.

- › In Bergtälern wirkt Verkehrslärm besonders störend, weil die mit der Entfernung normalerweise einsetzende Dämpfung für höher gelegene Orte vergleichsweise schwach ist, die U- bzw. Trog-förmigen Täler zu Reflexionen führen und wiederum Wetterphänomene die Ausbreitung des Lärms begünstigen. So zeigt die nachfolgende Figur die Auswirkung von

Inversionswetterlagen auf die Lärmausbreitung:



Figur 58 Quelle: Müller-BBM 2001.

- › Aufgrund seiner Funktion als Natur- und Erholungsraum mit dem Tourismus als einem der wichtigsten Wirtschaftszweige ist der Alpenraum hinsichtlich Umweltbeeinträchtigungen wie Lärm und Luftschadstoffe und auch auf Eingriffe in Natur und Landschaft durch Verkehrsinfrastrukturen besonders empfindlich. Im Zweifel führen schon Immissionen unterhalb von Immissionsgrenzwerten zu wirtschaftlichen Verlusten beispielsweise im Tourismus, weil Feriengäste einen höheren Anspruch auf ungestörte Nachtruhe haben, als in der LSV vorgesehen.

Zusätzliche Kosten sind dabei insbesondere in folgenden Bereichen vorhanden:

- › **Natur und Landschaft:** Aufgrund des beschränkten Raumes in den Talböden wirkt sich die Verkehrsinfrastruktur besonders stark aus hinsichtlich Flächenbeanspruchung, Habitatfragmentierung und Qualitätsverluste der Habitate. Da ebene Flächen im Alpenraum ein rares Gut sind, wirkt sich diese Knappheit auf den Bodenpreis aus. Diese höheren Kosten aufgrund der Knappheitspreise im Alpenraum werden in der Studie Econcept/Nateco

(2003) nicht voll berücksichtigt. Ein weiterer, bisher nicht quantifizierter Bereich ist die Zahlungsbereitschaft der Feriengäste für eine unverbaute Landschaft. Dazu gibt es Grundlagen und Abschätzungen, die auf Forschungsergebnissen des NFP41 und NFP 48 beruhen (Ott et al. 1999, Egger 1999, Gret-Regamey/Bebi 2004).

- › **Gesundheitskosten:** Die Gesundheitskosten werden in den Alpen tendenziell unterschätzt, da die Expositionsmodellierung die spezifische Situation in Gebirgstälern nicht ideal abbildet. Tendenziell liegen dort die modellierten PM₁₀ Konzentration um ca. 15-25% tiefer als die gemessenen Werte (siehe BUWAL/SAEFL 2003, S. 71). Diese Unterschätzung betrifft aufgrund der relativ dünnen Besiedelung der Alpen jedoch vergleichsweise wenige Personen und die Durchschnittsimmissionen im alpinen Raum sind zudem noch deutlich tiefer im Vergleich zu den Innenstädten.
- › **Lärm:** Aufgrund der bedeutenden wirtschaftlichen Rolle des Tourismus stellt sich die Frage, ob im Alpenraum die gleiche Empfindlichkeitsstufe gewählt werden kann wie im Flachland (55 dB(A) tagsüber, 45 dB(A) nachts). Ausserdem ist noch unklar, ob durch die Auswahl der Stichprobe der Lärmkatasterdaten in der Aktualisierungsstudie zu den Lärmkosten (Ecoplan 2004b) die spezifische Situation in den Alpen ausreichend repräsentiert ist. Einzig 2 aus 30 Rasterquadraten sind im Alpenraum.
Die verminderte Lärmdämpfung bei Inversionswetterlagen sowie die Reflexionseffekte in den U- bzw. Trogförmigen Bergtälern sind kaum berücksichtigt worden. Auf der Seite des Wertgerüsts wiederum wurden nur Mietzinsausfälle berücksichtigt. Diese wiederum berücksichtigten nicht, dass durch Verkehrslärm die Wertschöpfung aus dem Tourismus beeinträchtigt wird. Dazu liegen im Moment keine wertmässigen Grundlagen vor. Ein Quantifizierungsansatz wären Zahlungsbereitschaften für mehr Ruhe.
- › **Biosphäre:** Die Bewertung von verkehrsbedingten Schäden an der Biosphäre ist äusserst kontrovers. Allgemein bekannt ist zwar, dass v.a. bei Inversionswetterlagen an der Nebelgrenze eine deutlich sichtbare Schädigung von Blättern und Nadeln auftritt, die dazugehörigen Dosis-Wirkungsbeziehungen sind dabei äusserst komplex. Gleichzeitig wird dieser Aspekt im Bereich 'Waldschäden' (Kapitel 3.2 im Bericht) ebenfalls diskutiert. Zur Vermeidung von Doppelzählungen wird deshalb in diesem Kostenbereich auf eine Quantifizierung verzichtet.

Stand der Forschung / Literatur

Spezifische Studien zu den zusätzlichen externen Kosten im Alpenraum existieren im Moment nicht. Die vorhandenen Regionalisierungsstudien (Herry/INFRAS/PROGNOS 1995 und

Ott et. al 1999) übernehmen hauptsächlich die gesamtschweizerischen Mittelwerte und legen diese auf den Alpenraum um anhand verschiedener Indikatoren (Fahrleistungen, Infrastrukturnetz). Verschiedene Studien wurden im Zusammenhang mit den speziellen Umweltproblemen in den Alpen erstellt, diese enthalten aber meistens keine monetäre Quantifizierung der externen Verkehrskosten. Im Bereich der Zahlungsbereitschaftsstudien im Alpenraum sind aktuelle Resultate für die Zahlungsbereitschaft für unverbaute Landschaften bzw. für eine Verbesserung des Nutzens von Massnahmen für Natur und Landschaft vorhanden, die übernommen werden könnten.

8. ZUSATZKOSTEN IN STÄDTISCHEN RÄUMEN

In städtischen Agglomerationen dominieren die Verkehrsinfrastrukturen das Stadt- und Landschaftsbild, die Benutzung des öffentlichen Raums ist aufgrund des hohen Verkehrsaufkommens eingeschränkt. Verschiedene Effekte führen dabei zu Mehrkosten insbesondere der nicht-motorisierten Verkehrsteilnehmer:

- › Zeitverluste für Fussgänger und Velofahrende durch Zerschneidungseffekte. Dabei ist für Velofahrende insbesondere das sog. indirekte Linksabbiegen von Bedeutung: Bei hohem Verkehrsaufkommen quert ein Teil der Velofahrenden die Strasse wie die Zu-Fuss-Gehenden (nicht einspuren, sondern absteigen und Querung über den Fussgängerstreifen).
- › Zeitverluste für Fussgänger und Velofahrende durch Umwege/Umwegfahrten: Im Falle von sehr unattraktiven (hohes Verkehrsaufkommen, hohe Abgasbelastung) oder gefährlichen Streckenabschnitten weicht ein Teil der Zu-Fuss-Gehenden und der Velofahrenden auf längere, dafür attraktivere und sicherere Alternativrouten aus.
- › Knappheitsprobleme im öffentlichen Raum (z.B. als Raumverlust für Fahrräder darstellbar).

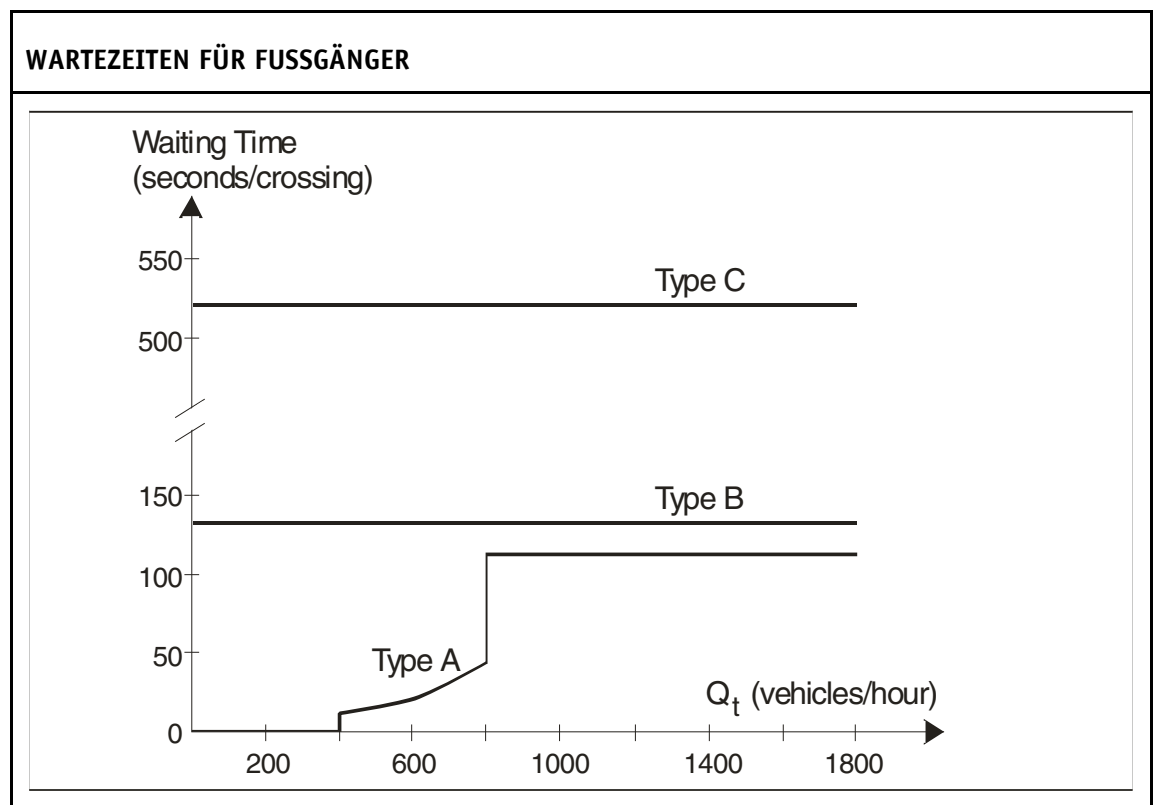
Daneben sind noch weitere Beeinträchtigungen wie z.B. die Veränderung und Beeinträchtigung des Landschafts- und Stadtbilds durch das Verkehrsaufkommen und die Verkehrsinfrastruktur zu nennen. Deren Bewertung ist allerdings sehr schwierig, es liegen im Moment keine belastbaren Schätzverfahren und -werte vor. Deshalb werden diese Aspekte nicht bewertet.

Die hohen Gesundheitskosten des Verkehrs in den Städten durch Luftschadstoffe und Lärm sowie die erhöhten Gebäuderenovationskosten wurden bereits in den laufenden Aktualisierungsstudien quantifiziert und sind hier nicht Gegenstand von Berechnungen.

Für die Zerschneidungseffekte und Knappheitsprobleme wurden bereits Pilot-Schätzungen im Rahmen der Studie INFRAS/IWW (2000) sowie in der Updatestudie

INFRAS/IWW (2004) vorgenommen. Diese Methoden beruhen auf bestehenden Bewertungsverfahren von Strassenbauten (EWS 1997). Wir schlagen vor, diesen methodischen Ansatz zu übernehmen und für die Schweiz zu verfeinern:

› **Zerschneidungseffekte:** Quantifizierung der Zeitverluste von FussgängerInnen bei der Überquerung von Strassen- und Bahnstrecken. Differenziert nach Strassentyp werden verschiedene Überquerungszeiten angenommen und mit einem Zeitkostensatz bewertet. Als Betroffene zählen die städtische Bevölkerung sowie der Saldo aus Zu- und Wegpendlern. Die Hochrechnung auf die Schweiz erfolgt anhand der Kosten für Pilotgemeinden bzw. pro Kopf-Kostensätzen auf Städte mit mehr als 50'000 EinwohnerInnen.



Figur 59 Die Wartezeiten sind abhängig vom Strassentyp. Schematische Darstellung Quelle: INFRAS/IWW (2000) nach PLANCO (1990). Für die vorliegende Studie verwenden wir aktuelle Zahlen aus EWS (1997).

› **Raumknappheitseffekte im öffentlichen Raum:** Die Annäherung der Kosten für die Raumknappheit in Ballungsgebieten wurde in INFRAS/IWW (2000) mit Hilfe der Kosten für Verkehrsinfrastruktur für den nicht-motorisierten Verkehr angenähert. Der Fokus liegt dabei auf der Erstellung zusätzlicher Radstreifen bzw. Radwege, da mit zunehmendem Verkehr kein Mischverkehr zwischen Fahrrädern und dem MIV vertretbar ist. Für die Schwei-

zer Städte mit ihrem vergleichsweise dichten Radwegenetz ist dieses bei der Quantifizierung zu berücksichtigten. Die Kosten ergeben sich aus den Baukosten zusätzlicher Radwege (Erstellungskosten 0.5 Mio. €, abgeschrieben über 10 Jahre).

Stand der Forschung / Literatur

Über die monetäre Quantifizierung räumlicher Trenneffekte ist relativ wenig bekannt, die Abschätzung in INFRAS/IWW 2000 sowie PLANCO 1990 geben erstmals einen quantitativen Überblick über die Trenneffekte.

9. ZUSATZKOSTEN DURCH VOR- UND NACHGELAGERTE PROZESSE

Energieproduktion und Graue Energie Fahrzeuge/Rollmaterial/Infrastruktur

Umweltschäden treten nicht nur durch den Betrieb von Fahrzeugen und Rollmaterial auf sondern auch durch deren Herstellung, Vertrieb und Entsorgung, die Erstellung der Infrastruktur sowie der Bereitstellung der Traktionsenergie bzw. des Treibstoffs. Die hierbei auftretenden Umweltschäden betreffen nahezu alle bekannten Kostenkategorien (Natur- und Landschaft beim Erzabbau, Lärm bei der Herstellung von Fahrzeugen und Strassen/Schienenwegen, Gesundheitskosten bei Bauarbeitern und Anwohnern beim Strassenbau oder Rohstoff-Abbau, Treibhauseffekte beim Transport und der Produktion der Treibstoffe sowie bei der Stromproduktion für die Traktionsenergie).

So vielfältig die unterschiedlichen Umweltbeeinträchtigungen im Lebenszyklus eines Verkehrsmittels bzw. bei der Produktion des Treibstoffes sind, so schwierig ist auch eine geeignete Annäherung an die daraus resultierenden externen Kosten. Anders als beim direkten Verkehrseffekt treten Emissionen bei der Produktion in anderen Ländern mit unterschiedlichem Expositionsmustern auf, haben kaum lokale Auswirkungen aufgrund z.B. der dünnen Besiedlung von Rohstofflagerstätten etc. Deshalb ist eine Quantifizierung dieser Lebenszyklus-Kosten äusserst schwierig. Eine Ausnahme bilden die global auftretenden Umweltschäden, bei denen die Schadensbemessung unabhängig vom Ort der Emission erfolgen kann. Dies betrifft in der vorliegenden Studie insbesondere die Treibhauseffekte. Aufgrund des grossen Bearbeitungsaufwandes und des relativ geringen Schadensbeitrags anderer Umweltwirkungen beschränkt sich die vorliegende Studie bei den vor- und nachgelagerten Prozessen auf die Quantifizierung der Treibhauseffekte.

Die folgenden Prozesse sind zu beachten:

- › **Energieerzeugung (Precombustion):** Die Erzeugung jeder Art von Energie verursacht zusätzliche Umweltschäden durch Abbau, Transport, Übertragung. Diese Schäden hängen direkt vom Umfang der Energienutzung ab und sind für alle Verkehrsträger relevant, wenn auch in geringerem Umfang für die Bahnen in der Schweiz, da sie grossteils mit erneuerbaren Energien betrieben werden.
- › **Fahrzeugbau, -instandhaltung und Entsorgung:** der Fahrzeug- und Rollmaterialbau ist angesichts der Lebenszyklen der verschiedenen Transportmittel vor allem langfristig von Bedeutung. Die kurzfristigen Grenzkosten sind nahe Null. Relevant sind dabei vor allem Luftverschmutzung und Treibhauseffekte, bei der Entsorgung auch Schäden für Böden und Grundwasser.
- › **Infrastrukturbau und -instandhaltung:** Auch hier müssen langfristig zusätzliche Emissionen berücksichtigt werden. Sie sind ähnlich wie die Kosten für Natur- und Landschaft zu behandeln, da sie mit der bestehenden Infrastruktur und damit sog. sunk costs zusammenhängen. Im Gegensatz zu diesen Effekten treten sie allerdings vor allem in der Bauphase bzw. bei Erneuerungsarbeiten auf.

A2. MENGENDERÜST

Fahr- und Verkehrsleistungen

Die folgenden Tabellen enthalten die wichtigsten Basisdaten für die Quantifizierung der weiteren externen Kosten des Verkehrs. Sie beruhen auf aktuellen Statistiken und Datenbanken (BFS, Handbuch Emissionsfaktoren, Treibhausgasinventare).

Strasse

FAHRLEISTUNGEN STRASSENVERKEHR 2000 IN MIO. FZKM		
Fahrzeugkategorie	Strassentyp	Mio. Fzkm 2000
Personenverkehr		
Motorrad	AB	388
	ao	829
	io	781
	Total	1'998
Personenwagen	AB	16'699
	ao	16'848
	io	16'005
	Total	49'552
Linienbus	ao	70
	io	127
	Total	197
Reisebus (Car)	AB	50
	ao	31
	io	20
	Total	101
Güterverkehr		
Lieferwagen	AB	1'384
	ao	1'232
	io	1'176
	Total	3'792
Schwere Nutzfahrzeuge (SNF) = LKW	AB	1'247
	ao	702
	io	436
	Total	2'385

Tabelle 35 Quelle: INFRAS 2004a, BUWAL 2004c⁶¹. AB: Autobahn, ao: ausserorts, io: innerorts.

⁶¹ Zwischen BUWAL 2004c/INFRAS 2004a und den aktuell auf BFS 2005 publizierten Fahrleistungen sind leichte Differenzen zu beachten.

VERKEHRSLEISTUNGEN STRASSENVERKEHR IN MIO. FZKM/PKM/TKM		
Fahrzeugkategorie	Mio. Fzkm	Mio. pkm/tkm
Personenverkehr		
Motorrad	1'998	2'440
Personenwagen	49'551	80'559
Linienbus	197	2'404
Reisebus	101	2'087
Güterverkehr		
Lieferwagen	3'792	1'488
Schwere Nutzfahrzeuge	2'385	13'630

Tabelle 36 Quelle: Fahrleistungen: INFRAS 2004a, BUWAL 2004c. Verkehrsleistungen: SNF: ARE 2004b, alle anderen Kategorien: BFS Homepage 'Statistik Schweiz', <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/de/index.html> (Stand 27.4.05).

Bei der Verkehrsleistungen der schweren Nutzfahrzeuge bestehen gegenwärtig noch grosse Unterschiede zwischen publizierten Daten des BFS (Details siehe BFS (2005, Stand Oktober 2005), Auslastungszahlen SNF beruhen auf der GTE 1998) und Publikationen des ARE (ARE 2004a+b). Wir übernehmen für die Berechnungen die Daten des ARE, da sie auf aktuellen Auswertungen von LSVA-Daten beruhen. Sie sind über 6'000 Mio. tkm tiefer als die publizierten Daten des BFS.⁶² Gem. Auskunft BFS befinden sich die Zeitreihen Güterverkehr ab 1985 für die Lieferwagen und schweren Nutzfahrzeuge gegenwärtig in Überarbeitung und werden demnächst neu publiziert. Bei den Verkehrsleistungen (in tkm) der schweren Nutzfahrzeuge darf erwartet werden, dass die überarbeiteten Zeitreihen des BFS recht nahe an den derzeit vom ARE publizierten Daten liegen.

62 Zahl BFS: 20'461 Mio. tkm (BFS 2005), Zahl ARE: 13'630 Mio. tkm (ARE 2004b)

Schiene:

FAHR- UND VERKEHRSLEISTUNGEN SCHIENENVERKEHR 2000 IN MIO. ZUGS-KM/PKM/TKM/BRTKM		
Verkehrsart	Einheit	Werte
Personenverkehr	Mio. Zugs-km	140.7
	Mio. pkm	12'620.5
	Mio. Personen	360.4
	Mio. Brtkm	40'478.5
	Ø Brutto-t/Zug	287.7
Güterverkehr	Mio. Zugs-km	31.4
	Mio. tkm	10'895.3
	Mio. t	63.5
	Mio. Brtkm	25'589.3
	Ø t/Zug	814.1
Total	Mio. Zugs-km	172.1
	Mio. Brtkm	66'067.8
	Ø Brutto-t/Zug	383.8

Tabelle 37 Quelle: Alle Zahlen aus BFS 2005 (ÖV-Statistik 2002)⁶³.**Streckennetze:****Strasse**

STRASSENNETZ SCHWEIZ 2000 IN KM	
Strassentyp	km
Nationalstrassen	1'638
Kantonsstrassen	18'097
Gemeindestrassen	51'397
Total	71'132

Tabelle 38 Quelle: BFS 2005.

63 Bei den Tonnen-km im Güterverkehr ergibt sich eine Differenz von ca. 1'215 Mio. tkm zu den Zahlen der Güterverkehrsperspektiven (ARE 2004). Hauptgrund für diese Differenz ist der Einbezug der Transportgefäss-Gewichte in den BFS Zahlen. Dies betrifft insbesondere die Behälter des Unbegleiteten Kombinierten Verkehrs (UKV) sowie die LKW-Gewichte der rollenden Landstrasse (ROLA). In ARE (2004) wurden sog. netto-netto-Tonnen zugrunde gelegt, die nur die tatsächlich transportierten Güter umfassen.

Schiene

STRECKENNETZ SCHIENE 2000 IN KM		
Spurweite	Total	davon mehrgleisig
Normalspur	3'628	1'707
Meterspur	1'404	45
Total	5'032	1'752

Tabelle 39 Quelle: BFS 2005: ÖV-Statistik 2002 (Stand 03.2005).

INFRASTRUKTUR-PARAMETER SCHIENENNETZ 2000			
Infrastruktur		Einheit	Wert
Tunnel	Total	Anzahl	667
	Länge	in km	401
Bahnbrücken (von mehr als 2m Länge)	Total	Anzahl	7'796
	Länge	in km	133
Gleislänge	Hauptgleise	in km	6'940
	Übrige Gleise	in km	3'385
	Total	in km	10'325
Privatanschlussgleise	Total	in km	1'435

Tabelle 40 Quelle: BFS 2005 (ÖV-Statistik 2002).

Emissionen + Energieverbrauch aus dem Betrieb

Strasse

VERBRAUCH UND EMISSIONEN STRASSENVERKEHR 2000 AUS DEM FAHRZEUG-BETRIEB, IN TONNEN										
FzKat	Treibstoff-Kategorie	Treibstoff	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	NO _x	CO	NMHC	SO ₂	NH ₃
MR	Benzin	60'041	188'573	337	2	566	22'422	6'602	17	4
PW	Benzin	3'162'767	9'933'461	979	459	20'936	204'041	19'151	895	1'310
PW	Diesel	286'963	903'957	8	12	2'718	1'636	315	156	4
LBUS	Diesel	70'955	223'513	7	3	3'003	863	301	39	1
RBUS	Diesel	26'566	83'685	1	1	1'030	166	57	14	1
LI	Benzin	166'705	523'579	89	19	2'806	27'391	1'863	47	51
LI	Diesel	179'635	565'865	4	6	2'420	1'040	176	98	2
SNF	Diesel	556'954	1'754'451	34	27	21'718	4'093	1'400	303	12
Total		4'510'586	14'177'084	1'460	530	55'198	261'651	29'864	1'569	1'385

Tabelle 41 Quelle: INFRAS 2004a, BUWAL 2004c, ohne Tanktourismus.

EMISSIONEN STRASSENVERKEHR 2000 - WEITERE SCHADSTOFFE AUS DEM FAHRZEUG-BETRIEB, IN TONNEN										
FzKat	Energie	HC-Total	Benzol	Toluol	Xylol	PM-exhaust	PM-non-exhaust	Zn	Zn(Abr)	Pb
MR	Benzin	6'939	277	684	583	67	32	0	3	0
PW	Benzin	20'130	1'225	1'782	1'524	136	1'846	16	116	4
PW	Diesel	322	5	1	3	332	173	2	11	0
LBus	Diesel	308	5	1	2	130	79	0	9	0
RBus	Diesel	58	1	0	0	33	19	0	5	0
LI	Benzin	1'952	115	174	143	6	82	1	14	0
LI	Diesel	181	3	1	1	327	73	1	13	0
SNF	Diesel	1'434	24	5	11	663	429	4	112	0
Total		31'324	1'654	2'648	2'268	1'693	2'733	25	284	5

Tabelle 42 Quelle: INFRAS 2004a, BUWAL 2004c, ohne Tanktourismus.

Schiene

EMISSIONEN SCHIENENVERKEHR 2000 IN TONNEN							
	CO	CH ₄	N ₂ O	NO _x	CO	NMVOC	SO ₂
Schiene	26'347	1.44	1.05	410.00	93.00	40.00	8.78

Tabelle 43 Quelle: SAEFL 2004.