

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation /  
Bundesamt für Strassen

**Methoden zum Erstellen und Aktualisieren von Wunschlinien-  
matrizen im motorisierten Individualverkehr**

**Méthodes d'estimation et actualisation d'une matrice d'origine-  
destination dans la circulation individuelle motorisée**

**Methods for estimating and updating of origin-destination matrices  
from traffic counts**

Forschungsauftrag: Nr. 2000/379 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer  
Verkehringenieure

Forschungsstelle: Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT),  
ETH Zürich

Bearbeitung: Dr.-Ing. Milenko Vrtic  
Prof. Dr. Kay W. Axhausen  
Prof. Dr. Michael G H Bell  
Dipl.-Ing. Sergio Grosso  
Dipl.-Ing. Wilfried Matthews

Begleitende Kommission:

SVI-Arbeitsgruppe "Informatik in der Verkehrsplanung"

- Schaufelberger Walter, B + S Ingenieur AG, Bern, Präsident
- Giacomazzi Maurizio, Dipartimento del territorio, Sezione dei trasporti, Bellinzona
- Hug Peter, SBB Personenverkehr P-FI-CFQ, Bern
- Mattenberger Philippe, Dep. de génie civil, EPFL, Lausanne
- Mötteli Markus, SNZ Ingenieure und Planer AG, Zürich
- Rubin Mario, Bundesamt für Strassen, Bern
- Züst Walter, ARE / Abteilung Verkehrskoordination, Bern

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	1
Summary .....	6
Résumé.....	11
1 Aufgabenstellung und Problemanalyse.....	16
2 Mathematische Problemstellung .....	18
3 Datenlage.....	24
4 Methodenübersicht und Eignungsprüfung .....	27
4.1 Kurzfassung .....	27
4.2 Introduction.....	30
4.3 Review of O-D estimators .....	33
4.3.1 Uncongested networks .....	33
4.3.2 Congested networks .....	34
4.3.3 Path flow estimation.....	35
4.3.4 Turning movement estimation.....	35
4.3.5 Short-term prediction .....	36
4.4 Steady state estimators.....	37
4.4.1 Variables and sets.....	37
4.4.2 Steady state conditions.....	38
4.4.3 Steady state O-D estimators for uncongested networks .....	40
4.4.4 Steady state O-D estimators for congested networks .....	41
4.4.5 Path flow estimation.....	42
4.4.6 Link to game theory .....	43
4.4.7 Solution methods.....	45
5 Description of the Path Flow Estimator (PFE).....	47
5.1 Introduction.....	47
5.2 PFE theory .....	49
5.3 Sets and variables.....	51
5.4 Model.....	51
5.5 Link cost functions.....	52

5.6	PFE algorithm .....	52
5.7	PFE Data Requirements .....	55
5.7.1	Data inputs and outputs .....	55
5.7.2	Use of O-D information .....	56
5.7.3	PFE data structure .....	56
5.7.4	Data generation: Interfaces for the conversion of data to PFE format .....	58
5.8	Swiss network and data .....	59
5.8.1	Static' network data .....	59
5.8.2	Network measurements .....	60
5.8.3	Generation of the PFE network and inputs .....	63
5.9	PFE analysis of the Swiss network .....	65
5.9.1	Constraints enforcement process .....	65
5.9.2	Analysis of convergence .....	65
5.9.3	Comparing PFE estimates against measurements .....	72
5.9.4	Comparison PFE vs User Equilibrium assignment .....	74
6	Bündelung der Methoden und Erweiterung .....	78
7	Aufbereitung der Zählraten .....	82
8	Anwendung auf das Schweizerische Strassennetz .....	86
8.1	Statisches Modell .....	86
8.2	Auswertung der mit dem PFE Ansatz Erstellte Quelle-Ziel Matrix .....	95
8.3	Dynamisches Modell .....	100
9	Schlussfolgerungen .....	103
10	Literatur .....	108

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Anwendungsbereiche der Ansätze.....	22
Table 2 Terminology .....	32
Table 3 Classification of techniques.....	32
Table 4 Variable definitions .....	37
Table 5 Set definitions .....	37
Table 6 Objective functions for steady state O-D estimators .....	40
Table 7 Steady state path flow estimators .....	42
Table 8 PFE sets and variables .....	51
Table 9 VISUM link types and frequencies.....	59
Table 10 Capacities (PCU/day) and their frequency .....	60
Table 11 Daily distribution of flows from traffic counts (stats).....	61
Table 12 Number of trips per distance band.....	62
Table 13 Generation of the PFE network for Switzerland.....	64
Table 14 Convergence statistics for links .....	68
Tabelle 15 Matrixstruktur mit und ohne Kalibration.....	94

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Quell-Ziel-Matrix .....	18
Abbildung 2 Zusammenhang zwischen Umlegung und Routenwahl.....	21
Abbildung 3. Zählstellen aus den Automatischen Zählungen und SSVZ 2000 .....	26
Figure 4 The constrained optimum.....	44
Figure 5. Maher's heuristic .....	46
Figure 6: A simple network .....	49
Figure 7: The logit response surface.....	49
Figure 8: Steady state cost curves.....	50
Figure 9: Equilibrium between demand and supply .....	50
Figure 10: The PFE algorithm .....	53
Figure 11: The PFE extended to include trip types .....	54
Figure 12: PFE – Directory Structure of I/O Files.....	57

Figure 13 Daily distribution of flows from traffic counts (graph).....	61
Figure 14: PFE iterative loops .....	66
Figure 15: Convergence behaviour for 30% confidence interval .....	69
Figure 16: Convergence behaviour for 10% confidence interval .....	70
Figure 17 Example of measured link without paths (border with Liechtenstein) .....	71
Figure 18 Measured vs PFE fitted flows for randomly generated links (1 day).....	72
Figure 19: Comparisons of RMSE error for the 24 hourly and measured vs PFE fitted flows for randomly generated links (17-18 o'clock) .....	73
Figure 20 VISUM's User Equilibrium vs. PFE assignment .....	74
Figure 21 VISUM's UE vs PFE's assignment - Zurich area .....	75
Figure 22 Simplified version of assignment results for Zurich area.....	76
Figure 23 Assignment in Zurich area with 10% confidence interval .....	77
Abbildung 24 Geschwindigkeitsfunktionen nach Typen.....	80
Abbildung 25 Zählstellen mit Automatischen Zählungen (ASTRA, 2000) .....	82
Abbildung 26 Nachfragedynamik während des Tages (ASTRA Zählungen, 2000) .....	83
Abbildung 27 Berücksichtigte Zählstellen mit SSVZ 2000 .....	84
Abbildung 28 Berücksichtigte Zählstellen mit ASTRA und SSVZ 2000 .....	85
Abbildung 29 Umlegung mit Ausgangsmatrix 1995.....	88
Abbildung 30 Abweichungen gegenüber Querschnittszählungen.....	90
Abbildung 31 Abweichungen gegenüber Querschnittszählungen.....	91
Abbildung 32 Die Abweichungen mit PFE-Matrix [Vergleich Modell/Zählwerte].....	92
Abbildung 33. Reiseweiteverteilung.....	93
Abbildung 34. Abweichungen (in %) gegenüber Zählungen: PFE – VStrom Fuzzy.....	94
Abbildung 35. Kantonale Beziehungen (>3000 PW-Fahrten; DWV).....	95
Abbildung 36. Verkehrsnachfrage von und nach Zürich.....	96
Abbildung 37. Spezifische MIV-Nachfrage nach Kantonen .....	97
Abbildung 38. Nachfrageverteilung am Gotthard (Richtung Nord).....	98
Abbildung 39. Verteilung der Quell-Zielströme über Gotthard- und Baregg tunnel .....	99
Abbildung 40. Mittlere Reiseweitenverteilung während des Tages .....	100
Abbildung 41 PFE – Dynamisches Modell – Mittlere (kumulierte) Abweichungen über alle Zeitintervalle .....	101
Abbildung 42. Abweichungen gegenüber Querschnittszählungen zwischen 18 und 19 Uhr .....	102

## Kurzfassung

Eine der wesentlichen Voraussetzungen für die Planung oder den Betrieb von Verkehrsanlagen ist die Kenntnis der erwarteten oder der vorhandenen Verkehrsbeziehungen zwischen festgelegten Punkten oder Zonen. Diese Quell-/Ziel-Beziehungen werden in der Regel als Matrix dargestellt. Damit stellen Wunschlinien- oder Quell-/Zielmatrizen eine vielfach verwendete Form der Darstellung der räumlichen Verteilung der Nachfrage nach Wegen dar.

Die Grundlagen für die Erstellung von Wunschlinienmatrizen sind Quell-Ziel-Erhebungen und Querschnittszählungen. Da eine vollständige Erhebung der Quell-/Zielmatrix nicht möglich ist, sind die Querschnittszählungen eine notwendige Voraussetzung für ihre Eichung und Aktualisierung. Wenn eine Ausgangsmatrix mit verlässlicher Struktur zur Verfügung steht, ist es möglich mit geeigneten Kalibrationsmethoden und Querschnittszählungen die räumlichen Veränderungen der Verkehrsnachfrage zu identifizieren und auf die Zählungen zu eichen. Dabei ist es wichtig, dass durch die Kalibration auf die Querschnittszählungen die Struktur der Wunschlinienmatrix nur entsprechend der räumlichen Differenzen der Veränderungen der Querschnittsbelastungen angepasst wird und die Matrixstruktur unverändert bleibt.

Das Hauptziel dieses Forschungsauftrages war, eine geeignete Methode für die Erstellung und Kalibration von Wunschlinienmatrizen auf Grundlage von Querschnittszählungen zu empfehlen. Die Methode soll für die vorhandenen Datengrundlagen und den vorgesehenen Anwendungsbereich in der Schweiz geeignet sein.

Aufgrund ihrer Kostengünstigkeit und der immer leichteren und vollständigeren Verfügbarkeit von Querschnittszählungen sind in den letzten Jahren auf diesen basierende Methoden immer populärer geworden. Bei der Schätzung von Quell-Ziel-Beziehungen mit Hilfe von Querschnittszählungen wird versucht, aus der Vielzahl möglicher Lösungen eine Lösung zu ermitteln, bei der die sich aus den geschätzten Beziehungen ergebenden Querschnittsbelastungen mit den gemessenen Querschnittsbelastungen möglichst übereinstimmen. Damit hat die Umlegungsmethode und ein realitätsnahes bzw. korrekt abgebildetes Routenwahlverhalten eine zentrale Bedeutung.

Anhand der Literaturanalyse und anhand der gestellten Anforderungen für die Erstellung der Quell-Ziel-Matrizen wurde der Path Flow Estimator (PFE) als das am besten geeignete Ver-

fahren ausgewählt. Die wesentlichen Vorteile dieses Verfahrens gegenüber den anderen Methoden sind:

- kann sowohl für die Erstellung von statischen als auch dynamischen (Zeitabhängigen) Quell-Ziel-Matrizen angewendet werden
- realitätsnähere Umlegung durch die Anwendung des stochastischen Nutzergleichgewichts
- die Wunschlinienmatrix und die Umlegung werden nicht sequentiell sondern simultan behandelt
- die zeit- und belastungsabhängige Darstellung von Fahrtzeitverlängerungen
- kann auch bei grösseren Netzen angewendet werden.

Da das hier entwickelte Verfahren sowohl auf schwach als auch auf stark belasteten Netze angewendet werden soll, ist das ermittelte stochastische Nutzergleichgewicht der wesentliche Baustein dieses Verfahrens. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde der PFE in folgenden Punkten weiter entwickelt:

- Implementierung eines neuen Routenwahl-Ansatzes (C-Logit)
- Neue Geschwindigkeitsfunktion für die Reisezeitberechnungen
- Asymmetrische Konfidenzintervalle für Zählstellen
- Verwendung der Reiseweitenverteilung als Randbedingung
- Festlegung der Gesamtzahl Fahrten
- Beschleunigte Berechnungszeiten.

Das weiterentwickelte Verfahren wurde durch die Anwendung auf dem nationalen Strassennetz überprüft und plausibilisiert. Dafür wurde auf der Grundlage der Ausgangsmatrix 1995, den Querschnittszählungen aus ASTRA und SSVZ 2000 (Schweizerische Strassenverkehrszählung) und der gesamten Reiseweitenverteilung aus dem Mikrozensus-Verkehr 2000 eine DWV-Wunschlinienmatrix für das Jahr 2000 erstellt. Um die Güte des Verfahrens zu überprüfen wurde ein Vergleich mit den Ergebnissen eines alternativen Verfahrens (Vstrom Fuzzy) durchgeführt. Zusätzlich wurden auch Ergebnisse aus den Erhebungen des alpen- und grenzquerenden Personenverkehrs berücksichtigt. Daraus konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Der PFE erfüllt die wesentlichen Anforderungen für die Kalibrierung der Wunschlinienmatrizen im motorisierten Individualverkehr
- Die Querschnittszählungen können mit der erzeugten Matrix und mit der stochastischen Nutzergleichgewichts-Umlegung sehr genau reproduziert werden

- Die Struktur bzw. die Reiseweiteverteilung der Ausgangsmatrix wird beibehalten

Ein weiterer und wichtiger Vorteil dieser Methode ist die Berücksichtigung der Nachfragedynamik und Erstellung zeitabhängiger Matrizen. Mit diesem Verfahren wurden hier für die nationalen Strassenmodelle stundenfeine Wunschlinienmatrizen erstellt.

Die Qualität und die Struktur der Matrix ist im Wesentlichen von weiteren Eingangsdaten abhängig, vor allem von:

- Dichte der Querschnittszählungen
- Qualität der Ausgangsmatrix

Mit einer grösseren Dichte der Zählstellen reduziert sich die Wahrscheinlichkeit, dass die Struktur der Ausgangsmatrix durch die Kalibration auf die Querschnittszählungen stark verändert wird. Bei einer höheren Genauigkeit und Dichte der Zählungen wird die Verkehrsnachfrage zwischen einzelnen Quell-Ziel-Beziehungen und die Nachfrageverteilung auf einzelnen Querschnitten gegenüber der Ausgangsmatrix vor allem in Abhängigkeit der Veränderung der Querschnittszählung geändert. Die räumlichen Charakteristiken der einzelnen Zonen können bei den Kalibrationsverfahren nicht berücksichtigt werden. Damit werden solche Veränderungen nur durch die Veränderungen in den Querschnittszählungen berücksichtigt.

Bei der Anwendung des Kalibrationsverfahrens muss jedoch klar sein, dass bei einer, bezogen auf die Netzdichte, kleineren bzw. ungenügenden Anzahl von Zählstellen die Nachfrageverteilung zwischen Zonen durch die Kalibration sehr stark verändert werden kann. In solchen Fällen und in Abhängigkeit der Differenz zwischen der Modellbelastung und dem Zählwert sind die Freiheitsgrade für die Veränderung der Ausgangsmatrix relativ gross. Mit einer erhöhten Anzahl von Zählstellen reduzieren sich diese Freiheitsgrade jedoch. Damit ist zu empfehlen, bei der Kalibration neben einer verlässlichen Ausgangsmatrix auch ein möglichst dichtes Zählstellennetz zu berücksichtigen, um die Struktur der originalen Wunschlinienmatrix zu behalten.

Die Anforderungen bei der Anwendung des dynamischen Modells sind ähnlich zu denen des statischen Modells. Zusätzliche Schwierigkeiten stellen hier die Ausgangsmatrizen bzw. ihre Struktur dar. Bei der Erstellung von Stundenmatrizen muss die zeitliche-

und räumliche Nachfragedynamik abgebildet werden. Ein mögliches Vorgehen dafür ist in Vrtic und Axhausen, 2003 beschrieben.

Die hier erstellte Wunschlinienmatrix wurde in ihrer Struktur gegenüber der Ausgangsmatrix 1995 nicht wesentlich verändert. Die Reiseweitenverteilung wurde entsprechend dem Mikrozensus Verkehr 2000 festgelegt. Dabei zeigte sich, dass durch eine ungenügende und inkonsistente Auswahl des Zählstellen, sowie sehr unterschiedlichen Differenzen zwischen Netzbelastungen aus der Ausgangsmatrix und Zählwerten bei einzelnen Zählstellen, die Nachfrageverteilung bestimmter Querschnitte sehr stark verändert wurde. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass die Genauigkeit und die Dichte der Zählstellen genügend ist.

Das PFE Programm wird allen interessierten Bundesämtern zur Verfügung gestellt. Zurzeit ist es nur für die Anwendungen im motorisierten Individualverkehr geeignet.

Das Verfahren könnte vor allem an folgenden zwei Punkten verbessert und weiterentwickelt werden:

- Anwendung für die ÖV-Netze. Da für die ÖV-Modellierung andere Umlegungsmethoden angewendet werden müssen als im mIV, müsste im PFE neben der unterschiedlichen Netzstruktur auch eine neue Methode zur Erstellung der alternativen Routen implementiert werden. Diese Erweiterungen würden sehr grundlegende Veränderungen im Programm verlangen.
- Die Ausgangsstruktur der Spinnen einzelner Querschnitten (Zählstellen) sollte durch die Kalibration nicht zu stark verändert werden. Dies bedeutet, dass die relativen Anteile der einzelnen Quell-Ziel-Beziehungen bei den Querschnittsbelastungen mindestens über kurzfristige Zeiträume und ohne bekannte Gründe nicht stark verändert werden sollen. Dafür müssten im Programm weitere Nebenbedingungen implementiert werden.

Für die Erstellung von nationalen Quell-Zielmatrizen sind die vorhandenen Datengrundlagen der Schweiz beschränkt. Wie vorher schon erwähnt wurde, können mit dem hier entwickelten Verfahren verlässliche Ergebnisse erzielt werden, wenn neben einer geeigneten Ausgangsmatrix auch eine genügende Zählstellendichte vorhanden ist. Die existierenden Querschnittszählungen sind im Strassennetz für die Matrixerstellung teilweise nicht geeignet verteilt. Hier wäre es nötig, für die bestehende Netzdichte und Zonierung eine Optimierung der Zählstellenverteilung durchzuführen. Eine besser geeignete Verteilung im Bezug auf die Modellab-

bildung und Kalibration von Quell-Zielmatrizen wäre sowohl bei der automatischen als auch bei den SSVZ (manuellen) Zählstellen möglich.

Weitere wichtige Verbesserungen der Grundlage wären vor allem in Bezug auf die Struktur der Wunschlinienmatrix möglich. Für die praktische Anwendung wäre es sehr wichtig, Fahrtzweckspezifische Wunschlinienmatrizen zu erstellen. Um eine verlässliche Struktur der Ausgangsmatrix zu erstellen, können folgende Möglichkeiten überprüft werden:

- Durchführung einer grossräumigen Quell-/Ziel-Befragung oder Spinnenerhebungen mit Quell-/Ziel-Befragungen und Querschnittszählungen
- Erstellen einer Ausgangsmatrix auf Grundlage der vorhandenen räumlichen, soziodemographischen- und verkehrlichen Charakteristiken (Modellrechnung)
- Kombination aus Teilerhebungen und Modellrechnungen

Aus den heute vorhandenen Erhebungsdaten ist die Erstellung von Teilmatrizen im Strassenverkehr als Grundlage für die Hochrechnung und Kalibration auf die Querschnittszählungen nicht möglich. Dafür müssten zusätzliche Spinnenerhebungen durchgeführt werden. Aus solchen Erhebungen wäre es möglich sowohl eine Teilmatrix zu erstellen als auch die Hochgerechnete bzw. kalibrierte Matrix zu überprüfen. Durch die Rückkoppelungen und die Anpassung der Eingangsgrössen bei der Matrixerstellung sollten mit der erstellten Matrizen die erhobenen Nachfrageverteilungen auf einzelnen Querschnitten reproduziert werden. Damit ist die Verlässlichkeit der nicht erhobenen bzw. modellmässig berechneten Quell-Zielströmen deutlich erhöht.

Mit den heute in der Schweiz verfügbaren Daten ist die Erstellung einer verlässlicheren Matrixstruktur nur durch die Kombination dieser Daten mit Modellrechnungen möglich. Auf den Grundlagen der Pendlermatrix 2000, der Schienenverkehrsmatrix (von SBB durchgeführte Quell-Ziel Erhebungen), den Erhebungen des alpen- und grenzenquerenden Personenverkehrs auf Strasse und Schiene (A+GQPV), des Mikrozensus Verkehrs 2000, der KEP-Befragungen, der Stated Preference Befragungen von Vrtic, Axhausen, Maggi und Rossera (2003) und den existierenden Strassen- und Schienenmodellen sowie weiteren statistischen Daten, können durch die Schätzung eines geeigneten Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodells die fahrzweckspezifischen Quell-Zielströme neu geschätzt werden. Dabei wäre es sehr wichtig, dass anhand der vorher erwähnten Daten die ermittelten Quell-Zielströme überprüft werden und nach Bedarf die Eingangsgrössen und Modellparameter durch wiederholte Rückkoppelungen korrigiert werden, bis die ermittelten und erhobenen Werte mit genügender Genauigkeit übereinstimmen.

## Summary

One of the major prerequisites for planning or operating traffic systems is a knowledge of anticipated or existing traffic flows between defined points or zones. These origin-destination (O-D) flows are generally represented as a matrix. Origin-destination matrices are thus frequently used to represent spatially distributed travel demand.

The basis for developing origin-destination matrices are travel surveys and cross-sectional traffic counts. As O-D matrices cannot be estimated completely through surveys, traffic counts are a necessary condition for calibrating and updating them. Once a prior matrix with a reliable structure is available, it is possible to identify changes in traffic demand and to calibrate them against count data with the aid of suitable calibration methods and cross-sectional traffic counts. When so doing, it is important for the structure of the O-D matrix only to be adapted slightly so that it conforms to spatial differences in the changing figures for average traffic congestion. The matrix structure itself should remain essentially unchanged.

The main purpose of the present research was to recommend a suitable method for developing and calibrating O-D matrices on the basis of such cross-sectional traffic counts. The method had to be suitable for the existing background data and for the intended applications in Switzerland.

Because of their low cost, their simple availability and their increasingly complete coverage, methods based on cross-sectional traffic counts have become increasingly popular in recent years. Estimations of O-D flows making use of such counts attempt to pinpoint one solution out of a multitude of possible solutions in which the average traffic congestion figures deduced from the estimated flows match as closely as possible the average traffic congestion figures actually measured. In this way, the method of assignment and a correctly described route choice behaviour assume central importance.

After examining the pertinent literature and taking due consideration of the demands made with respect to developing O-D matrices, the Path Flow Estimator (PFE) model was chosen as the most suitable process. This process has the following main advantages over others:

- it can be used to estimate both static and dynamic (time-dependent) O-D matrices;
- it is based on a realistic assignment by making use of the stochastic user equilibrium;
- O-D matrix and assignment are calculated not sequentially but simultaneously;
- it allows a time- and congestion-dependent representation of delays in travel time;
- it can also be used in larger networks.

As the process developed here is to be used on both comparatively uncongested and heavily congested networks, the stochastic user equilibrium forms its major component. The PFE was subjected to further development in the following areas within the course of this investigation:

- a new route choice model were implemented (C-logit model);
- a new speed function was used for the calculation of travel times;
- asymmetric confidence intervals were applied to count locations;
- the trip distance distribution can be used as constrains;
- the total number of trips can be defined;
- calculation times were accelerated.

After this further development, the model was checked on the national road network to see whether it was plausible. For this purpose, an average workday traffic O-D matrix was compiled for the year 2000 on the basis of the prior matrix for 1995, the ASTRA and SSVZ (Swiss Road Traffic Count) 2000 cross-sectional traffic counts and the entire trip distance distribution taken from the 2000 traffic micro-census. To check the quality of the process, a comparison was made with the findings from an alternative approach (Vstrom Fuzzy). In addition, the results from surveys of private trans-alpine and trans-border motor traffic were also taken into account. The following conclusions may be drawn from these analyses:

- the PFE fulfils the major requirements with respect to calibrating O-D matrices for private traffic;
- cross-sectional traffic counts can be reproduced with extreme accuracy with the aid of the matrix so developed and with stochastic user equilibrium assignment;
- the structure of the trip distance distribution of the prior matrix are retained.

One further important advantage of this method is the fact that it takes account of demand dynamics and of developing time-dependent matrices. Hourly O-D matrices were estimated for national road models using this process.

The quality and structure of the matrix is largely dependent on other input data – above all on the following:

- the density of traffic count locations;
- the quality of the prior matrix.

The greater the density of traffic count stations, the lower the probability that the structure of the prior matrix will be changed by calibration against traffic count figures. Increased accuracy and greater density of count data bring about changes in traffic demand between individual O-D zones and in distribution of traffic flows on separate link in comparison to the prior matrix, above all in relationship to changes in cross-sectional traffic counts. No consideration can be given to the spatial characteristics of individual zones in the process of calibration. Such changes are thus only taken into account by way of these modifications in cross-sectional traffic counts.

It is apparent that the demand distribution between zones can change dramatically through calibration if a small or insufficient number of count locations are available in relation to the density of the network. In such cases, there is a relatively large degree of freedom for changing the prior matrix. The greater the number of counting stations, however, the more this freedom is restricted. When calibrating, it is thus recommended to use a traffic count network as dense as possible alongside a reliable prior matrix in order to preserve the structure of the original O-D matrix.

The requirements for using the dynamic model are the same as those that apply to using the static model. Additional difficulties are presented by the prior matrices and/or their structure. Time-dependent and spatial demand dynamics must be represented when developing hourly matrices. One possible approach is described in Vrtic and Axhausen (2003).

The structure of the O-D matrix developed is essentially unchanged in comparison with the prior matrix from 1995. The trip distance distribution was derived from the 2000 traffic micro-census. In so doing, it was revealed that demand distribution had changed

considerably for certain link flows as a result of an inadequate and inconsistent choice of count stations in conjunction with widely divergent differences between the links volume shown in the prior matrix and traffic counting data. For this reason, it is important for count locations to be sufficiently accurate and densely distributed.

The PFE program will be made available to all interested federal authorities. At present, it is only suitable road traffic.

The model could be improved and developed further, particularly in the following two areas:

- Application to public transport networks: As the assignment methods used for public transport are different from those used for road traffic, the PFE would have to incorporate a new method of defining alternative routes – besides accommodate the different network structure involved. Such extensions would require far-reaching and fundamental changes in the program.
- Addition of additional constrains on the matrix, in particular if additional information is available for specific counting section or classes of counting stations.

The databases in existence in Switzerland are a limiting factor for the developing of national O-D matrices. Some of the existing traffic counting stations are not suitably located for the purposes of developing matrices. It would be necessary to optimise the distribution of counting stations given the current network density and zoning.

The replacement of the 1995 matrix by a set of matrices by trip purpose would be desirable. Such matrices could be estimated using the following methods:

- Conducting large-scale origin-destination questionnaire surveys, both at road sites, as well as at home;
- Development of a prior matrix on the basis of existing characteristic of the municipalities, socio-demographic and the travel behaviour of the population;
- Combination of sample surveys and model calculations.

It is not possible to compile sub-matrices in road traffic as a basis for extrapolating and calibrating cross-section traffic counts from the results of the surveys existing today. Additional road junction surveys would need to be conducted in order to permit this. Results of this type would not only make it possible to develop a sub-matrix, but also to check the extrapolated or calibrated matrix. Such feedback and adaptation of input vari-

ables in the drawing-up of matrices should make it possible to reproduce demand distributions at individual link flows with the matrices so produced. In this way, the reliability of non-empirical or model-based, calculated origin-destination link flows can be increased considerably.

With the data available in Switzerland today, it is only possible to generate a more reliable matrix structure by combining these data with model calculations. On the basis of the 2000 Commuter Matrix, the Rail Traffic Matrix (O-D surveys conducted by the Federal Swiss Railways (SBB)), the Trans-Alpine and Trans-Border Private Road and Rail Traffic Surveys, the 2000 Traffic Micro-Census, Ongoing Private Traffic Surveys conducted by LINK for the Federal Swiss Railways (KEP Surveys), Stated Preference Surveys by Vrtic, Axhausen, Maggi and Rossera (2003), existing road and rail models and additional statistical data, it is possible to re-estimate origin-destination link flows specific to trip purpose by constructing an appropriately estimated destination and choice of transport type model. It would be very important in this process to review the O-D link flows determined on the basis of the aforementioned data and to correct the input variables and model parameters as required by repeated feedback until those values estimated and those determined by survey match each other with a sufficient degree of accuracy.

## Résumé

L'une des conditions essentielles de la planification ou de l'exploitation des infrastructures destinées aux transports est de connaître les liens de circulation existants ou prévus entre des points ou des zones déterminés. Ces relations origine/destination sont habituellement représentées sous la forme d'une matrice. C'est ainsi que les matrices origine/destination ou les matrices des lignes de charge représentent une forme souvent utilisée pour la gestion de la répartition spatiale des voies de circulation.

L'élaboration des matrices de ligne de charge se base sur les enquêtes origine/destination et les comptages de la charge par section. Etant donné qu'il n'est pas possible d'obtenir un relevé de matrice origine/destination complet, les comptages de charge par section sont une condition nécessaire pour sa vérification et sa mise à jour. Lorsque l'on dispose d'une matrice initiale ayant une structure sûre, il est possible avec des méthodes de calibrage appropriées et des comptages de charge par section d'identifier les changements spatiaux concernant la demande de circulation et d'étalonner les données chiffrées. Dans ce cadre, il est important que d'une part, la structure de la matrice de ligne de charge, grâce au calibrage des comptages de charge par section, soit adaptée uniquement à la différence spatiale des modifications affectant les charges par section et que d'autre part, la structure de la matrice reste inchangée.

Le but principal de cette mission d'étude était de recommander une méthode appropriée pour l'élaboration et le calibrage des matrices de ligne de charge en se basant sur les comptages de charge par section. La méthode doit être adaptée aux bases de données disponibles et au domaine d'application prévu en Suisse.

En raison de leur coût peu élevé et de la disponibilité de plus en plus opérationnelle et globale des comptages de charge par section, les méthodes basées sur ces principes sont devenues de plus en plus populaires au cours des dernières années. Lors de l'évaluation des relations origine/destination à l'aide des comptages de charge par section, on essaie, à partir des multiples solutions possibles, de déterminer une solution qui permette de faire concorder le plus possible les charges par section basées sur les relations estimées avec les charges par section effectivement mesurées. C'est pourquoi la méthode de répartition et une procédure de sélection des

itinéraires la plus proche possible de la réalité, ou correctement reproduite, a une signification essentielle.

A l'aide de l'analyse de la documentation et en s'aidant des demandes faites pour l'élaboration des matrices origine/destination, le « Path Flow Estimator » (PFE) a été choisi comme le procédé étant le mieux approprié. Les avantages essentiels de ce procédé par rapport aux autres méthodes sont les suivants:

- Il peut être utilisé pour l'élaboration aussi bien des matrices origine/destination statiques que dynamiques (de temps)
- Une répartition plus proche de la réalité par l'emploi de l'équilibrage aléatoire des utilisateurs
- La matrice de lignes de charge et la répartition ne sont pas traitées par séquences mais simultanément
- La représentation des prolongations de la durée du trajet en fonction de la charge et du temps
- Peut être également appliqué à de plus grands réseaux

Etant donné que le procédé développé ici doit être utilisé sur des réseaux aussi bien à forte qu'à faible charge, l'équilibrage aléatoire des utilisateurs forme le module essentiel de ce procédé. Dans le cadre de cette étude, le PFE a été perfectionné dans les points suivants:

- Implémentation d'une nouvelle ébauche de sélection d'itinéraire (C-Logit)
- Nouvelle fonction de vitesse pour les calculs des temps de parcours
- Intervalles de confiance asymétriques pour les points de comptage
- Utilisation de la répartition des longueurs des parcours comme condition aux limites
- Détermination du nombre total des voyages
- Temps de calcul accélérés

Un contrôle de la plausibilité du procédé perfectionné a été effectué sur le réseau routier national. Pour ce faire, on a élaboré pour l'année 2000 une matrice des lignes de charge DWV en se basant sur la matrice initiale 1995, sur les comptages de charge par section d'ASTRA et SSVZ 2000 (comptage de circulation routière Suisse) et sur la totalité de la répartition des distances de parcours provenant du micro-recensement de la circulation en 2000. Afin de vérifier la qualité du procédé, il a été établi une comparaison avec les résultats d'un procédé alternatif (Vstrom Fuzzy). De plus, on a également pris en compte les résultats des enquêtes menées sur le trafic des voyageurs franchissant la frontière et les Alpes. Les conclusions suivantes ont pu être tirées de ces éléments:

- Le PFE remplit les principales conditions pour le calibrage des matrices de lignes de charge en ce qui concerne la circulation individuelle motorisée
- Les comptages de charge par section peuvent être très exactement reproduits avec la matrice créée et avec la répartition de l'équilibrage aléatoire des utilisateurs
- La structure et/ou la répartition des distances de parcours de la matrice initiale est conservée

Un autre avantage important de cette méthode est la prise en compte de la dynamique des demandes et l'élaboration des matrices dépendantes du temps. Avec ce procédé, les matrices de lignes de charge ont été produites à l'heure près pour les modèles de routes nationales.

La qualité et la structure de la matrice dépendent essentiellement d'autres données d'entrée; il s'agit avant tout de:

- La densité des comptages de charge par section
- La qualité de la matrice initiale

Avec une plus grande densité des points de comptage, la probabilité d'avoir la structure de la matrice initiale fortement modifiée par le calibrage sur les comptages de charge par section est réduite. Avec une exactitude et une densité accrue des données de comptage la demande en termes de circulation entre les différentes relations origine/destination et la répartition des demandes concernant les différentes sections par rapport à la matrice initiale, avant tout en fonction de la modification du comptage de charge par section, sont modifiées. Les caractéristiques spatiales des différentes zones ne peuvent pas être prises en compte lors du procédé de calibrage. Ainsi, ces modifications sont prises uniquement en considération via les modifications dans les comptages de charge par section.

Lors de la mise en oeuvre du procédé de calibrage, il doit être clair que la répartition de la demande entre les zones peut être très fortement modifiée par le calibrage, si le nombre de points de comptage, par rapport à la densité du réseau, s'avère réduit et/ou insuffisant. Dans de tels cas, et en fonction de la différence entre la charge du modèle et la valeur de comptage, les degrés de liberté sont relativement grands pour la modification de la matrice initiale. Avec un nombre de points de comptage accru, ces degrés de liberté se réduisent. C'est la raison pour laquelle il est recommandé de prendre en considération, lors du calibrage, non seulement une matrice initiale sûre mais aussi un réseau de points de comptage le plus dense possible afin de conserver la structure originale de la matrice de ligne de charge.

Les exigences avec l'emploi du modèle dynamique sont semblables à celles du modèle statique. Ici, les matrices initiales et/ou leur structure, représentent des difficultés supplémentaires. Lors de l'élaboration des matrices d'heures, la dynamique temporelle et spatiale de la demande doit être représentée. L'un des procédés possible est décrit dans Vrtic et Axhausen, 2003.

La matrice de lignes de charge produite n'a pas subi, dans sa structure, de modifications importantes par rapport à la matrice initiale 1995. La répartition des distances de parcours a été fixée conformément au micro-recensement de la circulation en 2000. A cette occasion, il est apparu qu'en raison d'une part, d'une sélection insuffisante et inconsistante des points de comptage, et d'autre part de différences très marquées entre les charges de réseau provenant de la matrice initiale et les valeurs de comptage des différents points de comptage, la répartition des demandes de sections déterminées a été très fortement modifiée. C'est la raison pour laquelle il est important que l'exactitude et la densité des points de comptage soient suffisantes.

Le programme PFE est mis à la disposition de tous les services fédéraux intéressés. Actuellement, il est adapté uniquement à des applications pour la circulation individuelle motorisée.

Le procédé pourrait être avant tout amélioré et perfectionné dans les deux domaines suivants :

- Emploi pour les réseaux de transports publics. Etant donné que pour la modélisation des transports publics d'autres méthodes de répartition que celles du mIV doivent être mises en oeuvre, il faudrait implémenter dans le PFE, à côté de la structure différente du réseau, une nouvelle méthode pour l'élaboration des itinéraires de rechange. Ces extensions nécessiteraient des changements très importants au sein du programme.
- La structure initiale des raccordements des différentes sections (points de comptage) ne devrait pas subir de modifications importantes en raison du calibrage. Cela signifie que, dans le cas de charges de section, les parts relatives des différentes relations origine/destination ne doivent pas subir de forts changements, au moins sur des créneaux de temps à court terme et sans raison précise. Pour ce faire, d'autres conditions auxiliaires devraient être implémentées dans le programme.

Pour l'élaboration des matrices origine/destination nationales, les bases de données disponibles de la Suisse sont limitées. Comme cela a été déjà mentionné, des résultats sûrs peuvent être obtenus avec le procédé développé ici si, outre une matrice initiale appropriée, on dispose également d'une densité suffisante de points de comptage. Les comptages de charge par section existants ne sont pas toujours répartis dans le réseau routier d'une manière appropriée à la construction de la matrice. Il serait donc nécessaire d'optimiser la répartition des points de comptage pour la densité de réseau et le zonage existants. Une répartition mieux appropriée des matrices origine/destination, par rapport à la représentation du modèle et du calibrage, serait possible à la fois pour les points de comptage automatiques et pour les points de comptage SSVZ (manuels).

D'autres améliorations importantes de la base seraient possibles, notamment par rapport à la structure de la matrice des lignes de charge. Pour la mise en application pratique, il serait très important de créer des matrices de ligne de charge spécifiques aux catégories de transport. Pour élaborer une structure sûre de la matrice initiale, les éventualités suivantes peuvent être vérifiées:

- Réalisation d'un sondage origine/destination de grande envergure ou d'enquêtes de raccordements avec des sondages origine/destination et des comptages de charge par section
- Elaboration d'une matrice initiale basée sur les caractéristiques d'espace, de circulation et de sociodémographie disponibles (modèle de calcul)
- Combinaison des recensements partiels et des modèles de calcul

A partir des données issues des enquêtes disponibles actuellement, l'élaboration de matrices partielles dans la circulation routière n'est pas possible comme base pour le calcul prévisionnel et le calibrage pour les comptages de charge par section. Pour ce faire, il faudrait exécuter des recherches complémentaires sur les raccordements. A partir de telles enquêtes, il serait possible d'élaborer aussi bien une matrice partielle que de contrôler également la matrice prévisionnelle et/ou calibrée. Grâce aux effets de retour et à l'adaptation des valeurs d'entrée lors de l'élaboration de la matrice, les matrices créées devraient permettre de reproduire les répartitions des demandes relevées sur les différentes sections. Ainsi, la justesse des courants origine/destination non relevés, respectivement calculés selon le modèle, est nettement accrue.

Avec les données disponibles aujourd'hui en Suisse, l'élaboration d'une structure de matrice plus sûre est uniquement possible par la combinaison de ces données avec des modèles de calcul. En se basant sur la matrice des migrants journaliers 2000, sur la matrice du trafic ferroviaire (enquêtes origine/destination menées par la SBB), sur les enquêtes menées sur le trafic des voyageurs franchissant la frontière et les Alpes, par route et par rail (A+GQPV), sur le micro-recensement de la circulation en 2000, sur les sondages KEP, les sondages « Stated Preference » de Vrtic, Axhausen, Maggi et Rossera (2003) et sur les modèles de routes et de rails existants ainsi que sur d'autres données statistiques, les courants origine/destination spécifiques aux catégories de transports peuvent être à nouveau évalués par l'estimation d'un modèle de destination et de sélection de moyen de transport approprié. De plus, il serait très important qu'au moyen des données précédemment mentionnées, les courants origine/destination déterminés soient contrôlés et qu'en cas de besoin, les valeurs d'entrée et les paramètres de modèle soient corrigés au moyen de rétroactions répétées jusqu'à ce que les valeurs déterminées et les valeurs recherchées concordent avec une exactitude suffisante.

## 1 Aufgabenstellung und Problemanalyse

Die Abschätzung der Nachfrageauswirkungen einer Massnahme kann nur durchgeführt werden, wenn es vorher gelungen ist, den Verkehr in seinen Zusammenhängen im Ist Zustand realistisch zu erfassen und abzubilden. Die Analyse eines Ist-Zustands kann entweder durch direkte Beobachtungen und Messungen oder in Kombination mit mathematischen Modellen durchgeführt werden. Bei der Abbildung des Verkehrszustands ist es selten möglich, diesen vollständig durch Messungen und Beobachtungen zu erfassen.

Für die Verkehrsplanung ist die Kenntnis der vorhandenen Verkehrsbeziehungen zwischen festgelegten Zonen oder Punkten eine wesentliche Voraussetzung. Diese Quell-Ziel-Beziehungen werden in der Regel in Form einer Matrix dargestellt. Ihre Dimensionen sind die Verkehrsmittel, die räumliche Auflösung (Anzahl Zonen innerhalb und ausserhalb des Untersuchungsgebiets), die Anzahl der Wegezwecke und die zeitliche Auflösung (Stundengruppen, Tage der Woche, Jahreszeit). Weitere Dimensionen sind denkbar, wie zum Beispiel die verschiedenen Dimensionen der Soziodemographie der Reisenden. Damit gibt die Quell-Ziel-Matrix (QZ-Matrix) die Verkehrsmengen zwischen den Quell- und Zielzonen in einem bestimmten Zeitintervall zu einem Fahrtzweck mit einem Verkehrsmittel an. Die Grundsätzliche Form einer Quell-Ziel-Matrix ist in der Abbildung 1 dargestellt.

QZ-Matrizen werden mit Hilfe von vier Ansätzen oder Mischungen von ihnen berechnet:

- Hochrechnung auf Grundlage von Befragungen
- Schätzung auf Grundlage von Beobachtungen, insbesondere Kennzeichenverfolgungen
- Schätzung auf Grundlage von Querschnittszählungen
- Schätzung mit Verkehrsmodellen

Infolge der kleinen Stichproben resultierend aus den sehr hohen Kosten und den damit verbundenen Problemen bei der Hochrechnung liefern Befragungen oft fragwürdige Ergebnisse. Die Schätzungen auf Grundlage von Kennzeichenverfolgungen haben den Nachteil, dass die Kennzeichen räumlich sehr breit verteilt sind. Damit ist die Zuordnung zu der Quell- bzw. Zielzone oft nicht möglich oder es wird eine sehr grobe Zonierung verwendet. Dazu kommen auch Erhebungsprobleme bei grösseren Verkehrsaufkommen. Bei der Schätzung mit Verkehrsnachfragemodellen wird die Matrix nicht nur aufgrund einer Verkehrsbefragung ermittelt, sondern es wird von den zusätzlichen

Strukturdaten der betrachteten Zonen ausgegangen. Aus diesen Strukturdaten wird mit Hilfe der Verkehrsnachfragemodelle die Verkehrserzeugung (Verkehrsaufkommen je Zone) und Verkehrsverteilung (Verkehrsströme zwischen den einzelnen Zonen) berechnet. Die so generierte Matrix muss dann mit Querschnittszählungen kalibriert werden.

Aufgrund ihrer Kostengünstigkeit und der immer leichteren und vollständigeren Verfügbarkeit von Querschnittszählungen sind in den letzten Jahren auf diesen basierende Methoden immer populärer geworden. Bei der Schätzung von Quell-Ziel-Beziehungen mit Hilfe von Querschnittszählungen wird versucht, aus der Vielzahl von möglichen Lösungen eine realitätsnahe Lösung zu ermitteln, bei der die sich aus den geschätzten Beziehungen ergebenden Querschnittsbelastungen mit den gemessenen Querschnittsbelastungen möglichst übereinstimmen. Die heute benutzten Methoden verwenden aber als zweite grosse Eingabe neben den Querschnittszählungen eine vorhandene QZ-Matrix oder eine Teilmatrix (Befragungsmatrix), die dann im Folgenden hochgerechnet und korrigiert wird. Das heisst, dass die in dieser Matrix möglicherweise vorhandenen strukturellen Probleme (zum Beispiel falsche Fahrtweitenverteilungen, fehlende regionale Unterschiede, etc.) fortgeschrieben werden. Das bedeutet auch, dass die Urmatrix nach einiger Zeit zu veraltet ist, um noch eine sinnvolle Anfangslösung zu sein, da wirtschaftliche und siedlungsstrukturelle Veränderungen nicht abgebildet werden.

Die Alternative zu einer vorhandenen älteren Matrix ist eine aktuelle partielle Matrix, die aus Befragungsergebnissen (Haushaltsbefragungen oder Strassenzensen) abgeleitet wird. Es ist aus finanziellen Gründen - praktisch - unmöglich, Haushaltsbefragungen durchzuführen, die es erlauben würden, grossräumige QZ-Matrizen in der gewünschten räumlichen Auflösung (z.B. für alle Gemeinden) zu schätzen. Die mögliche räumliche Auflösung führt dazu, dass die geschätzten Matrizen mit teilweise zweifelhaften Verfahren nachträglich räumlich disaggregiert werden müssen.

Strassenzensen, d.h. Befragungen am Strassenrand zu Quelle, Ziel und Zweck einer Fahrt (Spinnenbefragungen), liefern bei korrekter Durchführung gute Ergebnisse für die betrachteten Querschnitte, können aber tangentielle Bewegungen abseits der Befragungsquerschnitte nicht abbilden, d.h. sie sind vor allem für Korridor- oder kleinräumige Studien geeignet. Entsprechende Daten sind deshalb vor allem für die Validierung von Verkehrsmodellen wertvoll, bieten sich aber nicht zur Etablierung einer nationalen Matrix an.

## 2 Mathematische Problemstellung

Bei der in Abbildung 1 dargestellten Matrix ist der Vektor des Verkehrsaufkommens der Quellzellen i die rechte Randspalte

$$e'_i = \sum_j t'_{ij}$$

und entsprechend für das Verkehrsaufkommen der Zielzellen j

$$a'_j = \sum_i t'_{ij}$$

W'\_z ist die Summe aller Wege.

Abbildung 1 Quell-Ziel-Matrix

$t'_{ijz}$	Ziel j				
Quelle i	1	2	...	n	$e'_{iz}$
1	$t'_{11z}$	$t'_{12z}$	...	$t'_{1nz}$	$e'_{1z} = \sum_j t'_{1jz}$
2	$t'_{21z}$	$t'_{22z}$	...	$t'_{2nz}$	$e'_{2z} = \sum_j t'_{2jz}$
...	...	...	...	...	...
n	$t'_{n1z}$	$t'_{n2z}$	...	$t'_{nnz}$	$e'_{nz} = \sum_j t'_{njz}$
$a'_{jz}$	$a'_{1z}$ $= \sum_i t'_{i1z}$	$a'_{2z}$ $= \sum_i t'_{i2z}$	...	$a'_{nz}$ $= \sum_i t'_{inz}$	$W'_z =$ $\sum_i a'_{iz} = \sum_i e'_{iz}$

Die Summe aller Quellverkehrsaufkommen muss gleich zu der Summe der Zielverkehrsaufkommen sein:

$$\sum_i e'_i = \sum_j a'_j$$

Da hier die Summe aller Zeilen gleich zu der Summe aller Spalten ist, bedeutet das, dass eine Gleichung linear von den übrigen abhängig ist. Damit existieren für eine  $(n \times n)$ -Matrix  $2n-1$  Gleichungen. Die Zahl der unbekannt  $t_{ij}$ -Elemente beträgt  $n^2$  Unbekannte. Die Differenz zwischen den vorhandenen Gleichungen und Unbekannten steigt mit der Anzahl der gebildeten Zonen an. Daraus folgt, dass für eine mathematisch eindeutige Lösung weitere Gleichungen oder Zusatzbedingungen erforderlich sind.

Die erhobenen Streckenbelastungen eines Netzes werden durch die Quell-Ziel-Ströme und die Routenwahl verursacht. Damit lässt sich für jede Strecke  $l$  mit gemessener Verkehrsbelastung  $v_l$  folgende fundamentale Gleichung erstellen:

$$v_l = \sum_i \sum_j p_{ij}^l t_{ij} \quad (1)$$

wobei

$$0 \leq p_{ij}^l \leq 1$$

$$1 \leq l \leq n$$

$n$  – Anzahl Strecken mit gemessenen Belastungen

$p_{ij}^l$  ist der Anteil des Quell-Ziel-Stromes  $t_{ij}$ , der bei der Fahrt von  $i$  nach  $j$  den Querschnitt  $l$  passiert. Dieser Anteil ist durch die Routenwahl definiert und wird durch das Umlegungsmodell ermittelt.

Zur besseren Darstellung des Lösungsalgorithmus und zur Vereinfachung der Schreibweise werden die Quell-Ziel-Ströme  $t_{ij}$  als Vektor  $t$  dargestellt bzw. sie werden nicht mehr zeilen- und spaltenweise dargestellt, sondern hintereinander aufgelistet und dementsprechend fortlaufend durchnummeriert. Unter der Annahme, dass der Binnenverkehr nicht erfasst wird, ist die Anzahl möglicher Beziehungen  $m = I(J - 1)$ . In der Regel ist die Zahl der Quell- und Zielzo-

nen gleich und damit ist  $m = I^2 - I$ . Dabei werden auch die Anteile  $p_{ij}^l$  entsprechend umbenannt, wobei der 1. Index die Gleichung bzw. die Zählstellen und der 2. Index die zugehörige Quell-Ziel Beziehung angibt. Damit wird die ursprüngliche Beziehung

$$\begin{bmatrix} p_{12}^1 \dots p_{1J}^1 \dots p_{I1}^1 \dots p_{I,J-1}^1 \\ \vdots \\ p_{12}^n \dots p_{1J}^n \dots p_{I1}^n \dots p_{I,J-1}^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{12} \\ \vdots \\ t_{1J} \\ \vdots \\ t_{I1} \\ \vdots \\ t_{I,J-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

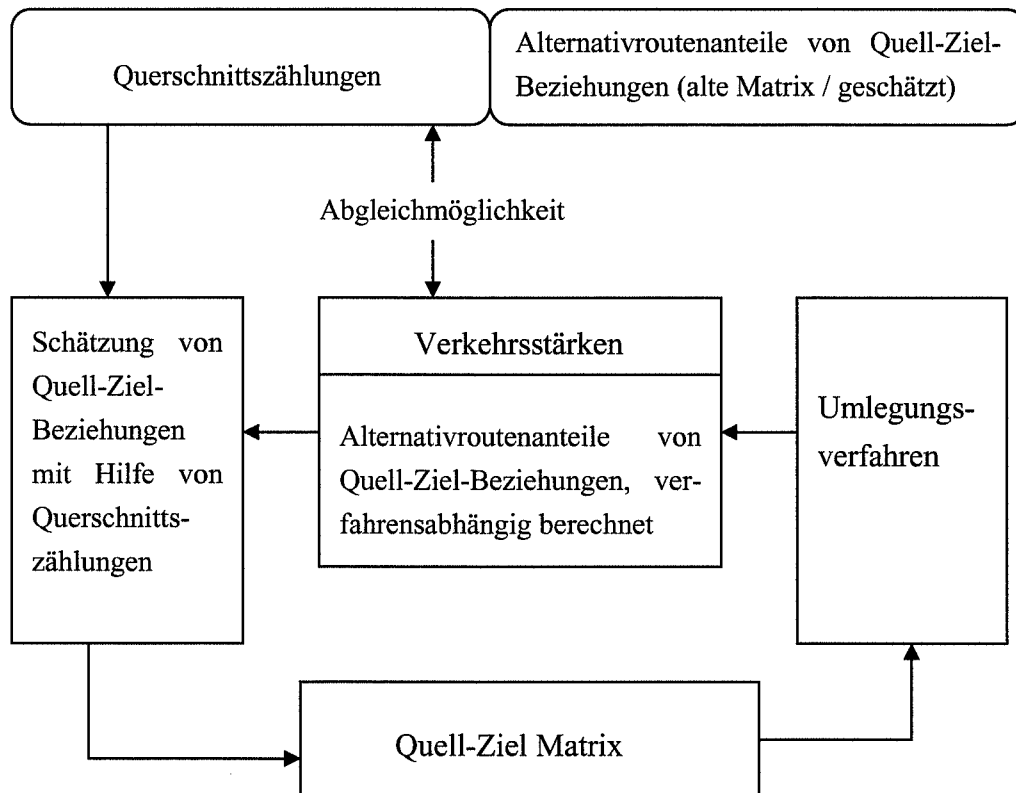
durch folgende Beziehung ersetzt

$$\begin{bmatrix} p_{11} \dots p_{1,J-1} \dots p_{1,m-J+2} \dots p_{1,m} \\ \vdots \\ p_{n1} \dots p_{n,J-1} \dots p_{n,m-J+2} \dots p_{n,m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_{J-1} \\ \vdots \\ t_{m-J+2} \\ \vdots \\ t_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

Die fundamentale Gleichung (1) wird für jeden Zählwert  $v_i$  erstellt. Daraus ergibt sich ein System linearer Gleichungen, welches in Vektor- und Matrixform wie in Gleichungen (2) und (3) dargestellt werden kann:  $p \cdot t = v$

Die Schätzung von QZ-Matrizen auf der Grundlage von Querschnittszählungen ist die Umkehrung der Umlegung, bei der die QZ-Matrix mit einem Netz verknüpft wird, um Streckenbelastungen zu ermitteln. Eine Umlegung ist deshalb implizit immer Teil der Schätzung der Quell-Ziel-Matrix. Dieser Zusammenhang ist in folgender Abbildung kurz dargestellt.

Abbildung 2 Zusammenhang zwischen Umlegung und Routenwahl



Quelle: FGSV, 1995

Wie oben schon erwähnt wurde, benötigen diese Verfahren die Informationen über die gewählte Routen einer Quell-Ziel-Beziehung. Aus diesen werden dann die Anteilswerte bzw. der Anteil des Verkehrstromes von Quelle  $i$  nach Ziel  $j$ , die über einem Querschnitt fahren, ermittelt. Eine korrekte Ermittlung dieses Anteils setzt eine Umlegung der gegebenen Verkehrsbeziehungen im Netz voraus. Wie aus Abbildung 2 zu sehen ist, werden diese Beziehungen durch die Matrixschätzung erst gesucht. Um das zu lösen und eine Anteilsmatrix zu berechnen, werden in der Regel ältere Informationen gebraucht. Als Hilfe werden hier die Umlegungsergebnisse einer alten vorhandenen Matrix bzw. einer Teilmatrix oder Erfahrungsschätzungen verwendet oder es wird die iterative Lösung durch ein heuristisches Verfahren (Ziegler, 1989) ausgehend von gemessenen Querschnittsbelastungen angewendet. Dabei sollte

hier, abhängig von den Netzcharakteristiken und der Netzbelastung, eine entsprechende Umlegungsmethode gewählt werden.

Es gibt zwei Grundansätze für die Schätzung. Der *statische* Ansatz geht davon aus, dass im Netz ein Gleichgewicht herrscht, das aber tageszeit- oder wochentagsabhängig sein kann (aggregierte Daten eines Zeitraums). Dieser Ansatz ist vor allem für grössere Netze und längere Zeithorizonte geeignet. Der *dynamische* Ansatz verwendet die Schwankungen in den Streckenbelastungen (zeitlich diskrete Daten in Form von Zeitreihen), um QZ-Beziehungen zu schätzen, die zu einem rekursiven Modell führen, das vor allem für kleinere Netze und kürzere Zeithorizonte geeignet ist.

Gemischte Ansätze, die versuchen die Stärken zu kombinieren, sind in der Literatur ebenfalls vorhanden. Der *path-flow-estimator* (PFE) Ansatz gehört zu den statischen Ansätzen. Die Anwendungsbereiche der verschiedenen Ansätze werden in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 Anwendungsbereiche der Ansätze

Art des Netzes	Zeithorizont		
	Langfristig	Mittelfristig	Kurzfristig
Klein ohne Alternativen in der Routenwahl	Statisch	Dynamisch	Dynamisch
Gross ohne Überlastungen	Statisch	Gemischt	Gemischt
Gross mit Überlastungen	PFE	PFE	PFE

Wenn das Netz keine Alternativen in der Routenwahl bietet oder wenn es nicht überlastet ist, kann die Umlegung und die Schätzung der QZ-Matrix getrennt behandelt werden. Man kann dann die Beziehungen zwischen Matrix und Umlegung als lineares Gleichungssystem behandeln. Wenn es zu Überlastungen kommt, können die Probleme nicht mehr getrennt werden. Es sind deshalb verschiedene zweistufige Ansätze entwickelt worden, in denen die beiden Probleme sequentiell behandelt werden (siehe zum Beispiel Florian und Chen, 1991; Yang *et al.*, 1992, 1994). Diese Ansätze liefern lokale Lösungen, die nicht unbedingt global optimal sind. Eine global optimale Lösung lässt sich mittels eines genetischen Algorithmus finden (siehe Kim, Baek und Lim, 2000). Für Kreuzungen oder kleine Netze ohne Wegewahlmöglichkeiten können zeitreihenanalytische Ansätze zur rekursiven Schätzung der Matrix verwendet werden

(Siehe Cremer und Keller, 1987; Nihan und Davis, 1987; Bell, 1991b, oder zusammenfassend FGSV, 1995). Für grössere Netze werden diese Ansätze zu ungenau, da die Pulkauflösung die Variabilität der Fahrtzeiten stark erhöht. Für nicht-überlastete Netzwerke sind gemischte Ansätze, wie der von Keller und Ploss (1987) vielversprechend, bei dem lokale dynamische Schätzungen als Randbedingungen in grossräumige statische Schätzungen eingehen. Bell *et al.* (1991) und Bell (1991b) präsentieren Erweiterungen dieser dynamischen Ansätze, die sie auch für mittelgrosse Netze anwendbar machen. Für ausgedehnte Netze, in denen Fahrten mehrere Zeitintervalle lang dauern können, muss eine dynamische Umlegung die statische Umlegung ersetzen. Tavana und Mahmassani, 2000 verwenden eine Mikrosimulation (in diesem Falle DYNASMART), um zeitabhängige QZ-Matrizen zu schätzen. Statt Mikrosimulation benutzen Van der Zijpp und Lindveld, 2000 ein "space-time extended network" (STEN), um zeitabhängige QZ-Matrizen zu schätzen.

### 3 Datenlage

Die Schweiz verfügt über eine Vielfalt von Datenquellen, die für die Bearbeitung dieses Projektes herangezogen werden können. Sie werden hier kurz nach Zählungen und Befragungen getrennt beschrieben.

Das ASTRA und die Kantone betreiben über 400 Zählstellen, deren Ergebnisse vom ASTRA und den jeweiligen Kantonen stundenscharf elektronisch zur Verfügung gestellt werden können (Sigmaplan, 2000 oder auch SNZ, 2000). Neben den automatischen Zählstellen können hier auch manuelle Zählungen wie z.B. die schweizerische Strassenverkehrszählung (SSVZ) berücksichtigt werden. Die Analyse dieser Zählungen hat aber gezeigt, dass wegen der im Verkehrsmodell vorhandene Zonierung nicht alle SSVZ und kantonalen Zählstellen berücksichtigt werden können. Es wurde festgestellt, dass einige Zählstellen einen bedeutenden Anteil an intrazonalem Verkehr (Fahrten mit Quelle und Ziel innerhalb einer Zone) beinhalten und deshalb nicht verwendet werden können. Diese Probleme sind vor allem bei den kantonalen Zählstellen stark ausgeprägt. Aus diesem Grund werden hier weniger die kantonalen Zählstellen sondern vor allem die Zählstellen der Schweizerischen Strassenverkehrszählung 2000 und automatischen Strassenverkehrszählungen berücksichtigt.

Damit werden bei der Anwendung des hier entwickelten Verfahrens vor allem die Daten aus den automatischen Zählungen für das Jahr 2000 (ASTRA) mit 77 Zählstellen (*LVC*-Zählstellen mit Längensklassen Unterscheidung) und der Schweizerischen Strassenverkehrszählung 2000 mit 435 Zählstellen verwendet (siehe Abbildung 3). Bei den automatischen Zählungen sind die Verkehrsstärken für Personenwagen nach Stunden und Richtungen vorhanden. Bei der SSVZ sind solche Segmentierungen nach Richtungen nicht möglich.

Für die Erstellung und Kalibration der Wunschlinienmatrizen anhand von Querschnittszählungen ist es wichtig, dass eine Ausgangs- oder Teilmatrix mit verlässlicher Matrixstruktur vorhanden ist. Die für die Schweiz heute vorhandene Quell-/Zielmatrix im Strassenverkehr wurde für das Jahr 1995 von der Arbeitsgemeinschaft Füsseis/Sigmaplan (1995) berechnet. Die aus soziodemographischen Daten und Mobilitätskennziffern berechnete Verkehrserzeugung und Verkehrsanziehung (nach Fahrtzwecken) wurde mittels eines einfachen Gravitationsansatzes zwischen den Zonen verteilt und auf die Querschnittszählungen kalibriert. Hier wurde eine Annahme zur Grösse der Gravitationskonstante getroffen, ohne diese aus den Erhebungsdaten zu kalibrieren. Die Nachfrageverteilung wurde nur mit den Daten des Mikrozensus-Verkehrs aus dem Jahr 1994 auf die Reiseverteilung hin geprüft und korrigiert.

Dabei wurde die Distanzverteilung der Matrix nur für Fahrten mit einer Reiseweite von mehr als 7km überprüft, ohne die inter- und intrazonalen Fahrten in den Mikrozensus-Daten eindeutig voneinander zu trennen.

Im Rahmen von mehreren Projekten, einschliesslich der Untersuchung von Vrtic, Axhausen, Rossera und Maggi 2003, hat sich gezeigt, dass die Struktur dieser Matrix geprüft, aktualisiert und verbessert werden sollte. Das bezieht sich vor allem auf die Nachfrage für bestimmte Verkehrsbeziehungen, Nachfrageverteilungen auf einzelnen Querschnitten, sowie auf die gesamte Reiseweiten-Verteilung. Es hat sich gezeigt, dass mit der angewendeten Methode bei der Matrixerzeugung und den dort verwendeten Parametern die Verkehrsbeziehungen mit kürzeren Entfernungen überbewertet und jene mit längeren Entfernungen stark unterbewertet sind. Dies ist sehr wahrscheinlich durch die zu grosse Gravitationskonstante verursacht worden. Damit ist die Nachfrageverteilung zwischen den Regionen bzw. einzelnen Quell-/Ziel-Beziehungen verzerrt.

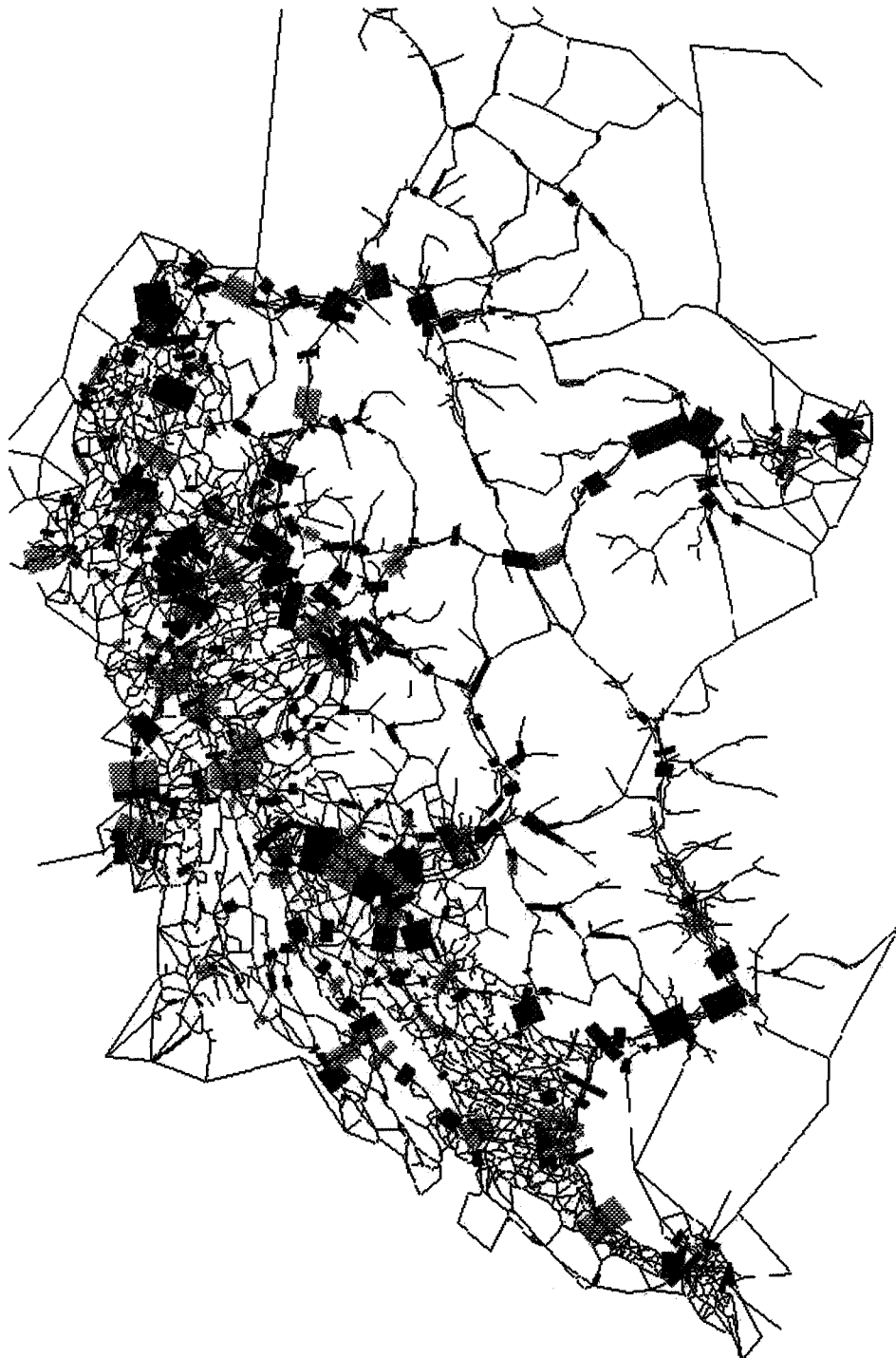
Da keine andere Matrix vorhanden ist, wird die bestehende Matrix 1995 hier als Ausgangsmatrix verwendet. Damit ist die Struktur der neu erstellten Matrix von der Struktur und Qualität dieser Matrix abhängig.

Weiterhin verwendete Grundlage ist das Nationale Strassenmodell des Bundesamtes für Raumentwicklung. Dieses Modell definiert 3066 Zonen, davon sind 2975 Binnenzonen und 91 Auslandszonen (als Grenzzonen). Die Binnenzonen sind entsprechend der Gemeindezuordnung (1995) abgebildet. Das Strassennetz beinhaltet ca. 8'000 Knoten und 21'000 Strecken. Es verbindet alle schweizerischen Gemeinden und beinhaltet das gesamte übergeordnete Strassennetz. Die Leistungsfähigkeit und Geschwindigkeit bei freiem Verkehrsfluss sowie die Geschwindigkeitsfunktionen werden nach 12 Streckentypen differenziert (siehe auch Vrtic, Fröhlich und Axhausen, 2003).

Die Ergebnisse des Mikrozensus Verkehrs 2000 sind für die Schätzung der notwendigen Modelle und die Überprüfung der Verhaltensannahmen wesentlich. Diese werden mit den KEP 2000 Befragungen ergänzt. Mit diesen beiden Datengrundlagen wurde die Reiseweiteverteilung der erzeugten Quell-/Zielmatrix geprüft.

Für die Überprüfung der Plausibilität der erstellten Matrix wurden auch die Erhebungen des alpen- und grenzquerender Personenverkehrs verwendet.

Abbildung 3 Zählstellen aus den Automatischen Zählungen (ASTRA) und SSVZ 2000



(grün – ASTRA, rot – SSVZ; DWV)

## 4 Methodenübersicht und Eignungsprüfung

### 4.1 Kurzfassung

In diesem Arbeitsschritt wird eine Übersicht und Analyse der Methoden für die Schätzung der Quell-Ziel Matrizen aus den Querschnittszählungen erstellt. Bei der Schätzung der Quell-Ziel-Matrix sind folgende gesuchte oder Einzugebenden Informationen zu unterscheiden (siehe Tabelle 2):

- Verkehrszählungen
- Umlegungsmatrix (Routenanteile der Quell-Ziel-Beziehungen über die Strecken)
- Erhobene oder veraltete Quell-Ziel-Matrix
- Gesuchte Quell-Ziel-Matrix

Wenn das vorhandene Verkehrsangebot keine Routenwahl erlaubt (bzw. es gibt nur eine einzige Route), ist die Umlegung der wesentliche Aspekt bei der Schätzung der Quell-Ziel-Matrix. In diesem Fall wird die Quell-Ziel-Matrix eigentlich durch die Umlegungsmatrix dargestellt, deren Elemente die Verkehrsanteile der Quell-Ziel-Beziehungen für jede benutzte Strecke zeigen. Solche Fälle, bei denen die Umlegungsmatrix unabhängig von der Quell-Ziel-Matrix ist, treten nur bei schwach belasteten Netzen (d.h. belastungsunabhängige Routenwahl) auf. Erste Ansätze für Quell-Ziel-Schätzungen basierten auf der Annahme, dass die Umlegungsmatrix exogen berechnet werden konnte.

Es wird angenommen, dass die Verkehrsteilnehmer die Route mit den niedrigsten generalisierten Kosten wählen. Ein wichtiges Element der generalisierten Kosten ist die Reisezeit, die in hochbelasteten Netzen von der Netzbelastung abhängig ist. In diesem Fall ist die Umlegungsmatrix bei der Schätzung der Quell-Ziel -Matrix endogen zu berechnen.

In dem Fall, das eine vorhandene (plausible) Matrix aktualisiert werden soll, wird durch die daraus berechnete Umlegungsmatrix die Schätzung der Quell-Ziel-Matrix wesentlich vereinfacht.

Im Gegensatz zu früheren Ansätzen, bei denen die Verkehrszählungen als fehlerfrei betrachtet wurden, erlauben neuere Ansätze die Behandlung von fehlerbehafteten Verkehrszählungen als auch Umlegungsmatrizen.

Im Folgenden wird eine Übersicht über die Entwicklung der Methoden und die verwendeten Modellansätze gegeben. Im Weiteren wird gezeigt wie welche Methoden in Abhängigkeit von der Netzgrösse, Netzbelastung und des betrachteten Zeitraumes (Zeitraum bei Querschnittszählungen) für die Schätzung von Quell-Ziel-Matrizen teilweise geeignet sind.

Bei der Q-Z-Schätzung bei unbelasteten Netzen wird angenommen, dass die Umlegungsmatrix vorgegeben ist oder belastungsunabhängig berechnet werden kann. Dafür werden Methoden wie *entropy maximisation* oder *information minimisation* (Van Zuylen and Willumsen, 1980; Willumsen, 1984), *constrained maximum likelihood* (Spiess, 1987), *constrained generalised least squares* (Bell, 1984), und der *shortest augmenting path algorithm* von Barbour and Fricker (1994) verwendet.

Bei hochbelasteten Netzen muss das Problem simultan gelöst werden. Hier ist die Fahrzeit auf der Strecke eine Funktion der Streckenbelastung, die Streckenbelastung wiederum ist aber auch eine Funktion der Fahrzeit. Die Konsequenz daraus ist, dass die Umlegungsmatrix dann ein Teil des Schätzproblems ist. Die ersten hier verwendeten Ansätze basierten auf einem deterministischen Nutzergleichgewicht für die Berechnung der Umlegungsmatrix d.h., dass für jede Q-Z-Beziehung nur die Routen mit minimalen Reisezeiten (oder Reisekosten) benutzt werden. Die hier angewendeten Methoden werden, mit ihren Lösungsansätzen und Vor- und Nachteilen, diskutiert.

Weitere Methoden, basieren auf der Idee des stochastischen Nutzergleichgewichts. Die Anwendung des stochastischen Nutzergleichgewichts für das Umlegungsproblem bietet gegenüber dem deterministischen Nutzergleichgewicht ein realistischeres Routenwahlverhalten und eindeutige Lösungen des Problems auf der Ebene der Routenwahl. Das beim *Path Flow Estimator* (PFE) dafür angewendete Logit Modell für die Routenwahl kann durch das C-Logit von Cascetta für eine bessere Abbildung von Überlappungen modifiziert werden. Die Bedeutung der Nachfragedynamik über die Zeit respektive der Abbiegebeziehungen wird auch beschrieben.

Im Kapitel 4.3 werden die allgemeinen Bedingungen, die Ansätze und Lösungsmethoden für die Quell-Ziel-Matrix Schätzung und Routenwahl Schätzung beschrieben.

Die Anwendung des zeitabhängigen PFE wird empfohlen wegen:

- kann sowohl für die Erstellung von statischen als auch dynamischen (Zeitabhängigen) Quell-Ziel-Matrizen angewendet werden

- realitätsnähere Umlegung durch die Anwendung des stochastischen Nutzergleichgewichts
- die Wunschlinienmatrix und die Umlegung werden nicht sequentiell sondern simultan behandelt
- die zeit- und belastungsabhängige Darstellung von Fahrtzeitverlängerungen
- kann auch bei grösseren Netzen angewendet werden.

Bei vielen Massnahmen im Strassenverkehr ist die Berücksichtigung der Nachfragevariationen während des Tages für die Schätzung von Nachfrageveränderungen eine sehr wichtige Komponente. Damit hat die Erstellung von zeitabhängigen Quell-Ziel-Matrizen eine immer höhere Bedeutung.

Da das hier entwickelte Verfahren sowohl auf schwach als auch auf stark belastete Netze angewendet werden soll und die Umlegung eine sehr wichtige Komponente bei der Erstellung von Wunschlinienmatrizen darstellt, ist das stochastische Nutzergleichgewicht der wesentliche Baustein dieses Verfahrens. Dieses Verfahren berücksichtigt die unterschiedliche Wahrnehmung der Reisekosten der Verkehrsteilnehmer und ist damit gegenüber herkömmlichen deterministischer Verfahren genauer.

In den bisherigen Kalibrationsverfahren wird die Umlegung und Erstellung von Quell-/Zielmatrizen sequentiell durchgeführt. Dies führt dazu, dass die Reisezeiten bzw. die generalisierten Kosten bei der Berechnung von Matrizen unabhängig und konstant sind. Mit dem PFE werden die Umlegung und die Matrixerstellung simultan behandelt, so dass Wechselwirkungen berücksichtigt sind. Bei der Erstellung von dynamischen Quell-/Zielmatrizen werden bei der Berechnung der belastungsabhängigen Reisezeit auch die aus dem vorherigen Zeitintervall „verbliebenen“ Fahrten berücksichtigt (Strecken mit Fahrten, die von einer Quelle zu einem Ziel länger dauern, als das betrachtete Zeitintervall).

## 4.2 Introduction

The Origin-Destination (O-D) matrix is a key set of variables in the transport planning process. Estimation of this matrix by survey, though valuable, is expensive and time consuming. As measurements of link flows are plentiful and often routinely collected for other purposes, techniques have developed for inferring or updating O-D matrices from link flow measurements. These techniques are classified and reviewed. Their appropriateness for updating the Swiss national O-D matrix is assessed.

Transport planning is essentially driven by estimates of demand. As movement occurs over space, and space is generally represented by points or zones, these estimates have to be spatially disaggregated. The conventional representation of spatially disaggregated demand is as a matrix, referred to as an *O-D matrix*, whose rows and columns denote the origins and destinations respectively (see Table 1). For junction design and control, traffic engineers require similar data, namely vehicle movements between the entrances and exits.

Surveys of O-D movements are costly and not suitable for on-line applications. While vehicle movements may be observed at various points in a road network, either manually or using automatic vehicle counters, it is not possible to ascertain directly the origin or destination of each trip. Hence, there has been active interest in techniques for inferring or updating an O-D matrix from traffic counts.

Unless the network offers no route choice, traffic assignment is an essential aspect of the O-D matrix estimation problem. Generally this is expressed in the form of an *assignment matrix* (see Table 1), whose elements show the proportion of traffic between each origin-destination pair that uses each link. Early approaches to O-D estimation assumed that the assignment matrix was exogenously determined. However, only in uncongested networks is the assignment matrix independent of the O-D matrix. Trip-makers are conventionally assumed to prefer least cost paths. An important element of cost is travel time, which in congested networks depends on traffic flow. In this case, the assignment matrix is determined endogenously.

Sometimes the problem is simply to update an existing, possibly out-of-date, O-D matrix, referred to as a *prior* or *target matrix* (see Table 2). In this case, there are two sources of data relating to the O-D matrix, necessitating a trade off. Early approaches assumed that the traffic counts were error free, so the problem became one of finding an O-D matrix that exactly reproduced observed traffic counts while being as “close” as possible to the prior matrix. Later approaches allowed for error in both the traffic counts and the assignment matrix.

Since the 1980s, when the first papers on the subject appeared, a wide variety of O-D matrix estimation methods have been proposed. These include:

1. Steady state methods for uncongested networks, which assume no variation in link flows. Under this heading come Entropy Maximisation (EM), Information Minimisation (IM), Constrained Generalised Least Squares (CGLS) and Constrained Maximum Likelihood (CML).
2. Steady state methods for uncongested networks, which allow for random variation in link flows and possibly also the assignment matrix. Under this heading come Generalised Least Squares (GLS), Bayesian estimation (B) and Maximum Likelihood (ML).
3. Time series methods that infer the O-D matrix from the correlation of flows on links correlate with each other, possibly taking time lags into account. Under this heading come Kalman Filtering (KF), Recursive Least Square (RLS) and Prediction Error Minimisation (PEM).
4. Steady state methods for congested networks. Under this heading come a variety of heuristics for solving Bi-level Programs (BP). Lack of convexity in the problem means that the best estimate can never be guaranteed.
5. Steady state methods for Path Flow Estimation (PFE). In this case, the path flows that make up the O-D matrix are estimated directly. Under this heading come linear programming for deterministic user equilibrium assignment and the log-linear PFE for stochastic user equilibrium assignment.
6. Linear Predictors (LP), Time-Dependent Path Flow Estimation (TDPFE) and Dynamic Assignment (DA) have been proposed for short-term predictions.

These methods are categorised according to type of network and period for which they are most suited in Table 3. The primary category of interest for this study relates to short-term estimation for a large congested network, suggesting that the relevant techniques are TDPFE and DA.

Table 2 Terminology

Term	Definition
O-D matrix	Table of movements starting in a given period, identified by their origin and destination. The rows conventionally represent the origins and the columns the destinations.
Target or prior matrix	O-D matrix to be updated on the basis of traffic counts. Usually this matrix will have emanated from a survey.
Assignment matrix	Matrix of link choice proportions, showing the proportion of trips between each origin and destination that uses each link. The rows of this matrix conventionally represent the links and the columns the O-D pairs.
Traffic count	A measurement of traffic flow over a defined period on a link in the road network. This may be made automatically using, for example, inductive loop vehicle detectors in each lane.

Table 3 Classification of techniques

Type of urban network	Period		
	Long	Medium	Short
Small with no route choice	KF, RLS, PEM	KF, RLS, PEM	KF, RLS, PEM
Large with no congestion	EM, IM, CGLS, CML	GLS, B, ML	LP
Large with congestion	BP	PFE	DA, TDPFE

## 4.3 Review of O-D estimators

### 4.3.1 Uncongested networks

For uncongested networks, methods generally assume that the assignment matrix is given or determined a “prior” by a flow-independent, proportional traffic assignment. These methods look for “the most probable set of O-D movements that are consistent with a set of link flows” (Bell, 1983, quoted in Hazelton, 2001). Methods include entropy maximisation or information minimisation (Van Zuylen and Willumsen, 1980; Willumsen, 1984), constrained maximum likelihood (Spiess, 1987), constrained generalised least squares (Bell, 1984), and the shortest augmenting path algorithm of Barbour and Fricker (1994).

Subsequently, methods were devised that did not require the fitted O-D matrix to be fully consistent with the traffic counts. Robillard (1975), Cascetta (1984), McNeil and Hendrickson (1985) and Bell (1991) proposed Generalised Least Square (GLS) estimators. Maher (1983) proposed Bayesian inference, combining a multivariate normal likelihood with an *a priori* distribution on the elements of the O-D matrix. However, Hazelton (2000) suggests that the natural distribution for the O-D elements is Poisson not normal. Lo, Zhang and Lam (1996) proposed full maximum likelihood estimation but assumed that link flows were statistically independent. Vardi (1996), for telecommunication networks, and Hazelton (2000) proposed full maximum likelihood estimation taking inter-link dependency into account. The methods of Lo et al. (1996), Vardi (1996) and Hazelton (2000) allow also for random variation in the assignment matrix.

A multi-objective programming formulation has been proposed by Brenninger-Goethe, Jornsten and Lundgren (1989) following a GLS approach. Liu and Fricker (1996) look at the joint estimation of a path choice model and O-D flows. Cascetta and Russo (1997) proposed a general class of demand model estimation methods from traffic counts and other forms of data. Bierlaire and Toint (1995) proposed the incorporation of parking survey data. Other approaches can be found in Nguyen (1983), Ben-Akiva and Lerman (1985) and Spiess (1990). A comprehensive review and analysis of the different methods for uncongested networks can be found in Cascetta and Nguyen (1988).

### 4.3.2 Congested networks

Most urban road networks are subject to growing levels of congestion. The presence of congestion leads to a problem of simultaneous estimation: Link travel times are a function of link flows but also link flows are a function of link travel times. As a consequence, the assignment matrix becomes part of the estimation problem. Nguyen (1977, 1984) was the first to address the O-D estimation problem subject to flows that are assigned according to the Deterministic User Equilibrium (DUE) principle, namely where for each origin and destination only paths with least travel time are used. The resulting formulation is shown to be similar to the elastic demand network equilibrium model for traffic assignment. The solution O-D matrix turns out not to be unique, so a secondary objective function has to be added to produce a preferred solution. A partial Lagrangian method has been proposed by LeBlanc and Farhanigan (1982) to choose the O-D matrix “closest” to a reference matrix among all feasible solutions, namely those that satisfy the traffic counts and conform to DUE assignment. Yang, (1994) showed that under certain conditions the O-D estimation problem under DUE assignment can be greatly simplified.

Alternative estimation algorithms have been developed by a number of authors. Turnquist and Gur (1979) developed a heuristic DUE-based O-D estimation method using the Frank-Wolfe algorithm. Fisk and Boyce (1983) proposed the calibration of a combined distribution-assignment model to reproduce given traffic counts. Yang, Meng and Bell (2001) proposed the simultaneous estimation of O-D matrices and the travel cost coefficient of the logit path choice model for congested networks, thereby extending the work of Liu and Fricker (1996) to include congestion.

The O-D estimation problem for congested networks can be formulated as a bilevel program. The upper level relates to the determination of the best fit O-D matrix while the lower level relates to the assignment, which constrains the upper level. Fisk (1988) extends the entropy maximising model of Van Zuylen and Willumsen (1980) to the congested case by using a bilevel formulation with DUE constraints. However, the existence of OD flows that exactly reproduce given traffic counts cannot be guaranteed. Consequently Yang (1995) uses a GLS upper level objective in place of the entropy function used by Fisk (1988). Rather than enforcing exact agreement between observed and fitted link flows, the objective function penalises differences between fitted and observed flows. Chen and Florian (1994) set out the optimality conditions for solving the O-D estimation problem with DUE constraints, while Florian and

Chen (1995) propose a descent method that guarantees adherence to the optimality conditions, though convergence is not guaranteed.

#### 4.3.3 Path flow estimation

In many applications, the O-D matrix is a set of latent variables lying between the observed traffic counts and the fitted path flows, from which turning proportions and other quantities may be estimated. Sherali and Park (1994) were the first to point out that path flow estimation for congested networks can in certain circumstances be formulated as a single level problem. They proposed a linear program to estimate DUE origin-destination flows from traffic counts. However, DUE path flows that are consistent with traffic counts, if indeed they exist, are not in general unique. Bell et al. (1997a, 1997b, 1998 and 1999) proposed a single level, non-linear programming Path Flow Estimator (PFE) based on a Stochastic User Equilibrium (SUE) assignment. This has a number of advantages over DUE assignment, namely greater behavioural realism and uniquely defined path flows. The PFE uses the logit model for route choice, following the approach set out in Fisk (1988) and modified by Cascetta, Nuzzolo, Russo and Vitetta (1996) to allow for overlapping path bias.

The period of estimation is often short compared to the duration of the average trip. In this context, the time dimension cannot be ignored, so steady state estimation is not appropriate. As queues at the end of the period represent incomplete trips, these should be carried across to the next period as an initial queue. The time-dependent PFE of Bell, Shield, Henry and Breheret (1996) does this, but retains the assumption of a steady state within each period. As the metering effect of a queue is not represented, there is a problem of double counting: Steady state continuity conditions imply that trips are completed yet queues of incomplete trips are carried forward. Work on correcting for double counting is ongoing.

#### 4.3.4 Turning movement estimation

For junctions or small networks without route choice, time series statistical techniques may be applied to identify junction input-output coefficients if detectors are available to measure all inflows and outflows. Particularly appropriate are recursive estimation techniques (see Cremer

and Keller, 1981, 1987; Nihan and Davis, 1987, 1989; Bell, 1991b; Li and de Moor, 1999). At the network level, the time lags between inputs and outputs become more variable because of platoon dispersion between junctions ( platoons of vehicles released by traffic signals tend to disperse as they travel away from a junction). This effect can be allowed for by embedding a platoon dispersion model in the estimator (Bell, 1991b). For larger, uncongested networks, a hybrid static-dynamic approach, as formulated by Keller and Ploss (1987), looks attractive. Input-output coefficients for junctions are determined dynamically. These are then used as additional constraints for the estimation of origin-destination flows by one of the methods described earlier (they considered entropy maximisation).

Problems can arise with recursive least squares methods when detectors fail or when the travel time between detectors depends on the intervening traffic conditions. Motivated by these concerns, Davis and Lan (1995) proposed an off-line scheme to evaluate the feasibility of estimating turning proportions in a network of intersections where only a partial set of detector counts are available. Li and Moor (2002) proposed recursive turning movement estimation for a partial set of detectors. As long as the detector configuration satisfies an identifiability condition, estimation is possible, although the estimates are less efficient than those provided by a full set of detectors. Lan and Davis (1999) present and apply a Markovian compartment model to allow travel time to be a function of traffic conditions. A traffic flow model is used to predict movement between compartments. Estimation is based on the linearisation of the traffic flow model and the use of prediction error minimisation.

The ODIN project of DRIVE I studied the applicability of a number of promising static and dynamic trip table estimators to a range of network types (urban and inter-urban, with and without route choice) and produced preliminary recommendations. ODIN also produced a number of interesting advances, notably an event based trip table estimator suitable for junctions (reported in Bell, Inaudi, Lange and Maher, 1991). Given pre-specified travel time distributions for each entry-exit pair, exit events are matched with entering events using maximum likelihood.

#### 4.3.5 Short-term prediction

When short-term prediction is required for larger networks, time dependencies must be taken into account. Approaches suggested so far have assumed proportional assignment and are therefore most appropriate for uncongested networks (see Cascetta, Inaudi and Marquis 1993; Ashok and Ben-Akiva, 1993).

## 4.4 Steady state estimators

### 4.4.1 Variables and sets

The variables required to describe the various methods more formally are set out in Table 4. The sets used are given in Table 5. As steady state conditions are assumed, the time dimension can be ignored.

Table 4 Variable definitions

Variable	Definition
$t_{ij}$	Trips from zone or node $i$ to zone or node $j$ starting within a given period, collectively referred to as the O-D matrix ( $\mathbf{t}$ )
$t^0_{ij}$	Prior estimate of trips from zone or node $i$ to zone or node $j$ starting within a given period, collectively referred to as the prior or target O-D matrix ( $\mathbf{t}^0$ )
$h_k$	Flow on path $k$ starting within a given period, referred to collectively as the vector of path flows ( $\mathbf{h}$ )
$g_k$	Cost of travel on path $k$ , referred to collectively as the vector of path costs ( $\mathbf{g}$ )
$a_{lk}$	1 if link $l$ lies on path $k$ , and 0 otherwise, collectively referred to as the link-path incidence matrix ( $\mathbf{A}$ )
$b_{ijk}$	1 if path $k$ connects $i$ to $j$ , and 0 otherwise, collectively referred to as the O-D-path incidence matrix ( $\mathbf{B}$ )
$v_l$	Flow on link $l$ , referred to collectively as the vector of link flows ( $\mathbf{v}$ ). Only links for which traffic counts are available are included in this vector.
$v^0_l$	Observed flow on link $l$ , referred to collectively as the vector of traffic counts ( $\mathbf{v}^0$ ).
$c_l$	Cost of travel on link $l$ , referred to collectively as the vector of link costs ( $\mathbf{c}$ )
$p_{kij}$	Proportion of traffic from $i$ to $j$ that chooses path $k$ , referred to collectively as the path choice matrix ( $\mathbf{P}$ )

Table 5 Set definitions

K	Set of paths
L	Set of links
LO	Set of observed links
W	Set of O-D pairs

#### 4.4.2 Steady state conditions

In a steady state, all trips are completed implying that flows are conserved. This in turn implies that

$$v_l = \sum_{k \in K} a_{lk} h_k, \quad \forall l \in L$$

For the moment we assume only one user class, so each link has only one flow and also only one cost, which may be added to yield the path cost

$$g_k = \sum_{l \in L} a_{lk} c_l, \quad \forall k \in K$$

The DUE principle requires that

$$p^*_{kij} > 0 \Rightarrow g_k \leq g_{k'}, \quad \forall k, k' \in K$$

If there is more than one minimum cost path, as is generally the case in congested networks, the relationship between the assignment matrix and path costs can be multi-valued. In other words, for a given set of path costs the assignment matrix is generally non-unique.

If the random utility path choice model is adopted, then the SUE principle requires that

$$p^*_{kij} = \text{Prob}\{g_k + \varepsilon_k \leq g_{k'} + \varepsilon_{k'}\}, \quad \forall k, k' \in K$$

where  $\varepsilon_k$  is a random term representing users' perception errors and/or model approximations. Different random utility models can be obtained from different assumptions about the joint distribution of the random term (Ben-Akiva and Lerman, 1985). For example, when  $\varepsilon_k$  are identically and independently Gumbel distributed, the logit path choice model results. Alternatively, when  $\varepsilon_k$  are multi-variate normally distributed, the probit path choice model results.

A particular problem arises with the logit path choice model when paths overlap. The error terms are then no longer statistically independent. Cascetta et al. (1996) proposed the C-logit model to correct for the tendency of the multinomial logit model to overload overlapping paths.

Note that steady state path flows are related to the O-D flows as follows

$$h_k = p_{kij} t_{ij}, \quad \forall k \in K$$

and therefore

$$v_l = \sum_{k \in K} a_{lk} p_{kij} t_{ij}, \quad \forall l \in L$$

Using vector and matrix notation, this may be written as

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{A} \mathbf{h} = \mathbf{A} \mathbf{P} \mathbf{t} = \mathbf{M} \mathbf{t}$$

where  $\mathbf{M}$  is the assignment matrix.

#### 4.4.3 Steady state O-D estimators for uncongested networks

Cascetta and Nguyen (1988) have shown that most steady state O-D estimators proposed so far take the following form

$$\mathbf{t}^* = \operatorname{argmin}_{\mathbf{t} \geq 0} F_1(\mathbf{t}, \mathbf{t}^0) + F_2(\mathbf{v}(\mathbf{t}), \mathbf{v}^0) \quad (8)$$

The two parts of the objective function may be viewed as distance measures between prior and fitted O-D flows and between the observed and fitted link flows respectively. When the traffic counts are treated as equality constraints, the second distance measure has an additional set of variables,  $\lambda$ , which are the Lagrange multipliers enforcing the constraints, where possible. If  $\lambda^*_l \neq 0$ , where  $*$  denotes the solution, then the corresponding constraint is met; otherwise it is not. Note that traffic counts are normally available for a sub-set of links only. The objective functions for different steady state models are summarised in Table 6.

Table 6 Objective functions for steady state O-D estimators: Uncongested networks

Model type	$F_1(\mathbf{t}, \mathbf{t}^0)$	$F_2(\mathbf{v}(\mathbf{t}), \mathbf{v}^0)$
EM and IM	$\sum_{ij \in W} t_{ij} (\ln(t_{ij} / t^0_{ij}) - 1)$	$\max_{\lambda} \lambda^T (\mathbf{v}^0 - \mathbf{v}(\mathbf{t}))$
CGLS	$(\mathbf{t} - \mathbf{t}^0)^T \mathbf{W}^{-1} (\mathbf{t} - \mathbf{t}^0)$	$\max_{\lambda} \lambda^T (\mathbf{v}^0 - \mathbf{v}(\mathbf{t}))$
GLS, ML and B	$(\mathbf{t} - \mathbf{t}^0)^T \mathbf{W}^{-1} (\mathbf{t} - \mathbf{t}^0)$	$(\mathbf{v}(\mathbf{t}) - \mathbf{v}^0)^T \mathbf{Q}^{-1} (\mathbf{v}(\mathbf{t}) - \mathbf{v}^0)$

Matrices  $\mathbf{W}$  and  $\mathbf{Q}$  are the variances and covariances for  $\mathbf{t}$  and  $\mathbf{v}^0$  respectively. When  $\mathbf{t}$  and  $\mathbf{v}^0$  are multi-variate normally distributed, the GLS, ML and B estimators coincide.

#### 4.4.4 Steady state O-D estimators for congested networks

In congested networks with unknown link costs, the assignment map is a non-linear function of  $t$ . Both DUE and SUE assignment may be expressed as optimisation problems if the Jacobians of the link cost functions are symmetric. With that proviso, bilevel optimisation is frequently proposed (Fisk, 1988; Florian and Chen, 1994; Yang, 1995). The proviso is trivially true when the link cost functions are separable, implying that the delay on any link is fully determined by the flow on that link. The bilevel problem may be expressed as follows

$$t^* = \operatorname{argmin}_{t \geq 0} F_1(t, t^0) + F_2(v^*, v^0)$$

$$v^* = \operatorname{argmin}_v z(t^*, v)$$

where  $z(t, v)$  represents an objective function that delivers either a DUE or an SUE assignment. The Beckman integral (Beckman et al., 1956) delivers a DUE assignment, while the Fisk objective (Fisk, 1980) delivers a logit assignment.

The bilevel program is known to be non-convex, meaning that gradient-based methods can only be relied upon to yield a local solution. Moreover, the iterative solution of (6) and (7) either fails to converge, or if it does converge, converges to a mutually consistent solution. This is known to be sub-optimal, in the sense that there will usually be an O-D matrix which is “closer” to  $t^0$  and  $v^0$ , in terms of the chosen distance measures  $F_1$  and  $F_2$ . A better method was proposed by Yang (1995) whereby a linear approximation of (7) formed at the current best estimate of  $v$  is included in (6) to yield

$$t^* = \operatorname{argmin}_{t \geq 0} F_1(t, t^0) + F_2(v(t, v^*), v^0)$$

$$v^* = \operatorname{argmin}_v z(t^*, v)$$

Cascetta and Postorino (2001) reexpress (6) and (7) as a fixed point problem as follows

$$t^* = \operatorname{argmin}_{t \geq 0} F_1(t, t^0) + F_2(M^*(c(v(t^*)))t, v^0) = T(t^*)$$

Various averaging techniques for fixed point problems (for a review of these, see Magnanti and Perakis, 1997) were tried out.

#### 4.4.5 Path flow estimation

As noted earlier, the O-D matrix may in many applications be viewed as a set of latent variables between the observed traffic counts and the fitted path flows. Path flow estimators bypass the latent variables and may be written as follows

$$\mathbf{h}^* = \operatorname{argmin}_{\mathbf{h} \geq 0} F_1(\mathbf{B}\mathbf{h}, \mathbf{t}^0) + F_2(\mathbf{A}_m\mathbf{h}, \mathbf{v}^0)$$

where  $\mathbf{A}_m$  is a reduced link-path incidence matrix including only the rows corresponding to the measured links. The forms of objective function for steady state path flow estimators are given in Table 7. In the case of the DUE path flow estimator, proposed by Sherali, Arora and Hobeika. (1994), both parts of the objective function are linear. The vector  $\mathbf{e}$  has all its elements equal to 1 and its function is to add the elements of  $|\mathbf{B}\mathbf{h} - \mathbf{t}^0|$ . Thus the first part of the objective function corresponds to the absolute deviation from the target O-D matrix, as measured by the sum of the absolute differences between the corresponding elements of the target and fitted matrices. In the case of the SUE path flow estimator, proposed by Bell, Shield, Busch and Kruse (1997), both parts of the objective function are log-linear. Congestion is represented through flow-dependent link costs, thereby allowing the representation of congestion.

Table 7 Steady state path flow estimators

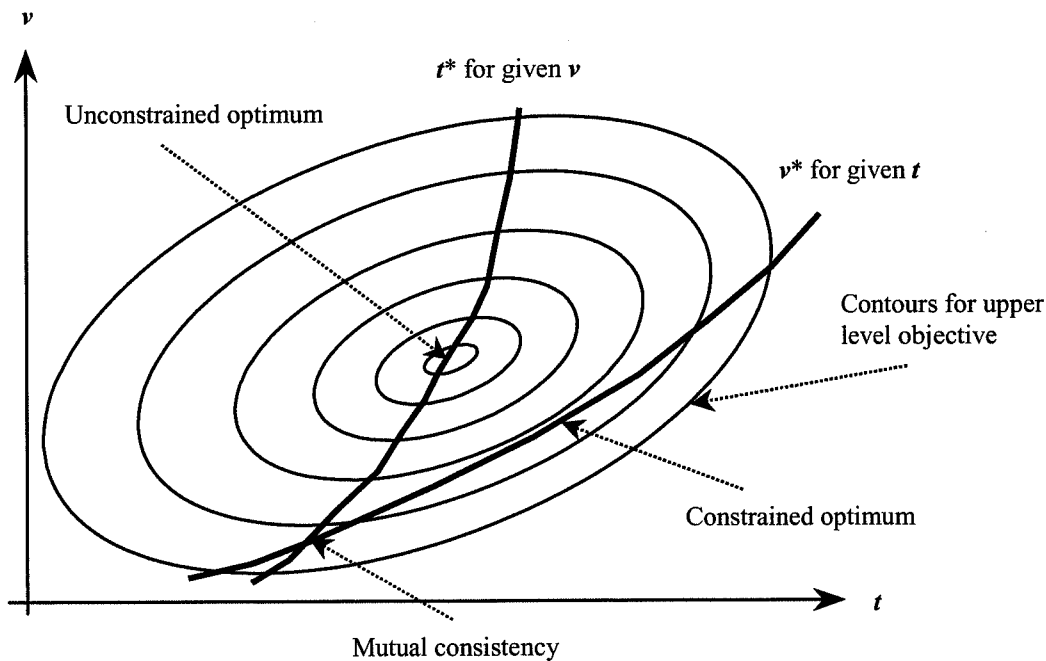
Model type	$F_1(\mathbf{B}\mathbf{h}, \mathbf{t}^0)$	$F_2(\mathbf{A}_m\mathbf{h}, \mathbf{v}^0)$
DUE	$\mathbf{e}^T  \mathbf{B}\mathbf{h} - \mathbf{t}^0 $	$\mathbf{c}(\mathbf{0})^T \mathbf{A}\mathbf{h} + \max_{\lambda} \lambda \lambda^T (\mathbf{v}^0 - \mathbf{A}_m\mathbf{h})$
SUE	$-\ln(\mathbf{t}^0)^T \mathbf{B}\mathbf{h}$	$\sum_j h_j (\ln(h_j) - 1) + \alpha \mathbf{c}(\mathbf{v})^T \mathbf{A}\mathbf{h} + \max_{\lambda} \lambda \lambda^T (\mathbf{v}^0 - \mathbf{A}_m\mathbf{h})$

#### 4.4.6 Link to game theory

As many have noted (Fisk, 1988; Yang, Iida and Sasaki, 1992; Maher, 2001), the bilevel nature of O-D estimation for congested networks allows one to view the solution as the equilibrium of a game in which the upper level problem (matrix estimation) and the lower level problem (traffic assignment) correspond to players. The players take turns in optimising their respective objective functions, having observed the previous actions of the other player. If neither player is able to predict the response of the other player, a Cournot game emerges. If one player is able to predict the response of the other, he takes a lead and a Stackelberg leader-follower game emerges. In the context of matrix estimation, it is more useful to assume that the matrix estimator takes the lead.

Figure 4 illustrates the game. The contours refer to the upper level objective function. The steeper curve shows the locus of solutions to the upper level problem with respect to solutions to the lower level problem, whereas the shallower curve shows the locus of solutions to the lower level problem with respect to solutions of the upper level problem. The intersection of the two curves defines the point of mutual consistency, which represents the solution to the Cournot game. However, it is clear that moving upwards from the Cournot solution along the locus of solutions to the lower level problem clearly improves the value of the upper level objective function, until the Stackelberg solution is reached.

Figure 4 The constrained optimum



Yang et al. (1992) noted that the iterative solution of the upper and lower level problems, if convergent, corresponds to the solution of a Cournot game. If not convergent, there is no “pure strategy” solution, as defined by Nash (1951). The method of successive averages may be used to find a “mixed strategy” solution, which always exists (see Nash, 1951). Maher, Zhang and Van Vliet (2001) noted that the solution to the Cournot game is not the best estimate of the O-D matrix. Influence factors, which predict the response of the network user, can be incorporated into the upper level problem. A possible choice of influence factors, proposed by Yang (1995), is the Jacobian matrix of the output of the lower level problem (link flows) with respect to the output variables of the upper level problem (the O-D flows).

#### 4.4.7 Solution methods

##### *Exact solution methods*

Finding a solution to the bilevel problem is acknowledged to be difficult and exact solution procedures have so far not achieved acceptable performance. Marcotte and Zhu (1996) proposed a penalty method whereby a gap function, which measures the deviation of the lower level objective from its optimum, is assigned a series of increasing penalties. Clegg and Smith (2001) proposed a half-space projection method whereby a descent direction is determined for the upper and lower level problems jointly, but with precedence given to the minimisation of the lower level problem provided the gap function for the lower level objective exceeds a certain threshold. The final solution is obtained as this threshold tends to zero.

##### *Heuristic methods*

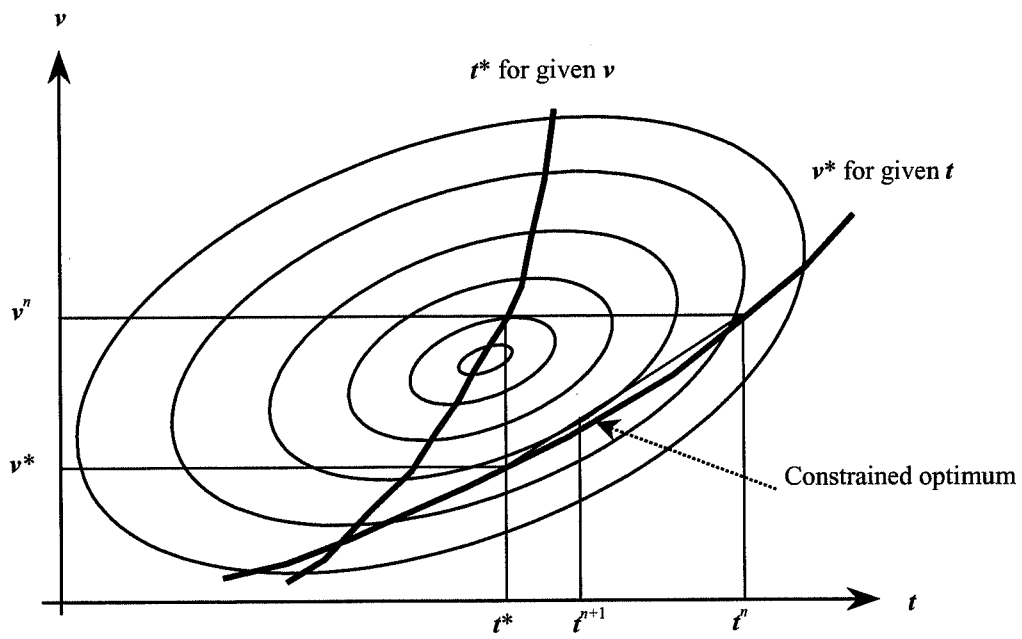
In Yang (1995), the influence factors  $\mathbf{J}^*$  are incorporated into the second part of the upper level objective function

$$\mathbf{v}(\mathbf{t}, \mathbf{v}^*) = \mathbf{v}^* + \mathbf{J}^*(\mathbf{t} - \mathbf{t}^*) \quad (11)$$

where  $\mathbf{J}^*$  is the Jacobian of the network equilibrium link flows with respect to the O-D flows, evaluated at  $\mathbf{t}^*$ . The calculation of  $\mathbf{J}^*$  follows the method devised by Tobin and Friesz (1988) and is complex.

Maher *et al.* (2001) used the difference between auxiliary (denoted by  $*$ ) and current (denoted by  $''$ ) O-D flows and link flows to produce a finite difference approximation to  $\mathbf{J}$ , thereby reducing the computational complexity significantly (see Figure 5 for an illustration of the method). However, neither heuristic can guarantee an exact solution to the problem because of its non-convexity. Interest is therefore shifting to probabilistic optimisation methods.

Figure 5 Maher's heuristic



## 5 Description of the Path Flow Estimator (PFE)

This chapter highlights the principles of the Path Flow Estimator (**PFE**) in relation to the work for the Swiss-OD project. The model, algorithm and I/O are clarified, with an emphasis on the data generation process, whereby network and dynamic data, in this case in **VISUM** format, are to be translated into **PFE** format.

### 5.1 Introduction

A commonly encountered problem in transport planning is the estimation of network flows (path flows, origin-destination flows, turning movements and link flows) given local measurements of traffic flows. One frequently studied version of the problem is the estimation of an origin-destination matrix (a table of trips categorised by origin and destination) from measurements of trips on certain links. In general, local traffic flow measurements on their own are insufficient in quantity (and possibly also in quality) for an accurate estimate of network flows. The most commonly encountered form of supplementary information is a prior estimate of the trip matrix, which may be obtained from a combination of trip generation and distribution models or from a past survey of some kind. However, there are often other sources of relevant information, in particular travel diary surveys or censuses, which can yield trip length distributions, and roadside interviews, which may allow local estimates of origin-destination flows.

This chapter looks at the estimation of path flows and extends the data used in estimation to include trip length distributions, perhaps disaggregated by origin or destination, and the origin-destination composition of flows on specific links. For a given network, the Path Flow Estimator (PFE) delivers estimates of:

1. Flows on paths, which the method itself generates.
2. Flows on links, where these are not measured.
3. Travel times on links.

The PFE requires a prior estimate of the OD matrix. This is assigned to the network using a logit route choice model, leading to initial path flows which are then modified to fit measurements made on the network. The kinds of data that may be included are:

1. Flows on one or more links.
2. The distribution of flow across a number of user-defined categories. Each category may refer to trip length or travel time. Alternatively, it could refer to the origin and destination of trips using a particular link or set of links. More than one categorisation of trips is possible.

The Path Flow Estimator (PFE) is a one-stage technique for data completion. Traffic counts are used to estimate path flows, from which flows on uncounted links are derived. Underlying the PFE is a capacitated stochastic user equilibrium traffic assignment which delivers unique estimates of path flows and travel times from traffic counts and prior estimates of OD flows. The PFE is implemented in VISUM-Online of PTV AG. The technique was developed and tested via a series of European projects (MARGOT, CLEOPATRA and COSMOS) and a version of the algorithm is running in an on-line mode in the MOTION traffic control system from Siemens.

Prior to path flow estimation, network observation followed a two-stage approach; first an OD matrix is estimated from traffic counts assuming constant link choice proportions, then data completion is achieved by assigning the estimated OD matrix the network allowing for the effect of congestion. There is a risk of inconsistency arising from the differing assignment assumptions of the two stages, unless these are reconciled by some iterative scheme. Furthermore, there are difficulties associated with the widely-used Deterministic User Equilibrium (DUE) assignment, associated with the lack of uniqueness of the resulting link choice proportions and the unrealistic assumption that drivers are perfectly informed about best routes.

The core of the PFE is a logit path choice model, whereby traffic is assigned to paths on the basis of their travel times, taking congestion into account. For those links where counts are available, shadow prices are calculated so as to reproduce the counts, plus or minus a tolerance. These shadow prices represent the corrections to the travel time functions necessary to achieve consistency between observed and fitted link flows. The static inputs are the network and the link delay functions. The balance between demand, as given by the logit model, and supply, as given by the travel time functions, defines the stochastic user equilibrium. The most significant paths in the network are generated by an approximate steepest descent column generation method.

## 5.2 PFE theory

Let us consider the two-path network in Figure 6. From a measurement of flow made at the detector indicated on the approach to the bifurcation, the problem is to estimate the flows on paths 1 and 2. Path 1 appears to be shorter, and might therefore be expected to attract more traffic.

Figure 6 A simple network

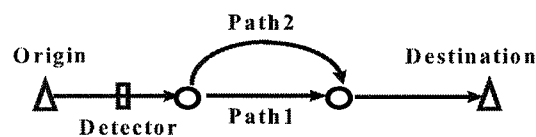
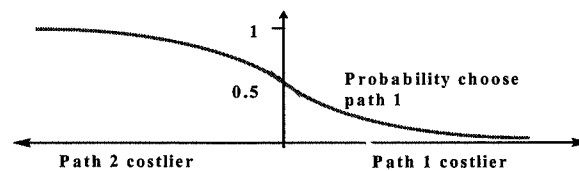


Figure 7 The logit response surface



The relationship between the cost of the two paths and the share of the traffic attracted is determined by the logit model (see Figure 7). The least cost path attracts the majority of the traffic. Link costs are decomposed into two components, a fixed component corresponding to the undelayed travel time and a demand-determined variable component corresponding to the delay. Generally it is reasonable to suppose that link cost does not decrease with increasing flow.

Figure 8 shows how the two path cost functions might appear. To the right of the intersection of the two curves, path 1 is costlier than path 2, while to the left of the intersection, path 2 is costlier than path 1. Under a DUE assignment, the share of the traffic assigned to the two paths would be given by the point of intersection of the two curves.

Figure 8 Steady state cost curves

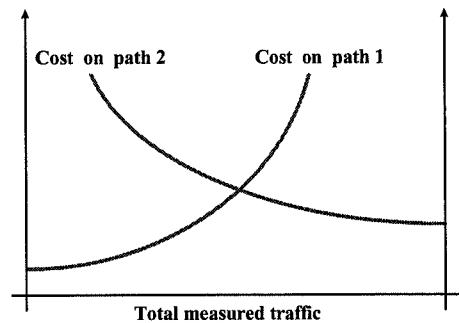
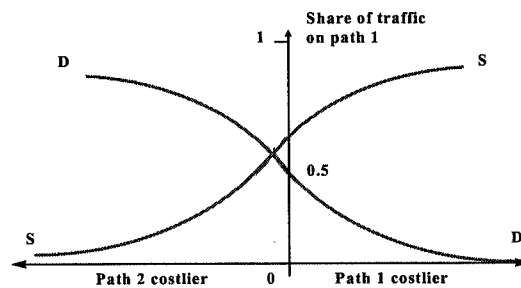


Figure 9 Equilibrium between demand and supply



When the difference in cost between the two paths is plotted against the share of traffic assigned to path 1, the solution yielded by the PFE is that suggested by the intersection of the two curves in Figure 9. The curve SS represents the supply-side relationship between the share of the traffic on the two paths and the resulting difference in cost. This relationship emanates directly from the path cost functions portrayed in Figure 8.

The curve DD represents the demand-side relationship between the difference in costs and the share of traffic choosing to use the two paths. This emanates from the logit model as shown in Figure 7.

### 5.3 Sets and variables

The variables used in presenting the *PFE* are set out in Table 8:

Table 8 PFE sets and variables

Set	Symbol	Variable	Description
Uncounted links	$U$	$v_i$	Fitted flow for link $i$
		$c_i(v_i)$	Fitted travel time for link $i$
		$s_i$	Maximum flow for link $i$
Counted links	$C$	$v_i$	Fitted flow for link $i$
		$m_i$	Count for link $i$
		$M_i$	Factor for counted link $i$
All paths	$P$	$h_j$	Fitted flow for path $j$
		$t_j$	Fitted travel time for path $j$
Feasible pairs of ODs	$W$	$Q_w$	Prior estimate for OD flow $w$
		$q_w$	Fitted flow for OD pair $w$
Paths connecting OD pair $w$	$P(w)$	$h_j$	Path flows connecting OD pair $w$
Trip types	$K$	$n_k$	Trips of type $k$
Paths of type $k$	$P(k)$	$h_j$	Path flow of type $k$
		$T$	Total flow

### 5.4 Model

The algorithm builds paths as the iterations progress. The paths are stored in the link-path incidence matrix as columns of elements 1 or 0, indicating the inclusion or exclusion of a link. Let  $\delta_{ij}$  be the element of the link-path incidence matrix corresponding to link  $i$  and path  $j$ . This will have value 1 if link  $i$  is included in path  $j$ , and 0 otherwise. Thus the path flows may be summed to yield the fitted link flows as follows:

$$v_i = \sum_{j \in P} \delta_{ij} h_j \quad i \in U \cup C$$

Confidence intervals defined by the measurements are specified by the user both for link and OD fitted flows. For the counted links, for instance, convergence is reached when:

$$(1-x) \leq v_i \leq (1+x) \quad i \in C$$

where  $0 \leq x \leq 1$  defines the level of confidence in the measurement.

The model essentially consists of the product of an OD-specific weight, a deterrence function and a series of factors:

$$h_j = Q_w \exp(-\alpha t_j) \prod_{i \in C} M_i^{\delta_{ij}} \quad j \in P$$

The dispersion parameter  $\alpha$  governs the sensitivity to path cost. When  $\alpha$  is large, path choice is sensitive to path cost, whereas when  $\alpha$  is small, trips are spread evenly across all the paths with little regard to cost. The  $M_i$  and  $Q_w$  factors are calculated so that the fitted link and origin-destination flows lie within the confidence intervals. These factors reflect the upward or downward pressure exerted by the constraints on the path flows. For example, when  $M_i$  is larger than unity, constraint  $i$  is exerting an upward effect on the path flows passing through counted link  $i$ . Conversely, when  $M_i$  is smaller than unity, constraint  $i$  is exerting a downward effect on the path flows passing link  $i$ .

The *PFE* allows for a correction for overlapping paths, as introduced by Cascetta (1996). A commonality factor is used to adjust the split of traffic for paths that share most of their route.

## 5.5 Link cost functions

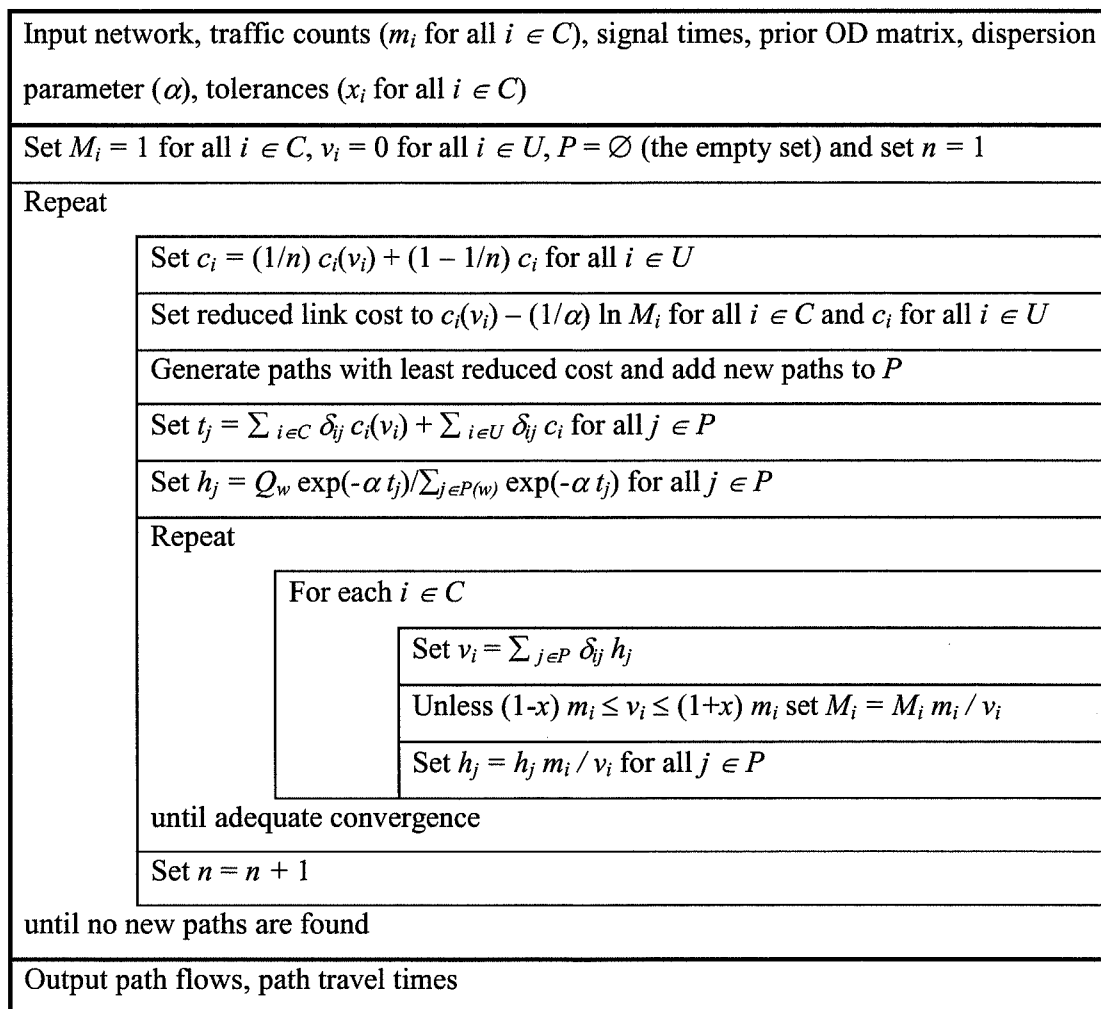
Fundamental to the PFE are the link travel time functions. As mentioned earlier, these are composed of undelayed travel time, which is constant, and delay, which is a function of flow. The relationship between link flow and link travel time will often depend on the form of control at the downstream end of the link. The CONTRAM simulator (see Leonard, Tough and Baguley, 1978) distinguishes between three kinds of link; priority links where the capacity depends on geometric factors alone, non-priority links where the capacity depends on geometric factors and conflicting priority flows, and signal controlled links where the capacity depends on geometric factors and the signal timings. The service process for each link can be regular (as in the case of traffic signal control), random (as in the case of non-priority stream), or somewhere in between (as in the case of the priority link). Delay can be estimated by appropriate steady state queuing formulae.

## 5.6 PFE algorithm

Model fitting is iterative, with an inner and an outer loop (see Figure 9). In the inner loop, the path flows are sequentially scaled so that the constraints are fulfilled. The process is iterative, because when the path flows are scaled to conform to the one constraint they may no longer

conform to the others. This scaling process cycles round all the constraints until convergence is achieved. If convergence is not achieved, the tolerances are progressively increased until convergence is achieved. In the outer loop, reduced link costs (link travel times plus any constraint-induced shadow prices) are calculated and least reduced cost paths are sought. Outer iterations continue until no new paths are generated. The steps of the algorithm are set out in the structure diagram below (see Figure 10).

Figure 10 The PFE algorithm



Often independent estimates of trip length distributions are available from sources like household travel diaries or censuses. Roadside interviews may yield data on the OD composition of flows on particular links. This additional information may be incorporated flexibly via a trip type constraint. Path flows are adjusted so that the distribution of fitted flows across the types

matches a given distribution. The trip type constraints are enforced within the inner loop, as shown in Figure 11.

Figure 11 The PFE extended to include trip types

Input network, traffic counts ( $m_i$ for all $i \in C$ ), signal times, prior OD matrix, dispersion parameter ( $\alpha$ ), tolerances ( $x_i$ for all $i \in C$ )
Set $M_i = 1$ for all $i \in C$ , $v_i = 0$ for all $i \in U$ , $P = \emptyset$ (the empty set) and set $n = 1$
Repeat
Set $c_i = (1/n) c_i(v_i) + (1 - 1/n) c_i$ for all $i \in U$
Set reduced link cost to $c_i(v_i) - (1/\alpha) \ln M_i$ for all $i \in C$ and $c_i$ for all $i \in U$
Generate paths with least reduced cost and add new paths to $P$
Set $t_j = \sum_{i \in C} \delta_{ij} c_i(v_i) + \sum_{i \in U} \delta_{ij} c_i$ for all $j \in P$
Set $h_j = Q_w \exp(-\alpha t_j) / \sum_{j \in P(w)} \exp(-\alpha t_j)$ for all $j \in P$
Repeat
For each $i \in C$
Set $h_j = h_j n_k \sum_{j \in P} h_j / (\sum_{k \in K} n_k \sum_{j \in P(k)} h_j)$
For each $k \in P(k)$ and for each categorization of trips
Set $v_i = \sum_{j \in P} \delta_{ij} h_j$
Unless $(1-x) m_i \leq v_i \leq (1+x) m_i$ set $M_i = M_i m_i / v_i$
Set $h_j = h_j m_i / v_i$ for all $j \in P$
until adequate convergence with respect to link flows
Set $n = n + 1$
until no new paths are found
Output path flows, path travel times

## 5.7 PFE Data Requirements

### 5.7.1 Data inputs and outputs

#### *Inputs:*

Links represent logical entities defined by grouping together lanes with the same characteristics and favourable traffic light stages. This last requirement may be relaxed if such a level of detail is not achievable and/or necessary. The requirement is for a map, on paper or in electronic format, as detailed as possible, and the following static and dynamic data. The parameters tagged with a ‘\*’ are optional and can be substituted by standard values when not available.

#### *Static data (for each link):*

- Connections with downstream links and downstream nodes (node numbers have to be used when there are downstream signals);
- origin (YES-NO) or destination (YES-NO);
- length and free speed (\*) or free flow travel time;
- speed-flow relationship for freeway links (\*);
- number of lanes;
- saturation flow per lane (\*);
- type of link (priority, non priority, signal controlled);
- presence of detectors and their reliability (YES/NO + reliability percentage);

#### *Dynamic data (for each link, every 5-15 minutes):*

- green times and cycle times if signals are present;
- measures (flows) from count stations;
- OD demands (actual or estimated, to be used as weights or constraints - see later).

#### *Outputs:*

Path flows (and, implicitly, OD matrices) and travel times, as well as link delays and link flows where not directly measured. It is worthwhile mentioning that those outputs do not di-

rectly affect the driver. Between them and the end user there is an intermediate layer represented by transport planners, traffic managers, producers of traffic monitoring and control who are in charge of taking action according to the **PFE** outputs.

### 5.7.2 Use of O-D information

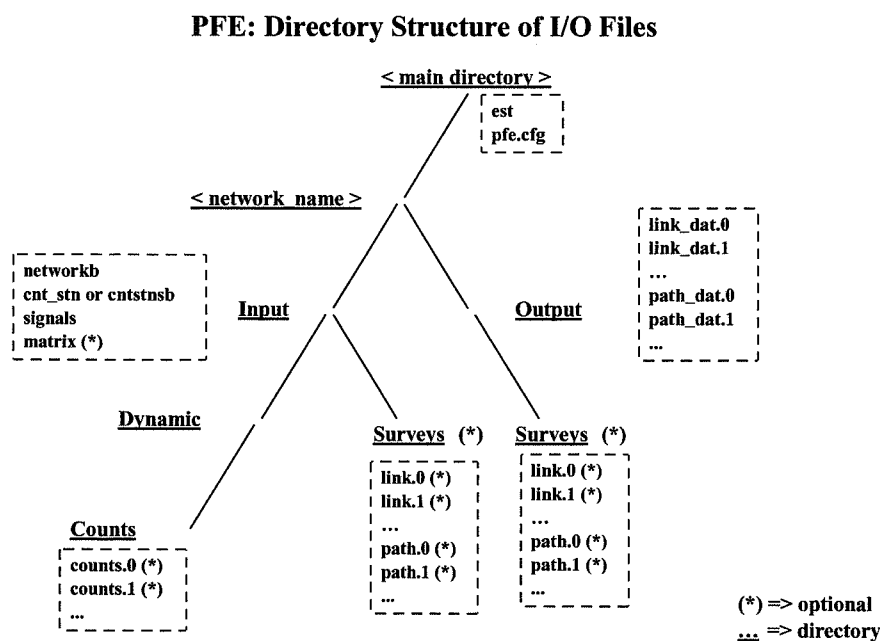
By default, any destination is reachable by any origin. In that case the input (optional) file *matrix* containing the OD data is composed of only 1s. There are three possibilities about the knowledge of OD information:

- (1) The user has no information on OD flows. In this case the program will run using no OD information.
- (2) The user has a library of historical OD matrices obtained from previous surveys and/or estimations and wants to use them, for example, in on-line operations. Those OD values represent weights and the **PFE** produces up-dated OD tables. Obviously, the user can also define directly the weights for each OD couple. In this case, he can use any value. If he sets 0, that implies that no flow is assigned to the routes between that origin and destination.
- (3) The user knows exactly the OD matrices or a subset of them and wants to analyse the traffic conditions for that particular period of time. In that case those values represent new constraints (in addition to the possible constraints on detectors measurements) that will affect the flow estimation process which has to reproduce them and determine other network variables like, for instance, journey times and path flows. This kind of functionality can be used as a Transportation Planning tool in off-line operations.

### 5.7.3 PFE data structure

The current **PFE** file structure is detailed in Figure 12. A short explanation is given to clarify how the interfaces between existing systems and **PFE** are to be made. As mentioned above, '\*' means optional. The directories are underlined. This file system is being used for off-line application. For application at test sites this structure might require slight changes to the files related to the time-dependency.

Figure 12 PFE – directory structure of I/O files



The details of the files are as follows:

- **est**: Executable which implements the Path Flow Estimator.
- **pfe.cfg**: Configuration file where the user specifies network name, confidence intervals for constraints, maximum number of inner and outer loops, value of the dispersion parameter alpha which governs the sensitivity to path cost, some input/output settings, minimum flows and delays to be used in the stopping criteria, possibility of re-scaling the OD trip table, and some others settings of minor importance.
- **networkb**: Contains the static data from the network that have been specified in the I/O section above.
- **cnt\_stn** or **cntstnsb**: Contain static information on the detectors available for each link and their reliability (only cntstnsb).
- **signals**: Associates to each stage of each node (junction), as specified in networkb, a green and cycle time.
- **counts.0**, **counts.1**, ...: Contain data on flows per time slice obtained from detectors. The suffix in the file name represents the time slice number.

- **link\_dat.0, link\_dat.1, ...**: Contain for each link measured (when a detector is available) and fitted flow, under-layed travel time, delay, and degree of saturation (these are output files).
- **path\_dat.0, path\_dat.1, ...**: Contain for each path the route, flow and travel time (these are output files).
- **link.0, link.1, ..., path.0, path.1, ...**: In the Input directory contain data from surveys, whereas in the Output directory detail the differences between fitted and observed values of path and link flows.

#### 5.7.4 Data generation: Interfaces for the conversion of data to PFE format

In both online and offline applications, static and dynamic data needs to be filtered and adapted to the **PFE** I/O structure. A network-specific program written in 'C' language, referred to as **an\_1**, has been developed to produce the translation mainly of the static data when required. At present the program translates the following networks into **PFE** format: a) Lyon; b) Piraeus (limited to specific operation); c) Stockholm; d) Toulouse; e) Turin SUPERVISOR; f) Turin UTOPIA. In addition to **an\_1**, site-specific dynamic data might need to be translated / adapted to the **PFE** structure. **An\_1** has an interface to Arc/Info, which can be used to define the study area within the network of interest. In other words, **an\_1** will produce an Arc/Info network which can be modelled to the extent required within the GIS package and, then, re-read into **an\_1** for it to produce the corresponding reduced **PFE** network.

## 5.8 Swiss network and data

### 5.8.1 Static' network data

The **VISUM** network (file *netz-strasse-1999.net*) provided has the following characteristics:

- 3066 zones
- 7426 nodes
- 20480 links

Table 9 shows link types (VISUM numeration) and their frequencies (how many times they appear). Link type '70', which accounts for 70% of the links) has a capacity of 15600 veh/day and a free flow speed of 50 km/h. Table 10 shows capacities (veh/day) and their frequencies.

Table 9 VISUM link types and frequencies

VISUM link type	Frequency
10 (motorway, 6 lines)	70
20 (motorway, 4 lines)	946
30 (motorway, 3 lines)	30
40 (motorway, 2 lines)	396
50 (highway, 4 lines),	470
60 (highway, 3 lines)	196
70 (regional roads, 2 lines)	14488
80 (regional roads, 2 lines)	3348
90 (external roads, not CH-roads)	518
91, 92, 93 (ferry, other)	18

Table 10 Capacities (PCU/day) and their frequency

Capacity	Frequency
6000	6
14400	3874
15600	14486
18000	396
22800	196
24000	2
26400	30
30000	4
48000	1416
72000	70

### 5.8.2 Network measurements

#### *Measured link flows*

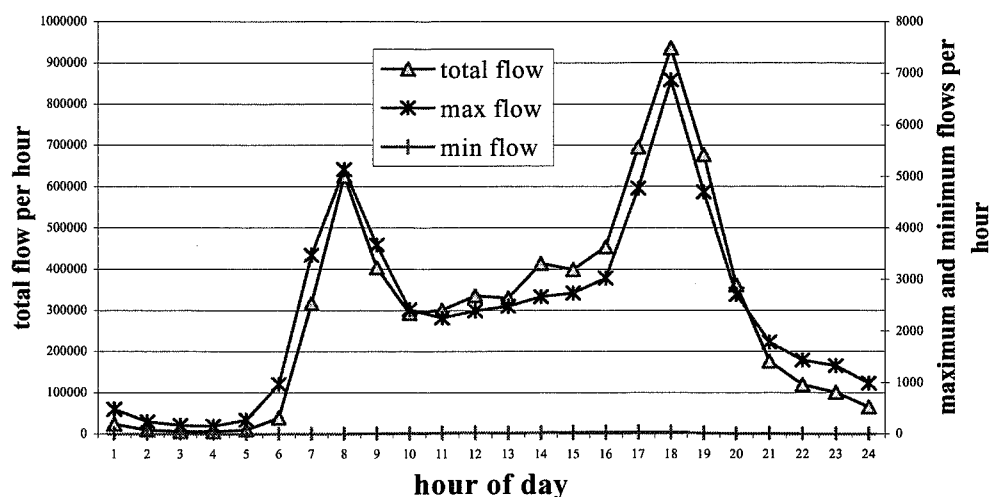
Data provided from the file *static-counting-data-22-april-03.str* (VISUM format) are in veh/day and contain 988 (out of 20480 original VISUM links) flow measurements. Flows range from 297 veh/day to 47090 veh/day.

In addition to that, 24 files containing hourly link flows from ASTRA and UNO (with names such as *dwv-astra-uno-16-und-17k.str*, for instance) were provided with the characteristics reported in Table 11 and Figure 13.

Table 11 Daily distribution of flows from traffic couts (stats)

<b>hour</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>total flow</b>	23746	9416	5835	5549	10091	39311
<b>max flow</b>	481	238	168	152	274	962
<b>min flow</b>	0	0	0	0	0	0
<b>hour</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
<b>total flow</b>	316484	625898	403274	292604	300544	335535
<b>max flow</b>	3472	5130	3669	2416	2253	2391
<b>min flow</b>	1	2	6	12	20	22
<b>hour</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>
<b>total flow</b>	329311	413947	399398	453491	694959	935126
<b>max flow</b>	2480	2665	2737	3026	4765	6866
<b>min flow</b>	18	23	30	33	35	34
<b>hour</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>
<b>total flow</b>	677014	361344	176476	119808	100614	65012
<b>max flow</b>	4697	2707	1782	1434	1321	988
<b>min flow</b>	17	8	3	1	1	0

Figure 13 Daily distribution of flows from traffic counts (graph)



*Surveyed/calculated OD matrix*

An initial OD matrix has been provided for the 3066 zones representing traffic sources and sinks for the Swiss network. It is made of 443595 OD relationships.

Apart from easing the memory allocation (in fact the total number of possible OD relationships, excluding trips from a zone to itself, is  $3065 * 3065 = 9394225$  – about 20 times more memory would be required) these provide the initial flows per OD. The total number of trips from the OD matrix is 5276970.

*Surveyed trip length distribution*

Table 12 shows the breakdown of number of trips per distance band as provided by Microcensus data.

Table 12 Number of trips per distance band

Distance (km)	Number of trips
0-5	1443530
5-10	1441844
10-15	770892
15-20	438500
20-25	294528
25-50	581736
50-75	155020
75-100	68186
100-150	62416
150-200	31114
200-250	6846
250+	9670

*Surveyed total number of trips per day*

Microcensus surveys have been factorized by 231 to obtain the expected total number of trips per day in Switzerland. As a result 6 million trips have been used as an estimate of the total number of trips per day across the country.

### 5.8.3 Generation of the PFE network and inputs

Table 13 shows a summary of the main elements converted into PFE format. It should be noted that the PFE uses the VISUM connectors as additional links. Therefore the total number of PFE links is: 20480 (original VISUM links) + 3066 \* 2 (connectors, linking origin/destination centroids representing zones to nodes) = 26612 links.

When an OD matrix is present like in this case, only zones generating traffic from the input matrix will produce flows in the assignment and traffic will be directed only to destination zones as specified in the matrix.

Table 13 Generation of the PFE network for Switzerland

nr.	source	VISUM		PFE		total
		element	nr.	element	nr.	
1	<i>netz-strasse-199.net</i>	links	20480	links	20480	
2	<i>netz-strasse-199.net</i>	zones	3066	origins	3066	
3	<i>netz-strasse-199.net</i>			destinations	3066	links 26612
4	<i>matrix.1995.fma</i>	OD relations	443595	OD relations	443595	"valid" OD rel. 443595
5	<i>static-counting-data-22-april-03.str</i>	1-day link counts	988	link counts	988	link counts > 0 988
6	<i>dwv-astra-uno-0-und-1k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 842
7	<i>dwv-astra-uno-1-und-2k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 220
8	<i>dwv-astra-uno-2-und-3k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 173
9	<i>dwv-astra-uno-3-und-4k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 172
10	<i>dwv-astra-uno-4-und-5k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 270
11	<i>dwv-astra-uno-5-und-6k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 872
12	<i>dwv-astra-uno-6-und-7k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
13	<i>dwv-astra-uno-6-und-7k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
14	<i>dwv-astra-uno-7-und-8k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
15	<i>dwv-astra-uno-8-und-9k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
16	<i>dwv-astra-uno-9-und-10k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
17	<i>dwv-astra-uno-10-und-11k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
18	<i>dwv-astra-uno-11-und-12k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
19	<i>dwv-astra-uno-12-und-13k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
20	<i>dwv-astra-uno-13-und-14k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
21	<i>dwv-astra-uno-14-und-15k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
22	<i>dwv-astra-uno-15-und-16k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
23	<i>dwv-astra-uno-16-und-17k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
24	<i>dwv-astra-uno-17-und-18k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
25	<i>dwv-astra-uno-18-und-19k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
26	<i>dwv-astra-uno-19-und-20k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
27	<i>dwv-astra-uno-20-und-21k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
28	<i>dwv-astra-uno-21-und-22k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
29	<i>dwv-astra-uno-22-und-23k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 902
30	<i>dwv-astra-uno-23-und-24k.str</i>	1-hour counts	899	link counts	899	link counts > 0 898

## 5.9 PFE analysis of the Swiss network

### 5.9.1 Constraints enforcement process

The PFE uses the data available in the following order, after the path building process for one outer loop is completed:

- a) It first assigns the OD matrix (5276970 trips – see chapter 5.8.2) onto the available paths using a logit assignment.
- b) It then enforces the trip length distributions (see chapter 5.8.2) by stretching or shrinking the path flows per distance band; the total number of trips (5276970) in the network doesn't change.
- c) Then it multiplies the resulting path flows by a factor (see chapter 5.8.2) that guarantees that the total number of trips provided by the surveys (6 million) in the network is met.
- d) Finally it loops once through the link measurements (see chapter 5.8.2) and changes fitted path flows in order to 'reproduce' the measurements.
- e) If convergence or a stopping condition (such as diverging PFE multiplication factors  $M_i$  – see Table 8 or maximum number of inner iterations reached) are not met, then it goes back to b).

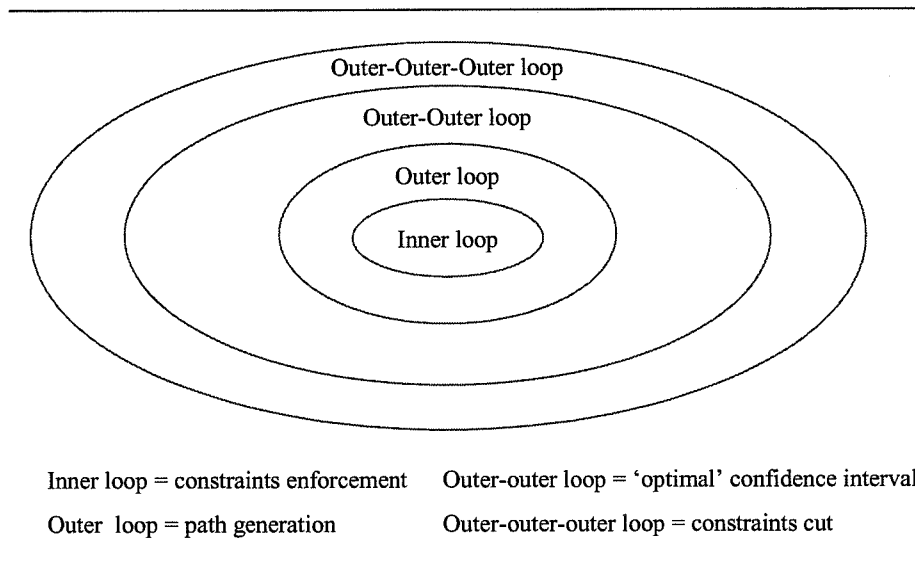
It should be noted that a recent improvement to the program has been to allow for a randomized access to the measured links (point d above). This way, the risk of an order-dependent assignment are minimized. The PFE will check if the last inner loop did converge and, if not, start the next one from a link randomly chosen and, then, continue in sequence. This possible change to the order in which the enforcement is conducted is in particular important for large networks because the first links with measurements as read from the network files are also the first to be modified in the inner loop and the likeliest to be outside their confidence intervals (see 5.4) if convergence is not reached.

### 5.9.2 Analysis of convergence

Convergence of the iterative process can either be guaranteed or not depending on the program settings. Convergence in this case means that all constraints used (which are not necessarily the same number as the constraints offered by the system) are within the confidence intervals (CI) set out by the user, for example that all estimated (fitted) flows are within 20% of the measurements. Figure 14 shows how the traditional outer (for path generation) and inner (constraint enforcement) loops work together with 2

further loops for the identification of 'optimal' CI (outer-outer loop) and constraints cut (outer-outer-outer loop).

Figure 14 PFE iterative loops



Whilst the original PFE would only use inner and outer loops, the current version offers the additional possibility to have a 'guaranteed' convergence on the constraints used. If the user specifies, for instance, 20% and 40% as the minimum and maximum CIs respectively, then the PFE will;

- a) First set CI = 20% in the outer-outer loop;
- b) Run outer and inner loop: if not convergence, then set CI = 40% in the outer-outer loop;
- c) Run inner loop: if convergence, then set CI = 30%;
- d) Run inner loop: if convergence then try  $CI = (30 - 20) / 2\% = 25\%$  and so on until the rate of change is lower than a certain threshold.

If both 20% and 40% CI do not guarantee convergence, then the PFE resolves to identify what is the constraint most likely to be in contrast with the others and removes it as a constraint. This is why convergence is guaranteed and the link with the 'suspect' measurement is flagged up for revision as it could bear wrong data. Convergence is ensured because all links used in the inner loop as constraints have to be within the CI for the process to stop.

Although time consuming, the identification of the best CI within a user-specified range can prove to be very important as clarified in one of the next sections (see chapter 5.9.3).

Figure 15 and Figure 16 show 2 different runs of the PFE, with different CIs for the enforcement of link constraints. Tests were run on 6 x 248 MHz processor Sun Enterprise 3000 with 1GB of real memory - Unix Operating System. On a Intel ® Pentium ® 4 processor, with enough RAM to cope with the Swiss network (1 GB are more than sufficient) the running times would be at least 10 times lower.

In the first outer loops of both cases the PFE builds 443595 paths. In fact, free flow speeds are assumed on all links as the first outer loop uses an 'empty' network. Then the number of additional paths built changes as follows:

30% CI] 1) 443595; 2) 245147; 3) 81722; ...;

10% CI] 1) 443595; 2) 251489; 3) 88590; ...;

It is evident from these figures that with lower CIs, more paths are generated because the link-specific factors  $M_i$  that reflect the pressure exerted by the constraints on the paths, are more likely to be pushed either towards  $+\infty$  or 0, thus producing higher/lower shadow prices for path generation than when CIs are higher. In particular, for the 10% CI, the PFE realises that the paths generated are not covering enough possible routes to accommodate all the demand and, as a result, will increase the shadow prices on the links used in order to encourage new paths to be built.

Figure 15 and Figure 16 show also the following statistics on the convergence of the links:

- a) Links not updated because found within CI;
- b) Links updated because found outside CI, whether above or below CI (for example if the measured flow on a link is 100 vehicles and the fitted flow is 50 vehicles then if CI is 10%, that link is marked as 'below CI');
- c) Zero (without a path);

The number of links converged/outside/zero is shown every 5 inner loops.

In terms of speed of convergence, Table 14 shows the sequence of links converged (within confidence intervals) out of 988 measured links (no cutting involved).

Table 14 Convergence statistics for links

Inner loop	Links converged 30% CI	Links converged 10% CI
5	563	232
10	967	895
15	970	956
20	970	962
25	970	962
30	970	962
35	970	962

While in the case with 30% CI a few iterations are sufficient for each inner loop to converge, the case with 10% CI requires many more iterations and it never converges. In other words the PFE cannot find a solution for which all the measured links used (978 initially and, then, 980 as further 2 are used by paths) have estimated flows within 10% of the measured values. In the light of this, the inner loop has been changed to start from a randomly selected measured link when a former iteration did not converge, as explained in 5.9.2.

Figure 15 Convergence behaviour for 30% confidence interval

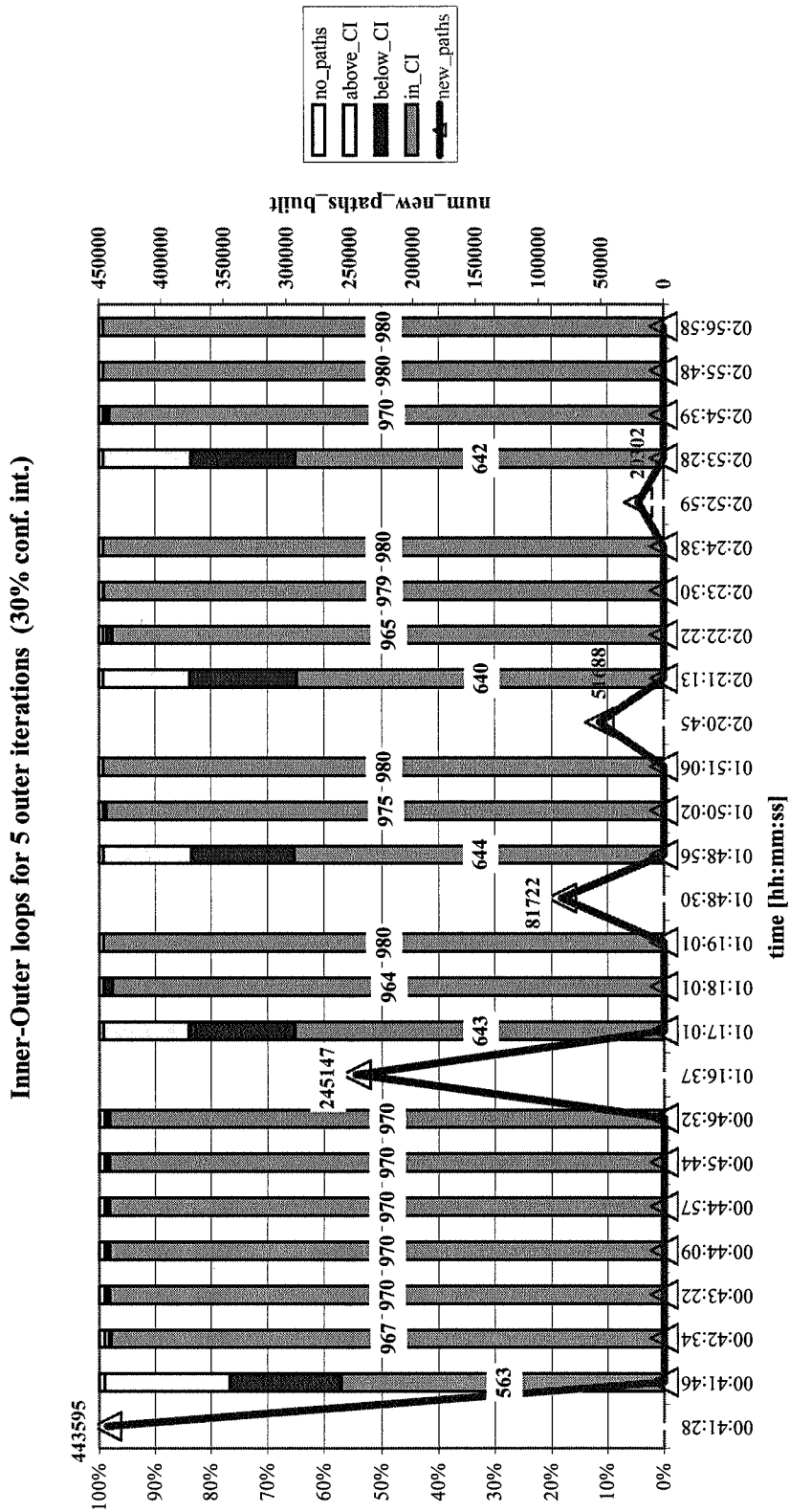
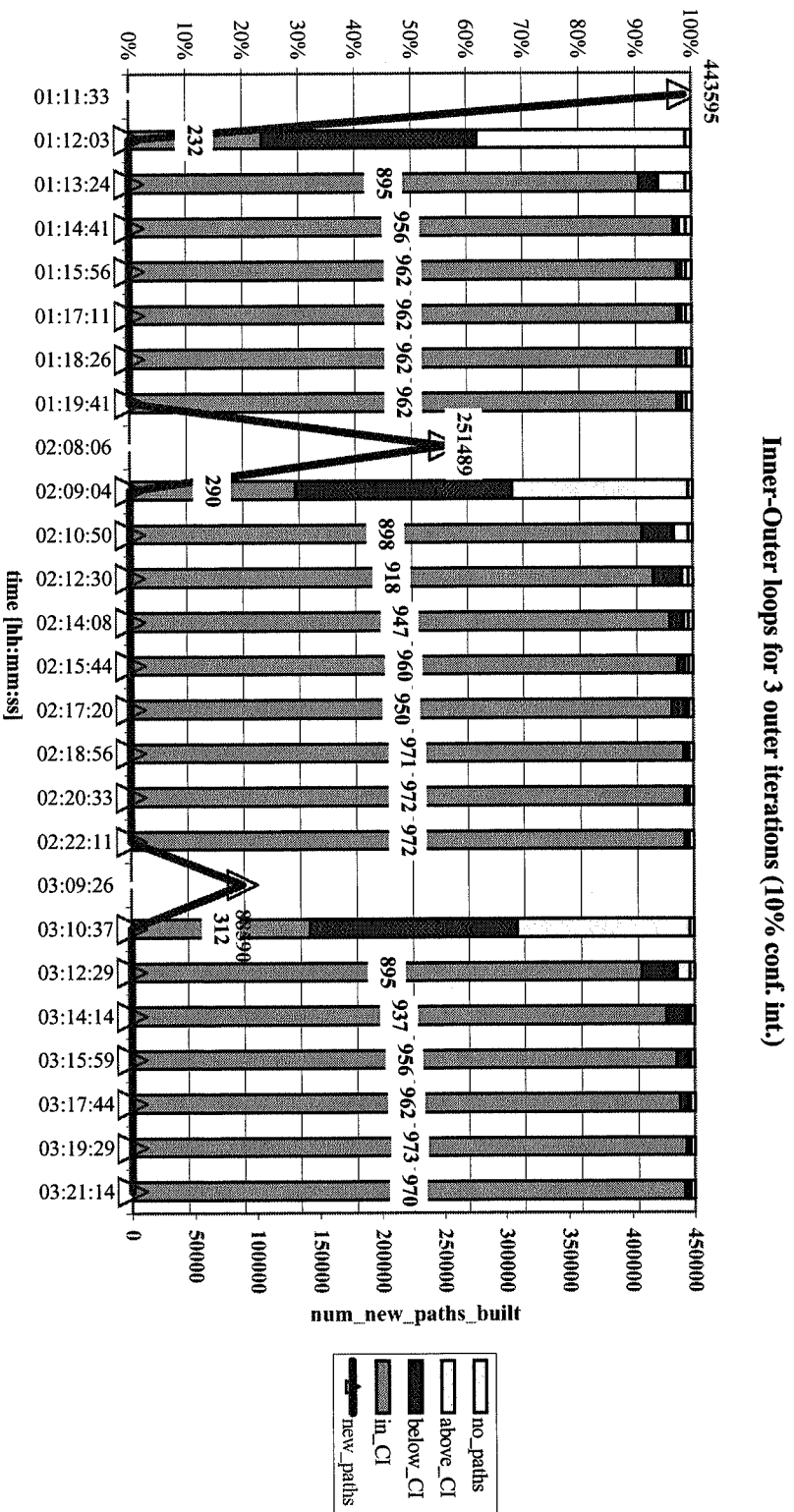


Figure 16 Convergence behaviour for 10% confidence interval

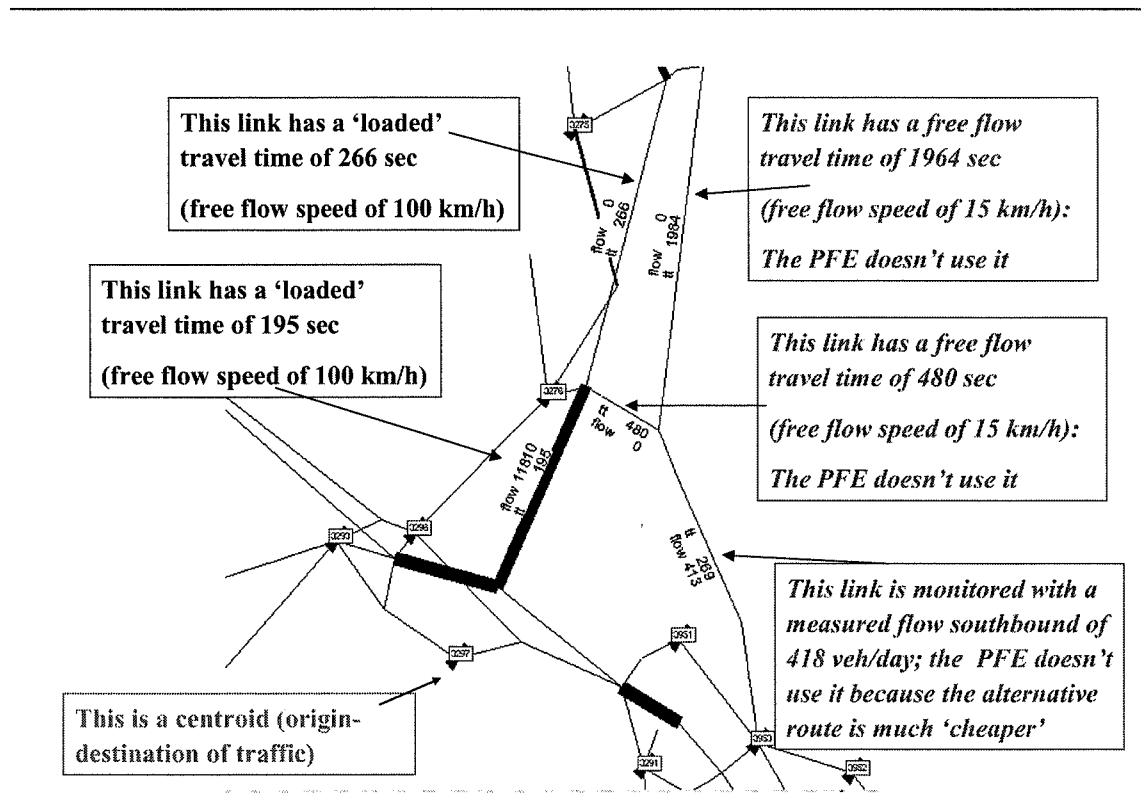


It has also to be pointed out that a number of links with measurements are not used by paths. These are initially 10 and then 8 for both cases (CI = 30% or 10%), despite the PFE trying to force new paths through those links by reducing the costs to 0 on them for path generation. The absence of paths on a link means that the link is not used in the assignment, thus there is no fitted flow for it.

Figure 17 shows one example of this situation where the southbound link has a measured flow of 418 vehicles per day and is not used by the PFE because the upstream links have very high free flow travel times due to free flow speeds of 15 km/h, as opposed to the alternative route, presumably a motorway, whose free flow speed is 100 km/h. As a result, any paths through that measured link would not be as attractive as those using the alternative route which is obviously not congested after assignment (degree of saturation around 20%). This example has been taken from the border with Liechtenstein.

In a situation like the one just described, if one needs the PFE to build paths across a particular link, dummy detectors with link-specific confidence intervals can be used to force the PFE to use that link. In the case of Figure 17, this could be done by adding a dummy detector to any or both the links directly upstream.

Figure 17 Example of measured link without paths (border with Liechtenstein)



### 5.9.3 Comparing PFE estimates against measurements

To test the results for Switzerland, a subset of 5% of measurements have been randomly selected to be used as tests and verify how the PFE performs on those. The selection was done using a reproducible random seed with the only constraint that the links chosen were not be terminal links (origin-destinations). This test has been carried out both for the 1-day data and for the 24 1-hour time slices. In the first case the PFE was run in static mode using BPR (see U.S. Bureau of Public Roads, 1964) VISUM delay functions whilst in the latter case, the PFE was run in time-dependent mode using Kimber & Hollis (1979) delay functions, which are more appropriate for time-dependency. This analysis shows that the (absolute) error varies by the time of day and is highest when the demand is highest (see also Table 13).

Figure 18 Measured vs PFE fitted flows for randomly generated links (1 day)

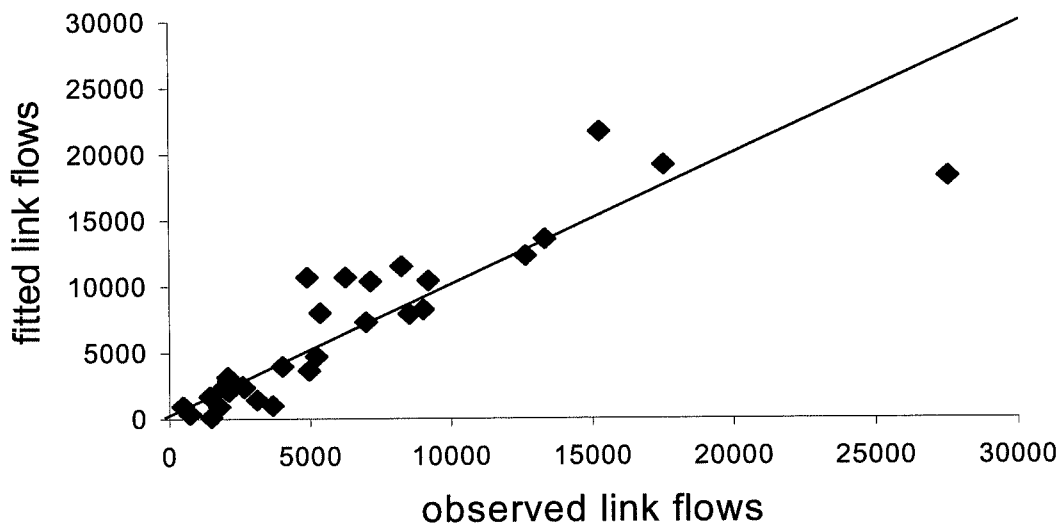
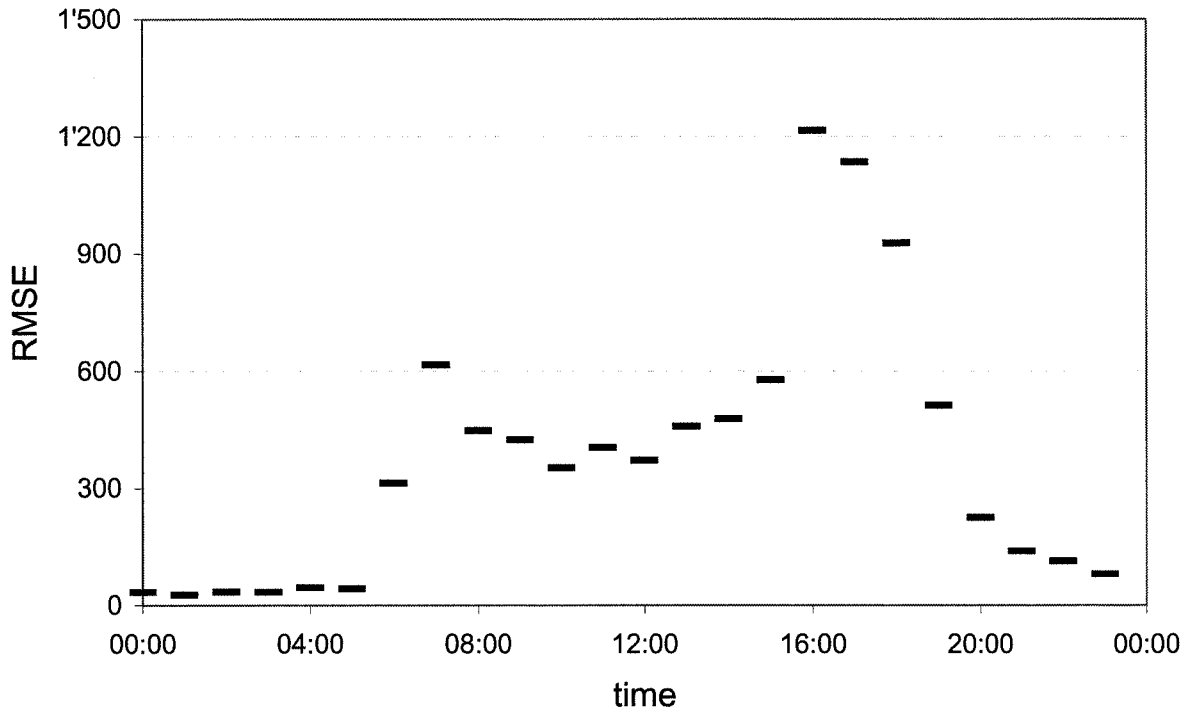
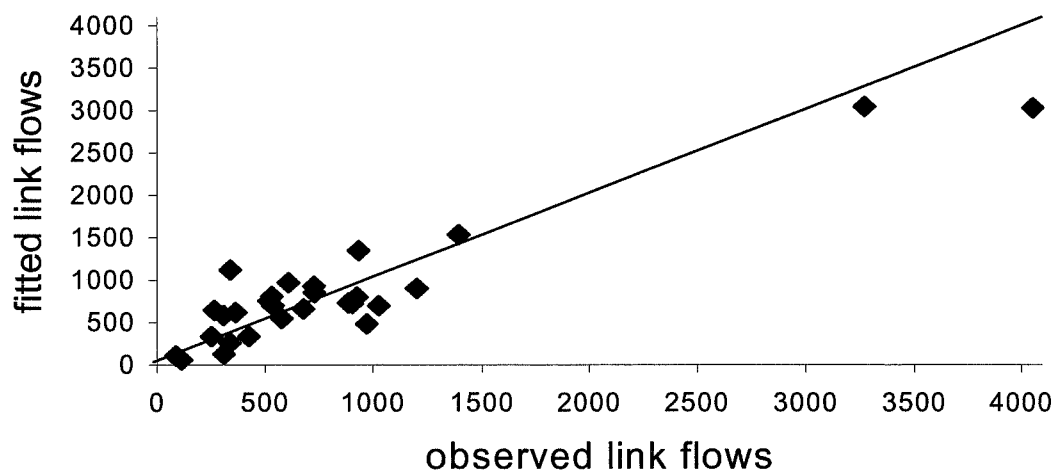


Figure 19 Comparisons of RMSE error for the 24 hourly and measured vs PFE fitted flows for randomly generated links



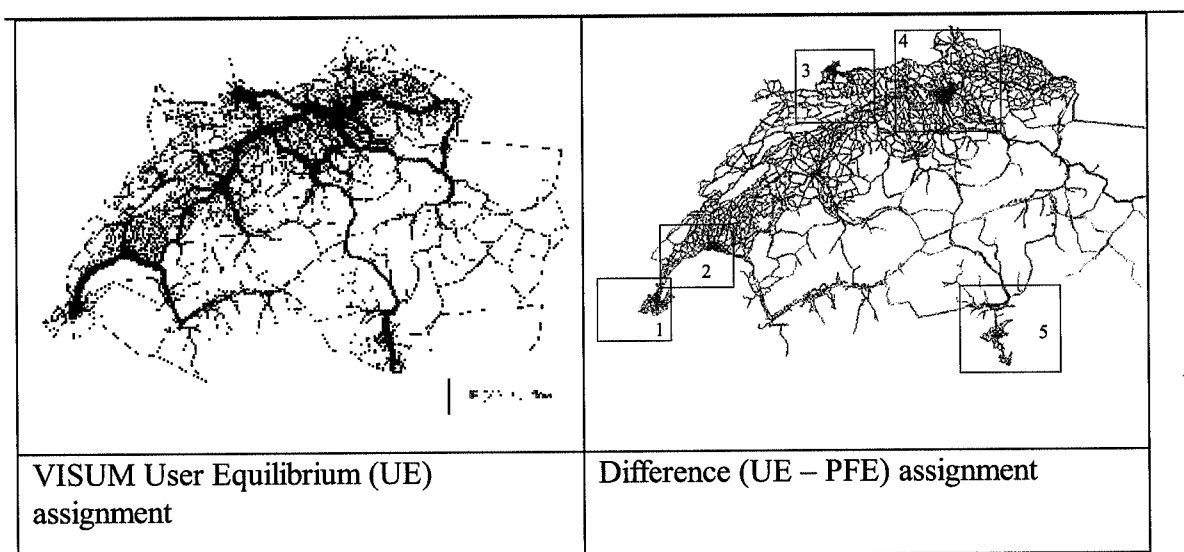
**17-18 o'clock**



### 5.9.4 Comparison PFE vs User Equilibrium assignment

Figure 20 shows to the left the results of a VISUM Deterministic User Equilibrium (UE) Assignment using the OD matrix generated by the PFE. To the right, the same results are compared with the PFE SUE assignment. The PFE used for these tests is version 3.2e, and it was run with 10 outer loops, 30% (non optimal) minimum = maximum confidence interval for link constraints,  $\alpha$  (dispersion parameter) = 0.1,  $\beta$  (commonality factor) = 0, BPR Capacity restraint functions (see U.S. Bureau of Public Roads, 1964); constraints on total number of trips (= 6M), trip distribution per distance band, and link measurements.

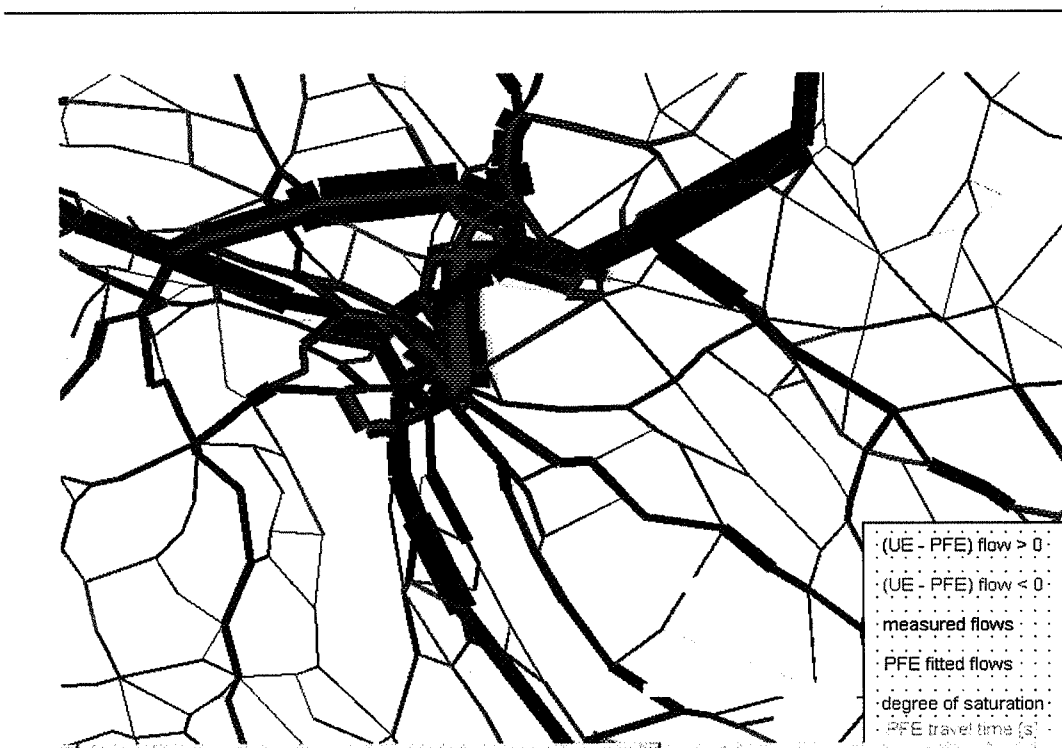
Figure 20 VISUM's User Equilibrium vs. PFE assignment



It can be noted that the differences are minimal and mainly identifiable in 5 areas. Excluding the Zurich area, UE flows exceed PFE flows by a maximum value of 19091 veh/day and PFE flows exceed UE flows by a maximum value of 19420 veh/day. For the Zurich area the maximum differences are respectively 42102 veh/day and 42538 veh/day.

Area 4 around Zurich, where there are bigger differences, is shown in Figure 21. In red it is shown where UE flows are greater than PFE flows and in light green the opposite.

Figure 21 VISUM's UE vs PFE's assignment - Zurich area

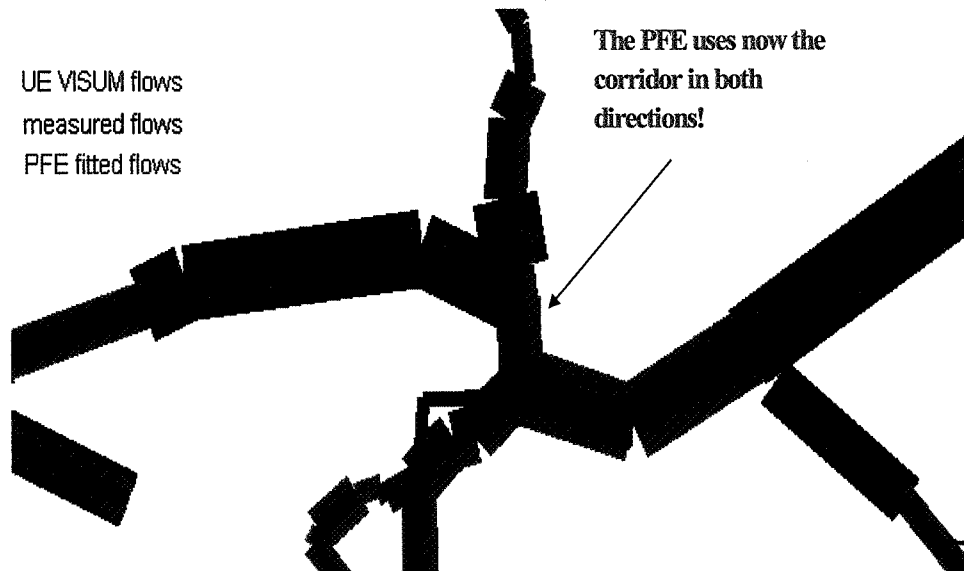


A simplified version with some annotation is shown in Figure 22. From this picture it is clear where the difference lies: the corridors north-south and south-north, despite the PFE having built 18683 and 16608 paths respectively, have been assigned only 1 trip per day southbound and 1673 trips per day northbound.

The response is that the PFE has solved the assignment problem by fulfilling all the slack (due to the 30% confidence interval) constraints without the need to use the corridor. Note that not all the 39056 vehicles travelling south from link 10233 will turn right to link 10235 as some will use a minor road travelling southwest which is not shown in the simplified Figure 22.



Figure 23 Assignment in Zurich area with 10% confidence interval



Alternatively to using confidence intervals, when it is known that traffic should use part of a network that is neglected by the PFE, dummy detectors with link-specific confidence intervals can be used. Another interesting aspect of the comparison PFE versus UE is that through UE alone it is not possible to guarantee that fitted and measured flows reside within a certain margin. As Figure 22 demonstrates, link 10235 westbound presents a measured flow of 40323 vehicles and UE estimates 24887 vehicles which is 38% lower. With the PFE, the fitted link flow is within 10% of the measured value if the user wants so.

## 6 Bündelung der Methoden und Erweiterung

In den bisherigen Anwendungen wurde der Path Flow Estimator (PFE) nicht auf so grosse Netze wie das Schweizerische Nationalstrassennetz angewendet. Aus diesem Grund musste das PFE-Programm in seiner Struktur entsprechend erweitert werden. Neben dieser Anpassung wurde das Programm vor allem in folgenden Punkten erweitert:

- Berechnungszeiten
- Implementierung eines neuen Routenwahl Ansatzes
- Neue Geschwindigkeitsfunktion für die Reisezeitberechnungen
- Asymmetrische Konfidenzintervalle bei einzelnen Zählstellen
- Festlegung der gesamten Reiseweitenverteilung
- Festlegung der Gesamtzahl Fahrten

Nachfolgend werden die Erweiterungen kurz beschrieben.

- Das Programm wurde weiterentwickelt, um die Anwendung auf einem Standard PC möglich zu machen. Die Berechnungszeit des Schweizerischen Strassennetzes auf einem PC (2.4 GHz - 1 GB RAM) wurde auf ca. eine Stunde Rechenzeit verkleinert. Das Programm kann jetzt auf Untersuchungsgebiete mit unbeschränkter Netzgrösse angewendet.
- Das Umlegungsmodell im PFE basiert auf einem stochastischen Nutzergleichgewicht. Bei diesem Verfahren muss ein Ansatz für die Nachfrageverteilung definiert werden. Bei der früheren Version von PFE wurde die Nachfrageverteilung auf der Grundlage des multinomialen Logit Modells (MNL) berechnet.

Die Unabhängigkeit von irrelevanten Alternativen ist eine sehr wichtige Charakteristik der MNL Modelle. In der englischsprachigen Literatur wird sie als *Independence from Irrelevant Alternatives* bezeichnet (IIA). Diese Eigenschaft besagt, dass das Verhältnis der Auswahlwahrscheinlichkeiten zweier Alternativen unabhängig von Verfügbarkeit und Charakteristik anderer Alternativen ist. Dies führt dazu, dass Logit-Modelle auf manche Fragestellungen, bei denen eine Korrelation zwischen den Störtermen der Alternativen besteht, nicht anwendbar sind. Für das Routenwahlmodell ist dies eine sehr wichtige Charakteristik, da zwei Alternativen (Routen) viele gemeinsame Eigenschaften haben können. Hier sind vor allem die gemeinsamen Streckenabschnitte (Überlappungen) wichtig.

Aus diesem Grund wurde im PFE ein neuer Ansatz implementiert mit dem die IAA Eigenschaft fast vollständig korrigiert wird.

Dafür wurde das so genannte C-Logit Modell verwendet, das Cascetta et al. (1996) für diese Zweck entwickelt haben.

Die Formulierung lautet:

$$P(k) = \frac{\exp(c_k - cf_k)}{\sum_l \exp(c_l - cf_l)}$$

wobei  $cf_k$ , der Gemeinsamkeitsfaktor für Route k, ein Mass für den Ähnlichkeitsgrad der Route k mit anderen Routen in einer Quell-Ziel-Beziehung ist. Dieser Faktor kann auf verschiedene Arten spezifiziert werden, bei Cascetta et al. (1997) wird er wie folgt berechnet:

$$cf_k = \alpha \cdot \ln \left[ 1 + \sum_l \left( \frac{L_{kl}}{L_k^{1/2} \cdot L_l^{1/2}} \right)^\gamma \right]$$

wobei  $L_{kl}$  die Länge (Kosten) der zugehörigen Strecken zu Route k und l und  $L_k, L_l$  die gesamte Länge (Kosten) der Route k und Route l ist.

Das stochastische Nutzergleichgewichts-Modell berücksichtigt neben unterschiedliche wahrnehmung der Reisekosten auch die belastungsabhängigen Reisekosten einer Strecke. Damit werden die aktuellen Reisezeiten durch eine festgelegte Zeit-Belastungsfunktion (Geschwindigkeitsfunktion) berechnet. Dafür wurde hier die für das nationale Strassennetz besser geeignete BPR-Funktion (Bureau of Public Roads) implementiert:

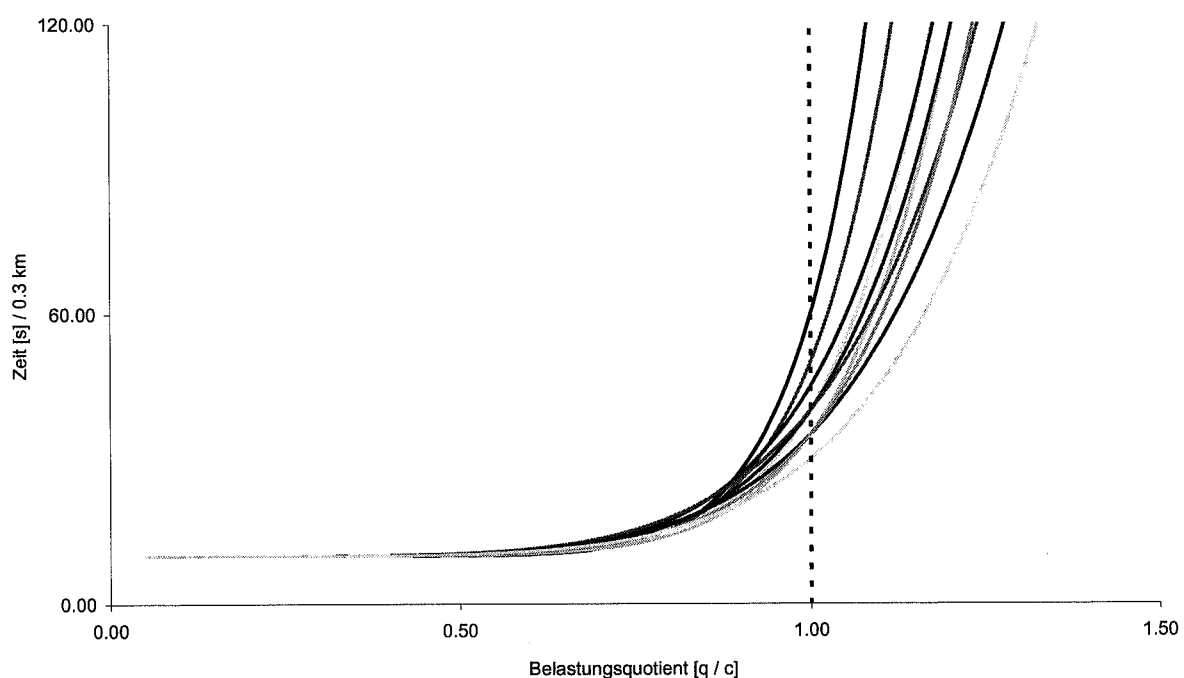
$$t_{\text{aktuell}} = t_0 \times \left( 1 + a \times \left( \frac{q}{c} \right)^b \right)$$

wobei:

$t_{\text{aktuell}}$	aktuelle Fahrzeit auf einer Strecke im belasteten Netz
$t_0$	Fahrzeit auf einer Strecke bei freiem Verkehrsfluss
$q$	aktuelle Streckenbelastung
$c$	Leistungsfähigkeit (PW Einheiten/Zeiteinheit)
$a, b$	benutzerdefinierte Parameter

Der Funktionsverlauf wird durch die Parameter  $a$  und  $b$  bestimmt. Dadurch können verschiedene Funktionstypen definiert werden. Die Grundlage dafür kann aus den gleichzeitigen Messungen der Fahrtgeschwindigkeit und der Verkehrsstärken erhoben werden. Daraus lassen sich die so genannten  $v/q$  Diagramme abbilden, aus denen dann auch diese Funktionen abgeleitet werden. Da solche Daten für die Schweiz zur Zeit nicht zur Verfügung stehen, wurden hier Erfahrungsparameter nach Streckentypen aus Deutschland übernommen (siehe Abbildung 24 ; Parameter  $a$  zwischen 2 und 3, Parameter  $b$  zwischen 5 und 8).

Abbildung 24 Geschwindigkeitsfunktionen nach Typen



- Um die Fehlergrösse bei den Zähldaten zu berücksichtigen wird ein asymmetrisches Konfidenzintervall ermöglicht. Die Fehlergrösse bei den Zähldaten (im Bezug auf die Modellierung) wird im Wesentlichen durch die folgenden zwei Faktoren verursacht:
  - Messfehler bzw. "ungenaue Zähler"
  - einen unterschiedlichen Anteil an intrazonalem Verkehr in Bezug auf die im Modell vorhandene Zonierung.

Diese Fehler sind für die einzelnen Zählstellen sehr unterschiedlich und müssen getrennt betrachtet werden.

Um den Anteil des intrazonalen Verkehrs im PFE zu berücksichtigen, müsste ein allgemein gültiger Ansatz definiert werden. Da eine solcher Ansatz mit kalibrierten Modellparametern für die Schweiz nicht existiert, sollte der Anteil des intrazonalen Verkehrs von den Anwendern extern berechnet bzw. geschätzt, und die Zählwerte dementsprechend korrigiert werden. Im PFE werden die eingegebenen Zählwerte als interzonaler Verkehr betrachtet.

Damit werden durch das vorgegebene Konfidenzintervall nur die Messfehler und die erlaubten Abweichungen gegenüber den Zählwerten abgebildet.

- Eine zusätzliche Erweiterung ist auch die Festlegung der gesamten Reiseweitenverteilung der Quell-Ziel-Matrix. Damit ist es möglich den Anteil oder die Anzahl der Fahrten innerhalb einer bestimmten Reiseweite festzulegen. Dies bezieht sich nur auf die Reiseweitenverteilung der gesamten Matrix, nicht aber auf die Nachfrageverteilung bei einzelnen Querschnitten.
- Die Gesamtzahl Fahrten in der Quell-Ziel-Matrix kann festgelegt werden.

## 7 Aufbereitung der Zähldaten

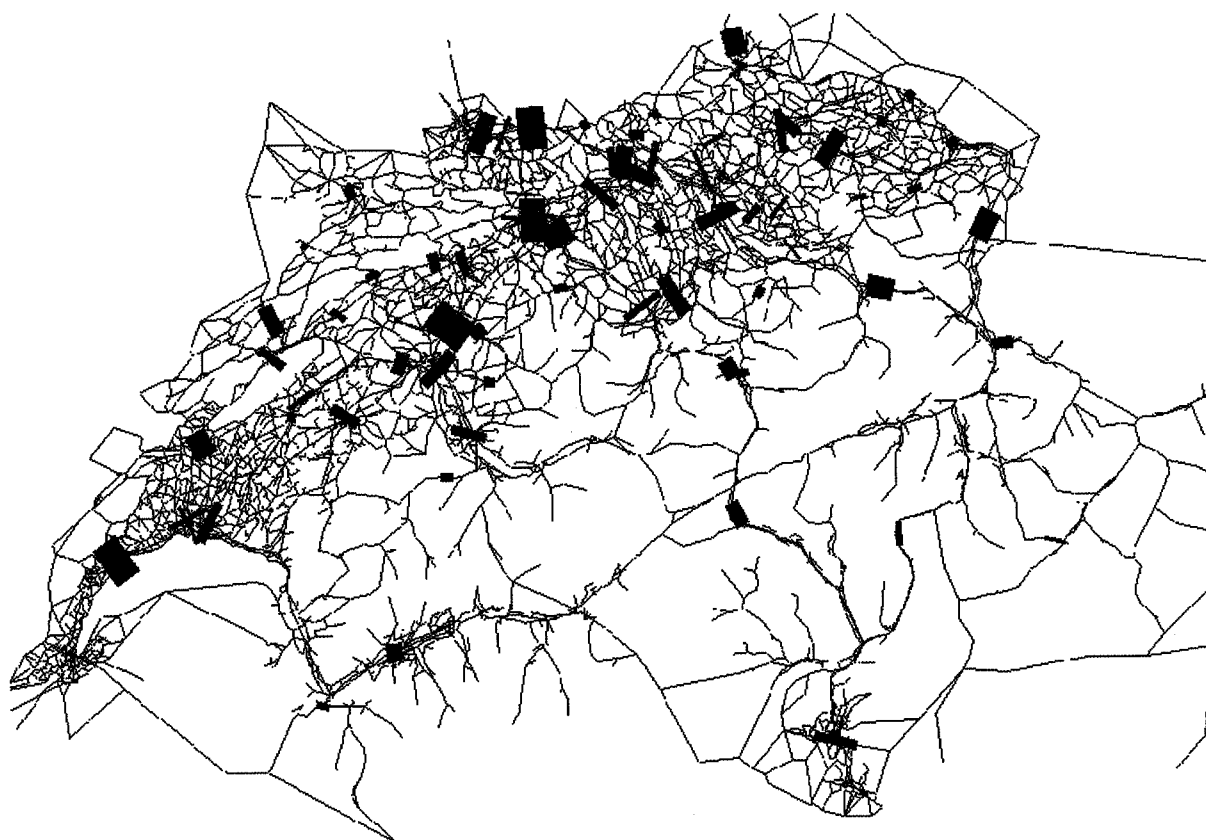
Wie in Kapitel 2 schon beschrieben wurde, werden hier die Zähldaten aus zwei wesentlichen Datenquellen verwendet:

- Automatische Strassenverkehrszählungen von ASTRA
- Schweizerische Strassenverkehrszählungen

Beide Datensätze wurden für das Jahr 2000 erhoben. Betrachtet wurde ein durchschnittlicher Werktagsverkehr mit Personenwagen (PW). Für das dynamische Modell wurden die Stundenfeinen Belastungen berechnet.

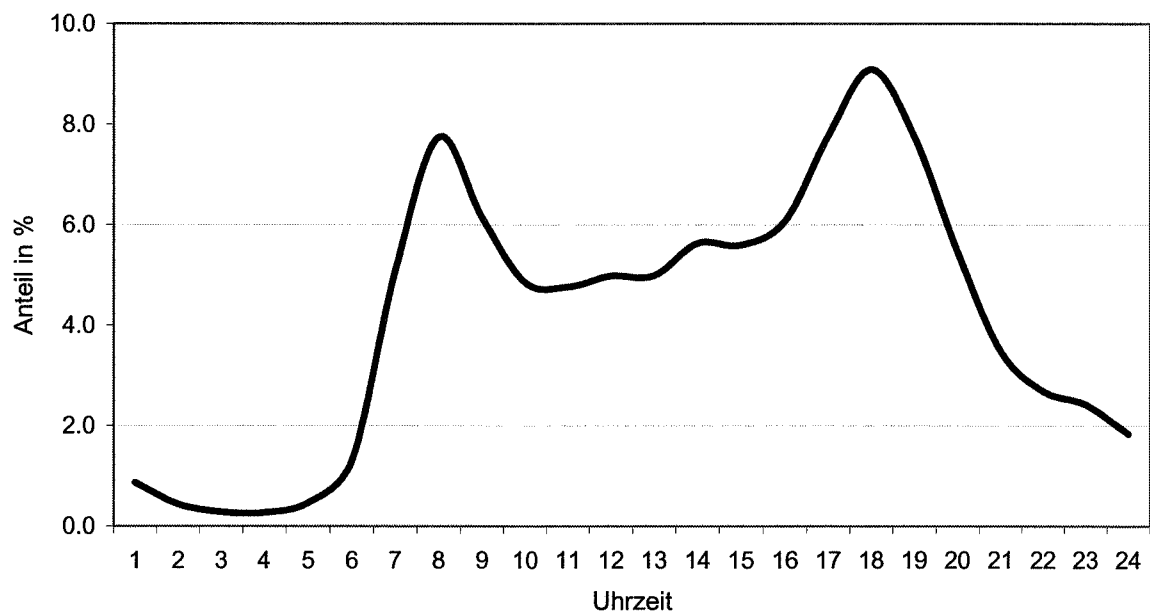
- Vom Bundesamt für Strassen werden die Zähldaten für den Personenverkehr (ASTRA) stundenfein und nach Richtungen für einen durchschnittlichen Werktag hochgerechnet. Damit könnten diese Daten durch die Streckenzuordnung direkt in das bestehende Strassennetz im Verkehrsmodell übernommen werden. Die Strecken und die gezählten Streckenbelastungen bei den vorhandenen ASTRA Zählstellen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

Abbildung 25 Zählstellen mit Automatischen Zählungen (ASTRA, 2000)



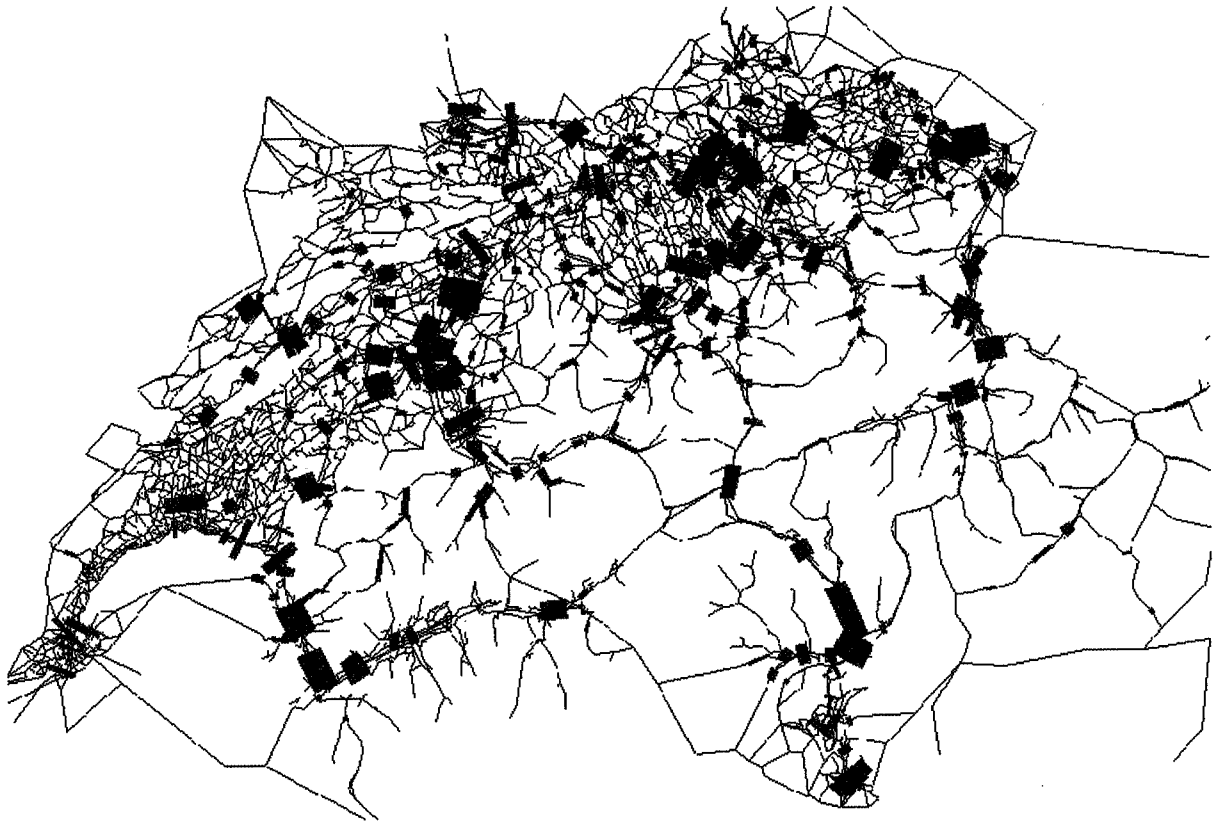
Es könnten insgesamt 77 Zählstellen (LVC-Zählstellen mit Längenklassenunterscheidung) berücksichtigt werden. Für das dynamische Modell wurden die Daten für einzelne Stunden und Richtungen differenziert betrachtet. Diese Daten wurden vom Bundesamt für Strassen zur Verfügung gestellt. Die aus diesen Daten und über alle Zählstellen gemittelte Nachfragedynamik während des Tages ist in Abbildung 26 dargestellt.

Abbildung 26 Nachfragedynamik während des Tages (ASTRA Zählungen, 2000)



- Die Schweizerische Strassenverkehrszählung wird alle fünf Jahre durchgeführt. Bei diesen Daten werden für die Berechnung des durchschnittlichen Werktagsverkehr (DWV) zwei unterschiedliche Datenquellen verwendet: die Ergebnisse der manuellen Stichprobenerhebung an den Zählstellen der Schweizerischen Strassenverkehrszählung und die Resultate der automatischen Strassenverkehrszählung. Mit einem Hochrechnungsverfahren werden die Stichprobendaten der manuellen Zählstellen mit den Daten aus der automatischen Strassenverkehrszählung verknüpft. Dafür wird eine Zuordnung der manuellen Zählstellen zu den entsprechenden automatischen Zählstellen durchgeführt. Mit diesen Daten könnten insgesamt 417 Zählstellen berücksichtigt werden. Der durchschnittliche Werktagsverkehr mit Personenwagen wurde aus dieser Datengrundlage über eine Streckenzuordnung direkt übernommen. Die Strecken und die gezählten Streckenbelastungen mit vorhandenen ASTRA Zählstellen sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

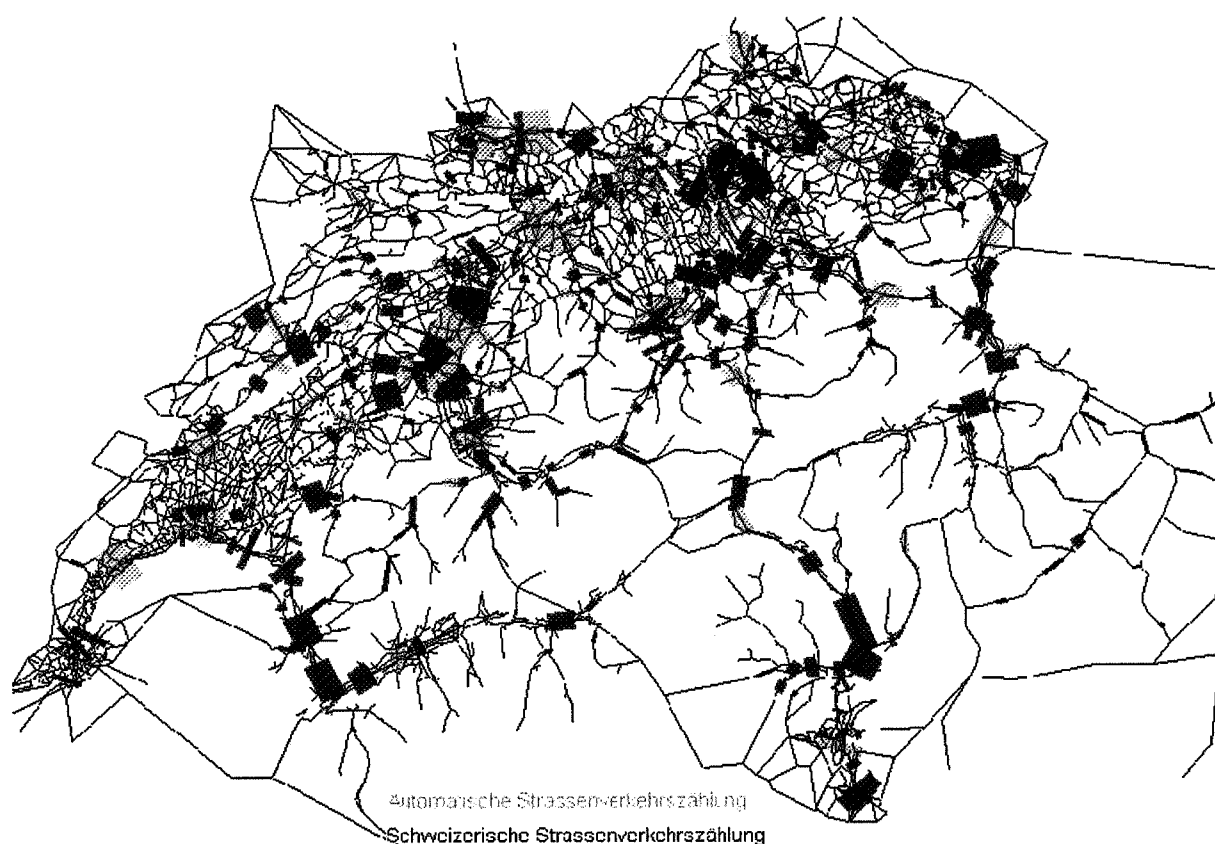
Abbildung 27 Berücksichtigte Zählstellen mit SSVZ 2000



Für die Berechnung der Streckenbelastungen für die einzelnen Stunden und Richtungen müssten diese Daten noch weiter bearbeitet werden. Vom Bundesamt für Strassen und dem Bundesamt für Statistik werden die Stundenbelastungen bei der SSVZ nicht nach Richtungen differenziert. Für die Anwendung des dynamischen Modells müssten diese Daten wegen unterschiedlicher Nachfragedynamik über die Zeit und der Raum (z.B. während der Morgenspitze höhere Nachfrage in Richtung der Grossstädte und umgekehrt) stundenfein nach Richtungen berechnet werden. Diese Berechnung wurde auf Grundlage vorhandener Stundenbelastungen für beide Richtungen aus der SSVZ und der Nachfrageverteilung nach Richtungen aus der automatischen Strassenverkehrszählungen durchgeführt. Dafür wurden die SSVZ Zählstellen einer Zählstelle aus der automatischen Strassenverkehrszählungen zugeordnet. Die aus der automatischen Strassenverkehrszählung für eine einzelne Stunde berechneten Anteile nach Richtungen wurden dann bei der SSVZ übernommen. Bei bestimmten Zählstellen, für die eine Zuordnung wegen unterschiedlichen räumlichen Charakteristiken nicht möglich war, wurden die typisierten Tagesganglinien aus der Ganglinien-Norm SN 640 005 (VSS, 2000) verwendet.

Damit konnten bei der Berechnung der Quell-Ziel-Matrizen für den durchschnittlichen Werktagsverkehr (statisches Modell) und für die stündlichen Verkehr (dynamisches Modell) aus den automatischen Strassenverkehrszählungen und den Schweizerischen Strassenverkehrszählungen insgesamt 494 Zählstellen berücksichtigt werden (siehe Abbildung 28).

Abbildung 28 Berücksichtigte Zählstellen mit ASTRA und SSVZ 2000



## 8 Anwendung auf das Schweizerische Strassennetz

In diesem Kapitel wird die Anwendung des PFE auf das Schweizerische Strassennetz dargestellt. Um die Ergebnisse dieser Methode zu beurteilen, werden parallel dazu auch die Ergebnisse der Anwendung einer alternativen Methode gezeigt. Dafür wird in der Verkehrsplanungssoftware VISUM als Standardprogramm die vorhandene VSTROM Fuzzy Methode angewendet. Die Ergebnisse dieser zwei Methoden werden verglichen und beurteilt.

### 8.1 Statisches Modell

Für die Erstellung und die Kalibration einer Quell-Ziel-Matrix mit Anwendung des PFE werden folgende Datengrundlagen gebraucht:

- Verkehrsangebot d.h. Strassennetz mit ihren Attributen
- Ausgangsmatrix oder Teilmatrix
- Querschnittszählungen

Zusätzlich können auch die Angaben über die gesamte Reiseweitenverteilung der Matrix vorgegeben werden.

Da PFE auf einem stochastischen Nutzergleichgewicht basiert, ist es sehr wichtig dass bei der Beschreibung des Verkehrsangebotes neben den üblichen Attributen wie Distanz und Anfangsgeschwindigkeit auch die Leistungsfähigkeit der Strecke und die Geschwindigkeitsfunktion definiert sind. Auf Grundlage dieser Attribute wird es möglich die belastungsabhängigen Reisezeiten zu berechnen.

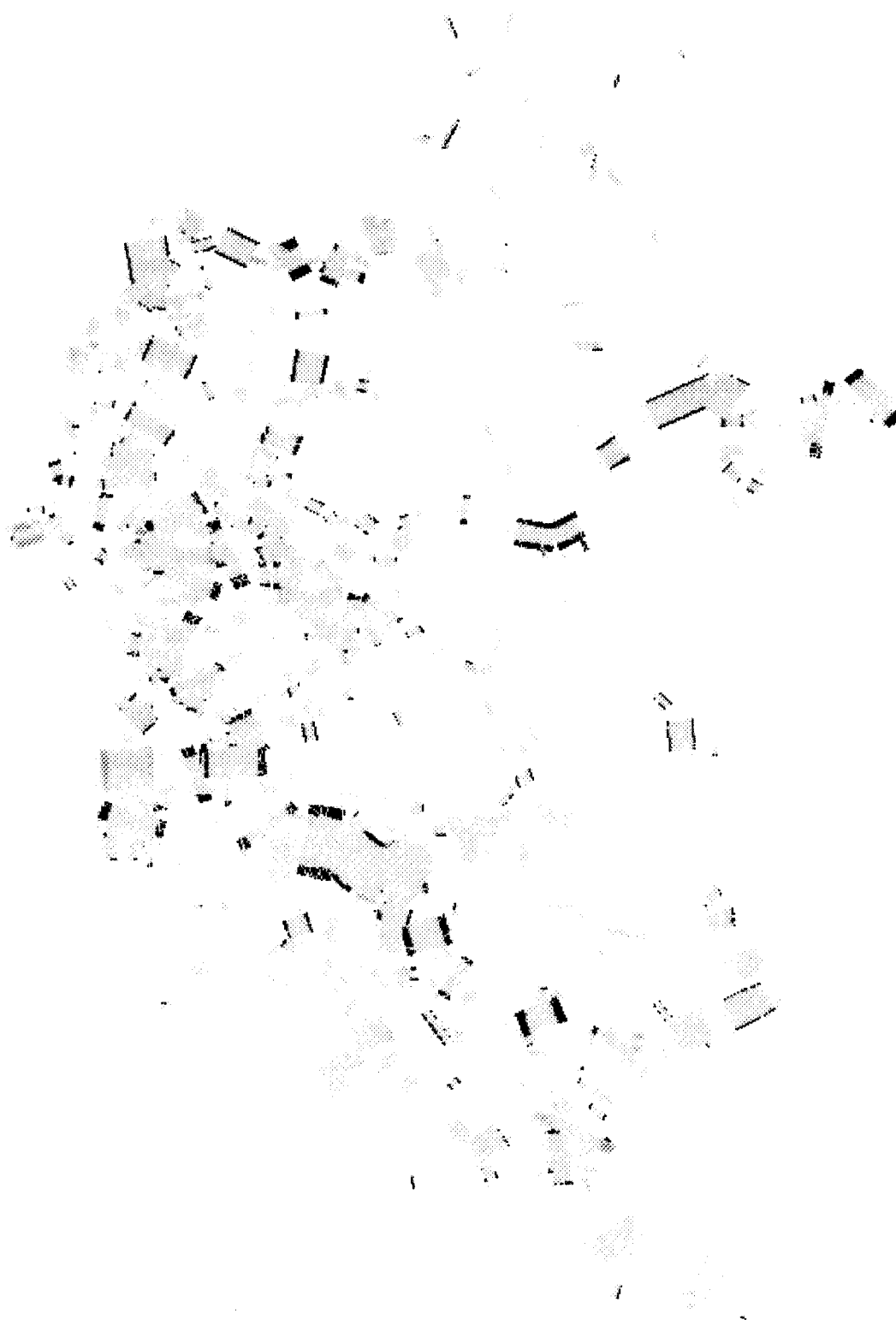
Für die Erstellung einer verlässlicheren Matrix sind die Erkenntnisse über die Matrixstruktur sehr wichtig. Die Matrixstruktur wird durch die Anzahl der Fahrten auf einzelnen Quell-Ziel-Beziehungen dargestellt. Damit die erstellte bzw. kalibrierte Matrix eine realitätsentsprechende Struktur hat ist es nötig, dass eine Eingagsmatrix als Zusatzinformation vorgegeben wird. Dafür kann eine Teilmatrix aus den Erhebungen oder eine veraltete Matrix verwendet werden. In dem Fall dass keine Ausgangsmatrix vorhanden ist, ist es mit PFE möglich nur auf Grundlage der Querschnittszählungen eine erste, strukturell schlechte Matrix zu erstellen. Dabei wird aber die Matrixstruktur nur auf Grundlage der Querschnittsbelastungen berechnet. In Abhängigkeit der Anzahl Zählstellen und ihrer Verteilung im Netz kann die Matrixstruktur sehr unterschiedlich und sehr unverlässlich sein.

Für eine höhere Qualität der Quell-Ziel-Matrix ist auch eine höhere Anzahl an Zählstellen nötig. Weiter ist auch entsprechend der Netzdichte eine gleichmässige Verteilung der Zählstellen wichtig. Je grösser die Zählstellendichte ist, desto verlässlicher wird die kalibrierte Quell-Ziel-Matrix. Die Genauigkeit der für die modellmässige Kalibration verwendeten Zählwerte sollte im Voraus überprüft werden. Hier ist vor allem auf den Anteil des intrazonalen Verkehrs zu achten. Diese Anteile sind sehr stark von der gewählten Zonierung und der Netzdichte im Modell auf der einen Seite und den realen räumlichen Charakteristiken der Zählstellen und ihrer Umgebung auf der anderen Seite Abhängig. Da das verwendete Verfahren den intrazonalen Verkehr nicht, sondern nur interzonalen Verkehr modellieren kann, ist es nötig die Anteile des intrazonalen Verkehrs bei den Zählstellen extern zu schätzen und die Zählwerte dementsprechend zu korrigieren. Im PFE werden die eingegebenen Zählwerte als interzonaler Verkehr betrachtet. Zusätzlich ist es möglich im Programm auch ein asymmetrisches Konfidenzintervall zu definieren. Dadurch werden die Messfehler und der in Abhängigkeit der Güte der Zählwerte erlaubte Freiheitsgrad vorgegeben.

Als Ausgangsmatrix wurde die von Sigmaplan und Füsseis (1998) für das Jahr 1995 erstellte Quell-Ziel-Matrix im Strassenverkehr verwendet. Mit den Querschnittszählungen für das Jahr 2000 wurde mit PFE eine neue, auf diese Zählwerte kalibrierte Matrix berechnet. Aus den Umlegungsergebnissen mit der Ausgangsmatrix 1995 und dem Vergleich gegenüber den Zählwerten für das Jahr 2000 zeigte sich, dass die Abweichungen bei einzelnen Zählstellen sehr gross und ungleichmässig sind (Abbildung 28). Die mittlere Abweichung gegenüber allen Zählstellen beträgt 28%.

Abbildung 29 Umlegung mit Ausgangsmatrix 1995 [Vergleich DUE-Modell/Zählwerte 2000]

---



---

gelb= Grundbelastung, rot= mehr, grün= weniger

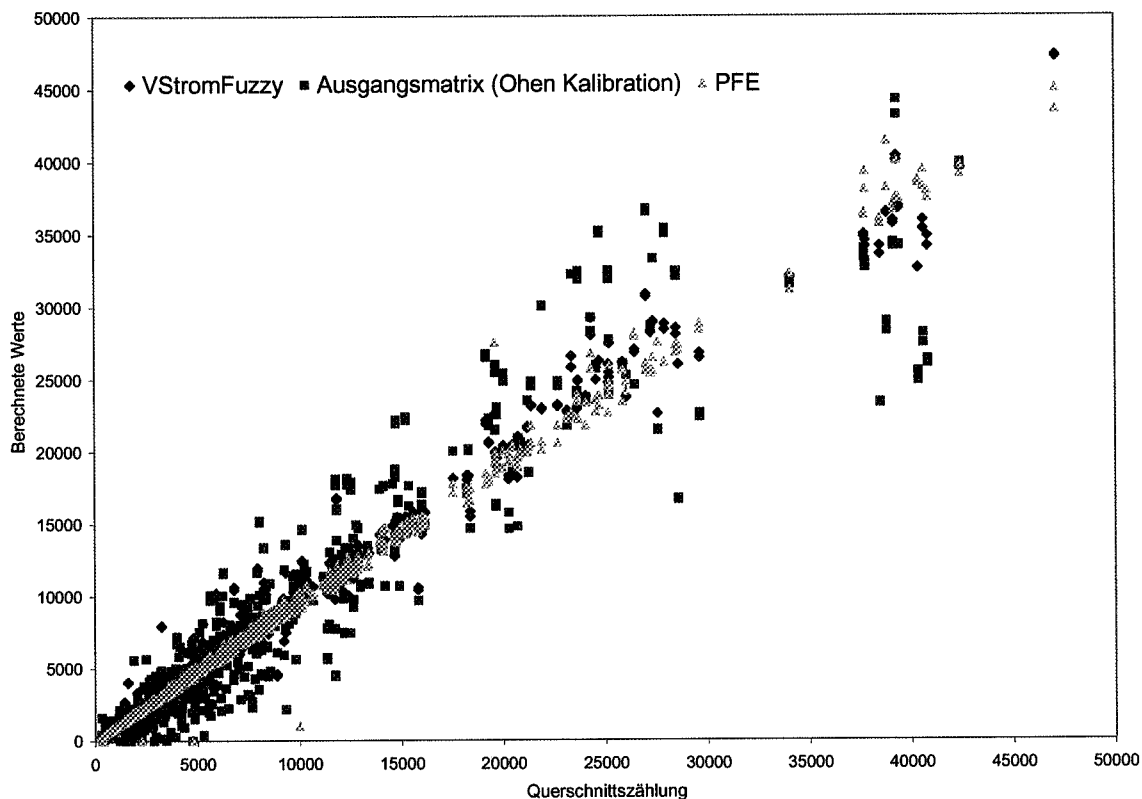
Für die Erstellung der Quell-Ziel-Matrix für das Jahr 2000 wurden neben der Ausgangsmatrix 1995 und der Querschnittszählungen auch die Geschwindigkeitsfunktionen und die Leistungsfähigkeit nach Streckentypen definiert. Diese beiden Attribute wurden aus dem vorhandenen nationalen Strassenmodell übernommen (siehe Vrtic, Fröhlich und Axhausen, 2000). Für die Nachfrageaufteilung zwischen den Routen wurde beim C-Logit für den Gemeinsamkeitsfaktor (siehe Kapitel 6) ein  $\beta$  von 0.1 verwendet. Bei der Berechnung der Wege zwischen einer Quelle und einem Ziel wurde beim PFE-Modell die benötigten Dispersionsparameter  $\alpha=0.1$  angenommen. Als weitere Beschränkung wurde aus dem Mikrozensus Verkehr 2000 die Verteilung der Fahrten nach Reiseweite vorgegeben. Hier wurden nur die Fahrten mit PW zwischen den Gemeinden betrachtet. Damit wird die gesamte Reiseweitenverteilung der kalibrierten Matrix aus dem MZ 2000 übernommen.

Mit der gleichen Ausgangsmatrix und den gleichen Querschnittszählungen wurde auch die Kalibration mit dem alternativen Vstrom-Fuzzy Verfahren (siehe PTV, 2000) durchgeführt. Diese Methode basiert auf einer deterministischen Gleichgewichts-Umlegung und ist als Standard-Kalibrationsverfahren in VISUM verfügbar. Methodisch basiert das Verfahren auf der Maximierung der Entropie der gesuchten Matrix (Mott und Nökel, 1999). Die verwendeten Zählwerte werden als unscharfe Eingangsgrösse interpretiert.

Die mit Vstrom-Fuzzy und PFE auf die Querschnittszählungen kalibrierten Matrizen wurden durch die Umlegung und die ermittelten Streckenbelastungen überprüft. Die Abweichungen gegenüber den Querschnittszählungen und der Vergleich mit den ermittelten Streckenbelastungen aus der Ausgangsmatrix sind in Abbildung 28 dargestellt. Aus dieser Abbildung ist zu sehen, dass die mit PFE berechnete Matrix und die daraus ermittelten Streckenbelastungen die kleineren Abweichungen gegenüber den Querschnittszählungen haben. Die mittleren Abweichungen gegenüber Zählwerten haben sich wie folgt verändert:

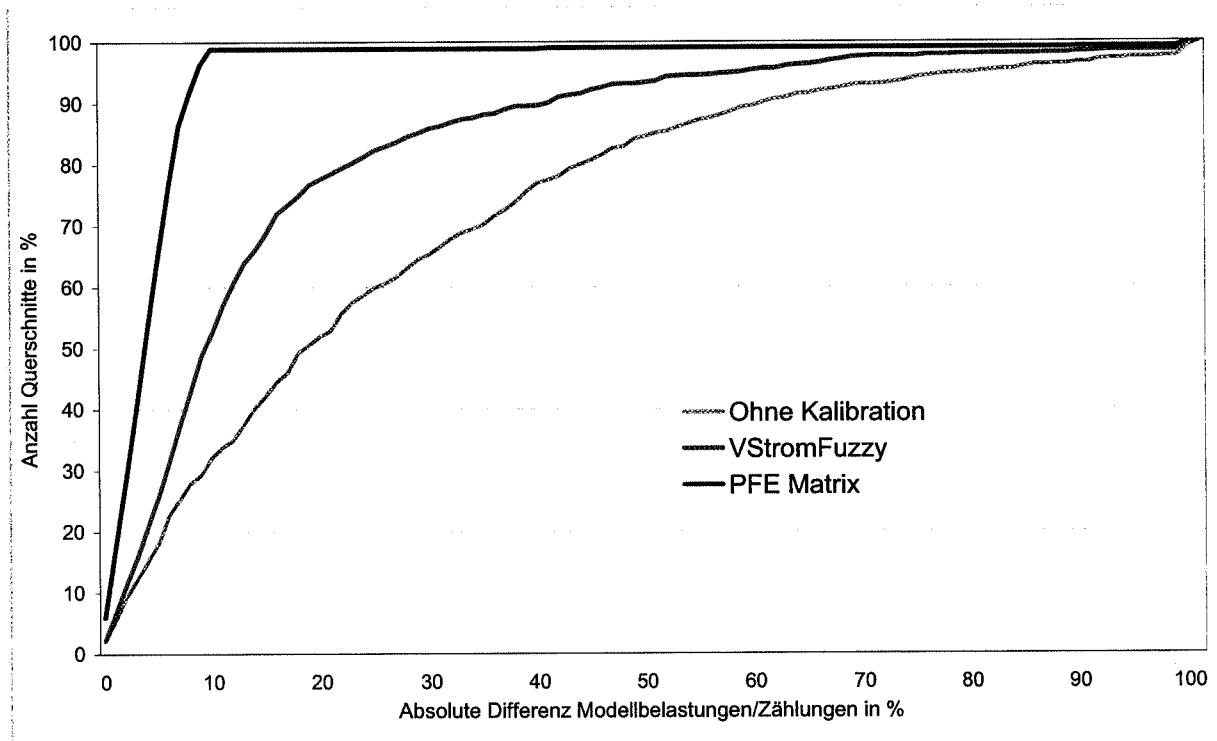
- Ausgangsmatrix 1995 und DUE 28%
- PFE und SUE 5.3%
- VstromFuzzy und DUE 8.3%

Abbildung 30 Abweichungen gegenüber Querschnittszählungen



Ein Vergleich der kumulierten Abweichungen zeigt die Güte der Kalibrationsmethoden noch besser (Abbildung 30). Diese Abbildung zeigt, dass bei 99% der Zählstellen die Abweichungen zwischen der mit dem PFE-Modell berechneten Querschnittsbelastungen und dem Zählwert unter 10% liegen. Mit Anwendung des Vstrom-Fuzzy haben 80% der Querschnitte eine Abweichung unter 23%. Damit zeigen sich die Vorteile der PFE Methode, die vor allem auf eine realitätsentsprechendere Umlegungsmethode (stochastisches Nutzergleichgewicht) zurückzuführen sind, hier sehr deutlich.

Abbildung 31 Abweichungen gegenüber Querschnittszählungen



Die räumliche Verteilung der Abweichungen des PFE gegenüber den Zählungen ist in Abbildung 31 dargestellt. Die Abweichungen sind vor allem auf die in den Querschnittszählungen vorhandenen Anteile an intrazonalem Verkehr sowie auf eventuelle Messfehler zurückzuführen. Die Messfehler sind vor allem bei den SSVZ Daten nicht zu unterschätzen, da diese Zählung manuell und über kleinere Zeitintervalle erhoben wird. Diese zwei Fehlermöglichkeiten führen zu den Unstimmigkeiten bei den Zählungen, die dann durch die Kalibration als Abweichungen zugelassen werden sollen. Ein Ausgleich auf die Zählwerte würde in solchen Fällen zu einer Verfälschung der Quell-Ziel-Matrix führen.

Abbildung 32 Die Abweichungen mit PFE-Matrix [Vergleich Modell/Zählwerte]

---

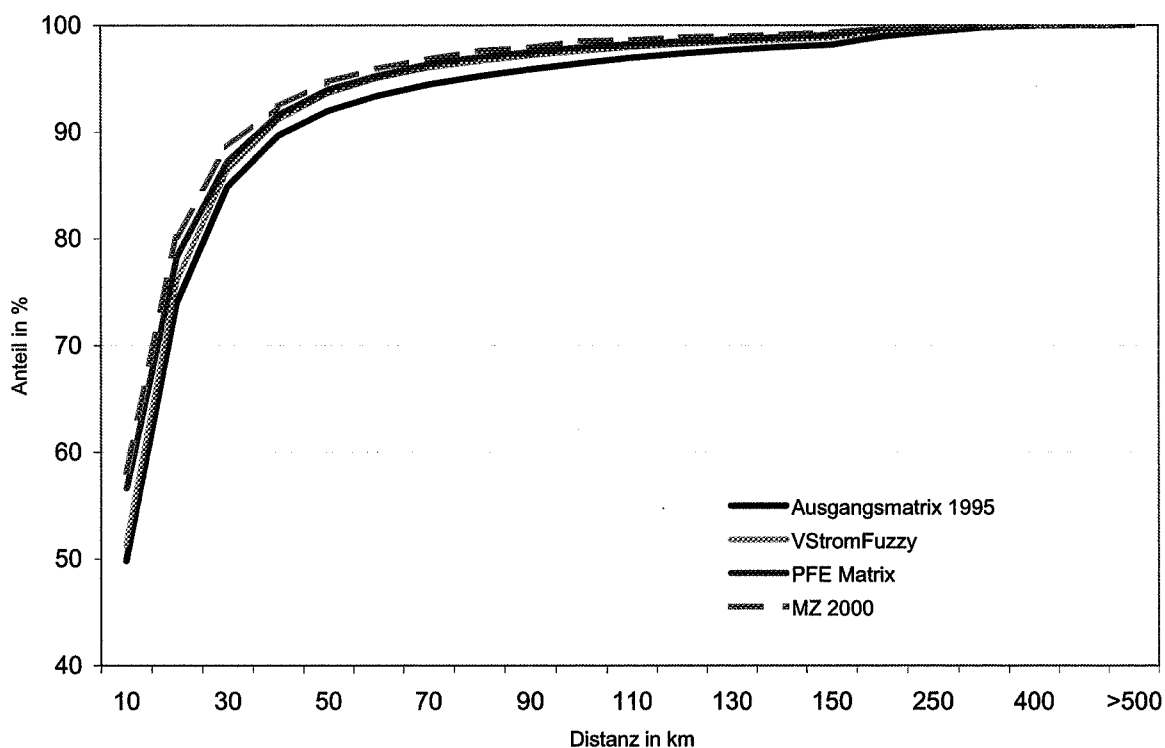


---

gelb= Grundbelastung, rot= mehr, grün= weniger

Bei der Kalibration der Quell-Ziel-Matrix ist es auch sehr wichtig, dass die Struktur der Matrix unverändert bleibt. Ein wichtiger Indikator ist dafür die gesamte Reiseweitenverteilung. Aus dem Vergleich der drei berechneten Matrizen ist festzustellen, dass sich die mit PFE und Vstrom Fuzzy kalibrierte Matrix von der Ausgangsmatrix 1995 nicht stark unterscheidet (Abbildung 33). Da die Ausgangsmatrix auf den Mikrozensus 1994 und teilweise unter Berücksichtigung der Fahrten innerhalb einer Zone kalibriert wurde, ist der Anteil der kürzeren Fahrten bei dieser Matrix höher als beim MZ 2000 und den mit PFE- und Vstrom Fuzzy kalibrierten Matrizen.

Abbildung 33 Distanzverteilung



Der Anteil der Fahrten im Binnen- Aussen- und Transitverkehr hat sich durch die Kalibration auch nicht verändert. Durch das Nachfragewachstum und höhere Querschnittsbelastungen bei den Zählungen zwischen 1995 und 2000 hat sich die gesamte Anzahl der PW-Fahrten um ca. 14% erhöht. Die Anzahl Fahrten im Binnen- Aussen- und Transitverkehr ist in der folgenden Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15 Matrixstruktur mit und ohne Kalibration

	Ausgangsmatrix		Vstrom-Fuzzy		PFE-Matrix	
	PW-Fahrten	Anteil	PW-Fahrten	Anteil	PW-Fahrten	Anteil
Binnenverkehr	4'597'866	87.1	5'208'410	88.0	5'285'519	88.0
Quellverkehr	324'222	6.1	338'550	5.7	345'924	5.8
Zielverkehr	324'251	6.1	343'397	5.8	350'235	5.8
Transitverkehr	30'631	0.6	25'567	0.4	21'779	0.4
Gesamt	5'276'970	100.0	5'915'924	100.0	6'003'457	100.0

Es konnte festgestellt werden, dass durch die Anwendung der PFE-Methode die erstellte Quell-Ziel-Matrix eine höhere Qualität hat. Die gesamte Struktur der Matrix ist gegenüber der Ausgangsmatrix fast unverändert geblieben und die Abweichungen gegenüber den Querschnittszählungen konnten minimiert werden. In Abbildung 34 sind die Abweichungen des PFE-Modells jenen aus Vstrom Fuzzy gegenüber gestellt. Daraus ist zu sehen, dass in den Fällen, wo Abweichungen zwischen diesen zwei Methoden vorhanden sind, die Fehler bei der Vstrom Fuzzy Methode grösser sind.

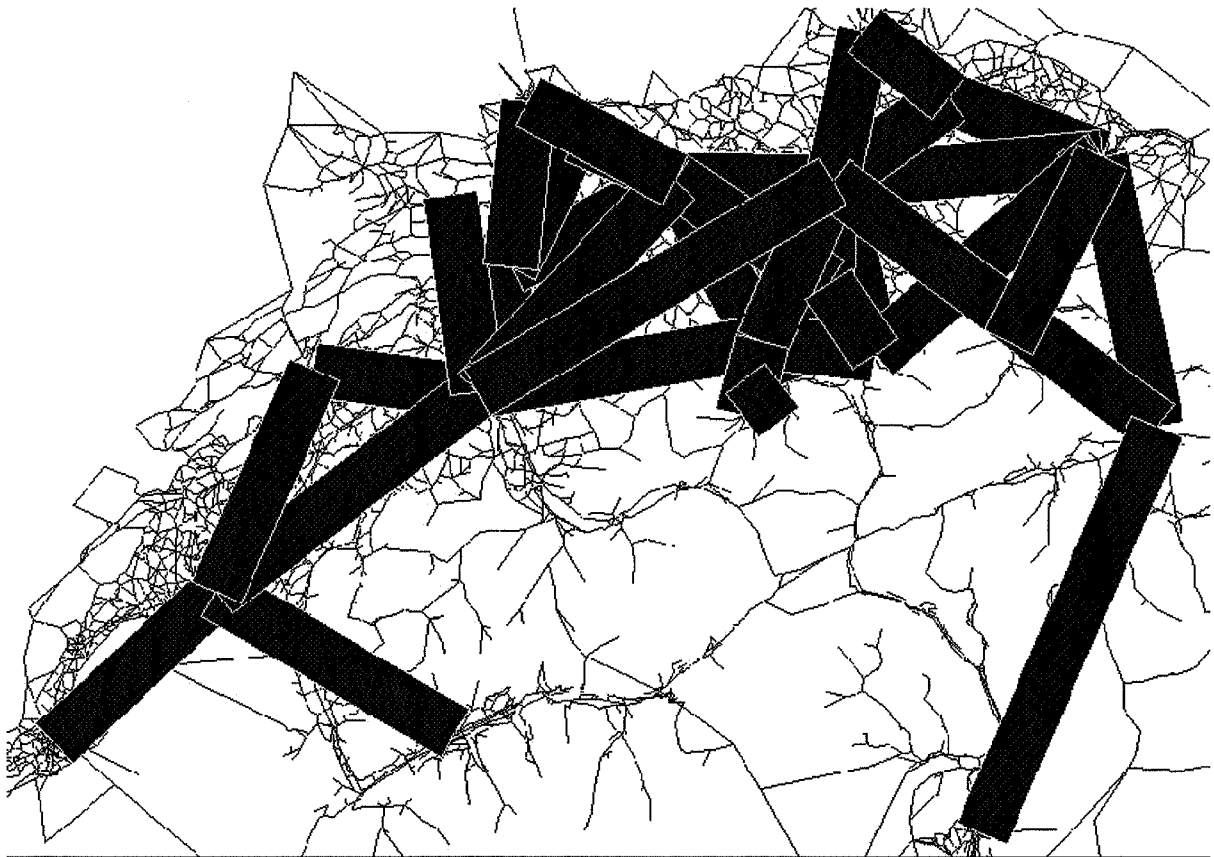
Abbildung 34 Abweichungen (in %) gegenüber Zählungen: PFE – VStrom Fuzzy (blau – PFE Abweichungen grösser, grün – VStrom Fuzzy Abweichungen grösser)



## 8.2 Auswertung der mit dem PFE Ansatz Erstellte Quelle-Ziel Matrix

Um die Struktur der Quell-Ziel-Matrix detailliert zu überprüfen werden die hier betrachteten Matrizen (Ausgangsmatrix und kalibrierte Matrix) zusätzlich auf einzelnen Querschnitten und Beziehungen ausgewertet. In einem ersten Schritt wurde die PFE-Matrix mit gemeindescharfer Zonierung auf die kantonale Zonierung aggregiert. Die Auswertung der kantonalen Aufkommensbeziehungen zeigt eine vor allem widerstandsabhängige Nachfrageverteilung, was aber für Raumverhältnisse, wie sie in der Schweiz üblich sind, nicht zu erwarten wäre. Hier zeigte sich die Erzeugungsabhängigkeit für längere bzw. interkantonale Fahrten als weniger relevant. Die aufkommensstärksten kantonalen Beziehungen (> 3000 Fahrten/Weritag) sind in Abbildung 35 dargestellt.

Abbildung 35 Kantonale Beziehungen (>3000 PW-Fahrten; DWV)

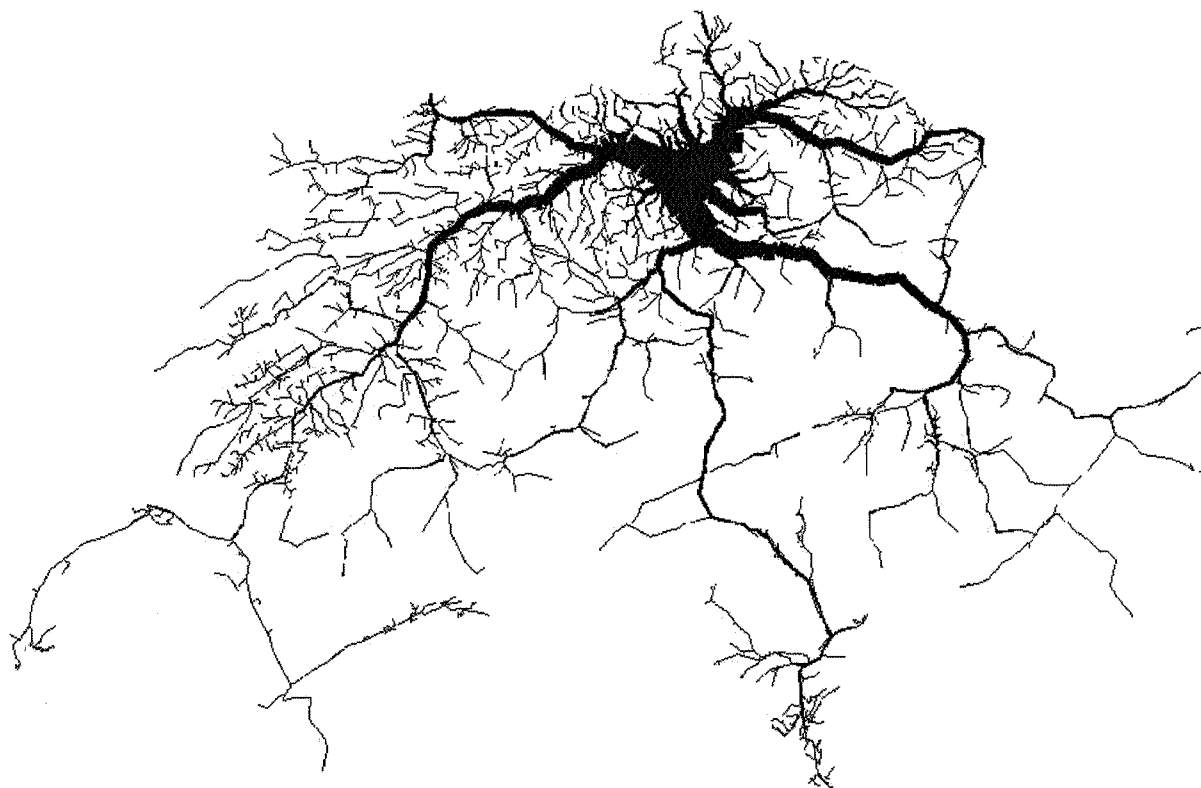


Die Analyse der Nachfrageverteilung von und nach Zürich bestätigt, dass die Ausgangsmatrix auf einem Gravitationsgesetz erstellt wurde. Daraus ist auch ersichtlich, dass die gewählte Gravitationskonstante nicht aus empirischen Daten kalibriert wurde. Aus der Abbildung 36 ist zu sehen, dass die Attraktionszonen nicht zu erkennen sind. Damit wurde die Nachfragever-

teilung bei der Ausgangsmatrix nur widerstandsabhängig berechnet. Durch die Anwendung der hier betrachteten Kalibrationsverfahren können solche Verbesserungen der Matrixstruktur nicht erreicht werden, weil die Struktur der Matrix vor allem von der Ausgangsmatrix abhängig gemacht wird.

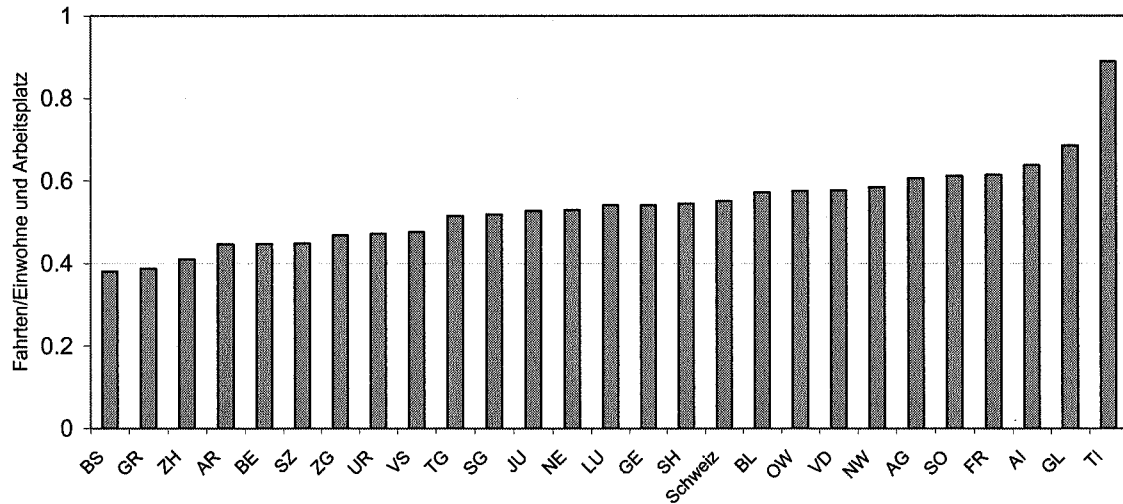
Abbildung 36 Verkehrsnachfrage von und nach Zürich

---



In einem weiteren Schritt wurde das gesamte kantonale Aufkommen aus der Matrix durch die Anzahl der Einwohner und der Arbeitsplätze (summierter Wert) dividiert um die spezifische Anzahl der PW-Fahrten zu berechnen. Aus der Abbildung 37 ist eine sehr starke Variation der spezifischen Anzahl von PW-Fahrten/Einwohner und Arbeitsplatz zwischen den Kantonen zu sehen. Dieser Wert ist sehr stark auch von anderen räumlichen und verkehrlichen Charakteristika abhängig, so dass eine generelle Beurteilung hier nicht möglich ist. Es ist zu bemerken, dass die räumlich kleineren Kantone und das Tessin eine höhere Rate aufweisen, was vor allem auf das schlechtere ÖV Angebot im Vergleich mit anderen Kantonen wie Basel, Zürich oder Bern zurückzuführen ist.

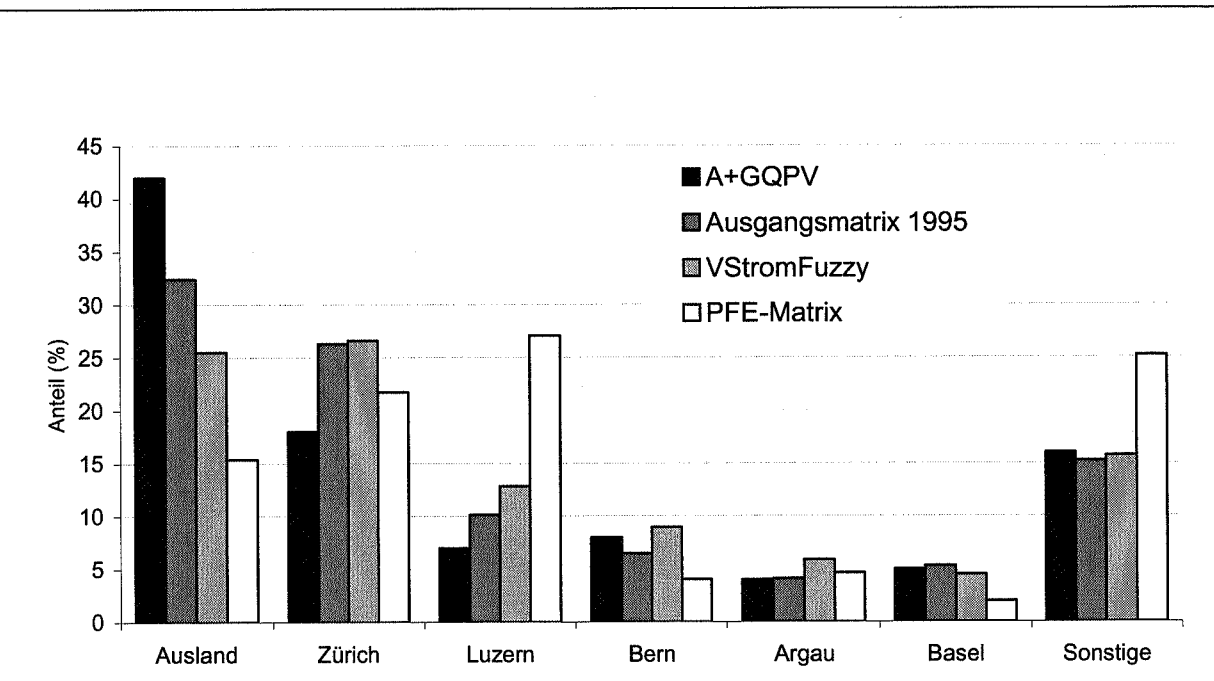
Abbildung 37 Spezifische MIV-Nachfrage nach Kantonen (PW Fahrten / Einwohner und Arbeitsplatz)



Ein weiteres und sehr wichtiges Kriterium für die Beurteilung der Kalibrationsverfahren ist die Verteilung der Verkehrsnachfrage an einem Querschnitt zwischen einzelnen Quell-Ziel-Beziehungen. Dafür wurde die Nachfrageverteilung aus der Ausgangsmatrix und der kalibrierten Matrix am Gotthard mit dem aus der Erhebung des „Alpen- und grenzquerender Personenverkehr“ (A+GQPV) verglichen. Die Verteilung der Fahrten aus dem Süden in Richtung Norden mit relevanten Zielen ist in folgender Abbildung dargestellt.

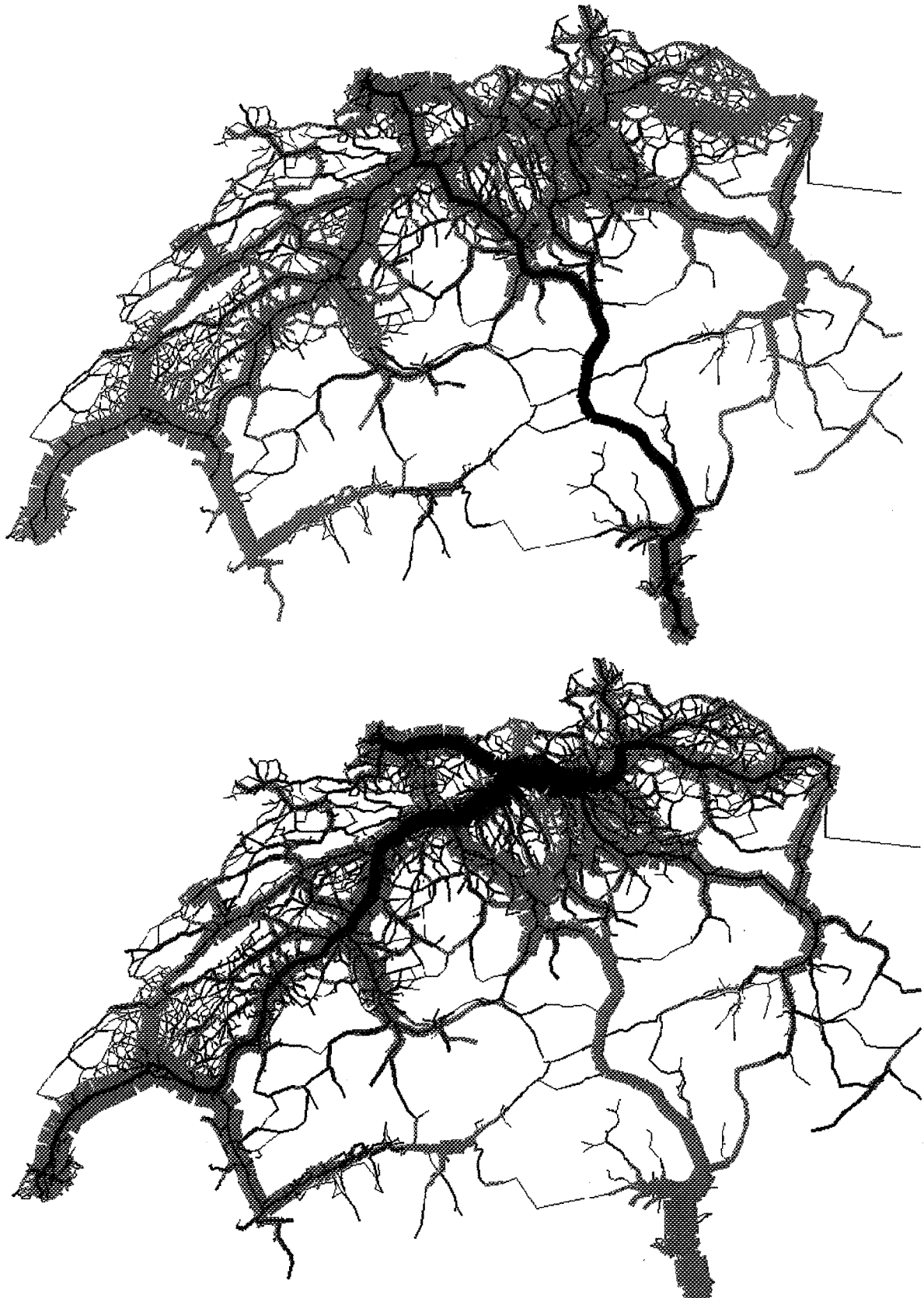
In der ursprünglichen Ausgangsmatrix 1995 ohne Kalibration wurden die alpen- und grenzquerenden Personenfahrten aus der Erhebung übernommen. Damit war die Nachfrageverteilung am Gotthard mit den Erhebungen identisch. Durch die Kalibration auf die Querschnittszählungen für das Jahr 1995 wurden diese Ströme, wie in der Abbildung 38 zu sehen ist, schon relativ stark verändert. Damit waren die Ströme nach der Kalibration nicht identisch mit denjenigen vor der Kalibration. Aus der Abbildung 38 ist weiter zu sehen, dass durch die weitere Kalibration der Ausgangsmatrix 1995 (auf die Zählungen 1995 kalibriert) sich die Ströme am Gotthard zwischen den einzelnen Quell-Ziel-Beziehungen weiter verändert haben.

Abbildung 38 Nachfrageverteilung am Gotthard (Richtung Nord)



An diesem Beispiel kann festgestellt werden, dass wegen einer sehr kleinen Anzahl von Zählstellen im betrachteten Korridor in der Kalibrierung ein sehr grosser Freiheitsgrad bei der Bestimmung der Fahrten zwischen einzelnen Quell-Ziel-Beziehungen erreicht werden kann. Bei einer dichteren Anzahl von Zählstellen ist die Nachfrageverteilung auf einem Querschnitt stärker von der Nachfrageverteilung auf folgenden Zählstellen abhängig. Aus diesem Grund wurden die Fahrten durch den Gotthardtunnel in der kalibrierten Matrix durch die Erhebungsfahrten ersetzt. Die Verteilung der Quell-Zielströme aus dieser Matrix über dem Gotthard- und Bareggstunnel ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

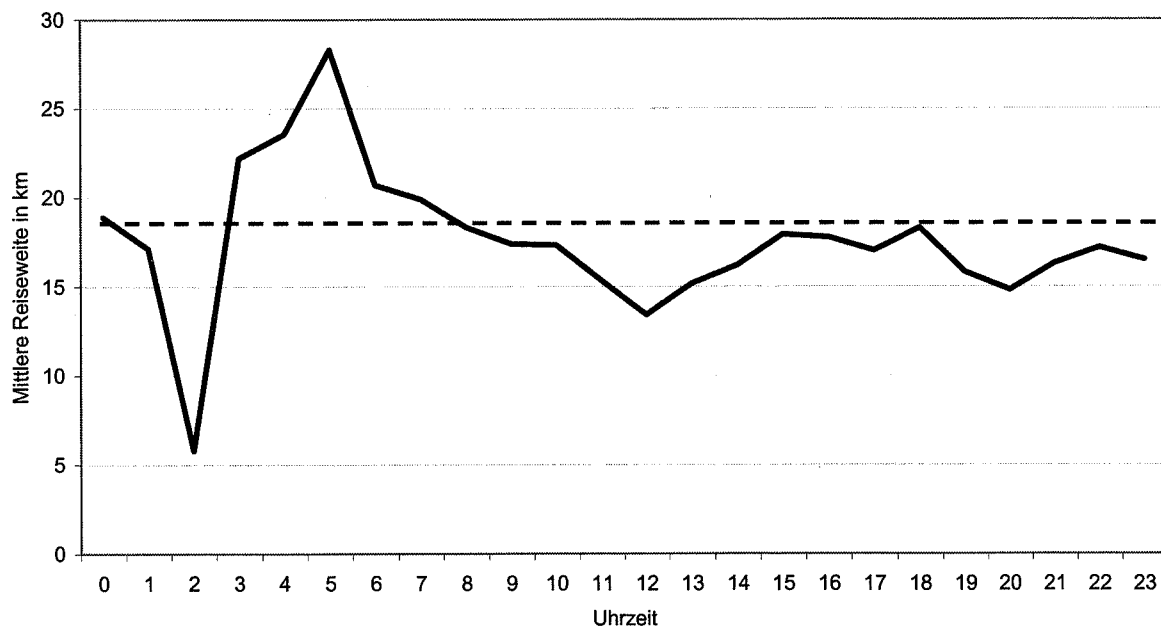
Abbildung 39 Verteilung der Quell-Zielströme über Gotthard- und Bareggtunnel



### 8.3 Dynamisches Modell

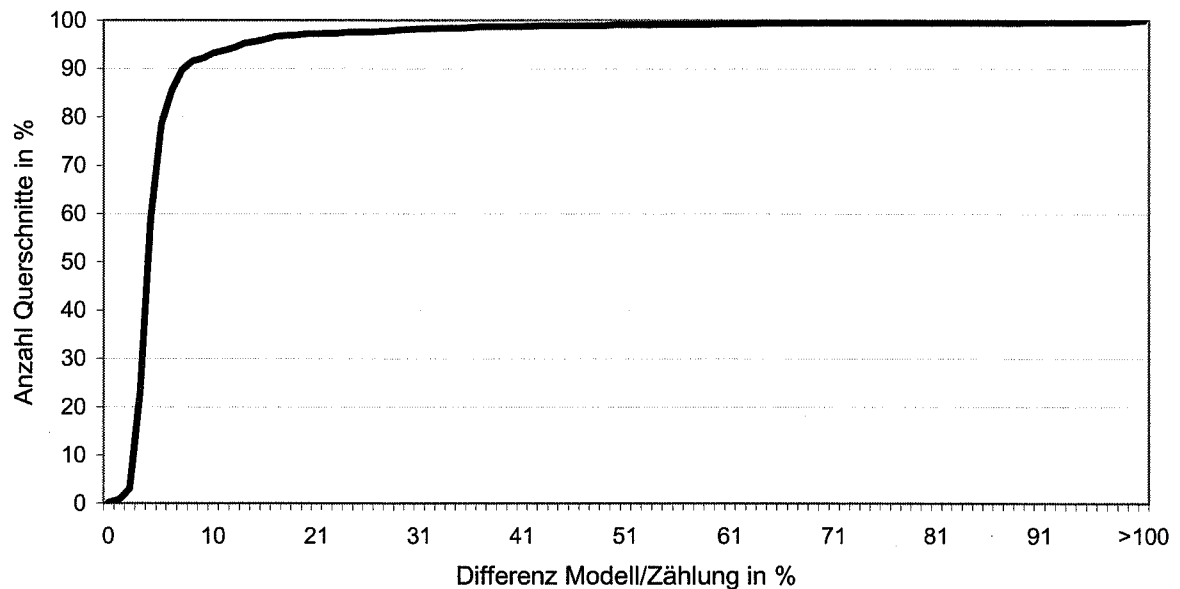
Bei der Anwendung des dynamischen Modells wurden die Zeitintervalle auf eine Stunde gesetzt. Als Eingangsdaten wurden neben den Querschnittszählungen auch die stundenfeinen Ausgangsmatrizen und die Reiseweitenverteilungen verwendet. Die Quell-Ziel-Matrizen für jede einzelne Stunde wurden aus einer früheren Untersuchung von Vrtic und Axhausen (2003) übernommen. Diese Matrizen wurden auf Grundlage verschiedener Kriterien (Zonengröße, zeitliche Variationen während des Tages, Reiseweite usw.) und dem Mikrozensus-Verkehr 1994 auf die Querschnittszählungen für das Jahr 1999 kalibriert. Weitere Inputs für das dynamische PFE-Modell waren auch die Reiseweitenverteilung während des Tages (siehe auch Abbildung 38) und die Nachfragedynamik aus dem Mikrozensus-Verkehr 2000.

Abbildung 40 Mittlere Reiseweitenverteilung während des Tages



Mit der PFE-Anwendung wurden die kalibrierten Stundenmatrizen auf die gesamte Anzahl der Fahrten und die Abweichungen gegenüber den Querschnittszählungen überprüft. Die kumulierten Abweichungen gegenüber den Querschnittszählungen über alle Zeitintervalle sind in der Abbildung 41 dargestellt. Daraus ist zu sehen, dass bei ca. 92% der Zählstellen die Abweichungen unter 7% und bei ca. 97% Zählstellen die Abweichungen unter 20% sind.

Abbildung 41 PFE – Dynamisches Modell – Mittlere (kumulierte) Abweichungen über alle Zeitintervalle



Damit wurden die Stundenmatrizen auf die gezählten Querschnittsbelastungen geeicht. Die gesamte Anzahl der Fahrten aus dem dynamischen Modell (über alle Stunde) betrag 6'001'133 PW-Fahrten, was gegenüber dem statischen Modell eine Differenz von nur 2324 Fahrten oder 0.04 % bedeutet.

Ein Beispiel für die Abweichungen gegenüber den Querschnittszählungen für das Zeitintervall zwischen 18 und 19 Uhr ist in Abbildung 42 dargestellt (mittlere Abweichungen 4.7%).

Damit bietet der PFE die Möglichkeit für die Erstellung der Quell-Ziel-Matrizen nach Zeitintervallen, wenn entsprechende Input-Daten vorhanden sind. Für die hochbelasteten Netze mit starker Variation der Verkehrsnachfrage über der Zeit, ist das eine sehr wichtige Voraussetzung für die Beurteilung von Massnahmen.

Abbildung 42 Abweichungen gegenüber Querschnittszählungen zwischen 18 und 19 Uhr

---



gelb= Grundbelastung, rot= mehr, grün= weniger

---

In dem Fall, dass die Querschnittszählungen für die kürzeren Zeitintervalle (z.B. 15 min) verfügbar sind, könnten somit mittels des PFE auch die Matrizen für solche kürzeren Zeitintervalle erstellt werden.

## 9 Schlussfolgerungen

Das wesentliche Ziel dieser Untersuchung war es eine geeignete Methode für die Erstellung und Kalibration von Wunschlinienmatrizen auf der Grundlage von Querschnittszählungen zu empfehlen. Die Methode sollte für die vorhandenen Datengrundlagen und den vorgesehenen Anwendungsbereich in der Schweiz geeignet sein. In den Vordergrund wurde die Anwendung mit nationalen und regionalen Modellen hochbelasteter Netze gestellt. Die Literaturanalyse gibt eine Übersicht über die Entwicklung der Methoden und die verwendeten Modellansätze. Dabei wird gezeigt, wie die Methoden in Abhängigkeit von der Netzgrösse, der Netzbelastung und des betrachteten Zeitraumes bei den Querschnittszählungen für die Schätzung von Quell-Ziel-Matrizen geeignet sind. Aus dieser Analyse und den gestellten Anforderungen bei der Erstellung der Quell-Ziel-Matrizen wurde der Path Flow Estimator (PFE) als das am besten geeignete Verfahren ausgewählt. Die wesentlichen Vorteile dieses Verfahrens gegenüber anderen Methoden sind:

- kann sowohl für die Erstellung von statischen als auch dynamischen (Zeitabhängigen) Quell-Ziel-Matrizen angewendet werden
- realitätsnähere Umlegung durch die Anwendung des stochastischen Nutzergleichgewichts
- die Wunschlinienmatrix und die Umlegung werden nicht sequentiell sondern simultan behandelt
- die zeit- und belastungsabhängige Darstellung von Fahrtzeitverlängerungen
- kann auch bei grösseren Netzen angewendet werden.

Da das hier entwickelte Verfahren sowohl auf schwach als auch auf stark belastete Netze angewendet werden soll und die Umlegung eine sehr wichtige Komponente bei der Erstellung von Wunschlinienmatrizen darstellt, ist das stochastische Nutzergleichgewicht der wesentliche Baustein dieses Verfahrens. Die stochastischen Umlegungsmodelle berücksichtigen neben Belastungseffekten auch sogenannte stochastische Effekte bei der Entscheidung (unterschiedliche Wahrnehmung der Kosten).

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde der PFE in folgenden Punkten weiter entwickelt:

- Implementierung eines neuen Routenwahl-Ansatzes (C-Logit)
- Neue Geschwindigkeitsfunktion für die Reisezeitberechnungen
- Asymmetrische Konfidenzintervalle für Zählstellen
- Verwendung der Reiseweitenverteilung als Randbedingung
- Festlegung der Gesamtzahl Fahrten

- Beschleunigte Berechnungszeiten.

Das weiterentwickelte Verfahren wurde durch die Anwendung auf das nationale Strassennetz überprüft und plausibilisiert. Dafür wurden auf der Grundlage der Ausgangsmatrix 1995, der Querschnittszählungen des ASTRA und SSVZ 2000 und der gesamten Reiseweitenverteilung aus dem Mikrozensus Verkehr 2000 eine DWV-Wunschlinienmatrix für das Jahr 2000 erstellt. Um die Güte des Verfahrens zu überprüfen, wurde ein Vergleich durch die Anwendung eines alternativen Verfahrens (Vstrom Fuzzy) durchgeführt. Zusätzlich wurden auch Ergebnisse aus den Erhebungen des alpen- und grenzquerenden Personenverkehrs berücksichtigt. Daraus konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- der PFE erfüllt die wesentlichen Anforderungen für die Kalibrierung der Wunschlinienmatrizen im MIV
- die Querschnittszählungen können mit der erzeugten Matrix und mit der stochastischen Nutzergleichgewichtsumlegung sehr genau reproduziert werden
- die gesamte Struktur bzw. die Reiseweitenverteilung der Ausgangsmatrix wird beibehalten

Im Vergleich mit den Ergebnissen des Vstrom Fuzzy sind die Abweichungen der mit der erstellten Matrix ermittelten Streckenbelastungen gegenüber den Querschnittszählungen kleiner.

Weiter zeigt das Programm eine höhere Flexibilität und die Offenheit für eine Weiterentwicklung. Mit diesem Verfahren ist auch die Erstellung einer Wunschlinienmatrix ohne eine Ausgangsmatrix möglich. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass die Struktur der so berechneten Matrix nur von der Dichte der Querschnittszählungen und weiteren verfügbaren Eingangsinformationen, wie z.B. der Reiseweiteverteilung abhängig ist.

Ein weiterer und wichtiger Vorteil dieser Methode ist die Berücksichtigung der Nachfragedynamik und der Erstellung der zeitabhängigen Matrizen. Damit ist es möglich in Abhängigkeit der Querschnittszählungen auch zeitabhängige Wunschlinienmatrizen zu erstellen. Mit diesem Verfahren wurden hier für das nationale Strassenmodell die stundenfeinen Wunschlinienmatrizen erstellt.

Damit ist es möglich, mit diesem Verfahren die Wunschlinienmatrizen zu erstellen mit denen die Querschnittszählungen sehr genau reproduziert werden können. Die gesamte Reiseweitenverteilung kann festgelegt werden, bzw. wird durch die Kalibration einer Ausgangsmatrix nicht verändert. Dabei ist die Qualität und die Struktur der Matrix hauptsächlich von weiteren Eingangsdaten abhängig, vor allem von:

- der Dichte der Querschnittszählungen
- der Qualität der Ausgangsmatrix

Mit einer grösseren Dichte der Zählstellen reduziert sich die Wahrscheinlichkeit, dass die Struktur der Ausgangsmatrix durch die Kalibration auf die Querschnittszählungen stark verändert wird. Bei einer höheren Genauigkeit und Dichte der Zählwerte wird die Verkehrsnachfrage zwischen einzelnen Quell-Ziel-Beziehungen und der Nachfrageverteilung auf einzelnen Querschnitten gegenüber der Ausgangsmatrix vor allem in Abhängigkeit der Veränderung der Querschnittszählung geändert.

Bei der Anwendung des Kalibrationsverfahrens muss berücksichtigt werden, dass bei einer, bezogen auf die Netzdichte kleineren bzw. ungenügenden Anzahl von Zählstellen die Nachfrageverteilung zwischen Zonen durch die Kalibration sehr stark verändert werden kann. In solchen Fällen und in Abhängigkeit von der Differenz zwischen der Modellbelastung und dem Zählwert ist der Freiheitsgrad bei der Veränderung der Ausgangsmatrix in Bezug auf die Querschnittszählungen relativ gross. Eine Verdichtung der Zählstellen reduziert diesen jedoch. Damit ist zu empfehlen, bei der Kalibration neben einer verlässlichen Ausgangsmatrix auch ein möglichst dichtes Zählstellennetz zu berücksichtigen, um eine stabile Struktur der Wunschlinienmatrix zu behalten.

Die Anforderungen bei der Anwendung des dynamischen Modells sind ähnlich wie beim statischen Modell. Zusätzliche Schwierigkeiten stellen hier die Ausgangsmatrizen, bzw. ihre Struktur dar. Bei der Erstellung von Stundenmatrizen muss die zeitliche- und räumliche Nachfragedynamik entsprechend abgebildet werden. Ein mögliches Vorgehen dafür ist in Vrtic und Axhausen, 2003 beschrieben.

Die hier erstellte Wunschlinienmatrix wurde in ihrer Struktur gegenüber der Ausgangsmatrix 1995 insgesamt nicht wesentlich verändert. Die gesamte Reiseweitenverteilung wurde entsprechend dem Mikrozensus Verkehr 2000 festgelegt. Dabei zeigte sich, dass durch eine ungenügende und inkonsistente Auswahl der Zählstellen, sowie durch sehr unterschiedliche Differenzen zwischen Netzbelastungen aus der Ausgangsmatrix und den Zählwerten bei einzelnen Zählstellen die Nachfrageverteilung auf bestimmten Querschnitten sehr stark verändert werden kann.

Das Verfahren könnte vor allem an folgenden zwei Punkten verbessert und weiterentwickelt werden:

- Anwendung für die ÖV-Netze. Da für die ÖV-Modellierung andere Umlegungsmethoden angewendet werden müssen als im mIV, müsste im PFE neben der unterschiedlichen

Netzstruktur auch eine neue Methode zur Erstellung der alternativen Routen implementiert werden. Diese Erweiterungen wurden sehr grundlegende Veränderungen im Programm verlangen.

- Die Ausgangsstruktur der Spinnen einzelner Querschnitten (Zählstellen) sollte durch die Kalibration nicht zu stark verändert werden. Dies bedeutet, dass die relativen Anteile der einzelnen Quell-Ziel-Beziehungen bei den Querschnittsbelastungen mindestens über kurzfristige Zeiträume und ohne bekannte Gründe nicht stark verändert werden sollen. Dafür müssten im Programm weitere Nebenbedingungen implementiert werden.

Für die Erstellung von nationalen Quell-Zielmatrizen sind die vorhandenen Datengrundlagen in der Schweiz sehr beschränkt. Wie vorher schon erwähnt wurde, können mit dem hier entwickelten Verfahren verlässliche Ergebnisse erzielt werden, wenn neben einer geeigneten Ausgangsmatrix auch eine genügende Zählstellendichte vorhanden ist. Die existierenden Querschnittszählungen sind im Strassennetz für die Matrixerstellung nicht geeignet verteilt. Hier wäre es nötig, für die bestehende Netzdichte und Zonierung eine Optimierung der Zählstellenverteilung durchzuführen. Eine besser geeignete Verteilung wäre sowohl bei der automatischen als auch bei den SSVZ (manuellen) Zählstellen möglich.

Weitere wichtige Verbesserungen der Grundlage wären vor allem in Bezug auf die Struktur der Wunschlinienmatrix möglich. Für die praktische Anwendung wäre es sehr wichtig, Fahrtzweckspezifische Wunschlinienmatrizen zu erstellen. Um eine verlässliche Struktur der Ausgangsmatrix zu erstellen, können folgende Möglichkeiten überprüft werden:

- Durchführung einer grossräumigen Quell-/Ziel-Befragung oder Spinnenerhebungen mit Quell-/Ziel-Befragungen und Querschnittszählungen
- Erstellen einer Ausgangsmatrix auf Grundlage der vorhandenen räumlichen, soziodemographischen- und verkehrlichen Charakteristiken (Modellrechnung)
- Kombination aus Teilerhebungen und Modellrechnungen

Aus den heute vorhandenen Erhebungsdaten ist die Erstellung von Teilmatrizen im Strassenverkehr als Grundlage für die Hochrechnung und Kalibration auf die Querschnittszählungen nicht möglich. Dafür müssten zusätzliche Spinnenerhebungen durchgeführt werden. Aus solchen Erhebungen wäre es möglich sowohl eine Teilmatrix zu erstellen als auch die Hochgerechnete bzw. kalibrierte Matrix zu überprüfen. Durch die Rückkoppelungen und die Anpassung der Eingangsgrößen bei der Matrixerstellung sollten mit der erstellten Matrizen die erhobenen Nachfrageverteilungen auf einzelnen Querschnitten reproduziert werden. Damit ist die Verlässlichkeit der nicht erhobenen bzw. modellmässig berechneten Quell-Zielströmen deutlich erhöht.

Mit den heute in der Schweiz verfügbaren Daten ist die Erstellung einer verlässlicheren Matrixstruktur nur durch die Kombination dieser Daten mit Modellrechnungen möglich. Auf den Grundlagen der Pendlermatrix 2000, der Schienenverkehrsmatrix (von SBB durchgeführte Quell-Ziel Erhebungen), den Erhebungen des alpen- und grenzenquerenden Personenverkehrs auf Strasse und Schiene (A+GQPV), des Mikrozensus Verkehrs 2000, der KEP-Befragungen, der Stated Preference Befragungen von Vrtic, Axhausen, Maggi und Rossera (2003) und den existierenden Strassen- und Schienenmodellen sowie weiteren statistischen Daten, können durch die Schätzung eines geeigneten Ziel- und Verkehrsmittelwahlmodells die fahrzweckspezifischen Quell-Zielströme neu geschätzt werden. Dabei wäre es sehr wichtig, dass anhand der vorher erwähnten Daten die ermittelten Quell-Zielströme überprüft werden und nach Bedarf die Eingangsgrößen und Modellparameter durch wiederholte Rückkopplungen korrigiert werden, bis die ermittelten und erhobenen Werte mit genügender Genauigkeit übereinstimmen.

## 10 Literatur

- Ashok, K. and M. E. Ben-Akiva (1993) Dynamic origin-destination matrix estimation and prediction for real-time traffic management systems, in *Proc. of 12th Int. Symp. on Transpn. and Traffic Theory*, 465-484, Amsterdam, Elsevier.
- Barbour, R. and J. D. Fricker (1994) Estimation of an origin-destination table using a method on shortest augmenting paths. *Transportation Research*, **28B** (1) 77-89.
- Beckman, M. J., C. B. McGuire and C. B. Winston (1956) *Studies in the Economics of Transportation*. Yale University Press, New Haven.
- Bell, M. G. H. (1983a) Linear model for the estimation of origin-destination matrices, *Proc. Associazione Italiana di Ricerca Operativa*, 901-916, Napoli, September 1983.
- Bell, M. G. H. (1983b) The estimation of an origin-destination matrix from traffic counts. *Transportation Science*, **17**, 198-218.
- Bell, M. G. H., D. Inaudi, J. Lange and M. Maher (1991) Techniques for the dynamic estimation of TRIP TABLE matrices in traffic networks. *Proc. of the DRIVE Conference*, Brussels, 1040-1056.
- Bell, M. G. H. (1984) Log-linear models for the estimation of origin-destination matrices from traffic counts: An approximation, in *Proc. 9th Int. Symp. on Transpn. and Traffic Theory*, VNU Science Press, Utrecht, 451-470.
- Bell, M. G. H. (1985) Variances and covariances for origin-destination flows when estimated by log-linear models. *Transportation Research*, **19B**, 497-507.
- Bell, M. G. H. (1991a) The estimation of generalised least squares by constrained generalised least squares. *Transportation Research*, **25B**, 13-22.
- Bell, M. G. H. (1991b) The real-time estimation of origin-destination flows in the presence of platoon dispersion. *Transportation Research*, **25B**, 115-125.
- Bell, M. G. H., W. H. K. Lam and Y. Iida (1996) A time-dependent multi-class path flow estimator. *Proc. 13<sup>th</sup> Int. Symp. on Transportation and Traffic Theory*, Lyon, July, 173-194.
- Bell, M. G. H., C. M. Shield, F. Busch and G. Kruse (1997a), A stochastic user equilibrium path flow estimator. *Transportation Research*, **5C**, 197-210.
- Bell, M. G. H. and Y. Iida (1997b), *Transportation Network Analysis*, Wiley, England.
- Bell, M. G. H. and S. Grosso (1998), The Path Flow Estimator as a network observer, *Traffic Engineering and Control*, **39**, 540-550.
- Bell, M. G. H. and S. Grosso (1999) Estimating path flows from traffic counts, in *Traffic and Mobility*, Springer, Berlin, 85-105.
- Bell, M. G. H. and C. M. Shield (1995) A log-linear model for path flow estimation. *Proc. of 4th International Conference on the Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering*, Capri.

- Bell, M. G. H., C. M. Shield, J-J Henry and L. Breheret (1996) *A stochastic user equilibrium (SUE) path flow estimator for the DEDALE database in Lyon*. Advanced Methods in Transportation Analysis, Springer-Verlag, Berlin, 75-92.
- Bell, M. G. H. and S. Grosso (1998), The Path Flow Estimator as a network observer. *Traffic Engineering and Control*, **39**, 540-550.
- Ben-Akiva, M. E. and S. Lerman,(1985) *Discrete Choice Analysis*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Bierlaire, M. and P. L. Toint (1995) MEUSE: An origin-destination matrix estimator that exploits structure. *Transportation Research*, **29B**, 47-60.
- Brenninger-Goethe, K., K. O. Jornsten, J. T. Lundgren (1989) Estimation of origin/destination matrices from traffic counts using a multiobjective programming formulation. *Transportation Research*, **23B**, 257-269.
- Cascetta, E. (1984) Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data: a generalised least squares estimator. *Transportation Research*, **18B**, 289-299.
- Cascetta, E. and S. Nguyen (1988) A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts. *Transportation Research*, **22B**, 437-455.
- Cascetta, E., D. Inaudi and G. Marquis (1993) Dynamic estimators of origin-destination matrices using traffic counts, *Transportation Science*, **27**, 363-373.
- Cascetta, E., A. Nuzzolo, F. Russo and A. Vitetta (1996) A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems. Specification and some calibration results for interurban roads. *Proc. 13<sup>th</sup> Int. Symp. on Transportation and Traffic Theory*, Lyon, 697-712.
- Cascetta, E. and F. Russo, (1997) Calibrating aggregate travel demand models with traffic counts: Estimators and statistical performances. *Transportation*, **24**(3), 271-293.
- Cascetta, E. and M. N. Postorino (2001) Fixed point approaches to the estimation of O-D matrices using traffic counts on congested networks. *Transportation Science*, **35**, 134-147.
- Chen, Y. and M. Florian (1994) O-D adjustment problem with congestion. Part I. Publication CRT-94-56, Centre de Recherche sur les Transport, Universite de Montreal, Montreal, Canada.
- Clegg, J. and M. J. Smith (2001) Cone projection versus half-space projection for the bilevel optimisation of transportation networks. *Transportation Research*, **35B**, 71-82.
- Cremer, M. and H. Keller (1981) Dynamic identification of O-D flows from traffic counts at complex intersections. *Proc. 8<sup>th</sup> Int. Symp. on Transportation and Traffic Theory*, Toronto, 121-142.
- Cremer, M. and H. Keller (1987) A new class of dynamic methods for the identification of origin-destination flows. *Transportation Research*, **21B**, 117-132.
- Davis, G. A. and C. J. Lan (1995) Estimating intersection turning movement proportions from less-than-complete sets of traffic counts. *Transportation Research Record*, **1510**, 53-59.
- FGSV (1995) Hinweise zur Schätzung von Verkehrsbeziehungen mit Hilfe von Querschnittszählungen, FGSV, Köln

- Fisk, C. (1980) Some developments in equilibrium traffic assignment. *Transportation Research*, **14B**, 243-255.
- Fisk, C. (1988) On combining maximum entropy trip matrix estimation with user optimal assignment. *Transport Research*, **22B**, 69-79.
- Fisk, C. and D. E. Boyce (1983) A note on trip matrix estimation from link traffic counts. *Transportation Research*, **17B**, 245-250.
- Florian, M. and Y. Chen (1995) A coordinate descent method for the bilevel O-D adjustment problem. *Internat. Trans. Oper. Res.*, **2(2)**, 165-179.
- Hazelton, M. L. (2001) Inference of origin-destination matrices: estimation, prediction and reconstruction. *Transportation Research*, **35B**, 667-676.
- Hazelton, M. L. (2000) Estimation of O-D matrices from from link flows on uncongested networks. *Transportation Research*, **3B**, 549-566.
- Hendrickson, C. and S. McNeil (1984) Matrix entry estimation errors. *Proceedings of the Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Delft, July, 413-430.
- Kimber, R. M. and E.M. Hollis (1979) Traffic queues and delays at road junctions, TRRL Laboratory Report 909, Transport and Road Research laboratory, Crowthorne, England.
- Lan, C. J. and G. A. Davis (1999) Real-time estimation of turning movement proportions from partial counts on urban networks. *Transportation Research*, **7C**, 305-327.
- LeBlanc, L. J. and K. Farhanigan (1982) Selection of a trip table which reproduces observed link flows, *Transportation Research*, **16B**, 83-88.
- Leonard, D. R., J. R. Tough and P. C. Baguley (1978) CONTRAM - A traffic assignment model for predicting flows and queues during peak periods. *TRRL Laboratory Report LR841*, Transport and Road Research laboratory, Crowthorne, England.
- Li, B. and B. de Moor (1999) Recursive estimation based on the equality-constrained optimisation for intersection origin-destination matrices. *Transportation Research*, **33B**, 203-214.
- Li, B. and B. de Moor (2002) Dynamic identification of origin-destination matrices in the presence of incomplete observations, *Transportation Research*, **36B**, 37-57.
- Liu, S. and J. D. Fricker (1996) Estimation of trip table and the  $\theta$  parameter in a stochastic network. *Transportation Research*, **30A**, 287-305.
- Lo, H. P., N. Zhang and W. H. K. Lam (1996) Estimation of an origin-destination matrix from random link choice proportions. *Transportation Research*, **30B**, 309-324.
- Magnanti, T. L. and J. Perakis (1997) Averaging schemes for variational inequalities and systems of equations. *Math. Oper. Res.*, **22(3)**, 568-587.
- Maher, M. (1983) Inferences on trip matrices from observations on link volumes: a Bayesian statistical approach. *Transportation Research*, **17B**, 435-447.
- Maher, M. and X. Zhang (1999) Algorithms for the solution of the congested trip matrix estimation problem. In: *Proc. 14th Int. Symp. on Transpn. and Traffic Theory*, Elsevier, Amsterdam, 445-469.

- Maher, M., X. Zhang, and D. Van Vliet (2001) A bilevel programming approach for trip matrix estimation and traffic control problems with stochastic user equilibrium link flows. *Transportation Research*, **35B**, 23-40.
- Marcotte, P. and D. L. Zhu (1996) Exact and inexact penalty methods for the generalised bilevel programming problem. *Mathematical Programming*, **74**, 141-157.
- McNeil, S. and C. Hendrickson (1985) A regression formulation of the matrix estimation problem. *Transportation Science*, **19**, 278-292.
- Nash, J. (1951) Non-cooperative games. *Annals of Mathematics*. Vol 54, pp 286-295.
- Nguyen, S. (1977) Estimating an O-D matrix from network data: A network equilibrium approach, Report 87, Centre de recherche sur les transports, Montreal.
- Nguyen, S. (1984) Estimating origin-destination matrices from observed flows, In M Florian, *Transportation Planning Methods*. Elsevier, Amsterdam, 363-380.
- Nihan, N. L. and G. A. Davis, (1987) Recursive estimation of origin-destination matrices from input/output counts. *Transportation Research*, **21B**, 149-163.
- Nihan, N. L. and G. A. Davis (1989) Application of prediction error minimisation and maximum likelihood to estimate intersection O-D matrices from traffic counts. *Transportation Science*, **23**, 77-90.
- Robillard, P. (1975) Estimating the O-D matrix from observed link volumes. *Transportation Research*, **9**, 123-128.
- Sherali, H. D. and T. Park (2001) Estimation of dynamic origin-destination trip tables for a general network. *Transportation Research*, **35B**, 217-235.
- Sherali, H.D., R. Sivanandan and A.G. Hobeika (1994) A linear programming approach for synthesising origin-destination trip tables from link traffic volumes. *Transportation Research*, **28B**, 213-234.
- Sherali, H. D., N. Arora and A.G. Hobeika (1997) Parameter optimisation methods for estimating dynamic origin-destination trip tables. *Transportation Research*, **31B**, 141-157.
- Spiess, H. (1987) A maximum likelihood model for estimating origing-destination models. *Transportation Research*, **21B**, 395-412.
- Spiess, H. (1990) A gradient approach for the O-D matrix adjustment problem, Report 693, Centre de recherche sur les transports, Montreal.
- Tobin, R. and T. Friesz (1988) Sensitivity analysis for equilibrium network flow. *Transportation Science*, **22**(4), 242-250.
- Turnquist, M. and Y. Gur (1979) Estimation of trip tables from observed link volumes. *Transportation Research Record*, **730**, 1-6.
- Yang, H, Y. Iida and T. Sasaki (1992) Estimation of origin-destination matrices from link counts on congested networks. *Transportation Research*, **26B**, 417-434.
- Yang, H., Y. Iida and T. Sasaki (1994) The equilibrium-based origin-destination estimation problem. *Transportation Research*, **28B**, 23-33.
- Yang, H. (1995) Heuristic algorithms for the bilevel origin/destination matrix estimation problem. *Transportation Research*, **29B**, 231-242.

- Yang, H., Q. Meng and M. G. H. Bell (2001) Simultaneous estimation of the origin-destination matrices and travel cost coefficient for congested networks in a stochastic user equilibrium. *Transportation Science*, **35**(2), 107-123.
- U.S. Bureau of Public Roads (1964) Traffic Assignment Manual. *U.S. Department of Commerce*, Washington DC.
- Vardi, Y. (1996) Network tomography : Estimating source-destination traffic intensities from link data. *Journal of the American Statistical Association*, **91**, 365-377.
- Van Zuylen, H and L G Willumsen (1980) The most likely trip matrix estimated from traffic counts. *Transportation Research*, **14B**, 281-293.
- Vrtic, M., K.W. Axhausen, F. Rossera und R. Maggi (2003) Verifizierung von Prognosemethoden im Personenverkehr, im Auftrag der SBB und dem Bundesamt für Raumentwicklung (ARE), IVT, ETH Zürich und USI Lugano, Zürich und Lugano.
- Vrtic, M. und K. W. Axhausen (2003) Experiment mit einem dynamischen Umlegungsverfahren, *Strassenverkehrstechnik*, **47** (3) 121-126.
- Vrtic, M., Ph. Fröhlich und K.W. Axhausen (2003) Schweizerische Netzmodelle im Strassen- und Schienenverkehr, in Kaspar, C., C. Laesser und T. Bieger (2003) Jahrbuch 2002/2003 Schweizerische Verkehrswirtschaft, Universität, St. Gallen.
- Vrtic, M. , R. Koblo und M.Vödisch (1999) Entwicklung eines bimodales Personenverkehrsmodells als Grundlage für Bahn2000, 2 Etappe, Modellierungsauftrag 1, (im Auftrag der SBB und dem Dienst für Gesamtverkehrsfragen), Prognos AG, Basel
- Wong, S. C. and C. O. Tong (1998) Estimation of time-dependent origin-destination matrices for transit networks. *Transportation Research*, **32B**, 35-48.





**Forschungsberichte auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Verkehrsingenieure (SVI)**  
**Rapports de recherche sur proposition de l'Association suisse des ingénieurs en transports**  
(erschienen im Rahmen der Forschungsreihe des UVEK / parus dans le cadre des recherches du DETEC)

- 1980 **Velo- und Mofaverkehr in den Städten**  
(R. Müller)
- 1980 **Anleitung zur Projektierung einer Lichtsignalanlage**  
(Seiler Niederhauser Zuberbühler)
- 1981 **Güternahverkehr, Gesetzmässigkeiten**  
(E. Stadtmann)
- 1981 **Optimale Haltestellenabstände beim öffentlichen Verkehr**  
(Prof. H. Brändli)
- 1982 **Entwicklung des schweizerischen Strassenverkehrs \***  
(SNZ Ingenieurbüro AG)
- 1983 **Lichtsignalanlagen mit oder ohne Uebergangssignal Rot-Gelb**  
(Weber Angehrn Meyer)
- 1983 **Güternahverkehr, Verteilungsmodelle**  
(Emch + Berger AG)
- 1983 **Parkraumbewirtschaftung als Mittel der Verkehrslenkung \***  
(Glaser + Saxer)
- 1984 **Le rôle des taxis dans les transports urbains (franz. Ausgabe)**  
(Transitec)
- 1984 **Park and Ride in Schweizer Städten \***  
(Balzari & Schudel AG)
- 1986 **Verträglichkeit von Fahrrad, Mofa und Fussgänger auf gemeinsamen Verkehrsflächen \***  
(Weber Angehrn Meyer)
- 1987 **Verminderung der Umweltbelastungen durch verkehrsorganisatorische und -technische Massnahmen\***  
(Metron AG)
- 1987 **Provisorischer Behelf für die Umweltverträglichkeits-Prüfung von Verkehrsanlagen \***  
(Büro BC, Jenni + Gottardi AG, Scherrer)
- 1988 **Bestimmungsgrössen der Verkehrsmittelwahl im Güterverkehr \***  
(Rapp AG)
- 1988 **EDV-Anwendungen im Verkehrswesen**  
(IVT, ETH Zürich)
- 1988 **Forschungsvorschläge Umweltverträglichkeitsprüfung von Verkehrsanlagen**  
(Büro BC, Jenni & Gottardi AG, Scherrer)
- 1989 **Vereinfachte Methode zur raschen Schätzung von Verkehrsbeziehungen \***  
(P. Widmer)
- 1990 **Planungsverfahren bei Ortsumfahrungen**  
(Toscano-Bernardi-Frey AG)
- 1990 **Anteil der Fahrzeugkategorien in Abhängigkeit vom Strassentyp**  
(Abay & Meyer)
- 1991 **Busbuchten, ja oder nein?\***  
(Zwicker und Schmid)
- 1991 **EDV-Anwendung im Verkehrswesen, Katalog 1990**  
(IVT, ETH Zürich)
- 1991 **Mofa zwischen Velo und Auto**  
(Weber Angehrn Meyer)
- 1991 **Erhebung zum Güterverkehr**  
(Abay & Meier, Albrecht & Partner AG, Holinger AG, RAPP AG, Sigmaplan AG)
- 1991 **Mögliche Methoden zur Erstellung einer Gesamtbewertung bei Prüfverfahren\***  
(Basler & Partner AG)
- 1992 **Parkierungsbeschränkungen mit Blauer Zone und Anwohnerparkkarte**  
(Jud AG)
- 1992 **Einsatzkonzepte und Integrationsprobleme der Elektromobile\***  
(U. Schwegler)
- 1992 **UVP bei Strassenverkehrsanlagen, Anleitung zur Erstellung von UVP-Berichten\***  
(Büro BC, Jenni & Gottardi AG, Scherrer)  
erschienen auch als Mitteilungen zur UVP Nr. 7/Mai 1992 des BUWAL
- 1992 **Von Experten zu Beteiligten - Partizipation von Interessierten und Betroffenen beim Entscheiden über Verkehrsvorhaben\***  
(J. Dietiker)



- 2000 **Dephi-Umfrage Zukunft des Verkehrs in der Schweiz**  
(P. Widmer / IPSO Sozial-, Marketing- und Personalforschung)
- 2000 **Der Wert der Zeit im Güterverkehr**  
(Jenni + Gottardi AG)
- 2000 **Floating Car Data in der Verkehrsplanung**  
(Rudolf Keller & Partner Verkehrsingenieure AG + Rosenthaler + Partner AG)
- 2000 **Verlässlichkeit als Entscheidungsvariable: Experimente mit verschiedenen Befragungssätzen**  
(IVT - ETHZ)
- 2001 **Aktivitätenorientierte Personenverkehrsmodelle, Vorstudie**  
(P. Widmer und K.W. Axhausen)
- 2001 **Zeitkostenansätze im Personenverkehr**  
(G. Abay und K.W. Axhausen)
- 2001 **Véhicules électriques et nouvelles formes de mobilité**  
(Transitec Ingénieurs-Conseils SA)
- 2001 **Besetzungsgrad von Personenzugwagen: Analyse von Bestimmungsgrößen und Beurteilung von Massnahmen zu dessen Erhöhung**  
(RAPP AG Ingenieure + Planer)
- 2001 **Grobkonzept zum Aufbau einer multimodalen Verkehrsdatenbank**  
(INFRAS)
- 2001 **Ermittlung der Gesamtleistungsfähigkeit (MIV + OEV) bei lichtsignalgeregelten Knoten**  
(büro S-ce Simon-consulting-engineering)
- 2001 **Besteuerung von Autos mit einem Bonus/Malus-System im Kanton Tessin**  
(U. Schwegler Büro für Verkehrsplanung)
- 2001 **GIS als Hilfsmittel in der Verkehrsplanung**  
(büro widmer)
- 2001 **Umgestaltung von Strassen im Zuge von Erneuerungen**  
(Infraconsult AG + Zeltner + Maurer AG)
- 2001 **Piloterhebung zum Dienstleistungsverkehr und zum Gütertransport mit Personenzugwagen**  
(Prognos AG, Emch+Berger AG, IVU Traffic Technologies AG)
- 2002 **Parkplatzbewirtschaftung bei publikumsintensiven Einrichtungen - Auswirkungsanalyse**  
(Metron AG, Neosys AG, Hochschule Rapperswil)
- 2002 **Probleme bei der Einführung und Durchsetzung der im Transportwesen geltenden Umweltschutzbestimmungen; unter besonderer Berücksichtigung des Vollzugs beim Strassenverkehrslärm**  
(B+S Ingenieur AG)
- 2002 **Nachhaltigkeit und Koexistenz in der Strassenraumplanung**  
(Berz Hafner + Partner AG)
- 2002 **Warum steht P. Müller lieber im Stau als im Tram?**  
(Planungsbüro Jürg Dietiker / MOVE RAUM P. Regli / Landert Farago Davatz & Partner / Dr. A. Zeyer)
- 2002 **Nachhaltigkeit im Verkehr**  
(Jenni + Gottardi AG)
- 2002 **Massnahmen zur Erhöhung der Akzeptanz längerer Fuss- und Velostrecken**  
(Arbeitsgemeinschaft Büro für Mobilität / V. Häberli / A. Blumenstein / M. Wältli)
- 2002 **Carreivekehr: Grundlagen und Perspektiven**  
(B+S Ingenieur AG / Gare Routière de Genève)
- 2002 **Potentielle Gefahrenstellen**  
(Basler & Hofmann / Psychologisches Institut der Universität Zürich)
- 2003 **Evaluation kurzfristiger Benzinpreiserhöhungen**  
(Infras / M. Peter / N. Schmidt / M. Maibach)
- 2002 **Verlässlichkeit als Entscheidungsvariable, Vorstudie**  
(ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme IVT)
- 2002 **Mischverkehr MIV / ÖV auf stark befahrenen Strassen**  
(Verkehrsingenieurbüro TEAMverkehr)
- 2003 **Vorstudie zu den Wechselwirkungen Individualverkehr – öffentlicher Verkehr infolge von Verkehrstelematik-Systemen**  
(Abay & Meier, Zürich)
- 2003 **Strassen mit Gemischtverkehr: Anforderungen aus der Sicht der Zweiradfahrer**  
(WAM Partner, Planer und Ingenieure, Solothurn)
- 2004 **Perspektiven für kurze Autos**  
(Ingenieur- und Planungsbüro Bühlmann, Zollikofen)
- 2004 **Lange Planungsprozesse im Verkehr**  
(BINARIO TRE, Windisch)
- 2004 **Auswirkungen von Personal Travel Assistance (PTA) auf das Verkehrsverhalten**  
(Ernst Basler und Partner AG, Zürich)



*\* vergriffen: Diese Exemplare können auf Wunsch nachkopiert werden  
\*épuisé: Selon désir, ces rapports peuvent être copiés*

Die Berichte können bezogen werden bei / Les rapports peuvent être commandés au:  
**VSS, Seefeldstrasse 9, 8008 Zürich,**  
**Tel. 01 269 40 20, Fax. 01 / 252 31 30, info@vss.ch**

