



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Grundlagen für eine differen- zierte Bemessung von Ver- kehrsanlagen

**Bases pour une procédure de dimensionnement
différenciée pour infrastructures de trafic**

A complex design method for transport infrastructures

Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETH Zürich

**M. Bernard
K.W. Axhausen**

**Forschungsauftrag 2000/339 auf Antrag des Schweizerischen Ver-
bands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)**

September 2008

1283

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen beauftragten Autor(en).
Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que l' (les) auteur(s) mandaté(s) par l'Office fédéral des routes.
Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

Il contenuto di questo rapporto impegna solamente l' (gli) autore(i) designato(i) dall'Ufficio federale delle strade.
Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) appointed by the Swiss federal roads authority.
Supply: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen

Bases pour une procédure de dimensionnement différenciée pour infrastructures de trafic

A complex design method for transport infrastructures

Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETH Zürich

**M. Bernard
K.W. Axhausen**

Forschungsauftrag 2000/339 auf Antrag des Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

September 2008

1283



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Impressum

Forschungsstelle und Projektteam

Projektleitung
KW Axhausen

Mitglieder
M Bernard
KW Axhausen

Federführende Fachkommission

Fachkommission 1: Verkehrsplanung

Begleitkommission

Präsident
Paul Widmer
Mitglieder
Georg Abay
Daniel Baumann
Frank Bruns
Dieter Egger
Christoph Lieb
Jost Lüking
Ruedi Ott

Antragsteller

Schweizerischen Verbands der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Bezugsquelle

Das Dokument kann kostenlos von www.vss.ch herunter geladen werden.

VSS-Forschungsauftrag (VSS 2000/399)

Grundlagen für eine differenzierte Bemessung von Verkehrsanlagen

**M Bernard
K W Axhausen**

Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung

**561
September 2008**

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	ii
Abbildungsverzeichnis	v
Kurzfassung	ix
Abstract.....	x
Resume.....	xi
Zusammenfassung	xii
Executive summary.....	xix
1 Problembeschreibung	1
1.1 Ausgangslage und Aufgabenstellung	1
1.2 Übersicht zum Berichtsaufbau.....	3
2 Stand der Anwendung und Forschung	4
2.1 Qualitätsbezogene Bemessung: Strassen	4
2.2 Durchsatzbezogene Bemessung: Knoten ohne Lichtsignalanlage	10
2.3 Durchsatzbezogene Bemessung: Kreisverkehrsplätze	11
2.4 Durchsatzbezogene Bemessung: Knoten mit Lichtsignalanlage.....	12
2.5 Verkehrsdynamik (Zusammenbruch)	14
3 Bemessungsmethoden anderer Ingenieurwissenschaften	17
3.1 Konstruktives Bauingenieurwesen	17
3.2 Bemessung von Elektrizitätskraftwerken/ Elektrizitätsnachfrage	21
3.3 Hochwasserschutz	24
4 Datengrundlage	28
4.1 Anforderungen an die Datenbasis	28
4.2 Datenbeschreibung	28

5	Zusammenhang Verkehrsstärke und Varianz.....	32
5.1	Methodik	32
6	Integriertes Bemessungskonzept.....	42
6.1	Einleitung.....	42
6.2	Definitionen.....	43
6.3	Herleitung	43
6.4	Ermittlung der Kapazität als Zufallsgrösse	45
6.5	Ergebnisse der Kapazitätsermittlung	47
6.6	Ergebnisse der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit	54
6.7	Auswirkungen eines Zusammenbruchs.....	60
6.8	Erwartete Kosten infolge von Zusammenbrüchen.....	74
7	Anwendung	78
7.1	Eingangsdaten.....	78
7.2	Vorgehen	79
7.3	Beispiel	82
7.4	Alternativenvergleich	86
8	Ausblick.....	89
9	Literatur.....	90
	Anhang: Übersicht der Fundamentaldiagramme	94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Vergleich der Verkehrsqualitätsstufen von amerikanischem HCM, deutschem HBS und schweizerischen Norm (VSS).....	8
Tabelle 2	Steuerungsverfahren für Lichtsignalgesteuerte Knotenpunkte	13
Tabelle 3	Lage und Typ der für die Analyse verwendete Zählstellen	29
Tabelle 4	Allgemeine Charakteristika der für die Analyse verwendeten Zählstellen..	30
Tabelle 5	Verteilung der Mittelwerte der 5-minütigen Auslastungen r_5 für gegebenen 60-minütige Auslastungen r_{60} (Auszug, nur Vielfache von 10 % dargestellt) 35	
Tabelle 6	Standardabweichung der 5-minütigen Auslastungsgrade $r_5=q_5/C_{VSS}$ gegenüber der mittleren stündlichen Auslastung $r_{60}=Q_{60}/C_{VSS}$	40
Tabelle 7	Datengrundlage für die Ermittlung der Kapazitäten als Zufallsgrösse, getrennt nach Schwerverkehrsklassen	49
Tabelle 8	Ermittelte Kapazitäten als Zufallsvariable Schwerverkehrsanteil: 0 - 5 %..	50
Tabelle 9	Ermittelte Kapazitäten als Zufallsvariable Schwerverkehrsanteil: 5 - 15 %.....	51
Tabelle 10	Ermittelte Kapazitäten als Zufallsvariable Schwerverkehrsanteil: 15 - 25 %.....	52
Tabelle 11	Ermittelte relative Kapazität: Median und Mittelwert des Erwartungswertes und der Standardabweichung	53
Tabelle 12	Parameter zur Bestimmung der mittleren Zusammenbruchswahrscheinlichkeit mittels approximierter Sigmoid-Kurve	58
Tabelle 13	Parameterschätzungen für die BPR-Funktion zur Berechnung der mittleren von Zusammenbrüchen nicht beeinflussten Geschwindigkeit v_m mit 95%-Konfidenzintervall der Parameter	65

Tabelle 14 Parameterwerte der Funktion zur Bestimmung von f_{mb} 66

Tabelle 15 Parameterwerte der Funktion zur Bestimmung von t_b für beide
Fahrzeugklassen (mIV und SV) 70

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Die 300 höchstbelasteten Stunden des vierspurigen Trans-Canada-Highway (Highway #1) östlich der Rocky Mountains	5
Abbildung 2	Die 8000 höchstbelasteten Stunden der gleichen Messung des vierspurigen Trans-Canada-Highway (Highway #1) östlich der Rocky Mountains.....	6
Abbildung 3	Stündliches Verkehrsaufkommen aller Stunden des Jahres 1996 des Trans-Canada Highways.....	6
Abbildung 4	Qualitätsstufen (levels of lervice, LOS) des Highway Research Board (1965).....	7
Abbildung 5	Bestimmung von Verkehrsstufen nach dem Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen	9
Abbildung 6	Geschwindigkeitszeitreihe des Autobahnkreuz Highway 400-Black Creek Drive und Highway 401 in Toronto	15
Abbildung 7	Wahrscheinlichkeit eines Zusammenbruchs des frei fließenden Verkehrs bei gegebenem Verkehrsaufkommen; gemessen am Autobahnkreuz Highway 400-Black Creek Drive und Highway 401 in Toronto.....	16
Abbildung 8	Scharfer (a) und gleitender (b) Übergang bei der Definition des Grenzzustands	18
Abbildung 9	Irreversibler und reversibler Grenzzustand	19
Abbildung 10	Belastung und Widerstand als Zufallsgrösse	20
Abbildung 11	Qualitativer Verlauf der Stromnachfrage verschiedener Nutzerklassen (Jahreszeit: Sommer).....	22

Abbildung 12	Beobachtete Maximallast eines Haushalts bei unterschiedlicher Messintervalllänge	22
Abbildung 13	Prinzip der Schadensermittlung bei Betrachtung diskreter Schadensereignisse.....	26
Abbildung 14	Beispiel zur Ermittlung der Schadenswahrscheinlichkeit auf Basis der Hochwasserwahrscheinlichkeit und Schadensfunktion für die Nullmassnahme	26
Abbildung 15	Normalverteilte 5-Minuten-Verkehrsstärken bei gegebenen stündlichen Mittelwerten (r_{60}): NP-Plot (links) und Wahrscheinlichkeitsfunktion (rechts).....	37
Abbildung 16	Standardabweichung der 5-minütigen Auslastungsgrade $r_5=q_5/C_{VSS}$ gegenüber der mittleren stündlichen Auslastung $r_{60}=Q_{60}/C_{VSS}$	39
Abbildung 17	Zusammenbruchswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der mittleren stündlichen Auslastung ($r_{60}=Q_{60}/C_{VSS}$) und des Schwerverkehranteils (0 - 5 %, 5 - 15 %, 15 - 25 %) Q_{60} : mittlere stündliche Verkehrsstärke C_{VSS} : Kapazität bei 0 - 5% SV-Anteil nach SN 640 018a (VSS, 2006)	55
Abbildung 18	Detail mittlere Auslastungsgrade: Zusammenbruchswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der mittleren Auslastung und des Schwerverkehranteils	56
Abbildung 19	Detail hohe Auslastungsgrade: Zusammenbruchswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der mittleren Auslastung und des Schwerverkehranteils.....	57
Abbildung 20	Mittlere nicht von Zusammenbrüchen beeinflusste Geschwindigkeit des motorisierten Individualverkehrs (mIV) für Autobahnen mit 120 km/h (schwarz) und 100 km/h (grau)	62
Abbildung 21	Mittlere nicht von Zusammenbrüchen beeinflusste Geschwindigkeit des Werks- bzw. Schwerverkehrs (SV) für Autobahnen mit 120 km/h (schwarz) und 100 km/h (grau)	63

Abbildung 22	Faktor $f_{mb} = v_b / v_m$, Verhältnis von mittlerer von Zusammenbrüchen unbeeinflusster Geschwindigkeit zu Geschwindigkeit während eines Zusammenbruchs für den motorisierten Individualverkehr (mIV) 67
Abbildung 23	Faktor $f_{mb} = v_b / v_m$, Verhältnis von mittlerer von Zusammenbrüchen unbeeinflusster Geschwindigkeit zu Geschwindigkeit während eines Zusammenbruchs für den Wirtschafts- bzw. Schwerverkehr (SV)..... 68
Abbildung 24	Ausschnitt des Verlaufs der 5-minütigen Geschwindigkeitsmittelwerte an der Zählstelle Mattstetten Richtung Zürich (Nr. 23, 0) mit einem Zusammenbruch und Angabe der Dauern des ungestörten Verkehrsflusses (t_m) und des Zusammenbruchs (t_b) 69
Abbildung 25	Mittlere Zusammenbruchsdauern in Stunden für einen Zusammenbruch bei gegebenen Auslastungsgrad r_{60} für Autobahnstrecken mit zulässiger Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h und 100 km/h..... 71
Abbildung 26	Zählstation (23, 0): Mattstetten, Richtung Zürich 1
Abbildung 27	Zählstation (23, 1): Mattstetten, Richtung Bern..... 2
Abbildung 28	Zählstation (32, 0): Deitingen, Richtung Zürich..... 3
Abbildung 29	Zählstation (32, 1): Deitingen, Richtung Bern 4
Abbildung 30	Zählstation (33, 0): Eptingen, Richtung Härkingen 5
Abbildung 31	Zählstation (42, 0): Umfahrung Bern Ost, Richtung Freudenbergerplatz..... 6
Abbildung 32	Zählstation (60, 0): Gunzgen, Richtung Zürich 7
Abbildung 33	Zählstation (60, 1): Gunzgen, Richtung Bern..... 8
Abbildung 34	Zählstation (81, 1): Mutenz, Hard, Richtung Basel 9
Abbildung 35	Zählstation (182, 0): Kirchberg N, Richtung Zürich 10

Abbildung 36	Zählstation (182, 1): Kirchberg N, Richtung Bern	11
Abbildung 37	Zählstation (208, 1): Birrhard, Birrfeld, Richtung Bern	12
Abbildung 38	Zählstation (225, 0): Egerkingen, Verzweigung N2, Richtung Härkingen.....	13

Kurzfassung

Die Bemessungsverfahren der Verkehrstechnik berücksichtigen die Varianzen und Dynamiken der zugrunde liegenden Prozesse in unterschiedlichem Umfang: Leistungsfähigkeit, kurzfristige Schwankungen der Nachfrage, Verteilung der Nachfrage über das Jahr oder den Tag. Mit der dreissigsten Stunde konzentrieren sich die bisherigen Richtlinienverfahren der Bemessung der Hochleistungsstrassen auf einen einzigen Punkt der Verteilung der Nachfrage über das Jahr. Sie ignorieren dabei die inzwischen gut dokumentierten Schwankungen in der Leistungsfähigkeit und die Schwankungen der Nachfrage im Minutenbereich. Die anderen Verfahren sind ähnlich unvollständig in ihrer Konzeption. Diese Lücken führen dazu, dass in der Bemessung die Nutzerkosten der Infrastruktur nicht vollständig erfasst werden. Die Bemessung wird verkürzt auf die Erreichung eines a-priori definierten Qualitätsniveaus ohne dass die Kosten des gewählten Ausbaustandards den entsprechenden Nutzen gegenübergestellt werden.

Ziel dieser Forschungsarbeit war es anhand des Beispiels der Hochleistungsstrassen ein Bemessungsverfahren zu entwickeln, das die oben genannten drei Prozesse vollständig erfasst und anwendungsfähig ist. Der Bericht beschreibt die empirischen Arbeiten und Ergebnisse, die notwendig waren, um das Ziel zu erreichen. Er schliesst mit einem Verfahrensvorschlag, der den gesetzten Ansprüchen genügt.

Das Verfahren berechnet die Zeitverluste, die im Laufe eines Jahres durch kurzfristige Zusammenbrüche des Verkehrsflusses entstehen. Die Wahrscheinlichkeit, dass bei einer gegebenen stündlichen Verkehrsmenge ein Zusammenbruch auftreten wird, wird empirisch ermittelt, wobei auf die automatischen Zählstellen der Schweiz zurückgegriffen wird. Die Wahrscheinlichkeit wird als das Produkt der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Kapazität des Querschnitts und der Wahrscheinlichkeitsverteilung des momentanen Verkehrsflusses berechnet. Die Verlustzeit wird anhand empirisch ermittelter mittlerer Dauern der Zusammenbrüche bestimmt. Die Monetarisierung verwendet die entsprechenden Ansätze der SN 641 820 ff „Kosten-Nutzen-Analyse“ um sowohl die mittleren Zeitverluste, als auch die Unzuverlässigkeit zu bewerten.

Weitere Forschung und Anwendung wird zeigen müssen, ob das zusätzliche Wissen, das dieses komplexere Verfahren bereitstellt, in der praktischen Anwendung seinen zusätzlichen Aufwand rechtfertigt.

Abstract

Traffic engineering design methods do not consider the short-term variation and longer-term dynamics of the essential processes underlying their choices: capacity, short-term variations in demand, annual or daily demand profiles. The 30th hour, for example, focuses the attention of the traditional design methods for motorway cross-sections on a single hour of the year. This ignores the well documented short-term variations in capacity and in demand. The other design methods, such as those for junctions, have similar gaps in their conceptual structure. These gaps cause an underestimate of the user costs in the design process. The current design process is reduced to a check of an a-priori defined level of service standard without a comparison of costs and benefits of the chosen cross-section.

The aim of this project was the development of a design method, which integrates the three processes mentioned above, using motorway cross-section design as an example. The report describes the empirical work undertaken and its results, which were required to achieve this goal. It concludes with a proposal for such a new design method, which matches the expectations formulated.

The new method calculates the time losses, which are caused over the course of a year by short-term breakdowns in traffic flow. The likelihood of such a breakdown for a given traffic volume is estimated empirically drawing on a records of the Swiss automated traffic counting stations. This probability is understood as the product of the probability distributions of the instantaneous capacity and traffic flow. The duration of the breakdown for a given volume is estimated empirically. The values of travel-time-savings and of reliability are taken from the appropriate Swiss guidelines SN 641 820ff.

Further research and application will have to show, if the additional information provided by this more complex method is justifying the additional effort required for practical applications.

Résumé

Les méthodes de dimensionnement de l'ingénierie de trafic ne tiennent pas compte des variations et dynamiques des procès sous-jacents: capacité, variations de la demande à court terme, distribution de la demande au cours d'une année ou d'une journée. Par la prise en compte de la 30^e heure, les méthodes de dimensionnement actuelles se concentrent sur un seul point de la distribution annuelle de la demande. Les variations de capacité et de demande au court terme, qui sont néanmoins bien documentées, sont ignorées par ces procédures. La conception d'autres procédures de dimensionnement, comme celle pour les carrefours, présentent des défauts similaires. Ces défauts mènent à une saisie incomplète des coûts et bénéfices de l'infrastructure. Le dimensionnement est limité à l'atteinte d'un niveau de qualité prédéterminé, sans que les coûts de la mesure effectuée n'aient été comparés aux avantages en résultant.

Le but de ce projet de recherche était donc de développer, par le moyen de l'exemple des routes à grand débit, une méthode de dimensionnement capable de saisir complètement les trois procès décrits ci-dessus qui serait apte à l'application. Le rapport décrit les travaux empiriques et les résultats nécessaires à l'atteinte de ce but. Il est conclu par la proposition d'une procédure qui satisfait les exigences posées.

La procédure calcule les pertes de temps qui résultent de dérangements imprévus du flux de circulation au cours d'une année. La probabilité qu'un tel dérangement survienne à un volume horaire de trafic donnée est déterminée empiriquement sur la base des comptages automatiques en Suisse. La probabilité se calcule comme produit de la répartition statistique de la capacité de la section de route et de celle du flux de circulation actuel. Le temps perdu est déterminé empiriquement en utilisant les durées moyennes des dérangements. La monétarisation de ces pertes est calculée selon la norme SN 641 820 ff „Analyse des coûts et avantages“, afin d'évaluer les pertes de temps moyennes ainsi que le manque de fiabilité.

Par des projets de recherche et des applications ultérieures, on devra déterminer si d'information supplémentaire fournie par cette procédure plus complexe justifie les investissements nécessaires à sa mise en pratique.

Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt ein Bemessungskonzept am Beispiel von Hochleistungsstrassen vor. Die Bewertung erfolgt kontinuierlich – einem Punktesystem vergleichbar – in der Einheit Schweizer Franken (CHF). Eine Bewertung in Stufen wird so vermieden und auch kleine Unterschiede in den Alternativen können so gemessen werden. Die Bemessung wird auf Basis der Fahrzeitkosten durchgeführt, die sich aus der Zahlungsbereitschaft der Verkehrsteilnehmer für Fahrzeitverkürzungen und Zuverlässigkeitssteigerungen ermitteln lassen.

Für die Fahrzeitermittlung wird von den Verkehrszuständen fließender Verkehr und stockender Verkehr ausgegangen, wobei der Übergang durch einen Verkehrszusammenbruch zustande kommt. Hierbei wird vorausgesetzt, dass ein Verkehrszusammenbruch entsteht, wenn die Verkehrsstärke während einer kurzen Periode die aktuelle Kapazität überschreitet. Die Kapazität wird als Zufallsvariable verstanden, die einer ermittelten Verteilung folgt. Im Zeitablauf folgt auf eine gegebene Verkehrsstärke ein Zusammenbruch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, die sich berechnen lässt. Im Falle eines Zusammenbruchs erfahren die Verkehrsteilnehmer für die Zeitdauer des Staus eine Reduktion der Fahrgeschwindigkeit bzw. eine verlängerte Reisezeit, von der angenommen wird, dass sie nicht in vollem Umfang bei der Fahrplanung berücksichtigt wurde und deshalb als Verspätungszeit wahrgenommen wird. Bei der Untersuchung wurden offensichtliche Rückstaus durch Engpässe ausserhalb des betrachteten Abschnitts ausgeschlossen, da diese Effekte den Verkehrsteilnehmern bekannt sein können und nicht eine Unzulänglichkeit der zu bemessenen freien Autobahnstrecke darstellen.

Ausgehend von einer durchschnittlichen über das Jahr gemittelten Fahrgeschwindigkeit ohne Verkehrszusammenbrüche (Abbildung A), lässt sich die Fahrzeit für alle stündlichen Verkehrsstärken des Jahres bestimmen. Für den Fall eines Verkehrszusammenbruchs, der mit der Wahrscheinlichkeit nach Abbildung B auftritt, fällt die Fahrgeschwindigkeit um einen Faktor nach Abbildung C für eine Dauer nach Abbildung D ab. Diese Effekte können für das jeweilige Verkehrsgeschehen der Alternativen ermittelt werden, um z. B. besondere bauliche oder verkehrstechnische Gegebenheiten zu berücksichtigen. Es lassen sich aus den Fahrgeschwindigkeiten bezogen auf einen Abschnitt der Erwartungswert der Fahrzeit und die unplanmässigen Verfrühungen und Verspätungen bestimmen. Diese Reisezeiten und deren Abweichungen (Verfrühung, Verspätung) werden mit den Zahlungsbereitschaften aller Verkehrsteilnehmer für deren Reduktion gewichtet und für ein Jahr bestimmt. Die Summe der Zahlungsbereitschaften wird als Bewertungsgrösse zwischen den Alternativen der Umbauten oder verkehrstechnischen Eingriffen verglichen.

Aus den Abbildungen A bis D wird eine Formel hergeleitet, mit der sich für jede Stunde des Jahres der Erwartungswert der Fahrzeit für eine gegebene Abschnittlänge bestimmen lässt, wobei abhängig vom Auslastungsgrad das Verhältnis von staufreier Fahrt und stockendem Verkehr mit geringeren Geschwindigkeiten berücksichtigt wird. Da einem Verkehrsteilnehmer ein Stauereignis nicht im Voraus bekannt ist, durchfährt er den Abschnitt schneller oder langsamer als die mittlere Geschwindigkeit, wobei unplanmäßige Verspätungen stärker gewichtet werden als Verfrühungen. Dieser Effekt wird durch die geplante Fahrzeit für einen Abschnitt berücksichtigt, über die sich die Verfrühungen und Verspätungen für die stündlichen Verkehrsstärken eines Jahres bestimmen lassen.

Abbildung A Mittlere nicht von Zusammenbrüchen beeinflusste Geschwindigkeit v_m für motorisierten Individualverkehr (mIV, Linie) und Schwerverkehr (SV, gestrichelt) auf Hochleistungsstrassen mit 120 km/h (schwarz) und 100 km/h (grau) erlaubter Maximalgeschwindigkeit bei gegebenem Auslastungsgrad r_{60}

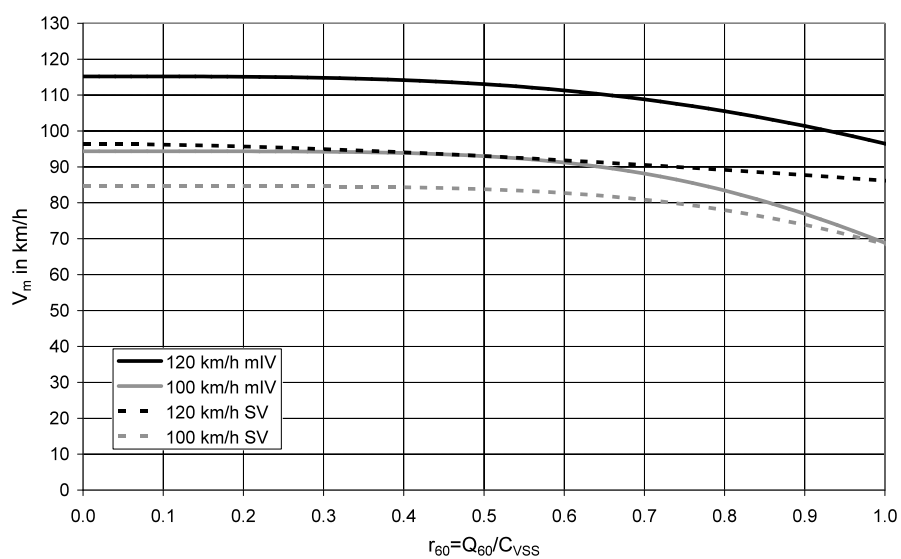


Abbildung B Mittlere Zusammenbruchswahrscheinlichkeit P_b bei gegebenem Auslastungsgrad r_{60} und gegebener Schwerverkehrsstärke (Klassen: 0 - 5 %, 5 - 15 % und 15 - 25 %)

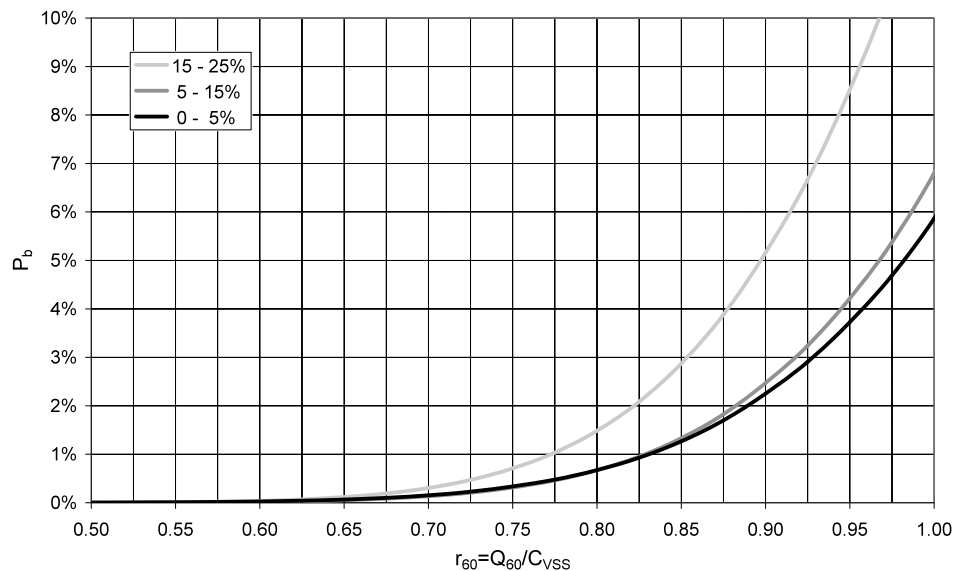


Abbildung C Faktor der mittleren Geschwindigkeitsreduktion während eines Zusammenbruchs f_{mb} für motorisierten Individualverkehr (mIV, Linie) und Schwerverkehr (SV, gestrichelt) auf Hochleistungsstrassen mit 120 km/h (schwarz) und 100 km/h (grau) erlaubter Maximalgeschwindigkeit bei gegebenem Auslastungsgrad r_{60}

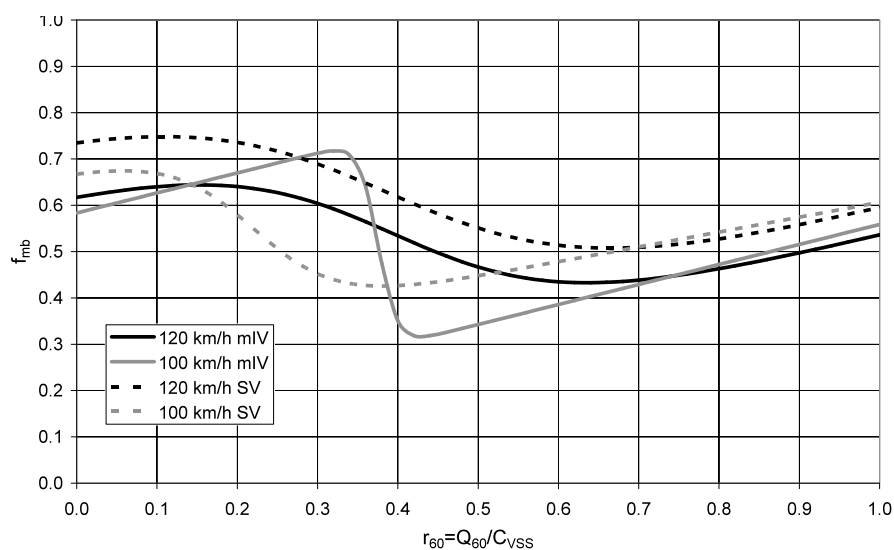
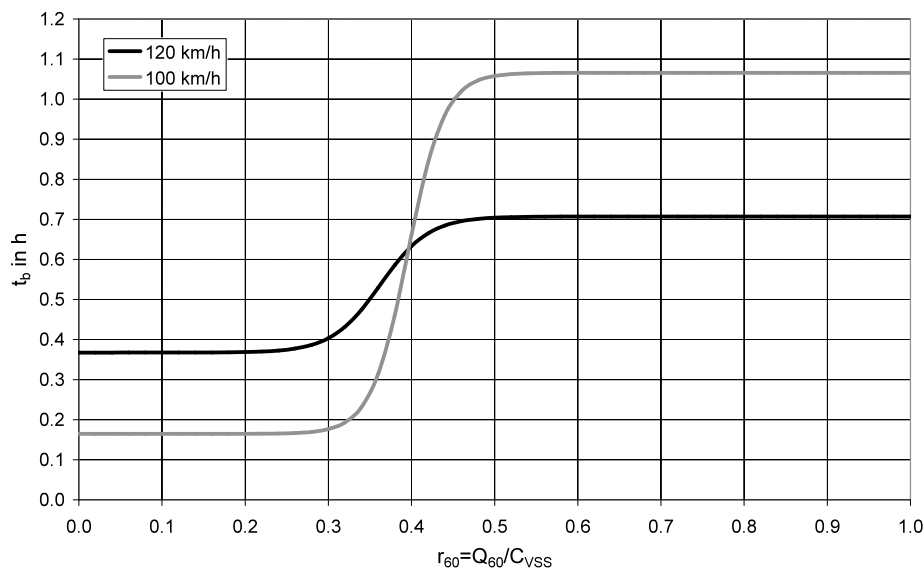


Abbildung D Mittlere Zusammenbruchsdauern t_b bei gegebenem Auslastungsgrad r_{60} für Hochleistungsstrassen mit 120 km/h und 100 km/h zulässiger Maximalgeschwindigkeit



Konzeptübersicht und Abgrenzung zur Bewertung und Abschätzung der Zuverlässigkeit (SN 641 825)

Das vorgestellte Bemessungskonzept ist allgemein für alle Infrastrukturelemente übertragbar und wird am Beispiel von Hochleistungsstrassen vorgestellt. Bestehende Bemessungskonzepte für Knotenpunkte der Schweizer Norm bieten im Gegensatz zur freien Strecke bereits die in diesem Konzept übernommene Grössen wie Reservekapazität (Knoten ohne Lichtsignalanlage), analog die Sättigungsverkehrsstärke (Knoten mit LSA) und mittlere Wartezeiten, die als Produkt der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit mit der Zusammenbruchsdauer verglichen werden können. Die Bemessung von Knotenpunkten lässt sich daher leicht integrieren und ermöglicht eine Bemessung über mehrere Abschnitte von verschiedenartigen Typen. Eine grundlegende Umgestaltung der Bemessung ist somit nur für freie Strecken nötig, die hier am Beispiel von Hochleistungsstrassen behandelt wurde. Zur Bemessung von freien Strecken hat die Schweizer Norm SN 640 016a bisher die Wahl der 30. bis 100. stärkstbela-

steten Stunde als Bemessungsverkehrsstärke vorgeschlagen. Die Bemessungsergebnisse nach dieser Methodik lassen sich nicht mit Bemessungen anderer Netzelemente vergleichen.

Im Detail wurden für Hochleistungsstrassen als beeinflussende Grössen die mittlere Fahrgeschwindigkeit, die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit, die Fahrgeschwindigkeit ohne Zusammenbrüche, die Geschwindigkeitsreduktion während eines Zusammenbruchs, die Zusammenbruchsdauer und die eingeplante Fahrzeit identifiziert, um bauliche sowie verkehrstechnische Modifikationen bewerten zu können. Diese Werte werden getrennt nach Fahrzeugklasse (motorisierter Individualverkehr oder Schwer- bzw. Werkverkehr), Strassentyp (Leistungsfähigkeit bzw. Kapazität und zulässige Maximalgeschwindigkeit) und Auslastungsgrad – somit der Verkehrsstärke – hergeleitet. In einer Formel werden diese Einflussfaktoren zu einer Bewertungsgrösse zusammengesetzt, anhand derer eine Bewertung eines Neu- oder Umbaus durchgeführt wird. Eine Gewichtung der Reisezeiten und -schwankungen über die Zahlungsbereitschaften laut Schweizer Norm (SN 641 822 und SN 641 823, SN 641 827, VSS, 2007 und SN 641 825, im Druck) führt zu einer Bemessungsgrösse in der Einheit Schweizer Franken.

Dieser Ansatz unterscheidet sich von der Kosten-Nutzen-Norm (SN 641 820, VSS, 2006), indem verkehrsbeeinflussenden Grössen mit deren Auswirkungen auf das Verkehrsgeschehen berücksichtigt werden können. Er ermöglicht planenden Personen eine Bewertung von Massnahmen mit einem Minimum an Datenerhebungsaufwand bis hin zu detaillierten abschnittsspezifischen Analysen, sofern zusätzliche Annahmen gemacht werden können oder Messwerte vorliegen.

Aus Sicht eines Verkehrsteilnehmers entstehen ihm generalisierte Fahrzeitkosten aufgrund der durchschnittlichen Fahrzeit auf einem Streckenabschnitt und der Unsicherheit in der Fahrzeit, die abhängt von der Fahrgeschwindigkeit ohne Zusammenbrüche, der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit, der Dauer des Zusammenbruchs und der Geschwindigkeitsreduktion während eines Zusammenbruchs. Auf Basis dieser Einflussgrössen plant er die Fahrt mit einer Geschwindigkeit unter Berücksichtigung der Zahlungsbereitschaft für Verfrühungen und Verspätungen. Zusammen mit der Zahlungsbereitschaft für eine Fahrzeitreduktion lassen sich alle Einflussfaktoren für die Bewertung in einer Formel zusammenfassen.

Die Verläufe der Einflussfaktoren werden detailliert hergeleitet und für durchschnittliche Autobahnabschnitte ausgewiesen. Für nicht durchschnittliche Autobahnabschnitte können die in dieser Studie ausgewiesenen Durchschnittswerte der Grössen separat angepasst werden, um Eigenheiten zu modellieren. Die Bewertung lässt sich für alle Verkehrsteilnehmer des be-

trachteten Abschnitts für ein Jahr über Ganglinien für eine nachfrageorientierte Bemessung oder anhand von Szenarien für eine angebotsorientierte Bemessung durchführen. Da die Methodik generalisierte Fahrzeitkosten in Abhängigkeit der Einflussgrössen ausweist, ist auch eine Leistungsanalyse möglich.

Abgrenzung von der Schweizer Norm SN 641 825 Kosten-Nutzen-Analyse im Strassenverkehr, Bewertung und Abschätzung der Zuverlässigkeit:

Das aufgezeigte Konzept ist für die Bemessung von Hochleistungsstrassen auf Basis stündlicher Verkehrsstärken geeignet, wobei der Anwendungsbereich in der differenzierten Analyse von verschiedenen Planungsfällen bei gegebenen Verkehrsszenarien liegt. Durch die stündliche Auflösung lassen sich auch kleinere Unterschiede bei ähnlichen Planungsfällen differenzieren, die für die Auswahl einer günstigen Planungsalternative nötig sind. Dies wird durch die neu eingeführte Bewertungsgrösse in Form von Fahrzeitkosten ermöglicht, die das übliche 6-Stufensystem der Verkehrsqualität vermeidet. Im Gegensatz zur Bewertung und Abschätzung der Zuverlässigkeit (SN 641 825, im Druck) liegt daher der Fokus auf der Analyse und Auswahl der Planungsfälle unter detaillierter Berücksichtigung der Grössen für Kapazität, Verkehrsstärke und des Verkehrsflusszustands. Eine mehrjährige Analyse ist in diesem Detaillierungsgrad in der Regel nicht sinnvoll, da die Prognoseunsicherheit allein für die Verkehrsstärke die Genauigkeit der Modelle stark beeinflusst und eine Prognose der Kapazitäts- und Verkehrszustandsgrössen (aktuell) mangels historischer Daten nicht durchgeführt werden kann. Momentan werden für Langzeitprognosen in der Regel Umlegungsmodelle verwendet, die mit durchschnittlichem täglichen Verkehr (DTV) arbeiten und nicht stundenfein auflösen und nur einen durchschnittlichen Werktag behandeln. Diese Werte eignen sich als Eingangsgrössen für die Bewertung und Abschätzung der Zuverlässigkeit nach SN 641 825, die sich in die Grundnorm der Kosten-Nutzen-Analyse (SN 641 820) eingliedert. Für die Kosten-Nutzen-Analyse, die auf mehrjährigen Prognosen basiert, bietet sich daher die SN 641 825 an. Der hier vorgelegte Detailvorschlag ist zudem auf Hochleistungsstrassen (Autobahnen) beschränkt.

Ausblick

Das hier vorgestellte Verfahren erlaubt dem Entwerfer bei der Bemessung den gesamten Verlauf der Ganglinie zu berücksichtigen und ihn zu bewerten, indem er realistischerweise sowohl die Varianz der Verkehrsstärke als auch die der Kapazität berücksichtigt. Der zusätzliche Aufwand ist überschaubar und durch die gewonnen Einsichten mehr als gerechtfertigt.

Das Verfahren erlaubt darüber hinaus nicht nur die Bewertung baulicher Veränderungen, sondern auch betrieblicher Massnahmen, die bisher nur ad-hoc bewertet werden konnten.

Die benötigten empirischen Zusammenhänge wurden auf der Grundlage aller relevanten Schweizer Daten erstellt, die notwendigen Verfahren teilweise neu entwickelt. Es zeigt sich aber, dass diese Basis in Teilen zu klein ist, so dass die Eigenschaften der spezifischen Messstellen stark spürbar werden. Es ist daher notwendig, in den ersten Jahren der Anwendung weitere Erfahrungen zu gewinnen, respektive die vorhandenen Messungen kontinuierlich auszuwerten. Vergleichende Studien in den Nachbarländern wären ebenfalls wünschenswert.

Mit diesem Verfahren verfügt das Verkehrswesen über einen Ansatz, der an der Front der Entwicklungen steht, und die Risiken besser berücksichtigt als die bisherige inkonsistente Praxis. Die Erfahrungen der Anwendung werden zeigen, wo seine Stärken und Schwächen sind. Eine Überprüfung und allfällige Überarbeitung sollte für den Zeitraum ab 2015 eingeplant werden.¹

¹ Für erste Erfahrungen siehe Sharma und Axhausen (2009)

Executive summary

This work presents a design concept exemplified by a methodology for motorways. The benchmarking is done on a continuous scale in units of Swiss Francs and is comparable to a points rationing system. As a step system is avoided even small differences in alternatives could be measured. The design process is based on generalised travel time costs consisting of the willingness to pay for travel time reductions and increases of reliability.

To assess the travel times two traffic states are defined as free flow and congested flow, where the transition from free flow to congestion is characterised by a breakdown. It is preconditioned that a traffic breakdown is provoked by a traffic volume being larger than the actual capacity for a short period of time. This leads to an understanding of capacity as a random variable following a probability distribution. Looking at patterns over time one can calculate the probability that a given traffic volume is succeeded by a breakdown. The road users experience a reduction in travel speed (increase in travel time) for the duration of the congestion. It is assumed that congestions due to traffic volumes being larger than capacity are not incorporated to the full extend by the road users and lead therefore to late arrivals. Obvious tailbacks of bottlenecks downstream were excluded as they are not a shortcoming of the investigated sections and the road users may be familiar with these special conditions.

Knowing the average annual travel speeds without breakdowns (Figure A), the travel times for all hourly traffic volumes of one year can be calculated. In case of a traffic breakdown, which will happen with the probability following Figure B, the travel speed will drop by the factor of Figure C for a duration given by Figure D. These effects can be adapted to specific traffic scenarios to incorporate special constructional or traffic signalling features. With knowledge of the different speeds the expected value of the travel time and not scheduled early or late arrivals are assessed for a section of a given length. These travel times and variations (early / late arrivals) are weighted by the willingness to pay for a reduction in travel times and variation and summed up for all road users of one year. This sum is the design parameter for one alternative which is to be compared to the value of the status quo or other alternatives.

Based on the parameters of Figure A to D a single formula is derived, providing the expected value of travel times for a given section. Depending on the volume to capacity ratio the proportion of free flow and congested flow with lower travel speeds is regarded. As a road has

no information about a breakdown event in advance, he or she will experience higher or lower travel speeds than the average speed. The road user will value a late arrival due to a breakdown inferior to early arrival of the same period of time. This fact is taken into consideration by the planned travel speed, which enables the engineer to compute the delays and early arrivals for all hourly traffic volumes of one year.

Figure A Mean travel speed v_m not affected by breakdowns for private vehicle transport (line, mIV) and heavy vehicles (dashed, SV) on motorways with 120 km/h (black) and 100 km/h (grey) speed-limit for a given hourly volume to capacity ratio r_{60}

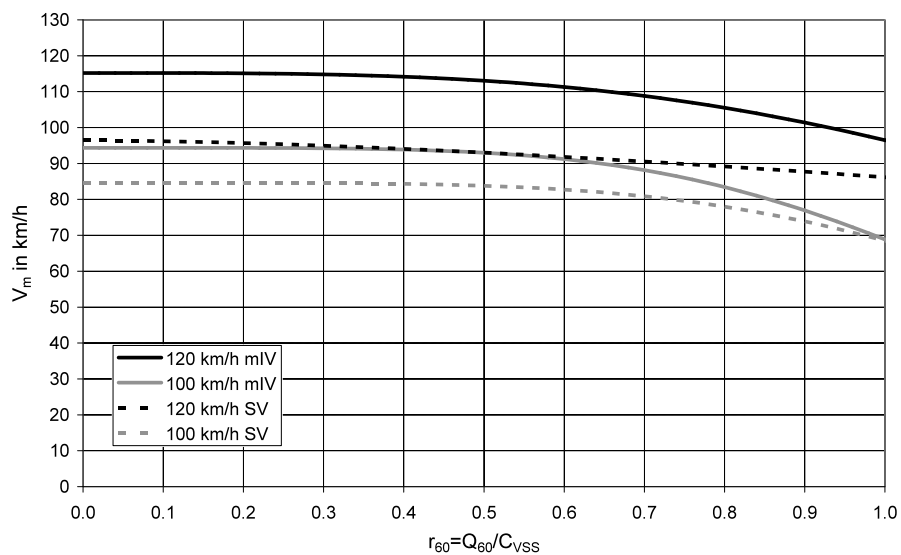


Figure B Mean breakdown probability P_b for given volume to capacity ratio r_{60} and percentage of heavy vehicles (classes: 0 - 5 %, 5 - 15 % und 15 - 25 %)

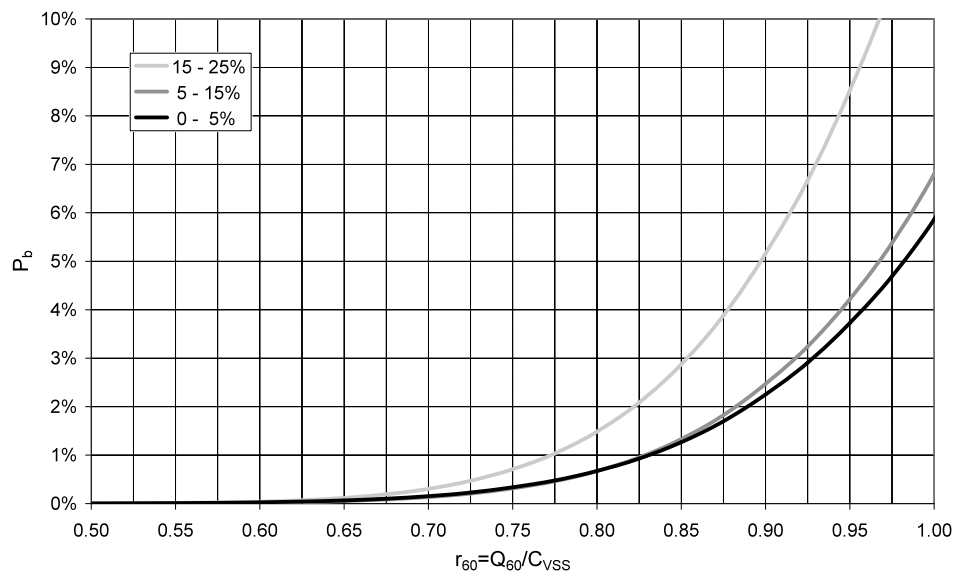


Figure C Factor of speed drop f_{mb} from mean speed to breakdown speed for private vehicle transport (line, mIV) and heavy vehicles (dashed, SV) on motorways with 120 km/h (black) and 100 km/h (grey) speed-limit for a given hourly volume to capacity ratio r_{60}

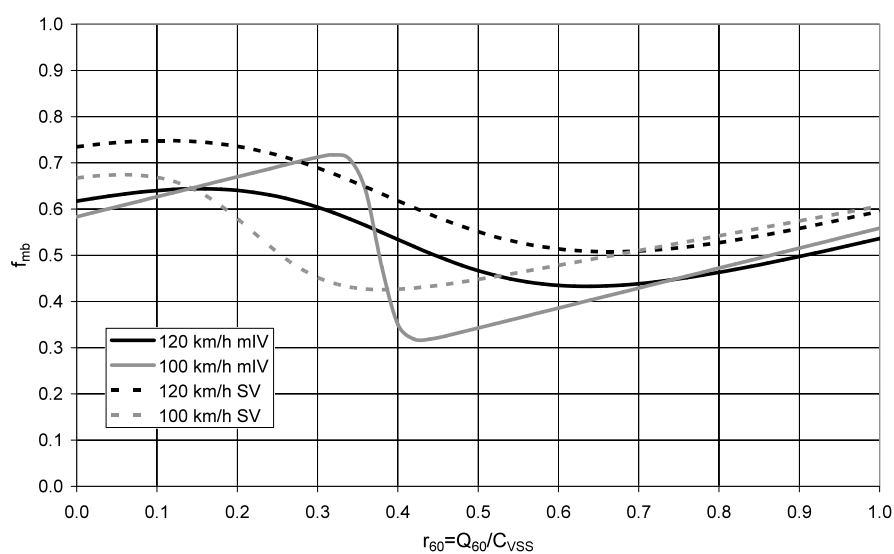
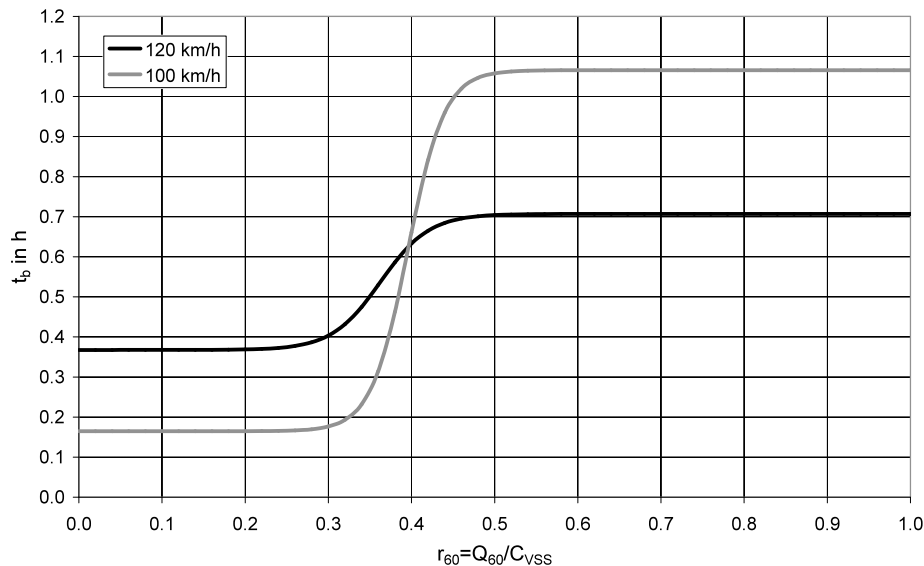


Figure D Duration of breakdown t_b on motorways with 120 km/h (black) and 100 km/h (grey) speed-limit for a given hourly volume to capacity ratio r_{60}



Conceptual overview and detachment of valuation and estimation of reliability (SN 641 825)

The presented design concept has a general form and could be applied to all infrastructure elements. Existing design concepts of the Swiss norm for nodes work with reserve capacities (non-signalised nodes) or traffic volume of saturation (signalised nodes) and mean delay times, which are comparable to the product of breakdown probability and breakdown duration. The design process of nodes can therefore easily be integrated and a design for a series of nodes is possible. A major restructuring is only needed for the design concept of streets which is exemplified for motorways. The current Swiss norm SN 640 016a proposes the 30th to 100th ranked hourly traffic volume as a design traffic volume that leads to results that cannot be compared to those of other network elements.

In detail, following influence factors were identified for motorways to benchmark constructional or traffic signalling modifications: mean travel speed, breakdown probability, travel speed without breakdowns, speed reduction during breakdowns, mean duration of breakdowns and the planned travel time for a trip. These elements are derived for vehicle class (private vehicle transport, heavy vehicles), road type (capacity and speed-limit) and volume

to capacity ratio separately. All factors are integrated into one benchmark-formula, allowing a valuation of alternatives based on the previous influence factors. A weighting of travel times and variations by the willingness to pay according to the Swiss norm (SN 641 823, SN 641 827, VSS, 2007, and SN 641 825, forthcoming) leads to a benchmark value in units of Swiss francs.

This approach contrasts with the cost-benefit norm (SN 641 820, VSS, 2006) by taking factors influencing the traffic flow into account. Engineers are enabled to benchmark an alternative with little data collection effort but also detailed analysis, given specific information of a section.

From a road user's point of view, generalised travel-time costs are driven by the mean travel time on a section and the unreliability of travel times. The uncertainty is dependent on the travel time without breakdowns, breakdown probability, duration of a breakdown and the speed drop during a breakdown. Based on these influence factors the user schedules a trip with a planned travel speed regarding the different willingness to pay for reductions travel time and in early or late arrivals.

The shown plots of the derived factors are valid for average motorways. Non-average sections may require modified parameters to cover specific properties. The benchmark process is performed for all road users of a section during one year, while patterns over time can be used for a demand driven approach or different scenarios for a supply driven approach. As the outcomes of the design concept are generalised travel-time costs a capacity analysis is also possible.

Relationship with Swiss norm SN 641 825 cost-benefit analysis in road traffic, valuation and estimation of reliability:

The presented concept enables the design process of motorways based on hourly traffic volumes, where sophisticated analyses of different alternatives and traffic scenarios fall into the scope of application. Driven by the hourly resolution even minor differences in similar case studies can be distinguished, being crucial in choosing the optimal alternative. This goal is reached by the introduced benchmark in units of Swiss francs avoiding the 6-step system of qualities of service. In contrast to the valuation and estimation of reliability (SN 641 825, forthcoming), the main focus is analysing and choosing alternatives in detailed consideration of the parameters capacity, traffic volume, and traffic state. Normally, a multi-year analysis with a very high level of detail does not make sense, as (actual) prognoses are performed on simplified models, which do not offer the needed level of detail. Most current long-term

prognoses are derived from assignment models, simulating an average (work) day. These values can be used as input for the valuation and estimation of reliability (SN 641 825, forthcoming), which is part of the costs-benefit-analysis norm (SN 641 820). A long-range forecast is therefore an application of SN 641 825.

Outlook

The method presented allows the designer to consider and evaluate the full annual demand profile, while accounting for both the variance of demand and capacity. The additional effort is limited and more than justified by the further insights gained. The method is suitable not only for capacity additions, but also for operational improvements, for which only ad-hoc evaluations are currently available.

The necessary empirical relationships were estimated using all available Swiss data. The estimation methods were newly developed were required. The empirical data base is in parts small, so that the estimated parameters reflect the specifics of individual observation sites. The experiences of the first applications will need to be carefully watched. Further measurements would usefully be added. International comparisons would also be fruitful.

The proposed methods gives traffic engineering a design method in line with other engineering disciplines and actually improves on them. It can now fully assess the variance of demand and capacity and is a clear step beyond the current incoherent practise. The practical experiences will show its strength and weaknesses. A regular update should be planned for 2015².

² See Sharma and Axhausen (2009) for first experiences

1 Problembeschreibung

Die Bemessung von Verkehrswegen ist seit dem frühen 19. Jahrhundert Gegenstand der Ingenieurwissenschaften. Das Hauptaugenmerk der frühen Ansätze lag auf der Bestimmung der Kapazität von Fernstrassen, angetrieben von ständig wachsenden Verkehrsmengen. Es wurde allgemein und unwidersprochen angenommen, dass der Bau von Strassen für die wirtschaftliche Entwicklung notwendig ist. Ziel war es, den vorhandenen Verkehr frei fließen zu lassen. Um den Verkehrsfluss zu optimieren, müssen Kapazitäten bestimmt, gemessen und ausgewertet werden. Diese werden verallgemeinert und anhand von Kenngrößen beschrieben. Allgemein lässt sich sagen, dass hier wie auch in anderen Ingenieurwissenschaften einem Widerstand – der Kapazität der Strasse – das Verkehrsaufkommen als Belastung gegenübergestellt wird. Problematisch gestaltet sich die Ermittlung einer maximalen Kapazität einer Strasse, da sie sich nicht unabhängig von der Nachfrage beschreiben lässt, sowie örtliche und zeitliche Verlagerungseffekte i.d.R. nicht ausgeschlossen werden können. Zudem kann die Verkehrsmenge nicht exakt bestimmt werden, die einen Zusammenbruch infolge Kapazitätsüberlastung nach sich zieht.

Das Thema der Bemessungsverfahren von Infrastrukturelementen im Verkehrswesen ist in den letzten Jahren praktisch nicht aufgegriffen worden. Ein Problem sind die momentan schwer zu vergleichenden Bewertungsansätze der unterschiedlichen Netzelemente. Die bestehende Beschreibung in sechs Verkehrsqualitätsstufen erlaubt nur einen Alternativenvergleich für ein Infrastrukturelement (Abschnitt, Knoten). Eine Stabilisierung des Verkehrsablaufs wird nur unzureichend bewertet und ein Vergleich ähnlicher Alternativen durch das Stufenkonzept erschwert.

1.1 Ausgangslage und Aufgabenstellung

Ziel des Projekts ist die Definition eines modernen Bemessungskonzeptes für Verkehrsanlagen, das die Variabilität der Nachfrage und der Leistungsfähigkeit der Verkehrsanlagen angemessen berücksichtigt. Es sind Methoden zu entwickeln, die für alle Infrastrukturelemente anwendbar und deren Bewertungsgrößen untereinander vergleichbar sind. Das zu erarbeitende Konzept muss sich unter den gegebenen Rahmenbedingungen (Verkehrssicherheit, Um-

weltwirkungen, politische Vorgaben etc.) auf die Bewertung aus der Sicht der Infrastrukturnutzer konzentrieren, um eine Leistungsanalyse oder angebots- bzw. nachfrageorientierte Bewertung durchführen zu können.

Nutzerkosten (Zeitkosten und Betriebskosten), Betreiberkosten (Investition und Unterhalt) aber auch die Ansprüche an die Verkehrssicherheit, die Umweltwirkungen und die politischen Vorgaben können aber nur im Rahmen einer umfassenden Kosten-Nutzen-Analyse angemessen abgewogen werden. Um diesen vielfältigen Zielsetzungen gerecht werden zu können, werden hier die Effekte analysiert, die die Fahrzeiten der Nutzer und deren Schwankungen/Unsicherheiten beeinflussen. Die Synthese dieser Effekte erfolgt über eine Gewichtung der Zeiten und Unsicherheiten nach den Zahlungsbereitschaften der Verkehrsteilnehmer in der Schweizer Norm (SN 641 822 und SN 641 823, VSS 2007). Es lassen sich somit auch Massnahmen bewerten, die nicht die Kapazität einer Strasse verändern sondern beispielsweise die Staudauern beeinflussen.

Bei gut ausgebauten Strassennetzen besteht immer weniger der Bedarf nach Neubauten von Streckenabschnitten oder Knotenpunkten, sondern es ist vielmehr häufig eine Bemessung von Umbaumassnahmen notwendig. So stehen nicht nur alternative Massnahmen zur Diskussion sondern bei Berücksichtigung verschiedener Routen auch Modifikationen an unterschiedlichen Orten und von Netzelementen verschiedenen Typs. Eine Vergleichbarkeit ist aber momentan nicht gegeben, wenn eine Bemessung nach Verkehrsqualitätsstufen (A bis F) erfolgt. Die konzeptionellen Unterschiede treten besonders zwischen der Bemessung von freien Strecken und Knoten hervor. Während sich bei der Bemessung von Knoten mit und ohne Lichtsignalanlage die mittleren Wartezeiten vergleichen lassen, geben bei freien Strecken die Auslastungsgrade, die zur Festlegung der Verkehrsqualitätsstufen betrachtet werden, keinen Aufschluss bezüglich zusätzlicher Wartezeiten bzw. veränderter Fahrgeschwindigkeiten.

Zur Vereinheitlichung bietet es sich an die Bemessung der freien Strecke so zu überarbeiten, dass eine einheitliche Bemessung der unterschiedlichen Netzelemente möglich wird. Ausgehend von den Warte- bzw. Reisezeiten stellt eine Bemessung über die Reisezeitkosten der Nutzer eine einheitliche Vergleichsgrösse dar, die auch die Berücksichtigung der Zuverlässigkeit zulässt. Die Bemessungskonzepte der Knotenpunkte bieten momentan noch keine Berücksichtigung der Zuverlässigkeit. Zukünftige Untersuchungen können diese Lücke aber leicht füllen, ohne die bestehende Methodik zu modifizieren, wobei sich bei Vernachlässigung der Zuverlässigkeit mit den bestehenden Normen zur Bemessung von Knotenpunkten bereits Reisezeiten und somit auch Reisezeitkosten berechnen lassen.

Hier soll exemplarisch am Beispiel von Hochleistungsstrassen ein vereinheitlichendes Konzept vorgestellt werden, das als Bemessungsgrösse generalisierte Reisezeitkosten in Schweizer Franken einführt. Zur Berechnung der jährlichen Reisezeitkosten unter Berücksichtigung der Stochastik von Kapazität und Belastung zusammen mit dem Risiko – also Wahrscheinlichkeit und Kosten eines Zusammenbruchs – integriert das Konzept Ansätze wie sie auch in anderen Ingenieurwissenschaften wie dem konstruktiven Ingenieurbau, der Bemessung von Elektrizitätskraftwerken und im Hochwasserschutz bekannt sind.

1.2 Übersicht zum Berichtsaufbau

Der Bericht behandelt zunächst in Kapitel 2 den Stand der Forschung und zeigt aktuelle in der Praxis verwendete Bemessungsmethodiken. Es wird aufgezeigt, dass Strassen anhand von Qualitätskriterien bemessen werden, wohingegen bei Knoten (ohne und mit Lichtsignalanlage) über den Durchsatz Wartezeiten bestimmt werden, denen ihrerseits Qualitätsstufen zugeordnet werden.

Hierauf folgend werden in Kapitel 3 Bemessungsmethoden anderer Ingenieurwissenschaften aufgezeigt, die relevante Techniken aufzeigen, die entweder bereits im Verkehrswesen analog angewendet werden oder übernommen werden können. Im Detail werden das konstruktive Ingenieurwesen, die Bemessung von Elektrizitätskraftwerken und der Hochwasserschutz besprochen.

Kapitel 4 beschreibt die verwendeten Zählstellen, die die Datengrundlage bilden. Bevor auf das Bemessungskonzept genauer eingegangen wird, wird in Kapitel 5 der Zusammenhang von relativer Verkehrsstärke zur Varianz der Verkehrsstärke erläutert.

Das Bemessungskonzept wird in Kapitel 6 im Detail hergeleitet und vorgestellt. Die Kapazität wird neu als Zufallsgrösse bestimmt und die Wahrscheinlichkeit eines Verkehrszusammenbruchs errechnet. Im Detail werden die beeinflussenden Faktoren der mittleren von Zusammenbrüchen unbeeinflussten Geschwindigkeit, die reduzierte Fahrgeschwindigkeit während eines Zusammenbruchs und die Dauer des Zusammenbruchs bestimmt. Hierauf aufbauend wird der Erwartungswert der Fahrgeschwindigkeit im mathematischen Sinne und die eingeplante Fahrzeit der Verkehrsteilnehmer bestimmt. Es wird erläutert wie sich mit diesen Grössen die zu erwartenden generalisierten Reisezeitkosten einer Infrastruktur bestimmen lassen, wobei die Methodik in Kapitel 7 anhand eines Beispiels illustriert wird.

2 Stand der Anwendung und Forschung

Zur Bemessung von Infrastrukturelementen im Verkehrswesen kommen für die jeweiligen Elemente unterschiedliche Verfahren zur Anwendung. Strassen werden in der Regel auf der Basis einer Bemessungsverkehrsstärke bemessen, die mit der Kapazität der Strasse verglichen wird, wodurch sich die Qualität des Verkehrsablaufs beurteilen lässt. Bei Kreuzungen ist das Ziel der Bemessung den Durchsatz an Fahrzeugen zu bestimmen bzw. zu maximieren, wobei auch die Wartezeiten berücksichtigt werden. Bei diesen Ansätze wird die Kapazität oder Leistungsfähigkeit eines Netzwerkelements in den aktuellen Normen (z. B. VSS, 2005, HBS, 2001 oder HCM, 2000) je nach Netzelement und Typ als eine feste Grösse angesehen. Bei Strassen wird hier neben dem Strassentyp und Anzahl der Spuren die Steigung und der Schwerverkehrsanteil berücksichtigt. Momentan bieten die Bemessungsansätze keine Integration in eine Kosten-Nutzen-Analyse, um die Wirtschaftlichkeit einer Wahl abzuschätzen.

2.1 Qualitätsbezogene Bemessung: Strassen

Für die Dimensionierung wird in der Regel das Konzept der 30. Stunde angewandt, dass in Bureau of Public Roads (1950) vorgestellt wurde. Die Wahl der 30. Stunde wird mit der Abflachung der Dauerlinie in diesem Bereich bei den damals erhobenen Daten begründet, wobei eine bei Bemessung nach höheren Verkehrsstärken und Stundenwerten kleiner als der 30. Stunde deutlich höhere Konstruktionskosten entstünden.

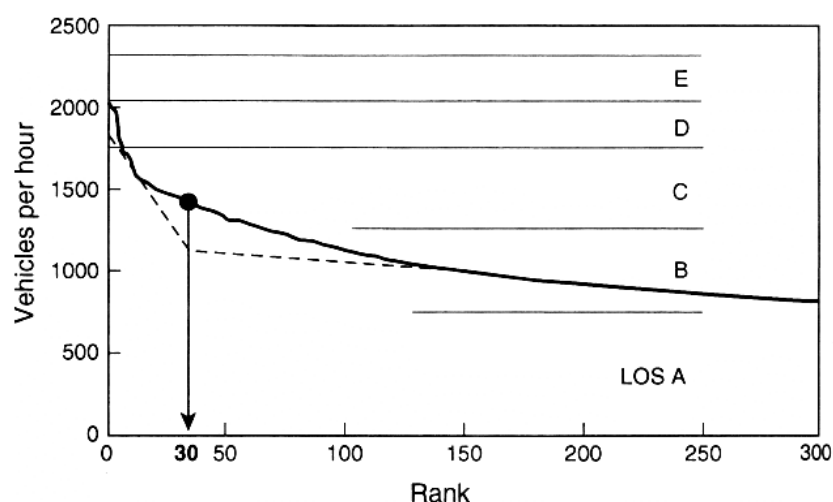
Antusch (1981) weist darauf hin, dass diese Eigenschaft sich jedoch nur auf Zählungen zu- trifft, bei denen Berufs- und Wirtschaftsverkehr den wesentlichen Anteil ausmacht. Die Dauerlinien für Sonn- und Urlaubsverkehr fallen auch nach der 30. Stunde weiter ab. Die 30. Stunde sollte aber auch bei diesen Verkehrstypen als Dimensionierungsstunde dienen, da nach Ansicht von Antusch (1981) höher belasteten Stunden von zufälligen Ereignissen wie z.B. Unfällen, besonderen Wetterbedingungen oder Veranstaltungen beeinflusst werden. Nach der 20. bis 30. höchstbelasteten Stunde können diese Vorkommnisse ausgeschlossen werden, so dass die Dauerlinie ab diesem Punkt das Verkehrsgeschehen beschreiben kann. Die massgebende Verkehrsstärke wird auch aus ökonomischen Gründen nach der 30. oder einer Stunde geringerer Belastung bemessen, da ein höherer Ausbraugrad zu einer sehr gerin-

gen mittleren Auslastung führen würde. Die massgebende höchstbelastete Stunde kann auch als Belastungsperzentil ausgedrückt werden. Für die Bemessung nach der 30. Stunde ergibt sich, dass während 99.66 % Stunden des Jahres geringere Verkehrsstärken vorliegen. In der Praxis wird die Beschreibung mittels Belastungsperzentil jedoch nur selten verwendet.

Auch in der aktuellen Ausgabe des *Highway Capacity Manuals* (2000) (Transportation Research Board, 2000) wird die Bemessung im Bereich zwischen der 30. bis 100. Stunde vorgeschlagen. Die gerichtete Bemessungsverkehrsstärke lässt sich aus dem Richtungsanteil des Spitzenstundenverkehrs und der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke ermitteln, multipliziert mit K-Faktoren zwischen 0.091 und 0.1, die den Urbanisierungsgrad berücksichtigen.

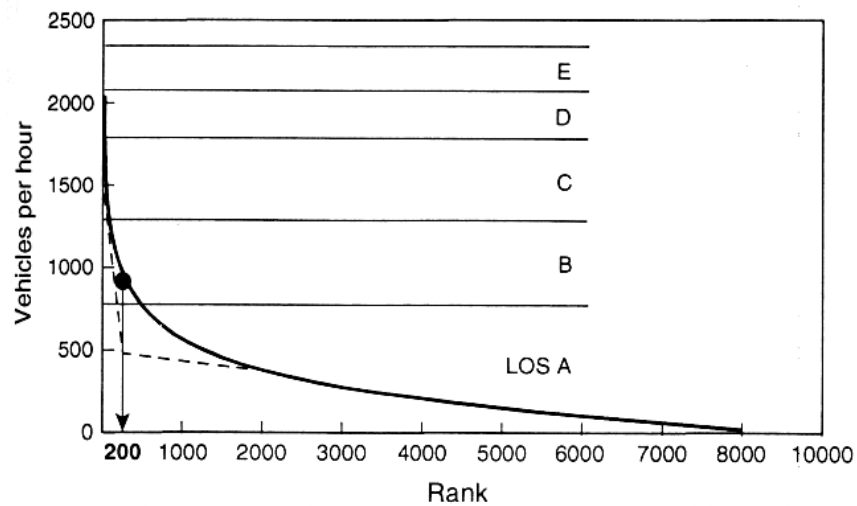
Die Bestimmung des Knicks (engl: **knee**) zwischen der 30. bis 100. Stunde ist nicht unproblematisch, wie das Beispiel von Hempsey und Teply (1999) in Abbildung 1 und Abbildung 2 zeigt. Je nach Auflösung und betrachtetem Ausschnitt der jährlichen höchstbelasteten Stunden kann der signifikante Knick an einer anderen Stelle vermutet werden, so dass diese Methode für die Bestimmung der Bemessungsstunde nicht geeignet scheint. Werden in diesem Beispiel die Qualitätsstufen aller stündlichen Belastungen des Jahres betrachtet, so zeigt sich in Abbildung 3, dass nur während weniger Stunden die Kapazität näherungsweise erreicht wird.

Abbildung 1 Die 300 höchstbelasteten Stunden des vierspurigen Trans-Canada-Highway (Highway #1) östlich der Rocky Mountains



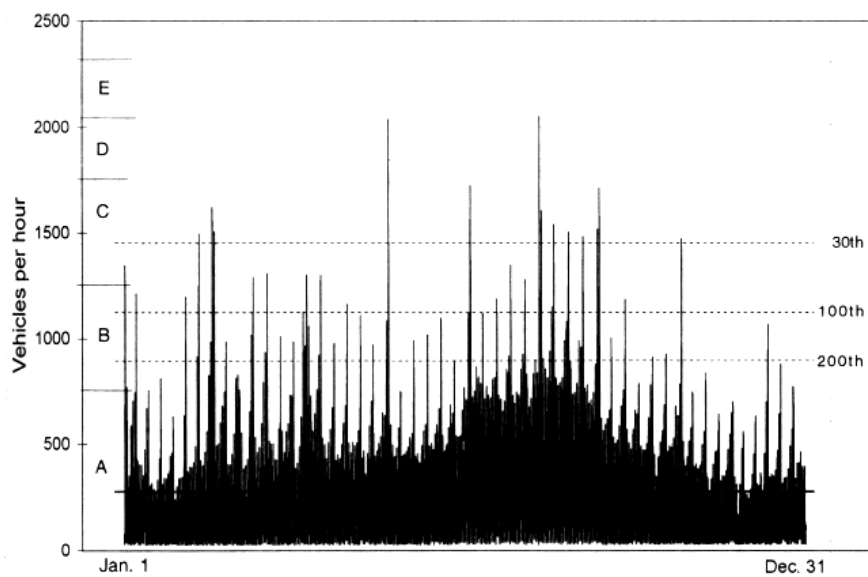
Quelle: Hempsey und Teply (1999)

Abbildung 2 Die 8000 höchstbelasteten Stunden der gleichen Messung des vierspurigen Trans-Canada-Highway (Highway #1) östlich der Rocky Mountains



Quelle: Hempsey und Teply (1999)

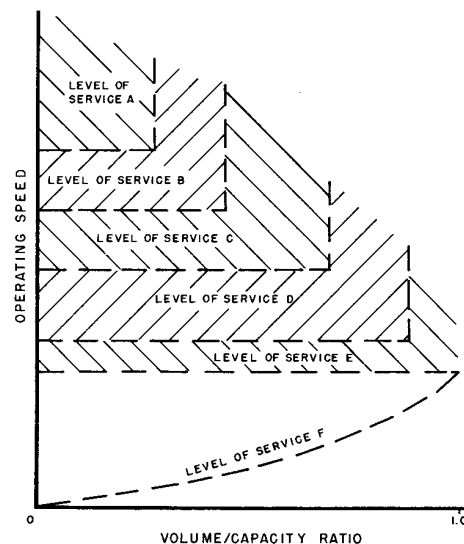
Abbildung 3 Stündliches Verkehrsaufkommen aller Stunden des Jahres 1996 des Trans-Canada Highways



Quelle: Hempsey und Teply (1999)

Seit dem zweiten amerikanischen *Highway Capacity Manual* (Highway Research Board, 1965) wird der Verkehrsfluss nach Qualitätsstufen (*levels of service*, LOS) beschrieben, die den Umstand berücksichtigen, dass der Verkehrsfluss auf Strassen abhängig von der Stärke und Dichte unterschiedlich verläuft. Es werden sechs Qualitätsstufen für den Verkehrsfluss über die gefahrene Geschwindigkeit und dem Verhältnis aus Verkehrsmenge zu Strassenkapazität definiert (Siehe Abbildung 4).

Abbildung 4 Qualitätsstufen (*levels of service*, LOS) des Highway Research Board (1965)



Quelle: Highway Research Board (1965)

Die Stufe höchster Qualität (A) beschreibt den freien Verkehrsfluss mit geringem Verkehrsaufkommen und hohen Geschwindigkeiten. Es herrscht nahezu keine gegenseitige Behinderung der Fahrzeuge vor. Der Bereich des stabilen Flusses kennzeichnet Stufe B, in der Fahrer selten durch die Verkehrsmenge gezwungen werden ihre Geschwindigkeit anzupassen. Die untere Grenze der Stufe B (geringste Geschwindigkeit bei höchster Verkehrsmenge) wird als Bemessungskriterium für Fernstrassen vorgeschlagen. Stufe C befindet sich noch im Bereich des stabilen Flusses, jedoch wird der Fahrer deutlicher zur Anpassung seiner Fahrweise an das erhöhte Fahrzeugaufkommen gezwungen, so dass die meisten Fahrzeuge nicht mit ihrer Wunschgeschwindigkeit fahren können. Die realisierte Geschwindigkeit bewegt sich in einem akzeptablen Rahmen. Dieses Kriterium wird für städtische Strassen als praktikabel angesehen. Der Übergang zum instabilen Fluss charakterisiert die Stufe D. Die Geschwindigkeiten bewegen sich in einem für die Fahrer erträglichen Rahmen, wobei das Verkehrsauf-

kommen stark schwankt und die Verkehrsspitzen die Fahrgeschwindigkeit für kurze Zeit stark herabsetzen. Stufe E wird durch noch niedrigere Geschwindigkeiten als in Stufe D beschrieben, bei denen die Verkehrsstärke der Kapazität der Strasse nahe kommt. Der Fluss ist unstabil und kann zu stockendem Verkehr führen. Die niedrigste Stufe F kennzeichnet den stark eingeschränkten Fluss bei niedrigen Geschwindigkeiten. Diese Verkehrsbedingung stellt sich gewöhnlich hinter Engpässen mit aufgestauten Fahrzeugen ein. Der Verkehrsfluss kann für kurze oder längere Zeit zum Stillstand kommen. Eine graphische Darstellung der Qualitätsstufen zeigt Abbildung 4.

Tabelle 1 zeigt einen Vergleich der Qualitätsstufen der aktuellen amerikanischen, deutschen und schweizerischen Richtlinien für den Verkehrsfluss auf einer zweistreifigen Richtungsfahrbahn einer Autobahn bzw. eines *freeways*. Zum Vergleich wurde ein *freeway* mit zulässiger Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h gewählt.

Die deutschen und amerikanischen Richtwerte für die Qualitätsstufen (HBS, 2001 und HCM, 2000) sind bezüglich des Auslastungsgrades und der Geschwindigkeiten sehr ähnlich. Leichte Unterschiede ergeben sich für die Verkehrsdichten, die im HCM höher sind. Die aktuelle Schweizer Norm (SN 640 018a, VSS, 2006) gibt die Qualitätsstufen nur über den Auslastungsgrad an, der bei den Verkehrsstufen A bis C über den US-amerikanischen und deutschen Werten liegt. Eine Beschreibung nach der Verkehrsdichte, wie sie in der SN 640 018 (VSS, 1999) noch vorgenommen werden konnte, wird nicht durchgeführt.

Tabelle 1 Vergleich der Verkehrsqualitätsstufen von amerikanischem HCM, deutschem HBS und schweizerischen Norm (VSS)

Qualitätsstufe (Level of service)	Verkehrsdichte [PW/km]		Auslastungsgrad (Verkehrsfluss / Kapazität) [-]			Geschwindigkeit bei max. Dichte [km/h]	
	HCM	HBS	HCM	HBS	VSS	HCM	HBS
A	≤ 14	≤ 8	≤ 35 %	≤ 30 %	≤ 40 %	≥ 120	≥ 130
B	≤ 22	≤ 16	≤ 55 %	≤ 55 %	≤ 60 %	≥ 120	≥ 125
C	≤ 32	≤ 23	≤ 77 %	≤ 75 %	≤ 80 %	≥ 115	≥ 115
D	≤ 44	≤ 32	≤ 92 %	≤ 90 %	≤ 90 %	≥ 100	≥ 100
E	≤ 56	≤ 45	≤ 100 %	≤ 100 %	≤ 100 %	≥ 86	≥ 80
F	-	> 45	-	-	> 100 %	-	< 80

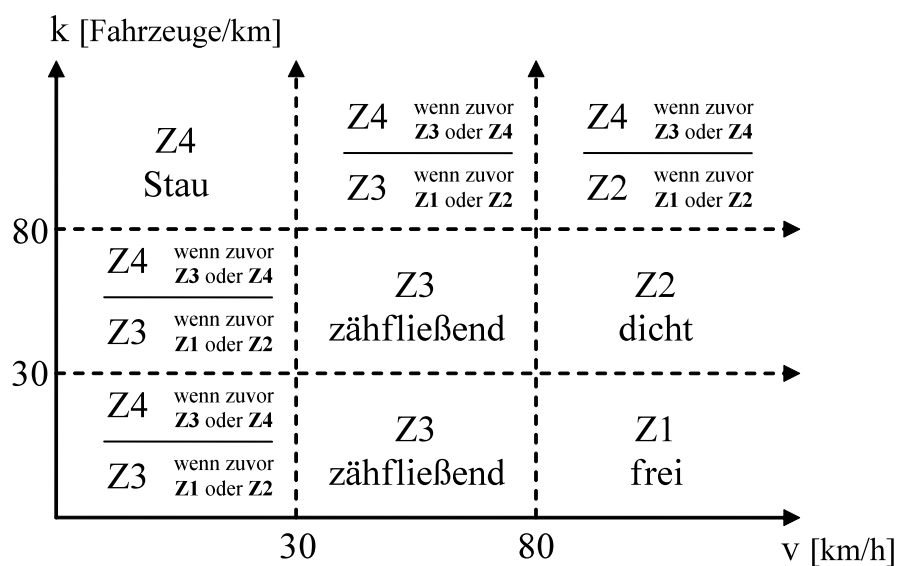
HCM: Highway Capacity Manual 2000 (Transportation Research Board, 2000)
zweistreifige Richtungsfahrbahn eines *freeways* mit 120 km/h zulässiger
Geschwindigkeit, S. 23-3

HBS: Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen 2001 (FGSV, 2001)
zweistreifige Richtungsfahrbahn einer Autobahn mit reinem Pkw-Verkehr mit
130 km/h Richtgeschwindigkeit, S. 3-8

VSS: SN 640 018a (VSS, 2006)
zweistreifige Richtungsfahrbahn normalen Ausbaugrades (2x2-N) mit Schwer-
verkehrsanteil $\leq 5\%$, Steigung $< 2\%$ und 120 km/h zulässiger Geschwindigkeit

Laut Transportation Research Board (2000) ist die Dichte die Hauptdeterminante zur Bestimmung der Qualitätsstufe. Im Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen vom Bundesamt für Strassenwesen (1999) werden für die Bestimmung des Verkehrszustandes die Dichte und zusätzlich die mittlere Geschwindigkeit verwendet (Abbildung 5).

Abbildung 5 Bestimmung von Verkehrsstufen nach dem Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen



Quelle: Bundesanstalt für Strassenwesen (1999)

2.2 Durchsatzbezogene Bemessung: Knoten ohne Lichtsignalanlage

2.2.1 Grundsätze

Die Bemessung von Knoten basiert analog zu der von Strecken auf den Verkehrsstärken. Bedingt durch die komplexeren Vorgänge an Knotenpunkten und den vielfältigen baulichen Ausprägungen wird hier nicht eine knotenspezifische Kapazität der Verkehrsstärke gegenüber gestellt, um die Qualitätsstufen zu bestimmen, sondern die zur erwartenden Wartezeiten herangezogen. Die Berechnungsmodelle basieren auf empirischen Regressionsverfahren (z. B. Kimber und Coombe, 1980 oder Kyte *et al.*, 1996), der Zeitlückentheorie (z. B. Harders, 1968 oder HBS, 2001) oder der Theorie der Konflikttechnik (Brilon und Wu, 2001). Das Regressionsverfahren von Kimber und Coombe (1980) wurde bisher nicht für allgemeine Kreuzungen entwickelt sondern findet in England nur bei T-Kreuzungen Anwendung. Das von Kyte *et al.* (1996) vorgestellte Verfahren kann für beliebige Kreuzungen verwendet werden, weist jedoch grosse Fehlermöglichkeiten auf (Brilon und Miltner, 2003). Aktuell werden in der Schweiz (VSS, 1999), den USA (HBS, 2000) und Deutschland (HBS, 2001) Modelle der Zeitlückentheorie angewandt. Die von Brilon und Wu (2001) entwickelte Kapazitätsermittlung mittels der Konflikttechnik bei Verkehrsströmen ist momentan als eine Alternative zur Zeitlückentheorie zu sehen, die aber für Verfahren mit komplexen Knoten oder verschiedener Verkehrsteilnehmerarten (insbesondere Fussgänger) praktikabler sein könnte (siehe Brilon und Miltner, 2003).

2.2.2 Aktuelle Verfahren

Die Leistungsfähigkeit wird über Grenz- und Folgezeitlücken zwischen den Fahrzeugen der einzelnen in Konflikt stehenden Verkehrsströme ermittelt. Hierbei wird für jeden vortrittsbelasteten Verkehrsstrom die maximal mögliche Leistungsfähigkeit (L) und somit die Verkehrsqualitätsstufe bestimmt. Das Vorgehen lässt sich in sieben Schritte unterteilen (VSS, 1999 und HBS, 2001):

- Festlegen von Regime der Knotenpunkte und daraus folgend der Rangfolge hinsichtlich der Vortrittsrechte
- Ermittlung der massgebenden Belastungen (MSV) für jeden Strom
- Bestimmung der massgebenden übergeordneten Verkehrsmengen
- Ermittlung der Grundleistungsfähigkeiten für jeden Verkehrsvorgang

- Ermittlung der maximalen Leistungsfähigkeit und der Wahrscheinlichkeit des staufreien Zustandes (p)
- Berechnung der Leistungsreserve (R) und der mittleren Wartezeit (w)
- Vergleich der aus der Wartezeit ermittelten Qualitätsstufe mit der angestrebten Qualität

Für die Belastungen wird der massgebende stündliche Verkehr (MSV) der Spitzenzeit verwendet. Die untergeordneten Nebenströme werden in Personenwageneinheiten (PWE) umgerechnet. Mit diesen Umrechnungsfaktoren wird auch die Längsneigung der Knotenzufahrten mit berücksichtigt.

Ausgehend von der massgebenden Hauptstrombelastung in Fahrzeugen pro Stunde wird die Grundleistungsfähigkeit (G) für jeden Nebenstrom ermittelt, die die im Idealfall mögliche Verkehrsmenge angibt. Die in den Normen (VSS, 1999 und HBS, 2001) dargestellten Grundleistungsfähigkeits-Diagramme basieren auf Annahmen zur Verteilung der Folgezeitlücken und Grenzzeitlücken, die ein Verkehrsteilnehmer mindestens benötigt, um in einen übergeordneten Strom einzufahren oder ihn zu kreuzen. Für vorfahrtsbelastete Ströme ist die tatsächliche maximale Leistungsfähigkeit (L) unterhalb der Grundleistungsfähigkeit, da die Zeitlückenverteilungen nur für rückstaufreie Zustände gelten. Somit wird die Grundleistungsfähigkeit mit Wahrscheinlichkeit (p) des rückstaufreien Zustandes für die Leistungsfähigkeit multipliziert. Zur Bestimmung der Qualität des Verkehrsablaufs wird zunächst die Leistungsreserve (R) aus der Differenz aus Leistungsfähigkeit und massgebender Verkehrsstärke für jeden Strom ermittelt. Die Leistungsreserve wird in Verbindung mit der massgebenden Hauptstrombelastung auf die mittlere Wartezeit (w) abgebildet, die ein Mass für die Verkehrsqualität darstellt. Die im amerikanischen HCM (2000) beschriebene Methodik ist der schweizerischen (VSS, 1999) und deutschen (HBS, 2001) sehr ähnlich, jedoch wird hier die Leistungsreserve nicht explizit berechnet, sondern die Wartezeit wird direkt aus Kapazität und Verkehrsstärke des jeweiligen Stroms ermittelt. Zusätzlich ist eine Gleichung zur Berechnung des 95%-Perzentils der Staulänge angegeben.

2.3 Durchsatzbezogene Bemessung: Kreisverkehrsplätze

Kreisverkehrsplätze werden in VSS (2006), HBS (2001) und HCM (2000) analog zu Knoten ohne Lichtsignalanlage als eine Folge von benachbarten T-förmigen Einmündungen bemessen. In VSS (2006) und HBS (2001) wird zusätzlich noch die Kapazität der Ausfahrten mit berücksichtigt, die im HCM (2000) nur implizit enthalten ist, da nur auf Kreisverkehre mit einer Verkehrsbelastung auf der Kreisbahn von weniger als 1200 Fahrzeugen pro Stunde eingegangen wird. Dies entspricht etwa der maximalen Kapazität der Ausfahrten von 1200 bis

1400 Fahrzeugen pro Stunde. Die Bemessung und Bewertung von Kreisverkehrsplätzen folgt der gleichen Methodik wie für Knoten ohne Lichtsignalanlage (Kapitel 2.2)

2.4 Durchsatzbezogene Bemessung: Knoten mit Lichtsignalanlage

2.4.1 Grundsätze

Lichtsignalanlagen werden in der Regel an Knotenpunkten mit höheren Verkehrsbelastungen erstellt, für die es zweckmässig ist, Ganglinien detailliert über einen längeren Zeitraum zu erfassen (z. B. 16 Stunden, siehe HBS, 2001), die bei Verkehrsstärkeschwankungen in 15-Minutenintervallen für alle Verkehrsbeziehungen aufgenommen werden sollten (alternativ: Spitzenstundenwert mal 1.2 nach VSS, 1999). Auf der Steuerungsebene werden Festzeitsteuerungen für charakteristische Verkehrszeiten und verkehrsabhängige Steuerungen für eine dynamische Programmwahl unterschieden. Eine Übersicht der Steuerungsverfahren zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2 Steuerungsverfahren für Lichtsignalgesteuerte Knotenpunkte

Steuerungsebene	Ordnungszahl	Aktivierung		veränderbare Elemente des Signalprogramms								Steuerungsverfahren	
		zeitplan- abhängig	verkehrs- abhängig	Umlaufzeit festgelegt		Phasenfolge festgelegt		Phasenzahl festgelegt		Freigabe- zeiten festgelegt		Hauptmerkmal der Veränderbarkeit des Signal- programms	Oberbe- griff
				ja	nein	ja	nein	ja	nein	ja	nein		
A: Makroskopische Steuerungsverfahren	A1	X		veränderbare Elemente des Signalprogramms gemäß Steuerungsverfahren Gruppe B								zeitplanabhängige Signalprogramm- auswahl	Signal- programm- auswahl
	A2		X									verkehrs- abhängige Signal- programmauswahl	
B: Mikroskopische Steuerungsverfahren	B1	Aktivierung gemäß Steuerungs- verfahren Gruppe A		X		X		X		X		keine Veränderbarkeit	Festzeit- signal- programm
	B2			X		X		X			X	Freigabezeit- anpassung	Signal- programm- anpassung
	B3			X			X	X		X		Phasentausch	
	B4			X		X			X		X	Bedarfsphasen- anforderung	
	B5				X		X		X		X	freie Veränderbarkeit	Signal- programm- bildung

Quelle: HBS (2001)

2.4.2 Aktuelle Verfahren

Die aktuellen Normenwerke bzw. Handbücher in der Schweiz, Deutschland und den USA (VSS, 1999; HBS, 2001; HCM 2000) beschreiben ein grundsätzlich ähnliches Verfahren zur Bestimmung der optimalen Freigabezeiten unter gegebenen Randbedingungen. Als Grundannahme wird eine Sättigungsverkehrsstärke (Kapazität) als Basis angenommen, die während vollkommener Freigabe eines Verkehrsstroms unter günstigen Bedingungen erreicht werden

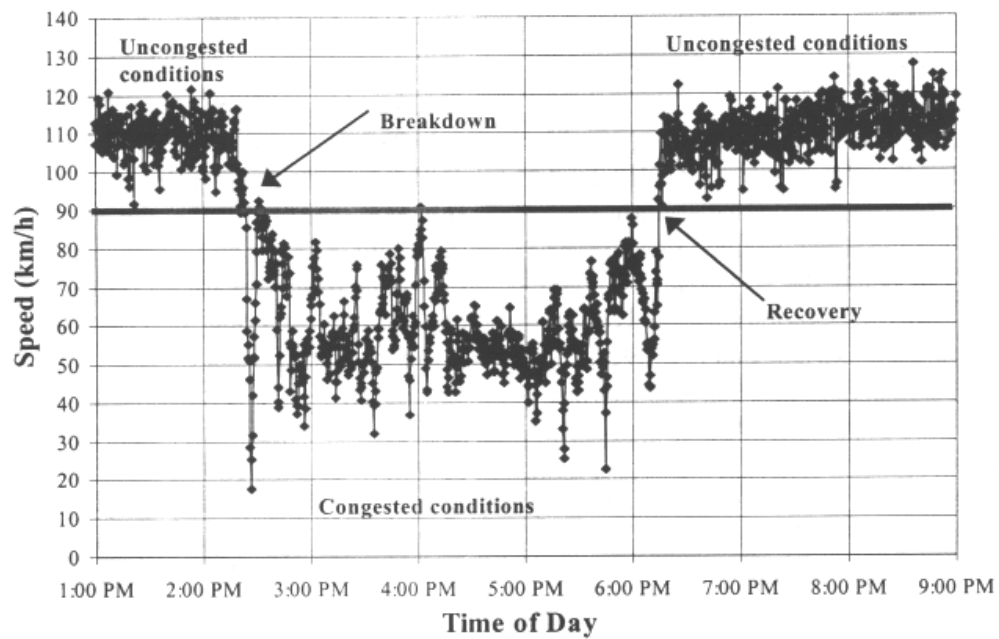
kann. Die Sättigungsverkehrsstärke wird im HBS (2001) und HCM (2000) durch Faktoren korrigiert, die die Verkehrssituation berücksichtigen. In der Regel wird die Sättigungsverkehrsstärke durch ungünstige (z. B. Schwerverkehrsanteil) Einflüsse abgesenkt; erhöhend wirken sich z. B. Gefälle oder im HCM (2000) sehr breite Fahrspuren aus. In VSS (1999) wird stattdessen mit Personenwageneinheiten (PWE) gerechnet, um die Verkehrszusammensetzung abzubilden. Als Sättigungsverkehrsstärken werden in VSS (1999) 1800 PWE/h, im HBS (2001) 2000 Fz./h und im HCM (2000) 1900 Fz./h angesetzt. Unter Berücksichtigung der Freigabezeiten, der massgebenden Zwischenzeiten und eventuellen vorfahrtbelasteten Strömen errechnet sich die effektive Leistungsfähigkeit für jeden Strom.

Als wichtigste Bewertungsgrösse im HBS (2001) und HCM (2000) die mittlere Wartezeit aufgeführt, für die auch Qualitätsstufen angegeben sind. In der Schweiz (VSS, 1999) werden die Qualitätsstufen über die Auslastungsgrade (Verkehrsstärke / effektive Leistungsfähigkeit) bestimmt. Eine Bestimmung der Rückstaulängen ist mit allen drei hier betrachteten Varianten möglich.

2.5 Verkehrsdynamik (Zusammenbruch)

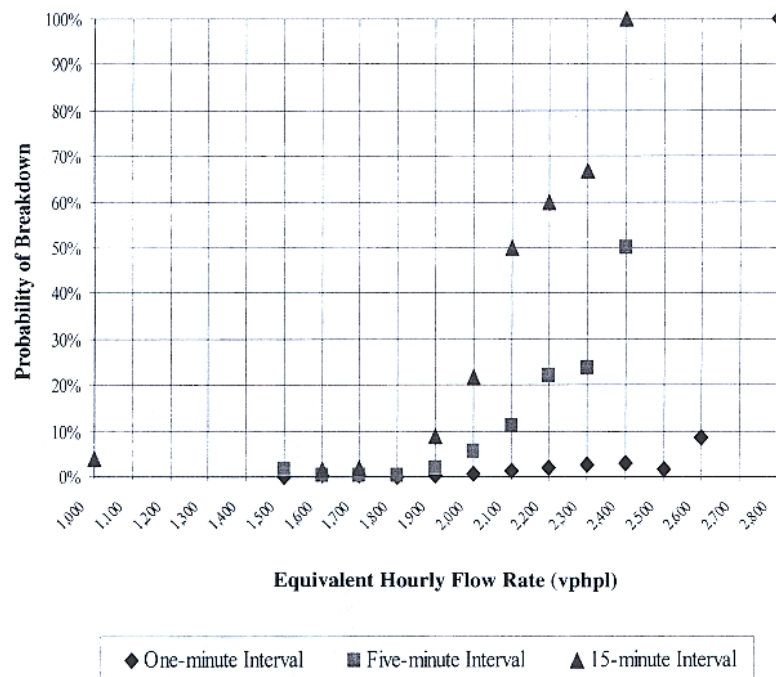
Matt und Elefteriadou (2001) haben für den Highway 401 in Toronto Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten ermittelt. Ein Zusammenbruch (*breakdown*) tritt per definitionem auf, wenn die Durchschnittsgeschwindigkeit aller Fahrbahnen während des folgenden Messintervalls um mindestens 15 km/h niedriger ausfällt als die vorherige Geschwindigkeit. In Abbildung 6 ist ein Ausschnitt der Geschwindigkeitszeitreihe mit freiem Verkehrsfluss (*uncongested conditions*) und gestauten Verhältnissen (*congested conditions*) dargestellt. Die Messintervalle wurden nach Verkehrsmengen klassifiziert und die jeweilige Zusammenbruchswahrscheinlichkeit ermittelt (Abbildung 7). Es wird ersichtlich, dass die Kapazität eine Zufallsgrösse ist und nicht als ein fixer Wert aufgefasst werden kann, bei dessen Überschreitung durch den Verkehrsfluss zwangsläufig ein Zusammenbruch folgt.

Abbildung 6 Geschwindigkeitszeitreihe des Autobahnkreuz Highway 400-Black Creek Drive und Highway 401 in Toronto



Quelle: Matt und Elefteriadou (2001)

Abbildung 7 Wahrscheinlichkeit eines Zusammenbruchs des frei fließenden Verkehrs bei gegebenem Verkehrsaufkommen; gemessen am Autobahnkreuz Highway 400-Black Creek Drive und Highway 401 in Toronto



Quelle: Matt und Elefteriadou (2001)

In Brilon und Zurlinden (2003) wird eine Methode zur Bestimmung der Kapazität einer Strasse vorgeschlagen, die die Verkehrsstärken der Messintervalle unmittelbar vor einer Kapazitätsverminderung (einem Zusammenbruch) gesondert auswertet. Kennzeichnend für diese Intervalle ist eine Reduktion der mittleren Geschwindigkeit im Folgeintervall. Basierend auf der statistischen Analyse von Lebensalterdaten wird die *Product-Limit*-Methode angewandt, um die Kapazität einer Strasse als Zufallsgrösse zu bestimmen. Es ist hiermit möglich, anders als bei Matt und Elefteriadou (2001), auch Intervalle in die Auswertung einzubeziehen, auf die kein Zusammenbruch folgt. Intervalle, bei denen der Verkehr fließt und deren Folgeintervall keinen Zusammenbruch markieren, werden als überlebende Intervalle ausgewertet. Es wird auch bei dieser Methode angenommen, dass ein Kapazitätsrückgang (*capacity drop*) ein zufälliges Ereignis ist, dass mit kontinuierlich steigender Verkehrsstärke wahrscheinlicher wird.

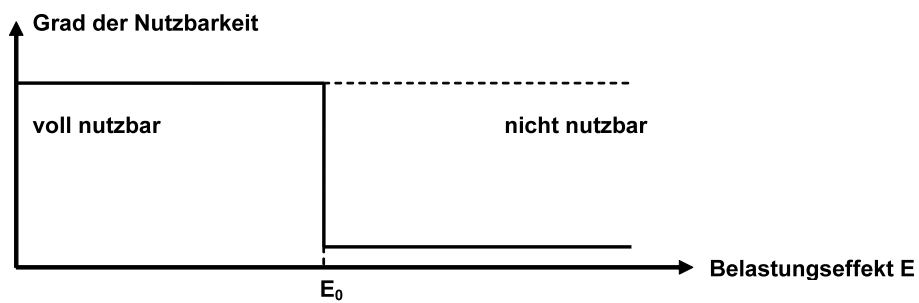
3 Bemessungsmethoden anderer Ingenieurwissenschaften

An dieser Stelle soll eine Auswahl von Bemessungs- und Dimensionierungsmethoden anderer Ingenieurwissenschaften vorgestellt werden. Die folgenden Methoden zeigen Aspekte, die bei der Bemessung von Verkehrsanlagen neue Impulse geben können und Vorgehensweisen, die ähnlich aufgebaut sind.

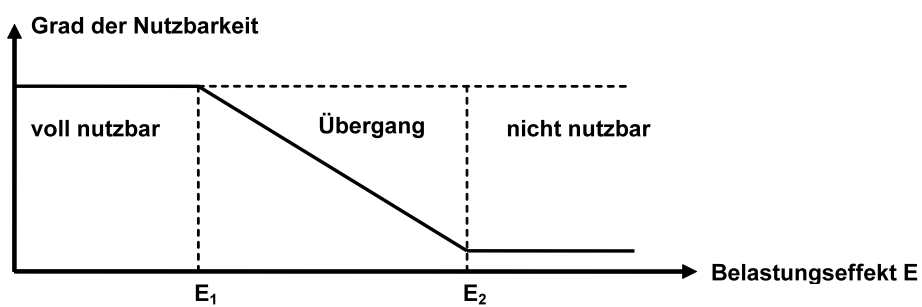
3.1 Konstruktives Bauingenieurwesen

Im konstruktiven Bauingenieurwesen findet seit 1990 eine Umstellung der unterschiedlichen nationalen Normen auf die Euronorm (EN) und die Eurocodes statt. Als genereller Ansatz wird das Grenzzustands-Konzept (*limit state design*) eingeführt. Es werden Modelle und Belastungsfälle für alle plausiblen Grenzzustände und Gebrauchsfähigkeitsgrenzen kombiniert. Die Bemessung erfolgt in dem Sinne, dass keine der Lastkombinationen den Grenzzustand des Modells oder Systems überschreiten darf. Bei vielen Systemen lässt sich der Grenzzustand jedoch nicht scharf definieren, so dass zwischen voll gebrauchsfähigem System und nicht nutzbarem Zustand ein fließender Übergang herrscht (Abbildung 8). Neben dem Grenzzustand (*limit state*) wird noch der Versagenszustand (*ultimate limit state*) eingeführt, der einer Beschädigung des Systems oder einer Sicherheitsverletzung mit Personenschäden oder Folgeeffekten entspricht. Die Versagenszustände (*ultimate limit states*) kennzeichnet in aller Regel die Irreversibilität dieses Zustands, wohingegen Grenzzustände, die die Nutzung einschränken, häufig reversibel sind (Abbildung 9).

Abbildung 8 Scharfer (a) und gleitender (b) Übergang bei der Definition des Grenzzustands



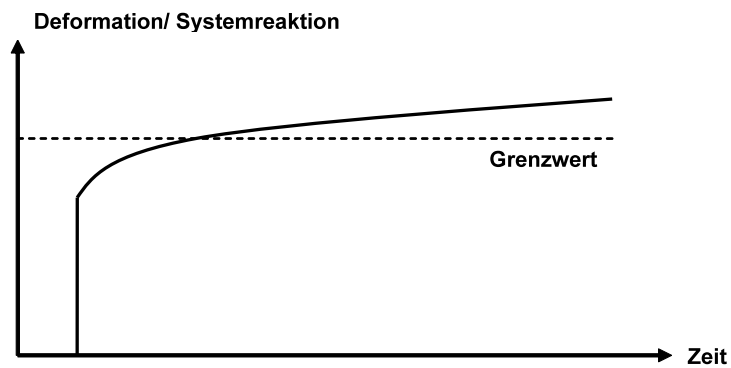
(a)



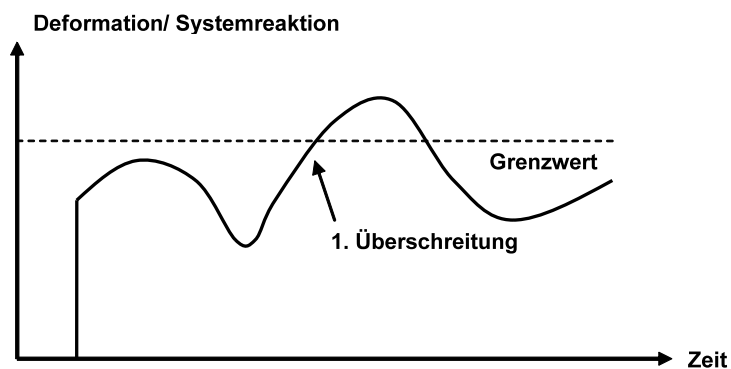
(b)

nach Gulvanessian *et al.* (2002)

Abbildung 9 Irreversibler und reversibler Grenzzustand



(a)

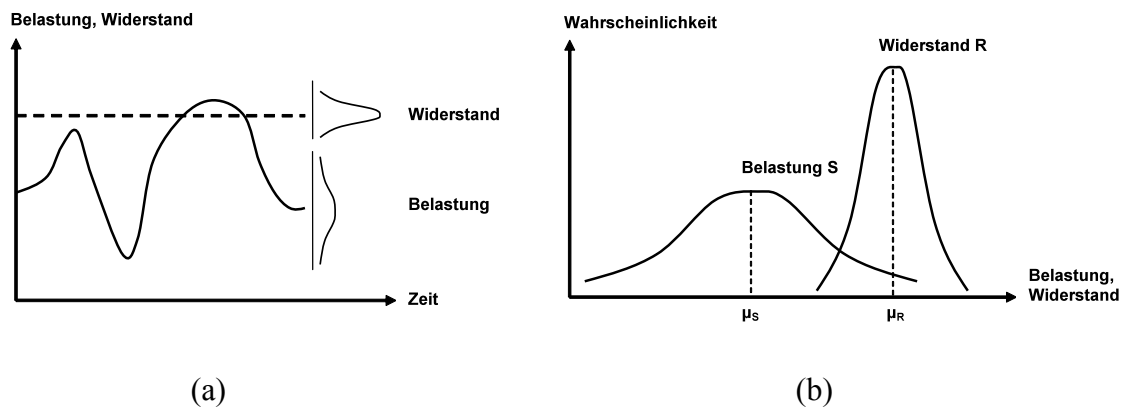


(b)

nach Gulvanessian *et al.* (2002)

In den Euro-Normen (EN) werden die Lasten und der Systemwiderstand als Zufallsvariablen angesehen. Auf diese Weise werden die System- und Materialunsicherheiten auf der Widerstandsseite und die Unsicherheiten bezüglich der Belastungsfälle berücksichtigt. Abbildung 10 zeigt das erweiterte Modell (vgl. Abbildung 9). Die Unsicherheiten werden hier als Verteilungsfunktion dargestellt. Sind die Verteilungen bekannt, so lässt sich die Überschreitungswahrscheinlichkeit ermitteln, mit der die Belastung grösser ist als der Widerstand (Abbildung 10 b).

Abbildung 10 Belastung und Widerstand als Zufallsgrösse



3.1.1 Vergleich mit dem Verkehrswesen

In Gulvanessian *et al.* (2002) wird der Grenzzustand nicht als Materialversagen oder Nutzbarkeitsverlust beschrieben sondern allgemein mit einem Status, in dem das System nicht länger den Planungskriterien entspricht. Vergleichen lässt sich dies mit dem Übergang von frei fliessendem Verkehr zum stehenden bzw. gestauten Verkehr. Der Übergang in Abbildung 8 spiegelt dabei die Verkehrsqualitätsstufen wider. Die Belastungseffekte dürfen jedoch nicht alleine als Verkehrsaufkommen interpretiert werden, da Verkehrssysteme infolge eines Unfalls auch bei sehr geringer Belastung einen Grenzzustand annehmen können. Die im Verkehrswesen auftretenden Grenzzustände sind reversibel, da ein Versagen des Systems im Sinne einer Zerstörung nicht vorkommt. Das Verkehrssystem in Form von Strassen bleibt i.d.R. intakt, wobei die Gebrauchsfähigkeit (entsprechend dem *limit state*) bei einem Stau nicht mehr voll gegeben ist. Der Versagenszustand (*ultimate limit state*) könnte durch einen Zustand der Selbstblockade (*grid lock*) definiert werden, in dem die generalisierten Kosten der Nutzer theoretisch ins Unendliche wachsen.

3.1.2 Folgerungen und Anwendbarkeit

Der Grad der Nutzbarkeit von Verkehrssystemen lässt sich mit Qualitätsstufen (*levels of service*) des Verkehrsflusses beschreiben, womit ein mehrstufiger Übergang von voll nutzbar (Level A, freier Verkehrsfluss) zu nicht akzeptabel (Level F, stark eingeschränkter Fluss bis stehender Verkehr) besteht (vgl. Abbildung 4).

Irreversible Systemzustände, die zerstörende Folgen haben, müssen i.d.R. innerhalb der Verkehrsplanung nicht behandelt werden. Reversible Überschreitungen der Grenzzustände erzeugen in einfachen Fällen Fahrkomforteinbussen und Zeitverluste.

Wird die Kapazität als Grenzwert und die Verkehrsstärke als Last angesehen, so können Überschreitungen des Grenzzustandes ermittelt werden. Zur Beurteilung muss bestimmt werden, wie lange diese Zustand anhält, wie gross die Überschreitung ist und wie häufig diese eintritt.

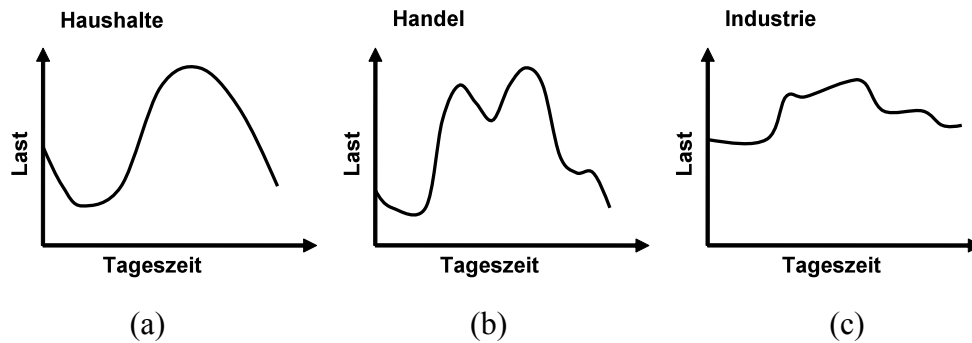
3.2 Bemessung von Elektrizitätskraftwerken/ Elektrizitätsnachfrage

Die Bemessung von Elektrizitätskraftwerken und Stromnetzen lässt sich in vielen Punkten mit der Bemessung im Verkehrswesen vergleichen. Die Frage nach der benötigten Kapazität für die Nachfragemuster muss auch hier beantwortet werden. Zudem ist ein optimales Verhältnis zwischen Qualität und Kosten gesucht.

3.2.1 Nutzerklassifizierungen

Für die Abschätzung der für Energieunternehmen interessanten Last wird häufig ein mehrstufiges Modell angewandt. Die Nachfrage ergibt sich aus den Wünschen der Verbraucher, Geräte zu benutzen, die Strom benötigen. Erst durch deren Nutzung entsteht eine Last auf dem Stromnetz. Im Südosten der USA teilt sich z. B. die Spitzennachfrage zu 58 % für Haushalte, 22 % für Einzelhandel, 11 % für Industrie und zu 9 % für andere Zwecke auf (Willis, 2002). Die Einteilung in Verbraucherklassen ermöglicht es, differenzierte Lastganglinien zu erstellen (Abbildung 11). Innerhalb der Nutzerklassen sind die Nachfragemuster ähnlich. Überlagert werden die Verläufe durch besondere Ereignisse, Ferien und Feiertagen aber vor allem durch die Jahreszeit bzw. speziell das Wetter.

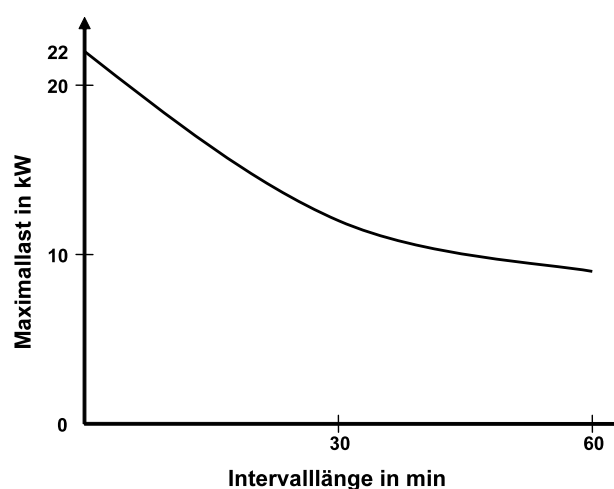
Abbildung 11 Qualitativer Verlauf der Stromnachfrage verschiedener Nutzerklassen (Jahreszeit: Sommer)



nach Willis (2002)

Um das Lastverhalten zu untersuchen werden typischerweise die über das gesamte Jahr ermittelten Belastungen der Grösse nach sortiert und in Dauerlinien dargestellt. Betrachtet werden häufig 15-Minutenintervalle, da Stundenwerte kurze Spitzennachfragen ausmitteln können (Abbildung 12). Wird eine sehr grosse Anzahl von Verbrauchern betrachtet, so kann ein längeres Messintervall gewählt werden, da es im Normalfall unwahrscheinlich ist, dass die individuellen Nachfragespitzen zur gleichen Zeit stattfinden. Eine Ausnahme ist jedoch ein Neustart nach einem Stromausfall, da in diesem Fall die Verbraucher gleichzeitig nachfragen und sich so eine höhere Gesamtlast ergibt (Willis, 2002).

Abbildung 12 Beobachtete Maximallast eines Haushalts bei unterschiedlicher Messintervalllänge



nach Willis (2002)

3.2.2 Prognosekonzepte

Die Vorhersage der Elektrizitätsnachfrage lässt sich in drei Kategorien einteilen: kurzfristige Vorhersagen (eine Stunde bis zu einer Woche), mittelfristige (eine Woche bis zu einem Jahr) und Langzeitprognosen (länger als ein Jahr). Die drei Prognosefenster sind wichtig für die unterschiedlichen Anwendungen der Stromerzeuger und -verteiler. Zudem ergibt sich auch eine Abstufung der Genauigkeit. Während kurzfristige Prognosen zur Schätzung von Stromflüssen und zur Verhinderung von Überlastungen eingesetzt werden, finden längerfristige Prognosen häufig bei Investitionsplanungen Anwendung. Neben der Verfügbarkeit von Elektrizität der Menge nach ist auch die Qualität ein wichtiger Aspekt.

Die Prognosemethoden werden von Feinberg und Genethliou (2003) in Mittel- bzw. Langfristmethoden und Kurzfristmethoden aufgeteilt. Für längerfristige Prognosen können folgende Modelle angewendet werden:

- Endverbrauchermodelle,
- ökonometrische Modelle und
- Lernmodelle, basierend auf statistischen Modellen.

Bei kurzfristigen Prognosen stehen folgende Modellformen zur Verfügung:

- Ansatz des vergleichbaren Tages,
- Regressionsmethoden,
- Zeitreihenanalyse,
- neuronale Netzwerke,
- wissensbasierte Systeme,
- fuzzy logic und
- support vector machines.

3.2.3 Vergleich mit dem Verkehrswesen

Viele Methoden der Bemessung von Elektrizitätskraftwerken und -netzen werden in analoger Form auch im Verkehrswesen angewandt. Die Betrachtung von Dauerlinien wird im Verkehr beim Konzept der 30. höchstbelasteten Stunde herangezogen. Das Konzept der Nutzerklassen bei der Stromnachfrage lässt sich gut mit den Tages-, Monats- und Jahres-Ganglinien vergleichen, da diese auch einer makroskopischen Darstellungsform entsprechen. Unterschiedliche Klassen bei der Nutzung von Verkehrsnetzen werden nur in mikroskopischen Untersuchungen herangezogen, die jedoch momentan in der Praxis zur Bemessung von Verkehrswegen eine untergeordnete Rolle spielen. Der Zusammenhang zwischen Maximallast oder analog

der maximalen Verkehrsstärke und Messintervalllänge (siehe Abbildung 12) darf auch im Verkehrswesen nicht vernachlässigt werden. In Brilon und Zurlinden (2003) wurde festgestellt, dass eine hohe Verkehrsstärke in einem 5-Minutenintervall mit hoher Wahrscheinlichkeit zu einem stockenden Verkehrsfluss führen kann, so dass auch kurzzeitige Spitzenwerte zu berücksichtigen sind.

Bei den Schätzmethoden fällt auf, dass für längerfristige Prognosen des Verkehrsgeschehens auch Methoden eingesetzt werden, die für Prognosen der Stromlast nur für kurzfristige Vorhersagen genutzt werden, wie z. B. der Ansatz des vergleichbaren Tages (bei Ganglinien), Regressionsmethoden und Zeitreihenanalysen zur Hochrechnung des zukünftigen Verkehrsaufkommens. In Verkehrsrechenzentralen werden die Methoden für kurzfristige Prognosen jedoch analog angewendet (z. B. wissensbasierte Systeme, vgl. Abbildung 5). Konzepte der längerfristigen Prognose (Endverbraucher-/ Nutzermodelle und Lernmodelle) werden in mehrstufigen Simulationen eingesetzt.

Mehr noch als im Verkehrswesen ist die Qualität bei der Stromverteilung von grosser Bedeutung. Stromspannungs- und Schwingungsschwankungen können die Nutzbarkeit beeinflussen oder sogar Geräte schädigen. Eine geringe Verkehrsqualität (Stau) erzeugt durch erhöhte Zeitverluste der Gesellschaft auch Kosten, die auch in die Kosten-Nutzen-Analyse einfließen (vgl. FGSV, 1997 und VSS, 2006: SN 641 820).

Trotz der aufgezeigten Ähnlichkeiten ist festzuhalten, dass die Verkehrskapazität nicht mit der Kapazität von Kraftwerken verglichen werden kann, da die Kraftwerksenergie theoretisch beliebig auf das Netz verteilt werden kann. Im Verkehrswesen ist die Kapazität an die einzelnen Netzelemente gebunden, die nur eingeschränkt innerhalb eines Korridors Überlastungen ausgleichen können. Das Problem der Vermeidung von lokalen Kapazitätsengpässen besteht im Verkehrswesen in besonderer Form.

3.3 Hochwasserschutz

Im Wasserbau folgt aus der Frage nach dem Bemessungshochwasser der gewünschte Schutz oder Sicherheitsgrad. Betrachtet werden zwei Klassen von Bemessungsfällen: 1. Eine Erhöhung des bestehenden Schutzgrads und 2. die Bemessung für Anlagen, von denen hohe Risiken beim Eindringen von Wasser entstehen (DVWK, 1989).

3.3.1 Bemessungsmethoden

Trotz unterschiedlicher Anwendungsgebiete (z. B. Deiche, Flussregelungen, Binnenentwässerung, Rückhaltebecken etc.) kann im Wasserbau in der Regel auf ein allgemein gültiges Konzept zurückgegriffen werden. Grundsätzlich wird die Nutzendifferenz zwischen verschiedenen Massnahmen und der Nullmassnahme (i.d.R. status quo) bewertet. In DVWK (1989) wird der Nutzen einer Massnahme wie folgt ermittelt:

$$\Delta S = \bar{S}_{ohne} - \bar{S}_{mit} \quad [\text{€/a}]$$

ΔS Schadensminderung bzw. Nutzen

$\bar{S}_{ohne}$ Schadenserwartung ohne Massnahme

$\bar{S}_{mit}$ Restschadenserwartung mit Massnahme.

$\bar{S}_{ohne}$ bzw. $\bar{S}_{mit}$ sind die mit der Eintrittswahrscheinlichkeit (in Ereignisse pro Jahr) gewichteten Erwartungswerte der Schäden (z. B. in €):

$$\bar{S} = \int_{P_0}^{P_k} S(P) dP \quad \text{bzw.} \quad \bar{S} = \sum_{i=1}^k S_i \cdot \Delta P_i$$

mit $S(P)$ Schadenswahrscheinlichkeit; Kosten in z.B. € bei gegebener Eintrittswahrscheinlichkeit,

P Eintrittswahrscheinlichkeit in Ereignisse pro Jahr,

P_0 Wahrscheinlichkeit des ersten Auftreten von Schäden; $S(P < P_0) = 0$,

P_k Eintrittswahrscheinlichkeit des grössten betrachteten Schadens,

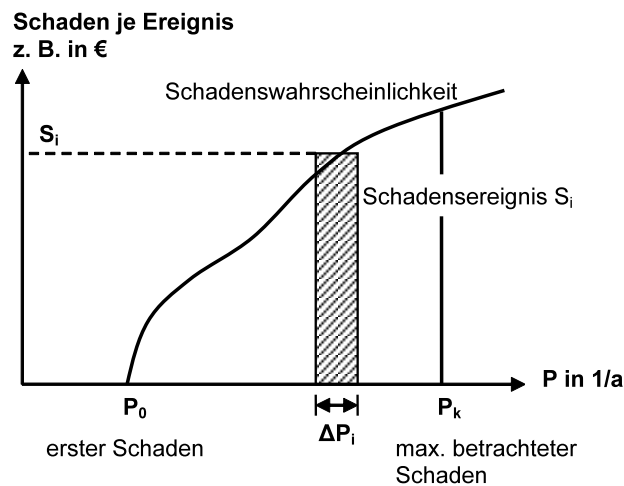
k Anzahl der betrachteten diskreten Schadensereignisse.

Für die Nutzenanalyse werden in der Regel diskrete Schadensfälle bei unterschiedlichen Hochwasserabflüssen betrachtet und die zugehörige Hochwasserwahrscheinlichkeit ermittelt (siehe Abbildung 13). Die Schäden (Kosten) aller betrachteten Ereignisse (k Fälle) werden mit dem zugehörigen Wahrscheinlichkeitsbereich (ΔP_i) multipliziert und jeweils addiert (Abbildung 14). Die ermittelten Schadenserwartungen der einzelnen Massnahmen werden über den Planungszeitraum (z. B. 80 Jahre) diskontiert und mittels der Jahreskosten miteinander verglichen.

Zur Bestimmung der Schadensfälle werden meist Bemessungshochwasser mit verschiedenen Wiederholungszeitspannen gewählt (10-, 20-, 50-, und 100-jähriges Hochwasser). Es wird empfohlen auch Abflüsse mit hohen Wiederholungszeitspannen (z. B. 500 Jahre) zu berücksichtigen, auch wenn diese nur ungenau bestimmt werden können. Da die Schäden jedoch

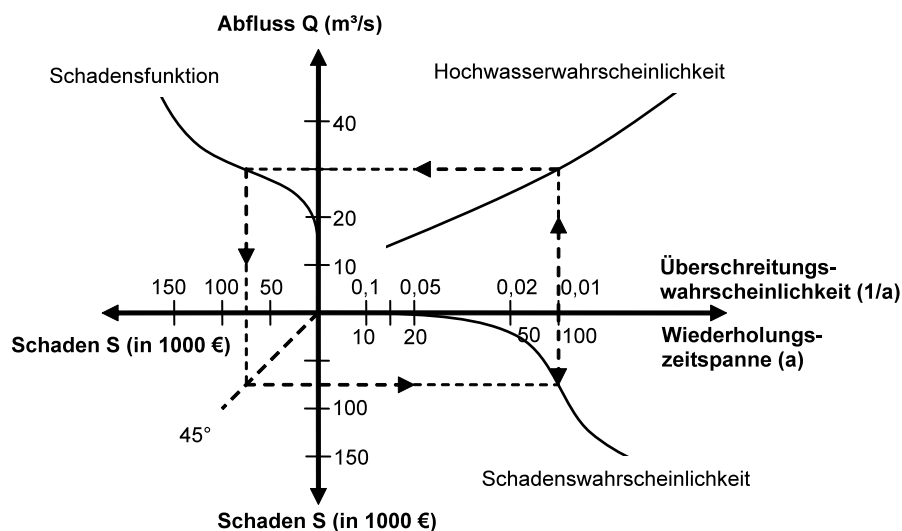
gross werden können, ist ihr Risikobeitrag nicht immer zu vernachlässigen. Abbildung 14 zeigt die Schadensfunktion der Bemessungshochwasser.

Abbildung 13 Prinzip der Schadensermittlung bei Betrachtung diskreter Schadensereignisse



nach DVWK (1989)

Abbildung 14 Beispiel zur Ermittlung der Schadenswahrscheinlichkeit auf Basis der Hochwasserwahrscheinlichkeit und Schadensfunktion für die Nullmassnahme



nach DVWK (1989)

3.3.2 Vergleich mit dem Verkehrswesen

Viele wasserbauliche Einrichtungen dienen dem Schutz von Personen, Gütern und Gebieten. Eine detaillierte Kosten-Nutzen-Analyse ist daher zentraler Teil der Bemessung. Messungen von Hochwasserpegeln erlauben Zeitreihenanalysen und bilden die Grundlage zur Bestimmung von Bemessungshochwassern mit zugehörigen Wiederkehrperioden bzw. Eintrittswahrscheinlichkeiten. Es wird implizit angenommen, dass sich eine gemessene Hochwasserverteilung während des Betriebszeitraums nicht ändert. Diese Annahme setzt voraus, dass keine Änderungen am Zu- bzw. Abfluss des betrachteten Bauwerks stattfinden werden.

Bei technischen Einrichtungen (z. B. bewegliche Wehre) ist neben der allgemeinen Risikoanalyse infolge Hochwassers zusätzlich die technische Versagenswahrscheinlichkeit zu berücksichtigen. Das technische Versagen ist häufig auch direkt vom Wasserstand abhängig, so dass diese Korrelation bei der Kosten-Nutzen-Analyse durch eine erhöhte Schadenswahrscheinlichkeit berücksichtigt werden muss (siehe auch Kalenda, 1990).

Das Konzept der Kosten-Nutzen-Analyse wird in ähnlicher Weise auch im Verkehrswesen genutzt (z. B. FGSV, 1997). Hier werden insbesondere Betriebskosten, Fahrzeiten, Unfälle, Lärm-, Schadstoff- und Klimabelastungen, Trennwirkungen, Flächenverfügbarkeit und ökologische Aspekte berücksichtigt. Projekte werden anhand ihres Nutzen/Kosten-Verhältnisses und ihrer Notwendigkeit bzw. Entbehrlichkeit bewertet.

Eine Bemessungsverkehrsstärke kann nicht allgemein analog zum Bemessungshochwasser im Wasserbau bestimmt werden. Während der Verlauf von Wasserständen in der Regel als gegeben und nicht beeinflussbar betrachtet wird, setzt die Verkehrserzeugung aus vielen Entscheidungsprozessen zusammen. Auf der Ebene von Ganglinien im Verkehr können ähnliche Analysen wie im Wasserbau durchgeführt werden, so lange sich die Verkehrserzeugung bzw. Attraktivitäten nicht ändern und die betrachteten Nachfragen nicht von Kapazitätsengpässen beeinflusst werden. Bei Verkehrsnachfragen nahe an der Kapazität findet ein räumliches als auch zeitliches Ausweichen statt, das im Wasserbau in dieser Form nicht auftreten kann.

4 Datengrundlage

4.1 Anforderungen an die Datenbasis

Eine grosse Datenbasis ist nötig, um genügend Verkehrszusammenbrüche für eine Modell-schätzung beobachten zu können, die nicht durch besondere Verkehrssituationen wie extreme Wetterbedingungen beeinflusst sind. Auf der anderen Seite sollen aber gerade auch diese besonderen Ereignisse, die nur mit langen Wiederholungsperioden auftreten in den Daten vorhanden sein, da auch diese die Verkehrsqualität beeinflussen.

4.2 Datenbeschreibung

Für die Datenauswertung wurden vom Schweizer Bundesamt für Strassen (ASTRA) hoch-aufgelöste Zähl-daten zur Verfügung gestellt. Die Zählstellendaten wurden als Textdateien mit Einzelfahrzeuginformationen (*vehicle-by-vehicle data*) geliefert (Rubin, 2004) die zu richtungsgetreunten 5-Minutenintervallen aggregiert wurden.

Für die Aggregation mussten die reinen Ausgabedaten der Zählstationen bereinigt werden, wobei Statusinformationen und Fehlermeldungen der Zählstationen entfernt wurden. Vereinzelt ergaben sich nicht korrekte Datenzeilen bei denen beispielsweise Buchstaben in Zahlenfeldern auftauchten oder die Anzahl der Attribute nicht stimmte. Diese offensichtlich fehlerhaften Datensätze wurden verworfen, auch wenn es sich um Felder handelte, die in dieser Auswertung nicht benötigt wurden, da nicht immer sichergestellt werden konnte, dass die übrigen Felder nicht von dem Fehler beeinflusst waren. Die Daten wurden zudem von mehrfach erscheinenden Fahrzeugen bereinigt und nach dem Zeitstempel der Einfahrt der Fahrzeuge in die Messeinrichtung sortiert. Da die Zählgeräte den Datensatz erst beim Verlassen der Messstelle schreiben, kommt es ohne Sortierung sonst bei unterschiedlich langen und unterschiedlich schnellen Fahrzeugen zu unstetigen Zeitverläufen.

Die Anzahl der nicht korrekt gezählten Fahrzeuge konnte über einen laufenden Fahrzeugindex, den die Messeinrichtungen erstellen, ermittelt werden, so dass zwischen einer längeren Zeitlücke ohne Fahrzeuge und einem fehlenden Datensatz unterschieden werden konnte. Bei der Aggregation wurde ein maximaler Fehler von 10 % der Intervalllänge (30 Sekunden

Ausfalldauer im 5-Minuten-Intervall) akzeptiert und „mittlere Fahrzeuge“ des betreffenden Intervalls nötigenfalls eingesetzt. Diese 5-Minutenintervalle bilden die Grundlage für die hier vorgestellten Untersuchungen.

Tabelle 3 Lage und Typ der für die Analyse verwendete Zählstellen

Zählstelle	Kanton	Richtung	Strasse	Nr.	Koord. Ost	Koord. Nord	Fahr- streifen
Mattstetten	Bern	Zürich	0	A 1	23	605450 207950	2
Mattstetten	Bern	Bern	1	A 1	23	605450 207950	2
Deitingen	Solothurn	Zürich	0	A 1	32	613300 230500	2
Deitingen	Solothurn	Bern	1	A 1	32	613300 230500	2
Eptingen N	Basel Land	Härkingen	0	A 2	33	628300 249600	2+1 *
Umfahr. Bern Ost	Bern	Freuden- bergerpl.	0	A 6	42	602400 200825	2
Gunzgen	Solothurn	Zürich	0	A 1	60	629050 240100	2
Gunzgen	Solothurn	Bern	1	A 1	60	629050 240100	2
Muttenz, Hard	Basel Land	Basel	1	A 2	81	615460 265360	3
Kirchberg N	Bern	Zürich	0	A 1	182	610400 217120	2
Kirchberg N	Bern	Bern	1	A 1	182	610400 217120	2
Birrhard, Birrfeld	Aargau	Bern	1	A 1	208	661090 255475	2
Egerkingen, Ver- zweigung N2	Solothurn	Härkingen	0	A 2	225	627390 241300	2+2 **

*) 2 Fahrstreifen und eine Standspur; **) 2 Fahrstreifen Richtung Bern und 2 Richtung Zürich

Tabelle 4 Allgemeine Charakteristika der für die Analyse verwendeten Zählstellen

Zählstelle	Nr.	Ri.	Intervalle	Zählbeginn*	Ermittelte Kapazität nach VSS in Fz/h	Ermittelte kritische Geschwindigkeit in km/h**
Mattstetten	23	0	326 055	17.01.2002	4000	80
Mattstetten	23	1	326 055	17.01.2002	4000	80
Deitingen	32	0	333 084	17.01.2002	3800	80
Deitingen	32	1	333 084	17.01.2002	3800	80
Eptingen N	33	0	233 615	18.12.2002	2800	66
Umfahr. Bern Ost	42	0	296 831	12.02.2002	4000	66
Gunzgen	60	0	250 586	11.04.2002	3800	80
Gunzgen	60	1	250 586	11.04.2002	3800	80
Muttenz, Hard	81	1	182 098	18.12.2002	6000	80
Kirchberg N	182	0	287 225	17.01.2002	3200	80
Kirchberg N	182	1	287 225	17.01.2002	3600	80
Birrhard, Birrfeld	208	1	298 164	15.02.2002	3600	80
Egerkingen, Verzweigung N2	225	0	331 938	17.01.2002	3200	80

*) Alle Messungen wurden bis zum 10.05.2005 ausgewertet **) $\frac{2}{3}$ der zulässigen Höchstgeschwindigkeit.

Von den zur Verfügung gestellten Zählstationen wurden solche ausgewählt, die für die Auswertung relevante Verkehrszustände enthalten. Besonders problematisch sind Rückstaus für die angewendete Methode. Da keine Messwerte von hintereinander liegenden Zählstellen ver-

fügar waren, bei denen sich die Verkehrsstärke nicht infolge von Zu- oder Abflüssen zwischen diesen Punkten ändern kann, können Rückstaus nicht direkt ermittelt werden. Sie machen sich aber in den Diagrammen der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit bemerkbar, indem die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit bei höheren Verkehrsstärken deutlich sinkt. In diesen Fällen sind die gemessenen Verkehrsstärken nicht die Ursache für einen folgenden Übergang zum stockenden Verkehrsfluss (Zusammenbruch), so dass Zählstellen, an denen Zustände dieser Art häufig eintreten, nicht genutzt werden konnten.

Tabelle 3 zeigt die Übersicht der für die Analyse verwendeten Zählstellen. Bei dieser Auswahl konnte sichergestellt werden, dass ein Grossteil der Messungen nicht von Rückstau oder Baustellen beeinflusst waren. An allen Messstellen wurden Zählwerte bis zum 10. Mai 2005 berücksichtigt, so dass mindestens für 29 Monate meistens sogar für 3½ Jahre 5-Minutenintervalle ermittelt werden konnten.

Auf Basis der 5-Minutenintervalle wurde analog zu dem Vorgehen der Schweizer Norm SN 640 018a die Kapazitäten der Zählstellen einzeln ermittelt. Eine Übersicht der Fundamentaldiagramme findet sich im Anhang. Die kritische Geschwindigkeiten können aus dem Fundamentaldiagramm entnommen werden, wobei diese Geschwindigkeit den oberen Ast des fließenden Verkehrs vom unteren Ast des stockenden Verkehrs trennt. Es hat sich gezeigt, dass vereinfachend $\frac{2}{3}$ der zulässigen Höchstgeschwindigkeit gewählt werden kann.

5 Zusammenhang Verkehrsstärke und Varianz

In der Verkehrsplanung liegen für die Planung häufig Messwerte, Schätzungen und Prognosen stündlicher Verkehrsstärken vor. Kürzere zeitliche Auflösungen liegen in der Ganglinien-norm (VSS, 1999: SN 640 005 oder Berg und Troxler, 1999) nicht vor und können selten aus Hochrechnungen gewonnen werden.

Da bei der Bestimmung der Kapazität in der Schweizer Norm (VSS, 2006: SN 640 018a) 5-Minutenintervalle genutzt und da hohe Verkehrsstärken während fünf Minuten einen Verkehrszusammenbruch auslösen können, dürfen die Schwankungen der Verkehrsstärke nicht vernachlässigt werden, was bei einer alleinigen Betrachtung eines 60-minütigen Mittelwerts der Fall wäre. Die in Kapitel 4.2 aufgeführten Zählstellen wurden zur Untersuchung des Zusammenhangs von Verkehrsstärke und der Varianz der Stärke innerhalb eines Messintervalls ausgewertet. Ziel der Untersuchung ist es, einen allgemeinen Zusammenhang zwischen einer gegebenen stündlichen Auslastung (Verkehrsstärke/Kapazität) auf einer Autobahn und einer spezifischen relativen Standardabweichung der kürzeren 5-Minuten zu zeigen. Mit einem solchen Zusammenhang lassen sich mit einem einfachen Diagramm die Verkehrsstärkeschwankungen für stündliche Mittelwerte bestimmen, auch wenn keine zeitlich hoch aufgelösten Daten vorliegen.

5.1 Methodik

Die Zähldaten der Einzelfahrzeuge wurden für die Analyse der Verkehrsstärken in 5-Minutenintervalle aggregiert. Basierend hierauf ermittelt sich die stündliche Verkehrsstärke q_{60} als Mittelwert aus den zugehörigen 12 Verkehrsstärken q_5 der 5-Minutenintervalle. Für eine Strecke A ergibt sich zum Zeitpunkt t:

$$Q_{60,A,t} = \frac{1}{12} \sum_{i=-11}^0 q_{5,A,t+i \cdot 5 \text{ min}} \quad .$$

Jeder gemittelten stündlichen Verkehrsstärke $Q_{60,A,t}$ wird die zugehörige Verkehrsstärke im 5-Minutenintervall $q_{5,A,t}$ zum selben Zeitpunkt t gegenübergestellt, der das Intervall kennzeichnet. Um vergleichbare Werte auf Strassen unterschiedlicher Kapazität zu erhalten, werden nur die Verhältnisse r von Verkehrsstärke q zu Kapazität bzw. Leistungsfähigkeit C betrachtet:

$$r_{60,A,t} = \frac{Q_{60,A,t}}{C_A} \quad \text{bzw.} \quad r_{5,A,t} = \frac{q_{5,A,t}}{C_A} .$$

Die Kapazität wird hier als Basis- bzw. Normierungswert verstanden und so gewählt, dass sie der maximalen Kapazität nach der Methodik der Schweizer Norm SN 640 018a (VSS, 2006) entspricht. Die höchsten Verkehrsstärken treten bei geringem Schwerverkehrsanteil auf und sind daher im Fundamentaldiagramm auch ohne Kenntnis der Schwerverkehrsanteile einfach abzulesen. Im Folgenden wird diese Kapazität als C_{VSS} bezeichnet, die die Leistungsfähigkeit eines Abschnitts ohne Schwerverkehr repräsentiert.

Als nächstes werden die Verhältnisse bzw. Auslastungsgrade r_{60} gruppiert, so dass sich ca. n Gruppen (G) von Intervallen mit einer Bandbreite von $2/n = \Delta r$ in folgender Form ergeben:

$$G_i = \left\{ r_{60,A,t} \mid r_{60,A,t} \geq \frac{i-1}{n} \wedge r_{60,A,t} < \frac{i}{n} \right\} .$$

Die Gruppen G_i haben die Form der halb geschlossenen Intervalle:

G_1 : alle $r_{60,A,t}$, die im Bereich $[0; 1/n)$ liegen,

G_2 : alle $r_{60,A,t}$, die im Bereich $[1/n; 2/n)$ liegen,

...

G_n : alle $r_{60,A,t}$, die im Bereich $[n-1/n; 1)$ liegen,

G_{n+1} : alle $r_{60,A,t}$, die im Bereich $[1; n+1/n)$ liegen.

Es ist möglich, dass sich nicht genau n Gruppen ergeben, da auch Messungen möglich sind, die über den definierten Kapazitäten der Strassen liegen bzw. dass manche Gruppen nicht gebildet werden können, da nicht genügend Messwerte vorliegen.

Innerhalb einer Gruppe G_i ergibt sich der Mittelwert der Verhältnisse r_{60,G_i} mit der Anzahl der Elemente J_i dieser Gruppe zu:

$$r_{60,G_i} = \frac{1}{J_i} \sum_{j=1}^{J_i} r_{60,A,t} \quad \text{für } r_{60,A,t} \in G_i \quad \text{und} \quad J_i = \|G_i\| .$$

Mit den zu den stündlichen Verhältnissen (r_{60}) korrespondierenden Verhältnissen r_5 der 5-Minuten-Verkehrsstärken zur Kapazität errechnet sich die Standardabweichung innerhalb einer Gruppe zu:

$$sd(r_{5,G_i}) = \sqrt{\frac{J_i \sum_{j=1}^{J_i} r_{5,A,t}^2 - \left(\sum_{j=1}^{J_i} r_{5,A,t}\right)^2}{J_i(J_i - 1)}} \quad \text{für } r_{5,A,t} \in G_i \text{ und } J_i = \|G_i\| ;$$

hierbei ist mit guter Näherung $r_{5,G_i} = \frac{1}{J_i} \sum_{j=1}^{J_i} r_{5,A,t} \approx \frac{1}{J_i} \sum_{j=1}^{J_i} r_{60,A,t} = r_{60,G_i}$, da für grosse J_i $r_{5,G_i} = r_{60,G_i}$ gesetzt werden kann ($\lim_{J_i \rightarrow \infty} (r_{5,G_i}) = r_{60,G_i}$).

Es wird die Hypothese aufgestellt, dass die Verhältnisse der Verkehrsstärken zur Kapazität r_5 für einen aggregierten 60-minütigen Mittelwert r_{60} normalverteilt sind, d. h. für gegebene mittlere Auslastungsgrade (r_{60}) bzw. Bereiche $r_{60} \pm \Delta r$ verhalten sich die 5-Minuten-Werte r_5 , aus denen die Stundenwerte gebildet werden, normalverteilt. Im nächsten Schritt soll diese Hypothese überprüft werden.

In Tabelle 5 ist ersichtlich, dass das Vertrauensintervall der Mittelwerte der 5-minütigen Auslastungen (r_5) den Mittelwert der stündlichen Auslastung in allen Klassen umschliesst. Es wurden hierbei die 5-Minutenintervalle ausgewertet, die zu einer 60-minütigen Auslastung (r_{60}) mit den gegebenen Klassen in der ersten Spalte der Tabelle und einer Bandbreite bzw. Ungenauigkeit der Auslastungen von 2.5 % beigetragen haben. Für alle Klassen (auch nicht tabellierte) ergibt die t-Statistik einen nicht signifikanten Unterschied der r_5 - und r_{60} -Mittelwerte für ein 5%-Signifikanzniveau im Bereich der getesteten Werte von $r=0.0$ bis 1.1 mit Schrittgrösse $\Delta=0.025$.

Es werden hier exemplarisch die Ergebnisse für drei Bereiche der stündlichen Verhältnisse dargestellt. Es wird eine Bandbreite oder Ungenauigkeit der 60-minütigen Stundenmittelwerte von 2.5 % vorgegeben, so dass bei einer klassischen Kapazität von 4000 Fz/h die stündliche Verkehrsstärke auf 100 Fz/h genau vorgegeben sei:

- a) $r_{60} \pm \Delta r$ ($=Q_{60}/C_{VSS} \pm \Delta q/C_{VSS}$) für $r_{60}=30\%$ und $\Delta r=1.25\%$,
- b) $r_{60} \pm \Delta r$ für $r_{60}=50\%$ und $\Delta r=1.25\%$ und
- c) $r_{60} \pm \Delta r$ für $r_{60}=90\%$ und $\Delta r=1.25\%$.

Für die drei Beispiele (a, b, c) sind in Abbildung 15 die *Normal-Probability-Plots* (NPP: Normalverteilungs-Wahrscheinlichkeits-Plot) und die empirische Wahrscheinlichkeitsfunktion mit theoretischer Normalverteilung dargestellt. Ein Verlauf entlang der gestrichelten Linie entspräche einer idealen Normalverteilung der Punkte mit $r_5 \sim \mathcal{N}(\text{mean}(r_5), \text{std}(r_5))$. Es ist aus den Grafiken ersichtlich, dass der grösste Teil der Messwerte (von einigen Ausreissern abge-

sehen) sich sehr gut mit der Normalverteilung annähern lässt. Statistische Tests (Kolmogorov-Smirnov) können jedoch die Normalverteilung nicht mit einem Signifikanzniveau von 5 % bestätigen, wenn alle Datenpunkte (teilweise ca. 2 Mio.) als Testbasis genommen werden. Zurückführen lässt sich diese Eigenschaft auf einerseits evtl. ungenaue Abschätzungen der aus dem Fundamentaldiagramm abgeleiteten Kapazität (nach SN 640 018a, VSS, 2006), die in die Auslastungswerte r_{60} ($r_{60}=Q_{60}/C_{VSS}$) eingeht und die Begebenheit, dass sich auch bei sehr grossem Stichprobenumfang eine Treppenfunktion der Wahrscheinlichkeiten bildet, im Gegensatz zur kontinuierlichen Normalverteilungsfunktion, da die Fahrzeugzählungen ganzzahlige Werte der Verkehrsstärke liefern.

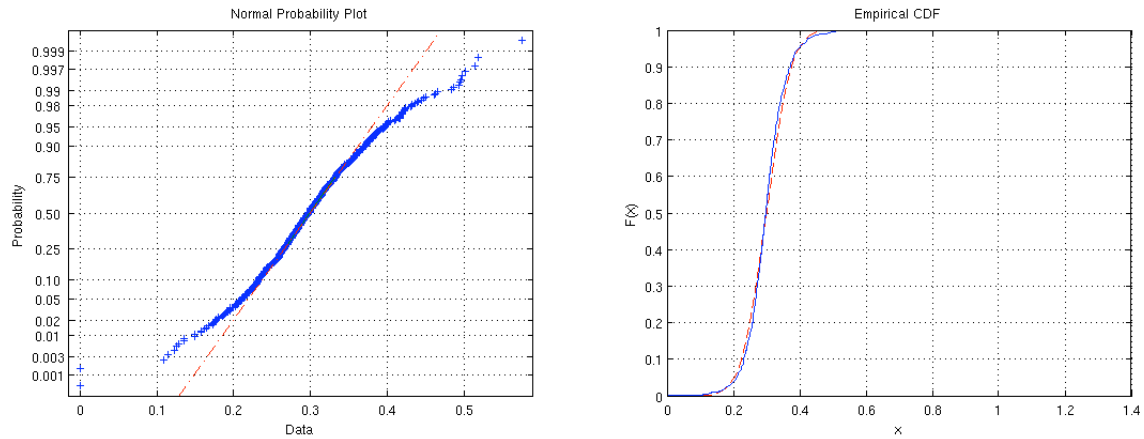
Tabelle 5 Verteilung der Mittelwerte der 5-minütigen Auslastungen r_5 für gegebenen 60-minütige Auslastungen r_{60} (Auszug, nur Vielfache von 10 % dargestellt)

Auslastung Q_{60}/C_{VSS}^* r_{60}	Mittelwert aller r_{60} - Messungen	95%-Vertrauensintervall des Mittelwertes der r_5 -Messungen (untere und obere Grenze)	
0.1	0.099	0.099	0.100
0.2	0.200	0.200	0.200
0.3 (Beispiel a)	0.300	0.300	0.300
0.4	0.400	0.400	0.401
0.5 (Beispiel b)	0.500	0.500	0.500
0.6	0.600	0.600	0.600
0.7	0.700	0.700	0.700
0.8	0.800	0.799	0.800
0.9 (Beispiel c)	0.899	0.899	0.900
1.0	0.998	0.997	0.999
1.1	1.097	1.050	1.145

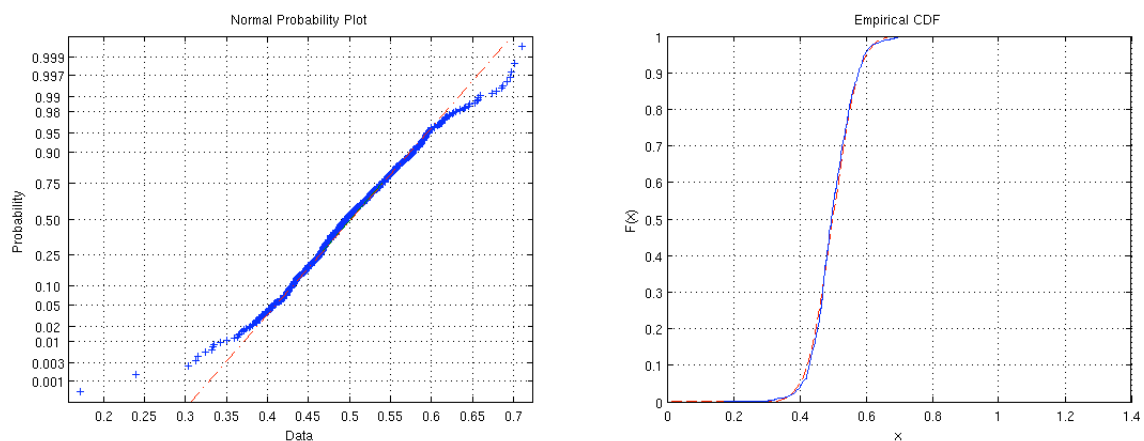
*) C_{VSS} ist die Leistungsfähigkeit bzw. Kapazität des Abschnitts ohne Schwerverkehr nach SN 640 018a (VSS, 2006)

Die aufgestellte Hypothese, dass die Verhältnisse der Verkehrsstärke zur Kapazität in den 5-Minutenintervallen r_5 innerhalb enger Bereiche der zugehörigen 60-minütigen Verhältnissen r_{60} normalverteilt wird, kann somit näherungsweise angenommen werden.

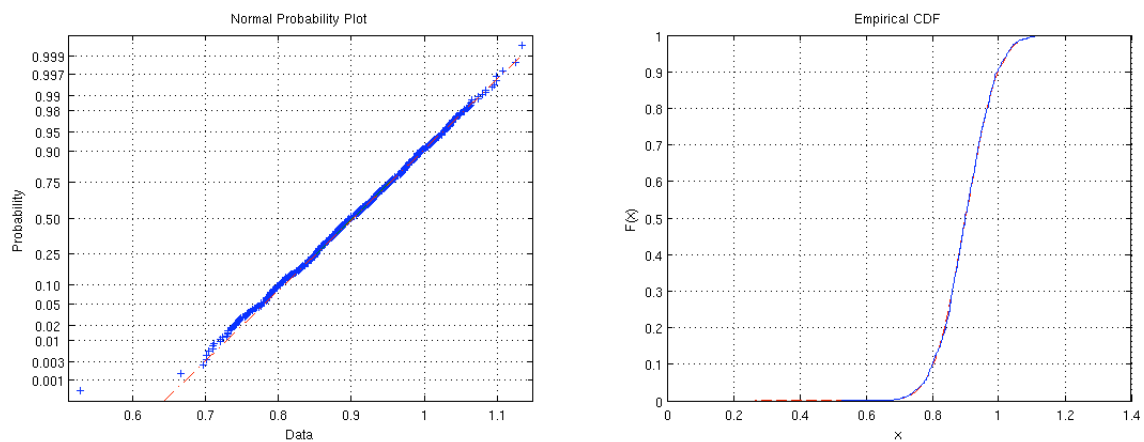
Abbildung 15 Normalverteilte 5-Minuten-Verkehrsstärken bei gegebenen stündlichen Mittelwerten (r_{60}): NP-Plot (links) und Wahrscheinlichkeitsfunktion (rechts)



a) $r_{60} \pm \Delta r$ ($=q_{60}/C \pm \Delta q/C$) für $r_{60}=30\%$ und $\Delta r=1.25\%$



b) $r_{60} \pm \Delta r$ für $r_{60}=50\%$ und $\Delta r=1.25\%$



c) $r_{60} \pm \Delta r$ für $r_{60}=90\%$ und $\Delta r=1.25\%$

Gestrichelte Linie: ideale Normalverteilung; *Punkte bzw. Linie:* gemessene Stichprobe
Datenpunkte: Zufallsstichprobe von 1000 Messwerten je Klasse

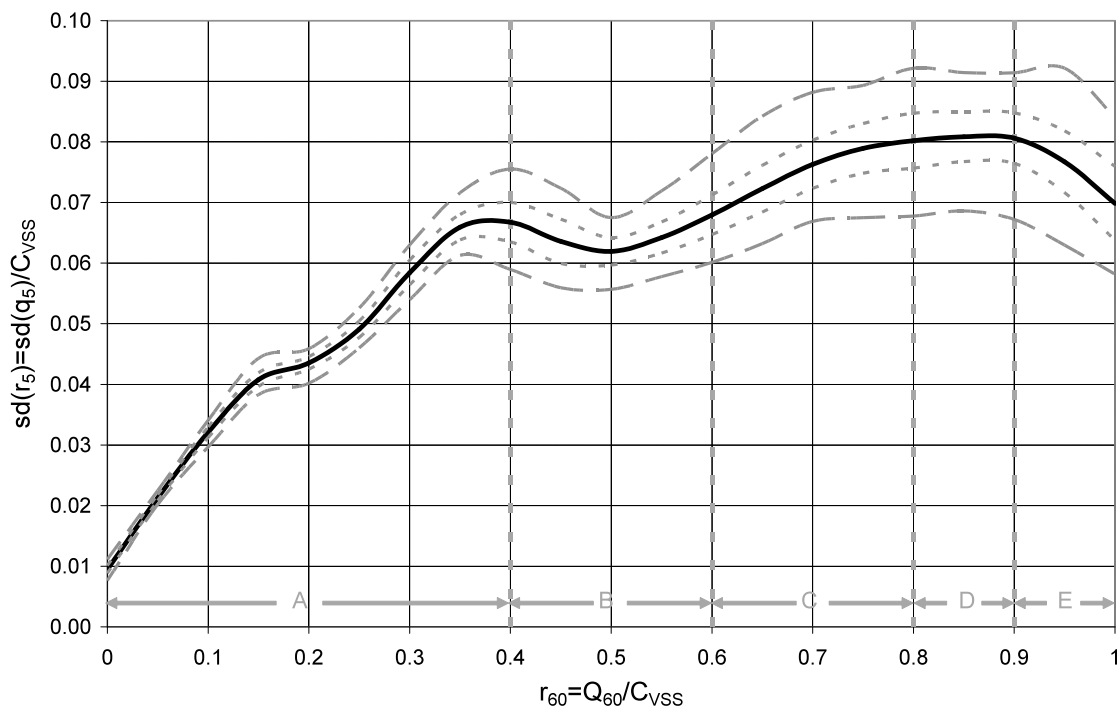
Die Grafiken der *NP-Plots* in Abbildung 15 (a bis c) zeigen, dass sich die Verteilungen der 5-Minutenintervalle r_5 innerhalb des 60-minütigen Mittels r_{60} bei höheren Auslastungsgraden besser der Normalverteilung annähern als bei niedrigeren. Bei geringeren Auslastungsgraden von z. B. 30 %, wie in Abbildung 15 a) gezeigt, treten Phasen mit Fahrzeugkolonnen und Phasen mit geringen Verkehrsstärken vermehrt auf, so dass sich im Bereich der Schwänze im *NP-Plot* höhere Anteile von hohen und tiefen Verkehrsstärken ausmachen lassen, als es bei einer idealen Normalverteilung der Fall wäre. Die für die Bemessung hauptsächlich relevanten Verteilungen höherer Auslastungsgrade lassen sich jedoch mit guter Näherung mit der Normalverteilung beschreiben. Geringe Auslastungsgrade liefern einen geringen Beitrag zu den generalisierten Reisezeitkosten und erzeugen sehr geringe Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten, so dass die gezeigten kleinen Abweichungen vernachlässigbar sind.

In Abbildung 16 bzw. Tabelle 6 sind die relativen Standardabweichungen der 5-Minutenintervalle der Auslastung $r_5 = q_5 / C_{VSS}$ gegenüber den mittleren stündlichen Auslastungsgraden ($r_{60} = Q_{60} / C_{VSS}$) dargestellt. Die Kapazität C_{VSS} bezieht sich auf die Kapazität nach VSS (2006), genauso wie die dargestellten Qualitätsstufen der Verkehrsabläufe A bis E. Der Bezug auf die Kapazität ermöglicht Verkehrswege mit unterschiedlichen Leistungsfähigkeiten miteinander zu vergleichen. Der qualitative Verlauf der Kurve bleibt zudem auch bei einer modifizierten Definition der Kapazität mit anderen Kennwerten erhalten (vergleiche SN 640 018, VSS, 1999 mit SN 640 018a, VSS, 2006). Die Klassen wurden abweichend von Kapitel 5.1 mit einer Bandbreite von 5 % ermittelt. Die breitere Klasseneinteilung erlaubte die Überprüfung, ob eine gesonderte Behandlung der Schwerverkehrsklassen einen Einfluss auf den Verlauf hat. Es hat sich gezeigt, dass bei niedrigen Auslastungsgraden bis ca. 40 % die Standardabweichung für Schwerverkehrsanteile über 15 % grösser ist als für die zwei Klassen mit geringeren Schwerverkehrsanteilen (0 - 5 % und 5 - 15 %). Ab einem Auslastungsgrad von etwa der halben Kapazität verlaufen die Kurven aller drei Schwerverkehrsklassen eng beieinander, so dass mit einer mittleren Kurve gerechnet werden kann, da bei geringen Auslastungsgraden die Reservekapazität gross genug ist, dass grössere Standardabweichungen in diesem Bereich keinen Einfluss auf die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit hat (vgl. Kapitel 6.3 bis 6.6).

Es zeigt sich, dass innerhalb der Verkehrsqualitätsstufe A bei steigender mittlerer Auslastung r_{60} die Standardabweichung der 5-minütigen Auslastungen r_5 steigt. Der Verlauf innerhalb der Qualitätsstufe B ist in Abbildung 16 volatil, kann aber für diesen Bereich vereinfacht als konstant angesehen werden. Im Bereich des Auslastungsgrades zwischen 60 % und 80 % (C) ergibt sich eine etwa lineare Steigung, wobei in der Stufe D der Maximalwert erreicht wird, aber insgesamt ein relativ konstanter Verlauf zu sehen ist. Ein eindeutiger Abfall ist bei Stufe

E auszumachen, der mit einer Homogenisierung des Verkehrsflusses durch hohe Verkehrsdichten begründet werden kann.

Abbildung 16 Standardabweichung der 5-minütigen Auslastungsgrade $r_5 = q_5 / C_{VSS}$ gegenüber der mittleren stündlichen Auslastung $r_{60} = Q_{60} / C_{VSS}$.



95%-Schwankungsintervall der Verläufe der 13 Messstellen: grau gestrichelt

95%-Konfidenzintervall der Mittelwerte: grau gepunktet

Kapazität C_{VSS} und Verkehrsqualitätsstufen nach VSS (2006)

Zur Überprüfung der Genauigkeit der bestimmten mittleren Standardabweichung der 5-minütigen Auslastungsgrade wurde für alle Punkte das 95%-Vertrauensintervall der mittleren Standardabweichungen der 13 Zählstellen für eine Normalverteilung mit dem t-Test berechnet. Das Vertrauensintervall für die korrekte Schätzung der mittleren Standardabweichungen hat eine maximale Bandbreite von nur 6 % bei einer Auslastung von eins.

Der Zusammenhang zwischen Verkehrsstärke und der Varianz bezogen auf kürzere Messintervalle liefert wichtige Hinweise für das Verkehrsgeschehen. Prognostizierte oder gemittelte Verkehrsstärken auf Stundenbasis vernachlässigen Extremwerte. Hier können vor allem Spitzenbelastungen innerhalb einer Stunde, die nur für wenige Minuten herrschen, den Fluss so beeinflussen, dass sich stockender Verkehr bildet. Der Verkehrsfluss kann somit nicht als stationär und die Dichte nicht als homogen angesehen werden. Wird angenommen, dass der Ver-

Verkehrsfluss vom fließenden in den stockenden Zustand übergeht, wenn die Verkehrsstärke die Kapazität übersteigt, so können folglich auch bei relativ geringen Verkehrsstärken im stündlichen Mittel Verkehrszusammenbrüche stattfinden.

Tabelle 6 Standardabweichung der 5-minütigen Auslastungsgrade $r_5 = q_5 / C_{VSS}$ gegenüber der mittleren stündlichen Auslastung $r_{60} = Q_{60} / C_{VSS}$.

Auslastung (Q_{60} / C_{VSS})* r_{60}	Standard- abweichung $sd(r_5)$ in 1/100	95%-Konfidenzintervall der Standardabweichung $sd(r_5)$ in 1/100 (untere, obere Grenze)		95%-Schwankungsintervall aller Messstellen in 1/100 (untere, obere Grenze)	
0.00	0.947	0.884	1.010	0.763	1.109
0.05	2.131	2.081	2.180	2.020	2.248
0.10	3.210	3.121	3.299	2.966	3.407
0.15	4.078	3.966	4.190	3.830	4.427
0.20	4.353	4.250	4.457	4.017	4.587
0.25	4.909	4.774	5.044	4.601	5.258
0.30	5.843	5.638	6.048	5.396	6.301
0.35	6.593	6.383	6.803	6.129	7.160
0.40	6.675	6.349	7.002	5.894	7.552
0.45	6.359	5.994	6.724	5.594	7.234
0.50	6.195	5.970	6.420	5.568	6.751
0.55	6.422	6.163	6.680	5.778	7.190
0.60	6.797	6.469	7.125	6.011	7.806
0.65	7.228	6.843	7.613	6.321	8.423
0.70	7.630	7.233	8.026	6.690	8.819
0.75	7.892	7.482	8.303	6.751	8.931
0.80	8.020	7.567	8.472	6.775	9.214
0.85	8.086	7.674	8.498	6.860	9.142
0.90	8.062	7.645	8.479	6.720	9.142
0.95	7.673	7.162	8.184	6.296	9.214
1.00	6.983	6.375	7.592	5.818	8.404

*) C_{VSS} ist die Leistungsfähigkeit bzw. Kapazität des Abschnitts ohne Schwerverkehr nach SN 640 018a (VSS, 2006)

Für die Anwendung können die Standardabweichungen in Tabelle 6 interpoliert und für Verkehrsstärke über der Kapazität ($r_{60} > 1$) auch extrapoliert werden. Da sich diese Funktionalität in einigen Tabellenkalkulationen nur umständlich implementieren lässt, kann vereinfachend auch folgende Funktion verwendet werden, die jedoch nicht zu bevorzugen ist, da sie die Auslastungsgrade bis etwa 45 % ausserhalb des Konfidenzintervalls abbildet:

$$sd(r_5) = -0.5166 \cdot r_{60}^4 + 1.0046 \cdot r_{60}^3 - 0.6864 \cdot r_{60}^2 + 0.2561 \cdot r_{60} + 0.0125$$

Für die praktische Anwendung sollte der ungenaue Verlauf der Funktion bei Auslastungsgraden bis 45 % keinen Einfluss haben, da die Reservekapazität in diesem Bereich hoch bzw. die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit sehr nahe bei null ist (siehe hierzu Kapitel 6). Der R^2 -Wert als Gütemass der Funktion für alle Beobachtungen beträgt 95%, betrachtet man jedoch den wichtigen Bereich mit Auslastungsgraden ab 50% (Bereich zwischen [50%; 100%]), so ergibt sich ein guter Wert für das Gütemass von $R^2 = 99\%$.

6 Integriertes Bemessungskonzept

6.1 Einleitung

Bestehende Bemessungskonzepte beziehen sich vielfach auf Mittelwerte der Verkehrsnachfrage in verschiedenen Zeitaufösungen. Durch den ständig wachsenden Einsatz von Dauerzählstellen können die betrachteten Zeitfenster nahezu beliebig klein gewählt werden. Grosse Zeitfenster bieten den Vorteil, dass bei der Annahme homogenen Verkehrs auch grosse räumliche Ausdehnungen betrachtet werden können. Schwierig gestaltet sich jedoch die Wahl der Bemessungsverkehrsstärke. Kurzzeitige Verkehrsspitzen werden vernachlässigt, wenn ein homogener Verkehrsfluss nicht gegeben ist. Durch die Wahl kürzerer Bemessungsintervalle lassen sich Heterogenitäten besser ausgleichen. Exakt wird der Verkehrsfluss nur bei Betrachtung jedes einzelnen Fahrzeuges wiedergegeben. Eine Mikrosimulation auf dieser Ebene ist mit verfügbaren Programmen derzeit schon möglich, jedoch ist die Erzeugung von realistischen Nachfragen auf Personenebene in der Praxis noch nicht weit verbreitet. Momentan werden Nachfragematrizen in der Praxis höchstens auf Stundenbasis genau ermittelt, wobei der durchschnittliche Tag häufig als Bemessungsgrundlage dienen muss.

Alternativ zur Beschreibung von heterogenem Verkehr durch Einteilung in kleinere quasi-homogene Intervalle kann der Fluss auch durch die Momente, Mittelwert und Varianz innerhalb eines Intervalls beschrieben werden. Hierbei wird der Verkehrsfluss als Zufallsgrösse angesehen, die einer Verteilungsfunktion folgt. Im Bemessungsprozess kann der Verkehrsfluss so weiterhin makroskopisch betrachtet werden und Verletzungen der Homogenität werden durch die Varianz (allgemein Momente höherer Ordnung) abgebildet.

Ziel des Bemessungskonzepts ist eine Vereinheitlichung der bestehenden Konzepte für verschiedene Infrastrukturelemente. Das für Hochleistungs- und Hauptverkehrsstrassen verwendete Konzept einer Bemessungsstunde – bekannt als 30. stärkste stündliche Verkehrsstärke eines Jahres, wobei diese auch auf die 100. oder 200. Stunde (im HBS, 2001) erweitert werden kann – unterscheidet sich sehr stark von den Bemessungskonzepten für Knotenpunkte. Das hier vorgestellte Konzept vereinheitlicht die Methodiken, indem sich Aussagen über entstehenden (Stau-)Kosten und die Qualität des Verkehrsablaufs machen lassen. Zudem lassen sich theoretische Staulängen analog zu Lichtsignalkreuzungen berechnen, um vergleichbare Grössen zu erhalten.

6.2 Definitionen

Hier werden zur Beschreibung des Verkehrsflusses der Mittelwert in einem Zeitintervall (i.d.R. eine Stunde) und die Varianz der Verkehrsstärke verwendet. Es wird dabei berücksichtigt, dass sich bei verschiedenen Auslastungsgraden (Verhältnisse von Verkehrsstärke zu Kapazität) der Strassen unterschiedliche Varianzen der Verkehrsstärke ergeben (siehe Kapitel 5).

Analog zur Verkehrsstärke soll im Folgenden auch die Kapazität einer Strasse als Zufallsgrösse angenommen werden. Hierbei ist zwischen der Kapazität der Schweizer Norm (VSS, 2006: SN 640 018a) und der Kapazität als Zufallsgrösse zu unterscheiden. In der Schweizer Norm wird die Kapazität durch einen (maximalen) Wert gekennzeichnet, der wiederholt beobachtet werden kann. Die hier vorgestellte Kapazität als Zufallsgrösse folgt einer Verteilung.

- Definition der Kapazität als Zufallsgrösse:
Die momentane Kapazität einer Strasse unter den gegebenen Verkehrsbedingungen ist erreicht, wenn bei der momentanen Verkehrsstärke ein Verkehrszusammenbruch erfolgt.
- Definition des Verkehrszusammenbruchs:
Ein Verkehrszusammenbruch ist der Übergang vom fliessenden Verkehr zum stockenden Verkehr oder vom oberen Bereich des Geschwindigkeit-über-Verkehrsstärke-Diagramms zum unteren Bereich.

Durch diese unterschiedlichen Definitionen der Kapazität ergeben sich verschiedene Grössenordnungen wenn die VSS-Kapazität mit dem Mittelwert der Kapazität als Zufallsgrösse verglichen wird. Es lässt sich jedoch aus der Zufallsgrössenkapazität die VSS-Kapazität abschätzen. Umgekehrt können Mittelwert und Standardabweichung (bzw. Varianz) der Zufallsgrössenkapazität nur vereinfacht aus der bisherigen Kapazität ermittelt werden.

6.3 Herleitung

Die Kapazität als Zufallsgrösse soll im Folgenden mit C bezeichnet werden mit der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_C(x)$. Analog wird die Verkehrsstärke als Zufallsvariable mit Q und deren Dichtefunktion $f_Q(x)$ genannt. Die Verkehrsstärke Q ist hierbei als eine Verkehrsstärke während eines Verkehrszustandes zu verstehen, also beispielsweise einer geschätzten stündlichen Verkehrsstärke. Bei einem Zusammenbruch (siehe Definition Kapitel 6.2) ist die aktuelle Kapazität kleiner oder gleich der aktuellen realisierten Verkehrsstärke q (q sei eine

Realisierung von Q). Die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit P_b , dass C kleiner als q ist, lässt sich mit der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f_C(x)$ wie folgt schreiben:

$$P_b = \int_0^C f_C(x) dx .$$

Es sei angemerkt, dass die Integration bei minus unendlich beginnt, auch wenn in der Praxis keine negativen Kapazitäten vorkommen können. Es soll an dieser Stelle jedoch noch keine Annahme über die Form der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion getroffen werden.

Da die aktuelle Verkehrsstärke im Bemessungsfall nicht bekannt ist, jedoch die Verteilung der Verkehrsstärke Q (siehe Kapitel 5), lässt sich die Wahrscheinlichkeit, dass Q grösser als C ist auch so ausdrücken:

$$P_b = \int_C^\infty f_Q(x) dx .$$

Für allgemeine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen $f_C(x)$ und $f_Q(x)$ kann das Faltungsintegral nicht analytisch gelöst werden. Wird die Normalverteilung angenommen, liegt eine einfache analytische Lösung vor.

Wenn die Reservekapazität R als:

$$R = C - Q$$

definiert ist, ergibt sich die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit P_b zu:

$$P_b = P(C - Q \leq 0) = P(R \leq 0) .$$

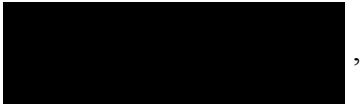
Wird zudem noch angenommen, dass die beiden Variablen C und Q unabhängig voneinander sind, ergibt sich der Fundamentalfall der Theorie der strukturellen Zuverlässigkeit (Gulvanessian *et al.*, 2002). Es ergibt sich für Verteilung der Reservekapazität R wiederum eine Normalverteilung, wobei der Mittelwert μ_R und die Standardabweichung σ_R wie folgt berechnet werden können:

$$\mu_R = \mu_C - \mu_Q \quad \text{and} \quad \sigma_R = \sqrt{\sigma_C^2 + \sigma_Q^2} \quad (\text{wenn } C \text{ und } Q \text{ statistisch unabhängig}).$$

Mit der kumulativen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Normalverteilung $\Phi=N(0, 1)$:



kann P_b wie folgt geschrieben werden:



mit dem Variationskoeffizient β :

$$\beta = \mu_R / \sigma_R .$$

6.4 Ermittlung der Kapazität als Zufallsgrösse

Da die Kapazität hier als Zufallsgrösse bestimmt wird und sich über Verkehrszusammenbrüche infolge hoher Verkehrsstärken definiert, sind für die Bestimmung Messungen über einen längeren Zeitraum nötig, um genügend Verkehrszusammenbrüche zu beobachten. So ist auch sichergestellt, dass auch zu nahezu allen Verkehrsbedingungen bezüglich des Schwerverkehranteils oder bezüglich der Wetter und Umgebungsbedingungen gemessen wird. Ziel der hier vorgestellten Kapazitätsanalyse ist es im Gegensatz zur VSS-Kapazität nicht einen Maximalwert zu finden, der in aller Regel bei guten Wetterbedingungen erreicht wird, sondern eine realistische Verteilung unter den üblichen Bedingungen. Wenn genügend Zählraten vorliegen ist eine bedingte Auswertung nach Schwerverkehrs- und Steigungsklassen, Licht- und Wetterverhältnissen oder Besonderheiten der Strassenführung möglich und wünschenswert. Die Analysen wurden hier auf eine Einteilung nach den Schwerverkehrsklassen der SN 640 018a (VSS, 2006) beschränkt.

Als ersten Schritt für die Bestimmung der Kapazität werden die Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten einer Zählstelle infolge der gemessenen Verkehrsstärken ermittelt.

Mit den Formulierungen aus Kapitel 6.3 lassen sich Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten des Verkehrsflusses bei gegebenen Verteilungen der Verkehrsstärke und der Kapazität ermit-

teln. Im Folgenden wird die Kapazität als Zufallsgrösse der einzelnen Zählstationen geschätzt. Als Eingangsdaten dienen die beobachteten Zusammenbruchshäufigkeiten nach Verkehrsstärkekassen. Für die Klassenbildung wird die gemessene stündliche Verkehrsstärke auf vielfache von 5%-Auslastungsgraden, so dass sich Klassen von 5, 10, 15, ... Prozent der Kapazität nach VSS (2006) ergeben, wobei die grösste Klasse dem maximalen beobachteten Auslastungsgrad entspricht, bei der mindestens ein Zusammenbruch gemessen wurde. Es wurden auch kleinere Klassengrössen mit Verkehrsstärkeschritten von 100 Fz/h getestet. Es hat sich jedoch gezeigt, dass bei zusätzlicher Gruppierung nach Schwerverkehrsstärken die beobachtete Menge an Zusammenbrüchen in einer Klasse zu gering wurden bzw. die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit keine steigende Tendenz über den Auslastungsgrad zeigte, so dass keine verlässlichen Kapazitätsschätzungen mit feineren Klasseneinteilungen durchgeführt werden konnten.

Da Rückstaus nicht beispielsweise anhand von direkt aufeinander folgenden Zählstellen ohne dazwischen liegende Auf- oder Abfahrten identifiziert werden konnten, wurden nur Verkehrsstärken ausgewertet, die mindestens einem Viertel der VSS-Kapazität entsprachen. Dabei wurden Zusammenbrüche bei geringen Verkehrsstärken, für deren Ursache ein Rückstau wahrscheinlich ist, herausgefiltert.

Ein Zusammenbruch liegt vor, wenn die mittlere Geschwindigkeit eines 5-Minutenintervalls grösser oder gleich der kritischen Grenzggeschwindigkeit ist (siehe Tabelle 4) und im folgenden 5-Minutenintervall unter diese Geschwindigkeit fällt; gleichzeitig muss auch die Verkehrsstärke des folgenden Intervalls zurückgehen, so dass ein *capacity drop* vorliegt. Diese Bedingungskombination identifiziert Verkehrszusammenbrüche und stellt unter den getesteten Identifikationsbedingungen den besten Kompromiss zwischen Genauigkeit und einfacher Handhabung auch grosser Datenmengen dar, da bei geringer werdender Verkehrsstärke die Geschwindigkeit nicht fallen sollte – speziell nicht unter den kritischen Wert, der den oberen Teil des Geschwindigkeit über Verkehrsstärke Diagramms (QV-Diagramm) vom unteren stockenden bzw. gestauten Teil trennt.

Für jede Verkehrsstärkekasse der 60-minütigen Mittelwerte der Verkehrsstärke μ_Q wird die gemessene Zusammenbruchswahrscheinlichkeit $P_m(\mu_Q)$ aus der Anzahl der Zusammenbrüche geteilt durch die Anzahl der Intervalle in dieser Klasse ermittelt. Die Standardabweichung der Verkehrsstärke $\sigma_Q(\mu_Q)$ wird mit Hilfe des Diagramms in Abbildung 16 ermittelt. Die analytische Zusammenbruchswahrscheinlichkeit sei P_a (siehe 6.3) und hängt von μ_R und σ_R ab, die sich aus den Parametern μ_Q , σ_Q , μ_C und σ_C ermitteln lassen. Da μ_Q und σ_Q bekannt sind und

als Eingangsparameter dienen lässt sich folgende Gleichung mit den Unbekannten μ_C und σ_C aufstellen:

$$P_m(\mu_Q) \approx P_a(\mu_Q) = \text{[redacted]} .$$

Hierbei entspricht der Index Q einer Verkehrsstärkenklasse, so dass sich ein Gleichungssystem ergibt. Die Parameter μ_C und σ_C werden über die Minimierung der Summe der quadratischen Residuen (Residuen $r_Q = P_m(\mu_Q) - P_a(\mu_Q)$) mit einer nichtlinearen kleinste Quadrate Methode geschätzt. Da sehr grosse Verkehrsstärken selten auftreten und daher die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit nicht mit so hoher Genauigkeit geschätzt werden kann, wird eine gewichtete Gleichung eingeführt, die die Anzahl 5-Minutenintervalle in den Klassen berücksichtigt. Die Gewichtung geht mit der Quadratwurzel der Anzahl der Messungen in die Gleichung ein, so dass sich die Residuen r_Q der einzelnen Klassen wie folgt schreiben lassen:

$$\text{[redacted]} ,$$

wobei $N_Q = ||Q||$ die Anzahl der Intervalle in der Klasse Q entspricht. Im Folgenden sind der Mittelwert der Kapazität der Strasse μ_C und die Standardabweichung σ_C so zu finden, dass die Summe Residuenquadrate minimiert wird:

$$\sum_{(Q)} r_Q^2 \rightarrow MIN .$$

6.5 Ergebnisse der Kapazitätsermittlung

Zur Bestimmung der Kapazitäten wurden die Zählstellen aus Tabelle 3 bzw. Tabelle 4 verwendet. Das allgemeine Vorgehen aus Kapitel 6.4 wurde durch eine Klassifizierung der Schwerverkehrsanteile erweitert. Dafür wurden die Beobachtungen nach den Schwerverkehrsklassen (nach SN 640 018a, VSS, 2006) mit 0 bis 5 % Schwerverkehrsanteil, 5 bis 15 % und 15 bis 25 % Anteil separat untersucht, so dass für jede Zählstelle die gemessenen Zu-

sammenbrüche für die Bestimmung der Kapazitäten nach Schwerverkehrsanteil zugeordnet werden.

Um eine Konsistenz mit den bestehenden Normen zu gewährleisten, wird auch hier angenommen, dass der Schwerverkehrsanteil die Kapazität beeinflusst. Die hier vorgestellte Methodik lässt es zu, den Schwerverkehrsanteil durch eine gesonderte Verteilung des Verkehrsflusses (Q) zu beschreiben. Auf diese Weise könnte die Kapazität unabhängig vom Schwerverkehrsanteil beschrieben werden, wobei die jeweilige Beanspruchung der Strasse zu höheren Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten führt.

Die einfache Handhabung der bestehenden Normen (z. B. SN 640 018a, VSS, 2006) legt jedoch nahe, vorerst an dem Konzept der Kapazitäten abhängig vom Schwerverkehrsanteil festzuhalten, da sich so die effektiven Kapazitäten nach VSS (2006) leicht ermitteln lassen.

Bei der Einteilung nach Schwerverkehrsklassen tritt bei wenigen Zählstellen das Problem auf, dass manche Verkehrszusammensetzungen nur selten auftreten oder nur bei bestimmten (niedrigen) Verkehrsstärken, so dass nur wenige Zusammenbrüche gemessen werden konnten und die Berechnungen auf dieser Basis nicht verlässlich sind. Die genutzten Zählstationen für die einzelnen Schwerverkehrsklassen sind in Tabelle 7 aufgelistet. In der darauf folgenden Tabelle 8 sind die absoluten und relativen Werte der Erwartungswerte der Kapazitäten und der Standardabweichungen der Kapazitäten als Zufallsvariable für einen Schwerverkehrsanteil von 0 - 5 % dargestellt, in Tabelle 9 analog für einen Anteil von 5 - 15 % und in Tabelle 10 für einen Anteil von 15 - 25 %. Das in Tabelle 8 bis Tabelle 10 angegebene Bestimmtheitsmass R^2 ist über die Wurzel der Beobachtungen einer Klasse (Q) gewichtet und bestimmt sich über:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}, \text{ mit}$$

$$SSE = \sum_{(Q)} \sqrt{N_Q} (P_m(\mu_Q) - P_a(\mu_Q))^2 \text{ und } SST = \sum_{(Q)} \sqrt{N_Q} (P_m(\mu_Q) - \overline{P_m(\mu_Q)})^2,$$

wobei $\overline{P_m(\mu_Q)}$ der Mittelwert aller gemessenen Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten ist.

Tabelle 7 Datengrundlage für die Ermittlung der Kapazitäten als Zufallsgrösse, getrennt nach Schwerverkehrsklassen

Zählstelle	Nr.	Ri.	Schwerverkehrs- anteil 0 - 5 %	Schwerverkehrs- anteil 5 - 15 %	Schwerverkehrs- anteil 15 - 25 %
Mattstetten	23	0	OK	OK	OK
Mattstetten	23	1	OK	OK	OK
Deitingen	32	0	OK	OK	OK
Deitingen	32	1	OK	OK	OK
Eptingen N	33	0	OK	OK	OK
Umfahr. Bern Ost	42	0	OK	OK	wenig Messungen
Gunzgen	60	0	OK	OK	OK
Gunzgen	60	1	OK	OK	OK
Muttenz, Hard	81	1	OK	OK	OK
Kirchberg N	182	0	OK	OK	wenig Messungen
Kirchberg N	182	1	OK	OK	OK
Birrhard, Birrfeld	208	1	OK	OK	wenig Messungen
Egerkingen, Verzw.	225	0	OK	OK	OK

Anmerkung: Wenn zu wenig Beobachtungen und wenig Zusammenbrüche ermittelt wurden, konnte der angewendete Algorithmus keine sinnvollen Kapazitäten ermitteln.

Tabelle 8 Ermittelte Kapazitäten als Zufallsvariable
Schwerverkehrsanteil: 0 - 5 %

Zählstelle	Nr.	Ri.	C _{VSS} Kapa- zität	R ² in %	E(C) Erwar- tungswert der Kapa- zität	std(C) Standard- abwei- chung der Ka- pazität	E(C)/C _{VSS} relativer Erwar- tungswert der Kapa- zität	std(C)/C _{VSS} relative Standard- abweichung der Kapazi- tät
Mattstetten	23	0	4000	98.0	5179	796	1.29	0.20
Mattstetten	23	1	4000	98.1	5322	816	1.33	0.20
Deitingen	32	0	3800	97.8	4774	583	1.26	0.15
Deitingen	32	1	3800	86.0	6836	1350	1.80	0.36
Eptingen N	33	0	2800	97.8	4232	792	1.51	0.28
Umfahr. Bern Ost	42	0	4000	96.1	5150	666	1.29	0.17
Gunzgen	60	0	3800	95.0	3808	~0	1.00	~0
Gunzgen	60	1	3800	92.9	6483	1300	1.71	0.34
Muttenz, Hard	81	1	6000	98.3	8282	1543	1.38	0.26
Kirchberg N	182	0	3200	93.7	4506	604	1.41	0.19
Kirchberg N	182	1	3600	94.8	4081	440	1.13	0.12
Birrhard, Birrfeld	208	1	3600	96.3	4130	~0	1.15	~0
Egerkingen, Verz.	225	0	3200	87.8	4662	1006	1.46	0.31

Tabelle 9 Ermittelte Kapazitäten als Zufallsvariable
Schwerverkehrsanteil: 5 - 15 %

Zählstelle	Nr.	Ri.	C_{VSS} Kapa- zität	R^2 in %	$E(C)$ Erwar- tungswert der Kapa- zität	$std(C)$ Standard- abwei- chung der Ka- pazität	$E(C)/C_{VSS}$ relativer Erwar- tungswert der Kapa- zität	$std(C)/C_{VSS}$ relative Standard- abweichung der Kapazi- tät
Mattstetten	23	0	4000	96.2	4669	464	1.17	0.12
Mattstetten	23	1	4000	92.9	5901	920	1.48	0.23
Deitingen	32	0	3800	96.9	4868	624	1.28	0.16
Deitingen	32	1	3800	100	4708	232	1.24	0.06
Eptingen N	33	0	2800	89.1	4167	668	1.49	0.24
Umfahr. Bern Ost	42	0	4000	97.0	4791	557	1.20	0.14
Gunzgen	60	0	3800	96.0	5180	781	1.36	0.21
Gunzgen	60	1	3800	97.3	5048	686	1.33	0.18
Muttenz, Hard	81	1	6000	72.6	8860	1798	1.48	0.30
Kirchberg N	182	0	3200	92.2	3689	~0	1.15	~0
Kirchberg N	182	1	3600	92.3	4195	423	1.17	0.12
Birrhard, Birrfeld	208	1	3600	81.6	6296	1118	1.75	0.31
Egerkingen, Verz.	225	0	3200	95.9	4123	745	1.29	0.23

Anmerkung: Wenn zu wenig Beobachtungen und wenig Zusammenbrüche ermittelt wurden, konnte der angewendete Algorithmus keine sinnvollen Kapazitäten ermitteln (siehe Tabelle 7).

Tabelle 10 Ermittelte Kapazitäten als Zufallsvariable
Schwerverkehrsanteil: 15 - 25 %

Zählstelle	Nr.	Ri.	C _{VSS} Kapa- zität	R ² in %	E(C) Erwar- tungswert der Kapa- zität	std(C) Standard- abwei- chung der Ka- pazität	E(C)/C _{VSS} relativer Erwar- tungswert der Kapa- zität	std(C)/C _{VSS} relative Standard- abweichung der Kapazi- tät
Mattstetten	23	0	4000	99.3	4457	640	1.11	0.16
Mattstetten	23	1	4000	94.6	6116	1137	1.53	0.28
Deitingen	32	0	3800	96.7	4583	594	1.21	0.16
Deitingen	32	1	3800	99.4	4228	0	1.11	0.00
Eptingen N	33	0	2800	89.7	3995	591	1.43	0.21
Umfahr. Bern Ost	42	0	4000	-	-	-	-	-
Gunzgen	60	0	3800	90.0	4806	653	1.26	0.17
Gunzgen	60	1	3800	96.3	3949	~0	1.04	~0
Muttenz, Hard	81	1	6000	98.3	7144	1111	1.19	0.19
Kirchberg N	182	0	3200	-	-	-	-	-
Kirchberg N	182	1	3600	94.1	4302	526	1.19	0.15
Birrhard, Birrfeld	208	1	3600	-	-	-	-	-
Egerkingen, Verz.	225	0	3200	89.6	3948	656	1.23	0.21

Anmerkung: Wenn zu wenig Beobachtungen und wenig Zusammenbrüche ermittelt wurden, konnte der angewendete Algorithmus keine sinnvollen Kapazitäten ermitteln (siehe Tabelle 7).

Basierend auf den relativen Erwartungswerten der Kapazität in Tabelle 8, Tabelle 9 und Tabelle 10 lässt sich mittels t-Test zeigen, dass sich die Mittelwerte nicht vom Median unterscheiden, so dass grössere Einflüsse von Ausreissern ausgeschlossen werden können. Die relativen Erwartungswerte $E(C_i)/C_{i,VSS}$ und die relativen Standardabweichungen $sd(C_i)/C_{i,VSS}$ wurden für jede Messstelle i durch Division der absoluten Werte (siehe Tabelle 8, Tabelle 9 und Tabelle 10) geteilt durch die ermittelten Kapazitätswerte nach der Methodik von VSS (2006) berechnet.

Für alle gültigen Messstellen (i) einer Schwerverkehrsklasse wurden Mittelwert und Median des Erwartungswertes und der Standardabweichung berechnet. Für die praktische Anwendung werden die Medianwerte in Tabelle 11 vorgeschlagen, um keine Strecken mit besonders hohen oder niedrigen Kapazitäten über zu bewerten.

Tabelle 11 Ermittelte relative Kapazität: Median und Mittelwert des Erwartungswertes und der Standardabweichung

	median $E(C)/C_{VSS}$	median $sd(C)/C_{VSS}$	mean $E(C)/C_{VSS}$	mean $sd(C)/C_{VSS}$
Schwer- verkehrs- anteil	Median des Erwar- tungswert der Kapazität	Median der Stan- dardabweichung der Kapazität	mittlerer Erwar- tungswert der Kapazität	mittlere Standard- abweichung der Kapazität
0-5 %	1.3305	0.1991	1.3626	0.1989
5-15 %	1.2885	0.1805	1.3364	0.1766
15-25 %	1.2004	0.1658	1.2312	0.1520

Anmerkung: Die relative Kapazität berechnet sich aus dem Kapazitätswert der Zufallsgrösse geteilt durch den Kapazitätswert der Schweizer Norm (SN 640 018a, VSS, 2006) für geringen Schwerverkehrsanteil (0 - 5 %): C_{VSS} .

Vergleicht man die Faktoren des Medians der Erwartungswerte zueinander von 1.33 : 1.29 : 1.20 also einem Verhältnis von 1.11 : 1.07 : 1.00 mit den Verhältnissen der Kapazitäten der Schweizer Norm 640 018a für zweistreifige Querschnitte (120 km/h) von

1.11 : 1.06 : 1.00 für Steigungen kleiner 2 % bzw. 1.19 : 1.09 : 1.00 für Steigungen zwischen 2 und 4 % zeigt sich, dass die ermittelten Verhältnisse der Kapazität als Zufallsgrösse im Bereich der Angaben der Norm liegen. Dies ist auch bei dreistreifigen Querschnitten der Fall, bei denen sich die Verhältnisse zu 1.14 : 1.07 : 1.00 bei etwa ebener Strecke (Steigung bis 2 %) und zu 1.18 : 1.10 : 1.00 ergeben.

Grundsätzlich werden die Kapazitätsverhältnisse der SN 640 018a für die Schwerverkehrsanteile bestätigt. In der praktischen Anwendung können daher ermittelte Kapazitäten mit geringem Schwerverkehrsanteil in Kapazitäten bei höherem Schwerverkehrsanteil umgerechnet werden, ohne dass der Schwerverkehrsanteil während der Messung bekannt sein muss, da angenommen werden muss, dass die höchsten gemessenen Verkehrsstärken einen geringen Schwerverkehrsanteil aufweisen.

Zur Bestimmung der Kapazität als Zufallsvariable ist es hinreichend, den Kapazitätswert der SN 640 018a für geringen Schwerverkehrsanteil (0 - 5 %) als Basiswert mit den in Tabelle 11 angegebenen Mittelwerten für die gesuchten Schwerverkehrsklasse zu multiplizieren und die Standardabweichung analog zu berechnen.

6.6 Ergebnisse der Zusammenbruchwahrscheinlichkeit

Mit Hilfe von Abbildung 17 und den Detailausschnitten in Abbildung 18 und Abbildung 19 lässt sich mit dem Auslastungsgrad (Q_{60}/C_{VSS}) als Eingangsgrösse direkt die Zusammenbruchwahrscheinlichkeit (P_b) ablesen. Der Auslastungsgrad ermittelt sich als Quotient aus mittlerer stündlicher Verkehrsstärke Q_{60} und der Kapazität nach SN 640 018a (VSS, 2006) für geringe Schwerverkehrsstärken (0 - 5 %) als Basiswert. Es zeigt sich, dass der Verlauf der Zusammenbruchwahrscheinlichkeiten für die Schwerverkehrsklassen 0 - 5% und 5 - 15% bei niedrigen und mittleren Auslastungsgraden nahezu gleichförmig verlaufen. Bei niedrigen Auslastungsgraden ergeben sich für höhere Schwerverkehrsklassen geringere Zusammenbruchwahrscheinlichkeiten. Die Unterschiede sind absolut gering und sind auf die geringere Standardabweichung der Kapazität als Zufallsvariable zurückzuführen. Hohe Schwerverkehrsanteile treten nicht oft bei sehr hohen Verkehrsstärken auf und sind von grösserer Homogenität im Verkehrsfluss gekennzeichnet, so dass die geringere Kapazität genauer, also mit geringerer Standardabweichung, geschätzt werden kann.

Abbildung 17 Zusammenbruchswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der mittleren stündlichen Auslastung ($r_{60}=Q_{60}/C_{VSS}$) und des Schwerverkehranteils (0 - 5 %, 5 - 15 %, 15 - 25 %)

Q_{60} : mittlere stündliche Verkehrsstärke

C_{VSS} : Kapazität bei 0 - 5% SV-Anteil nach SN 640 018a (VSS, 2006)

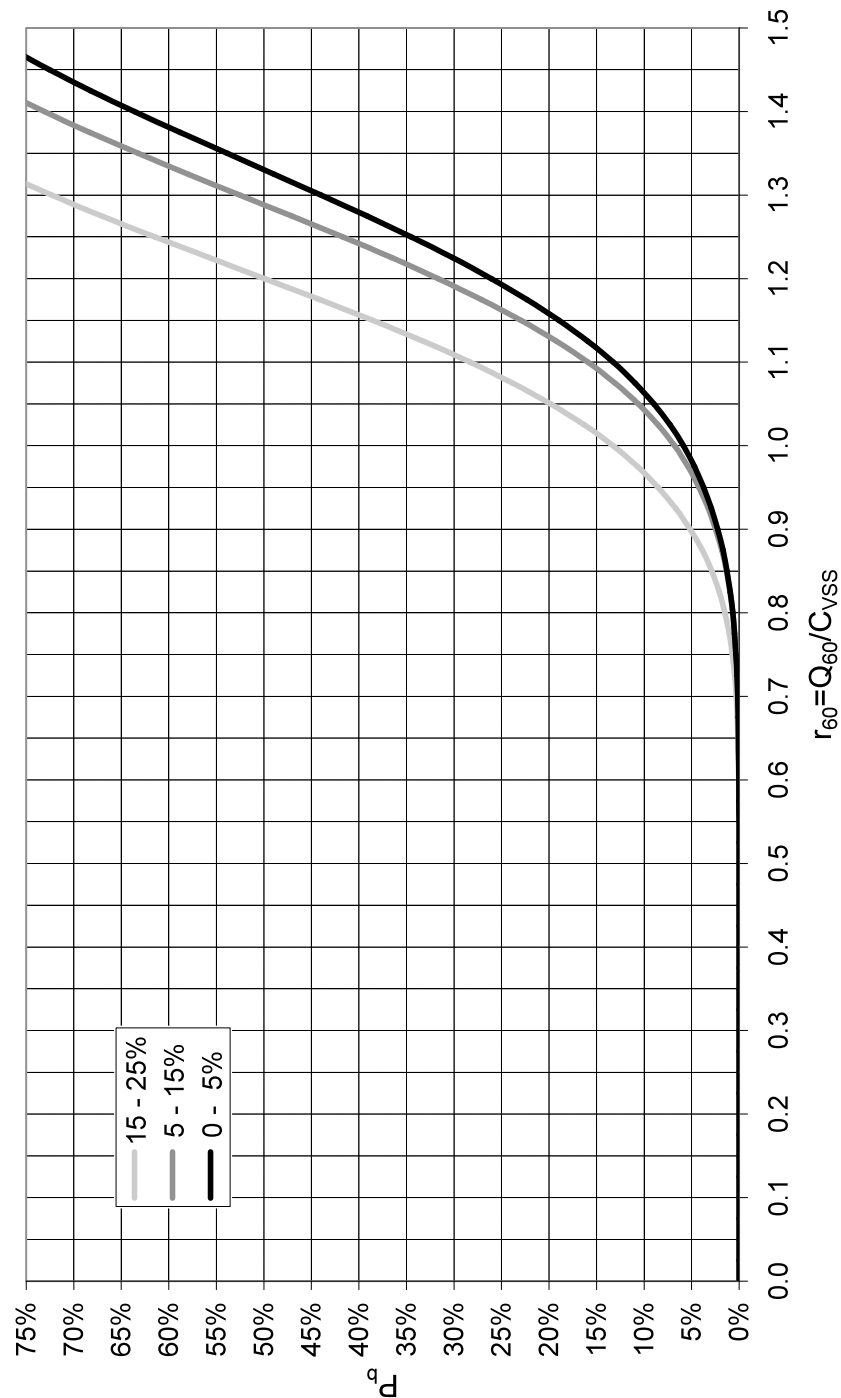


Abbildung 18 Detail mittlere Auslastungsgrade: Zusammenbruchswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der mittleren Auslastung und des Schwerverkehranteils

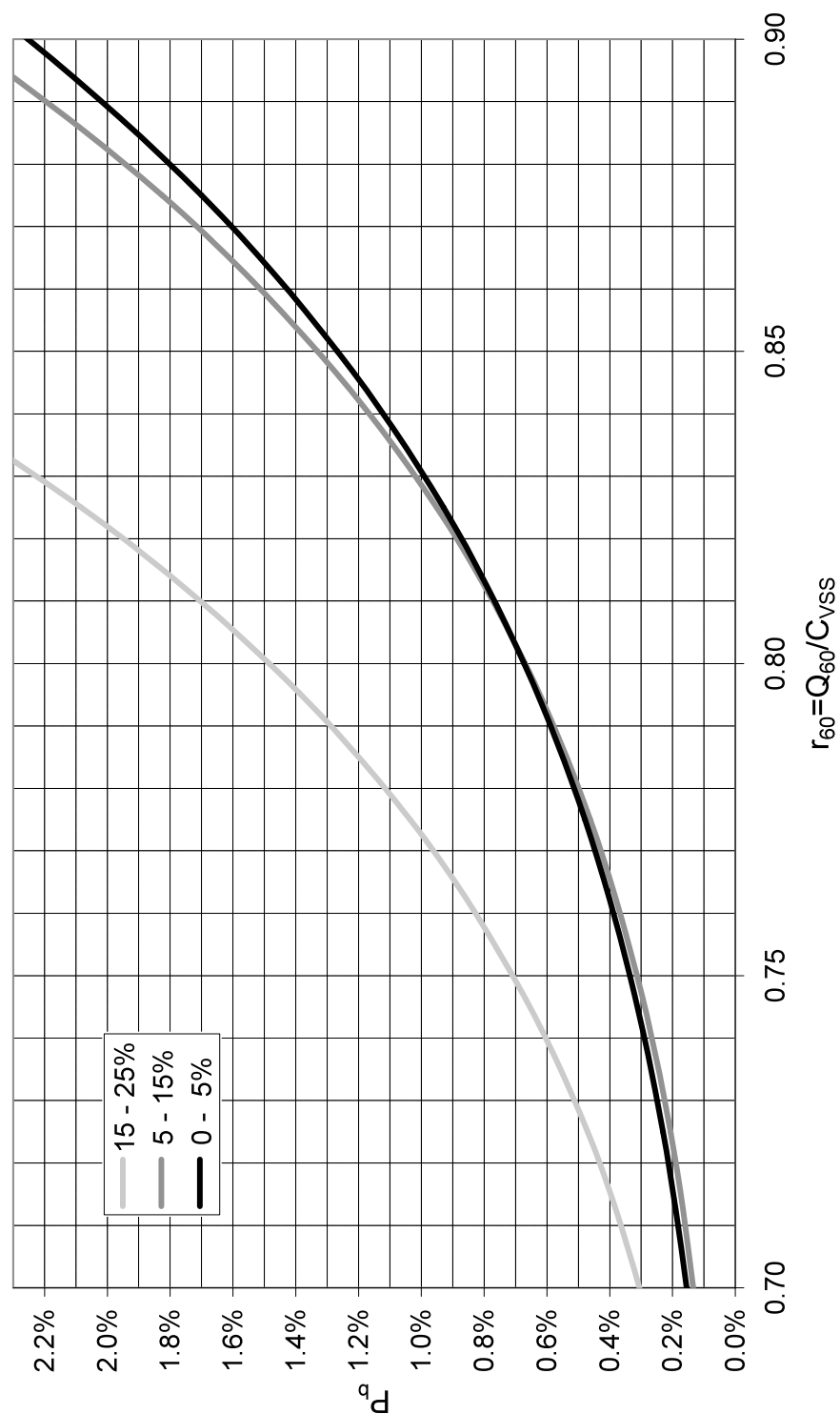
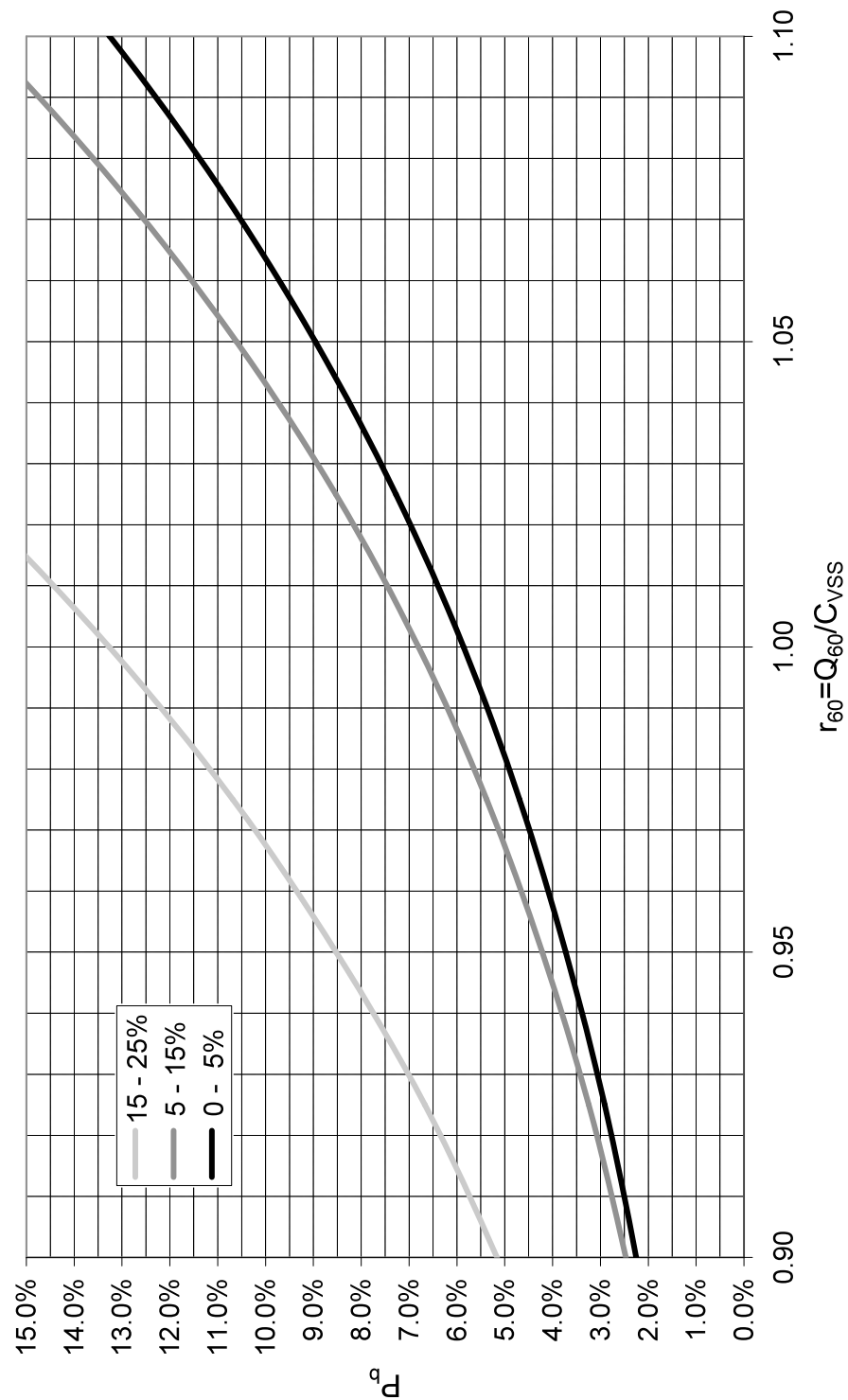


Abbildung 19 Detail hohe Auslastungsgrade: Zusammenbruchswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der mittleren Auslastung und des Schwerverkehranteils



In der Anwendung sollte die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit über den Variationskoeffizienten der Reservekapazität nach Kapitel 6.3 bestimmt werden, da auch viele Tabellenkalkulationen die kumulative Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Normalverteilung (hier mit $\Phi(-\mu_R/\sigma_R)$ bezeichnet) anbieten. Für Abschätzungen mit geringerer Genauigkeit kann auch mit folgender Formel (Sigmoid-Kurve) die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit P_b direkt bestimmt werden:

$$P_b = \frac{1}{1 + e^{\alpha - \beta \cdot r_{60}}} ,$$

wobei r_{60} der stündliche Auslastungsgrad ist und α und β Parameter nach Tabelle 12.

Tabelle 12 Parameter zur Bestimmung der mittleren Zusammenbruchswahrscheinlichkeit mittels approximierter Sigmoid-Kurve

Schwerverkehrsanteil	α	β	R^2 in %
0-5 %	11.593	8.806	99.9
5-15 %	11.987	9.361	99.9
15-25 %	11.481	9.578	99.8

Anmerkung: Es wird der Median der ermittelten Kapazitätsfaktoren nach Tabelle 11 genutzt

6.6.1 Zusammenbruchswahrscheinlichkeit in einem Verkehrsszenario

Die Berechnung der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit wird für Verkehrsszenarien durchgeführt, wobei ein Szenario eine bestimmte Verkehrssituation kennzeichnet. Für die hier gegebene Methodik genügt folgende Definition eines Verkehrsszenarios:

- Definition Verkehrsszenario:
Ein Verkehrsszenario beschreibt eine gegebene geschätzte mittlere stündliche Verkehrsstärke mit gegebenem Schwerverkehrsanteil auf einem Streckenabschnitt mit bekannter Kapazität.

Es sind folgende Schritte für die Berechnung der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit des fließenden (oder auch gebundenen) Verkehrsflusses für ein Verkehrsszenario nötig:

- Bestimmung der Kapazität als Zufallsvariable der Strecke durch Umrechnung der VSS-Kapazität unter Berücksichtigung des Schwerverkehrsanteils.
- Bestimmung der Standardabweichung der Verkehrsstärke über die mittlere stündlichen Verkehrsstärke dieses Szenarios aus Zählungen, Hochrechnungen (evtl. über die Ganglinien) oder Umlegungen bzw. Simulation.
- Ermittlung der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit aus Diagramm oder über die Berechnung der Verteilung der Reservekapazität M aus der Verteilung der Verkehrsstärke und der Kapazität.

Anmerkung: Die Verteilung Reservekapazität und somit Zusammenbruchswahrscheinlichkeit können alternativ zu den Auslastungsgraden als Indikator für die Verkehrsqualität dienen, wobei hier die Sicherheit eines stabilen Verkehrsflusses bewertet wird.

Beispiel: Berechnung der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit für ein Verkehrsszenario mit einer geschätzten stündlichen Verkehrsstärke von 3600 Fahrzeugen pro Stunde mit einem Schwerverkehrsanteil zwischen 5% und 15% auf einem ebenen (Steigung <2%) zweistreifigen Autobahnabschnitt (Höchstgeschwindigkeit 120 km/h).

- Die Kapazität des Abschnitts beträgt nach SN 640 018a (VSS, 2006) 4000 Fz/h (für Schwerverkehrsanteil von 0-5% als Basiswert). Die Kapazität als Zufallsgrösse ergibt sich mit Tabelle 11 (Faktor 1.331) zu 5324 Fz/h im Mittel und die Standardabweichung zu 796 Fz/h (Faktor 0.199).
- Die Verkehrsstärke des Szenarios beträgt im Mittel 3600 Fz/h, womit sich eine relative Standardabweichung der Verkehrsstärke über den Auslastungsgrad von 0.9 von 8.1 % (Abbildung 16) also einer absoluten Standardabweichung von 322 Fz/h ergibt.
- Die Reservekapazität R hat ein Mittel von $\mu_R=1724$ Fz/h (Differenz aus $\mu_C-\mu_Q$) und die Standardabweichung berechnet sich aus der Wurzel der Summe der Quadrate von σ_C und σ_Q zu $\sigma_R=859$ Fz/h. Mit $\beta=\mu_R/\sigma_R=2.01$ ergibt sich die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit für dieses Szenario $P_b=\Phi(-\beta)=23$ ‰. Alternativ kann für den Auslastungsgrad von 90% auch in Abbildung 17 bzw. Abbildung 18 dieser Wert direkt für einen Schwerverkehrsanteil von 0-5% abgelesen werden.

6.7 Auswirkungen eines Zusammenbruchs

6.7.1 Von Zusammenbrüchen unbeeinflusste mittlere Geschwindigkeit

Als Referenzwert für einen von Zusammenbrüchen nicht beeinflussten Verkehrsfluss wird die mittlere Geschwindigkeit v_m eingeführt. Diese Geschwindigkeit entspricht dem Erwartungswert der Geschwindigkeit eines Verkehrsteilnehmers unter Berücksichtigung des Auslastungsgrades. Dieser Geschwindigkeit wird die erwartete Geschwindigkeit während eines Zusammenbruchs gegenübergestellt (Kapitel 6.7.2).

Laut Definition eines Zusammenbruchs (siehe Kapitel 6.2) sinkt die Geschwindigkeit während eines Zusammenbruchs unter die Geschwindigkeit des 5-Minutenintervalls direkt vor dem Zusammenbruch ab. Da die für die Bemessung nötigen Eingangsgrößen stundenfein aufgelöst dargestellt sind, ist die mittlere stündliche Geschwindigkeit von Interesse. Aus diesem Grund wird als mittlere Geschwindigkeit v_m die mittlere Geschwindigkeit ermittelt, für die nur Intervalle berücksichtigt werden, die nicht von einem Zusammenbruch beeinflusst sind. Diese Geschwindigkeiten sind nicht die Geschwindigkeiten, die unter optimalen Wetterbedingungen und Verkehrszusammensetzungen erreicht werden können wie in SN 640 018a (VSS, 2006), sondern die mittleren Geschwindigkeiten während aller vorkommenden Bedingungen in den Messzeiträumen. Solange keine detaillierten Auswertungen getrennt nach Wetterbedingungen durchgeführt sind, geben diese Werte für Ganzjahresberechnungen gültige Mittelwerte der freien Geschwindigkeiten an. Die in dieser Auswertung genutzten Zählstellen weisen Tempolimits von 120 und 100 km/h auf, so dass die freien Geschwindigkeiten für diese beiden Typen separat untersucht wurden. Die Grafiken der mittleren Geschwindigkeiten mit 95%-Schwankungsintervall sind in Abbildung 20 (120 km/h) und Abbildung 21 (100 km/h) für den motorisierten Individualverkehr (mIV) und Werks- bzw. Schwerverkehr (SV) gezeigt. Die mittlere Geschwindigkeit v_m ermittelt sich aus den mittleren Geschwindigkeiten (ohne Zusammenbrüche) der einzelnen Zählstellen, um eine Übergewichtung von Zählstellen mit einem grossen Datenumfang zu vermeiden und spezifische Besonderheiten einzelner Autobahnabschnitte auszugleichen. In diesem Fall ist das 95%-Schwankungsintervall (als Fehlerbalken gezeigt) die Bandbreite innerhalb derer sich die Mittelwerte der einzelnen Zählstellen zu 95 % bewegen.

Es hat sich gezeigt, dass die mittleren von Zusammenbrüchen nicht beeinflussten Geschwindigkeiten sich für unterschiedliche Anteile von Schwerverkehr nicht signifikant unterscheiden. Da hier die Geschwindigkeiten von mIV und SV separat ausgewertet wurden, lassen sich diese Werte nicht direkt mit Verkehrsstärke-Geschwindigkeits-Diagrammen (Q-V-

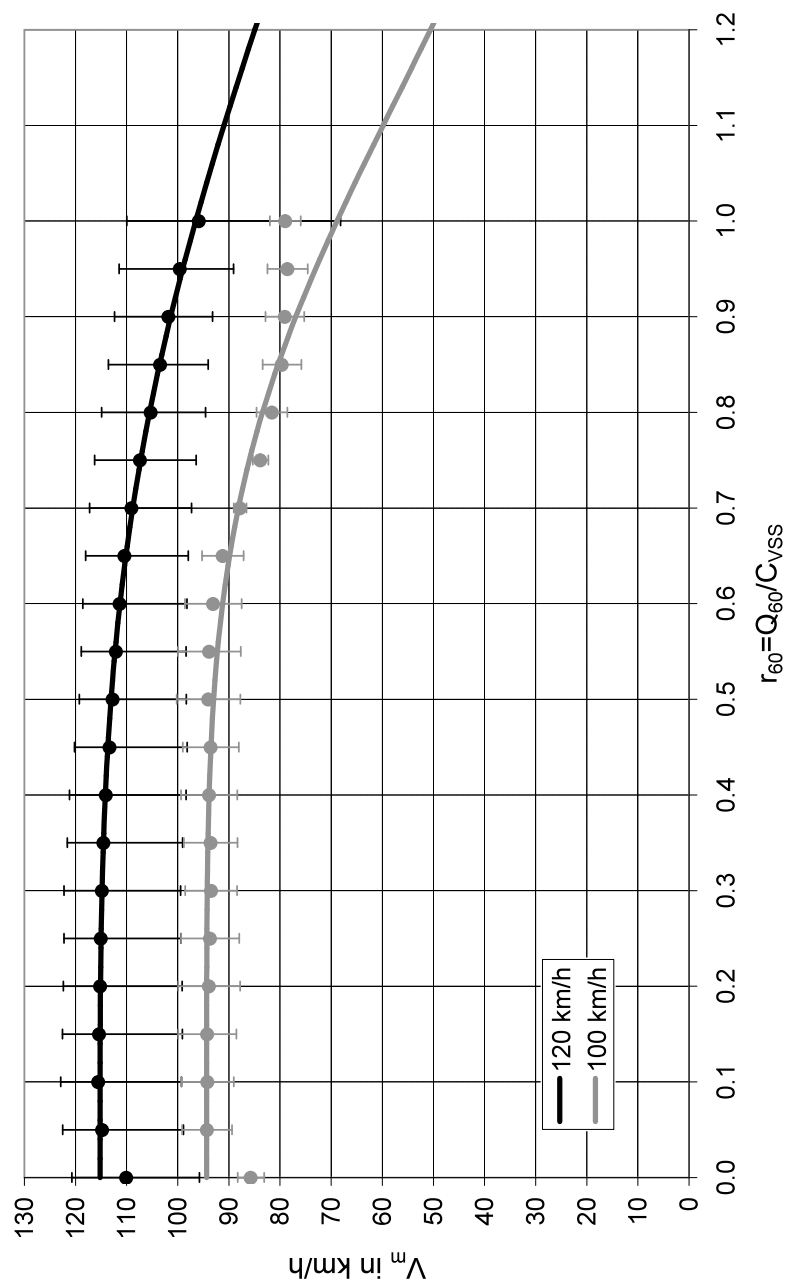
Diagramm) beispielsweise aus SN 640 018a (VSS, 2006) vergleichen, die verschiedene Verläufe je Schwerverkehrsklasse ausweisen, sondern sie sind als Linearkombination der hier gezeigten Geschwindigkeiten mit entsprechendem Schwerverkehrsanteil zu verstehen. Eine getrennte Analyse der Geschwindigkeiten für mIV und SV ist für eine differenzierte Kostenberechnung der beiden Fahrzeugklassen nötig.

Für weitergehende Berechnungen wurde auf die Daten die *BPR-Funktion* (Transportation Research Board, 2000) in der Form:

$$v_m = \frac{v_0}{1 + \alpha r_{60}^\beta}$$

angepasst, wobei v_m die mittlere Geschwindigkeit ist, und r_{60} der stündliche Auslastungsgrad aus stündlicher Verkehrsstärke und klassischer Kapazität. Die Parameter der BPR-Funktion v_0 , α und β wurden mit der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt.

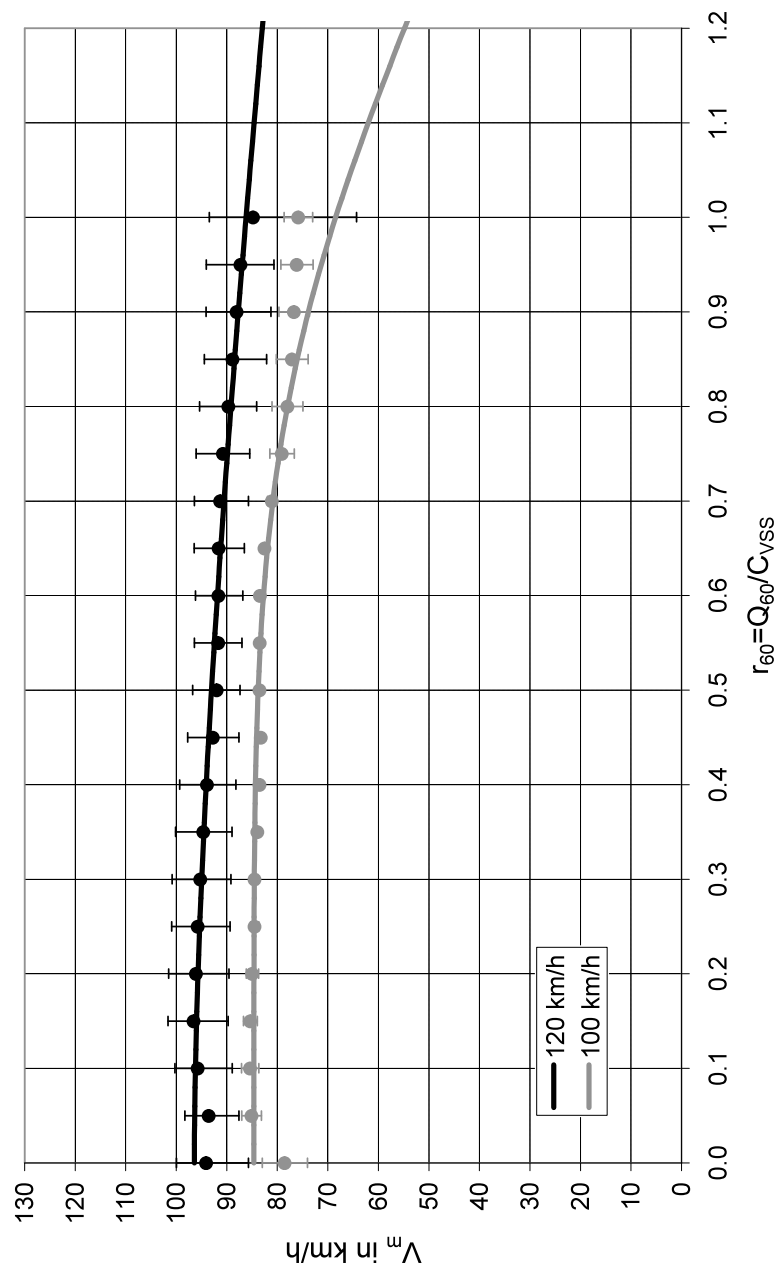
Abbildung 20 Mittlere nicht von Zusammenbrüchen beeinflusste Geschwindigkeit des motorisierten Individualverkehrs (mIV) für Autobahnen mit 120 km/h (schwarz) und 100 km/h (grau)



Beobachtete Mittelwerte
BPR-Funktion, Anpassung
95%-Schwankungsintervall der Messstellenmittel

Punkte
durchgezogene Linie
Fehlerbalken

Abbildung 21 Mittlere nicht von Zusammenbrüchen beeinflusste Geschwindigkeit des Werks- bzw. Schwerverkehrs (SV) für Autobahnen mit 120 km/h (schwarz) und 100 km/h (grau)



Beobachtete Mittelwerte
BPR-Funktion, Anpassung
95%-Schwankungsintervall der Messstellenmittel

Punkte
durchgezogene Linie
Fehlerbalken

Die ermittelten Parameter für die Fahrzeugklassen mIV und SV und die zwei Autobahntypen mit 120 und 100 km/h zulässiger Höchstgeschwindigkeit sind in Tabelle 13 aufgeführt. Die Schätzungen für die elf Autobahnen mit 120 km/h zulässiger Höchstgeschwindigkeit liefern signifikant (zu 95 %) von null verschiedene Parameterwerte, die mit schmalen Konfidenzintervallen bestimmt werden konnten. Aufgrund der geringeren Datenbasis von nur zwei Zählstellen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h, sind die Vertrauensintervalle hier grösser. Es zeigte sich in den gemessenen mittleren Geschwindigkeiten für die niedrigste Auslastungsklasse, dass die freien Geschwindigkeiten für stündliche Auslastungen von gerundet 0 für r_{60} in vielen Fällen unterhalb der Geschwindigkeiten für die Auslastungsklasse $r_{60}=10\%$ lag. Dies lässt sich auf eventuelle zeitlich sehr kurze Staus oder Ereignisse zurückführen, bei denen die Geschwindigkeit reduziert ist und als Zusammenbruch erkannt werden konnten. Zusätzlich fallen noch besondere Verkehrsverhältnisse in diese Klasse, bei denen nur deutlich langsamer gefahren werden kann und gleichzeitig sehr wenige Fahrzeuge fahren. Für die Messstellen mit einer Höchstgeschwindigkeit von 120 km/h wurden daher die Auslastungsklassen von $r_{60}=10\%$ bis $r_{60}=100\%$ ausgewertet. Die Verläufe der Messwerte für die Zählstellen mit einer erlaubten Geschwindigkeit von 100 km/h weisen relativ wenige Messwerte für hohe Auslastungsgrade auf, so dass hier für den mIV nur der Bereich von $r_{60}=10\%$ bis $r_{60}=90\%$ und den SV der Bereich von $r_{60}=10\%$ bis $r_{60}=80\%$ für die Schätzung genutzt wurde.

Die in Tabelle 13 angegebenen Parameter wurden über die Mittelwerte der mittleren Fahrgeschwindigkeiten der einzelnen Zählstellen geschätzt, wobei Auslastungsschritte von 5 % der VSS-Kapazität gewählt wurden. Die Mittelwerte sind in Abbildung 20 und Abbildung 21 als Punkte dargestellt. Die Schätzungen der Parameter konnten mit guter Güte durchgeführt werden, wie die hohen Werte des Bestimmtheitsmasses in Tabelle 13 zeigen.

Zu den Geschwindigkeiten des Werks- bzw. Schwerverkehrs in Abbildung 21 ist anzumerken, dass auf Schweizer Autobahnen die maximal erlaubte Geschwindigkeit für Fahrzeuge über 3.5 t zulässiges Gesamtgewicht, Fahrzeugen mit Anhängern und Sattelzügen 80 km/h beträgt und für Busse (ohne Gelenkbusse) und schwere Wohnwagen 100 km/h. Es hat sich in Stichprobenuntersuchungen herausgestellt, dass bis zu 20 % der Lastwagen falsch detektiert werden, indem Lieferwagen als Lastwagen erkannt werden. Leichte Lieferwagen unterliegen keiner zusätzlichen Geschwindigkeitsbeschränkung, so dass deutlich höhere Werte als 80 km/h im Mittel gemessen werden. Für die Fahrzeitkostenbestimmung ist jedoch die Zahlungsbereitschaft im Werksverkehr massgebend, zu dem auch die Lieferwagen zu zählen

sind, so dass hierdurch kein Fehler entsteht, sondern die gesamten Fahrzeitkosten besser abgebildet werden.

Tabelle 13 Parameterschätzungen für die BPR-Funktion zur Berechnung der mittleren von Zusammenbrüchen nicht beeinflussten Geschwindigkeit v_m mit 95%-Konfidenzintervall der Parameter

Fahr- zeug- klasse	Konfidenz- intervall			Konfidenz- intervall			Konfidenz- intervall			R ² in %
	α	ci(α)		β	ci(β)		v_0	ci(v_0)		
Autobahnen mit zulässiger Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h										
mIV	0.194	0.188	0.200	3.344	3.143	3.545	115.2	114.9	115.5	99.8
SV	0.119	0.105	0.133	1.700	1.194	2.206	96.4	95.3	97.5	96.2
Autobahnen mit zulässiger Maximalgeschwindigkeit von 100 km/h										
mIV	0.370	0.279	0.462	4.656	3.321	5.991	94.4	93.3	95.4	95.2
SV	0.236	0.128	0.345	4.566	2.889	6.242	84.6	84.1	85.2	93.8

6.7.2 Geschwindigkeit während eines Zusammenbruchs

Der mittleren Geschwindigkeit v_m steht die zu erwartende Geschwindigkeit während eines Zusammenbruchs v_b gegenüber, die sich für einen Zusammenbruch bei einem gegebenen Auslastungsgrad ergibt. Der Auslastungsgrad bezieht sich auf den für die Bemessung relevanten gemittelten stündlichen Auslastungsgrad direkt vor dem Zusammenbruch, um Effekte eines Verkehrsstärkerückgangs und somit eines Auslastungsrückgangs während des Zusammenbruchs (häufig als *capacity drop* bezeichnet) ausschliessen zu können. Die erwartete Geschwindigkeit während eines Zusammenbruchs v_b für einen gegebenen stündlichen Auslastungsgrad und einen Schwerverkehrsanteil unmittelbar (im 5-Minutenintervall) vor dem Zusammenbruch. Ähnlich wie bei den mittleren Geschwindigkeiten ist auch der Verlauf der Zusammenbruchsgeschwindigkeiten sehr ähnlich. Um die Werte für beide Geschwindigkeitsklassen der Autobahnen gemeinsam nutzen zu können, wird nicht die absolute Zusammen-

bruchsgeschwindigkeit ermittelt, sondern der Faktor f_{mb} ($v_b = f_{mb} \cdot v_m$), der sich als Quotient aus der Geschwindigkeit während des Zusammenbruchs v_b und der mittleren Geschwindigkeit v_m ergibt. Der Verlauf der mb-Faktoren gegenüber dem Auslastungsgrad erscheint homogener im Vergleich zur Zusammenbruchsgeschwindigkeit v_b . Die Resultate sind in Abbildung 22 für den motorisierten Individualverkehr und in Abbildung 23 für Anteile den Wirtschafts- bzw. Schwerverkehr dargestellt. Für die Auswertungen von f_{mb} wurden nicht die geglätteten der *BPR-Funktion* für v_m gewählt, sondern die beobachteten Mittelwerte, die in Abbildung 20 und Abbildung 21 gezeigt sind. Es soll hierdurch eine mögliche Fehlerfortpflanzung vermindert werden. Der Verlauf der mb-Faktoren wurde mit einer Funktion folgender Form approximiert:

$$f_{mb} = c + \delta \cdot r_{60} + \frac{\gamma}{1 + e^{\alpha - \beta \cdot r_{60}}} \quad .$$

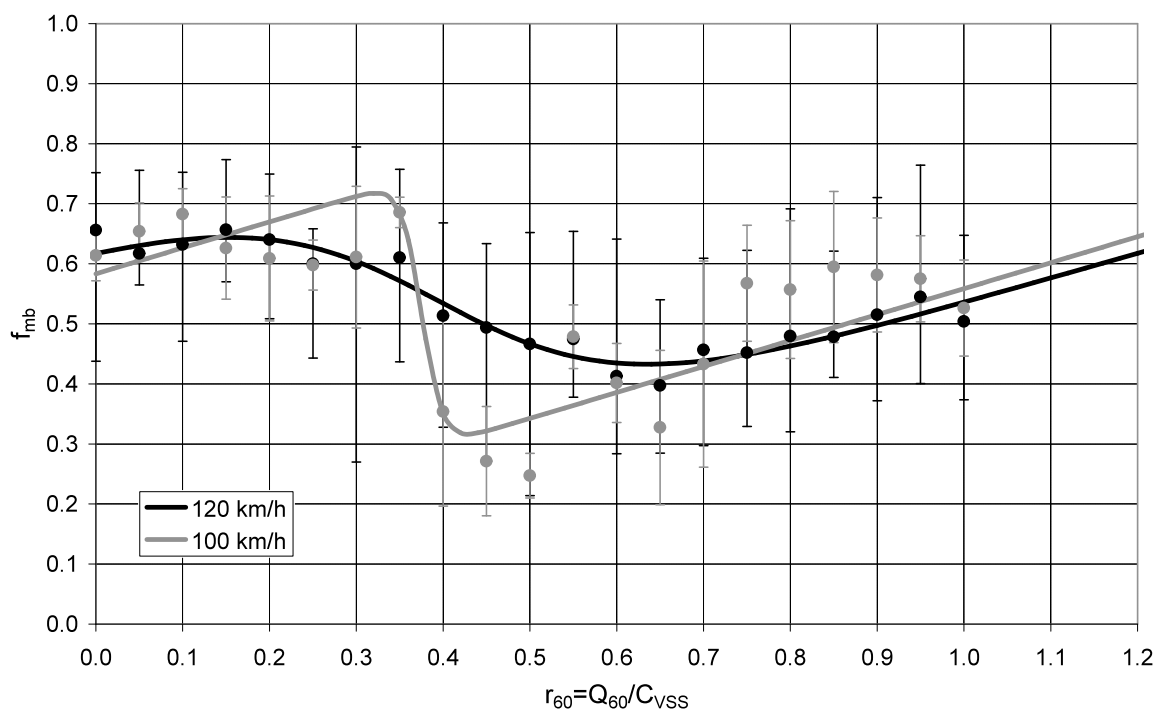
Hierbei ist r_{60} der stündliche Auslastungsgrad und die Parameter α , β , γ , δ und c sind in Abhängigkeit von der zulässigen Maximalgeschwindigkeit und der Fahrzeugklasse (mIV, SV) Tabelle 14 zu entnehmen. Für die Funktionsanpassung wurden die mb-Faktoren mit dem Kehrwert ihrer Standardabweichung gewichtet, um Punkte mit wenig Streuung stärker zu gewichten. Vor diesem Hintergrund sind auch die R^2 -Werte in Tabelle 14 zu interpretieren, da diese auf Basis einer gewichteten nichtlinearen Regression bestimmt wurden.

Tabelle 14 Parameterwerte der Funktion zur Bestimmung von f_{mb}

Fahrzeug- klasse	α	β	γ	δ	c	R^2 in %
Autobahnen mit zulässiger Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h						
mIV	3.638	9.223	-0.511	0.415	0.630	99.0
SV	3.055	7.901	-0.596	0.425	0.762	98.9
Autobahnen mit zulässiger Maximalgeschwindigkeit von 100 km/h						
mIV	-31.38	-83.61	0.457	0.432	0.126	97.4

SV	-4.128	-18.79	0.388	0.321	0.285	99.1
----	--------	--------	-------	-------	-------	------

Abbildung 22 Faktor $f_{mb} = v_b / v_m$, Verhältnis von mittlerer von Zusammenbrüchen unbeeinflusster Geschwindigkeit zu Geschwindigkeit während eines Zusammenbruchs für den motorisierten Individualverkehr (mIV)



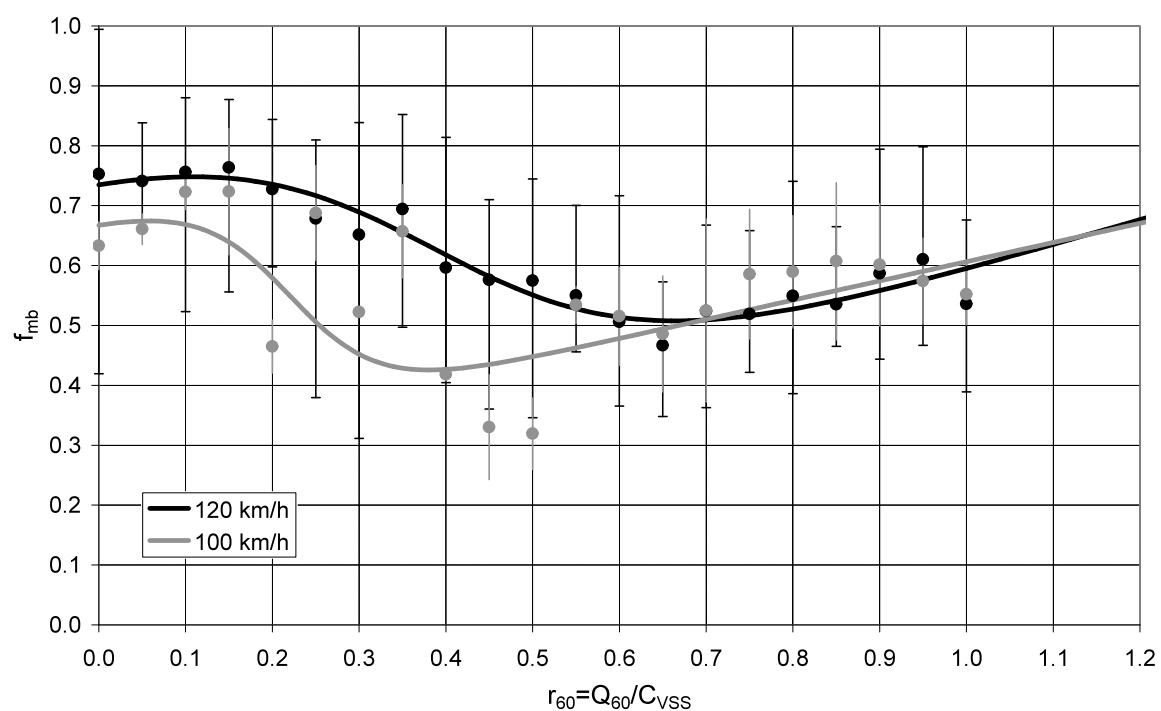
Beobachtete Mittelwerte
 Geglättete Funktion, Anpassung
 95%-Schwankungsintervall der Messstellenmittel

Punkte
 durchgezogene Linie
 Fehlerbalken

Der Verlauf des Faktors $f_{mb} = v_b / v_m$ zeigt starke Schwankungen bei Auslastungsgraden bis etwa 45 % für Strecken mit 100 km/h zulässiger Maximalgeschwindigkeit, die sich durch eine geringe Anzahl von Zusammenbrüchen in diesem Bereich erklären und zudem noch durch einen Rückstau von stromabwärts liegenden Ereignissen beeinflusst sein können. Für die praktische Anwendung ist der Verlauf in diesem Bereich niedriger Auslastung nicht relevant, da die Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten in diesem Bereich numerisch bei null liegen (siehe Abbildung 17). Bei den für die Bemessung wichtigen höheren Auslastungsgraden ab

ca. 50% sind die Verläufe von f_{mb} für beide Strassenkategorien und beide Verkehrsmittelklassen einander ähnlich.

Abbildung 23 Faktor $f_{mb} = v_b / v_m$, Verhältnis von mittlerer von Zusammenbrüchen unbeeinflusster Geschwindigkeit zu Geschwindigkeit während eines Zusammenbruchs für den Wirtschafts- bzw. Schwerverkehr (SV)



Beobachtete Mittelwerte
Geglättete Funktion, Anpassung
95%-Schwankungsintervall der Messstellenmittel

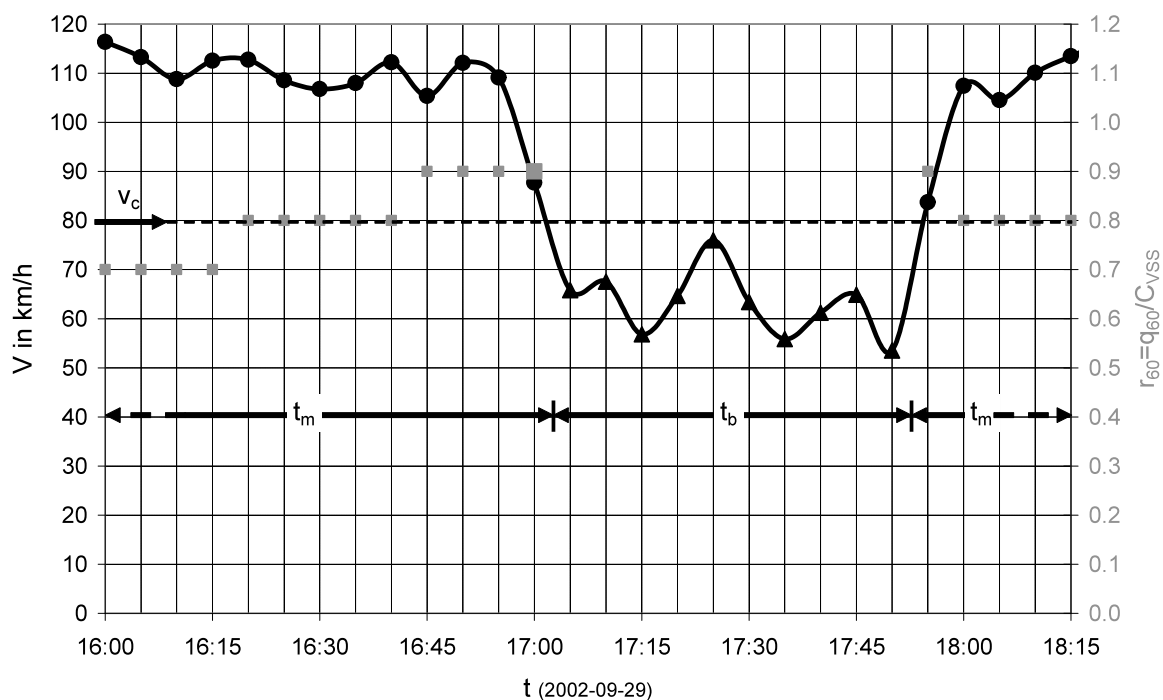
Punkte
durchgezogene Linie
Fehlerbalken

6.7.3 Ergebnisse der Zusammenbruchsdauer

Die erwartete Zusammenbruchsdauer entspricht der mittleren Dauer während der sich der Verkehr nach einem Zusammenbruchereignis (Definition, siehe Kapitel 6.2) im stockenden oder gestauten Zustand befindet. Ein Zusammenbruch wird als beendet angesehen, wenn zwei aufeinander folgende 5-Minutenintervalle jeweils grösser oder gleich der kritischen Ge-

schwindigkeit ($\frac{2}{3}$ der zulässigen Höchstgeschwindigkeit, siehe Tabelle 4) sind. Die Zusammenbruchsdauer ermittelt sich aus dem Zeitraum zwischen dem Intervall, auf das der Zusammenbruch folgt und dem Zeitpunkt vor dem ersten der mindestens zwei Intervalle, die nach dem Zusammenbruch mittlere Geschwindigkeiten oberhalb oder gleich der Grenzggeschwindigkeit aufzeigen. In Abbildung 24, die einen zeitlichen Ausschnitt der 5-minütigen Geschwindigkeitsmittel zeigt, sind die Intervalle eines Zusammenbruchs mit Dreiecken gekennzeichnet.

Abbildung 24 Ausschnitt des Verlaufs der 5-minütigen Geschwindigkeitsmittelwerte an der Zählstelle Mattstetten Richtung Zürich (Nr. 23, 0) mit einem Zusammenbruch und Angabe der Dauern des ungestörten Verkehrsflusses (t_m) und des Zusammenbruchs (t_b)



5-minütige Geschwindigkeiten V
 60-minütiger Auslastungsgrad r_{60}
 kritische Geschwindigkeit v_c

schwarze Linie (linke Achse)
 graue Quadrate (rechte Achse)
 gestrichelte Linie (80 km/h)

Die Verkehrsstärke (bzw. Auslastungsgrad r_{60} , bezogen auf die klassische Kapazität) bei der ein Zusammenbruch stattfindet ist definiert als die mittlere stündliche Verkehrsstärke direkt vor dem Zusammenbruch (siehe auch Kapitel 6.7.1). Dieser Auslastungsgrad ist in Abbildung 24 als grösseres graues Quadrat bei 17:00 Uhr und dem Wert von 90 % gekennzeichnet. Der

folgende Zusammenbruch ist daher der Auslastungsklasse um 90 % zugeordnet und zusätzlich in diesem Fall der Schwerverkehrsklasse von 0 - 5 %, da die Schwerverkehrsstärke direkt vor dem Zusammenbruch etwa 1 % betrug.

Die Analyse der mittleren Zusammenbruchsdauern t_b wurde für alle Zählstellen in Auslastungsschritten von 5 % durchgeführt. Untersucht wurden in einem ersten Schritt die mittleren Zusammenbruchsdauern getrennt nach Auslastungsgraden, den drei Schwerverkehrsklassen und den zwei unterschiedlichen zulässigen Höchstgeschwindigkeiten. Die Dauern sind natürlich für alle Verkehrsteilnehmer gleich, so dass hier nicht zwischen mIV und SV unterschieden werden muss. Es zeigte sich, dass sich die Schwerverkehrsklassen nicht signifikant unterscheiden liessen. Aus diesem Grund wurden die Zusammenbruchsdauern t_b getrennt nach Auslastungsgrad und zulässiger Maximalgeschwindigkeit ermittelt, deren Mittelwerte (Punkte), 95%-Schwankungsintervall der Messstellenmittel (Fehlerbalken) und geglätteter Verlauf in Abbildung 25 dargestellt sind. Es wurde folgende Funktion für die Glättung verwendet:

$$t_b = c + \frac{\gamma}{1 + e^{\alpha - \beta \cdot a_{60}}}$$

Die Parameter sind Tabelle 15 zu entnehmen. Wie in Abbildung 25 zu sehen, bildet die gewählte Glättung eine stufenförmige S-Kurve. Werden in der Anwendung nur hohe Auslastungsgrade betrachtet, so kann auch vereinfachend die Zusammenbruchsdauer für $a_{60} \geq 65$ %:

für Maximalgeschwindigkeiten von 120 km/h $t_b = 0.707$ h und

für Maximalgeschwindigkeiten von 100 km/h $t_b = 1.066$ h angenommen werden.

Tabelle 15 Parameterwerte der Funktion zur Bestimmung von t_b für beide Fahrzeugklassen (mIV und SV)

α	β	γ	c	R ²
Autobahnen mit zulässiger Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h				
12.39	34.16	0.340	0.369	91.4

Autobahnen mit zulässiger Maximalgeschwindigkeit von 100 km/h

17.95

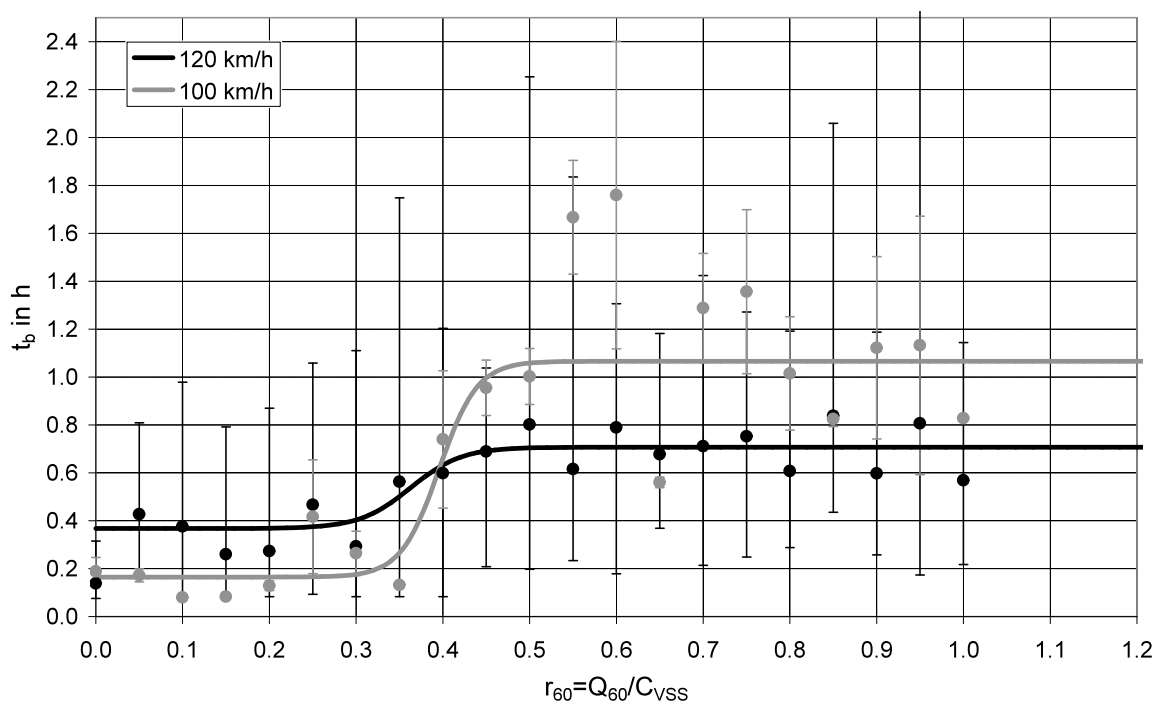
45.37

0.901

0.165

91.1

Abbildung 25 Mittlere Zusammenbruchsdauern in Stunden für einen Zusammenbruch bei gegebenem Auslastungsgrad r_{60} für Autobahnstrecken mit zulässiger Maximalgeschwindigkeit von 120 km/h und 100 km/h



Beobachtete Mittelwerte
Geglättete Funktion, Anpassung
95%-Schwankungsintervall der Messstellenmittel

Punkte
durchgezogene Linie
Fehlerbalken

6.7.4 Erwartungswert der Fahrgeschwindigkeit

Die absolute Fahrzeit bei ungestörtem Verkehrsfluss (ohne Zusammenbrüche) und zusätzliche Verzögerungen aus eventuellen Staus hängen natürlich massgeblich von der zu fahrenden Distanz ab, die hier nicht weiter behandelt werden soll. Es wird daher ein Ausdruck über den Erwartungswert der Fahrgeschwindigkeit gewählt, der die mittlere freie Geschwindigkeit und anteilig die zu erwartende Geschwindigkeit während eines Zusammenbruchs berücksichtigt.

Wird die Summe der gemessenen Zeit des ungestörten Verkehrsflusses für einen gegebenen Auslastungsgrad mit T_m bezeichnet (siehe Abbildung 24) und die Summe der Zusammenbruchsdauern mit T_b , so lassen sich mit der Anzahl der Intervalle bei ungestörtem Verkehrsfluss n_m , der Intervalllänge Δt (hier 5 Minuten), der Anzahl von Zusammenbrüchen dieses Auslastungsgrades n_b' und der mittleren Dauer der Zusammenbrüche t_b (Abbildung 25) die Zeiten T_m und T_b wie folgt schreiben:

$$T_m = n_m \cdot \Delta t \quad \text{und} \quad T_b = n_b' \cdot t_b .$$

Der Erwartungswert der Fahrgeschwindigkeit $E(v)$ für einen gegebenen stündlichen Auslastungsgrad ergibt sich mit $v_b = f_{mb} \cdot v_m$ zu:

$$E(v) = \frac{T_m}{T_m + T_b} v_m + \frac{T_b}{T_m + T_b} f_{mb} \cdot v_m ,$$

wobei v_m die mittlere von Zusammenbrüchen nicht beeinflusste Geschwindigkeit nach Abbildung 20 und Abbildung 21 darstellt und $v_b = f_{mb} \cdot v_m$ die mittlere Geschwindigkeit während eines Zusammenbruchs (vgl. Abbildung 22 und Abbildung 23). Da die in Abbildung 17 bzw. in Abbildung 18 und Abbildung 19 gezeigte Zusammenbruchswahrscheinlichkeit $P_b = n_b'/n_m$ das gemessene Verhältnis von Intervallen, auf die ein Zusammenbruch folgt, zu allen beobachteten Intervallen eines gegebenen Auslastungsgrades und einer Schwerverkehrsstärke abbildet, lässt sich $E(v)$ auch wie folgt ausdrücken:

$$E(v) = \frac{\Delta t}{\Delta t + P_b t_b} v_m + \frac{P_b t_b}{\Delta t + P_b t_b} f_{mb} \cdot v_m = \left(\frac{1 + P_b t_b / \Delta t f_{mb}}{1 + P_b t_b / \Delta t} \right) \cdot v_m$$

Es ist zu beachten, dass die Intervalllänge der Beobachtungen Δt hier nicht als Parameter in die Formel eingeht, sondern in Zusammenhang mit dem zugehörigen Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten zu verstehen ist, da sich diese bei geänderten Intervalllängen auch ändern, wie Matt und Eleftheriadou (2001) gezeigt haben (vgl. Kapitel 2.5 und Abbildung 7).

6.7.5 Eing geplante Fahrgeschwindigkeit

Die eing geplante Fahrgeschwindigkeit berücksichtigt die mittlere freie Geschwindigkeit und anteilig die zu erwartende Geschwindigkeit während eines Zusammenbruchs, wobei die Geschwindigkeiten mit der Zahlungsbereitschaft gewichtet wird. Zur Bestimmung der eing geplanten Reisezeit aus Zähl Daten wird angenommen, dass alle Verkehrsteilnehmer ihren Nutzen maximieren und sich unter den gegebenen Bedingungen Kostenoptimal hinsichtlich der generalisierten Fahrzeitkosten verhalten (vgl. homo oeconomicus). Zur generalisierten Kostenbestimmung sei auf das anschliessende Kapitel 6.8 verwiesen.

Analog zum Erwartungswert der Fahrgeschwindigkeit (Kapitel 6.7.4) kann die mit den Zeitkostensätzen für Verfrühungen $VTTS_e$ und für Verspätungen $VTTS_l$ gewichtete eing geplante Geschwindigkeit v_p bestimmt werden. Es wird hierbei angenommen, dass der zeitliche Anteil (T_m) mit der Fahrgeschwindigkeit ohne Zusammenbrüche (v_m) mit der Zahlungsbereitschaft zur Verminderung von Verfrühungen ($VTTS_e$) und der zeitliche Anteil eines Zusammenbruchs (T_b) mit dem Kostensatz für Verspätungen ($VTTS_l$) gewichtet wird. Folglich summieren sich die beiden Gewichtungen zu 1:

$$\frac{VTTS_e \cdot T_m}{VTTS_e \cdot T_m + VTTS_l \cdot T_b} + \frac{VTTS_l \cdot T_b}{VTTS_e \cdot T_m + VTTS_l \cdot T_b} = 1 \quad .$$

Es ergibt sich somit für die eing geplante Geschwindigkeit v_p folgender Ausdruck, indem die Geschwindigkeit ohne Zusammenbruch und während des Zusammenbruchs mit dem kombinierten Zeit- und Kostenanteilen gewichtet werden:

$$v_p = \frac{VTTS_e \cdot T_m}{VTTS_e \cdot T_m + VTTS_l \cdot T_b} v_m + \frac{VTTS_l \cdot T_b}{VTTS_e \cdot T_m + VTTS_l \cdot T_b} f_{mb} \cdot v_m \quad \text{bzw.}$$

$$v_p = \left(\frac{VTTS_e + VTTS_l \cdot P_b \cdot t_b / \Delta t \cdot f_{mb}}{VTTS_e + VTTS_l \cdot P_b \cdot t_b / \Delta t} \right) \cdot v_m \quad .$$

6.8 Erwartete Kosten infolge von Zusammenbrüchen

6.8.1 Modell der generalisierten Reisezeitkosten

Das Modell verwendet folgende Definition der generalisierten Gesamtreisezeitkosten:

Unter den generalisierten Gesamtreisezeitkosten ist die Summe der theoretischen Zahlungsbereitschaften über einen Zeitraum (z. B. ein Jahr) zu verstehen, die die Nutzer des betrachteten Infrastrukturelements bereit wären zu zahlen, um Reisezeit und Schwankungen um einen bestimmten Betrag zu reduzieren.

Es soll hier ein einfaches Modell der Abfahrtszeitwahl betrachtet werden, in dem jeder Nutzer bestrebt ist, die generalisierten Kosten der Fahrt zu minimieren. Als Kostenkomponenten werden hier Reisezeit, Verfrühung und Verspätung betrachtet. Es existiert eine Zahlungsbereitschaft für die Reduktion sowohl der Reisezeit als auch der Fahrzeitunsicherheiten.

Die Zahlungsbereitschaft (VTTS) der Nutzer lässt sich z. B. anhand von Einkommen, Fahrzeug oder Fahrtweite unterscheiden (Vrtic *et al.*, 2007). Vereinfachend soll hier mit der mittleren Zahlungsbereitschaft für alle Auto- und Motorradfahrer gerechnet werden, wobei nach Zahlungsbereitschaft aufgeschlüsselte Nachfragen analog modellieren lassen. Für den Schwer- bzw. Werkverkehr sollten separate Zahlungsbereitschaften verwendet werden, die in den aktuellen Schweizer Normen (SN 641 823, VSS, 2007) aufgeführt sind, sofern Schwerverkehrsstärken für den Bemessungsabschnitt bekannt sind. Ist dies nicht der Fall, können die Werte für den mIV für alle Verkehrsteilnehmer verwendet werden, wobei die Gesamtreisezeitkosten unterschätzt werden könnte, da die Zahlungsbereitschaft bezogen auf einen Verkehrsteilnehmer für den Binnenschwerverkehr höher anzusetzen ist als für den Individualverkehr mit Autos oder Motorrädern (vgl. SN 641 823, VSS, 2007).

Neben der Zahlungsbereitschaft für eine Reduktion der mittleren Fahrzeit existiert auch eine Zahlungsbereitschaft für die Verlässlichkeit der Reisezeit. Die bei unverlässlichen Routen auftretenden Verfrühungen und Verspätungen entstehen durch nicht systematisch abgebildete Reisezeitschwankungen um einen angenommenen Wert, wobei die Schwankungen für die Verkehrsteilnehmer nicht vorhersagbar sind, deren Ausmass jedoch abgeschätzt werden kann. Allgemein entstehen durch unsichere Reisezeiten Nachteile, die in Form von generalisierten Kosten ausgedrückt werden können. Begründet liegen diese Kosten in der Planungsunsicherheit und dem entgangenen Nutzen, diese Zeiten evtl. besser nutzen zu können. Eine besondere Bedeutung kommt einer Verspätung zu. Untersuchungen haben ergeben (z. B. König,

2004), dass in der Regel Verspätungen grössere Nachteile, d. h. höhere generalisierte Kosten, erzeugen als unerwartete Verfrühungen. Eine Literaturrecherche in Chaumet *et al.* (2007) hat gezeigt, dass ein Verhältnis der Zahlungsbereitschaften für Reisezeit ($VTTS_t$) zu Verfrühung ($VTTS_e$) zu Verspätung ($VTTS_l$) von 2 : 1 : 3 angenommen werden kann (siehe auch SN 671 825, VSS, im Druck). Es ergibt sich eine Funktion der generalisierten Zeitkosten (COST) für eine Person und eine Strecke zu:

$$COST = VTTS_t \cdot t + VTTS_e \cdot \Delta t_e + VTTS_l \cdot \Delta t_l,$$

wobei t die realisierte Fahrzeit ist, die dem Erwartungswert der Fahrzeit im Sinne des gewichteten Mittels entspricht. Δt_e ist null, wenn die Person pünktlich oder später als geplant am Ziel ankommt, sonst entspricht Δt_e der Zeitspanne der Verfrühung. Analog ist Δt_l null bei Pünktlichkeit oder Verfrühung und hat sonst den Wert der Verspätungszeit. Es wird angenommen, dass die Fahrer bestrebt sind ihre generalisierten Kosten zu minimieren, wobei hier nur die Zeitkosten der Fahrt berücksichtigt werden.

6.8.2 Ansatz zur Bestimmung der Reisezeitkosten

Wie beim Erwartungswert der Fahrgeschwindigkeit (Kapitel 6.7.4) beschrieben, lässt sich die Summe der gemessenen Zeit des ungestörten Verkehrsflusses für einen gegebenen Auslastungsgrad T_m und die Summe der Zusammenbruchsdauern T_b mit der Anzahl der Intervalle bei ungestörtem Verkehrsfluss n_m , der Intervalllänge Δt , der Anzahl der Zusammenbrüche n_b' und der mittleren Dauer der Zusammenbrüche t_b die Zeiten T_m und T_b wie folgt schreiben:

$$T_m = n_m \cdot \Delta t \quad \text{und} \quad T_b = n_b' \cdot t_b, \quad \text{wobei} \quad P_b = \frac{n_b'}{n_m}.$$

Da nach Definition die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit die Anzahl der Zusammenbrüche gegenüber der Anzahl der Intervalle ohne Zusammenbrüche für einen gegebenen Auslastungsgrad ist, lässt sich der Anteil der Reisezeit im ungestörten Fluss P_e und während Zusammenbrüchen P_l darstellen:

$$P_e = \frac{T_m}{T_m + T_b} = \frac{\Delta t}{\Delta t + P_b t_b} \quad \text{und} \quad P_l = \frac{T_b}{T_m + T_b} = \frac{P_b t_b}{\Delta t + P_b t_b}.$$

Es wird angenommen, dass eine Person pünktlich oder verfrüht ankommt, wenn sie keine Verkehrszusammenbrüche erfährt und pünktlich oder verspätet ist, wenn sie einen Zusammenbruch erfährt. Es wird zudem impliziert, dass die eingeplante Fahrzeit bzw. Fahrgeschwindigkeit zwischen der mittleren Geschwindigkeit ohne Zusammenbrüche und Zusammenbruchsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Zusammenbruchswahrscheinlichkeit und Zeitkostensätzen liegt ($v_m \leq v_p \leq f_{mb} \cdot v_m$). Da ein linearer Ansatz für die Kostenkomponenten der Verfrühungen und Verspätungen gewählt wurde, lässt sich die Funktion für die mittleren generalisierten Reisezeitkosten für eine Person in der Stunde h und eine Strecke mit der Verfrühungswahrscheinlichkeit P_e und zugehörigen Verfrühungszeit Δt_e bzw. Verspätungswahrscheinlichkeit P_l und Verspätungszeit Δt_l folgendermassen formulieren:

$$COST_{p,h} = VTTS_t \cdot t_E + P_e \cdot VTTS_e \cdot \Delta t_e + P_l \cdot VTTS_l \cdot \Delta t_l$$

Hierbei ist t_E der Erwartungswert der Reisezeit. Bezogen auf einen Abschnitt der Länge s formt sich diese Gleichung mit dem Zusammenhang zwischen Strecke, Geschwindigkeit und Reisezeit ($s = v \cdot t$) um zu:

$$\frac{COST_{p,h}}{s} = VTTS_t \cdot \frac{1}{E(v)} + VTTS_e \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t + P_b t_b} \cdot \left(\frac{1}{v_p} - \frac{1}{v_m} \right) + VTTS_l \cdot \frac{P_b t_b}{\Delta t + P_b t_b} \cdot \left(\frac{1}{f_{mb} \cdot v_m} - \frac{1}{v_p} \right),$$

wobei $\Delta t_e = s \cdot \left(\frac{1}{v_p} - \frac{1}{v_m} \right)$ und $\Delta t_l = s \cdot \left(\frac{1}{f_{mb} \cdot v_m} - \frac{1}{v_p} \right)$ eingesetzt wurde.

Die Kosten für einen stündlichen Verkehrsstrom in der Stunde h und mit der Stärke Q_{60} ergibt sich für den motorisierten Individualverkehr (PVT: *private vehicle transport*) und den Schwer- bzw. Werkverkehr (HV: *heavy vehicles*) zu:

$$\frac{COST_{PVT,h}}{s} = Q_{60,h} \cdot (1 - p_{HV,h}) \cdot r_{o,h} \cdot \frac{COST_{p,PVT,h}}{s}$$

$$\frac{COST_{HV,h}}{s} = Q_{60,h} \cdot p_{HV,h} \cdot \frac{COST_{p,HV,h}}{s}$$

mit s Abschnittslänge in km
 h Index der Stunde
 $COST_{PVT,h}$ stündliche Reisezeitkosten für den mIV in der Stunde h

$COST_{HV,h}$	stündliche Reisezeitkosten für den SV in der Stunde h
$Q_{60,h}$	stündliche Verkehrsstärke in der Stunde h
$p_{HV,h}$	Schwerverkehrsanteil in der Stunde h
$r_{o,h}$	Besetzungsgrad (<i>occupation ratio</i>) des mIV in der Stunde h
$COST_{p,PVT,h}$	Reisezeitkosten einer Person im mIV (PVT: <i>private vehicle traffic</i>) in der Stunde h
$COST_{p,HV,h}$	Reisezeitkosten einer Person im SV (HV: <i>heavy vehicle</i>) in der Stunde h

Die jährlichen Gesamtreisezeitkosten ergeben sich aus der Summation über alle 8760 Stunden des Jahres. Um ein Jahr mit Schalttag zu vergleichen, ist über alle 8784 Stunden zu summieren und die Reisezeitkosten des Jahres sind mit 365/366 zu multiplizieren, um einen Bezug auf 365 Tage herzustellen.

$$\frac{COST_{tot}}{s} = \sum_{h=1}^{8760} \frac{COST_{PVT,h}}{s} + \frac{COST_{HV,h}}{s} \quad \text{bzw.}$$

$$\frac{COST_{tot}}{s} = \sum_{h=1}^{8760} Q_{60,h} \left((1 - p_{HV,h}) r_{o,h} \frac{COST_{PVT,p,h}}{s} + p_{HV,h} \frac{COST_{HV,p,h}}{s} \right) .$$

6.8.3 Bestimmung der Nutzendifferenz

Die Nutzendifferenz ergibt sich aus dem Unterschied der jährlichen Zahlungsbereitschaften der Alternativen. Auf Basis der Nutzendifferenz wird die Wirksamkeit der Alternativen bewertet. Zusätzlich kann die Nutzendifferenz noch mit den Umgestaltungskosten für eine Alternative in Relation gesetzt werden, um eine grobe Abschätzung des Kosten-Nutzenverhältnisses zu erhalten, die aber eine volle Kosten-Nutzen-Analyse nach SN 641820ff nicht ersetzen kann. Es ist für den Einzelfall abzuwägen, welche Alternative den grössten Nutzen Gewinn unter den gegebenen Randbedingungen ausweist.

7 Anwendung

Die Basis für die Bewertung eines Streckenabschnitts ist die in Kapitel 6.8.2 vorgestellte Reisezeitkostenformel, die für eine gegebene stündliche Verkehrsstärke gültig ist. Für die Beurteilung der jährlichen Reisezeitkosten müssen alle stündlichen Verkehrsstärken bekannt sein bzw. abgeschätzt werden. Liegen für einen Prognosefall keine stundenfeinen Abschätzungen vor, können die Stundenwerte über das Ganglinienverfahren (z. B. SN 640 005a, VSS 2006 oder die Nachfolgenorm) ermittelt werden, das auf durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärken (DTV) basiert und um Spitzenstundenauswertungen und Hochrechnungen von Zählwerten ergänzt werden kann. Vereinfachend können hier gleiche Verkehrsstärken gruppiert werden, so dass die Berechnung nicht für alle Stunden eines Jahres durchgeführt werden müssen.

Ziel des Ansatzes ist es, in der Genauigkeit zu skalieren, je detaillierter und spezifischer die Eingangsdaten erhoben werden können. Je nach betrachtetem Abschnitt und Massnahme bekommen unterschiedliche Grössen ein wachsendes Gewicht. Einerseits können Spitzenverkehre und deren Veränderung massgebende Grössen in der Bewertung sein, so dass es sich anbietet, diese detailliert zu ermitteln. Andererseits können verkehrsbeeinflussende Massnahmen wie z. B. Überholverbote für Lastwagen an Steigungen die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit verringern und evtl. ein weiter anhaltendes Überholverbot für Lastwagen auf einem darauf folgenden Gefälleabschnitt die Zusammenbruchsdauer vermindern, da sich Stockungen schneller auflösen können. Zur Bemessung dieses Falls bietet sich an, die Eigenheiten der Zusammenbrüche dieses Abschnitts näher zu untersuchen.

Für die Praxis bedeutend ist die Möglichkeit, mit hier vorgestellten Mittelwerten arbeiten zu können und bei Bedarf einzelne oder alle Parameter und Einflussfaktoren den Gegebenheiten entsprechend anzupassen.

7.1 Eingangsdaten

Das Konzept ist so angelegt, dass es auch mit geringem Datengenerierungsaufwand angewendet werden kann. Im einfachsten Fall müssen für die zu vergleichenden Alternativen Informationen über den Strassentyp des Abschnitts, mittleren Besetzungsgrad und durchschnittlichen täglichen Verkehr vorliegen, so dass stündliche Verkehrsstärken der Nachfrage abge-

schätzt werden können. Für alle weiteren benötigten Grössen können die oben bestimmten Mittelwerte angenommen werden, sofern keine zusätzlichen Kenntnisse vorliegen.

Je nach Aufgabenstellung können die stündlichen Verkehrsstärken mit beispielsweise dynamischen Umlegungsmethoden oder über Mikrosimulation zur Verbesserung der Genauigkeit ermittelt werden. Es kann zudem nützlich sein, Messungen und Abschätzungen der Standardabweichung der Verkehrsstärke durchzuführen (siehe Kapitel 5), die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit separat zu ermitteln und hieraus die Kapazität zu bestimmen (siehe Kapitel 6.4 und 6.5), die mittleren Geschwindigkeiten ohne und während Zusammenbrüchen zu messen (siehe Kapitel 6.7.1 bzw. 6.7.2) oder auch die mittlere Zusammenbruchsdauer separat zu erfassen (Kapitel 6.7.3). Sind abschnittsspezifische Analysen oder Abschätzungen vorhanden, werden der Erwartungswert der Fahrgeschwindigkeit (Kapitel 6.7.4) und eingeplante Fahrgeschwindigkeit (Kapitel 6.7.5) angepasst. Diese beiden Werte können jedoch auch direkt und ohne die angegebene Formel bestimmt werden, sofern Messdaten bzw. Befragungsergebnisse vorliegen.

Neben den hier angesprochenen Grössen beeinflussen die gesamten Reisezeitkosten zusätzlich noch der Anteil des Schwerverkehrs und die Zahlungsbereitschaft für Reisezeitvermindierungen und zu frühes bzw. zu spätes Ankommen.

7.2 Vorgehen

Für die Bemessung sind für alle gewählten Alternativen bzw. Massnahmen folgende Vorbereitungen durchzuführen: Die Nachfrage bzw. Verkehrsstärken sind stundenfein für alle 8760 Stunden eines durchschnittlichen oder des betrachteten Jahres im optimalen Fall mit Besetzungsgrad und Schwerverkehrsanteil zu bestimmen. Sind die Werte nicht stundenfein vorhanden, müssen sie abgeschätzt werden. Zusätzlich müssen Zahlungsbereitschaften für eine Reduzierung der Fahrzeit, des unplanmässig verfrühten und des verspäteten Ankommens festgesetzt werden. Empfohlen werden für die Schweiz die Kostensätze nach der Schweizer Norm SN 641 822a Zeitkosten im Personenverkehr (im Druck) und SN 641 823 Zeitkosten im Güterverkehr (2007). Es wird nun nach folgenden Schritten vorgegangen:

1. Bestimmung der Standardabweichung der Verkehrsstärken $sd(q)$ nach Abbildung 16 (S. 39), Tabelle 6 (S. 40) oder Formel in Kapitel 5.1 (S. 32). Soll nur eine Abschätzung nach Punkt 3.b) durchgeführt werden, so muss die Standardabweichung nicht bestimmt werden.

2. Für die drei Klassen der Schwerverkehrsanteile sind die Kapazitäten $C \sim N(\mu_C, \sigma_C)$ als Zufallsvariable (Mittelwert und Standardabweichung) zu bestimmen mit der Kapazität nach SN 641 018a (VSS, 2006) für geringe Schwerverkehrsanteile (0 - 5 %) und den Umrechnungsfaktoren nach Tabelle 11 (S. 53) oder über vergleichbare Abschnitte nach Tabelle 8 (S. 50) bis Tabelle 10 (S. 52). Soll nur eine Abschätzung nach Punkt 3.b) durchgeführt werden, so muss die Kapazität als Zufallsvariable nicht bestimmt werden.
3. Bestimmung der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit P_b für jede stündliche Verkehrsstärke über die Reservekapazität oder Abschätzung der mittleren Zusammenbruchswahrscheinlichkeit, wenn keine zusätzlichen Informationen über Verkehrsstärke und Kapazität vorliegen.
 - a) Bestimmung der Reservekapazitäten $R \sim N(\mu_R, \sigma_R)$ als Zufallsvariable nach Kapitel 6.3 (S. 43) für alle Verkehrsstärken und Bestimmung der Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten über die kumulative Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Normalverteilung mit $P_b = \Phi(-\mu_R/\sigma_R)$.
Liegen keine abschnittsspezifischen Daten für die Verteilungen der Verkehrsstärke (Q) oder Kapazität (C) vor, können direkt die Werte für mittlere Abschnitte verwendet werden (siehe b).
 - b) Direkte Abschätzung der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit P_b für einen durchschnittlichen Abschnitt mit Tabelle 12 (S. 58) und Formel in Kapitel 6.6 (S. 54) bzw. über Graphen in Abbildung 17 (S. 55) bis Abbildung 19 (S. 57).
4. Für jeden Auslastungsgrad lassen sich die mittleren Geschwindigkeiten v_m ohne Verkehrszusammenbrüche getrennt nach mIV und SV nach Abbildung 20 (S. 62) für den mIV und Abbildung 21 (S. 67) für den SV bzw. über die Parameter von Tabelle 13 (S. 65) mit der BPR-Funktion (Kapitel 6.7.1, S. 60) ermitteln, sofern keine Messungen vorliegen oder besondere Eigenschaften des Abschnitts andere Werte vermuten lassen.
5. Bestimmung der Faktoren der Geschwindigkeitsreduktion während eines Zusammenbruchs f_{mb} für alle Auslastungsgrade getrennt nach mIV und SV nach Abbildung 22 (S. 67) für den mIV und Abbildung 23 (S. 68) für den SV bzw. mit der Formel in Kapitel 6.7.2 (S. 65) und den Parametern nach Tabelle 14 (S. 66).

6. Ermittlung der mittleren Zusammenbruchsdauern t_b gemeinsam für mIV und SV nach Abbildung 25 (S. 71) bzw. Formel in Kapitel 6.7.3 (S. 68) und Parameter laut Tabelle 15 (S. 70).
7. Der Erwartungswert der Fahrzeit $E(v)$ ist getrennt nach mIV und SV für alle Auslastungsgrade nach der Formel in Kapitel 6.7.4 (S. 71) zu bestimmen, falls keine zusätzlichen Informationen zur Verfügung stehen.
8. Die von den Fahrern eingeplante Fahrgeschwindigkeit v_p ist nach mIV und SV getrennt für alle Auslastungsstufen mit der Formel aus Kapitel 6.7.5 (S. 73) bestimmt werden, sofern keine Befragungsdaten oder besondere Eigenschaften eines Abschnitts bekannt sind.

Mit den ermittelten Werten können die jährlichen Reisezeitkosten $COST_{tot}$ in CHF für einen gegebenen Abschnitt der Länge s mit Hilfe der Formel aus Kapitel 6.8.2 (S. 75) bestimmt werden, wobei über die Stunden eines Jahres summiert wird:

$$\frac{COST_{tot}}{s} = \sum_{h=1}^{8760} Q_{60,h} \left((1 - p_{HV,h}) \cdot r_{o,h} \frac{COST_{p,PVT,h}}{s} + p_{HV,h} \frac{COST_{p,HV,h}}{s} \right) .$$

mit	s	Abschnittslänge in km
	h	Index der Stunde
	$Q_{60,h}$	stündliche Verkehrsstärke in der Stunde h
	$p_{HV,h}$	Scherverkehrsanteil in der Stunde h
	$r_{o,h}$	Besetzungsgrad (occupation ratio) des mIV in der Stunde h
	$COST_{p,PVT,h}$	Reisezeitkosten einer Person im mIV (PVT: private vehicle traffic) in der Stunde h
	$COST_{p,HV,h}$	Reisezeitkosten einer Person im SV (HV: heavy vehicle) in der Stunde h

und mit den Zahlungsbereitschaften einer Person separat für den motorisierten Individualverkehr (PVT) und Schwerverkehr (HV):

$$\frac{COST_{p,h}}{s} = VTTS_t \cdot \frac{1}{E(v)} + VTTS_e \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t + P_b t_b} \cdot \left(\frac{1}{v_p} - \frac{1}{v_m} \right) + VTTS_l \cdot \frac{P_b t_b}{\Delta t + P_b t_b} \cdot \left(\frac{1}{f_{mb} \cdot v_m} - \frac{1}{v_p} \right) ,$$

mit	$COST_{p,h}$	stündliche Reisezeitkosten für eine Person in der Stunde h
	$VTTS_t$	stündliche Reisezeitkosten für den SV in der Stunde h

$VTTS_e$	stündliche Verkehrsstärke in der Stunde h
$VTTS_l$	Schwerverkehrsanteil in der Stunde h
$E(v)$	Besetzungsgrad (<i>occupation ratio</i>) des mIV in der Stunde h (Kapitel 6.7.4, S. 71)
Δt	Konstante der Intervalllänge: 1/12 h (5 Minuten)
P_b	Zusammenbruchswahrscheinlichkeit (Kapitel 6.6.1, S. 58)
t_b	Zusammenbruchsdauer in Stunden (Kapitel 6.7.3, S. 68)
v_p	eing geplante Fahrgeschwindigkeit (Kapitel 6.7.5, S. 73)
v_m	mittlere Fahrgeschwindigkeit ohne Zusammenbrüche (Kapitel 6.7.1, S. 60)
f_{mb}	Geschwindigkeitsreduktionsfaktor während eines Zusammenbruchs (Kapitel 6.7.2, S. 65)

7.3 Beispiel

Als Anwendungsbeispiel wird die Zählstelle Mattstetten (Nr. 32) auf der A1 Richtung Zürich betrachtet wobei die stündlichen Zählwerte der automatischen Verkehrszählungen des Bundesamts für Strassen (ASTRA, 2005) für das Jahr 2005 verwendet werden. Für den zweispurigen Autobahnabschnitt bei Mattstetten wird eine Kapazität von 4000 Fahrzeugen pro Stunde nach SN 640 018a (VSS, 2006) angenommen. Es werden die Gesamtreisezeitkosten im Sinne der theoretischen Zahlungsbereitschaft (Definition Kapitel 6.8.1) für den status quo im Jahr 2005 und für einen Planfall bestimmt, der eine Mitbenutzung des Seitenstreifens im Staufall vorsieht, wobei angenommen werden soll, dass sich hierdurch die Staudauern um 30 % reduzieren. Für alle Zeiten wird vereinfachend ein Besetzungsgrad von $r_0=1.55$ für den motorisierten Individualverkehr angenommen. Die Zahlungsbereitschaften für mIV und Schwerverkehr werden für das Basisjahr 2005 verwendet. Exemplarisch werden im Folgenden die Parameter und stündlichen Reisezeitkosten für die 10. (hier mit a bezeichnet) und 17. Stunde (mit b bezeichnet) am Freitag den 1. April 2005 bestimmt. Für das Beispiel werden folgende Werte benutzt:

$C_{VSS} = 4000 \text{ Fz/h}$ bei Schwerverkehrsanteil unter 5 %, d. h. maximale Kapazität

$Q_{60,a} = 2070 \text{ Fz/h}$ ($r_{60,a} = 51.75 \%$) $SV_a = 14 \%$

$Q_{60,b} = 3845 \text{ Fz/h}$ ($r_{60,b} = 96.13 \%$) $SV_b = 6 \%$

mIV: $VTTS_t = 19.74$, $VTTS_e = 9.87$, $VTTS_l = 29.61 \text{ CHF/h} \cdot \text{Pers.}$

SV: $VTTS_t = 53.72$, $VTTS_e = 23.86$, $VTTS_l = 80.58 \text{ CHF/h} \cdot \text{Fz.}$

Anmerkung: Die mIV-Werte aus der SN 641 822 (VSS, 2007) wurden mit dem Nettolohnwachstum von 1.876 % vom Jahr 2003 für das Jahr 2005 berechnet (Index 2003: 2076, Index 2005: 2115). Die SV-Werte für das Jahr 2005 setzen sich aus den Zeitkostenwerten der Verloader (SN 641 823, VSS, 2007) und zusätzlich den Betriebskosten (SN 641 827, im Druck) für Sachtransportfahrzeuge zusammen.

Es wird nach den Schritten aus Kapitel 7.2 vorgegangen:

1. Bestimmung der Standardabweichung der Verkehrsstärken $sd(q)$ nach Abbildung 16, Tabelle 6 oder Formel in Kapitel 5.1. Mit der Näherungsformel:

$$sd(r_5) = -0.5166 \cdot r_{60}^4 + 1.0046 \cdot r_{60}^3 - 0.6864 \cdot r_{60}^2 + 0.2561 \cdot r_{60} + 0.0125$$

ergibt sich $sd(q_a) = 253$ Fz/h $sd(q_b) = 302$ Fz/h und mit linearer Interpolation der Werte aus Tabelle 6 ergeben sich folgende Werte, die in den nächsten Schritten verwendet werden:

$$sd(q_a) = 251 \text{ Fz/h}$$

$$sd(q_b) = 301 \text{ Fz/h}$$

2. Für die drei Klassen der Schwerverkehrsanteile sind die Kapazitäten $C \sim N(\mu_C, \sigma_C)$ als Zufallsvariable (Mittelwert und Standardabweichung) zu bestimmen mit der Kapazität nach SN 641 018a (VSS, 2006) für geringe Schwerverkehrsanteile (0 - 5 %) und den Umrechnungsfaktoren nach Tabelle 11. Wenn, wie in diesem Fall Schätzungen der Kapazität vorliegen, sollten diese Werte genutzt werden (Tabelle 8 bis Tabelle 10). In diesem Beispiel wird zur Veranschaulichung jedoch mit Umrechnungsfaktoren nach Tabelle 11 gerechnet, wobei die Medianwerte mit der Basiskapazität C_{VSS} multipliziert werden:

$$5\text{-}15\%: \mu_C = 1.2885 \cdot 4000 = 5154 \text{ Fz/h}, \quad \sigma_C = 0.1805 \cdot 4000 = 722 \text{ Fz/h}$$

3. Bestimmung der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit P_b für jede stündliche Verkehrsstärke über die Reservekapazität oder Abschätzung der mittleren Zusammenbruchswahrscheinlichkeit, wenn keine zusätzlichen Informationen über Verkehrsstärke und Kapazität vorliegen.

- a) Bestimmung der Reservekapazitäten $R \sim N(\mu_R, \sigma_R)$ als Zufallsvariable nach Kapitel 6.3 für alle Verkehrsstärken:

$$SV_a: 5 - 15\% \quad \mu_{R,a} = 5154 - 2070 = 3084 \text{ Fz/h}$$

$$\sigma_{R,a} = \sqrt{722^2 + 251^2} = 764 \text{ Fz/h}$$

$$\begin{aligned} \text{SV}_b: 5 - 15 \% \quad \mu_{R,b} &= 5154 - 3845 = 1309 \text{ Fz/h} \\ \sigma_{R,b} &= \sqrt{722^2 + 301^2} = 782 \text{ Fz/h} \end{aligned}$$

Bestimmung der Zusammenbruchswahrscheinlichkeiten über die kumulative Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Normalverteilung mit $P_b = \Phi(-\mu_R/\sigma_R)$:

$$P_{b,a} = \Phi(-4.035) = 0.003 \%$$

$$P_{b,b} = \Phi(-1.674) = 4.710 \%$$

- b) Direkte Abschätzung der Zusammenbruchswahrscheinlichkeit P_b für einen durchschnittlichen Abschnitt mit Tabelle 12 und Formel in Kapitel 6.6 bzw. über Graphen in Abbildung 17 bis Abbildung 19. Die Ergebnisse sind die gleichen wie bei 3.a), da hier mit Mittleren Werten für die Standardabweichung der Verkehrsstärken und Umrechnungsfaktoren für die Kapazität gerechnet wurde.
4. Ermittlung der mittleren Geschwindigkeiten v_m ohne Verkehrszusammenbrüche für mIV und SV nach Abbildung 20 für den mIV bzw. Abbildung 21 für den SV, alternativ über die Parameter von Tabelle 13 mit der BPR-Funktion (Kapitel 6.7.1), wie hier gezeigt:
- $$v_m = \frac{v_0}{1 + \alpha r_{60}^\beta}$$
- | | | | | | |
|---------------|---|-------------|--------------|---|------------|
| $v_{m,mIV,a}$ | = | 112.81 km/h | $v_{m,SV,a}$ | = | 91.88 km/h |
| $v_{m,mIV,b}$ | = | 98.20 km/h | $v_{m,SV,b}$ | = | 85.84 km/h |
5. Bestimmung der Faktoren der Geschwindigkeitsreduktion während eines Zusammenbruchs f_{mb} für mIV und SV nach Abbildung 22 für den mIV und Abbildung 23 für den SV bzw. mit der Formel in Kapitel 6.7.2 und den Parametern nach Tabelle 14, wie hier gezeigt:
- $$f_{mb} = c + \delta \cdot r_{60} + \frac{\gamma}{1 + e^{\alpha \cdot \beta \cdot r_{60}}}$$
- | | | | | | |
|----------------|---|--------|---------------|---|--------|
| $f_{mb,mIV,a}$ | = | 0.4587 | $f_{mb,SV,a}$ | = | 0.5479 |
| $f_{mb,mIV,b}$ | = | 0.5243 | $f_{mb,SV,b}$ | = | 0.5830 |
6. Ermittlung der mittleren Zusammenbruchsdauern t_b gemeinsam für mIV und SV nach Abbildung 25 bzw. Formel in Kapitel 6.7.3 und Parameter laut Tabelle 15, wie hier gezeigt:

$$t_b = c + \frac{\gamma}{1 + e^{\alpha - \beta \cdot a_{60}}}$$

$$t_{b,a} = 0.7055 \text{ h}$$

$$t_{b,b} = 0.7072 \text{ h}$$

7. Der Erwartungswert der Fahrgeschwindigkeit $E(v)$ berechnet nach der Formel in Kapitel 6.7.4 für mIV und SV mit $\Delta t = 1/12 \text{ h}$ (Konstante: 5 Minuten) wie folgt:

$$E(v) = \left(\frac{1 + P_b \cdot t_b / \Delta t \cdot f_{mb}}{1 + P_b \cdot t_b / \Delta t} \right) \cdot v_m$$

$$E(v)_{mIV,a} = 112.80 \text{ km/h} \quad E(v)_{SV,a} = 91.87 \text{ km/h}$$

$$E(v)_{mIV,b} = 84.86 \text{ km/h} \quad E(v)_{SV,b} = 75.62 \text{ km/h}$$

8. Bestimmung der von den Fahrern eingeplante Fahrgeschwindigkeit v_p für den mIV und dem SV mit den Zahlungsbereitschaften für die Vermeidung von Verfrühungen zu Verspätungen im Verhältnis von $VTTS_e : VTTS_l = 1 : 3$ über die Formel aus Kapitel 6.7.5:

$$v_p = \left(\frac{VTTS_e + VTTS_l \cdot P_b \cdot t_b / \Delta t \cdot f_{mb}}{VTTS_e + VTTS_l \cdot P_b \cdot t_b / \Delta t} \right) \cdot v_m$$

$$v_{p,mIV,a} = 112.77 \text{ km/h} \quad v_{p,SV,a} = 91.85 \text{ km/h}$$

$$v_{p,mIV,b} = 72.73 \text{ km/h} \quad v_{p,SV,b} = 66.33 \text{ km/h}$$

Die Fahrzeitkosten im Sinne der Zahlungsbereitschaft der einzelnen Stunden berechnen sich über die Formel aus Kapitel 6.8.2 für eine allgemeine Streckenlänge s zu:

$$\frac{COST_{tot}}{s} = \sum_{h=1}^{8760} Q_{60,h} \left((1 - p_{HV,h}) \cdot r_{o,h} \cdot \frac{COST_{p,PVT,h}}{s} + p_{HV,h} \cdot \frac{COST_{p,HV,h}}{s} \right) \text{ und}$$

$$\frac{COST_{p,h}}{s} = VTTS_l \cdot \frac{1}{E(v)} + VTTS_e \cdot \frac{\Delta t}{\Delta t + P_b t_b} \cdot \left(\frac{1}{v_p} - \frac{1}{v_m} \right) + VTTS_l \cdot \frac{P_b t_b}{\Delta t + P_b t_b} \cdot \left(\frac{1}{f_{mb} \cdot v_m} - \frac{1}{v_p} \right)$$

Als Zwischenergebnis für die Zahlungsbereitschaft einer Person für den mIV (PVT) und SV (HV), wobei hier für SV und mIV die gleichen Zeitkostensätze angenommen wurden, ergibt sich bezogen auf einen Abschnitt der Länge s in km:

$$\begin{aligned} \text{COST}_{p,\text{mIV},a} &= 0.1751 \cdot s \text{ CHF} & \text{COST}_{p,\text{SV},a} &= 0.5850 \cdot s \text{ CHF} \\ \text{COST}_{p,\text{mIV},b} &= 0.3057 \cdot s \text{ CHF} & \text{COST}_{p,\text{SV},b} &= 0.8816 \cdot s \text{ CHF} \end{aligned}$$

Bezogen auf eine Stunde bei gegebenen Verkehrsfluss und Schwerverkehrsanteilen ergibt sich folgende stündliche Zahlungsbereitschaft:

$$\begin{aligned} \text{Mit: } \frac{\text{COST}_{PVT,h}}{s} &= Q_{60,h} \cdot (1 - p_{HV,h}) \cdot r_{o,h} \cdot \frac{\text{COST}_{p,PVT,h}}{s} \quad \text{und} \\ \frac{\text{COST}_{HV,h}}{s} &= Q_{60,h} \cdot p_{HV,h} \cdot \frac{\text{COST}_{p,HV,h}}{s} \end{aligned}$$

ergibt sich:

$$\begin{aligned} \text{COST}_{\text{mIV},a} &= 483.9 \cdot s \text{ CHF} & \text{COST}_{\text{SV},a} &= 167.9 \cdot s \text{ CHF} \\ \text{COST}_{\text{mIV},b} &= 1712.7 \cdot s \text{ CHF} & \text{COST}_{\text{SV},b} &= 203.7 \cdot s \text{ CHF} . \end{aligned}$$

Werden alle Stundenwerte des Jahres analog zu den hier gezeigten zwei Stunden (a, b) bestimmt und über das Jahr aufsummiert mit:

$$\frac{\text{COST}_{\text{tot}}}{s} = \sum_{h=1}^{8760} \frac{\text{COST}_{PVT,h}}{s} + \frac{\text{COST}_{HV,h}}{s} ,$$

ergibt sich die jährlichen Gesamtreisezeitkosten des Jahres 2005 an diesem Abschnitt zu $\text{COST}_{\text{tot}}/s = 4.224 \text{ Mio CHF/km}$.

7.4 Alternativenvergleich

Für die Bewertung des Zustandes aus dem Beispiel (7.3) wird als Alternative eine Mitbenutzung des Seitenstreifens als zusätzliche Fahrbahn im Staufall vorgeschlagen. Es soll hier angenommen werden, dass sich durch diese Massnahme die Staudauern um 30 % reduzieren. Alle übrigen Parameter bleiben gleich. Somit treten gegenüber dem Beispiel Änderungen ab Punkt 6 auf:

6. Ermittlung der mittleren Zusammenbruchsdauern t_b gemeinsam für mIV und SV nach Abbildung 25 bzw. Formel in Kapitel 6.7.3 und Parameter laut Tabelle 15, wie hier gezeigt. Es wird nun mit 70 % der durchschnittlichen Staudauer ohne Massnahme gerechnet:

$$t_{b,a} = 0.4939 \text{ h} = 0.7 \cdot 0.7055 \text{ h}$$

$$t_{b,b} = 0.4950 \text{ h} = 0.7 \cdot 0.7072 \text{ h}$$

7. Der Erwartungswert der Fahrzeit $E(v)$ berechnet nach der Formel in Kapitel 6.7.4 für mIV und SV mit $\Delta t = 1/12 \text{ h}$ (Konstante: 5 Minuten) wie folgt:

$$E(v)_{\text{mIV},a} = 112.80 \text{ km/h} \quad E(v)_{\text{SV},a} = 91.87 \text{ km/h}$$

$$E(v)_{\text{mIV},b} = 87.98 \text{ km/h} \quad E(v)_{\text{SV},b} = 78.02 \text{ km/h}$$

Die erwarteten Fahrgeschwindigkeiten sind für geringe Auslastungen im Fall a nahezu identisch, da die Zusammenbruchswahrscheinlichkeit sehr gering ist. Im Fall b ergibt sich für einen höheren Auslastungsgrad eine Erhöhung der erwarteten Fahrgeschwindigkeit um 3.7 % für den mIV und 3.2 % für den SV.

8. Bestimmung der von den Fahrern eingeplante Fahrgeschwindigkeit v_p für den mIV und dem SV mit den Zahlungsbereitschaften für die Vermeidung von Verfrühungen zu Verspätungen im Verhältnis von $VTTS_e : VTTS_l = 1 : 3$ über die Formel aus Kapitel 6.7.5:

$$v_{p,\text{mIV},a} = 112.78 \text{ km/h} \quad v_{p,\text{SV},a} = 91.86 \text{ km/h}$$

$$v_{p,\text{mIV},b} = 76.88 \text{ km/h} \quad v_{p,\text{SV},b} = 69.51 \text{ km/h}$$

Analog zu den erwarteten Fahrgeschwindigkeiten gibt es keine signifikanten Unterschiede für den Fall a. Im Fall b wird die reduzierte Fahrzeit im Staufall stärker bewertet, so dass sich die eingeplante Geschwindigkeit für den mIV um 5.7 % und für den SV um 4.8 % steigt.

Die Zahlungsbereitschaft einer Person für den mIV (PVT) und SV (HV) ergibt sich für die Alternative zu:

$$\text{COST}_{p,\text{mIV},a} = 0.1751 \cdot s \text{ CHF} \quad \text{COST}_{p,\text{SV},a} = 0.5849 \cdot s \text{ CHF}$$

$$\text{COST}_{p,\text{mIV},b} = 0.2969 \cdot s \text{ CHF} \quad \text{COST}_{p,\text{SV},b} = 0.8607 \cdot s \text{ CHF}$$

Bezogen auf eine Stunde bei gegebenen Verkehrsfluss und Schwerverkehrsanteilen ergibt sich folgende stündliche Zahlungsbereitschaft:

$$\text{COST}_{\text{mIV},a} = 483.9 \cdot s \text{ CHF} \quad \text{COST}_{\text{SV},a} = 58.5 \cdot s \text{ CHF}$$

$$\text{COST}_{\text{mIV},b} = 1662.9 \cdot s \text{ CHF} \quad \text{COST}_{\text{SV},b} = 86.7 \cdot s \text{ CHF}$$

Für das Jahr 2005 ergäbe sich bei Mitbenutzung des Seitenstreifens im Staufall eine Summe der Zahlungsbereitschaften von $\text{COST}_{\text{tot/s}} = 4.195 \text{ Mio CHF/km}$.

Die Nutzendifferenz der jährlichen Zahlungsbereitschaften beträgt rund 28'500 CHF pro Kilometer und Jahr oder bezogen auf einen Streckenabschnitt von 15 km etwa 427'500 CHF pro Jahr für den Bereich um die Zählstelle Mattstetten in Richtung Zürich.

8 Ausblick

Das hier vorgestellte Verfahren erlaubt dem Entwerfer bei der Bemessung den gesamten Verlauf der Ganglinie zu berücksichtigen und ihn zu bewerten, indem er realistischerweise sowohl die Varianz der Verkehrsstärke als auch der Kapazität berücksichtigt. Der zusätzliche Aufwand ist überschaubar und durch die gewonnen Einsichten mehr als gerechtfertigt. Das Verfahren erlaubt darüber hinaus nicht nur die Bewertung baulicher Veränderungen, sondern auch betrieblicher Massnahmen, die bisher nur adhoc bewertet werden konnten.

Die benötigten empirischen Zusammenhänge wurden auf der Grundlage aller relevanten Schweizer Daten erstellt, die notwendigen Verfahren teilweise neu entwickelt. Es zeigt sich aber, dass diese Basis in Teilen zu klein ist, so dass die Eigenschaften der spezifischen Messstellen stark spürbar werden. Es ist daher notwendig, in den ersten Jahren der Anwendung weitere Erfahrungen zu gewinnen, respektive die vorhandenen Messungen kontinuierlich auszuwerten. Vergleichende Studien in den Nachbarländern wären ebenfalls wünschenswert.

Mit diesem Verfahren verfügt das Verkehrswesen über einen Ansatz, der an der Front der Entwicklungen steht, und die Risiken besser berücksichtigt als die bisherige inkonsistente Praxis. Die Erfahrungen der Anwendung werden zeigen, wo seine Stärken und Schwächen sind. Eine Überprüfung und allfällige Überarbeitung sollte für den Zeitraum ab 2015 eingeplant werden.³

³ Für erste Erfahrungen siehe Sharma und Axhausen (2009)

9 Literatur

- Antusch, G. (1981) Beiträge zur Problematik der Bemessung von Strassen Teil I, *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, **320**, Bundesministerium für Verkehr, Bonn-Bad Godesberg.
- Bernard, M., J.K. Hackney and K.W. Axhausen (2006) Correlation of link travel speeds, Vortrag, *6th Swiss Transport Research Conference*, Ascona, März 2006.
- Bundesamt für Strassen, ASTRA (2005) *Automatische Strassenverkehrszählung*, **2005**, ASTRA, Bern.
- Bundesamt für Strassenwesen (1999) Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen (MARZ), Bergisch Gladbach.
- Brilon, W. und K. Lemke (1999) Strassenquerschnitte in Tunneln, Schlussbericht zum Forschungsauftrag FE-Nr. 02163/1995/FR im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum, Bochum.
- Brilon, W. und M. Ponzlet (1996) Auswirkungen von zeitlich veränderlichen Leistungsfähigkeiten, *Schriftenreihe Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, **718**, Bundesministerium für Verkehr, Bonn.
- Brilon, W. und N. Wu (2001) Capacity at unsignalized intersections derived by conflict technique, *Transportation Research Record*, **1776**, 82-90, Washington, D. C.
- Brilon, W. und T. Miltner (2003) Verkehrsqualität unterschiedlicher Verkehrsteilnehmerarten an Knotenpunkten ohne Lichtsignalanlage, *Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, Verkehrstechnik*, **V100**, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven.
- Brilon, W. und H. Zurlinden (2003) Überlastungswahrscheinlichkeiten und Verkehrsleistung als Bemessungskriterium für Strassenverkehrsanlagen, *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, **870**, Bundesministerium für Verkehr, Bonn.
- Brilon, W. und H. Zurlinden (2004) Kapazität von Strassen als Zufallsgrösse, *Strassenverkehrstechnik*, **48** (4) 164-172
- Bureau of Public Roads (1950) *Highway Capacity Manual (1950)*, United States Government Printing Office, Washington.
- Chaumet, R., P. Locher, F. Bruns, D. Imhof, M. Bernard und K.W. Axhausen (2007) Verfahren zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeit in Evaluationen, Schlussbericht VSS 2002/002, *Schriftenreihe*, **1176**, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern.
- Cohen, S. (1983) Méthodes d'estimation de la capacité des autoroutes, *rapport de recherche* **62**, INRETS, Arcueil.
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V., DVWK (1989) Wahl des Bemessungshochwassers, *Merkblätter zur Wasserwirtschaft*, **209**, Verlag Paul Parey, Hamburg.

- Dietrich, K. (1964) Zulässige Belastung, Forschungsauftrag: Massgebender Verkehr und zulässige Belastung, 1 Teilbericht, Institut für Orts-, Regional- und Landesplanung, ETH, Zürich.
- Feinberg, E. A. und D. Genethliou (2003) Load forecasting – chapter 1, <http://www.ams.sunysb.edu/~feinberg/public/lf.pdf>.
- Forschungsgesellschaft für Strassen und Verkehrswesen, FGSV (1997) *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Strassen, EWS 1997, Aktualisierung der RAS-W 86*, FGSV, Köln.
- Forschungsgesellschaft für Strassen und Verkehrswesen, FGSV (2001) *Handbuch für die Bemessung von Strassenverkehrsanlagen* (HBS 2001), FGSV, Köln.
- Gulvanessian, H., J.-A. Calgaro und M. Holický (2002) *Designers' guide to EN 1990, Eurocode: Basis of structural design*, Thomas Telford Publishing, London.
- Hall, F. L., V. F. Hurdle und J. H. Banks (1992) Synthesis of recent work on the nature of speed-flow and flow-occupancy (or density) relationships on freeways, *Transportation Research Record*, **1365**, 12-18.
- Harders, J. (1968) Die Leistungsfähigkeit nicht signalgeregelter städtischer Verkehrsknoten, *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, **76**, Bundesminister für Verkehr, Abt. Strassenbau, Bonn.
- Hempsey, L. J. und S. Teply (1999) Redesigning the design hour for Alberta highways, *ITE Journal*, **69** (5) 43-48.
- Highway Research Board (1965) *Highway Capacity Manual, HCM (1965), Special Report, 87*, HRB, Washington D.C.
- Kalenda, R. (1990) Zur Quantifizierung der hydraulischen Versagenswahrscheinlichkeit beweglicher Bauwerke, Dissertation, Technische Universität München, München.
- Keller, H. und T. Sachse (1992) Einfluss des Bezugsintervalls in Fundamentaldiagrammen auf die zutreffende Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Strassenabschnitten, *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, **614**, Bundesministerium für Verkehr, Bonn.
- Kimber, R. M. und R. D. Coombe (1980) The capacity of major/minor priority junctions, *Supplementary Report*, **582**, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- König, A. und K.W. Axhausen (2004) Zeitkostenansätze im Personenverkehr, Schlussbericht für SVI 2001/534, *Schriftenreihe*, **1065**, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern.
- Kyte, M., Z. Tian, Z. Mir, Z. Hamedmansoor, W. Kittelson, M. Vandehey, B. Robinson, W. Brilon, L. Bondzio, N. Wu, R. Troutbeck (1996) Capacity and level of service at unsignalised intersections, *NCRHP Report*, **3-46**, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C.
- Matt, R. L. und L. Elefteriadou (2001) Defining freeway capacity as function of breakdown probability, *Transportation Research Record*, **1776**, 43-51, Washington, D.C.
- May, A. D. und H. Keller (1968) Evaluation of single- and two-regime traffic flow models Institute of Transportation and Traffic Engineering, University of California, Berkeley.

- Minderhoud, M. M., H. Botma und P. H. L. Bovy (1996) An assessment of roadway capacity estimation methods, Delft University of Technology, Delft.
- Ponzlet, M (1996) Auswirkungen von systematischen und umfeldbedingten Schwankungen des Geschwindigkeitsverhaltens und deren Beschreibung in Verkehrsflussmodellen, *Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswesen*, **16**, Ruhr-Universität, Bochum.
- Rinne, H. (2003) *Taschenbuch der Statistik*, Verlag Harri Deutsch GmbH, Frankfurt am Main.
- Rubin, M. (2004) Online-Verkehrsdatenbank, Projektbeschrieb / User-Informationen, Bundesamt für Strassen ASTRA, Bern.
- Sharma, S. und K.W. Axhausen (2009) Design diagrams for road infrastructure elements: High capacity roads, *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, **560**, IVT, ETH Zürich, Zürich.
- Transportation Research Board (2000) *Highway Capacity Manual (2000)*, National Research Council, Washington D. C.
- van Aerde, M. (1995) A single regime speed-flow-density relationship for freeways and arterials, Vortrag, *74th Transportation Research Board Annual Meeting*, Washington D. C., Januar 1995.
- VSS (2009) SN 641 826 *Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Betreiberkosten*, EK 1.02, VSS, Zürich.
- VSS (2009) SN 641 826 *Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Externe Kosten*, EK 1.02, VSS, Zürich.
- VSS (2008) SN 641 826 *Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Betriebs- und Unterhaltskosten von Strassen*, EK 2.02, VSS, Zürich.
- VSS (2007) SN 641 823 *Zeitkosten im Güterverkehr*, EK 2.02, VSS, Zürich
- VSS (2006) SN 641 821 *Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Diskontsatz*, EK 2.02, VSS, Zürich.
- VSS (2006) SN 641 820 *Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Grundnorm*, EK 2.02, VSS, Zürich
- VSS (Im Druck) SN 641 822a *Zeitkosten im Personenverkehr: Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr*, EK 2.02, VSS, Zürich.
- VSS (2009) SN 641 826 *Kosten-Nutzen-Analysen im Strassenverkehr: Zuverlässigkeit*, EK 1.02, VSS, Zürich. (Chaumet, Bruns, Locher, Bernard and Axhausen)
- Vrtic, M., N. Schüssler, A. Erath and K.W. Axhausen (2007) Route, mode and departure time choice behaviour in the presence of mobility pricing, Vortrag, *86th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., January 2007.
- Werdin, H., H. Honermann, R. Laube und I. Belopitov (2006) Verkehrsqualität und Leistungsfähigkeit auf Autobahnen, Forschungsauftrag VSS 2000/337, *Schlussbericht* in Druck, Bundesamt für Strassen, UVEK, Bern.
- Willis, H. L. (2002) *Spatial Electric Load Forecasting*, 2nd edition, Marcel Dekker, Inc., New York.

Zackor, H., R. Kühne und W. Balz (1988) Untersuchungen des Verkehrsablaufes im Bereich der Leistungsfähigkeit und bei instabilem Fluss, *Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik*, **524**, BMV, Bonn.

Anhang

A 1 Übersicht der Fundamentaldiagramme

Übersicht der Fundamentaldiagramme von den verwendeten Zählstellen nach Tabelle 3 und Tabelle 4.

Abbildung 26 Zählstation (23, 0): Mattstetten, Richtung Zürich

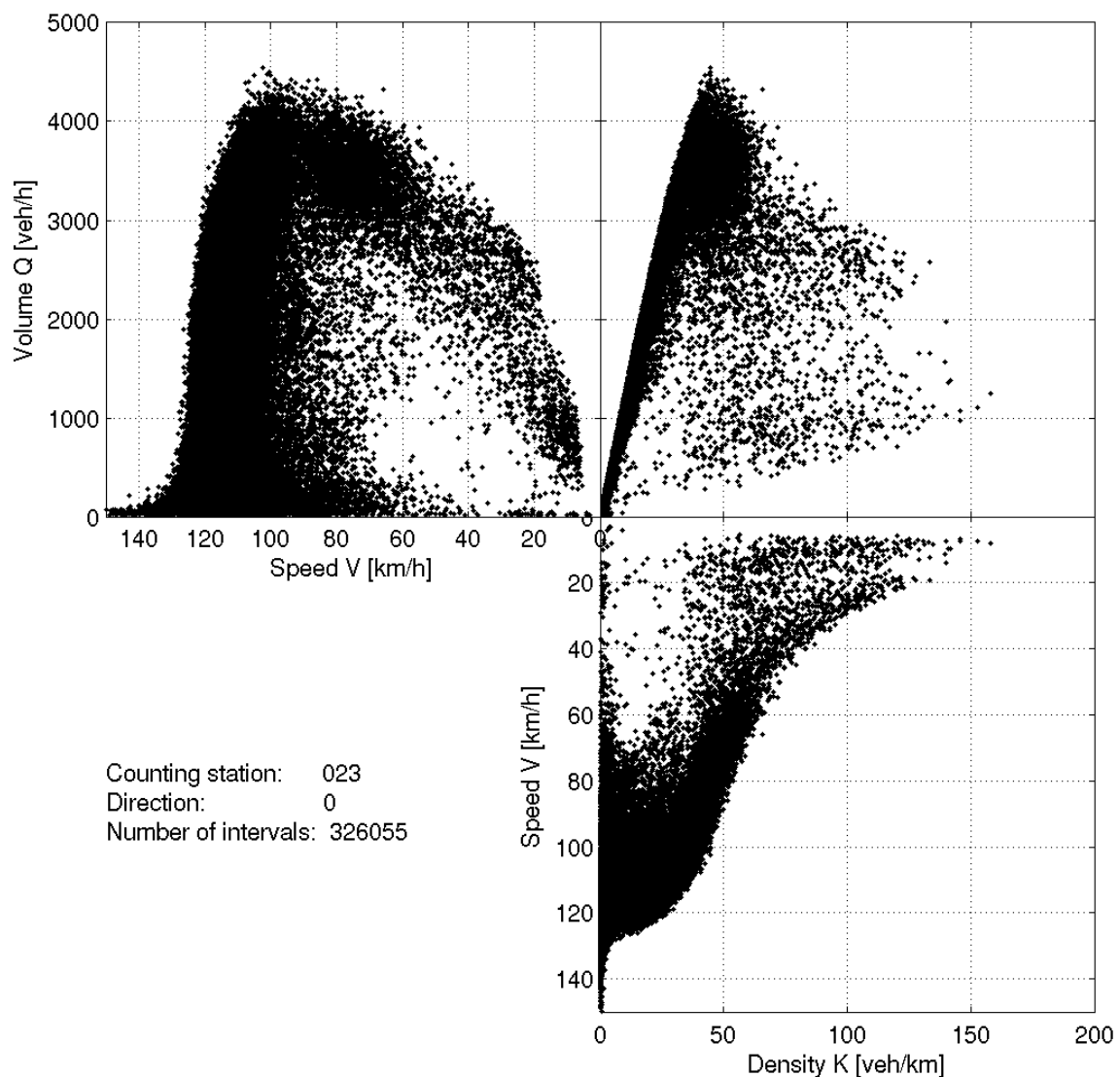


Abbildung 27 Zählstation (23, 1): Mattstetten, Richtung Bern

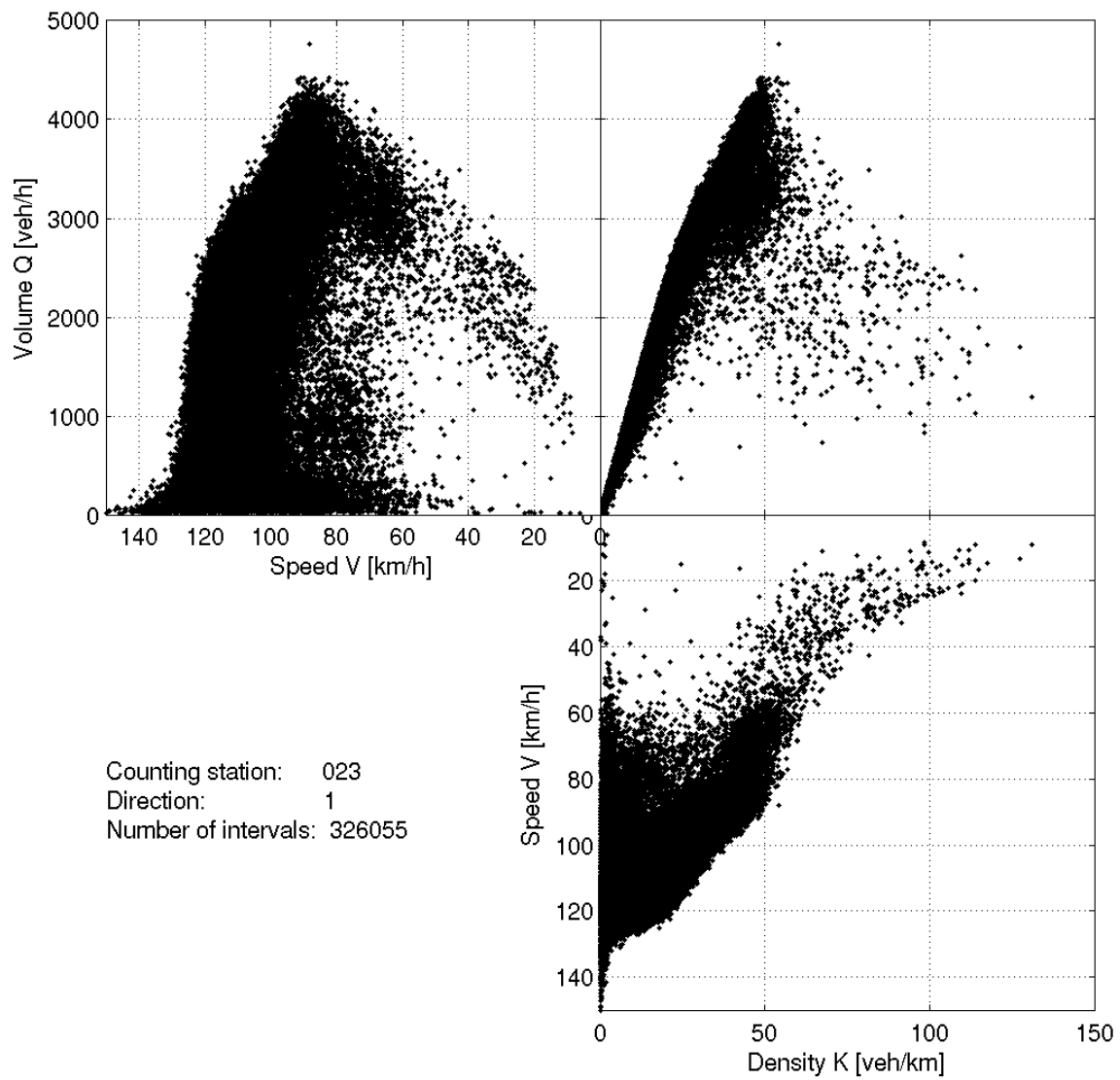


Abbildung 28 Zählstation (32, 0): Deitingen, Richtung Zürich

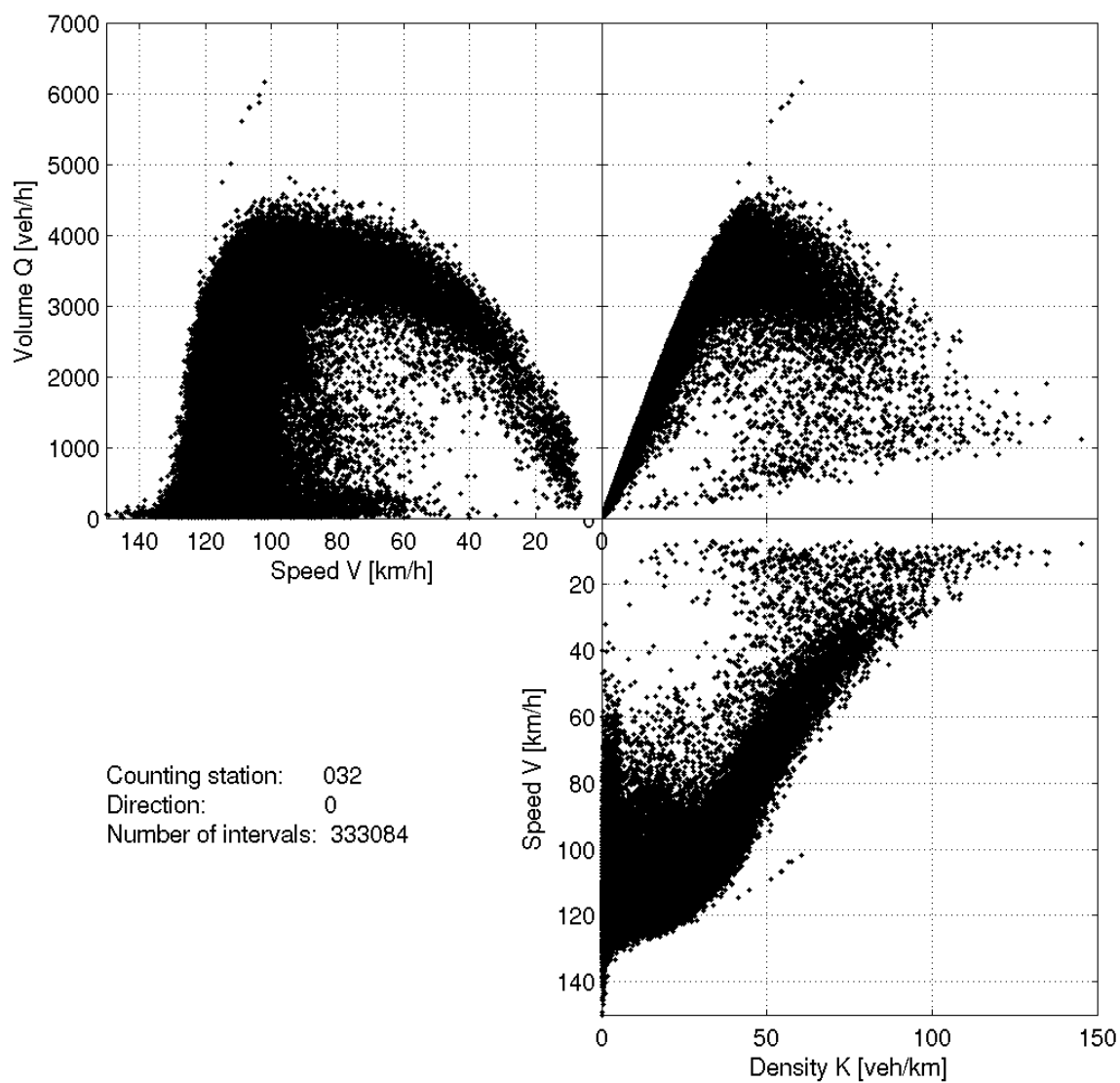


Abbildung 29 Zählstation (32, 1): Deitingen, Richtung Bern

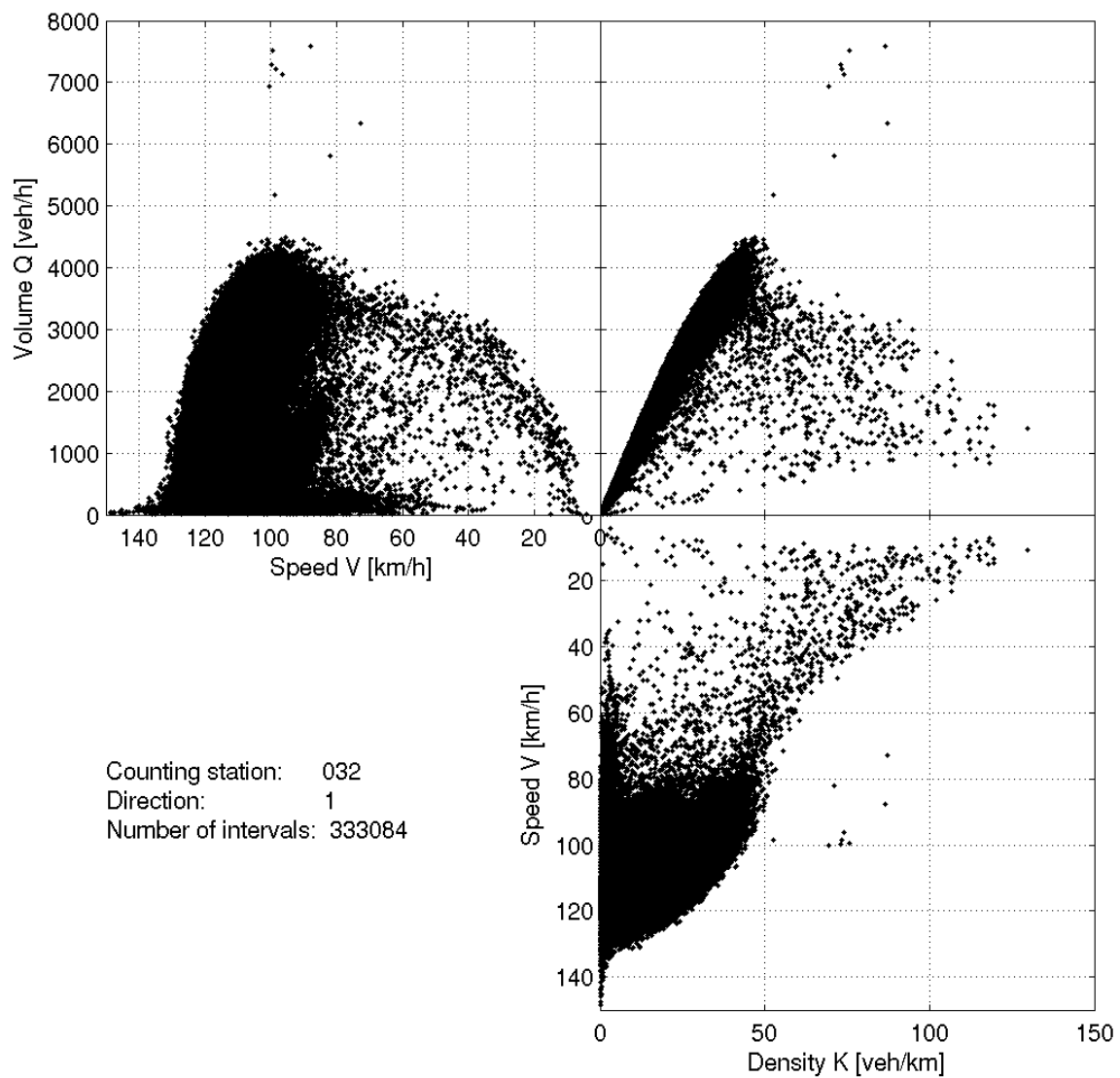


Abbildung 30 Zählstation (33, 0): Eptingen, Richtung Härkingen

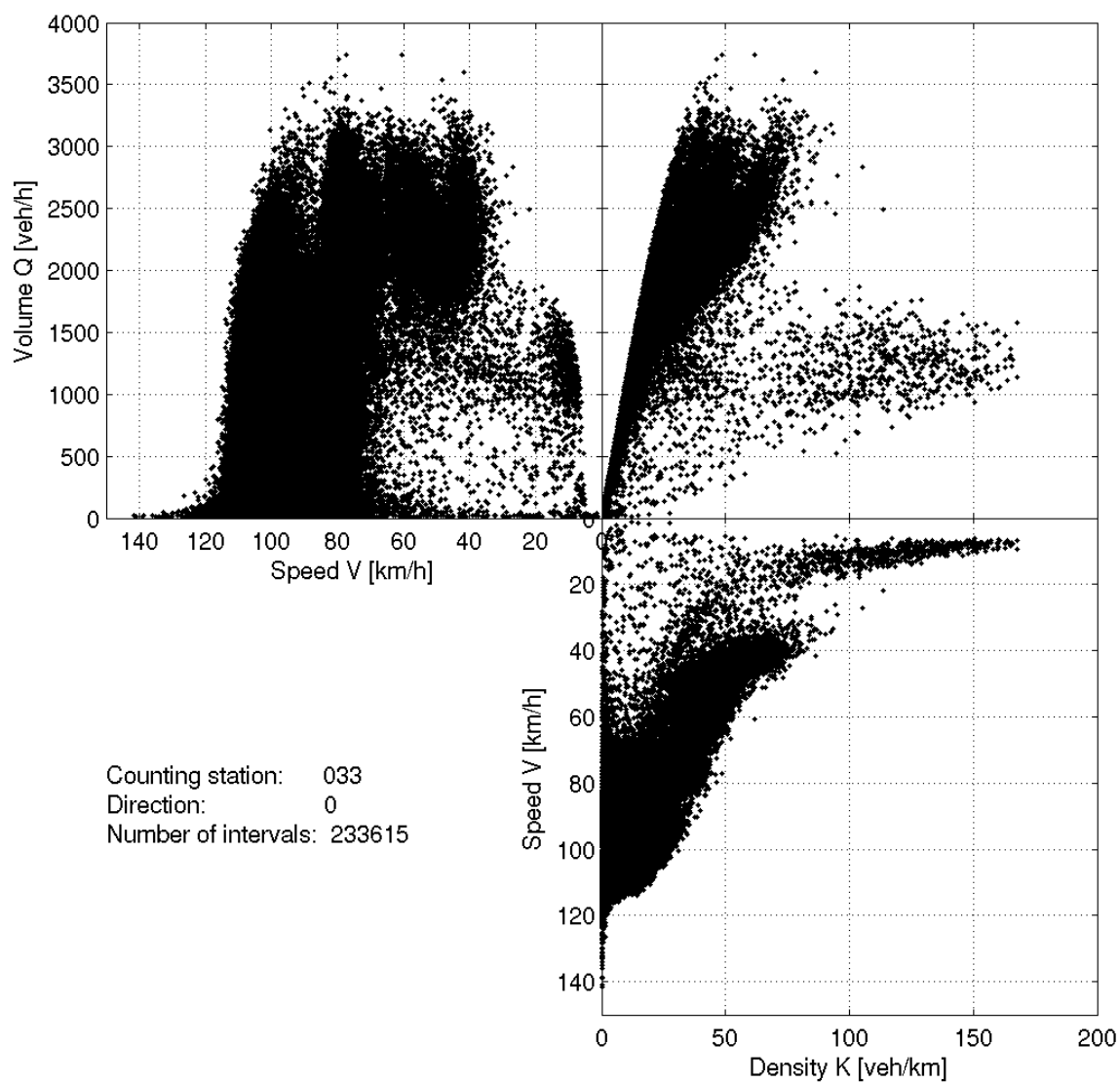


Abbildung 31 Zählstation (42, 0): Umfahrung Bern Ost, Richtung Freudenbergerplatz

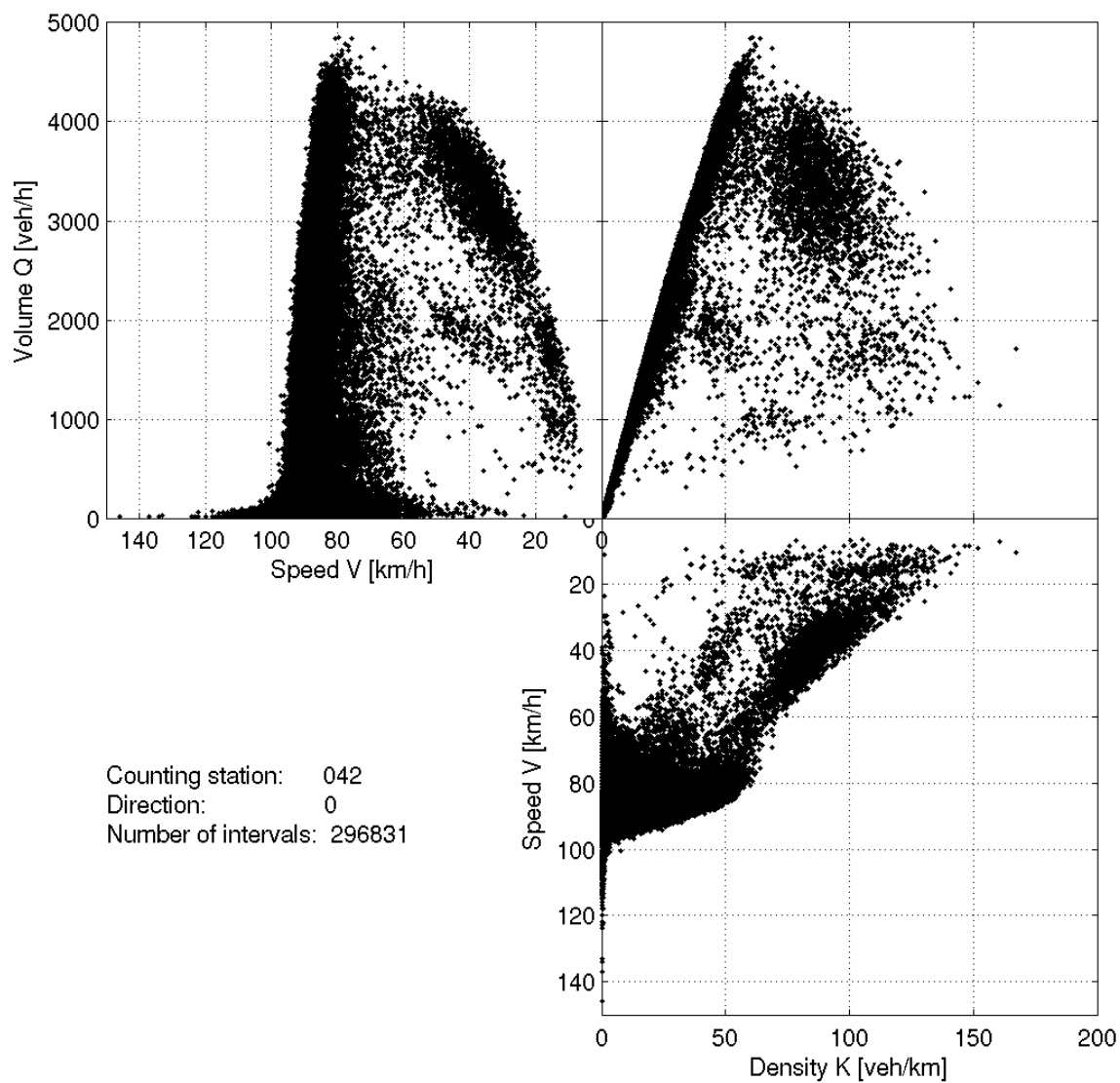


Abbildung 32 Zählstation (60, 0): Gunzgen, Richtung Zürich

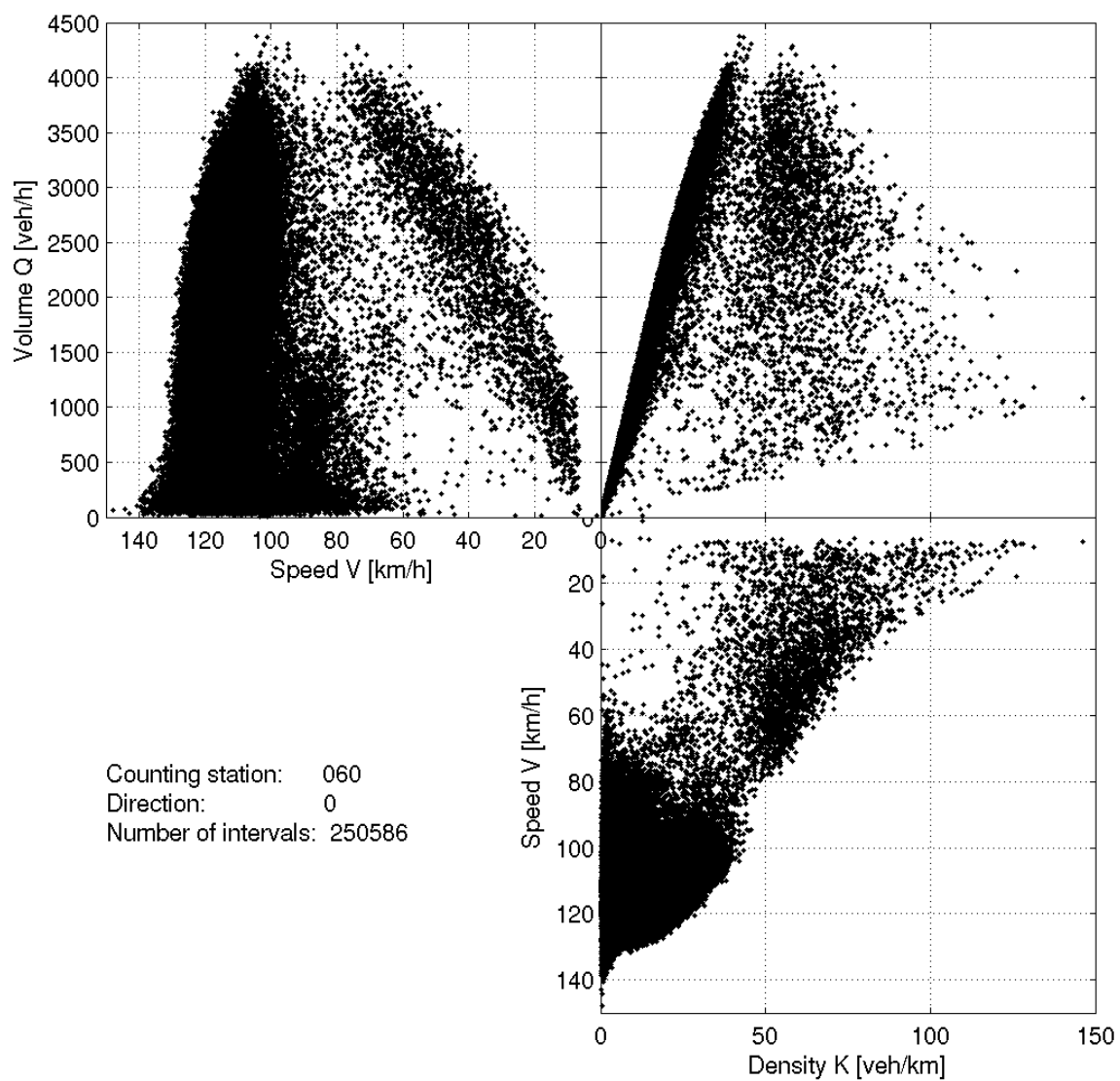


Abbildung 33 Zählstation (60, 1): Gunzgen, Richtung Bern

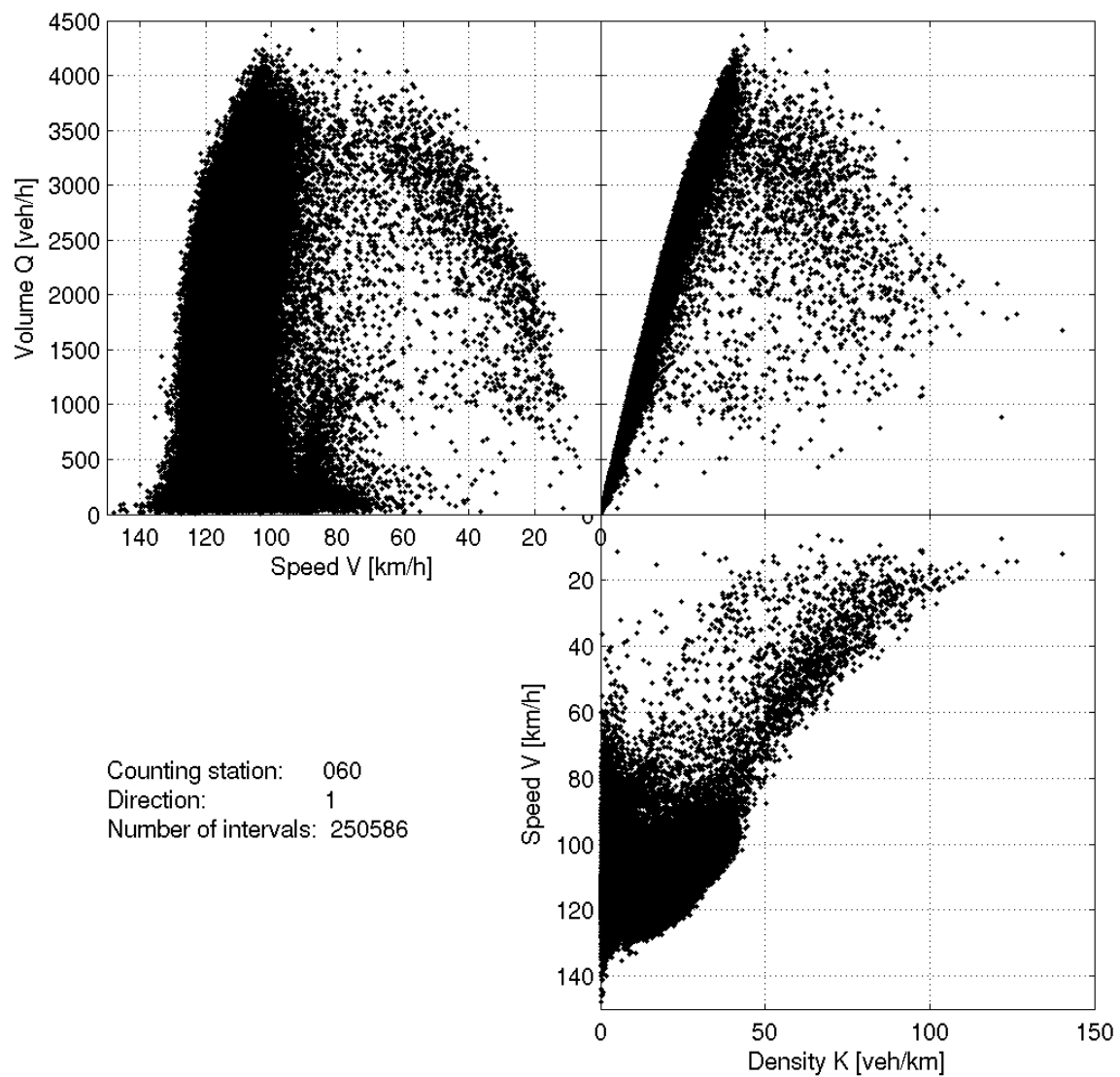


Abbildung 34 Zählstation (81, 1): Mutenz, Hard, Richtung Basel

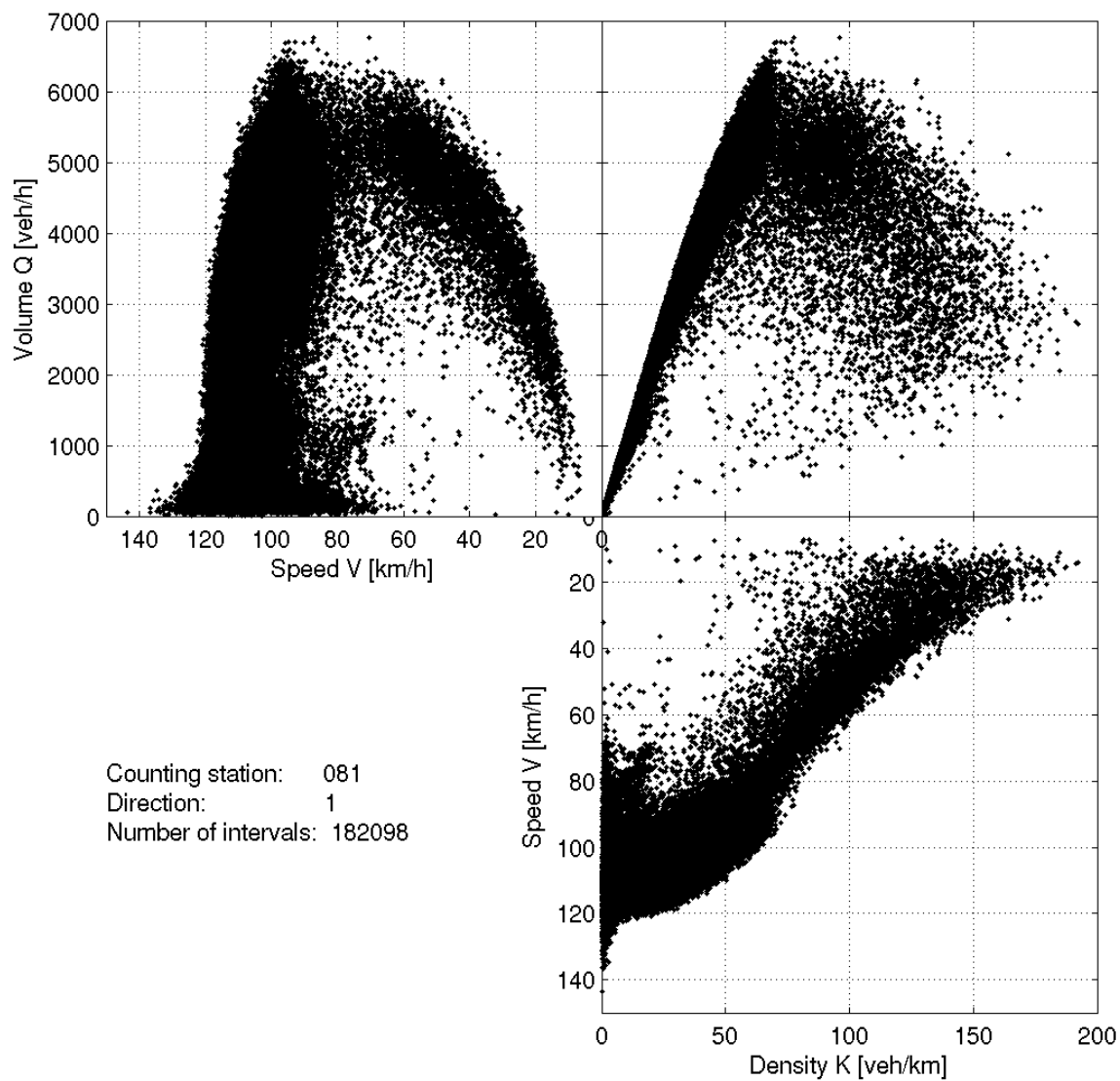


Abbildung 35 Zählstation (182, 0): Kirchberg N, Richtung Zürich

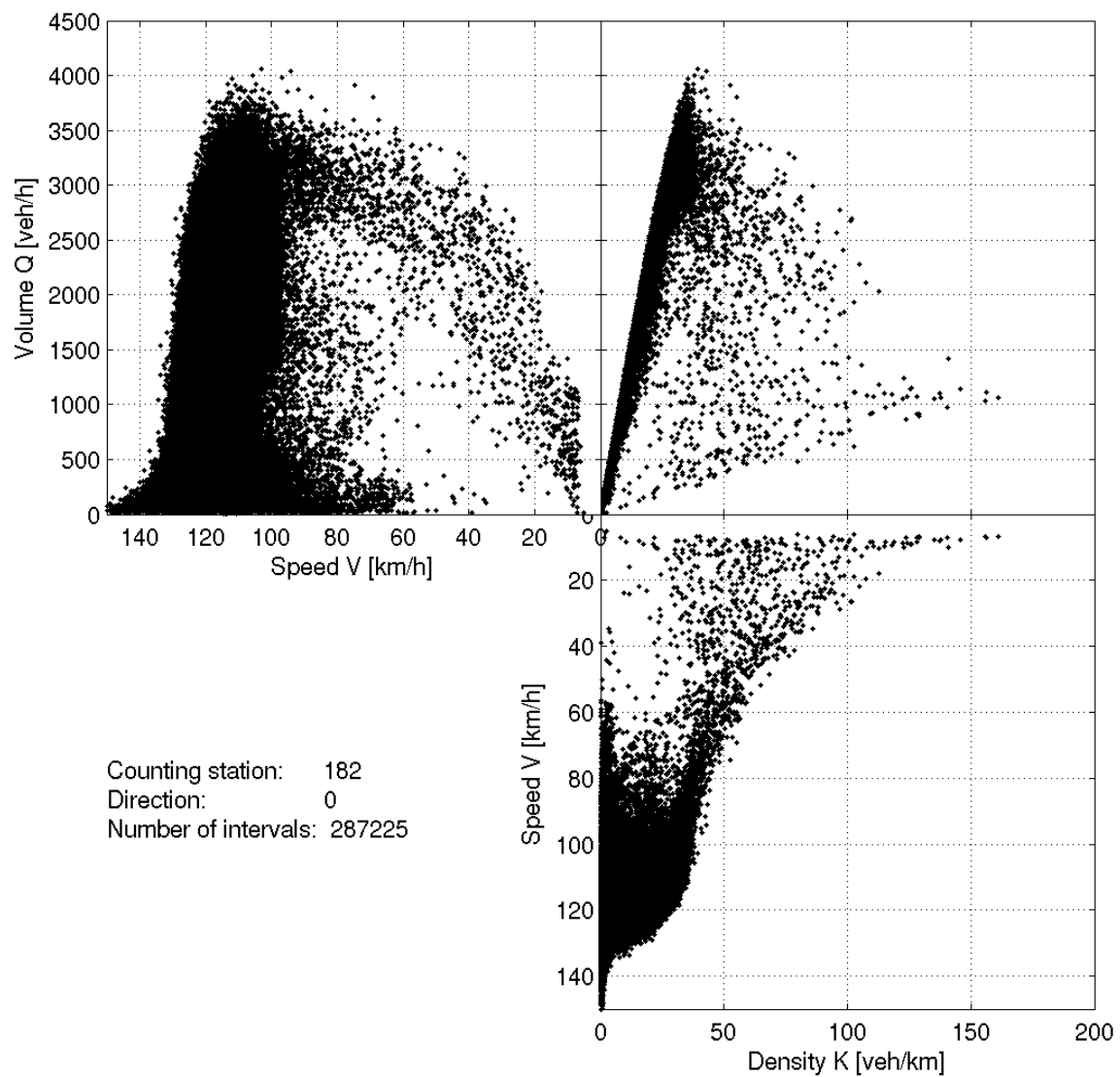


Abbildung 36 Zählstation (182, 1): Kirchberg N, Richtung Bern

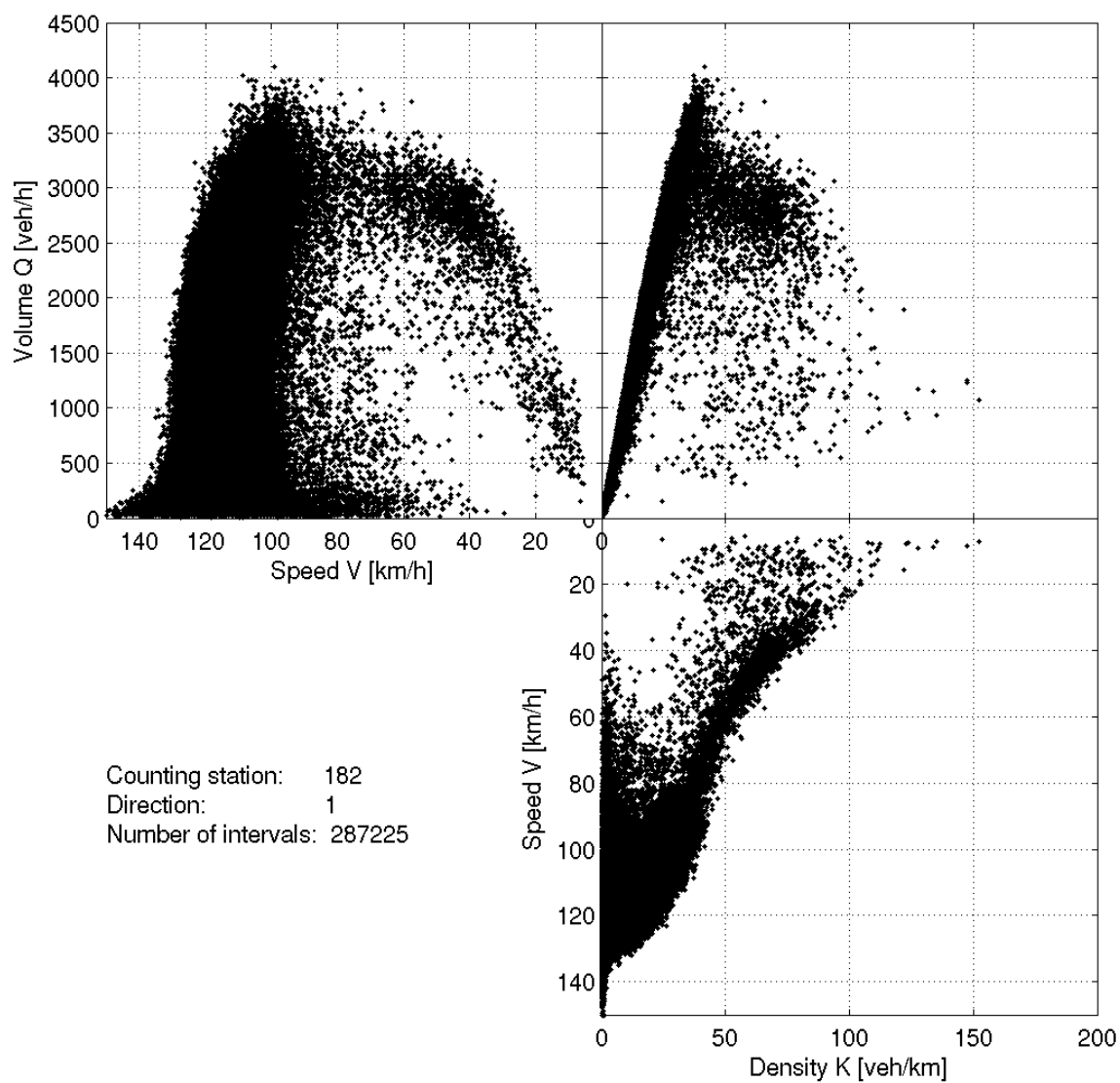


Abbildung 37 Zählstation (208, 1): Birrhard, Birrfeld, Richtung Bern

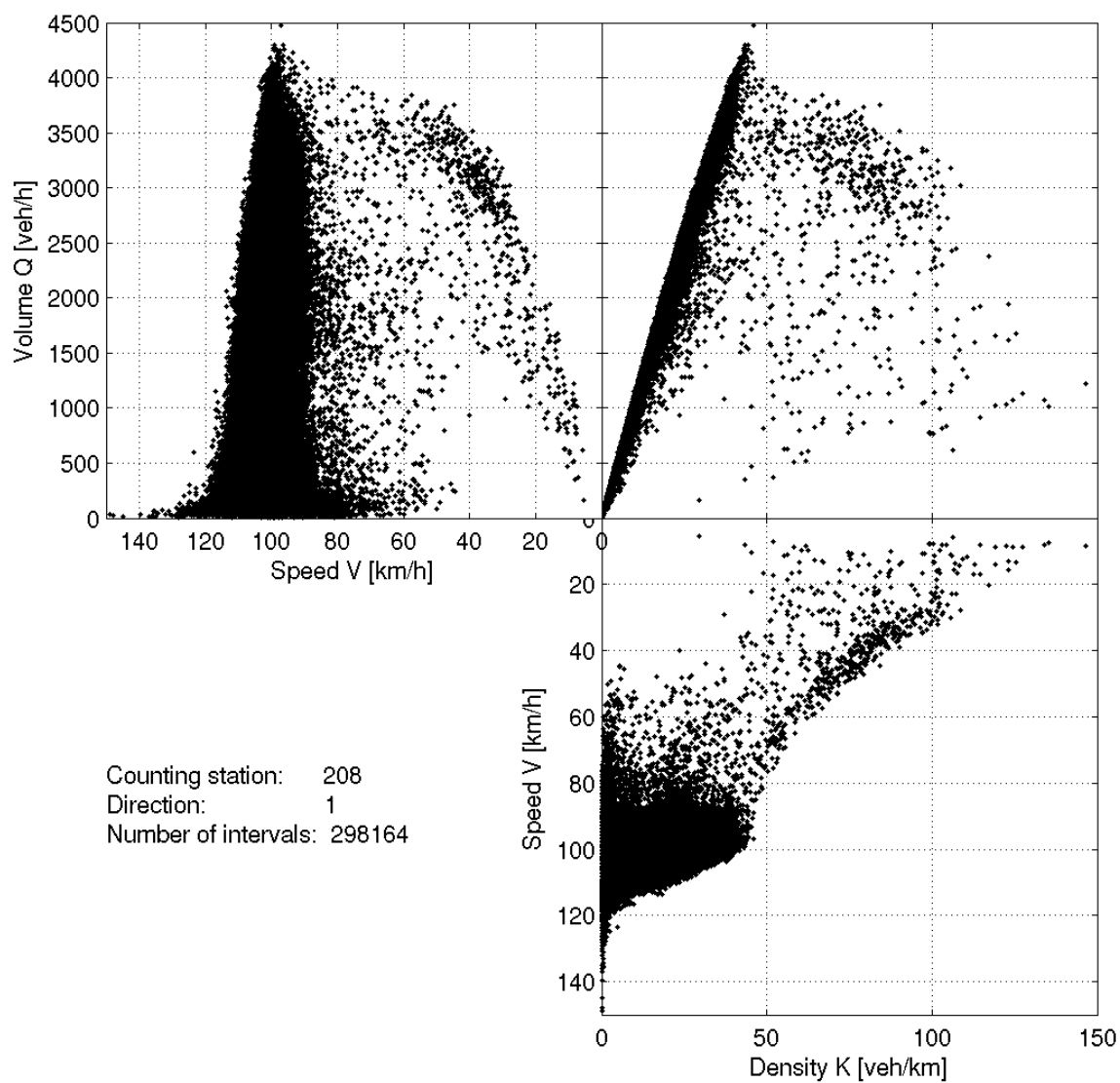


Abbildung 38 Zählstation (225, 0): Egerkingen, Verzweigung N2, Richtung Härkingen

