

Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement
Bundesamt für Strassenbau

Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie
Office fédéral des routes

Dipartimento federale dei trasporti, delle comunicazioni e delle energie
Ufficio federale delle strade

Einfahrten auf Hochleistungsstrassen in Tunneln

Balzari & Schudel AG, Ingenieure und Planer, Bern
R. Lanz, dipl. Ing. ETH
W. Schaufelberger, dipl. Ing. ETH
F. Marino, Verkehrstechniker

Institut für Psychologie, Laboratorium für visuelle Informationsverarbeitung, Universität Bern
Prof. Dr. phil. R. Groner
Dr. phil. M. Groner
D. Zahnd lic. phil.

Forschungsauftrag 23/90 im Auftrag
der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)

Entwurf Mai 1994

Einfahrten auf Hochleistungsstrassen in Tunneln

Entrées aux routes à grand débit en tunnels

Balzari & Schudel AG, Ingenieure und Planer, Bern
R. Lanz, dipl. Ing. ETH
W. Schaufelberger, dipl. Ing. ETH
F. Marino, Verkehrstechniker

Institut für Psychologie, Laboratorium für visuelle Informationsverarbeitung,
Universität Bern
R. Groner, Prof. Dr. phil.
M. Groner, Dr. phil.
D. Zahnd, lic. phil.

Forschungsauftrag 23/90 im Auftrag der
Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)

Dezember 1995

AUFBAU DES BERICHTES

Der vorliegende Forschungsbericht ist wie folgt aufgebaut:

	Seite
Teil 1 Zusammenfassung / Résumé (blau)	3/7
Teil 2 Detailliertes Inhaltsverzeichnis	11
Teil 3 Die wichtigsten Resultate (grün)	13
Teil 4 Hintergründe und detaillierte Resultate	28
Teil 5 Verzeichnisse	60
Teil 6 Anhänge	63

DANK

An dieser Stelle danken wir allen am Forschungsauftrag beteiligten Personen und Instanzen für die wertvolle Unterstützung. Unser Dank richtet sich insbesondere an:

- die Mitglieder der Subkommission 172.20
- das Tiefbauamt des Kantons Bern
- die Kantonspolizei Bern (Feldversuch SN6 Bern, Überdeckung Sonnenhof)

ZUSAMMENFASSUNG

Einfahrten auf Hochleistungsstrassen im Bereich von Tunneln werden heute von den zuständigen Stellen bis auf wenige Ausnahmen nicht genehmigt und wurden deshalb in der Schweiz bisher kaum realisiert. Im Forschungsauftrag 18/87 wurden erste Anforderungen an solche Einfahrten formuliert. Dabei zeigte sich, dass die Problematik von Beschleunigungstreifen im Bereich von Tunneln vor allem auch unter Beachtung der visuellen Wahrnehmung noch näher zu untersuchen ist. Aufgrund dieser Ausgangslage wurde der Forschungsauftrag 23/90 über „Einfahrten auf Hochleistungsstrassen im Bereich von Tunneln und Galerien“ in die Wege geleitet. Ausgangslage, Zielsetzungen, Vorgehen, Untersuchungen und Resultate der Forschungsarbeiten sind im vorliegenden Bericht zusammengefasst. Die Untersuchungen beschränkten sich auf richtungstrennte Hochleistungsstrassen mit mindestens 2 Fahrstreifen pro Richtung.

Das **Ziel der Forschungsarbeiten** war, Aspekte der Verkehrssicherheit insbesondere im Hinblick auf die visuelle Wahrnehmung zu klären und für den Praktiker ein Hilfsmittel und wenn möglich zugleich die Grundlagen für eine (Vor-) Norm zu schaffen, welche die Beurteilung der Machbarkeit von Einfahrten auf Hochleistungsstrassen im Einflussbereich von Tunneln erlaubt.

Die **Problematik der Wahrnehmung** solcher Einfahrten war in erster Linie anhand von **Feldversuchen** zu untersuchen.

Als **Forschungsstelle** wurden **Balzari & Schudel AG**, Ingenieur- und Planungsbüro, Bern, und das **Institut für Psychologie**, Laboratorium für visuelle Informationsverarbeitung, Uni Bern, beauftragt. Die Arbeiten wurden eng begleitet durch die **VSS Subkommission 172.20**.

Die Forschungsarbeiten umfassten eine verkehrstechnische Voranalyse, wahrnehmungspsychologische Betrachtungen, die Suche nach geeigneten Versuchsobjekten für Feldversuche, die Vorbereitung und Durchführung der Feldversuche sowie die Interpretation der Resultate und die Formulierung der Schlussresultate. Für die Interpretation der Resultate und die Formulierung der Schlussresultate wurden auch die Erkenntnisse aus den wahrnehmungspsychologischen Laborversuchen beigezogen, welche anlässlich der Forschungsaufträge 13/90 und 15/90 über „A-Niveau-Knoten im Bereich von Tunneln“ durchgeführt wurden. Die Arbeiten wurden innert 3 Jahren durchgeführt.

Mit der **verkehrstechnischen Voranalyse** wurden die wichtigsten Probleme, welche bei der Anordnung von Einfahrten auf Hochleistungsstrassen im Einflussbereich von Tunneln entstehen können, erfasst und systematisiert. Massgebende Einflussfaktoren sind die Lage der Einfahrt in bezug auf den Tunnel, die Tunnelgeometrie, die signalisierte Höchstgeschwindigkeit, die Verkehrszusammensetzung, die Tunnelbeleuchtung und die weitere Tunnelausrüstung.

Je nach **Lage der Einfahrt in bezug auf den Tunnel** variieren Lichtverhältnisse, Adaptationsprobleme bei Lichtwechsel (hell/dunkel und dunkel/hell), sowie Kontraste zwischen Hindernis und Umgebung. Besondere Bedeutung kommt der Tunneleinfahrt mit „schwarzem Loch“ zu. Betreffend Lage in bezug auf den Tunnel wurden deshalb, in Fahrtrichtung gesehen, folgende Zonen festgelegt:

- Zone B: Annäherungsbereich = Bereich der Anhaltesichtweite vor Tunneleinfahrtsportal
- Zone D1: Adaptationsbereich Tunneleinfahrt = Anhaltesichtweite ab Tunneleinfahrtsportal
- Zone D2: Adaptationsbereich Tunneleinfahrt = Übergangsstrecke nach Beleuchtungsnorm
- Zone E: Tunnelinnenbereich
- Zone F: Bereich mit Sicht aus dem Tunnel hinaus ins Freie
- Zone H: Anschlussbereich = doppelte Anhaltesichtweite nach Ausfahrtsportal

Für die **Wahrnehmung und Begreifbarkeit einer Einfahrt** im Einflussbereich von Tunneln müssen die Einfahrt, die Vortrittsregelung, der Rückstau, vortrittsberechtigte Fahrzeuge und Fehlverhalten erkannt sowie Zeitlücken, Distanzen und Geschwindigkeiten von vortrittsberechtigten Fahrzeugen abgeschätzt werden können. Eine wichtige Rolle spielt auch die Erwartungshaltung des Automobilisten.

Die grössten **Probleme für das Wahrnehmungssystem** des Automobilisten beim Durchfahren eines Tunnels ergeben sich bei hellem Tageslicht, da dann die Unterschiede in der Beleuchtung zwischen aussen und innen am grössten sind. Bei der Annäherung an den Tunnel erscheint der Eingang als schwarzes Loch, in dem man kaum etwas erkennen kann. Die schlechte Sichtbarkeit von Objekten, die sich im Tunnel befinden, wird hauptsächlich verursacht durch Streulicht, das sich überlagert und damit den Kontrast der Objekte vermindert.

Das zweite Problem ist die grosse, sehr schnell erfolgende Veränderung der Beleuchtung beim Einfahren in und beim Ausfahren aus dem Tunnel.

Unter Berücksichtigung der Probleme, die sich für die Wahrnehmung beim Durchfahren eines Tunnels bei Tageslicht ergeben - **Einfluss von Streulicht bei der Tunnelannäherung, Dunkeladaptation bei der Tunneleinfahrt, Helladaptation bei der Tunnelausfahrt** - und der beleuchtungstechnischen Massnahmen zu ihrer Reduktion, stellte sich die Frage, ob Einfahrten auf Hochleistungsstrassen unter den gegenwärtigen Normen der Tunnelbeleuchtung in den einzelnen Tunnelzonen ausreichend wahrgenommen werden können. Dieselbe Frage stellt sich auch für das Erkennen des Rückstaus.

Da sich zu dieser Fragestellung in der Literatur keine ausreichenden Aussagen finden lassen, wurde entschieden, die offenen Fragen anhand von Feldversuchen zu untersuchen.

Ziel der **Feldexperimente** war es, aufgrund von versuchsweise eingerichteten Einfahrten im Bereich von bestehenden Tunneln aufgrund von Messung und Beobachtung des Verkehrsverhaltens eine Aussage über die Verkehrssicherheit und über notwendige Gestaltungselemente zu gewinnen. Dabei sollten Einfahrten mit Einfädelungsvorgängen in den Zonen D, E, F und allenfalls H untersucht werden. Es sollten mehrere Feldversuche an verschiedenen Objekten durchgeführt werden.

Beim Verkehrsverhalten interessierten insbesondere der Fahrstreifenwechsel, das Geschwindigkeitsverhalten, der Anteil an kritischen Zeitlücken und kritische Situationen wie verzögerte oder abgebrochene Einfädelungsmanöver und abrupte Bremsvorgänge. Für die Gestaltung der Einfahrt standen die Fragen nach der minimal erforderlichen Länge des Beschleunigungstreifens und nach der Gestaltung des Zwickels am Einfahrtsende im Vordergrund.

Die **Suche nach geeigneten Objekten** für die Feldversuche zeigte sich aufgrund der gestellten Anforderungen erwartungsgemäss als sehr schwierig.

Von Beginn weg vorgesehen war, sich ausgehend von grosszügigen Lösungen aus Sicherheitsgründen an eine minimal erforderliche Gestaltung der unterirdischen Einfahrtssituation heranzutasten und die vorgesehenen Feldversuche dementsprechend aufzubauen.

Bei Aufnahme der Forschungsarbeit war bekannt, dass die **N6 Einfahrt Bern-Ostring** in Fahrtrichtung Thun aus Lärmschutzgründen überdeckt wird (Überdeckung Sonnenhof) und dass die Möglichkeit bestand, vor und nach der Überdeckung die notwendigen Erhebungen und Beobachtungen durchzuführen. Dadurch konnte ein direkter Vergleich zwischen einer Einfahrt am Tageslicht und einem unterirdischen Beschleunigungstreifen durchgeführt werden.

Aufgrund des positiven Resultates über diesen Vorher-/Nachhervergleich entschied die Begleitkommission, mit einem weitergehenden Versuch einen nächstschwierigeren Fall durchzuführen und dazu ein weiteres Versuchsobjekt zu suchen. Mangels anderer geeigneter Versuchsobjekte wurde entschieden, auf der N6 Einfahrt Bern Ostring einen zweiten Versuch mit einer Trennwand in den Tunnel hinein und einem verkürzten Beschleunigungstreifen durchzuführen. Folgende Messungen wurden also durchgeführt:

- Versuch „91“ ohne Überdeckung der Einfahrt
- Versuch „92“ mit Überdeckung der Einfahrt, ohne Trenn- und Abweiswand
- Versuch „93“ Messungen mit Überdeckung der Einfahrt, mit Trenn- und Abweiswand und verkürztem Beschleunigungstreifen

Die **Resultate** aus der automatischen Verkehrserhebung für die Versuche „91“, „92“ und „93“ zeigen im direkten Vergleich keine signifikanten Unterschiede in bezug auf das Fahrverhalten, welche auf kritische Situationen zurückzuführen wären.

Kleinere Probleme wie vereinzelter Abbruch des Einfädelungsvorganges oder einige Bremsmanöver in Versuch „93“ waren nicht auf das Erkennen der Einfahrtssituation, sondern auf die Umgewöhnung an eine neue (Versuchs-)Situation oder auf die Leistungsfähigkeit, welche durch die Verkürzung der Einfahrt absank, zurückzuführen. Diese entsprechen Situationen, wie sie bei stark belasteten, oberirdischen Einfahrten im gleichen oder noch grösseren Mass auftreten.

Durch die paketweise Beschickung der Einfahrt aufgrund der Lichtsignalregelung bei angrenzenden Knoten wurde die Leistungsfähigkeit bei der verkürzten Länge des Beschleunigungstreifens in Versuch „93“ jeweils kurzfristig erreicht. Bei einer weiteren Verkürzung der Einfahrt hätte die Gefahr einer Leistungsüberschreitung (Verkehrszusammenbruch) bestanden.

In bezug auf die Wahrnehmung eines vollständig unterirdischen Beschleunigungstreifens („93“) traten keine Probleme auf. Die Abweiswand am Ende des Beschleunigungstreifens konnte sowohl tagsüber (Kontrast zu hellem Tunnelausfahrtsportal) als auch nachts (deutliches Erkennen der Kurvenschranken durch reflektierendes Fahrzeuglicht) gut wahrgenommen werden (vgl. Abb 9.5.).

Aus den Feldversuchen können folgende Schlüsse gezogen werden:

Ein Einfädelungsmanöver in den Zonen E und F ist unter Einhaltung gewisser Anforderungen und Voraussetzungen genügend sicher. Der Fall eines Einfädelungsvorganges in Zone D1 kann nicht abschliessend beurteilt werden, liegt aber im Grenzbereich zwischen einer genügenden und ungenügenden Wahrnehmung.

Bei starken Verkehrsbelastungen sollte die Gesamtlänge des Beschleunigungstreifens (Abstand zwischen geometrischer Nase und Ende des Zwickels) 200 m nicht unterschreiten. Auf eine sorgfältige optische Führung des Verkehrs (z.B. Beleuchtungsband über dem Beschleunigungstreifen, beleuchteter und signalisierter Zwickel am Einfahrtssende) ist grosses Gewicht zu legen. Ein Sicherheitsraum zwischen Einfädelungsstrecke und Zwickel erlaubt einen sicheren Abbruch des Einfädelungsmanövers im letzten Moment.

Aus den zuvor beschriebenen Untersuchungen lassen sich die in der Folge zusammengefassten **Forschungsergebnisse** ableiten.

Die Realisierung einer Einfahrt auf Hochleistungsstrassen im Bereich von Tunneln ist unter Einhaltung gewisser Einschränkungen und Anforderungen grundsätzlich machbar. Die wichtigsten Anforderungen sind:

- Die Anordnung des Manöver- und Einfädelungsbereiches eines Beschleunigungsstreifens im Bereich D1 (Tunneleinfahrtsbereich) ist nicht zulässig.
- Bei Realisierung von Einfahrten im Bereich von Tunneln ist in jedem Fall mit 99%iger Wahrscheinlichkeit auszuschliessen, dass sich ein Rückstau in die Zone D1 ausdehnt.
- Die signalisierte Höchstgeschwindigkeit darf maximal 80 km/h betragen. Die Projektierungsgeschwindigkeit auf der durchgehenden Hauptfahrbahn ist um 20 km/h zu erhöhen.
- Die minimale Länge des Beschleunigungsstreifens wird auf 200 m festgelegt.
- Die Trassierung ist so zu wählen, dass auf Hauptfahrbahn und Zufahrt ab geometrischer Nase der gesamte Beschleunigungsstreifen bis Ende Einfädelungsbereich/Sicherheitsraum überblickt werden kann.
- Bei unterirdischer Anordnung des Beschleunigungsstreifens ist auf der ganzen Länge der Einfahrt ein Standstreifen und am Ende des Beschleunigungsstreifens ein mindestens 50 m langer Fluchtraum vorzusehen.
- Der Zwickel am Ende des Beschleunigungsstreifens ist mit Kurvenschranken zu signalisieren und anzuleuchten.
- Die Beleuchtung der Einfahrt ist so auszuführen, dass eine optimale optische Führung erreicht werden kann.
- Im Einfahrtsbereich wird ein gegenüber der Beleuchtungsnorm um 50 % erhöhtes Leuchtdichteniveau empfohlen.
- Die Einfahrt ist mit geeigneten Mitteln automatisiert zu überwachen.

Auf der Basis der vorliegenden Resultate wird in einem nächsten Schritt die Erarbeitung einer „Vornorm“ vorgeschlagen, welche die Projektierung und Realisierung erster solcher Anlagen erlaubt.

Aufgrund der vorliegenden Resultate und der noch vorhandenen Probleme im Grenzbereich der Wahrnehmung werden weitere Untersuchungen für Beschleunigungsstreifen in Zone D1 und bei nur einem Fahrstreifen pro Fahrtrichtung (bei Gegenverkehr) vorgeschlagen.

RESUME

A quelques exceptions près, les entrées aux routes à grand débit situées dans la zone d'influence d'un tunnel ne sont aujourd'hui pas autorisées par les autorités compétentes et, pour cette raison, ont à peine été réalisées en Suisse. Les premières exigences concernant ces entrées ont été formulées lors du mandat de recherche 18/87. Il s'est alors montré que la problématique des voies d'accélération situées dans la zone d'influence d'un tunnel doit encore être étudiée de plus près, particulièrement sous l'aspect de leur perceptibilité visuelle.

Partant de cette situation, le mandat de recherche intitulé "**Les entrées aux routes à grand débit situées dans la zone d'influence d'un tunnel ou d'une galerie**" (23/90) a été mis en route. La situation de base, les objectifs, le procédé, les études ainsi que les résultats des travaux de recherche sont regroupés dans le présent rapport. Les études se sont limitées aux routes à grand débit avec sens de circulation séparés et comportant au moins deux voies de circulation dans chaque direction.

Les objectifs des travaux de recherche étaient d'une part de saisir les aspects de la sécurité routière du point de vue de la perception visuelle, et d'autre part, de créer un outil pour la pratique et, si possible, d'élaborer en même temps les bases pour une norme préliminaire qui permettrait de juger de la faisabilité d'une entrée à une route à grand débit située dans la zone d'influence d'un tunnel.

Le problème de la perceptibilité de ces entrées devrait être étudié en premier lieu par des **essais in situ**.

Balzari et Schudel SA, Bureau d'ingénieurs à Berne et l'**Institut de psychologie**, Laboratoire pour le traitement de l'information visuelle de l'**université de Berne** ont été chargés de ce travail de recherche. Les travaux ont été suivis étroitement par la **sous-commission VSS 172.20**.

Les travaux de recherche englobaient une analyse préliminaire de la circulation, des considérations concernant la psychologie de la perception, la recherche de sites expérimentaux aptes à des essais in situ, la préparation et la mise en oeuvre des essais in situ ainsi que l'interprétation des résultats et la formulation des conclusions finales. Les connaissances acquises par les essais de laboratoire sur la psychologie de la perception effectués lors des deux travaux de recherche 13/90 et 15/90, intitulés "**Les carrefours à niveau situés dans la zone d'influence d'un tunnel**", ont également contribué à l'interprétation des résultats et à la formulation des conclusions. Les travaux ont été conduits sur une période de trois ans.

L'analyse préliminaire de la circulation a permis de saisir et systématiser les problèmes principaux qui peuvent se manifester lors de la réalisation d'une entrée à une route à grand débit dans la zone d'influence d'un tunnel. La position de l'entrée par rapport au tunnel, la géométrie du tunnel, la vitesse maximale indiquée, la composition du trafic, l'éclairage du tunnel ainsi que l'équipement du tunnel ont été reconnus comme les facteurs d'influence déterminants.

Les conditions lumineuses, les problèmes d'adaptation causés par le changement de l'intensité lumineuse (clair/sombre et sombre/clair) ainsi que les contrastes entre un objet et son entourage varient selon **l'emplacement de l'entrée par rapport au tunnel**. Une importance particulière doit être attribuée à l'entrée du tunnel perçue comme un "trou noir". Les zones suivantes ont alors été définies en fonction de l'emplacement du carrefour dans le tunnel (vu dans le sens de circulation):

- zone B : zone d'approche = distance de visibilité d'arrêt avant le portail d'entrée du tunnel
- zone D1 : zone d'adaptation au tunnel = distance de visibilité d'arrêt à partir du portail d'entrée du tunnel
- zone D2 : zone d'adaptation au tunnel = tronçon transitoire selon la norme d'éclairage
- zone E : zone à l'intérieur du tunnel
- zone F : zone avec vue de l'intérieur du tunnel vers l'extérieur
- zone H : zone de sortie = double distance de visibilité d'arrêt après le portail de sortie

Pour **percevoir et comprendre une entrée** située dans la zone d'influence d'un tunnel il faut d'une part tenir compte de l'entrée même ainsi que des règles de priorité, des embouteillages, des véhicules prioritaires et des comportements fautifs des usagers de la route; d'autre part il est nécessaire de pouvoir estimer les lacunes de temps et les distances entre véhicules prioritaires ainsi que leur vitesse. De plus, l'attitude de l'automobiliste joue un rôle important.

Le passage d'un tunnel lors d'une journée très claire provoque les plus grands **problèmes pour le système de perception** de l'automobiliste, puisque la différence entre l'intensité lumineuse à l'intérieur et à l'extérieur du tunnel est maximale. Au moment de l'approche au tunnel, l'entrée apparaît comme un "trou noir", dans lequel il est à peine possible de discerner quelque chose. La mauvaise perceptibilité des objets situés à l'intérieur du tunnel est principalement causée par la lumière diffuse qui, en se superposant, diminue le contraste des objets par rapport à leur entourage.

Un autre problème est donné par le changement abrupt et important de l'intensité lumineuse au moment de l'entrée et de la sortie du tunnel.

En raison des problèmes de perception qui résultent lors du passage d'un tunnel pendant la journée - **influence de la lumière diffuse au moment de l'approche du tunnel, adaptation à l'obscurité à l'entrée du tunnel, adaptation à la lumière du jour à sa sortie** - et des mesures d'éclairage destinées à les réduire, la question se pose, si les entrées aux routes à grand débit peuvent être suffisamment bien perçues dans les différentes zones du tunnel soumises aux normes actuelles de l'éclairage des tunnels. La même question se pose pour la perception des embouteillages.

Etant donné que la littérature ne fournit pas de réponses suffisantes à ce sujet, la question de la perception des entrées a été étudiée par des essais in situ.

Le but des **essais in situ** était, à l'aide de mesures et d'observations du comportement du trafic effectuées sur des entrées qui ont, à titre d'essai, été mises en place dans la zone d'influence de tunnels existants, d'acquérir des connaissances sur la sécurité routière et les éléments conceptuels nécessaires. A cette occasion, des entrées et des processus d'insertion dans les zones D, E, F et à la rigueur H devraient être étudiés. Il était prévu d'effectuer plusieurs essais in situ sur différents sites expérimentaux.

L'étude du comportement du trafic a été concentrée sur les changements de voie de circulation, le régime des vitesses observées, la partie des lacunes de temps critiques ainsi que les situations critiques telles que les processus d'insertion retardés ou arrêtés et les manoeuvres de freinage abruptes. La détermination de la longueur minimale de la voie d'accélération et la conception du biseau situé à la fin de l'entrée s'est révélée particulièrement importante pour la réalisation d'une entrée.

Etant donné les exigences imposées, la recherche des sites expérimentaux appropriés était très difficile.

Dès le début de l'étude, il était prévu de partir de solutions généreuses par des raisons de sécurité pour finalement arriver à une conception minimale et indispensable d'une entrée souterraine. Les essais ont été conçus conformément à cette démarche.

En même temps que le travail de recherche commençait, l'entrée Bern-Ostring à la route nationale N6 en direction de Thoun devrait être recouverte par des raisons de protection anti-bruit. Il était alors possible d'y effectuer les mesures et les observations nécessaires avant et après le recouvrement de l'entrée. Ainsi, une comparaison entre une entrée à ciel ouvert et une voie d'accélération souterraine a pu être réalisée.

Suite aux résultats positifs de cette comparaison avant/après, la commission VSS 172.20 a décidé de chercher un autre site expérimental et de poursuivre les essais par l'étude d'un cas plus difficile. A défaut d'un autre site approprié il a été décidé d'effectuer un deuxième essai sur la même entrée à Berne, mais cette fois-ci équipée d'une paroi séparatrice disposée à l'intérieur du tunnel et d'une voie d'accélération raccourcie. Les essais suivants ont alors été effectués:

- essai "91" sans recouvrement de l'entrée
- essai "92" avec recouvrement de l'entrée, sans paroi séparatrice et paroi d'évitement
- essai "93" avec recouvrement de l'entrée, avec paroi séparatrice et paroi d'évitement, avec voie d'accélération raccourcie

La comparaison directe du relevé automatique de la circulation des essais "91", "92" et "93" ne montre aucune différence significative du comportement des automobilistes qui pourrait être attribuée à une situation critique.

Les problèmes mineurs tels que les arrêts isolés du processus d'insertion ou quelques manoeuvres de freinage observés pendant l'essai "93" n'étaient pas causés par une mauvaise perception de la situation d'entrée, mais plutôt par le manque d'habitude à une nouvelle situation d'essai ou par la capacité limitée suite au raccourcissement de la voie d'accélération. Ces problèmes ne sont pas spécifiques aux entrées souterraines; ils s'observent fréquemment sur les entrées à ciel ouvert sollicitées par un trafic intense.

Par l'alimentation fractionnée des entrées situées à proximité d'un carrefour à régulation lumineuse, la capacité limite de l'entrée a été atteinte, lors de l'essai "93", à chaque fois qu'un ensemble de véhicules arrivaient à la voie d'accélération. Un nouveau raccourcissement de la voie d'accélération entraînerait sans doute le danger d'un dépassement de la capacité (arrêt complet de la circulation).

La perception d'une voie d'accélération entièrement souterraine ("93") ne posait aucun problème. La paroi d'évitement située à la fin de la voie d'accélération a pu être identifiée aussi bien pendant la journée (contraste par rapport à la clarté du portail de sortie) que pendant la nuit (perception nette des panneaux de démarcation de virage grâce à la réflexion de la lumière du véhicule)(voir figure 9.5).

Les résultats des essais in situ permettent de tirer les **conclusions** suivantes:

A condition de respecter certaines exigences, une manoeuvre d'insertion effectuée dans les zones E et F est suffisamment sûre. Le cas d'un processus d'insertion dans la zone D1 ne peut être jugé de manière définitive, mais il se trouve probablement à la limite d'une perception insuffisante.

La longueur totale de la voie d'accélération (distance entre le nez géométrique et la fin du biseau) ne devrait pas être inférieure à 200 m, si le volume du trafic est important. Le guidage optiquement soigneux du trafic (p.ex. bande d'éclairage en-dessus de la voie d'accélération, biseau illuminé et signalé) est d'une importance particulière. La mise en place d'un espace de sécurité situé entre le tronçon d'insertion et le biseau permet d'arrêter le processus d'insertion au dernier moment.

Les recherches décrites auparavant permettent de déduire les **résultats** récapitulés ci-dessous. **A condition de respecter certaines restrictions et exigences, la réalisation d'une entrée à une route à grand débit située dans la zone d'influence d'un tunnel est en principe faisable.** Les exigences principales sont:

- La mise en place de la zone d'insertion dans la zone D1 (zone d'entrée) n'est pas admissible.
- Lors d'une réalisation d'une entrée dans la zone d'influence d'un tunnel autre que la zone D1, il faut éviter avec une probabilité de 99% que les embouteillages s'étendent jusqu'à la zone D1.
- La vitesse maximale indiquée ne doit pas dépasser 80 km/h. La vitesse de projet sur la chaussée principale est à augmenter de 20 km/h.
- La longueur minimale de la voie d'accélération est fixée à 200 m.
- Le tracé est à choisir de façon à ce que toute la voie d'accélération (du nez géométrique jusqu'à la fin du biseau) puisse être perçue aussi bien depuis la chaussée principale que depuis la voie d'entrée.
- Lors de la réalisation d'une voie d'accélération souterraine, il faut prévoir une voie d'arrêt sur toute la longueur de l'entrée ainsi qu'un espace de sauvetage d'au moins 50 m de longueur à sa fin.
- Le biseau situé à la fin de la voie d'accélération est à illuminer et à signaler par des panneaux de démarcation de virage.
- L'éclairage de l'entrée est à réaliser de façon à ce qu'un guidage optiquement optimal puisse être atteint.
- Un niveau de luminance majoré de 50% par rapport à la norme d'éclairage est recommandé dans la zone d'entrée.
- L'entrée doit être surveillée par des moyens automatisés appropriés.

Vu les résultats ci-dessus il est conseillé pour la **prochaine étape** d'élaborer une **norme préliminaire** qui permettra de planifier et de réaliser des entrées souterraines.

Sur la base des présents résultats et des problèmes subsistants concernant la perception humaine limitée, **d'autres études** devraient être effectuées pour analyser la réalisation de voies d'accélération situées dans la zone D1. Aussi le cas des entrées aux routes avec seulement une voie de circulation dans chaque sens (routes à double sens) devrait être étudié de plus près.

INHALTSVERZEICHNIS

1. FORSCHUNGSRÉSULTATE	13
1.1 Übersicht	13
1.2 Resultate und Interpretationen aus den Feldversuchen	13
1.3 Grundsätzliche Machbarkeit von Beschleunigungsstreifen im Bereich von Tunneln und Galerien	14
1.4 Allgemeine Anforderungen an die Gestaltung von Beschleunigungsstreifen im Bereich von Tunneln	16
1.5 Zusätzliche Anforderungen an eine unterirdische Lage von Beschleunigungsstreifen	21
1.6 Spezialfälle	23
1.7 Die wichtigsten Änderungen gegenüber den Resultaten aus Forschungsauftrag 18/87	23
1.8 Erreichung der Forschungsziele (vgl. Kap. 4)	24
1.9 Fazit	24
2. EMPFEHLUNGEN FÜR DAS WEITERE VORGEHEN	25
2.1 Übersicht	25
2.2 Einfahrten in den Bereichen B, D2, E, F und H	26
2.3 Weitere Untersuchungen im Bereich von Tunneln	26
2.4 Einfahrten in Galerien	27
3. EINLEITUNG	28
3.1 Ausgangslage	28
3.2 Vorgeschichte	28
3.3 Auftrag/Zweck	29
3.4 Projektorganisation	29
3.5 Projektablauf	30
4. ZIELSETZUNGEN	32
5. GRUNDLAGEN, RANDBEDINGUNGEN, VORENTSCHEIDE	33
5.1 Grundlagen	33
5.1.1 Normen	33
5.1.2 Bisherige Forschungsarbeiten	36
5.1.3 Übrige Literatur	36
5.1.4 Geräte	36

6. METHODIK	37
7. VERKEHRSTECHNISCHE VORANALYSE	38
7.1 Zweck der Voranalyse	38
7.2 Einflussfaktoren	38
7.3 Anforderungen für einen sicheren Verkehrsablauf	41
7.4 Erhebung eingeschalteter Fahrzeuglichter	41
8. WAHRNEHMUNGSPSYCHOLOGISCHE BETRACHTUNGEN	43
8.1. Einleitung	43
8.2 Wahrnehmungsprobleme beim Befahren von Tunneln	45
8.2.1 Einfluss von Streulicht	45
8.2.2 Dunkeladaptation	46
8.2.3 Helladaptation	47
9. FELDVERSUCHE	48
9.1 Einleitung	48
9.2 Suche nach geeigneten Objekten	48
9.3 Feldversuch SN6 Einfahrt Bern-Ostring	50
9.3.1 Ausgangslage	50
9.3.2 Versuchsanordnung	52
9.3.3 Versuchsergebnisse	57
9.3.4 Versuchsinterpretation	58
9.4 Begehung N5 Neuchâtel, Einfahrt Champ Coco	58
9.5 Schlussfolgerungen	59

VERZEICHNISSE

Abbildungen

Tabellen

Literatur

ANHANG

1. Auszug aus den Resultaten zum Feldversuch SN6 Einfahrt Bern-Ostring

DIE WICHTIGSTEN RESULTATE

Dieser Berichtsteil enthält die Forschungsergebnisse für Einfahrten auf zweistreifigen, richtungsgetrennten Hochleistungsstrassen und die Empfehlungen für das weitere Vorgehen. Die Hintergründe zu den beiden Forschungsaufträgen und die Entstehungsgeschichte der Resultate sind im Berichtsteil "Hintergründe und detaillierte Resultate" dargelegt.

1. FORSCHUNGSERGEBNISSE

1.1 Übersicht

Die Resultate aus den zuvor beschriebenen Untersuchungen können wie folgt gegliedert werden:

- Resultate und Interpretationen aus den Feldversuchen (Kap. 1.2)
- Grundsätzliche Machbarkeit von Beschleunigungsstreifen im Bereich von Tunneln (Kap. 1.3)
- Allgemeine Anforderungen an die Gestaltung von Beschleunigungsstreifen im Bereich von Tunneln (Kap. 1.4)
- Zusätzliche Anforderungen an eine unterirdische Lage von Beschleunigungsstreifen (Kap. 1.5)
- Spezialfälle (Kap. 1.6)
- Die wichtigsten Änderungen gegenüber den Resultaten aus Forschungsauftrag 18/87 (Kap. 1.7)
- Erreichung der Forschungsziele (Kap. 1.8)
- Fazit (Kap. 1.9)

Die vorliegenden Anforderungen an die Gestaltung eines Beschleunigungsstreifens im Bereich von Tunneln gelten als Basis für die Erstellung einer "Vor-Norm", welche die Realisierung und begleitende Untersuchungen erster solcher Knoten ermöglichen soll, bevor eine definitive Norm erstellt werden kann.

1.2 Resultate und Interpretationen aus den Feldversuchen

Bei richtungsgetrennten Hochleistungsstrassen mit mehr als 2 Fahrstreifen pro Richtung ist ein Einfädelungsmanöver in den Zonen E und F unter Einhaltung gewisser Anforderungen und Voraussetzungen genügend sicher. Der Fall eines Einfädelungsvorganges in Zone D1 kann nicht abschliessend beurteilt werden, liegt aber im Grenzbereich zwischen einer genügenden und ungenügenden Wahrnehmung.

Bei starken Verkehrsbelastungen sollte die Gesamtlänge des Beschleunigungsstreifens 200 m nicht unterschreiten. Auf eine sorgfältige optische Führung der Einfahrt ist grosses Gewicht zu legen. Ein Sicherheitsraum zwischen Einfädelungsstrecke und Zwickel erlaubt einen sicheren Abbruch des Einfädelungsmanövers im letzten Moment.

1.3 Grundsätzliche Machbarkeit von Beschleunigungstreifen im Bereich von Tunneln und Galerien

Die Realisierung einer Einfahrt auf einer mindestens 2streifigen, richtungsgetrenten Hochleistungsstrasse im Bereich von Tunneln ist unter Einhaltung der nachfolgenden Einschränkungen und Anforderungen grundsätzlich machbar.

Ein Einfädeln im Bereich D1, d.h. die Anordnung des Manöverbereiches und des Einfädelungsbereiches eines Beschleunigungstreifens im Bereich D1 (Tunneleinfahrtsbereich, vgl. Abb. 1.1) ist in jedem Fall unzulässig. Ein allfälliger Sicherheitsraum am Ende des Beschleunigungstreifens kann hingegen zu Beginn des Bereiches D1 liegen.

Eine allfällige Machbarkeit eines Beschleunigungstreifens in dieser Lage bedarf weiterer detaillierter Untersuchungen, welche den zeitlichen und finanziellen Rahmen des vorliegenden Forschungsauftrages gesprengt hätten. Eine Lage F/H (vgl. Tab. 1.1) ist nicht zulässig, da das Einfädelungsmanöver unmittelbar nach dem Tunnelausfahrtsportal stattfindet. Der Blick im Rückspiegel zurück ins „schwarze Loch“ des Tunnels ist aus Wahrnehmungsgründen problematisch.

In allen übrigen Bereichen (B, D2, E, F, H) können unter Einhaltung der entsprechenden Anforderungen (gemäss den folgenden Kap.) Einfahrten auf Hochleistungsstrassen realisiert werden.

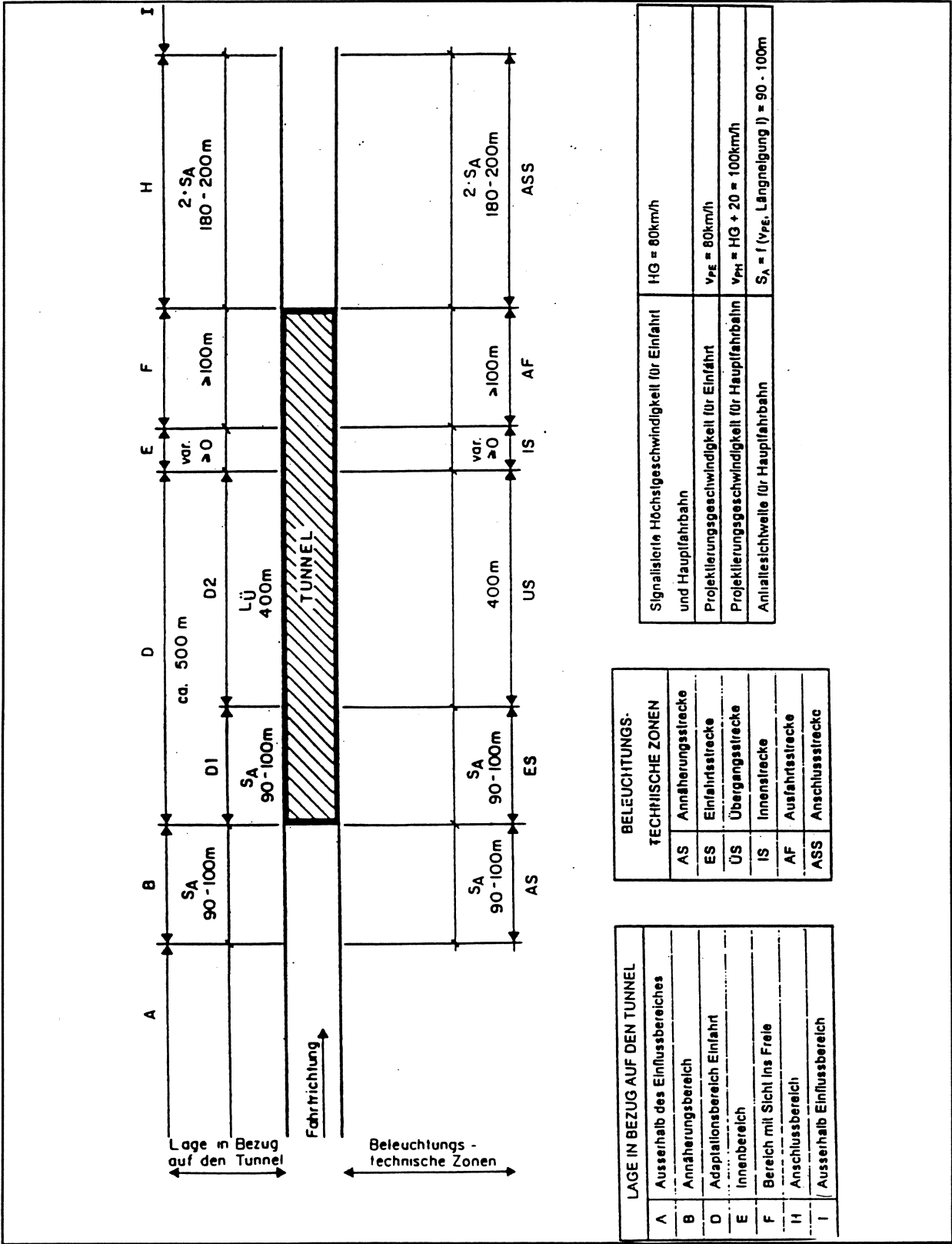
In einem Kurztunnel mit Sicht auf das Tunnelende vor der Einfahrt, der sich im Prinzip nur aus einer Zone D1 und einer Zone F zusammensetzt, ist die Anordnung des Einfädelungsvorganges in Bereich F zulässig. Trotz verminderter Wahrnehmungsprobleme in D1 (geringere Wirkung des schwarzen Loches und der Dunkeladaptation) gegenüber einem Tunnel ohne Durchsicht ist in diesem Bereich die Anordnung des Einfädelungsmanövers unzulässig.

Bei Realisierung von Beschleunigungstreifen im Bereich von Tunneln ist in jedem Fall mit 99 %iger Wahrscheinlichkeit auszuschliessen, dass sich ein Rückstau in die Zone D1 ausdehnt.

Die Zonen C und G werden aus folgenden Gründen nicht verwendet bzw. dargestellt:

- Die Zonen im vorliegenden Forschungsbericht sollen denjenigen aus den Forschungsaufträgen 13/90 und 15/90 entsprechen
- Die Zonen C und D umfassen die Bereiche unmittelbar vor bzw. nach dem Tunnelportal, in deren Gebiet die Sichtdreiecke bei A-Niveau-Knoten in den Tunnel hinein reichen. Diese Situation ist nur für den Fall eines A-Niveau-Knotens mit geregelter Vortritt geradeaus von Bedeutung

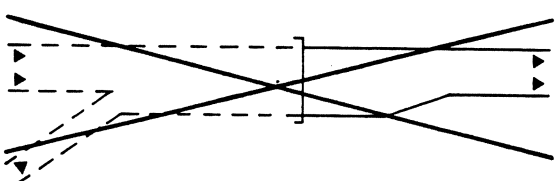
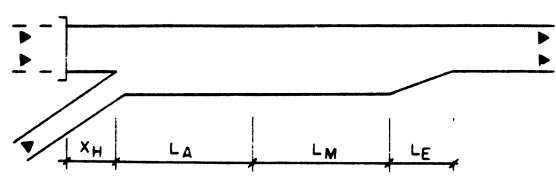
Abb 1.1 Lage in bezug auf den Tunnel, Definitionen



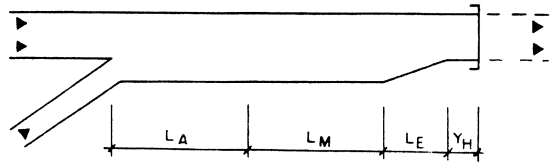
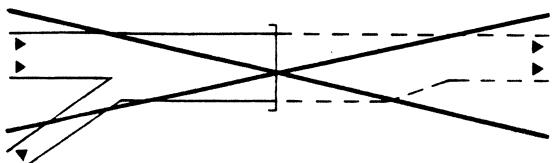
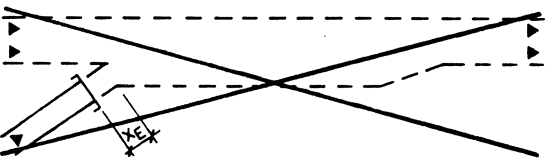
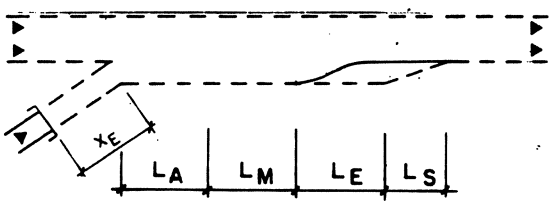
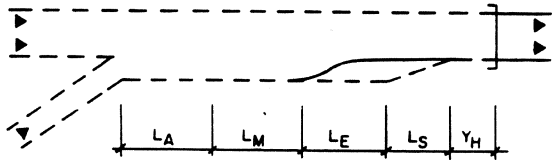
1.4 Allgemeine Anforderungen an die Gestaltung von Beschleunigungsstreifen im Bereich von Tunneln

Tab 1.1 Lage der Hauptfahrbahn
(Definition L_A , L_M , L_E , L_S vgl. Tab 1.3)

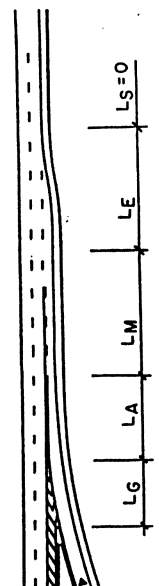
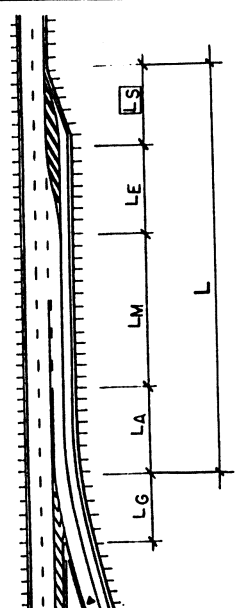
Lage	Skizze	Parameter	Bemerkungen
B		$Y_H > 50 \text{ m}$ oder falls $Y_H=0$: $L_S > 50 \text{ m}$ in Tunnel hinein	- L_A, L_M und L_E ausserhalb des Tunnels - Abstand Y_H zum Tunnelportal möglichst gross
B/D1			Einfädelungsmanöver im Bereich D1 nicht zulässig! L_E muss vollständig ausserhalb des Tunnels liegen
D1		$X_H < S_A$	Einfädelungsmanöver im Bereich D1 nicht zulässig! L_M muss vollständig in D2 liegen
D2, E		$X_H > S_A$	
F		$Y_H > 0 \text{ m}$	L_A und L_M liegen unter Umständen noch im Bereich E

F/H			L_M und L_E im Portalbereich möglichst vermeiden; nur in Ausnahmesituationen zulässig
H		$X_H \geq 0$ (Bei $X_H = 0$ kann das Einfädelungsmanöver frühestens 50 m nach dem Tunnelportal erfolgen)	Kein L_S erforderlich

Tab 1.2 Lage der Einfahrt

Lage	Skizze	Parameter	Bemerkungen
B	 entspricht Skizze Hauptfahrbahn	$Y_H > 50 \text{ m}$ oder falls $Y_H = 0$: $L_S > 50 \text{ m}$ in Tunnel hinein	- L_A, L_M und L_E ausserhalb des Tunnels - Abstand Y_H zum Tunnelportal möglichst gross
B/D1	 entspricht Skizze Hauptfahrbahn		Einfädelungsmanöver im Bereich D1 nicht zulässig! L_E muss vollständig ausserhalb des Tunnels liegen
D1		$0 < X_H < S_A$	Einfädelungsmanöver im Bereich D1 nicht zulässig! L_M muss vollständig in D2 liegen
D2, E		$X_H > S_A$	
F	 entspricht Skizze Hauptfahrbahn	$Y_H > 0 \text{ m}$	L_A und L_M liegen unter Umständen noch im Bereich E

Tab 1.3 Geometrie und Länge des Beschleunigungstreifens

BEREICH	ANFORDERUNGEN OBERIRDISCH (nach vorhandenen Normen)	ANFORDERUNGEN IM TUNNELBEREICH (Vorschlag Forschungsstelle)
Geometrie, Länge und Markierung des Beschleunigungstreifens (vgl. SN 640 266 und SN 640 854): $L = L_A + L_M + L_E$ L Länge des Beschleunigungstreifens L_A Länge des Beschleunigungsbereiches L_M Länge des Manöverbereiches L_E Länge des Einfädelungsbereiches L_G geom. bedingte Länge L_S Länge des Sicherheitsraumes v_E Geschw. auf der Einfahrt bei der geometrischen Nase v_{pE} Projektierungsschwindigkeit Situationsskizze SN 640 266 inkl. Markierung SN 640 854	$L_E (v_E = 80)$ $L_{Mmin} (v_{pE} = 80)$ $L_A (v_E = 80, v_E = 40, a = 1, i = 0)$ $L_A (v_E > 60)$ $L (v_E = 80)$ L_{Min} $= 50 \text{ m}$ $= 50 \text{ m}$ $= 80 \text{ m}$ $= 50 \text{ m}$ $= 230$ $= 200 \text{ m}$ $L_{Amin} = 50 \text{ m}$ $L_{Smin} = 50 \text{ m}$ 	$L_E (v_E = 80)$ $L_{Mmin} (v_{pE} = 80)$ $L_A (v_E = 40)$ $L_S (v_E = 80)$ $L (v_{pE} = 80)$ L_{Min} $= 50 \text{ m}$ $= 50 \text{ m}$ $= 80 \text{ m}$ $= 50 \text{ m}$ $= 230$ $= 200 \text{ m}$ $L_{Amin} = 50 \text{ m}$ $L_{Smin} = 50 \text{ m}$ 

Tab 1.4 Allgemeine Anforderungen

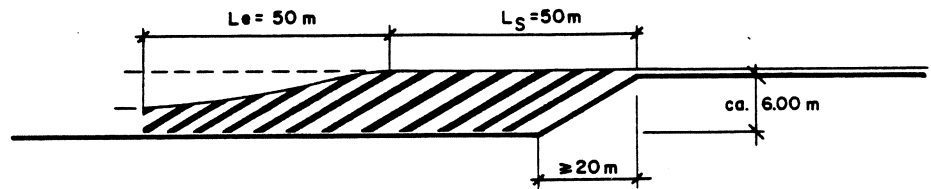
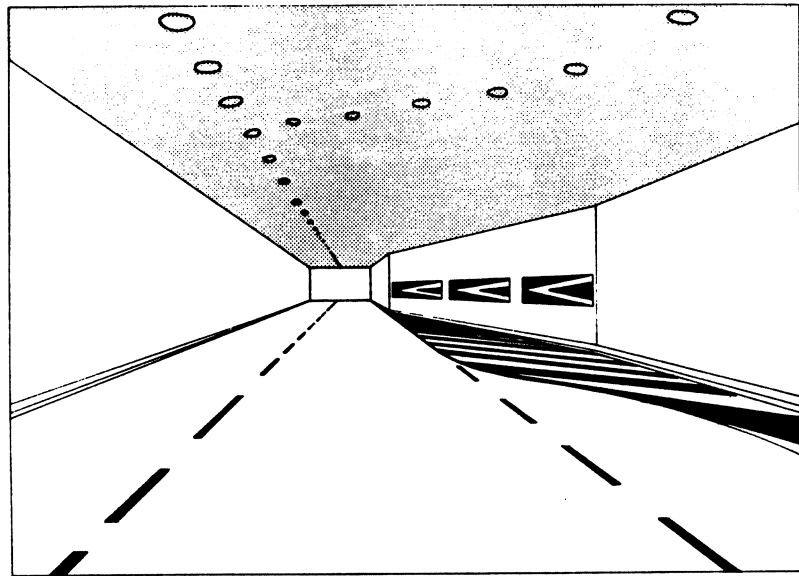
Lage im Tunnel (für Einfahrt und Hauptfahrbahn!)	gemäss Tab 1.1 und 1.2 Eine Lage des Einfädelungsvorganges (Manövrier- und Einfädelungsbereiches) in D1 und unmittelbar nach dem Tunnelausfahrtsportal ist nicht zulässig.
Linienführung des Tunnels im Bereich des Beschleunigungstreifens - horizontal - vertikal - räumlich	Die Trassierung ist so zu wählen, dass auf Hauptfahrbahn und Zufahrt ab geometrische Nase der gesamte Beschleunigungstreifen bis Ende Einfädelungsbereich/Sicherheitsraum überblickt werden kann. Empfehlungen: - Möglichst gestreckte Linienführung der Hauptfahrbahn und der Zufahrt in Höhe und Lage - Vermeidung der Anordnung in Rechtskurven und auf Kuppen - Steigung auf Hauptfahrbahn und Zufahrt max. 3 % (Vermeidung von grossen Geschwindigkeitsdifferenzen infolge Langsamfahrzeugen)
Projektierungsgeschwindigkeit v_{PH} für Hauptfahrbahn	$v_{PH} = 100 \text{ km/h}$ d.h. 20km/h höher als die signalisierte Höchstgeschwindigkeit HG
Projektierungsgeschwindigkeit v_{PE} für Einfahrt.	$v_{PE} = 80 \text{ km/h}$ d.h. entsprechend der signalisierten Höchstgeschwindigkeit
signalisierte Höchstgeschwindigkeit HG	$HG = 80 \text{ km/h}$ Die Begrenzung auf 80 km/h ist frühzeitig zu signalisieren (Hauptfahrbahn und Zufahrt), so dass das Geschwindigkeitsniveau vor der geometrischen Nase erreicht wird.
Signalisation	Grundsätzlich wie Beschleunigungstreifen ausserhalb des Tunnelbereiches. Die Anordnung des Signales SSV 3.07 Einfahrt von rechts ist unter Umständen sinnvoll, denn sie erhöht die Aufmerksamkeit des Fahrers auf der Hauptfahrbahn, in dem dieser frühzeitig auf eine unterirdische Einfahrtssituation hingewiesen wird.

Leistungsfähigkeit der Einfahrt	Die unterirdische Einfahrt ist grundsätzlich so zu dimensionieren, dass das erwartete Verkehrsaufkommen 80 % der Kapazität nicht überschreitet (genügend lange Einfädelungsstrecke). Für die Leistungsfähigkeitsberechnungen ist in städtischen Verhältnissen die paketweise Beschickung der Einfahrt durch LSA zu berücksichtigen. Bei erwartetem starken Verkehrsaufkommen auf der Zufahrt (volle Auslastung) ist die Länge L des Beschleunigungsstreifens auf 300 m zu verlängern.
Behandlung von Verkehrsstörungen Knotenüberlastung / Rückstau / Unfall / Pannenfahrzeuge etc.	Bei Lage der Einfahrt in Zone D2, E, F oder H sind folgende Massnahmen vorzusehen: - Ausrüstung mit automatischer Verkehrsüberwachung des Einfahrtbereiches mit Videogeräten oder automatischen Verkehrsstörungs-Erfassungssystemen - Warnsystem (Tunnelsperre, Gelbblinken, Stauwarnung etc.) bei Verkehrsstörungen im Einfahrtbereich und falls erforderlich, Verkehrsdosierung am Tunnel-einfahrtsportal - Hochschalten der Beleuchtung in der Adaptationszone (Bereich D1) bei Ausdehnung des Rückstaus aus Zone E/D2 in Zone D1 (unter Berücksichtigung der Reaktionszeit für die Hochschaltung der Beleuchtung nur in langen Tunnels sinnvoll; bei kurzen Tunnels: Tunnelsperre bzw. Verkehrsdosierung am Tunnel-einfahrtsportal) - Bauliche und betriebliche Sicherstellung der raschen Eingriffsmöglichkeit für Polizei und Rettungsdienste

1.5 Zusätzliche Anforderungen an eine unterirdische Lage von Beschleunigungsstreifen

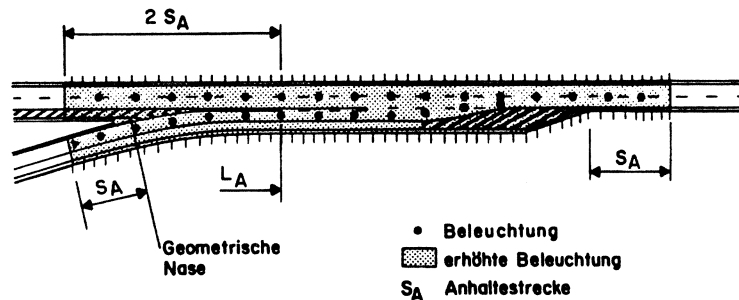
Tab 1.5 Zusätzliche Anforderungen an die unterirdische Lage

Geometrie des Beschleunigungsstreifens	Es ist ein Aufbau des Beschleunigungsstreifens gemäss Skizze aus Tab. 1.3 vorgesehen. Bemerkungen: - Der Aufbau und die Länge des Beschleunigungsstreifens sollen grundsätzlich gemäss SN 640 266 erfolgen. - Eine $L_{A\min} = 50$ m ist notwendig, um dem einmündenden Fahrzeuglenker die Sicht zurück auf die Hauptfahrbahn zu ermöglichen - Sicherheitshalber ist eine $L_{S\min} = 50$ m als Fluchraum mangels weitergehendem Standstreifen vorzusehen - Der Standstreifen gemäss Skizze in Tab. 1.3 muss eine normale Breite von 2.50 m aufweisen.

**Gestaltung des
Zwickels****Gestaltung des
Zwickels
(Fortsetzung)**

Vorläufige Anforderungen an die Beleuchtung

Die Beleuchtung erfolgt grundsätzlich gemäss SN 418915 insbesondere Absatz 8.1.1 (... liegen besonders schwierige Verkehrsbedingungen vor, müssen die Anforderungen um mindestens 30% erhöht werden). Es wird empfohlen, das geforderte Leuchtdichteniveau gemäss Tabellen 1 bis 3 der SN 418915 (vgl. Tab 5.2 und 5.3) in den folgenden Strecken um 50% zu erhöhen:



Die Beleuchtung ist so auszuführen, dass eine optimale optische Führung erreicht wird. Beispielsweise kann über der Einfahrt bis zum Ende des Beschleunigungsstreifens eine zusätzliche Leuchtenreihe angeordnet werden.

Bei Anordnung einer Einfahrt in Lage D2 ist die ganze Länge der Übergangsstrecke ÜS (vgl. Abb. 5.3) mit dem höheren Niveau gemäss SN 418915, welches für die Einfahrtsstrecke ES (Lage D1) gilt, zu beleuchten.

Die Abschlusswand des Beschleunigungsstreifens ist mit der doppelten Leuchtdichte der Fahrbahn zu beleuchten.

1.6 Spezialfälle

Galerien

Der Fall von Beschleunigungsstreifen in Galerien wurde nicht gesondert betrachtet. Unter der Voraussetzung, dass die Licht-/Kontrastverhältnisse in Galerien eher besser als in Tunneln sind, haben die für Tunnel aufgestellten Anforderungen auch für Galerien ihre Gültigkeit.

1.7 Die wichtigsten Änderungen gegenüber den Resultaten aus Forschungsauftrag 18/87

Gegenüber den in Forschungsauftrag 18/87 formulierten vorläufigen Empfehlungen für Knoten im Bereich von Tunneln treten folgende Abweichungen auf:

- Die nicht zulässige Lage des Beschleunigungsstreifens (Manövrier- und Einfädelungsbereich) wird nur noch auf die Zone D1 beschränkt.
- Die minimale Gesamtlänge des Beschleunigungsstreifens (Abstand zwischen geometrischer Nase und Endes des Zwickels) wurde auf 200m reduziert.
- Die Anforderungen an die Beleuchtung wurden angepasst.

1.8 Erreichung der Forschungsziele (vgl. Kap. 4)

Die für die Forschungsarbeit gesteckten Ziele konnten weitgehend erreicht werden.

1.9 Fazit

Die Untersuchungen haben einerseits gezeigt, dass unter Einhaltung gewisser Bedingungen die Realisierung von Einfahrten auf Hochleistungsstrassen im Bereich von Tunneln und Galerien vertretbar ist.

Andererseits zeigten die Untersuchungen, dass man sich im bau- und verkehrstechnisch interessanten Bereich D1 im Grenzbereich einer genügenden Wahrnehmung befindet und deshalb die Anordnung des Manövrierebereiches in dieser Zone aus Sicherheitsgründen nicht zugelassen werden sollte.

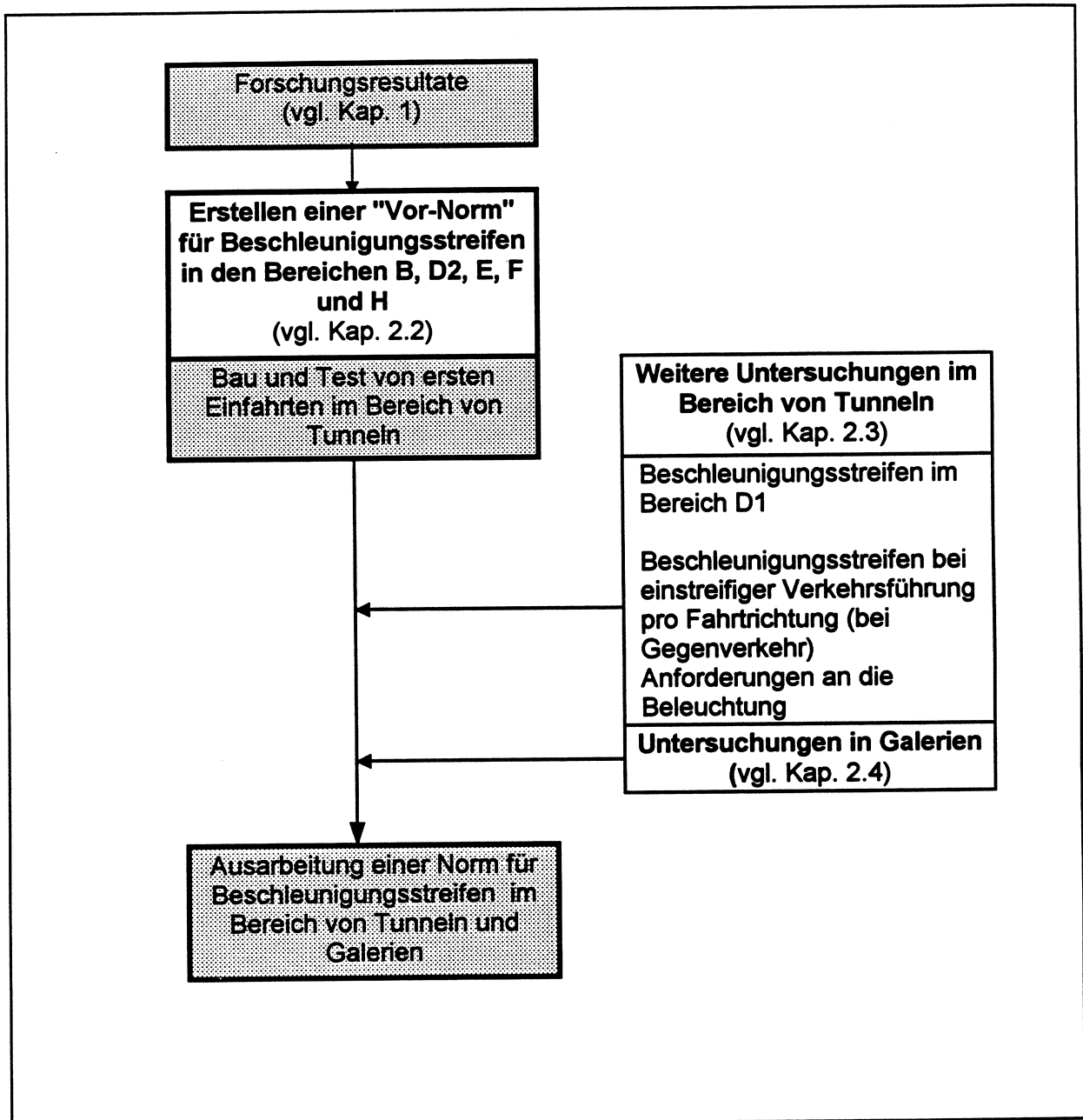
In einem Kurztunnel mit Sicht auf das Tunnelende vor der Einfahrt, der sich im Prinzip nur aus einer Zone D1 und einer Zone F zusammensetzt, ist die Anordnung des Einfädelungsvorganges in Bereich F zulässig. Trotz verminderter Wahrnehmungsprobleme in D1 (geringere Wirkung des schwarzen Loches und der Dunkeladaptation) gegenüber einem Tunnel ohne Durchsicht ist in diesem Bereich die Anordnung des Einfädelungsmanövers unzulässig.

2. EMPFEHLUNGEN FÜR DAS WEITERE VORGEHEN

2.1 Übersicht

Das weitere Vorgehen ist in Abb. 2.1 im Überblick schematisch dargestellt:

Abb 2.1 Empfehlungen für das weitere Vorgehen, Übersicht



2.2 Einfahrten in den Bereichen B, D2, E, F und H

Aufgrund der vorliegenden Resultate empfehlen wir folgendes weiteres Vorgehen:

1. Für die Planung erster Einfahrten auf Hochleistungsstrassen im Bereich von Tunneln ist auf der Basis der formulierten Anforderungen eine "Vornorm" zu erstellen. Diese hat Gültigkeit bis zum Erlass der definitiven Norm.
2. Erste gebaute Beschleunigungsstreifen sind ab Inbetriebnahme bezüglich Verkehrsablauf, Unfallgeschehen und Fehlverhalten zu überwachen und auszutesten. Aufgrund erster ausgewerteter Untersuchungen müssen die vorliegenden Anforderungen allenfalls überarbeitet werden.
3. Die aufgrund erster Betriebserfahrungen überarbeiteten Anforderungen können im Anschluss in eine definitive Norm über Einfahrten auf Hochleistungsstrassen im Bereich von Tunneln und Galerien übergeführt werden

2.3 Weitere Untersuchungen im Bereich von Tunneln

Für den Gewinn weiterer Erkenntnisse, die für den Praktiker von wesentlichem Interesse sind, empfehlen wir folgende weitergehende Untersuchungen:

A. Beschleunigungsstreifen im Bereich D1

Nebst Beschleunigungsstreifen direkt ausserhalb bzw. am Tunnelportal (Bereich B) sind Einfahrten unmittelbar nach dem Portal (Bereich D1) für die Praktiker sowohl verkehrs- als auch bautechnisch von grossem Interesse. Eine definitive Aussage zu der Machbarkeit solcher Anlagen im Bereich D1 kann nur gewonnen werden, indem für die Tunneleinfahrtszone weitergehende Feldversuche durchgeführt werden.

B. Beschleunigungsstreifen bei nur einem Fahrstreifen pro Fahrtrichtung (bei Gegenverkehr)

Anhand von Feldversuchen muss ermittelt werden, inwieweit das Verkehrsverhalten bei nur einem Fahrstreifen auf der durchgehenden Fahrbahn von den vorliegenden Forschungsergebnissen abweicht. Insbesondere müssen folgende Problembereiche beachtet werden:

- Auf der durchgehenden Hauptfahrbahn besteht keine Möglichkeit mehr, bei einmündenden Fahrzeugen auf den Überholstreifen auszuweichen.
- Wie gross ist die Gefahr, dass Automobilisten bei einmündenden Fahrzeugen aus Gewohnheit auf den Fahrstreifen der Gegenrichtung ausweichen?

C. Anforderungen an die Beleuchtung

Die vorläufigen Anforderungen an die Tunnelbeleuchtung aus Tab. 1.5 stützen sich nur zum Teil auf die in den Untersuchungen erarbeiteten Befunde, zum andern Teil auf die generell bekannte Tatsache, dass komplizierte Sehaufgaben auch höhere Anforderungen an die Beleuchtung stellen. Bisher wurde das Problem der Beleuchtung von unterirdischen Knoten international (im Rahmen der internationalen Beleuchtungskommission CIE) aber noch nicht studiert. Für das weitere Vorgehen sollte auf ein breiteres Fachwissen und zusätzliche Untersuchungen zurückgegriffen werden. Der Division 4 der CIE wird deshalb vorgeschlagen, ein neues technisches Komitee zu gründen, das sich mit der Beleuchtung von unterirdischen Knoten befassen sollte. Auf schweizerischer Ebene sollte die Fachgruppe Tunnelbeleuchtung der SLG die Erarbeitung der Beleuchtungsnormen übernehmen.

2.4 Einfahrten in Galerien

Um abzuklären, inwieweit die zuvor festgelegten Anforderungen für Beschleunigungsstreifen in Galerien gelockert werden können, kann am besten an einer ersten in einer Galerie realisierten Einfahrt getestet werden.

HINTERGRÜNDE UND DETAILLIERTE RESULTATE

3. EINLEITUNG

3.1 Ausgangslage

Einfahrten auf Hochleistungsstrassen im Bereich von Tunneln und Galerien erlauben Linieneinführungen und Anschlusskonzepte, welche sowohl den Forderungen nach unterirdischer Strassenführung wie auch nach genügender Anschlussdichte Rechnung tragen.

Solche Beschleunigungsstreifen werden von den zuständigen Stellen bis heute grundsätzlich nicht genehmigt und demzufolge in der Schweiz bisher nur in wenigen Ausnahmesituationen realisiert.

Insbesondere in städtischen Verhältnissen wird der Druck auf die Praxis bzw. die zuständigen Behörden zur Realisierung unterirdischer Einfahrten immer grösser.

Insbesondere werden aufgrund einer entsprechenden heute gültigen Weisung durch das Bundesamt für Strassenbau im Bereich von Tunneln und Galerien keine solchen Einfahrten genehmigt.

Im VSS Forschungsbericht 187 "Voraussetzungen für Strassenknoten in Tunneln und Galerien" sind erste Bedingungen und Anforderungen formuliert, unter welchen solche Anlagen möglich sind.

Dabei war es nicht möglich, sämtliche Aspekte ausführlich zu bearbeiten, so dass die Bedingungen und Empfehlungen zum Teil sehr restriktiv formuliert werden mussten. Im Besonderen zeigte sich das Bedürfnis, die Wahrnehmungsprobleme in Form von Feldversuchen zu untersuchen.

3.2 Vorgeschichte

Im Forschungsauftrag 18/87 "Voraussetzungen für Strassenknoten in Tunneln und Galerien" wurden aufgrund eines Literaturstudiums, einer Umfrage in der Schweiz und im Ausland, der Untersuchungen einiger Beispiele und von theoretischen Erwägungen erste Anforderungen an Beschleunigungsstreifen im Bereich von Tunneln und Galerien formuliert.

Die im Rahmen jenes Forschungsauftrages durchgeführten Arbeiten liessen die grundsätzliche Folgerung zu, dass Einfahrten im Bereich von Tunneln unter Berücksichtigung der formulierten Empfehlungen und Voraussetzungen und bei sorgfältiger Projektierung verkehrssicher ausgestaltbar sind. Dabei wurden besondere Bedingungen unter anderem in Bezug auf die Lage, das Geschwindigkeitsniveau, die Beleuchtung, die Sichtverhältnisse und die Verkehrssteuerung formuliert.

Gleichzeitig hat sich aber gezeigt, dass mit zusätzlichen Untersuchungen zahlreiche Wissenslücken zu schliessen sind, damit eine erhöhte Sicherheit in der solcher Anlagen erreicht und die zum Teil stark einschränkenden Bedingungen gelockert werden können.

Aufgrund der zahlreichen offenen Fragen drängte sich eine Weiterbearbeitung der Forschungsarbeiten auf.

3.3 Auftrag/Zweck

Das Ziel der Untersuchungen war, Aspekte der Verkehrssicherheit zu klären und für den Praktiker ein Hilfsmittel und wenn möglich zugleich die Grundlagen für eine (Vor-)Norm zu schaffen, welche die Beurteilung der Machbarkeit von Einfahrten auf Hochleistungsstrassen sowohl knapp ausserhalb des Portales als auch innerhalb von Tunneln und Galerien erlaubt.

Die Untersuchungen beschränken sich auf Einfahrten in zweistreifige richtungsgetrennte Hochleistungsstrassen.

Die Problematik der Wahrnehmung und Verkehrssicherheit von Beschleunigungstreifen im Bereich von Tunneln war in erster Linie anhand von Feldversuchen an bestehenden Objekten zu untersuchen.

3.4 Projektorganisation

Die Forschungsarbeiten wurden begleitet durch die **VSS Subkommission 172.20**, der folgende Mitglieder angehörten:

- Dr. P. Blaser, Eidgenössisches Amt für Messwesen, Wabern
- G. Brugnoli, Brugnoli + Gottardi, Lugano
- P. Hehlen, bfu, Bern
- J. Koch, Bundesamt für Strassenbau, Bern
- J. Krähenbühl, Ingenieur-Conseil, Genève-Troinex
- M. Pigois, Bundesamt für Strassenbau, Bern
- H. Riedel, Tiefbauamt des Kantons Basel-Land, Liestal
- M. Schaad, Bundesamt für Strassenbau (**Vorsitz**)
- P. Spacek, Institut für Verkehrswesen und Transporttechnik, ETH Zürich

Die Subkommission führte insgesamt 9 Sitzungen durch.

Als Forschungsstelle wurde beauftragt:

Balzari & Schudel AG, Ingenieur- und Planungsbüro, Schweiz, mit folgenden Mitarbeitern:

- R. Lanz, dipl. Ing. ETH
- W. Schaufelberger, dipl. Ing. ETH
- F. Marino, Spezialist für Verkehrsuntersuchungen

zuständig für Gesamtkoordination und Fachbereiche Strassenbau, Verkehrstechnik

Institut für Psychologie, Laboratorium für visuelle Informationsbearbeitung LVI, Universität Bern, mit folgenden Mitarbeitern:

- Prof. Dr. phil. R. Groner
- Dr. phil. M. Groner
- D. Zahnd, lic.phil.

zuständig für Fachbereich visuelle Wahrnehmung

Für die **Behandlung von lichttechnischen Fragen** wurde das Subkommissionsmitglied **Dr. P. Blaser** beigezogen.

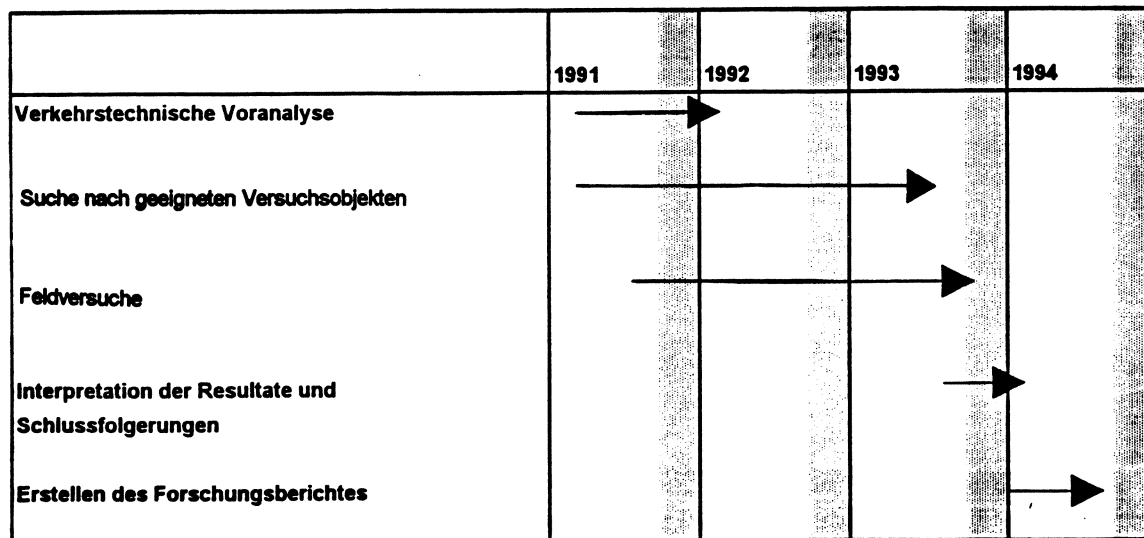
Bei der Zusammensetzung der Subkommission und der Forschungsstelle wurde grosses Gewicht auf eine gute Ausgewogenheit gelegt:

- Vertreter aus den wichtigsten Fachbereichen (Strassenbau, Verkehrstechnik, Verkehrssicherheit, Tunnelbeleuchtung, Wahrnehmungspsychologie)
- Vertreter aus Wissenschaft und Praxis
- Vertreter aus der öffentlichen Verwaltung und aus projektierenden Ingenieurbüros
- Vertreter aus dem Tessin, aus dem Welschland und aus der Deutschschweiz

3.5 Projektablauf

Für den Ablauf des Forschungsvorhabens wurde das in Abb. 3.1 dargestellte Vorgehen festgelegt.

Abb 3.1 Projektablauf



4. ZIELSETZUNGEN

Für Forschungsarbeit folgende übergeordnete Ziele:

- Aussage, ob und allenfalls unter welchen Bedingungen im Einflussbereich von Tunneln und Galerien zukünftig Beschleunigungstreifen realisiert werden können
- Überprüfung und Konkretisierung der im Forschungsauftrag 17/87 formulierten vorläufigen Empfehlungen
- Die Resultate sollten in erster Linie durch Feldversuche an bestehenden Objekten und weniger durch theoretische Betrachtungen gewonnen werden.
- Erstellen eines ersten Hilfsmittels für Praktiker, welches die Beurteilung der Machbarkeit solcher Einfahrten erlaubt und als Grundlage für die Projektierung gelten soll
- Schaffen einer Grundlage für eine "Vor-Norm", welche die Realisierung und den Test erster Beschleunigungstreifen im Bereich von Tunneln und Galerien ermöglichen soll, bevor aufgrund erster Erfahrungen eine definitive Norm erstellt werden kann.

Hauptziel der Forschungsarbeiten war es, die Aspekte der Verkehrssicherheit zu klären. Von besonderem Interesse sind insbesondere Beschleunigungstreifen unmittelbar vor und nach dem Tunnelportal, welche in der Praxis am meisten auftreten würden.

Die Hauptfragestellung bezog sich dabei auf die Bereiche Wahrnehmung und Fahrverhalten und ihre Beeinflussungsmöglichkeiten durch Beleuchtung und Ausrüstung der Verkehrsanlage sowie durch bauliche, gestalterische und betriebliche Massnahmen.

Für die beiden Forschungsvorhaben wurden folgende konkreten Aufgaben gestellt:

- Erkennen und Definieren von Verkehrssicherheits- und Wahrnehmungsproblemen
- Untersuchung der wichtigsten Probleme anhand von Feldversuchen
Hier stand die Behandlung folgender Fragen im Vordergrund:
 - Erkennen der Situation eines Beschleunigungstreifens
 - Erkennen und Begreifen des Beschleunigungstreifens auf der durchgehenden Hauptfahrbahn und auf der Einfahrt
 - Wahrnehmung von vortrittsberechtigten Fahrzeugen
 - Abschätzen von Distanzen und Zeitlücken
- Festlegen von Kriterien für eine genügende Wahrnehmung bzw. Verkehrssicherheit
- Beurteilung der grundsätzlichen Machbarkeit von Einfahrten im Bereich von Tunneln
- Aussage, wo und unter welchen Bedingungen im Bereich von Tunneln Beschleunigungstreifen angeordnet werden können

- Formulierung von konkreten Anforderungen bezüglich Geometrie, Ausrüstung und Betrieb für die Machbarkeit von solchen Einfahrten

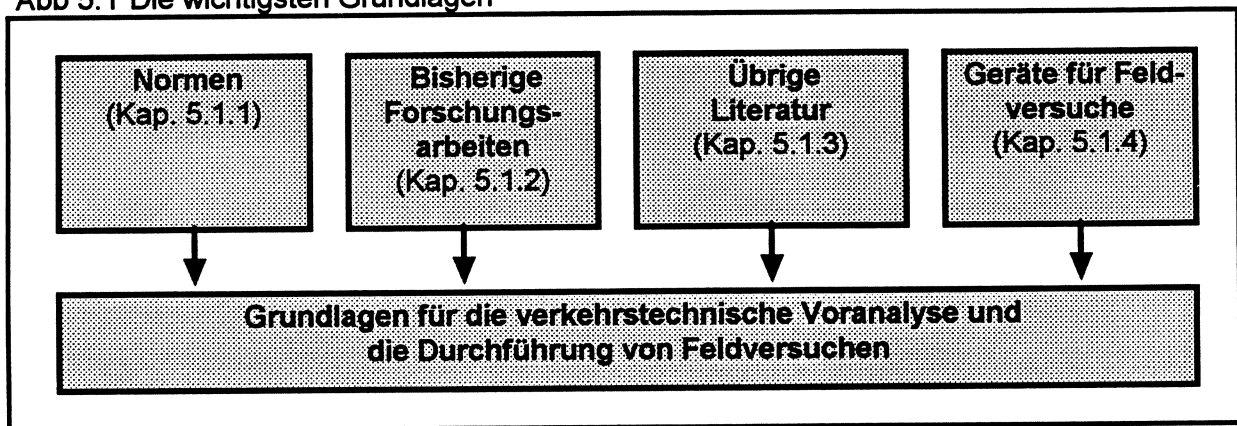
5. GRUNDLAGEN, RANDBEDINGUNGEN, VORENTSCHEIDE

5.1 Grundlagen

Eine detaillierte Übersicht über die verwendeten Unterlagen gibt das Literaturverzeichnis im Berichtsteil "Verzeichnisse".

Die wichtigsten für die Forschungsarbeiten verwendeten Grundlagen sind im folgenden kurz zusammengestellt.

Abb 5.1 Die wichtigsten Grundlagen



5.1.1 Normen

SN 640 090 a, Sichtweiten. 04/92, VSS-Norm

Abb 5.2 Richtwerte der Anhaltesichtweite auf Hochleistungsstrassen

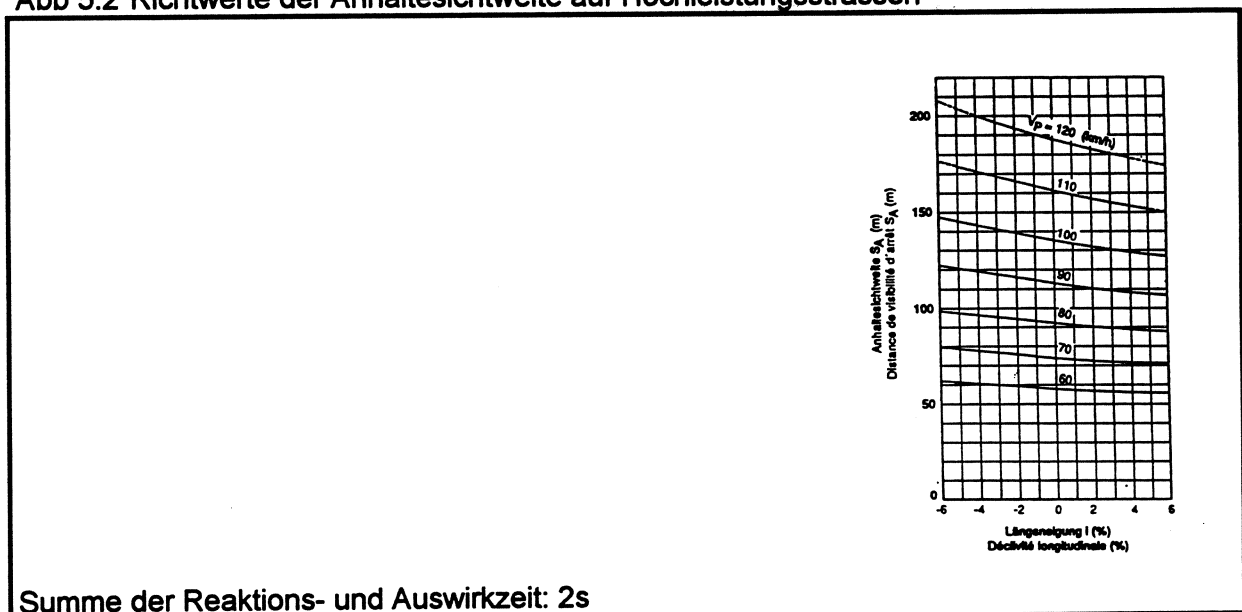
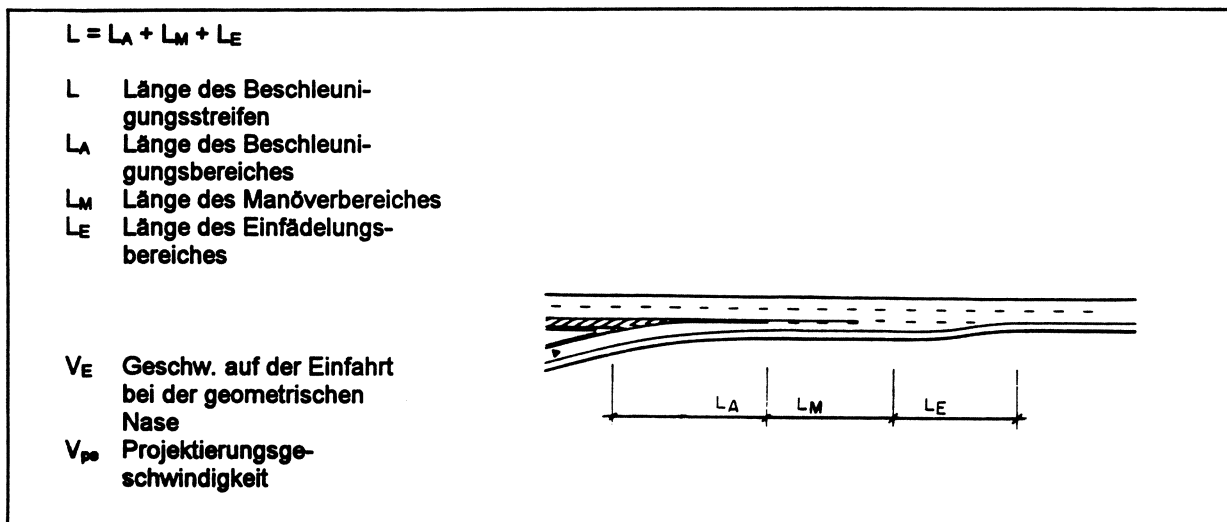
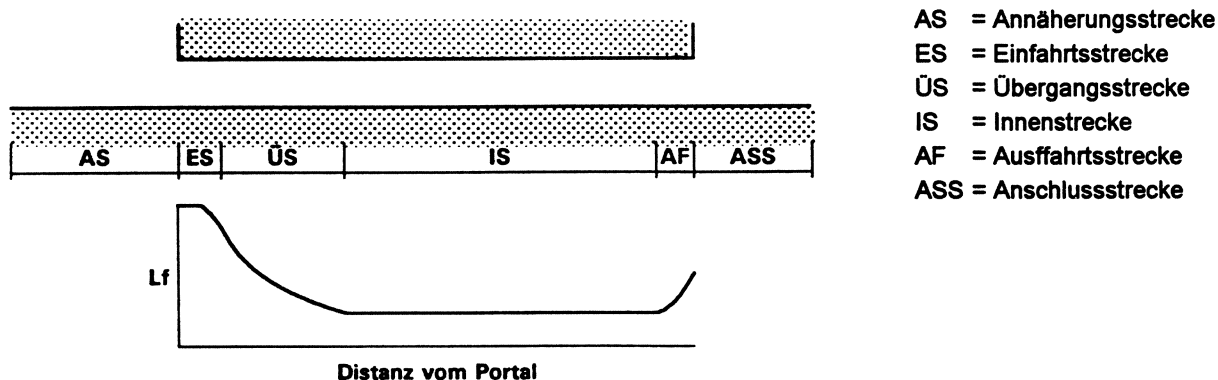


Abb 5.3 Aufbau und Länge der Beschleunigungsstreifen gemäss SN 640 266



SN 418 915, Öffentliche Beleuchtung, Strassentunnels, -galerien und -unterführungen, 3.6.92, Norm SEV, Leitsätze SLG

Abb 5.4 Tunnelbeleuchtung: Streckenübersicht und Definitionen

Tab 5.1 Notwendige k-Werte zur Erzielung der Leuchtdichte der Einfahrtsstrecke L_{FE}

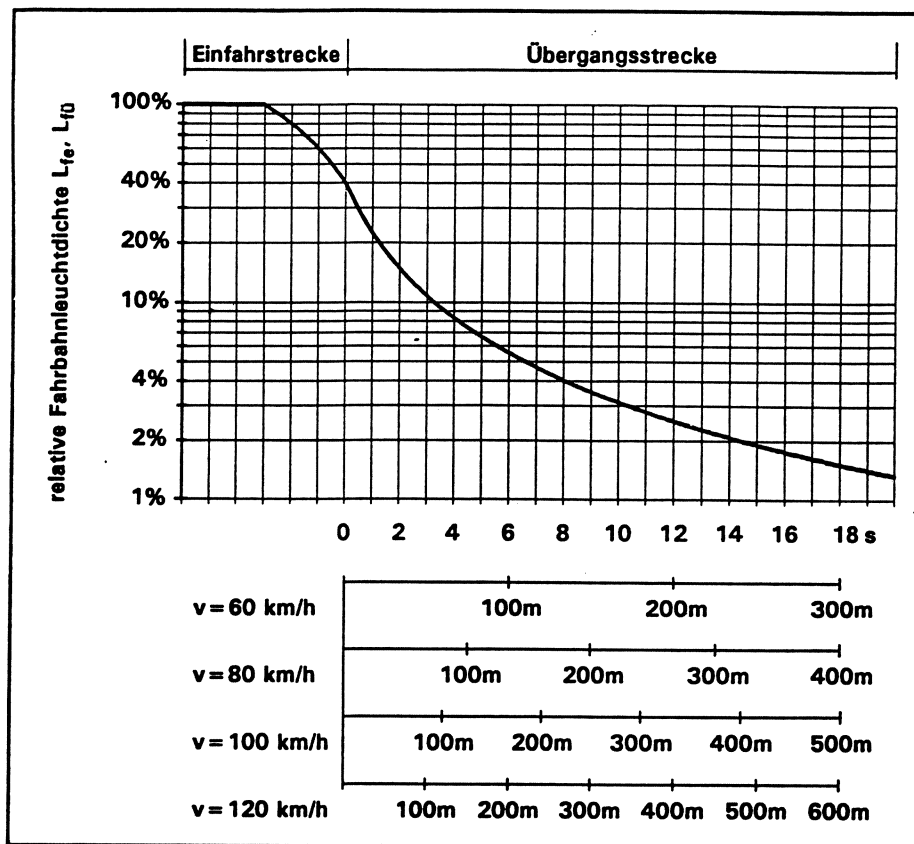
Die mittlere Leuchtdichte der Einfahrtsstrecke L_{fe} soll mindestens den durch die folgende Gleichung gegebenen Wert aufweisen:

$$L_{fe} \geq k \cdot L_{20} \quad (L_{fe} \text{ und } L_{20} \text{ in } \text{cd/m}^2)$$

Die von der Geschwindigkeitslimite, der Verkehrsmenge und der Beleuchtungsart abhängigen k-Werte sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Beleuchtungsart	symmetrisch ($q_c < 0,5$)			gegenstrahlend ($q_c \geq 0,5$)		
Verkehrsmengen	< 100	100–1000	> 1000	< 100	100–1000	> 1000
Geschwindigkeitslimite						
60 km/h	0,03	0,04	0,04	0,015	0,02	0,02
80 km/h	0,04	0,05	0,06	0,02	0,025	0,03
100 km/h	0,06	0,07	0,08	0,03	0,035	0,04
Verkehrsmenge in Fz/h je Fahrstreifen						

Abb 5.5 Zeitlicher Verlauf der Leuchtdichten der Einfahrt- und Übergangsstrecke

Tab 5.2 Mittlere Leuchtdichten der Innenstrecke L_{fi} (cd/m²) bei Tag

Geschwindigkeitslimite km/h	Verkehrsmenge		
	<100	100–1000	>1000
60	1	2	3
80	2	3	4
100	3	4	6
Verkehrsmenge in Fz/h je Fahrstreifen			

Tab 5.3 Mittlere Leuchtdichten der Innenstrecke L_{fi} (cd/m²) bei Nacht

Geschwindigkeitslimite km/h	Verkehrsmenge		
	<100	100–1000	>1000
60	0,5	1	1
80	0,5	1	1
100	1	1	2
Verkehrsmenge in Fz/h je Fahrstreifen			

5.1.2 Bisherige Forschungsarbeiten

VSS Forschungsbericht 187 über Forschungsauftrag 18/87 "Voraussetzungen für Strassenknoten in Tunneln und Galerien", Mai 1990; wichtigste Forschungsergebnisse

Vorläufige Empfehlungen für Einfahrten in Autobahnen

Einfahrten werden unter Berücksichtigung folgender Bedingungen als möglich erachtet:

- Trassierung und Sichtweiten für eine um 20 km/h höhere als die signalisierte Höchstgeschwindigkeit HG
- Die geometrische Nase darf in Fahrtrichtung nicht 150 m vor bis 100 m nach dem Einfahrtsportal und nicht 250 m vor bis 50 m nach dem Ausfahrtsportal liegen
- Die minimale Länge des Beschleunigungstreifens muss 300 m betragen
- Geschwindigkeitsbeschränkung auf 80 km/h
- Leistungsreserven von 20 %
- Erhöhte Beleuchtung und Leuchtenbänder über jedem Fahrstreifen
- Dauernde Überwachung des Einfahrtsbereiches

5.1.3 Übrige Literatur

vgl. Literaturverzeichnis im Berichtsteil "Verzeichnisse"

5.1.4 Geräte

Für die Forschungsarbeiten standen folgende Geräte zur Verfügung

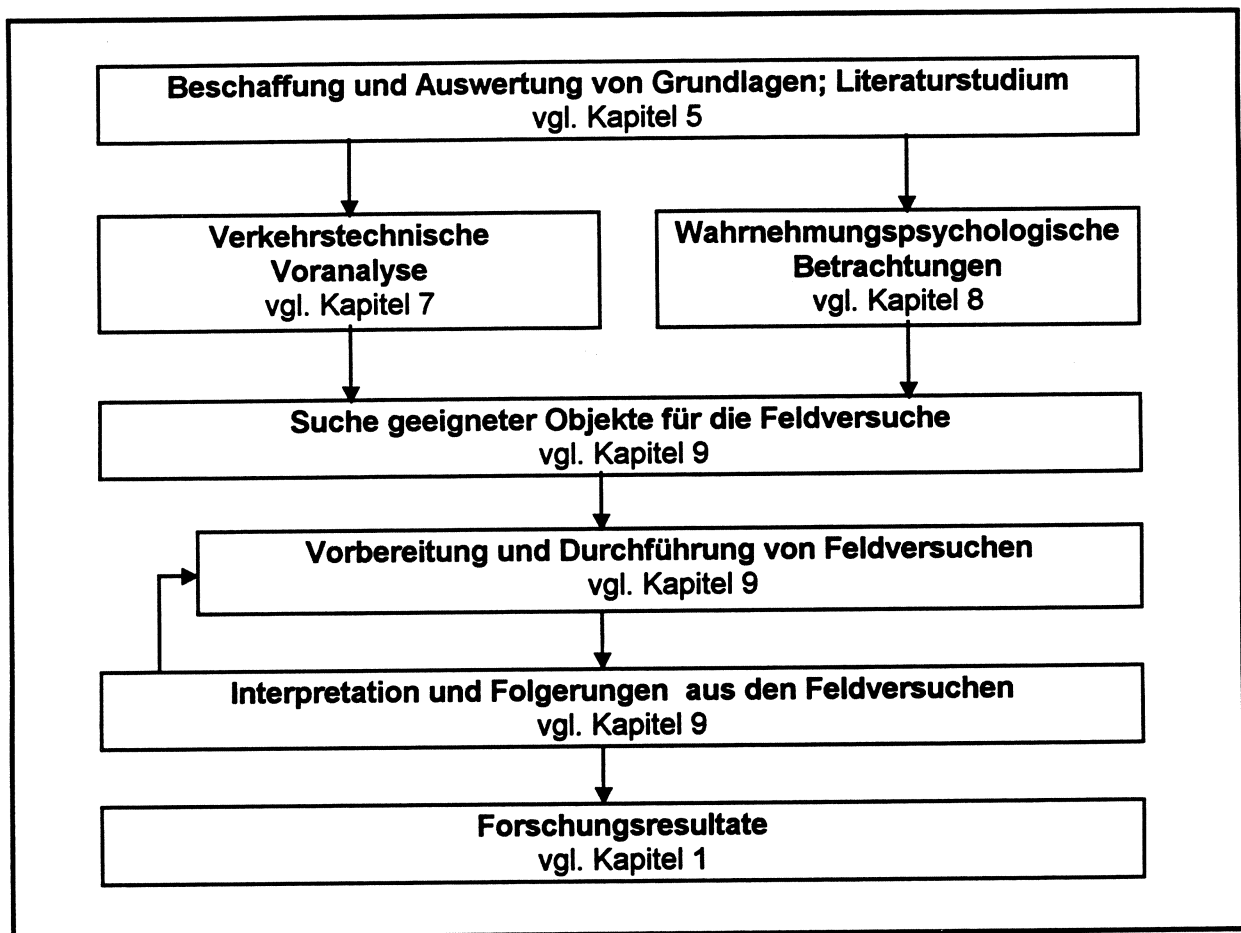
Verkehrsuntersuchungen

- automatische Verkehrszählgeräte mit entsprechender Auswerte-Software, Eigenentwicklung Balzari & Schudel AG, mit folgenden Merkmalen:
 - Ermittlung der Verkehrsbelastung pro Fahrstreifen in einem beliebigen Zeitintervall
 - Ermittlung von Geschwindigkeiten, unterteilt nach Fahrzeugtypen
 - Ermittlung von Zeitlücken
 - Einzelfahrzeugetfassung
 - Flexible Auswerte-Software für beliebig wählbare Zeitintervalle, Ganglinien, grafische Darstellungen usw.
- Videokameras zur Aufnahme des Verkehrsablaufes im Freien und in Tunneln für folgende Einsatzmöglichkeiten:
 - Erhebung von Fahrzeugströmen
 - Unterscheidung von Fahrzeugtypen
 - Erkennen von Verkehrsstörungen / kritischen Situationen
 - Erfassung des Anteils nicht eingeschalteter Fahrzeug-Lichter

6. METHODIK

Für die Abwicklung der Forschungsarbeit wurde folgendes Vorgehen gewählt:

Abb 6.1 Vorgehen



7. VERKEHRSTECHNISCHE VORANALYSE

7.1 Zweck der Voranalyse

Mit der verkehrstechnischen Voranalyse sollten die wichtigsten Problembereiche, welche bei der Anordnung von Einfahrten auf richtungsgetrennten Hochleistungsstrassen mit mindestens 2 Fahrstreifen pro Richtung im Einflussbereich von Tunneln entstehen können, erkannt und systematisiert werden. Sie bildete wichtige Grundlage für die Suche nach geeigneten Versuchsobjekten und die Durchführung der Feldversuche.

7.2 Einflussfaktoren

Für die Wahrnehmung eines Beschleunigungstreifens im Bereich eines Tunnels sind folgende Einflussfaktoren massgebend:

- (1) Lage der Einfahrt in Bezug auf den Tunnel
- (2) Geometrie des Tunnels
- (3) signalisierte Höchstgeschwindigkeit
- (4) Ausrüstung des Einfahrtsbereiches (z.B. Signalisation)
- (5) Verkehrszusammensetzung
- (6) Tunnelbeleuchtung

(1) Lage des Knotens in Bezug auf den Tunnel

Je nach Lage des Knotens in Bezug auf den Tunnel variieren Lichtverhältnisse, Adaptationsprobleme bei Lichtwechsel (hell/dunkel und dunkel/hell), Kontraste zwischen Hindernis und Umgebung sowie Blendungseffekte entgegenkommender Fahrzeuge. Auf diese Aspekte wird in Kapitel 8 ausführlich eingegangen.

Aufgrund dieser Problematik wurde der Tunnel in verschiedene Bereiche unterteilt (Abb. 7.1).

Grundlage für diese Unterteilung bildeten die unterschiedlichen Wahrnehmungsprobleme in Abhängigkeit der Lage einerseits und die in den Leitsätzen der SLG definierten Strecken andererseits.

Im Forschungsauftrag 18/87 werden Knotenpunkte ausserhalb des Tunnelportales, aber im Einflussbereich des Tunnels behandelt. Dieser Einflussbereich wurde in Anlehnung an die beleuchtungstechnischen Zonen aus der SN 418 915 wie folgt abgegrenzt:

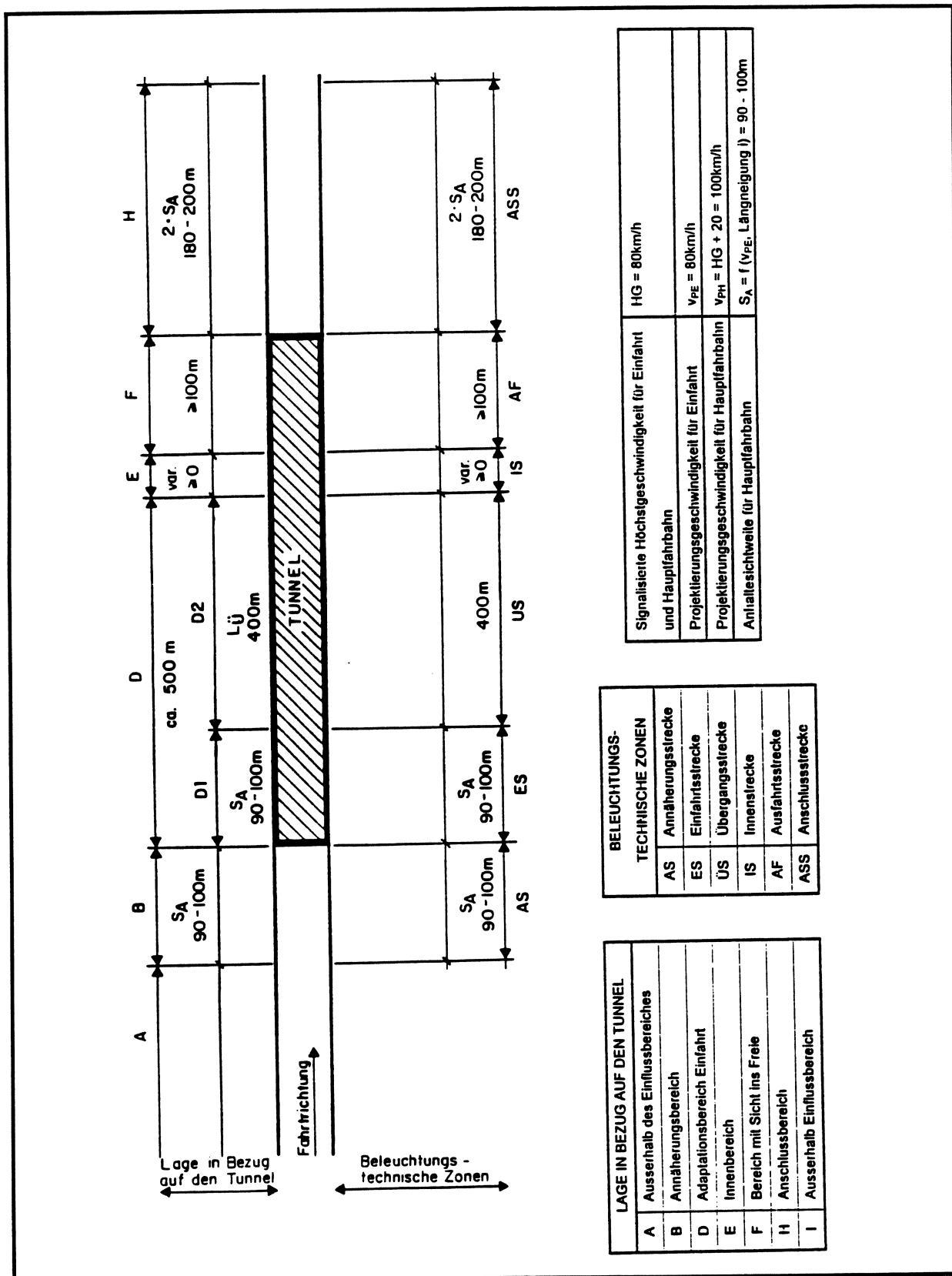
- bei der Tunnelzufahrt auf die Länge der Anhaltestrecke
- bei der Tunnelwegfahrt auf die doppelte Länge der Anhaltestrecke

Die Lage im Tunnel ist zu betrachten:

- in bezug auf die durchgehende Hauptfahrbahn
- in bezug auf die Einfahrt

Ein Kurztunnel, bei welchem das Tunnelende bereits vor der Einfahrt in den Tunnel erkannt werden kann, setzt sich nur aus einer Zone D1 mit verminderter Wirkung des „schwarzen Loches“ bzw. der Dunkeladaption bei der Tunneleinfahrt und einer Zone F zusammen.

Abb 7.1 Lage in bezug auf den Tunnel: Definitionen und Distanzen (entspricht Abb 1.1)



(2) Geometrie des Tunnels

Die Tunnelgeometrie ist von entscheidender Bedeutung für die rechtzeitige Wahrnehmung eines unterirdischen Beschleunigungstreifens. Insbesondere drängen sich folgende Fragen auf:

- Kann die Trassierung (horizontale und vertikale Radien) eines Tunnels mit unterirdischer Einfahrt zwecks rechtzeitiger Ermöglichung der Wahrnehmung der Situation auf der Basis derselben minimalen Anhaltesichtweite wie eine entsprechende oberirdische Anlage erfolgen oder muss gegenüber den Werten aus der Norm SN 640 090a ein Sicherheitszuschlag erfolgen?
- Wie wirkt sich die direkte Durchsicht durch einen Tunnel (Erkennen des Tunnelendes bereits vor der Tunneleinfahrt) auf die Wahrnehmung eines Knotens im Tunnelbereich aus?

(3) signalisierte Höchstgeschwindigkeit

Hier stellt sich die Frage, ob aus Wahrnehmungs- und Sicherheitsgründen gegenüber einer oberirdischen Einfahrt eine restriktivere Anforderung an die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit gestellt werden soll, z.B. eine Beschränkung auf maximal 80 km/h.

(4) Ausrüstung

Es gilt abzuklären ob das Erkennen der Einfahrt mit zusätzlicher Ausrüstung (z.B. spezielle Signalisation) verbessert werden kann.

(5) Verkehrszusammensetzung

Betreffend Verkehrszusammensetzung sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- ortskundige und ortsunkundige Fahrer (z.B. Pendler und Freizeitverkehr)
- Schwerverkehrsanteil

(6) Beleuchtung

Folgende Problembereiche müssen näher betrachtet werden:

- Tunnelbeleuchtung im Annäherungsbereich der Einfahrt
- Beleuchtung im Bereich der Einfahrt
- Ungenügende Fahrzeugbeleuchtung (zu spät oder gar nicht eingeschaltete bzw. zu früh ausgeschaltete Fahrzeuglichter)
- Kann die Wahrnehmung im Übergangsbereich hell-dunkel mit erhöhter Beleuchtung verbessert werden?
- Sind für das Erkennen von Rückstau Fahrzeuge mit oder ohne eingeschaltetem Licht massgebend?

7.3 Anforderungen für einen sicheren Verkehrsablauf

Für einen sicheren Verkehrsablauf bei einem Beschleunigungstreifen im Tunnelbereich müssen folgende Punkte erfüllt sein:

- a) ausreichende Erwartungshaltung
- b) Erkennen der Einfahrt
- c) Erkennen von vortrittsberechtigten Motorfahrzeugen
- d) Abschätzen von Zeitlücken, Distanzen und Geschwindigkeiten von vortrittsberechtigten Fahrzeugen
- e) Erkennen von Fehlverhalten (nicht vortrittsberechtigten Fahrzeuge)

Ob bei der Zufahrt auf die Einfahrt und beim Befahren des Einfahrtsbereiches diese Punkte im einzelnen Fall wahrgenommen werden, hängt im Bereich von Tunneln insbesondere von folgenden Faktoren ab:

- Tunneleinfahrt mit „schwarzem Loch“ (Problem Schleierleuchtdichte)
- Adaptation (hell/dunkel und dunkel/hell)
- Erwartungshaltung des Fahrzeuglenkers (unterirdische Einfahrten werden heute nicht erwartet, da sie praktisch nicht vorkommen)
- Geometrie (genügende Sichtweiten)

7.4 Erhebung eingeschalteter Fahrzeuglichter

Für die Wahrnehmung von Einfädelungsvorgängen und Rückstau in Tunneln, insbesondere im Bereich D, wurde der Unterschied, ob das stehende Fahrzeug das Rücklicht eingeschaltet hat oder nicht, als wesentlich erachtet. Es wurde davon ausgegangen, dass ein Fahrzeug ohne Rücklicht wesentlich schlechter wahrnehmbar ist, als ein solches mit eingeschaltetem Licht.

Deshalb war von entscheidender Bedeutung, ob für die Wahrnehmungsbetrachtungen für den Einfädelungsvorgang und bei Rückstau ein Fahrzeug mit oder ohne eingeschaltetem Rücklicht berücksichtigt werden sollte.

Aufgrund dieser Ausgangslage wurden in 2 Tunneln (Tab 7.3 und 7.4) in Abhängigkeit der Distanz zum Tunneleinfahrtsportal der Anteil Fahrzeuge ohne Licht erhoben.

Tab 7.3 N12 Bern, Brünstentunnel (L = ca. 300m), Anteil Fz ohne Licht, 1115 bis 1315 Uhr

	Total (Fz)	ohne Licht (Fz)	
Einfahrtsportal	917	472	52 %
30 m nach Portal	917	85	9 %
100 m nach Portal	917	16	2 %
Ausfahrtsportal	917	290	37 %

Tab 7.4 N2 Belchentunnel (L = ? m), Anteil Fahrzeuge ohne Licht, 1300 bis 1500 Uhr

	Total (Fz)	ohne Licht (Fz)	
Einfahrtsportal	2288	346	15 %
30 m nach Portal	2288	192	8 %
100 m nach Portal	2288	108	5 %
Ausfahrtsportal	2288	163	7 %

Aufgrund des grossen Anteils nicht eingeschalteter Fahrzeuglichter wurde festgelegt, dass für die Wahrnehmungsbetrachtungen für Einfädelungsvorgänge und Rückstau Fahrzeuge ohne eingeschaltetes Rücklicht als massgebend zu berücksichtigen sind.

8. WAHRNEHMUNGSPSYCHOLOGISCHE BETRACHTUNGEN

8.1. Einleitung

Bei unterirdischen Einfahrten in Hochleistungsstrassen geht es vom wahrnehmungspsychologischen Standpunkt her um das Erkennen anderer Fahrzeuge und die Beurteilung ihrer Geschwindigkeit unter erschwerten Bedingungen.

Ob ein Objekt von einer Person wahrgenommen wird, hängt von mehreren Faktoren ab, primär einmal von der Helligkeitsdifferenz zwischen Objekt und Hintergrund und von der mittleren Helligkeit im Gesichtsfeld, an die die Person adaptiert ist. Zu den weiteren Faktoren gehören Grösse, Form und Farbe des Objekts, wie lange es präsentiert wird und ob es sich bewegt oder stationär bleibt. Dann spielt das Alter der Person eine Rolle und ihre Aufmerksamkeit auf Ereignisse im Gesichtsfeld. Die Verteilung der Aufmerksamkeit hängt wieder davon ab, ob die Person ein entsprechendes Objekt im Gesichtsfeld erwartet.

Das menschliche Sehsystem funktioniert über einen Intensitätsbereich von mehr als acht Zehnerpotenzen und ist dort imstande, relativ kleine Differenzen zu entdecken. Die minimale Differenz DL in der Leuchtdichte zwischen Objekt und Hintergrund, die nötig ist, damit eine Person ein Objekt in einem bestimmten Prozentsatz von Fällen entdeckt, wird als Schwelle bezeichnet. In psychophysischen Untersuchungen, in denen Versuchspersonen ein Objekt auf einem homogenen Hintergrund entdecken mussten, wurde gefunden, dass die Kontrastschwelle, die als DL/L definiert ist, mit zunehmender Hintergrundhelligkeit abnimmt, oder anders ausgedrückt, dass die Empfindlichkeit zunimmt. Dies gilt je nach Grösse eines Objekts bis zu einer Hintergrundhelligkeit von etwa 1 bis 100 cd/m^2 . Dass die Leistung mit der mittleren Leuchtdichte im Gesichtsfeld über einen weiten Bereich zunimmt, gilt nicht nur für das Entdecken von Objekten, sondern zum Beispiel auch für Sehschärfeaufgaben. Für grössere Hintergrundsleuchtdichten bleibt dann die Kontrastschwelle DL/L annähernd konstant. Diese Beziehung wurde schon im letzten Jahrhundert von Weber entdeckt und wird seither als Webersches Gesetz bezeichnet.

Die Kontrastschwelle nimmt auch mit der Grösse des Objekts und mit seiner Präsentationsdauer bis zu einem gewissen Betrag ab. Dies deutet darauf hin, dass das Sehsystem das Licht über einen bestimmten räumlichen und zeitlichen Bereich integriert. Das Ausmass dieser Integration ist sowohl räumlich wie zeitlich unter skotopischen Bedingungen (Dunkelheit) viel grösser als unter photopischen (Tageslicht). Dadurch wird die räumliche und zeitliche Auflösung bei der Verarbeitung von Lichtreizen in der Dunkelheit verringert zugunsten der Entdeckung schwacher Intensitäten. Eine Beschreibung der experimentellen Resultate, die diesen Gesetzmässigkeiten zugrunde liegen, findet sich zum Beispiel bei Hood und Finkelstein (1986). Dass die Entdeckbarkeit eines Reizes aber nicht nur von seiner Fläche, sondern auch von seiner Form abhängt, konnte zum Beispiel Thomas (1978) in einer Untersuchung mit Rechtecken verschiedener Länge und Breite zeigen.

Seit einigen Jahren ist man in der Psychophysik dazu übergegangen, die Kontrastsensitivität, die als Kehrwert der Kontrastschwelle definiert ist, anhand von sinusförmigen Streifenmustern (gratings) zu untersuchen. Abb. 6.1 zeigt die Kontrastempfindlichkeit in Abhängigkeit der Ortsfrequenz eines Sinusstreifenmusters. Die Daten stammen aus einer Untersuchung von van Nes und Bouman (1967).

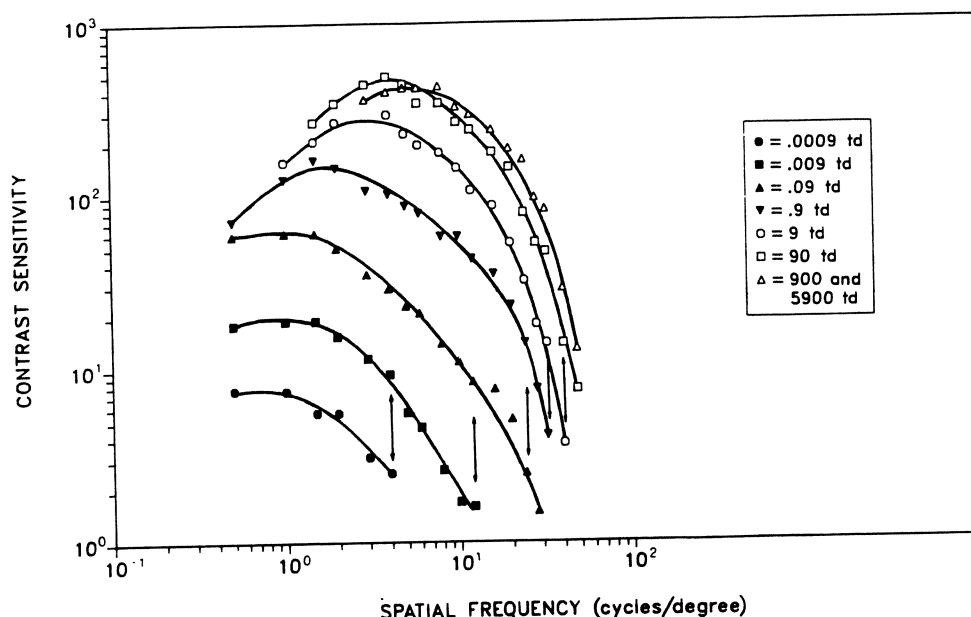


Abb. 8.1 Kontrastsensitivität in Abhängigkeit der Ortsfrequenz (Perioden pro Grad Sehwinkel) eines Sinusstreifenmusters. Der Parameter ist die mittlere Leuchtdichte gemessen in Troland.

Der Zielreiz, den die Versuchspersonen (Vpn) entdecken mussten, war ein Sinusstreifenmuster von 4.5 Grad Sehwinkel Breite und 8.25 Grad Sehwinkel Höhe. Die verschiedenen Kurven entsprechen verschiedenen mittleren Leuchtdichten gemessen in Troland. Die Daten stammen von einem einzelnen Beobachter. Die genaue Form der Kurven und die Position der Maxima variieren zwar zwischen Personen, aber die Daten zeigen mehrere allgemeine Eigenschaften. Die Kontrastsensitivität nimmt mit der mittleren Leuchtdichte zu bis zu einem Betrag von etwa 1000 td, was ungefähr 300 cd/m² entspricht, dann bleibt sie konstant. Mit steigender mittlerer Leuchtdichte verschiebt sich das Maximum der Kontrastsensitivität zu höheren Ortsfrequenzen, das heisst feinere Streifenmuster werden besser erkannt. Die Kontrastsensitivitätsfunktion für tiefe mittlere Leuchtdichten entspricht einem Tiefpassfilter. Mit zunehmender mittlerer Leuchtdichte wird sie zu einem Bandpassfilter. Hier finden wir die Gesetzmässigkeiten wieder, die oben im Zusammenhang mit der Entdeckung von aperiodischen Reizen beschrieben worden sind. Die Untersuchung der Kontrastsensitivität anhand von Sinusstreifenmustern hat den Vorteil, dass sie viel allgemeiner ist und dass unter der Annahme, dass das visuelle System linear arbeitet, aus den entsprechenden Kontrastsensitivitätsfunktionen die Kontrastsensitivität für einen beliebigen Reiz abgeleitet werden könnte. Eine Beschreibung dieses Ansatzes findet sich in Olzak und Thomas (1986).

Mit zunehmendem Alter nimmt die Transmissivität des Auges ab (Weale, 1963). Dies ist hauptsächlich dadurch bedingt, dass Absorption und Streuung des Lichts in der Linse ab 40 Jahren zunehmen (Wolf and Gardiner, 1965). Dies hat zur Folge, dass sich die Kontrastsensitivität verändert. Owsley, Sekuler und Siemsen (1983) untersuchten 91 Versuchspersonen im Alter von 19 bis 87 Jahren. Sie stellten fest, dass sich die Kontrastsensitivität für tiefe Ortsfrequenzen über das Alter nicht verändert, jedoch für höhere Ortsfrequenzen ab einem Alter von 40 bis 50 Jahren abnimmt. Ferner zeigten junge Vpn eine vier- bis fünffach erhöhte Sensitivität, wenn anstelle eines tieffrequenten statischen Musters ein bewegtes präsentiert wurde. Diese erhöhte Sensitivität für bewegte Muster war jedoch bei über 60-Jährigen markant reduziert.

8.2 Wahrnehmungsprobleme beim Befahren von Tunneln

Die grössten Probleme für das Wahrnehmungssystem beim Durchfahren eines Tunnels ergeben sich bei hellem Tageslicht, da dann die Unterschiede in der Lichtstärke zwischen aussen und innen am grössten sind. Bei der Annäherung an den Tunnel erscheint der Eingang als schwarzes Loch, in dem man kaum etwas erkennen kann. Die schlechte Sichtbarkeit von Objekten, die sich im Tunnel befinden, wird hauptsächlich verursacht durch Streulicht, das sich überlagert und damit den Kontrast der Objekte vermindert.

Das zweite Problem ist die grosse, sehr schnell erfolgende Veränderung der Beleuchtung beim Einfahren in und beim Ausfahren aus dem Tunnel. Das menschliche Wahrnehmungssystem operiert zwar wie erwähnt über viele Zehnerpotenzen von Hintergrundleuchtdichten, aber die Adaptation an grosse Veränderungen braucht Zeit. Sie bleibt in natürlicher Umgebung unbemerkt, da der Tag-Nachtwechsel graduell und langsam erfolgt.

8.2.1 Einfluss von Streulicht

Wenn ein Fahrer/eine Fahrerin sich dem Tunnelportal nähert, muss er/sie Objekte im Tunnelinnern von aussen erkennen können mindestens aus einer Distanz, die der Anhaltstrecke entspricht. Der Leuchtdichte der Objekte und des Tunnelhintergrunds werden Leuchtdichten überlagert, die durch Streuung des Lichts aus der Tunnelumgebung an Luftpartikeln, an der Windschutzscheibe und im Auge des Fahrers/der Fahrerin entstehen. Diese drei Streuleuchtdichten bilden einen Schleier über das Gesichtsfeld, reduzieren damit den Kontrast aller Objekte im Gesichtsfeld einschliesslich derjenigen im Tunnel und machen sie schlechter sichtbar. Formal lässt sich das so demonstrieren: der Kontrast C_{ob} eines Objekts im Tunnel wird folgendermassen definiert:

$$C_{ob} = (L_{ob} - L_h) / L_h$$

L_{ob} bezeichnet die Leuchtdichte des Objekts, L_h diejenige des Hintergrunds. L_s sei die Summe der drei Streuleuchtdichten. Der reduzierte Kontrast C_{red} beträgt dann:

$$C_{red} = (L_{ob} - L_h) / (L_h + L_s)$$

Die Beziehung lässt sich wie folgt umformen:

$$C_{red} = C (L_h / (L_h + L_s))$$

Der Kontrast wird also um den Faktor $L_h / (L_h + L_s)$ reduziert. Die Sichtbarkeit eines Objekts V wird definiert als Verhältnis des vorhandenen Kontrasts C_{red} zur Kontrastschwelle C_{th}

$$V = C_{red} / C_{th}$$

Alle drei Streuleuchtdichten variieren beträchtlich. Die atmosphärische hängt ab von der Art der Partikel in der Luft und von der Transmissivität der Atmosphäre, diejenige der Windschutzscheibe von ihrem Verschmutzungsgrad und diejenige des Auges vom Winkel zwischen der Streulichtquelle und der Blickrichtung. Weiter hängt die letztere auch vom Alter ab, da wie oben erwähnt die Streuung in der Linse mit dem Alter zunimmt.

Die Tunnelbeleuchtung trägt dem kontrastreduzierenden Einfluss des Streulichtes Rechnung, indem die Leuchtdichte in der Einfahrzone des Tunnels in Abhängigkeit von den Streuleuchtdichten bestimmt wird. In der Praxis wird als Regelgrösse die Leuchtdichte L_{20} verwendet, durch die sich die Summe der Streuleuchtdichten approximieren lässt. L_{20} ist

die mittlere Leuchtdichte in einem 20 Grad Kreis, der sein Zentrum im Tunneleingang hat, gemessen aus der Anhaltedistanz. Die Länge der Einfahrzone entspricht der Anhaltedistanz. Nach den neuen Tunnelbeleuchtungsnormen SEV 8915 (1992) bleibt die Leuchtdichte über die halbe Länge der Einfahrzone konstant und sinkt dann bis zum Ende der Einfahrstrecke linear auf 40% ihres Anfangswertes.

8.2.2 Dunkeladaptation

Bei der Einfahrt in den Tunnel bei hellem Tageslicht wird die mittlere Leuchtdichte im Gesichtsfeld in sehr kurzer Zeit drastisch reduziert, nämlich auf etwa 1% bis 8% der Aussenleuchtdichte L₂₀ je nach Beleuchtungsart, Höchstgeschwindigkeit und Verkehrsmenge. Eine Veränderung der mittleren Leuchtdichte hat eine temporäre Reduktion der Kontrastsensitivität zur Folge. Das Zurückgewinnen der Sensitivität braucht Zeit in der Grössenordnung von Sekunden bis Minuten. Der Prozess dauert viel länger bei der Adaptation an einen dunkleren Hintergrund als bei der Adaptation an einen helleren Hintergrund. Die Dunkeladaptation ist von vielen Faktoren abhängig. Zu den wichtigsten gehören Dauer, Intensität und Grösse des Adaptationsfeldes, Grösse, Ortsfrequenzanteil und Präsentationsdauer des zu entdeckenden Objekts (siehe z.B. Hood und Finkelstein, 1986). Wichtig in unserem Zusammenhang ist die Differenz zwischen der mittleren Leuchtdichte vor dem Tunneleingang und nach dem Tunneleingang. Je grösser diese Differenz ist, umso länger dauert die Adaptation.

Der verminderten Sensitivität des visuellen Systems wird in der Tunnelbeleuchtung dadurch Rechnung getragen, dass in der sogenannten Übergangszone die Leuchtdichte der Einfahrzone langsam vermindert wird, bis sie die Leuchtdichte der Innenzone erreicht, die je nach Höchstgeschwindigkeit und Verkehrsmenge zwischen 1 und 6 cd/m² beträgt.

Die Bedeutung der Dunkeladaptation für die Wahrnehmung des Fahrers oder der Fahrerin im Tunnel wird in der Tunnelbeleuchtungsliteratur verschieden eingeschätzt (Schreuder, 1991). In einer Publikation der CIE (Nr. 61, 1984), in der es um Wahrnehmungsuntersuchungen geht, auf denen die Prinzipien der Beleuchtung der Einfahrzone basieren, wird angenommen, dass die Dunkeladaptation schon weitgehend während der Annäherung an das Tunnelportal abläuft, da der dunkle Tunnelmund einen immer grösseren Anteil im Gesichtsfeld einnimmt und zusätzlich auch die Streuleuchtdichten, die das Adaptationsniveau erhöhen, mit der Distanz zum Portal abnehmen. Damit nicht im Einklang steht eine Untersuchung von Bourdy, Chiron, Cottin und Monot (1987), die den Einfluss der Dunkeladaptation auf die Kontrastschwelle untersuchten.

In einem Laborexperiment simulierten sie das Luminanzprofil bei der Einfahrt in einen Tunnel auf einem Feld mit einem Durchmesser von 12 Grad Sehwinkel. Die Ausgangsluminanz, an die die Versuchspersonen für eine Minute adaptiert wurden, betrug 4000 cd/m². Die simulierte Fahrt begann 360m vor dem Tunneleingang und endete 1040m im Tunnelinnern. Die Geschwindigkeit betrug 72km/h. Die Versuchspersonen mussten ein rundes Objekt, das in der Grösse dem Standardobjekt der CIE entsprach (7' Sehwinkel Durchmesser) und alle 3 sec präsentiert wurde, entdecken. Gemessen wurde die Kontrastschwelle (DL/L) für das Objekt. Es zeigte sich, dass nach dem Abfall der Luminanz beim Tunneleingang die Kontrastschwelle anstieg. Der maximale Anstieg von ca. 0.6 logarithmischen Einheiten wurde etwa 6 bis 10 sec nach dem Tunneleingang erreicht. Danach sank die Schwelle langsam wieder ab. Dies würde bedeuten, dass bei einer Geschwindigkeit von 60km/h die maximale Reduktion der Sensitivität durch die Anpassung an die reduzierte Luminanz erst 100 bis 160m im Tunnelinnern auftreten würde.

In einer weiteren Untersuchung fanden Bourdy et al. (1988), dass der Anstieg der Kontrastschwelle von der Ausgangsluminanz abhing. Bei 2000 cd/m² betrug er nur noch die Hälfte. Der Zeitpunkt der maximalen Reduktion der Sensitivität hing von der Geschwindigkeit ab. Die Autoren stellen die Frage, ob der Effekt der Dunkeladaptation in der Tunnelbeleuchtung nicht stärker berücksichtigt werden müsste.

8.2.3 Helladaptation

Die Tunnelinnenzone endet, wenn der Tunnelausgang sichtbar wird. Mit der Annäherung an den Tunnelausgang, nimmt die helle Tunnelöffnung einen immer grösseren Anteil im Gesichtsfeld ein. Objekte sind als dunkle Silhouetten gegen den hellen Ausgang sehr gut sichtbar, da der Kontrast sehr hoch ist. Ein Problem besteht nur, wenn kleinere Objekte (zum Beispiel kleinere Fahrzeuge) sich im "Schatten" von grösseren befinden, dann besteht für sie der Silhouetteneffekt nicht.

Bei der Ausfahrt aus dem Tunnel nimmt die mittlere Leuchtdichte im Gesichtsfeld sprunghaft zu, was eine temporäre Reduktion der Sensitivität zur Folge hat. Im Vergleich zur Dunkeladaptation erfolgt die Helladaptation schneller. Sie liegt im Bereich von einigen Sekunden. Auch hier ist der Zeitverlauf abhängig von der Intensität des Adaptationsfeldes. Je höher diese ist, um so mehr Zeit wird benötigt, bis sich die Sensitivität wieder erholt hat (Hood und Finkelstein, 1986).

Wegen des schnelleren Zeitverlaufs der Helladaptation, wird dieses Problem in der Tunnelbeleuchtung nicht berücksichtigt. Die Beleuchtung der Ausfahrzone wird gegenüber der Innenzone nicht erhöht.

9. FELDVERSUCHE

9.1 Einleitung

Ziel der Feldexperimente war es, aufgrund von versuchsweise eingerichteten Einfahrten im Bereich von bestehenden Tunneln aufgrund von Messung und Beobachtung des Verkehrsverhaltens eine Aussage über die Verkehrssicherheit und über notwendige Gestaltungselemente zu gewinnen. Dabei sollten Einfahrten mit Einfädelungsvorgängen in den Zonen D, E, F und allenfalls H untersucht werden. Es sollten mehrere Feldversuche an verschiedenen Objekten durchgeführt werden.

Beim Verkehrsverhalten interessierten insbesondere der Fahrstreifenwechsel, das Geschwindigkeitsverhalten, der Anteil an kritischen Zeitlücken und kritische Situationen wie verzögerte oder abgebrochene Einfädelungsmanöver und abrupte Bremsvorgänge. Für die Gestaltung der Einfahrt standen die Fragen nach der minimalen Länge des Beschleunigungsstreifens und die Gestaltung des Zwickels am Einfahrtsende im Vordergrund.

Die Suche nach geeigneten Objekten für die Feldversuche zeigte sich aufgrund der gestellten Anforderungen erwartungsgemäss als sehr schwierig.

Für eine optimale Versuchsanordnung wurden folgende Voraussetzungen gestellt:

- möglichst langer dreistreifiger Tunnel im Einrichtungsverkehr, d.h. zweistreifige durchgehende Hauptfahrbahn mit einer Fahrstreifenaddition im oder knapp vor dem Tunnel, welche anlässlich des Versuches mit einfachen Mitteln in einen Beschleunigungsstreifen umgebaut werden kann.
- mögliche Anordnung des Beschleunigungsstreifens in verschiedenen Lagen in bezug auf den Tunnel.
- möglichst grosse Verkehrsbelastungen auf der durchgehenden Hauptfahrbahn und auf der Einfahrt.
- bei ausserhalb des Portales liegender Fahrstreifenaddition: Aufstellen einer Trennwand zwischen Einfahrt und durchgehender Fahrbahn zur Verhinderung des gegenseitigen Sichtkontaktes bis in den Tunnel hinein darf den Fahrbahnquerschnitt nicht zu stark einengen.

Vor Beginn weg vorgesehen war, sich aus Sicherheitsgründen an eine minimal erforderliche Gestaltung der unterirdischen Einfahrtssituation heranzutasten und die vorgesehenen Feldversuche dementsprechend aufzubauen.

9.2 Suche nach geeigneten Objekten

Bei Aufnahme der Forschungsarbeit war bekannt, dass die N6 Einfahrt Bern-Ostring in Fahrtrichtung Thun aus Lärmschutzgründen überdeckt wird (Überdeckung Sonnenhof) und dass die Möglichkeit bestand, vor und nach der Überdeckung die notwendigen Erhebungen und Beobachtungen durchzuführen. Dadurch konnte ein direkter Vergleich zwischen einer Einfahrt am Tageslicht und einem unterirdischen Beschleunigungsstreifen durchgeführt werden.

Aufgrund des positiven Resultates über diesen Vorher-/Nachhervergleich entschied die Begleitkommission, mit einem weitergehenden Versuch einen nächstschwierigen Fall durchzuführen und dazu ein weiteres geeignetes Versuchsobjekt zu suchen. Eine erste

Durchsicht aller in Frage kommender Versuchsobjekte ergab folgende Liste von Tunneln zur weiteren Prüfung:

- N1 Zürich, Schöneich-Tunnel
- N2 Basel, Schwarzwaldtunnel
- N2 Luzern, Tunnel Reussport
- N5 Neuchâtel, Champ Coco
- N6 Bern-Ostring, Überdeckung Sonnenhof
- N12 Bern, Brünnetunnel

Folgende Objekte wurden in einem nächsten Durchgang aufgrund einer Begehung vor Ort und entsprechenden weiteren Unterlagen aus nachstehenden Gründen ausgeschieden:

N1 Zürich, Schöneich-Tunnel

Trotz idealer unterirdischer Einfahrt musste auf einen Versuch verzichtet werden. Hauptgrund waren die allzu grossen Verkehrsbelastungen, welche bei einem Fahrstreifenabbau zu Kapazitätsproblemen führen könnten. Gleichzeitig wäre ein Einfädelungsvorgang nur im Bereich F, d.h. unmittelbar am Tunnelende möglich gewesen.

N2 Basel, Schwarzwaldtunnel

Aufgrund der geraden Linienführung kann das Tunnelende bereits knapp vor der Tunnel-einfahrt erkannt werden. Zudem liegt die vorhandene Fahrstreifenaddition ein rechtes Stück vor dem Tunneleinfahrtsportal (grosser Aufwand für Trennwand in den Tunnel hinein).

N2 Luzern, Tunnel Reussport

Der Fahrbahnquerschnitt ist für das Aufstellen einer Trennwand zwischen Hauptfahrbahn und Einfahrt zu eng, d.h. aufgrund der verbleibenden Fahrstreifenbreite wäre das Geschwindigkeitsniveau sehr stark absinken bzw. die Verkehrssicherheit nicht mehr gewährleistet.

N12 Bern, Brünnetunnel

Die Installation der Versuchsanlage wurde als zu aufwendig beurteilt, da die Einfahrt zu weit vom Tunnelportal entfernt liegt und dadurch das Aufstellen einer sehr langen Trennwand zwischen Hauptfahrbahn und Einfahrt bis in den Tunnel hinein erforderlich gewesen wäre.

Es blieben also der im Frühling 1993 neu eröffnete Tunnel N5 Neuchâtel Champ Coco und die überdeckte N6 Einfahrt Bern Ostring aus den Vorher-/Nachheruntersuchungen übrig. Eine Begehung und Beobachtung des Verkehrsgeschehens der Einfahrt Champ Coco - diese Einfahrt wird heute mit einem „Krüzlistich“ als Fahrstreifenaddition 1+1 betrieben - mit Vertretern des ASB, des Kantons Neuenburgs und der Forschungsstelle vor Ort zeigte, dass sie als Versuchsobjekt nicht geeignet ist. Die wichtigsten Gründe für diese Beurteilung sind:

- Der momentane Betrieb als Fahrstreifenaddition
- Die geringe Länge des Beschleunigungsstreifens (ca. 100 m)
- Die kritische Lage der Einfahrt in Bereich D1

Deshalb wurde entschieden, auf der N6 Einfahrt Bern Ostring einen dritten Versuch mit einer Trennwand in den Tunnel hinein und einem verkürzten Beschleunigungsstreifen durchzuführen. Dies hatte zugleich den Vorteil, dass 3 Messungen mit 3 Versuchsanordnungen am selben Objekt direkt miteinander verglichen werden konnten.

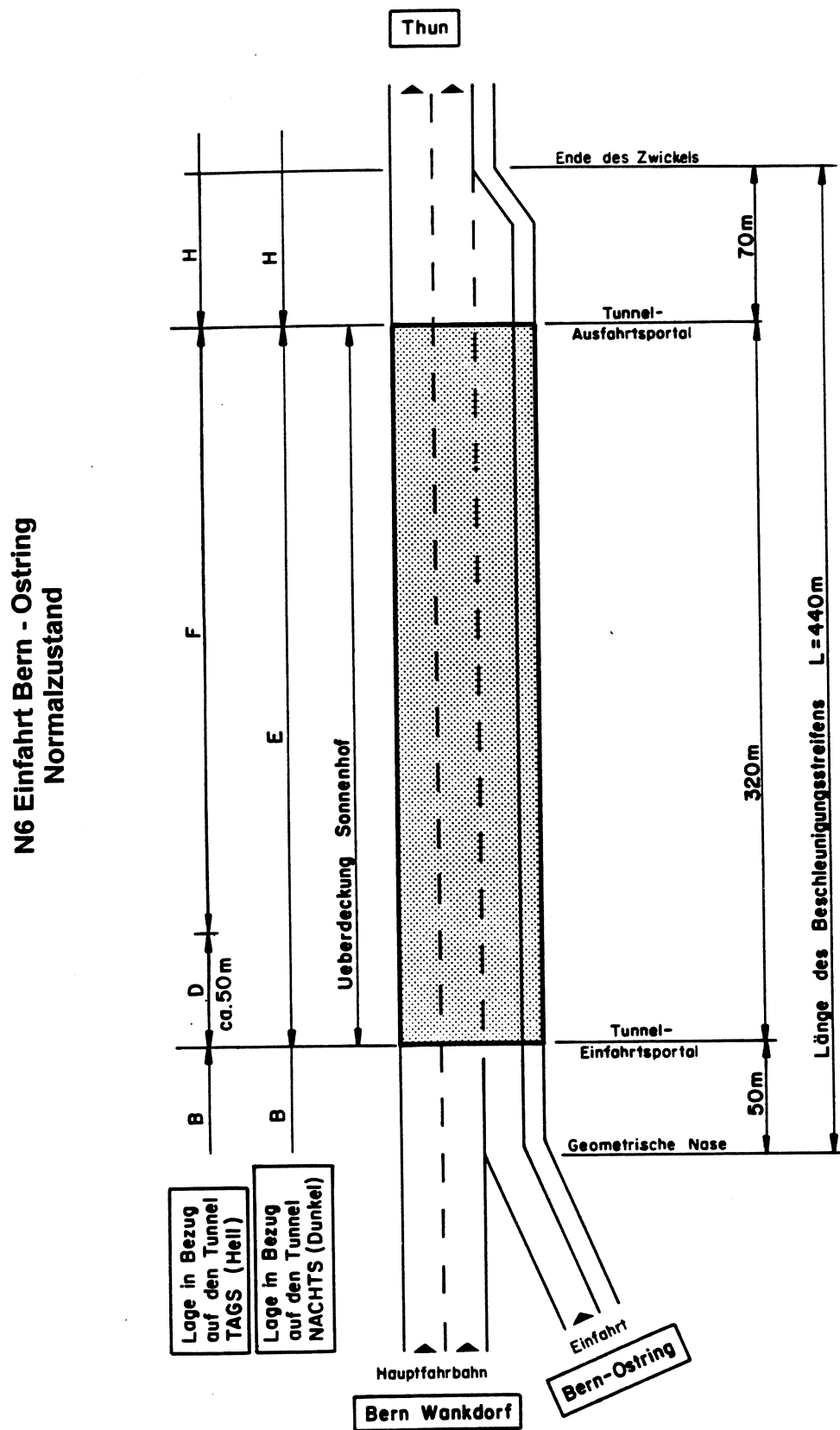
9.3 Feldversuch SN6 Einfahrt Bern-Ostring

9.3.1 Ausgangslage

Die heutige Situation der Einfahrt N6 Einfahrt Bern-Ostring ist in Abb. 9.1 schematisch dargestellt. Die 440 m lange Einfahrt beginnt kurz vor der Überdeckung und endet 70 m nach deren Ende. Der Tunnel liegt in einer Linkskurve und ist 320 m lang. Ca. 50 m nach dem Tunneleinfahrtsportal ist das Tunnelende sichtbar. Somit ist der Bereich D1 sehr kurz und geht direkt in die Zone F über. Eine Zone E existiert eigentlich nur nachts, wenn die Sicht auf das helle Tunnelende entfällt. Die Einfahrt wurde anfangs 1992 überdeckt. Das Einfädelungsmanöver kann im Bereich D1 und F (nachts E) erfolgen.

Das auf einen Stundenwert hochgerechnete Spitzen-5-Minuten-Intervall beträgt ca. 4400 Fz/h (3400 auf der Hauptfahrbahn und 1000 auf der Einfahrt). Kurzfristig hohe Spitzenbelastungen werden insbesondere durch die Lichtsignalregelung unmittelbar vor der Einfahrt, welche eine paketweise Beschickung des Beschleunigungsstreifens verursacht, erzielt. Trifft ein solches Paket auf einen Pulk auf der durchgehenden Hauptfahrbahn, wird die Leistungsfähigkeit der Einfahrt für kurze Zeit erreicht.

Abb 9.1 SN6 Bern Ostring, Normalzustand



Signalisierte Höchstgeschwindigkeit: 80 km/h
Tunnelbeleuchtung: Gegenstrahlbeleuchtung nach Norm

9.3.2 Versuchsanordnung

Die 3 Versuchsanordnungen sind in den Abb. 9.2 bis 9.4 schematisch dargestellt und können wie folgt kurz charakterisiert werden:

Versuch „91“ (Abb 9.2)

Messungen ohne Überdeckung der Einfahrt

Durchführung im Oktober 1991

gegenüber dem Normalzustand Verkürzung der Lage des Beschleunigungsstreifens auf 310 m (markierter Zwickel im Tunnelbereich F, der aber überfahren werden konnte, d.h. identisch mit Versuch 92)

Versuch „92“ (Abb 9.3)

Messungen mit Überdeckung der Einfahrt, ohne Trenn- und Abweiswand

Durchführung im Oktober 1992

gegenüber dem Normalzustand Verkürzung der Länge des Beschleunigungsstreifens auf 310 m (markierter Zwickel im Tunnelbereich F, der aber überfahren werden kann)

Tunnelbeleuchtung nach Norm

Einfädelungsmanöver im Bereich D1 und F (nachts E)

Versuch „93“ (Abb 9.4 und 9.5)

Messungen mit Überdeckung der Einfahrt, mit Trenn- und Abweiswand

Durchführung im Oktober 1993

gegenüber dem Normalzustand Verkürzung der Länge des Beschleunigungsstreifens auf 210 m (Abweiswand)

Abweiswand nicht speziell beleuchtet und ausgerüstet mit Kurvenschranken

Tunnelbeleuchtung nach Norm

Leuchtenband über der Einfahrt ab Ende des Einfädelungsbereiches ausgeschaltet

Trennwand zwischen Hauptfahrbahn und Einfahrt bis 50 m in den Tunnel hinein

Einfädelungsmanöver im Bereich F (nachts E)

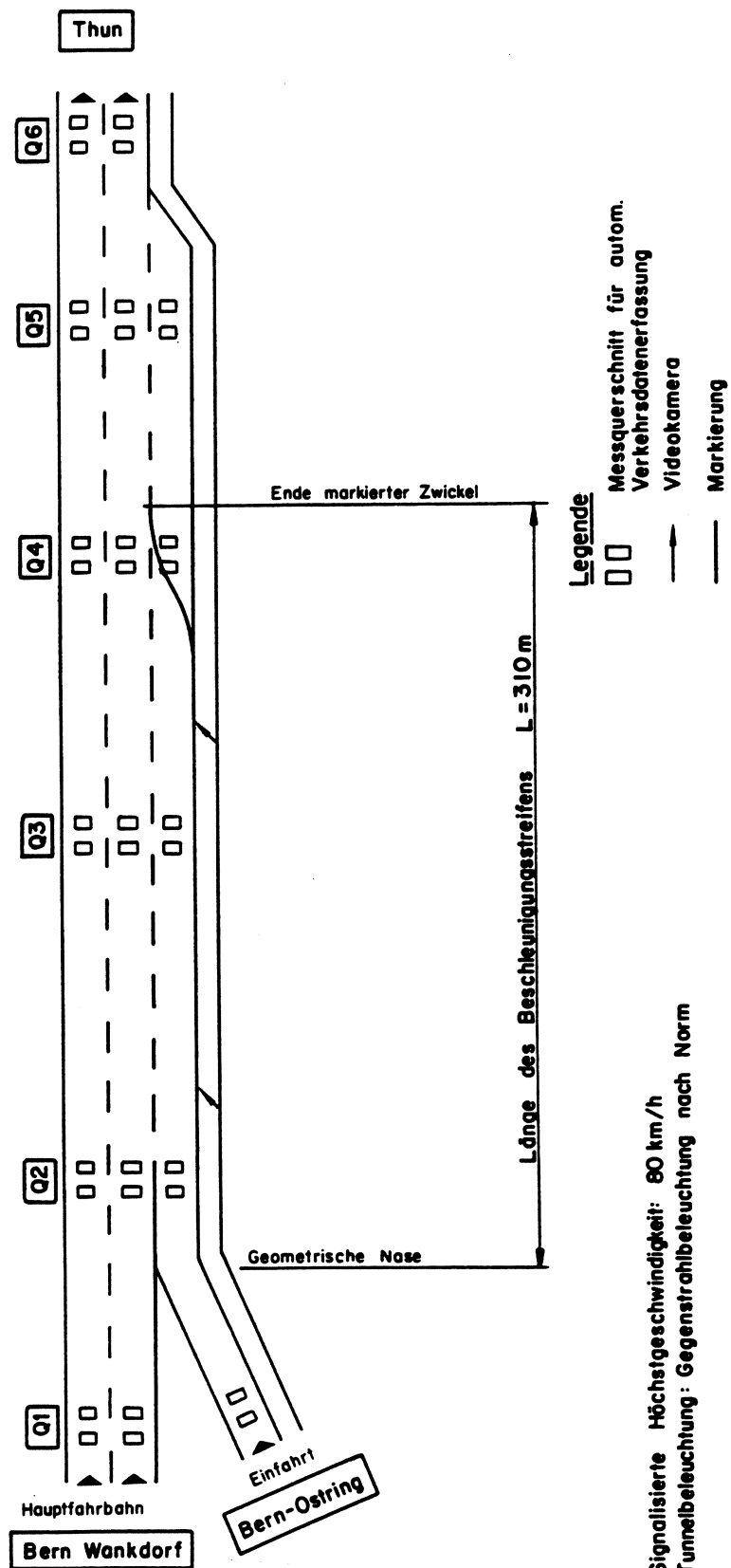
Mit automatischen Verkehrszählgeräten wurden jeweils nach einigen Tagen Angewöhnungsphase an die Versuchssituation während mindestens einer Woche bei 6 Messquerschnitten pro Fahrstreifen die Verkehrsmenge, die Geschwindigkeit der Einzelfahrzeuge und die Zeitlücken erhoben.

Lage und Konfiguration der Messschleifen waren in allen 3 Versuchsanordnungen dieselben.

Mit Videokameras wurde werktags und übers Wochenende in Spitzen- und Randzeiten stundenweise der Bereich des Beschleunigungsstreifens innerhalb des Tunnels aufgezeichnet.

Abb 9.2 SN6 Bern Ostring, Versuch "91", ohne Überdeckung

**N6 Einfahrt Bern - Ostring
Versuch "91": Ohne Überdeckung**



Signalisierte Höchstgeschwindigkeit: 80 km/h
Tunnelbeleuchtung: Gegenstrahlbeleuchtung nach Norm

Abb 9.3 SN6 Bern Ostring, Versuch "92", mit Überdeckung, ohne Trenn- und Abweiswand

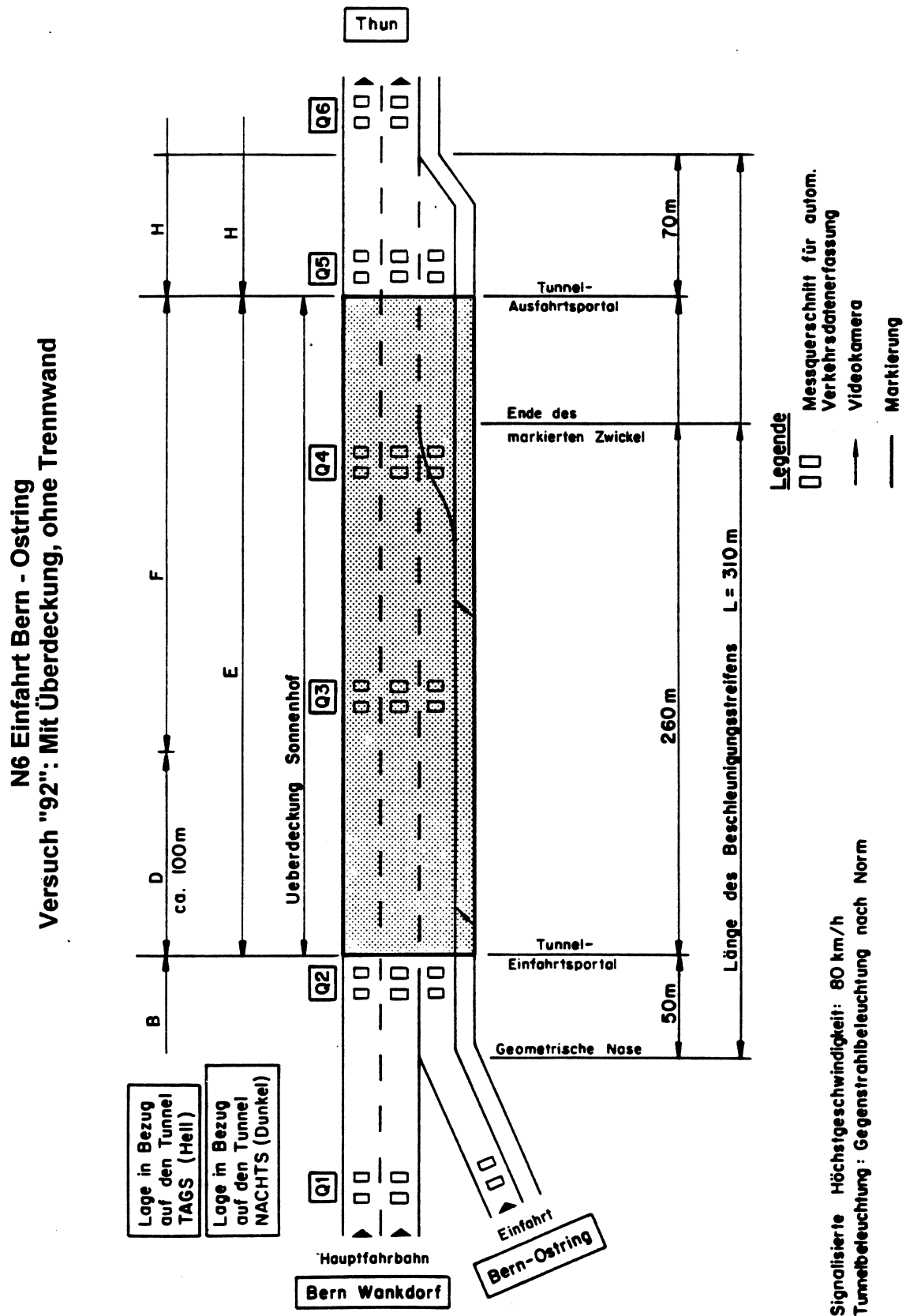


Abb 9.4 SN6 Bern Ostring, Versuch "93", mit Überdeckung und mit Trenn- und Abweiswand

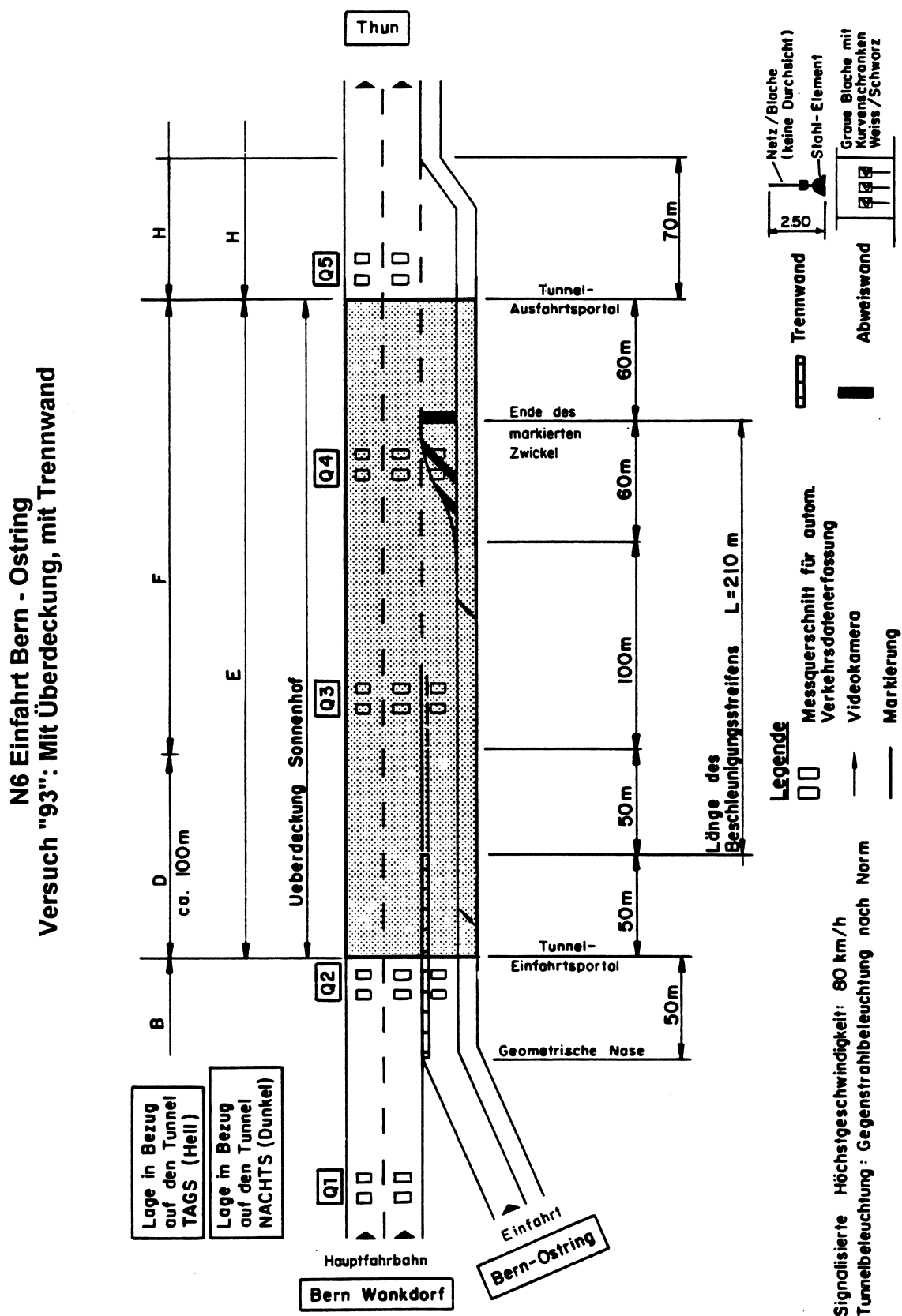
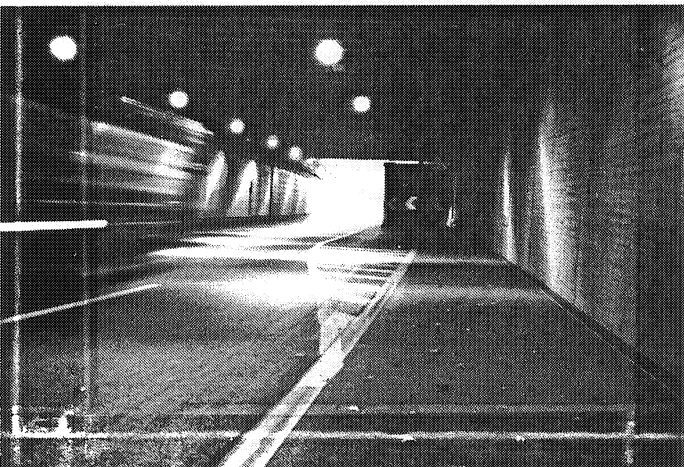
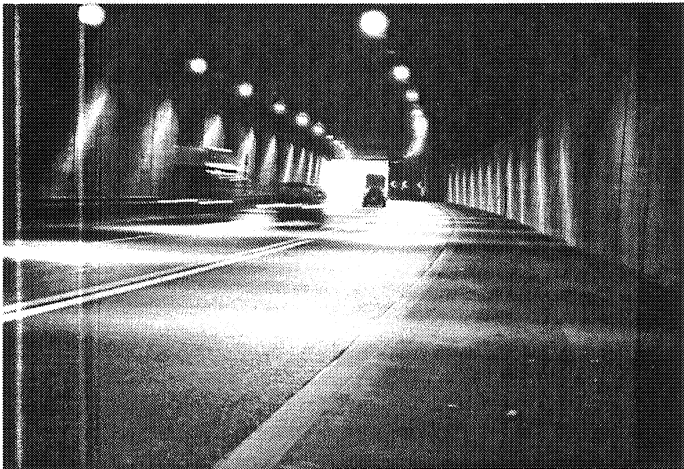
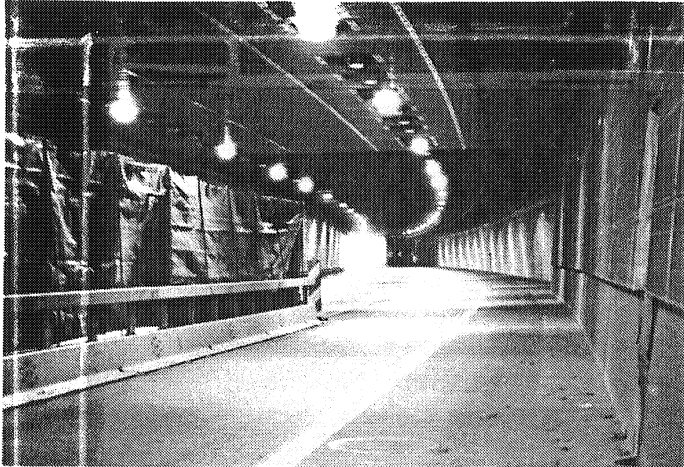
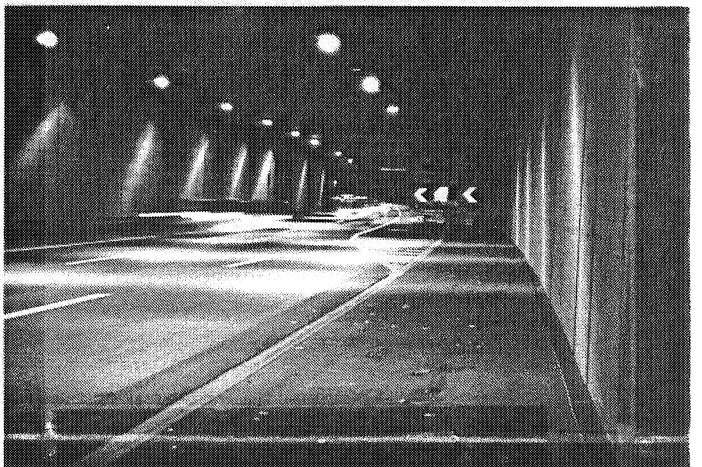
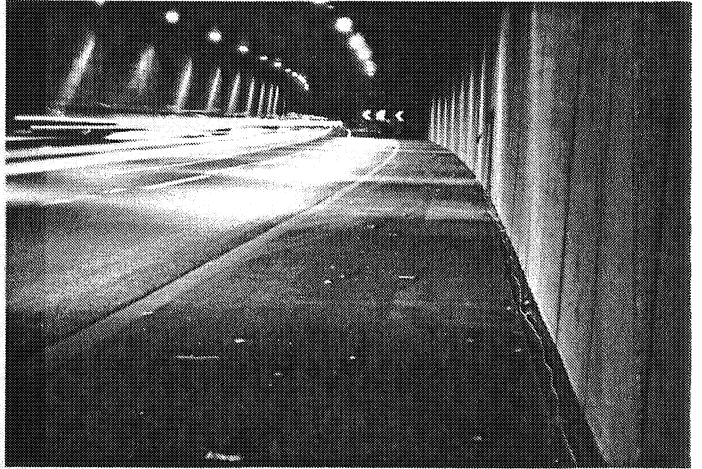


Abb 9.5 SN6 Bern Ostring, Fotos Versuch "93"

„tags“



„nachts“



9.3.3 Versuchsergebnisse

Ein Auszug aus den Versuchsergebnissen ist in Anhang 1 dargestellt.

Aus den erhobenen Daten wurden für alle 3 Versuche 4 Messreihen gebildet und ausgewertet:

- 1 Werktag, tagsüber (0700 bis 1800 Uhr)
- 1 Werktag, nachts (1800 bis 0700 Uhr)
- 1 Sonntag, tagsüber (0700 bis 1800 Uhr)
- 1 Sonntag, nachts (1800 bis 0700 Uhr)

Diese Unterteilung zwischen Werk- und Sonntag erfolgte, da sich die Verkehrszusammensetzung zwischen Werktag (grosser Anteil Pendlerverkehr) und Wochenende (grosser Anteil Freizeitverkehr) sehr stark unterscheidet. Die Unterscheidung Tag - Nacht lässt sich durch die veränderte Wahrnehmungssituation begründen.

Für die automatisch erhobenen Verkehrsdaten wurden pro Messreihe 5-Minuten-Intervalle gebildet und in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung auf der Einfahrt Bern-Ostring und auf der durchgehenden Hauptfahrbahn vergleichbare Fälle gebildet. Diese sind charakterisiert durch die 5-Minuten-Belastung auf der Hauptfahrbahn und der Einfahrt.

Pro Fall wurden für jeden Fahrstreifen folgende Daten ausgewertet:

- Verkehrsbelastung
- mittlere Geschwindigkeit
- Zeitlücken kleiner als 1 Sekunde
- Zeitlücken kleiner als 2 Sekunden
- Zeitlücken kleiner als 1 bzw. 2 Sekunden in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung auf dem Normalstreifen
- Summenverteilung Geschwindigkeit
- Fahrstreifenwechsel und „kritische“ Situation aufgrund von Videoaufnahmen

Die wichtigsten Resultate aus dem Vergleich analoger Fälle der 3 Versuchsanordnungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Während der gesamten Versuchszeit trat **kein Unfall** auf. Einzig bei den Einrichtungsbauarbeiten zu Versuch „93“ ereignete sich ein leichter Auffahrunfall. Während des Versuches „93“ befuhren über 200'000 Fahrzeuge die verkürzte unterirdische Einfahrt.
- Aufgrund der ausgewerteten Videoaufnahmen konnte für die Versuchsanordnung „91“ und „92“ keine **kritischen Situationen** wie Abbruch des Einfädelungsvorganges oder heftige Bremsmanöver festgestellt werden. In Versuch „93“ konnte pro Spitzenstunde ca. 1 Einfädelungsabbruch (ca. 1 % der beobachteten Einfahrten) und einige wenige brüske, aber nicht gefährliche Bremsmanöver (ca. 3 %) festgestellt werden.
- Zwischen Werktag- und Sonntagverkehr konnten keine wesentlichen Unterschiede festgestellt werden.
- **Spurverhalten:** Der grösste Teil der Einfädelungsmanöver fand bei „91“ und „92“, bei welchen ein Fahrstreifenwechsel von Q2 bis fast Q6 möglich war, zwischen Q2 und Q3 statt. Der Beschleunigungsstreifen wurde bei Q4 nur noch von wenigen % der Einfahrenden benutzt, bei Q5 von praktisch niemandem mehr (< 1 %). Infolge der Trennwand zwischen Einfahrt und Hauptfahrbahn und der Abweiswand kurz nach Q4 wechselten die meisten Fahrzeuge in „93“ gezwungenermassen zwischen Q3 und Q4.
- Die **mittlere Geschwindigkeiten** „91“ und „92“ waren bei allen Querschnitten in den meisten Fällen praktisch gleich (Abweichungen max. einige %). Bei „93“ liegt die mittlere Geschwindigkeit im Bereich von Q3 gegenüber „91“ und „92“ leicht tiefer, was auf ein er-

schwertes Einfädeln schliessen lässt. Die Summenverteilungskurven der Geschwindigkeiten zeigen bei allen 3 Versuchen dieselbe Charakteristik.

- Der Anteil an Zeitlücken < 1 bzw. 2 Sekunden liegt bei „93“ leicht tiefer als bei den ersten beiden Versuchen.

9.3.4 Versuchsinterpretation

Die Resultate aus der automatischen Verkehrserhebung für die Versuche „91“, „92“ und „93“ zeigen im direkten Vergleich keine signifikanten Unterschiede in bezug auf das Fahrverhalten, welche auf kritischen Situationen zurückzuführen wären.

Kleinere Probleme wie vereinzelter Abbruch des Einfädelungsvorganges oder einige Bremsmanöver in Versuch „93“ waren nicht auf das Erkennen der Einfahrtssituation sondern auf die Umgewöhnung an eine neue (Versuchs-) Situation oder auf die Leistungsfähigkeit, welche durch die Verkürzung der Einfahrt absinkt, zurückzuführen. Das entspricht Situationen wie sie bei stark belasteten, oberirdischen Einfahrten im gleichen oder noch grösseren Mass auftreten.

Durch die paketweise Beschickung der Einfahrt wurde die Leistungsfähigkeit bei der verkürzten Länge des Beschleunigungsstreifens in Versuch „93“ jeweils kurzfristig erreicht. Bei einer weiteren Verkürzung der Einfahrt hätte die Gefahr einer Leistungsüberschreitung (Verkehrszusammenbruch) bestanden.

In bezug auf die Wahrnehmung eines vollständig unterirdischen Beschleunigungsstreifens („93“) traten keine Probleme auf. Die Abweiswand am Ende des Beschleunigungsstreifens konnte sowohl tagsüber (Kontrast zu hellem Tunnelausfahrtsportal) als auch nachts (deutliches Erkennen der Kurvenschranken durch reflektierendes Fahrzeuglicht) gut wahrgenommen werden (vgl. Abb. 9.5).

9.4 Begehung N5 Neuchâtel, Einfahrt Champ Coco

Aus der Begehung der N5 Einfahrt Champ Coco in Neuenburg (Hauptfahrbahn in Zone E und Einfahrt in Zone D1 im Endzustand; heute mit Krüzlistichregelung als Fahrstreifenaddition betrieben) können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Auf eine sorgfältige Beleuchtung einer solchen Situation ist grosses Gewicht zu legen. Die Beleuchtung muss sowohl den einfahrenden Automobilisten (Dunkeladaptation) und denjenigen der Hauptfahrbahn (Gefahr der Blendung bei allzu heller Beleuchtung) gerecht werden.
- Die Situation einer unterirdischen Einfahrt muss in einer solch schwierigen Situation sowohl auf der Einfahrt als auch auf der Hauptfahrbahn rechtzeitig vor dem Einfädelungsbereich für alle deutlich erkennbar sein.
- Die auf das „schwarze Loch“ der Einfahrt zufahrenden Automobilisten verzögerten ihre Geschwindigkeit bei der Tunneleinfahrt trotz ungenügender Sichtweiten auch bei tiefem Beleuchtungsniveau nicht.

9.5 Schlussfolgerungen

Ein Einfädelungsmanöver in den Zonen D2, E und F ist unter Einhaltung gewisser Anforderungen und Voraussetzungen genügend sicher. Der Fall eines zwingenden Einfädelungsvorganges in Zone D1 kann nicht abschliessend beurteilt werden, liegt aber im Grenzbereich zwischen einer genügenden und ungenügenden Wahrnehmung.

Bei starken Verkehrsbelastungen sollte die Gesamtlänge des Beschleunigungsstreifens 200 m nicht unterschreiten. Auf eine sorgfältige optische Führung der Einfahrt (z.B. Beleuchtungsband über dem Beschleunigungsstreifen, beleuchteter und signalisierter Zwickel am Einfahrtende) ist grosses Gewicht zu legen. Ein Sicherheitsraum zwischen Einfädelungsstrecke und Zwickel erlaubt einen sicheren Abbruch des Einfädelungsmanövers im letzten Moment.

VERZEICHNISSE

Verzeichnis der Abbildungen

Abb 1.1	Lage in bezug auf den Tunnel, Definitionen	15
Abb 2.1	Empfehlungen für das weitere Vorgehen, Übersicht	25
Abb 3.1	Projektablauf	31
Abb 5.1	Die wichtigsten Grundlagen	33
Abb 5.2	Richtwerte der Anhaltesichtweite auf Hochleistungsstrassen	33
Abb 5.3	Aufbau und Länge der Beschleunigungsstreifen gemäss SN 640 266	34
Abb 5.4	Tunnelbeleuchtung: Streckenübersicht und Definitionen	34
Abb 5.5	Zeitlicher Verlauf der Leuchtdichten der Einfahrt- und Übergangsstrecke	35
Abb 6.1	Vorgehen	37
Abb 7.1	Lage in bezug auf den Tunnel: Definitionen und Distanzen	39
Abb. 8.1	Kontrastsensitivität in Abhängigkeit der Ortsfrequenz (Perioden pro Grad Sehwinkel) eines Sinusstreifenmusters. .	44
Abb 9.1	SN6 Bern Ostring, Normalzustand	51
Abb 9.2	SN6 Bern Ostring, Versuch "91", ohne Überdeckung	53
Abb 9.3	SN6 Bern Ostring, Versuch "92", mit Überdeckung, ohne Trenn- und Abweiswand	54
Abb 9.4	SN6 Bern Ostring, Versuch "93, mit Überdeckung und mit Trenn- und Abweiswand	55
Abb 9.5	SN6 Bern Ostring, Fotos Versuch "93"	56

Verzeichnis der Tabellen

Tab 1.1	Lage der Hauptfahrbahn	16
Tab 1.2	Lage der Einfahrt	18
Tab 1.3	Geometrie und Länge des Beschleunigungsstreifens	19
Tab 1.4	Allgemeine Anforderungen	20
Tab 1.5	Zusätzliche Anforderungen an die unterirdische Lage	21
Tab 5.1	Notwendige k-Werte zur Erzielung der Leuchtdichte der Einfahrtsstrecke L_{FE}	34
Tab 5.2	Mittlere Leuchtdichten der Innensrecke L_{fi} (cd/m ²) bei Tag	35
Tab 5.3	Mittlere Leuchtdichten der Innenstrecke L_{fi} (cd/m ²) bei Nacht	35
Tab 7.3	N12 Bern, Brüntentunnel (L = ca. 300m), Anteil Fahrzeuge ohne Licht, 11 ¹⁵ bis 13 ¹⁵ Uhr	41
Tab 7.4	N2 Belchentunnel (L = ? m), Anteil Fahrzeuge ohne Licht, 13 ⁰⁰ bis 15 ⁰⁰ Uhr	42

Literaturverzeichnis

Bourdy, C., Chiron, A., Cottin, C. and Monot, A. Visibility at a tunnel entrance: Effect of temporal adaptation. Lighting Research and Technology, 1987, 19, 35-44.

Bourdy, C., Chiron, A., Cottin, F. and Monot, A. Visibility at a tunnel entrance: Effect of temporal luminance variation. Lighting Research and Technology, 1988, 20, 199-200.

CIE Publication No. 61 Tunnel entrance lighting. 1984.

EVED, Bundesamt für Strassenbau, Forschungsbericht Nr. 187 über Forschungsauftrag 18/87 der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Voraussetzungen für Strassenknoten in Tunneln und Galerien, Mai 1990.

Hood, D.C. and Finkelstein, M. A. Sensitivity to light. In Boff, K.R., Kaufman, L., and Thomas, J.P. (eds.) Handbook of perception and human performance. Vol.I, New York: Wiley, 1986.

Leitsätze der SLG: Oeffentliche Beleuchtung, Strassentunnels, -galerien und -unterführungen. SN 418915/ SEV 8915.1992, Zürich, 1992.

Olzak, L.A. and Thomas, J.P. Seeing spatial patterns. In Boff, K.R., Kaufman, L. and Thomas, J.P. (eds.) Handbook of perception and human performance. Vol. I, New York: Wiley, 1986.

Owsley, C., Sekuler, R. and Siemsen, D. Contrast sensitivity throughout adulthood. Vision Research, 1983, 23, 689-699.

Schreuder, D.A. Practical determination of tunnel entrance lighting needs. Transportation Research Record 1327, 1991.

SN 640 090a, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Projektierung, Grundlagen, Sichtweiten, 04/92.

Thomas, J.P., Spatial summation in the fovea: Asymmetrical effects of longer and shorter dimensions. Vision Research, 1978, 18, 1023-1029.

van Nes, F.L. and Bouman, M.A. Spatial modulation transfer in the human eye. Journal of the Optical Society of America, 1967, 57, 401-406.

Weale, R.A. The aging eye. London: Lewis, 1963.

Wolf, E. and Gardiner, J.S. Studies on the scatter of light in the dioptric media of the eye as a basis of visual glare. Arch. Ophthalm., 1965, 74, 338-345.

ANHANG

Auszug aus den Resultaten zum Feldversuch SN6 Einfahrt Bern-Ostring

Legende zu grafischen Darstellungen

- Messungen „93“ (mit Überdeckung, mit Trenn-/Abweiswand)
- Messungen „92“ (mit Überdeckung, ohne Trenn-/Abweiswand)
- Messungen „91“ (ohne Überdeckung)
- Werte Normalstreifen
- — Werte Überholstreifen
- - - - Werte Beschleunigungsstreifen

SN6 - TABELLARISCHE DARSTELLUNG ALLER FÄLLE

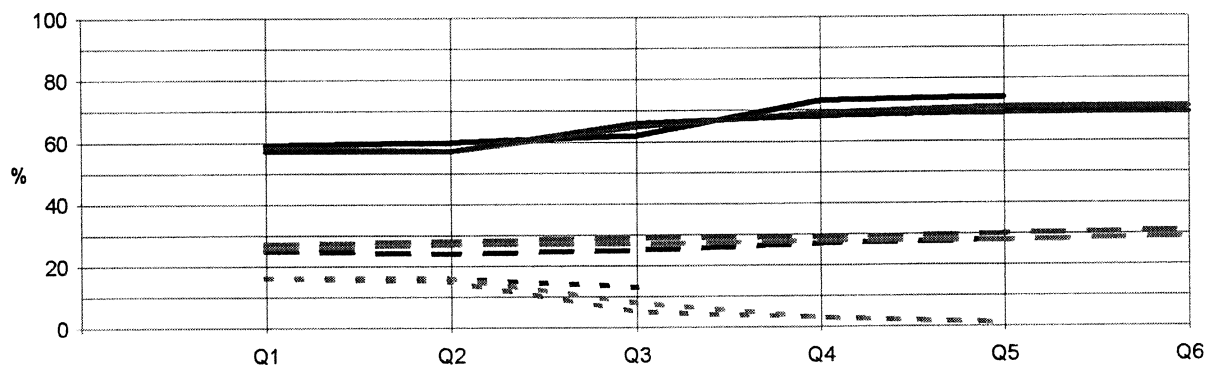
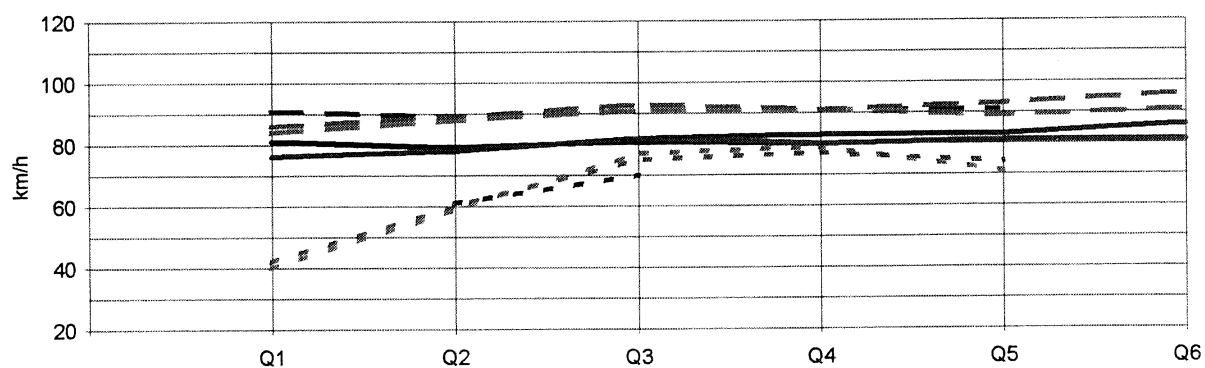
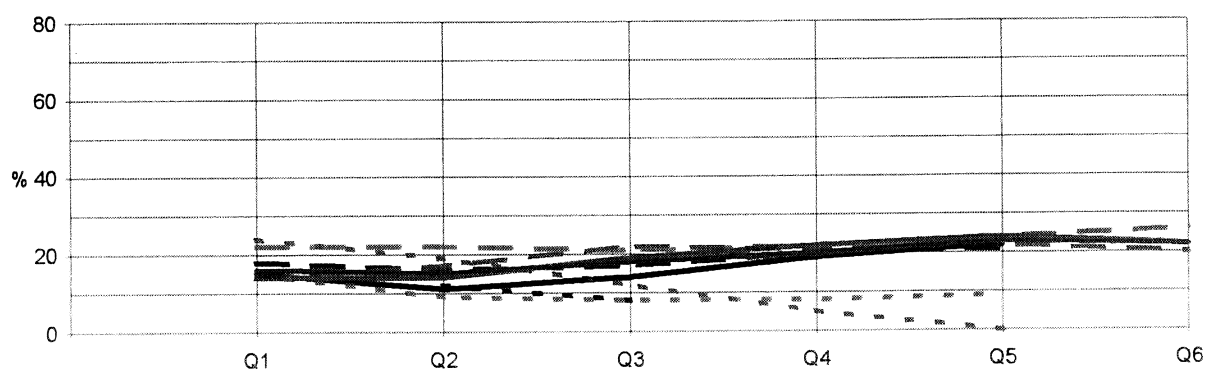
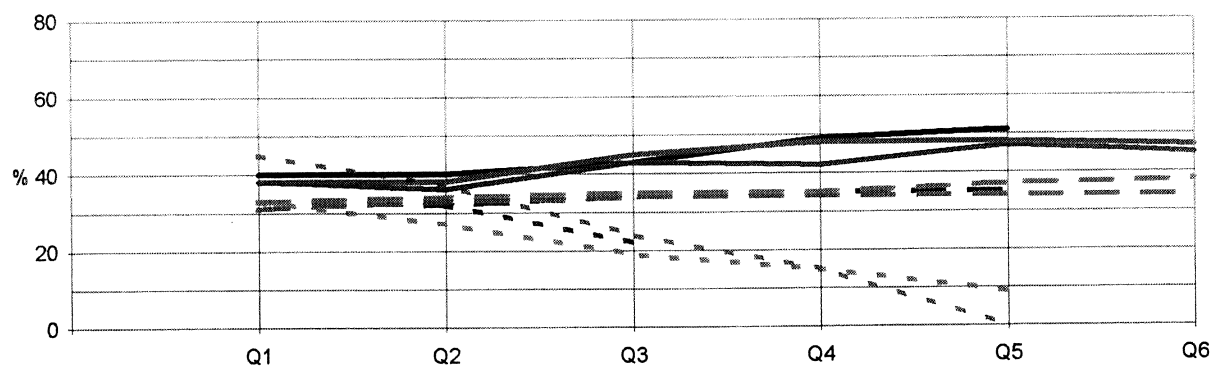
Werktag 07.00 - 18.00 Auswertung 5 Min. Intervall / 100er Schritte

Hochgerechnete Verkehrsbelastungen Fz/h

EINFAHRT OSTRING																							
0 - 100		100 - 200		200 - 300		300 - 400		400 - 500		500 - 600		600 - 700		700 - 800		800 - 900		900 - 1000		1000 - 1100			
91	92	93	91	92	93	91	92	93	91	92	93	91	92	93	91	92	93	91	92	93	91	92	93
					</																		

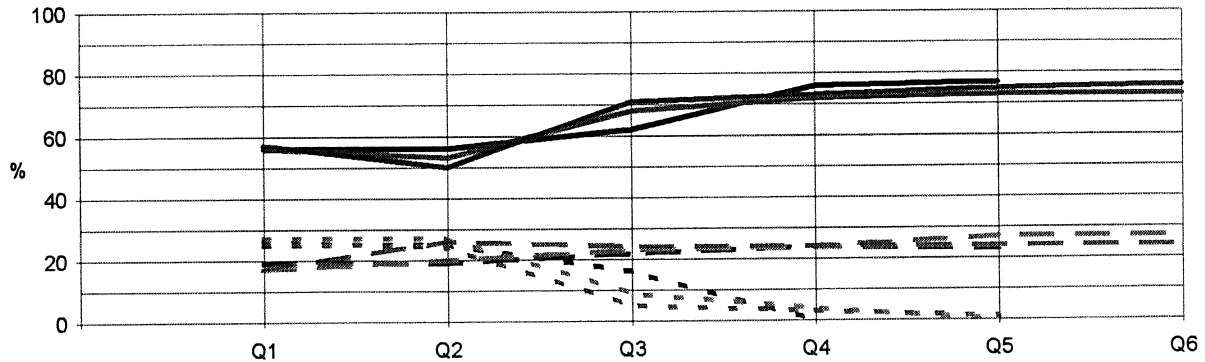
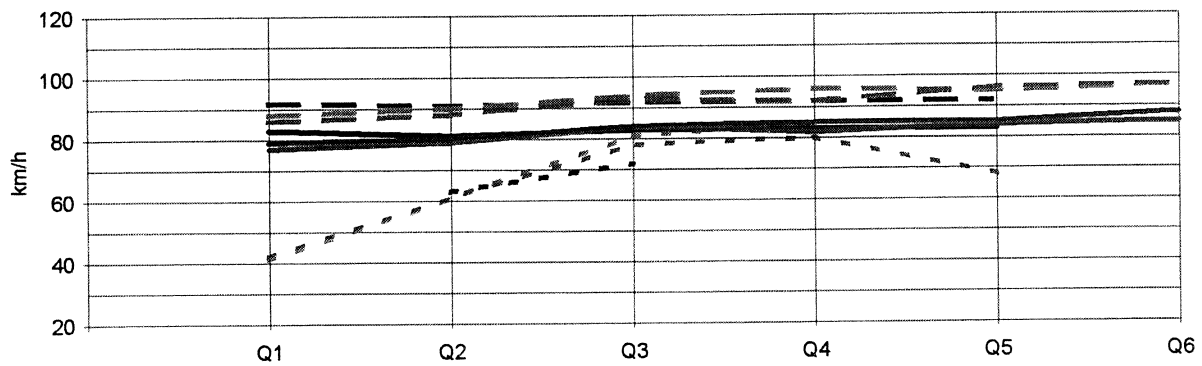
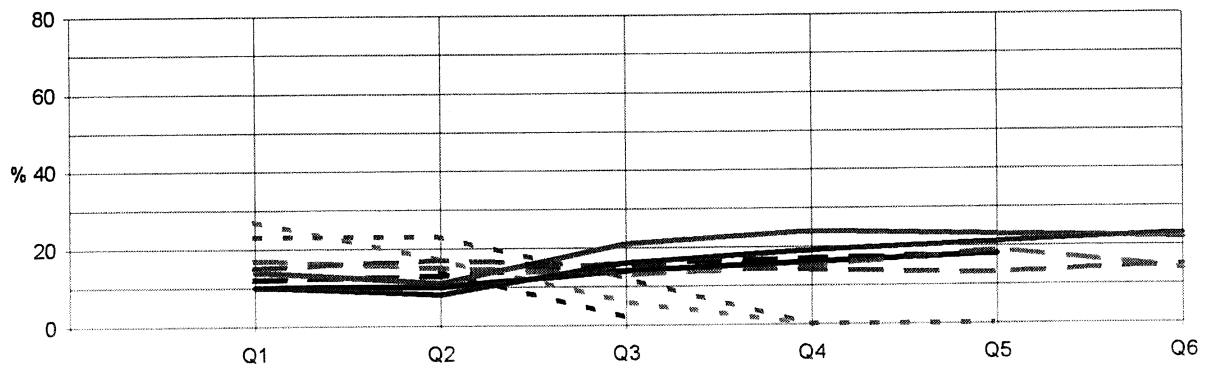
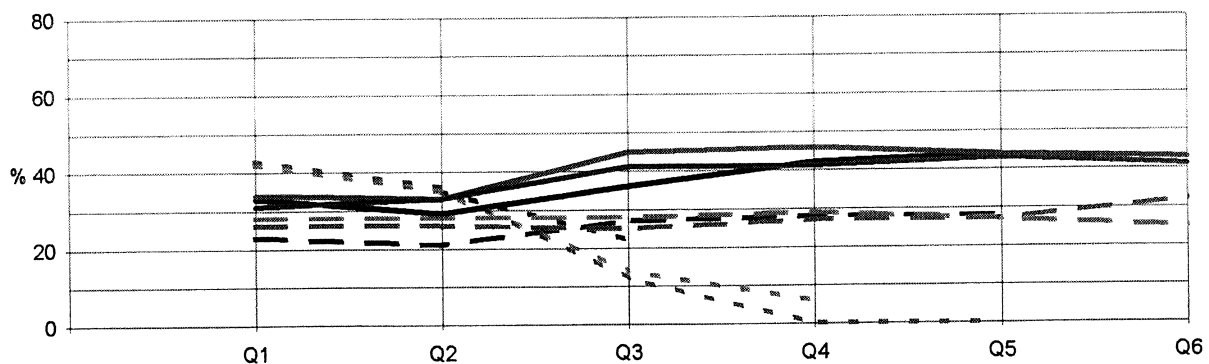
SN6 - GRAFISCHE DARSTELLUNG EINES FALLES

Auswertung im 5 Min. Intervall / von 07.00 - 18.00 Uhr / Abstufung in 100er Schritte / Werktag

VERKEHRSELASTUNGEN FALL 83 : EINFAHRT 200 - 300 Fhz/h AUTOBAHN 1200 - 1300 Fhz/h**Verkehrsbelastung pro Fahrstreifen in %****Mittlere Geschwindigkeit pro Fahrstreifen in km/h****Fahrzeuge mit Zeitlücke ≤ 1 sec. pro Fahrstreifen in %****Fahrzeuge mit Zeitlücke ≤ 2 sec. pro Fahrstreifen in %**

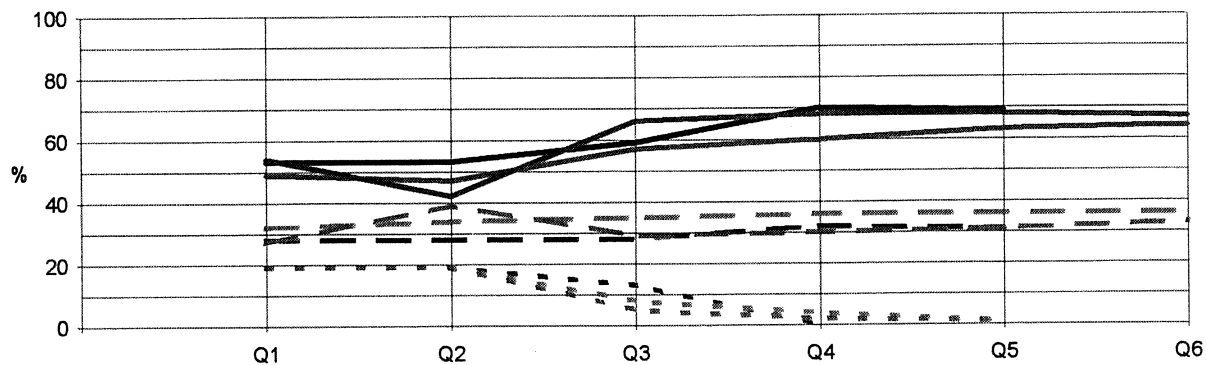
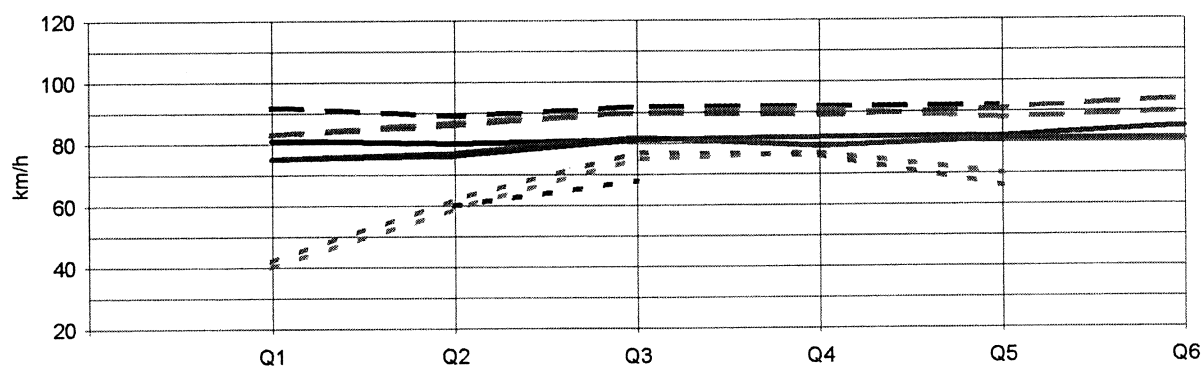
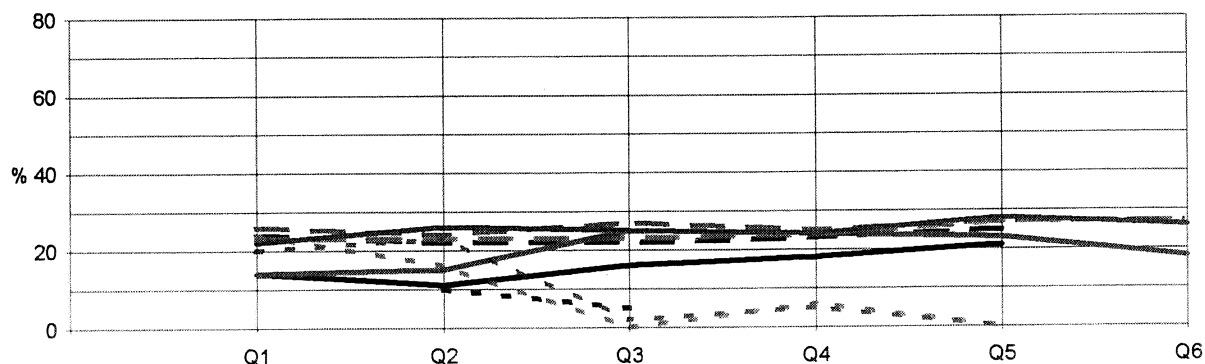
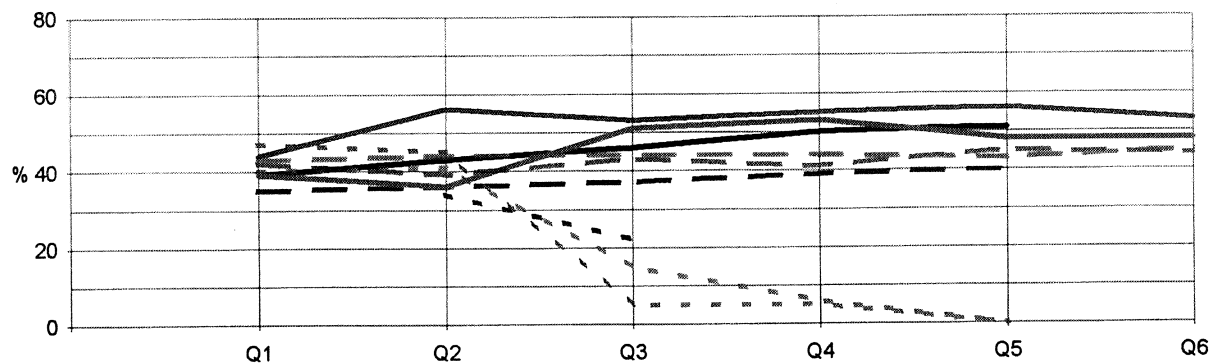
SN6 - GRAFISCHE DARSTELLUNG EINES FALLES

Auswertung im 5 Min. Intervall / von 07.00 - 18.00 Uhr / Abstufung in 100er Schritte / Werktag

VERKEHRSELASTUNGEN FALL 115 : EINFABRT 300 - 400 Fhz/h AUTOBAHN 900 - 1000 Fhz/h**Verkehrsbelastung pro Fahrstreifen in %****Mittlere Geschwindigkeit pro Fahrstreifen in km/h****Fahrzeuge mit Zeitlücke ≤ 1 sec. pro Fahrstreifen in %****Fahrzeuge mit Zeitlücke ≤ 2 sec. pro Fahrstreifen in %**

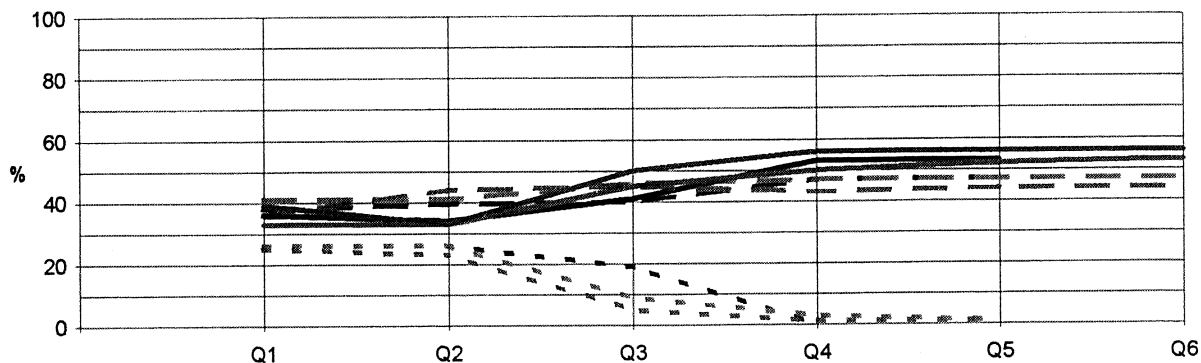
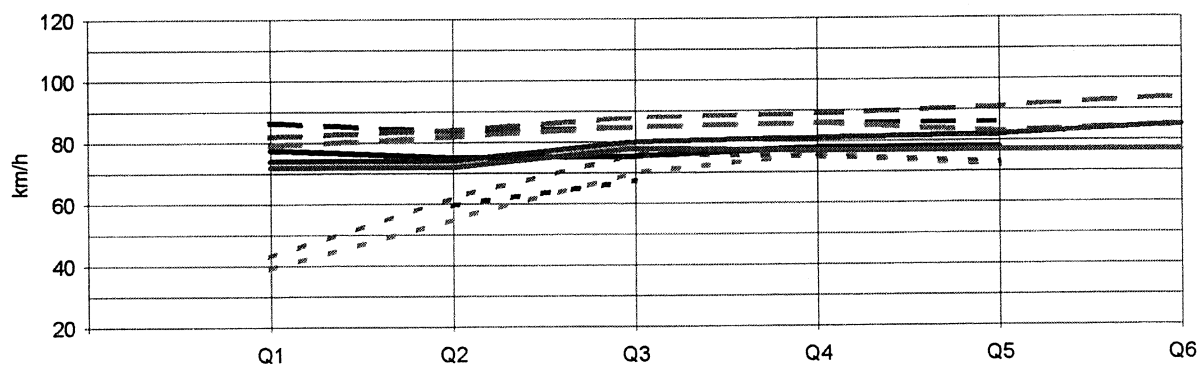
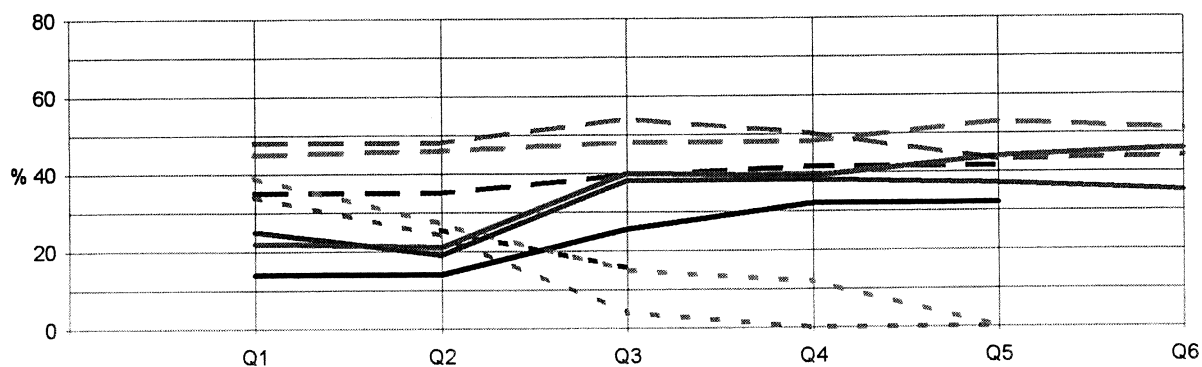
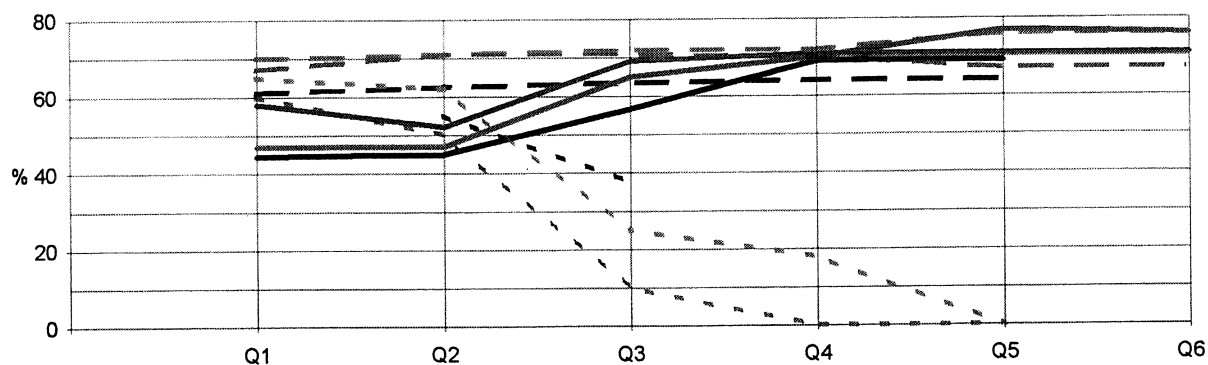
SN6 - GRAFISCHE DARSTELLUNG EINES FALLES

Auswertung im 5 Min. Intervall / von 07.00 - 18.00 Uhr / Abstufung in 100er Schritte / Werktag

VERKEHRSELASTUNGEN FALL 120 : EINFABRT 300 - 400 Fhz/h AUTOBAHN 1400 - 1500 Fhz/h**Verkehrsbelastung pro Fahrstreifen in %****Mittlere Geschwindigkeit pro Fahrstreifen in km/h****Fahrzeuge mit Zeitlücke ≤ 1 sec. pro Fahrstreifen in %****Fahrzeuge mit Zeitlücke ≤ 2 sec. pro Fahrstreifen in %**

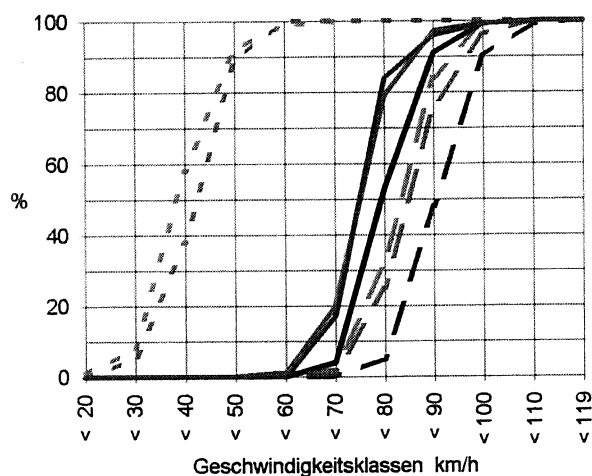
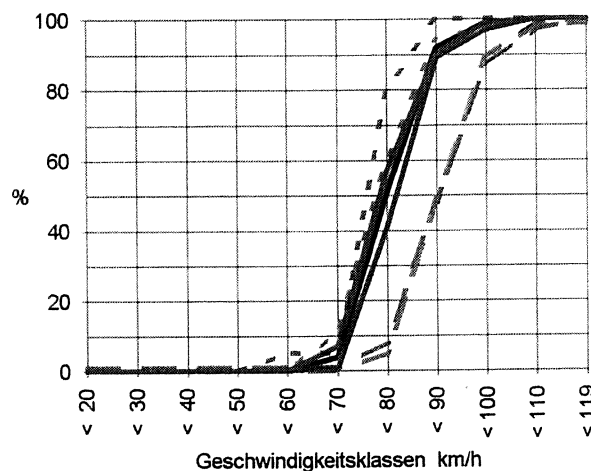
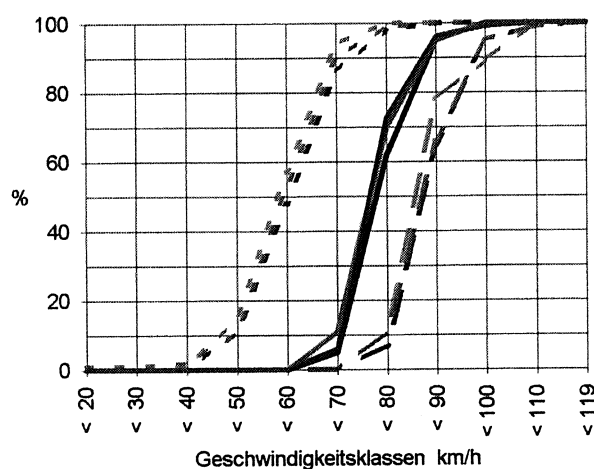
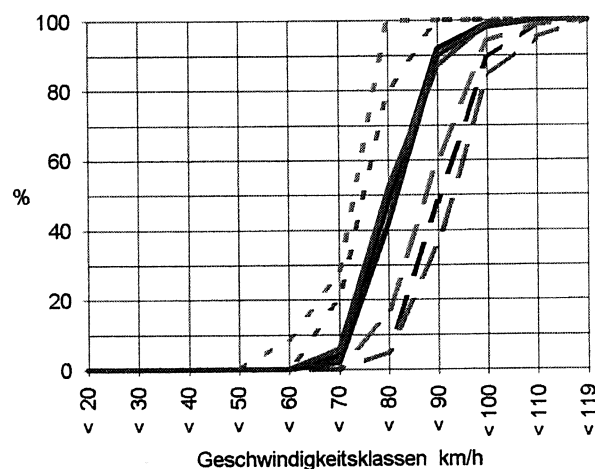
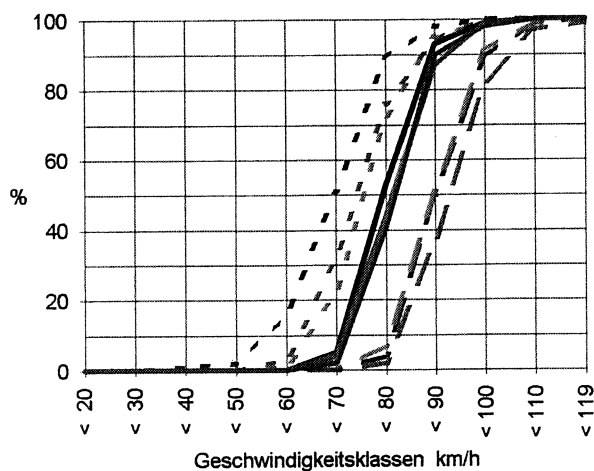
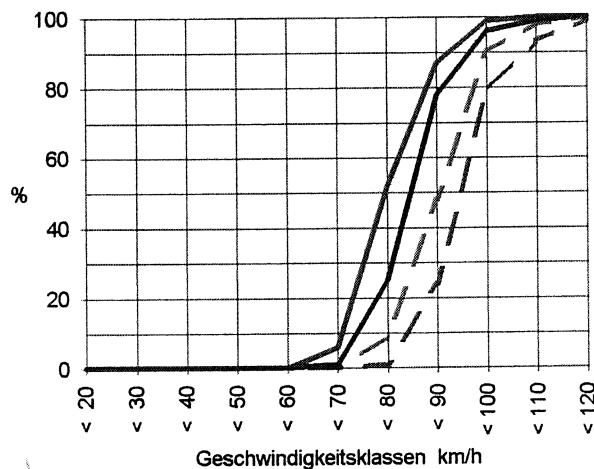
SN6 - GRAFISCHE DARSTELLUNG EINES FALLES

Auswertung im 5 Min. Intervall / von 07.00 - 18.00 Uhr / Abstufung in 100er Schritte / Werktag

VERKEHRSELASTUNGEN FALL 305 : EINFABRT 800 - 900 Fhz/h AUTOBAHN 2300 - 2500 Fhz/h**Verkehrsbelastung pro Fahrstreifen in %****Mittlere Geschwindigkeit pro Fahrstreifen in km/h****Fahrzeuge mit Zeitlücke ≤ 1 sec. pro Fahrstreifen in %****Fahrzeuge mit Zeitlücke ≤ 2 sec. pro Fahrstreifen in %**

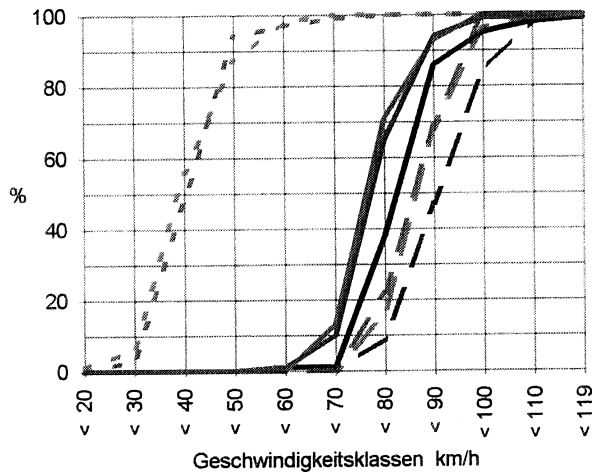
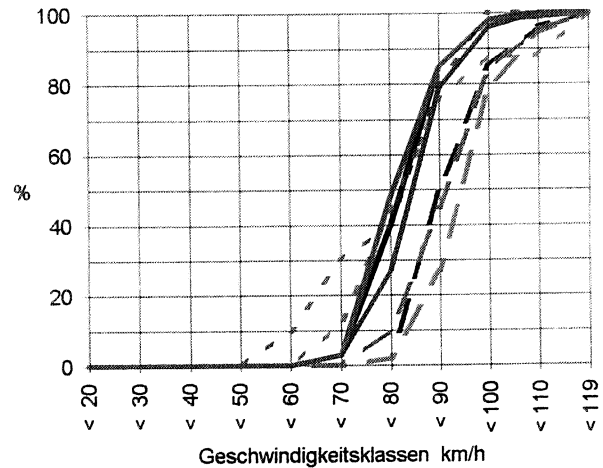
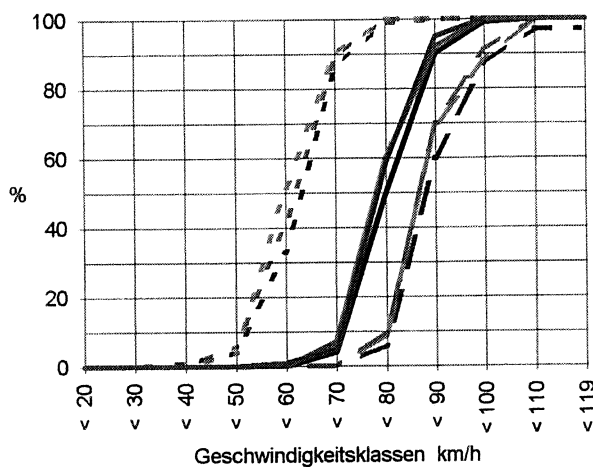
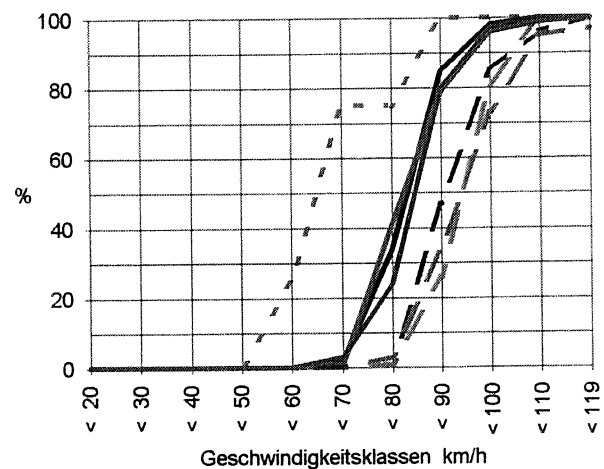
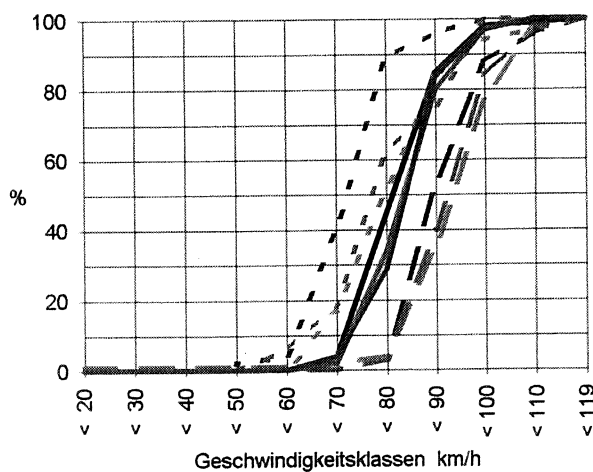
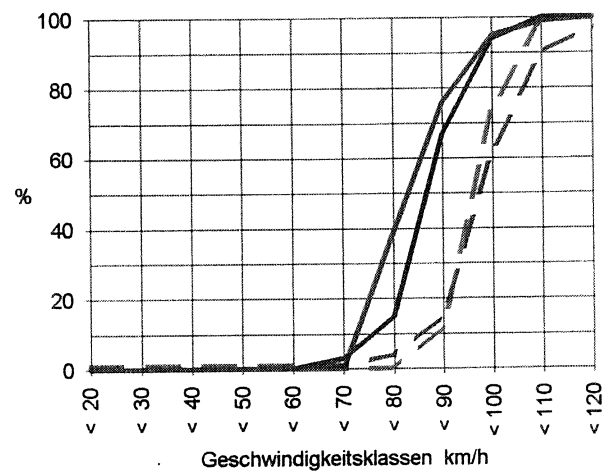
SN6 - GRAFISCHE DARSTELLUNG EINES FALLES

Auswertung im 5 Min. Intervall / von 07.00 - 18.00 Uhr / Abstufung in 100er Schritte / Werktag

VERKEHRSELASTUNGEN FALL 83 : EINFAHRT 200 - 300 Fhz/h AUTOBAHN 1200 - 1300 Fhz/h**Summenverteilungskurven Querschnitt 1****Summenverteilungskurven Querschnitt 4****Summenverteilungskurven Querschnitt 2****Summenverteilungskurven Querschnitt 5****Summenverteilungskurven Querschnitt 3****Summenverteilungskurven Querschnitt 6**

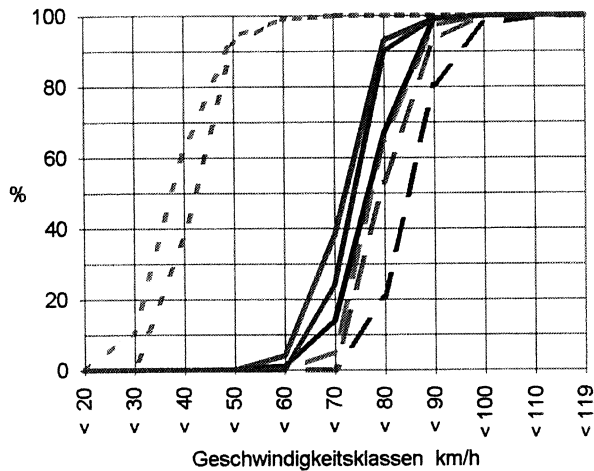
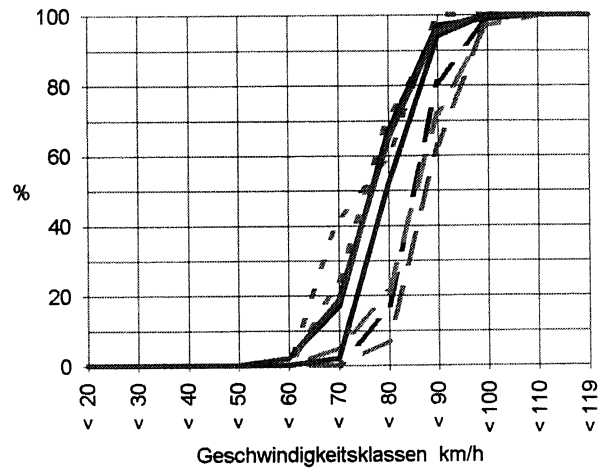
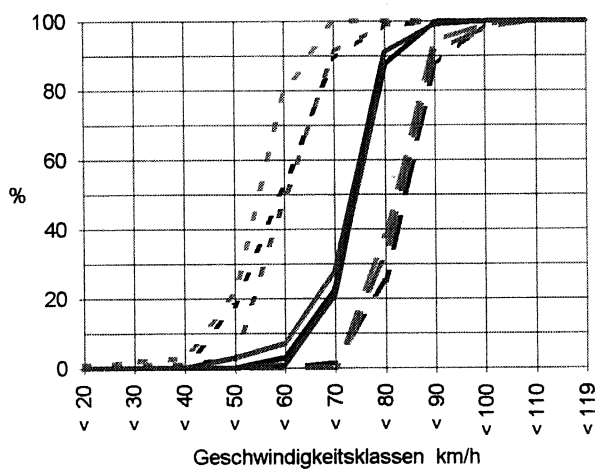
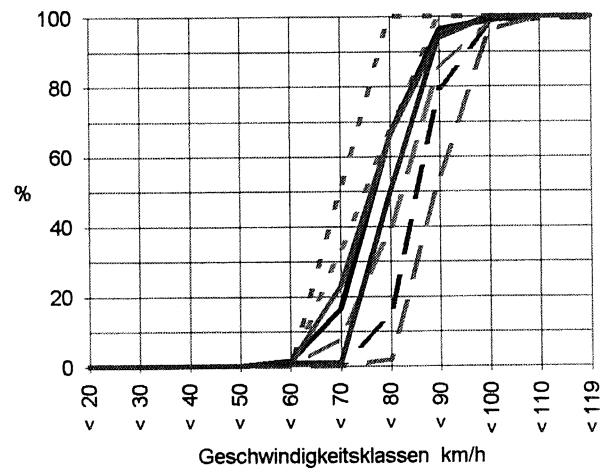
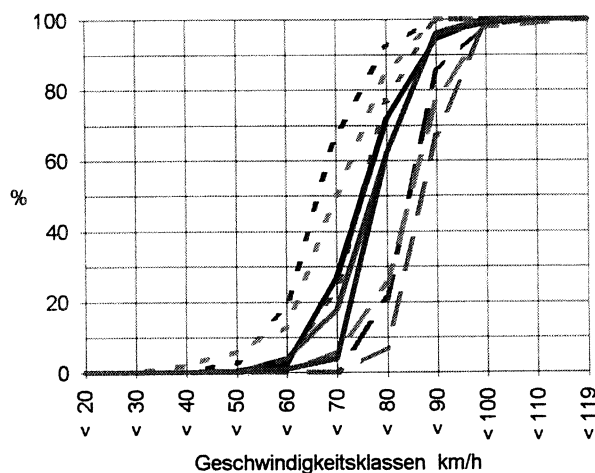
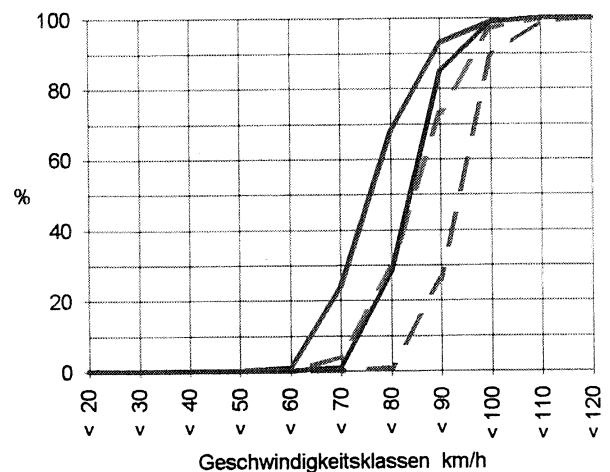
SN6 - GRAFISCHE DARSTELLUNG EINES FALLES

Auswertung im 5 Min. Intervall / von 07.00 - 18.00 Uhr / Abstufung in 100er Schritte / Werktag

VERKEHRSELASTUNGEN FALL 115 : EINFAHRT 300 - 400 Fhz/h AUTOBAHN 900 - 1000 Fhz/h**Summenverteilungskurven Querschnitt 1****Summenverteilungskurven Querschnitt 4****Summenverteilungskurven Querschnitt 2****Summenverteilungskurven Querschnitt 5****Summenverteilungskurven Querschnitt 3****Summenverteilungskurven Querschnitt 6**

SN6 - GRAFISCHE DARSTELLUNG EINES FALLES

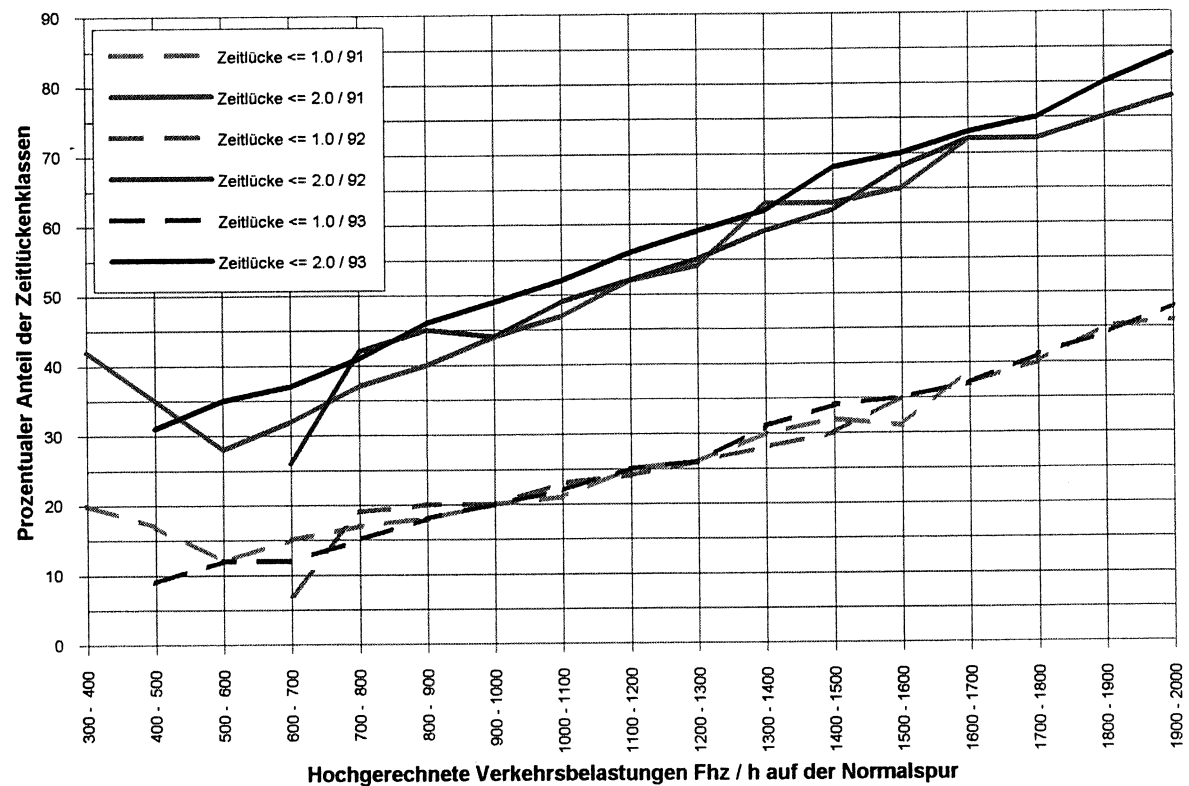
Auswertung im 5 Min. Intervall / von 07.00 - 18.00 Uhr / Abstufung in 100er Schritte / Werktag

VERKEHRSELASTUNGEN FALL 305 : EINFAHRT 800 - 900 Fhz/h AUTOBAHN 2300 - 2500 Fhz/h**Summenverteilungskurven Querschnitt 1****Summenverteilungskurven Querschnitt 4****Summenverteilungskurven Querschnitt 2****Summenverteilungskurven Querschnitt 5****Summenverteilungskurven Querschnitt 3****Summenverteilungskurven Querschnitt 6**

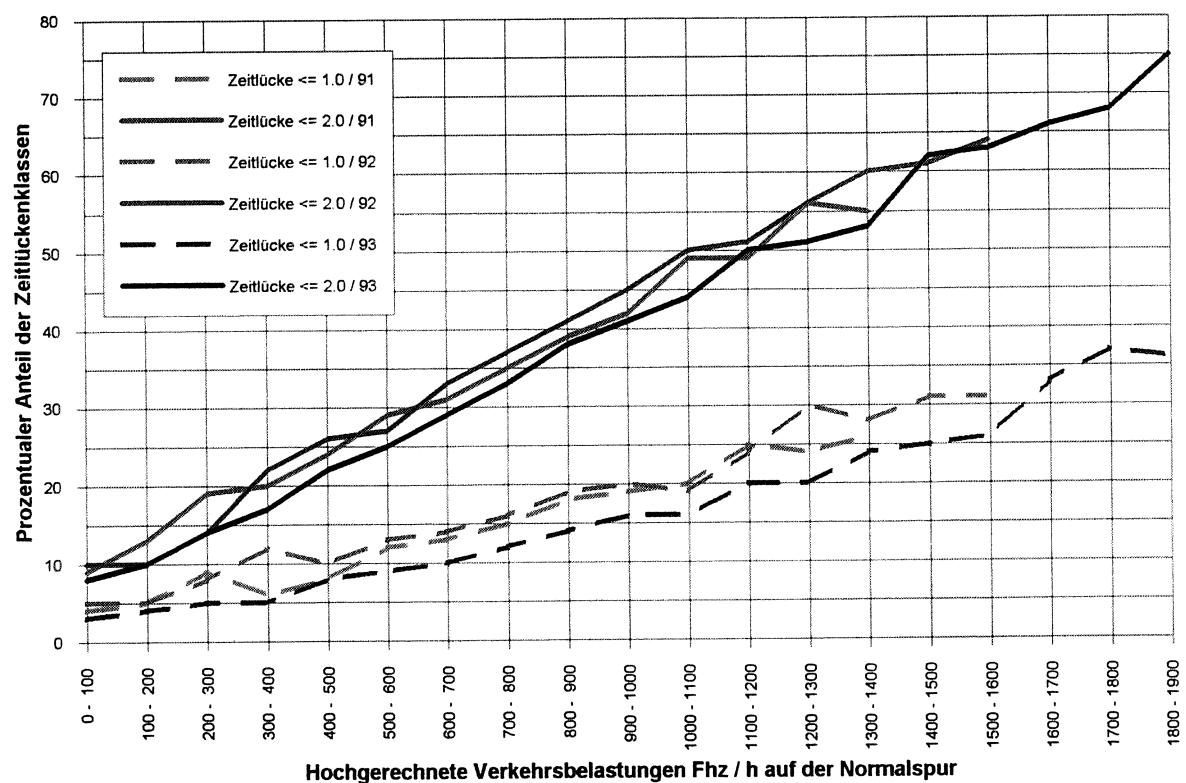
Auswertung Normalspur im 5 Min. Intervall / Abstufung in 100er Schritte / Werktag

PROZENTUALE ANTEILE DER ZEITLÜCKENKLASSEN IN ABHÄNGIGKEIT DER VERKEHRSELASTUNG AUF DER NORMALSPUR DER QUERSCHNITTE 3 UND 4

Werktag 07.00 - 18.00 Uhr

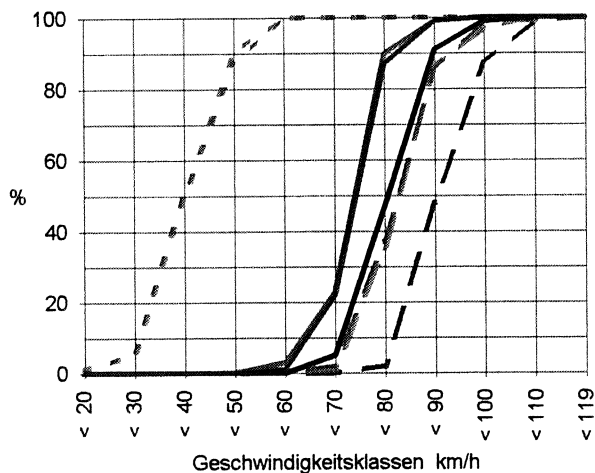
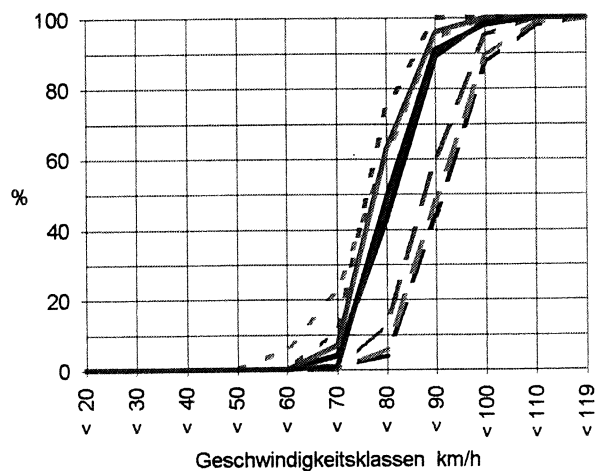
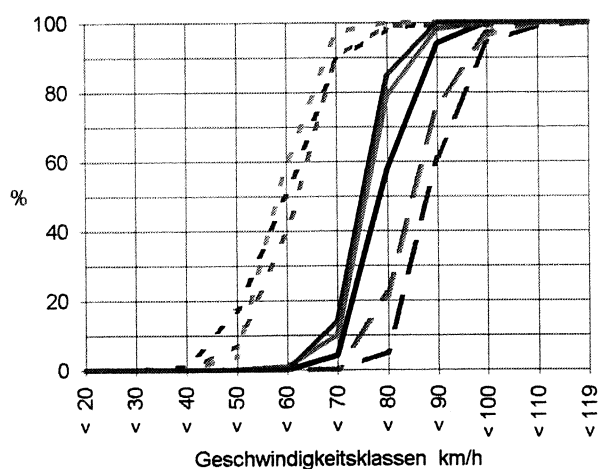
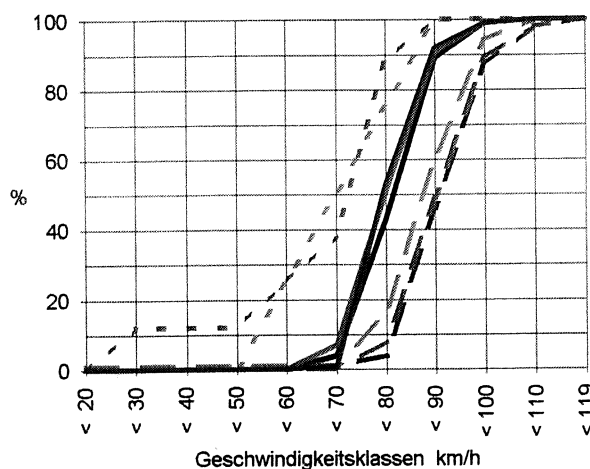
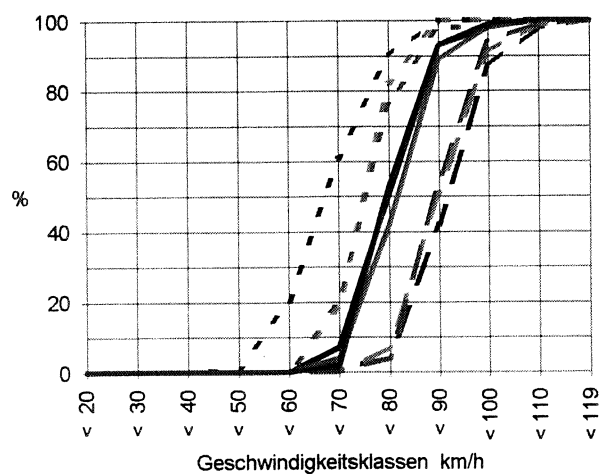
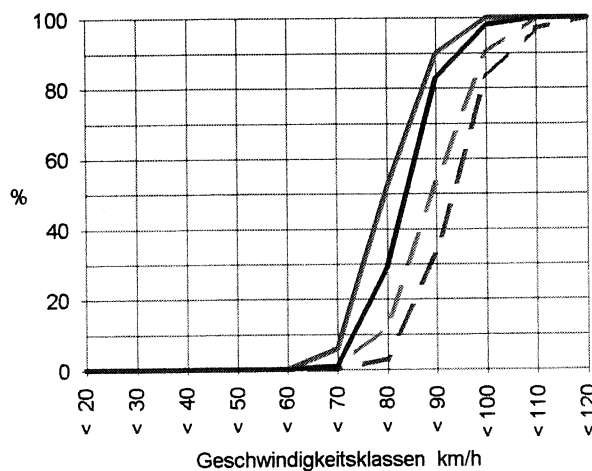


Werktag 00.00 - 07.00 + 18.00 - 24.00 Uhr



SN6 - GRAFISCHE DARSTELLUNG EINES FALLES

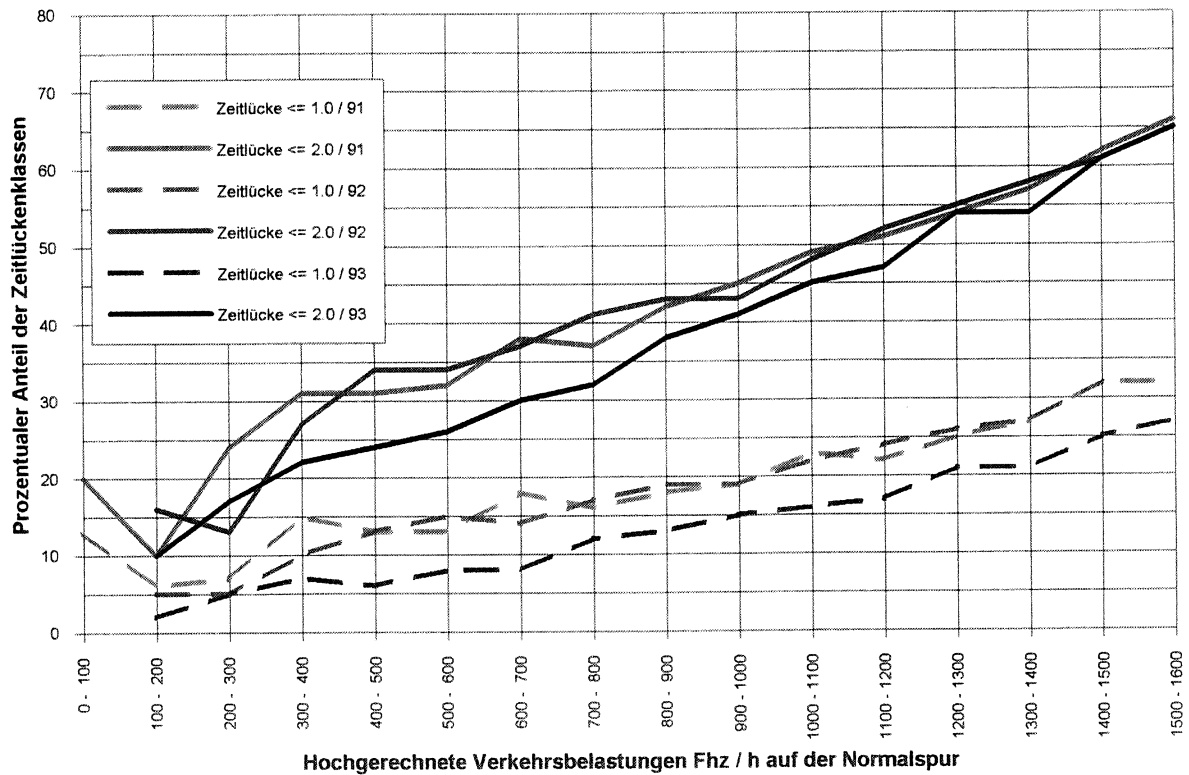
Auswertung im 5 Min. Intervall / von 07.00 - 18.00 Uhr / Abstufung in 100er Schritte / Werktag

VERKEHRSELASTUNGEN FALL 120 : EINFABRT 300 - 400 Fhz/h AUTOBAHN 1400 - 1500 Fhz/h**Summenverteilungskurven Querschnitt 1****Summenverteilungskurven Querschnitt 4****Summenverteilungskurven Querschnitt 2****Summenverteilungskurven Querschnitt 5****Summenverteilungskurven Querschnitt 3****Summenverteilungskurven Querschnitt 6**

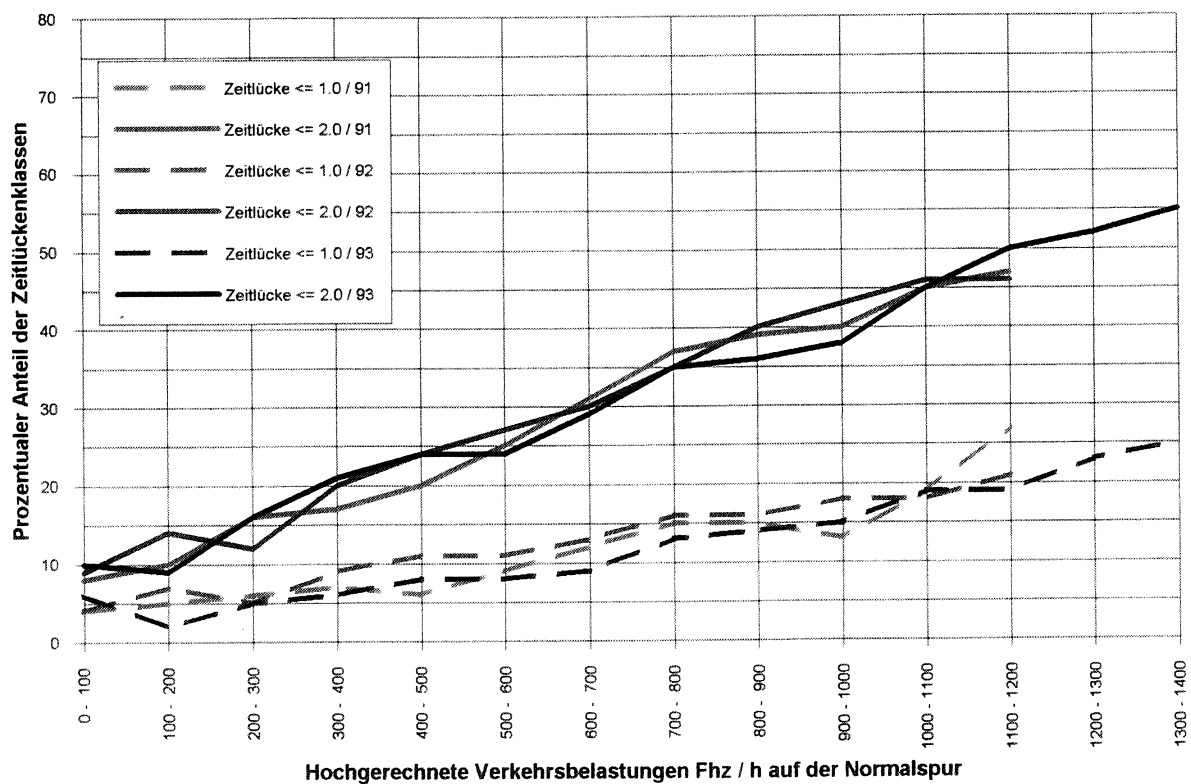
Auswertung Normalspur im 5 Min. Intervall / Abstufung in 100er Schritte / Sonntag

PROZENTUALE ANTEILE DER ZEITLÜCKENKLASSEN IN ABHÄNGIGKEIT DER VERKEHRSELASTUNG AUF DER NORMALSPUR DER QUERSCHNITTE 3 UND 4

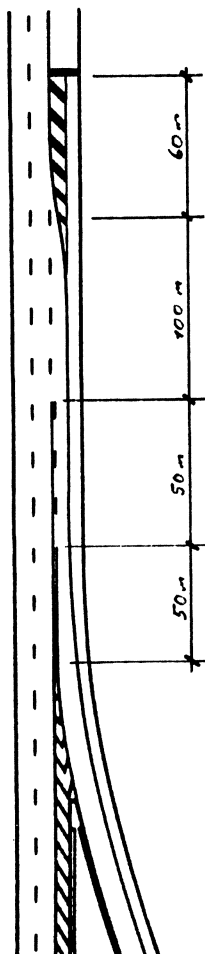
Sonntag 07.00 - 18.00 Uhr



Sonntag 00.00 - 07.00 + 18.00 - 24.00 Uhr



Auswertung Videoaufzeichnungen der Versuchsanordnung Oktober 93



		Querschnitt 2				Einfahrt					"Kritische"	Stehende			
		Überholspur		Normalspur		Total	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Situationen	Fahrzeuge			
Mittwoch	27.10.93	1397	54%	1207	46%	2604	6	1%	135	17%	667	82%	7	1%	-
Dienstag	26.10.93	1347	53%	1174	47%	2521	3	0%	102	13%	650	85%	8	1%	-
Freitag	22.10.93	1380	56%	1099	44%	2479	2	0%	146	20%	582	79%	6	1%	1
Freitag	22.10.93	1319	53%	1175	47%	2494	4	1%	89	13%	587	84%	16	2%	2
Freitag	22.10.93	1037	49%	1077	51%	2114	1	0%	128	20%	510	78%	11	2%	2
Mittwoch	27.10.93	964	47%	1095	53%	2059	2	0%	81	13%	535	86%	5	1%	-
Dienstag	26.10.93	960	47%	1089	53%	2049	2	0%	91	15%	512	84%	7	1%	-
Mittwoch	27.10.93	750	43%	985	57%	1735	3	0%	74	11%	569	88%	2	0%	-
Dienstag	26.10.93	708	43%	947	57%	1655	0	0%	89	14%	535	85%	4	1%	1
Samstag	23.10.93	669	40%	988	60%	1657	3	1%	72	15%	402	83%	8	2%	2
Samstag	23.10.93	700	42%	955	58%	1655	1	0%	39	11%	297	87%	3	1%	1
Sonntag	24.10.93	501	34%	968	66%	1469	1	0%	35	11%	286	88%	2	1%	-
Sonntag	24.10.93	525	36%	947	64%	1472	0	0%	41	13%	264	86%	1	0%	2
Dienstag	26.10.93	426	33%	877	67%	1303	0	0%	42	15%	237	83%	5	2%	-
Samstag	23.10.93	478	37%	813	63%	1291	0	0%	51	18%	234	81%	4	1%	2
Sonntag	24.10.93	365	29%	899	71%	1264	1	0%	30	13%	203	86%	1	0%	-
Sonntag	24.10.93	355	29%	853	71%	1208	1	0%	21	8%	232	90%	4	2%	-
Mittwoch	27.10.93	398	35%	747	65%	1145	2	1%	62	17%	304	82%	4	1%	1
		14279	44%	17895	56%	32174	32	0%	1328	15%	7606	84%	98	1%	14

