

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

A-Niveau-Knoten im Bereich von 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.

Forschungsaufträge 13/90 und 15/90 im Auftrag
der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS)

A-Niveau-Knoten im Bereich von Tunneln

Carrefours à niveau dans la zone d'influence de 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 13/90 und 15/90 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)	3/6
Teil 2 Detailliertes Inhaltsverzeichnis	10
Teil 3 Die wichtigsten Resultate (grün)	13
Teil 4 Hintergründe und detaillierte Resultate	35
Teil 5 Verzeichnisse	95
Teil 6 Anhänge	98

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, Oberingenieurkreis I
- die Kantonspolizei Bern und die Gemeinde Steffisburg (Feldversuch Kreisel Steffisburg)
- das Bauamt Uri und die Kantonspolizei Uri (Messungen und Aufnahmen Stutzegg Tunnel, Axenstrasse)

ZUSAMMENFASSUNG

A-Niveau-Knoten im Bereich von Tunneln werden heute von den zuständigen Stellen bis auf wenige Ausnahmen nicht genehmigt und wurden in der Schweiz bisher kaum realisiert. Im Forschungsauftrag 18/87 wurden erste Anforderungen an solche Knoten formuliert. Dabei zeigte sich, dass die Problematik von A-Niveau-Knoten im Bereich von Tunneln vor allem auch unter Beachtung der visuellen Wahrnehmung noch näher zu untersuchen ist.

Aufgrund dieser Ausgangslage wurden die beiden **Forschungsaufträge 13/90 „A-Niveau-Knotenpunkte ausserhalb, aber im Einflussbereich von Tunneln und Galerien“** und **15/90 „A-Niveau-Knotenpunkte in Tunneln und Galerien“** in die Wege geleitet. Ausgangslage, Zielsetzung, Vorgehen, Untersuchungen und Resultate der Forschungsarbeiten sind im vorliegenden Bericht zusammengefasst. Die Untersuchungen beschränken sich auf einstreifige Knotenzufahrten.

Der im folgenden verwendete Begriff „im (Einfluss-) Bereich von Tunneln“ schliesst Knotenpunkte im Tunnel und ausserhalb, aber im Einflussbereich des Tunnels, ein.

Das Ziel der **Forschungsaufträge** 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 A-Niveau-Knotenpunkten im Einflussbereich von Tunneln erlaubt.

Die **Problematik der Wahrnehmung** solcher Knoten war in erster Linie anhand von **Laborversuchen** 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, Grundlagenbeschaffung für wahrnehmungspsychologische Untersuchungen, Vorbereitung und Durchführung von wahrnehmungspsychologischen Laborversuchen sowie Interpretation der Resultate und die Formulierung der Schlussresultate. Die Arbeiten wurden innert 3 Jahren durchgeführt.

Mit der **verkehrstechnischen Voranalyse** wurden die wichtigsten Probleme, welche bei der Anordnung von A-Niveau-Knoten im Einflussbereich von Tunneln entstehen können, erfasst und systematisiert. Als massgebende Einflussfaktoren wurden die Lage des Knotens in bezug auf den Tunnel, die Tunnelgeometrie, die signalisierte Höchstgeschwindigkeit, die Knotenform, die Betriebsart des Knotens, die Verkehrsbeziehungen im Knoten, die Verkehrszusammensetzung und die Tunnelbeleuchtung erkannt.

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. 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 eines Knotens** im Einflussbereich von Tunneln müssen der Knoten, die Vortrittsregelung, der Rückstau, vortrittsberechtigte Fahrzeuge, querende Fussgänger, vortrittsberechtigte Radfahrer und Fehlverhalten erkannt sowie Zeitlücken, Distanzen und Geschwindigkeiten von vortrittsberechtigten Fahrzeugen abgeschätzt werden können. Eine wichtige Rolle spielt auch die Erwartungshaltung des Automobilisten.

Aufgrund der Knotenform (Kreuzung und Einmündung) und der Betriebsart des Knotens (Lichtsignalanlage, Kleinkreisel, Vortritt geradeaus und Rechtsvortritt) wurden die Knoten typisiert.

Wegen der umfangreichen Problematik und der an die Grenzen stossenden Wahrnehmung wurden die **weitergehenden Untersuchungen** auf die aus der Praxis vordringlichsten Themen **lichtsignalgeregelte Knoten, Kleinkreisel und Rückstau im Knotenbereich** konzentriert.

Die Resultate eines Feldversuches am **Kleinkreisel Stuckikreuzung in Steffisburg** zeigen, dass die Mittelinsel eines Kleinkreisels mit vollem Kern im Vergleich zur freien Durchsicht ähnliche Leistungsfähigkeit und ein leicht tieferes Geschwindigkeitsverhalten bewirkt. Nebst diesen Argumenten sprechen konstruktive Gründe und die bessere Wahrnehmung des Knotens (Zufahrt auf ein Hindernis) für die Realisierung eines vollen Kerns bei unterirdischer Anordnung eines Kleinkreisels.

Die grössten Probleme für das **Wahrnehmungssystem** des Automobilisten beim Durchfahren eines Tunnels ergeben sich bei hellem Tageslicht, da dann die Unterschiede in der Leuchtstärke 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 Knoten, die als Kleinkreisel konzipiert sind oder durch eine Lichtsignalanlage geregelt werden, unter den gegenwärtigen Normen der Tunnelbeleuchtung in den einzelnen Tunnelzonen ausreichend erkannt werden. Ausreichend bedeutet, dass die Knoten aus der Anhaltedistanz entdeckt und als solche erkannt würden. Dieselbe Frage stellt sich auch für das Erkennen des Rückstaus.

Da sich zu dieser Fragestellung in der Literatur keine ausreichenden Aussagen finden, wurde die Frage der Sichtbarkeit von Knoten und des Rückstaus in einem möglichst realen Laborexperiment direkt untersucht.

Als **Grundlage für die Laborexperimente** wurden in einem bestehenden Tunnel Videoaufnahmen hergestellt. Dabei wurden in jeder der oben definierten Zonen ein Knoten (Lichtsignal und Kleinkreisel) bzw. ein Rückstau (stehendes Fahrzeug mit und ohne Rücklicht) simuliert. Zusätzlich wurden auch die **Leuchtdichten** dieser Objekte und des Tunnelhintergrundes unter verschiedenen Beleuchtungen gemessen. Vom Kanton Uri wurde dafür der Stutzegg Tunnel an der N4 Axenstrasse zur Verfügung gestellt.

In den **Laborversuchen** wurden mit Stichproben von jüngeren und älteren Versuchspersonen die Sichtbarkeit von Knoten und Rückstau in den verschiedenen Tunnelzonen untersucht. Dabei ergab sich, dass die älteren Leute allgemein Knoten und Rückstau signifikant später erkannten als die jüngeren Leute.

Als Kriterium für die ausreichende Sichtbarkeit wurde festgelegt, dass 85 % der Stichprobe der älteren Fahrer die Knoten und den Rückstau mindestens aus der Anhaltedistanz gemäss SN 640 090a für 70 km/h bei einer Längsneigung der Strasse von -3% erkennen mussten. Dieses Kriterium kann in allen Bereichen mit Ausnahme der Einfahrtszone D1 für Kleinkreisel, Lichtsignalanlage und Rückstau erfüllt werden. Beim Kleinkreisel mit vollem Kern ist dazu allerdings eine Erhöhung der Beleuchtung des Kreisels zur Vergrösserung des Kontrastes des Objektes zum Hintergrund bzw. eine Erhöhung der Beleuchtung im Umfeld des Knotens erforderlich.

Im Experiment nicht untersucht wurde der Einfluss der Erwartungshaltung und der Aufmerksamkeit des Fahrers in bezug auf Knoten und Rückstau im Einflussbereich von Tunneln. Diese Problematik kann aber mit einer deutlichen (Vor-) Signalisation der Knotensituation abgemindert werden.

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

Die Realisierung eines A-Niveau-Knotens im Bereich von Tunneln ist unter Einhaltung gewisser Einschränkungen und Anforderungen grundsätzlich machbar. Die wichtigsten Anforderungen sind:

- Es kommen nur lichtsignalgeregelte Knoten und Kleinkreisel in Frage.
- Die Anordnung eines Knotens im Bereich D1 (Tunneleinfahrtsbereich) ist nicht zulässig.
- Bei Realisierung von Knoten 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 60 km/h betragen. Die Projektierungsgeschwindigkeit zur Berechnung der notwendigen Sichtweiten ist um 10 km/h zu erhöhen.
- Es wird eine deutliche Vorseignalisation und Wegweisung gefordert.
- Im Knoten- und begrenzten Rückstaubereich wird ein gegenüber der Beleuchtungsnorm um 50 % erhöhtes Leuchtdichteniveau empfohlen.
- In unterirdischen Knoten dürfen keine Fussgänger und Radfahrer zugelassen werden.
- Lichtsignalanlagen sind vollständig redundant auszuführen.

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 zu folgenden Punkten vorgeschlagen:

- Lichtsignalanlagen und Kleinkreisel im Bereich D1
- Knoten mit Vortritt geradeaus im Portalbereich
- Radfahrer und Fussgänger im Tunnel
- mehrstreifige Knotenzufahrten

RESUME

A quelques exceptions près, les carrefours à niveau situés dans la zone d'influence d'un tunnel ne sont aujourd'hui pas autorisés par les autorités compétentes et, pour cette raison, ont à peine été réalisés en Suisse. Les premières exigences concernant ces carrefours ont été formulées lors du mandat de recherche 18/87. Il s'est alors montré que la problématique des carrefours à niveau situés 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, les deux mandats de recherche intitulés "**Les carrefours à niveau situés à l'extérieur, mais dans la zone d'influence d'un tunnel ou d'une galerie**" (13/90) et "**Les carrefours à niveau situés à l'intérieur d'un tunnel ou d'une galerie**" (15/90) ont été mis en route. La situation de base, les objectifs, le procédé, les études ainsi que les résultats des deux travaux de recherche sont regroupés dans le présent rapport. Les études se sont limitées aux accès au carrefour à une voie.

Par la suite, la notion "situé dans la zone d'influence d'un tunnel" englobe les carrefours situés à l'intérieur ainsi qu'à l'extérieur d'un tunnel, mais placés toujours dans la zone d'influence d'un tunnel.

Les objectifs des deux 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'un carrefour à niveau situé dans la zone d'influence d'un tunnel.

Le problème de la perceptibilité de ces carrefours devrait être étudié en premier lieu par des essais de laboratoire.

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, l'élaboration, la préparation et la mise en oeuvre des essais de laboratoire sur la psychologie de la perception ainsi que l'interprétation des résultats et la formulation des conclusions finales. 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 mise en place d'un carrefour dans la zone d'influence d'un tunnel. La position du carrefour dans le tunnel, la géométrie du tunnel, la vitesse maximale indiquée, la forme du carrefour, son mode d'exploitation, les relations des courants du trafic dans le carrefour, la composition du trafic ainsi que l'éclairage 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), les contrastes entre un objet et son entourage ainsi que les effets d'éblouissements causés par les véhicules roulant en sens inverse varient selon **l'emplacement du carrefour dans le 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 un carrefour situé dans la zone d'influence d'un tunnel il faut d'une part tenir compte du carrefour même ainsi que des règles de priorité, des embouteillages, des véhicules et cyclistes prioritaires, des piétons traversants 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.

Les carrefours ont été caractérisés en fonction de leur forme (carrefour, entrées) et de leur mode de fonctionnement (signalisation lumineuse, minigiratoire, régime de priorité).

A cause de la thématique très vaste et de la perception humaine touchant à sa limite, les études détaillées se sont concentrées sur les situations les plus importantes rencontrées dans la pratique: les carrefours à régulation lumineuse, les minigiratoires et les embouteillages observés dans la zone du carrefour.

Les résultats d'un essai in situ effectué sur le minigiratoire "Stuckikreuzung" à Steffisburg (BE) montrent que la mise en place d'un îlot central à noyau plein a pour conséquence une capacité similaire, mais des vitesses légèrement inférieures par rapport à un îlot central offrant une visibilité dégagée sur tout le giratoire. Outre ces arguments, des raisons constructives et la meilleure perception du carrefour comme obstacle favorisent la mise en place d'un îlot central à noyau plein lors d'une conception souterraine d'un minigiratoire.

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 carrefours, conçus comme minigiratoires ou réglés par une signalisation lumineuse, peuvent être suffisamment bien perçus dans les différentes zones du tunnel soumises aux normes actuelles de l'éclairage des tunnels. Leur perception est suffisante si les carrefours peuvent être reconnus et identifiés comme tels à partir de la distance d'arrêt. 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 carrefours et des embouteillages a été étudiée à l'aide d'essais de laboratoire aussi proche que possible de la réalité.

Des vidéo-cassettes, enregistrées dans des tunnels existants, servaient de base pour les **essais de laboratoire**. A cette occasion, des carrefours (carrefour à signalisation lumineuse et minigiratoire) et des embouteillages (véhicule arrêté avec et sans feu arrière) ont été simulés dans chacune des zones définies plus haut. De plus, les **luminances** de ces objets et de l'arrière-plan du tunnel ont été mesurées à des conditions d'éclairage variées. A cet effet, le tunnel "Stutzegg" de la route nationale N4 (Axenstrasse) a été mis à notre disposition par le canton d'Uri.

La perception des carrefours et des embouteillages simulés dans les différentes zones du tunnel a été étudiée à l'aide d'échantillons de personnes de différentes classes d'âge choisis au hasard. Il s'est alors montré que les personnes plus âgées reconnaissent les carrefours et les embouteillages sensiblement plus tard que les personnes plus jeunes.

Le critère pour une perception suffisante a été fixé de la manière suivante: Le carrefour et les embouteillages doivent être perçus par 85% de l'échantillon des automobilistes plus âgés au minimum à partir de la distance d'arrêt selon la SN 640 090a pour une vitesse de 70 km/h et avec une déclivité longitudinale de la route de -3%.

A l'exception de la zone D1, ce critère peut être satisfait dans toutes les zones du tunnel pour les minigiratoires, les carrefours à signalisation lumineuse et les embouteillages. Lors de la mise en place d'un giratoire muni d'un îlot central à noyau plein, il est cependant nécessaire d'augmenter l'éclairage du giratoire pour accroître son contraste par rapport au tunnel ou bien d'augmenter l'éclairage dans l'entourage du giratoire.

L'influence de l'attitude et de l'attention de l'automobiliste envers les carrefours et les embouteillages dans la zone d'influence d'un tunnel n'ont pas été étudiées. Le problème d'une attention insuffisante de la part de l'automobiliste peut cependant être réduit par la mise en place d'une (pré)signalisation nette du carrefour.

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

- Uniquement les carrefours à régulation lumineuse et les minigiratoires doivent être réalisés.
- La mise en place d'un carrefour dans la zone D1 (zone d'entrée) n'est pas admissible.
- Lors d'une réalisation d'un carrefour 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 60 km/h. La vitesse de projet pour le calcul des distances de visibilité d'arrêt est à augmenter de 10 km/h.
- La présignalisation du carrefour et les indications de direction doivent être claires et nettes.
- Un niveau de luminances majoré de 50% par rapport à la norme d'éclairage est recommandé dans la zone du carrefour et dans les zones touchées par des embouteillages.
- Les piétons et les cyclistes ne sont pas tolérés dans les carrefours souterrains.
- La signalisation lumineuse est à réaliser de façon entièrement redondante.

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 carrefours souterrains.

Sur la base des présents résultats et des problèmes subsistants concernant la perception humaine limitée, **d'autres études** devraient être effectuées pour analyser les points suivants:

- carrefours à signalisation lumineuse et minigiratoires situés dans la zone D1
- carrefours avec priorité tout droit et priorité de droite
- cyclistes et piétons dans le tunnel
- entrées dans le carrefour à plusieurs voies

INHALTSVERZEICHNIS

1.	FORSCHUNGSRÉSULTATE	13
1.1	Übersicht	13
1.2	Resultate und Folgerungen aus den wahrnehmungspychologischen Untersuchungen	13
1.3	Grundsätzliche Machbarkeit von Knoten im Bereich von Tunneln und Galerien	15
1.4	Allgemeine Anforderungen an die Knotengestaltung im Bereich von Tunneln	18
1.5	Spezielle zusätzliche Anforderungen an unterirdische Knoten (Lage D2, E, F)	21
1.6	Spezielle zusätzliche Anforderungen an Knoten ausserhalb, aber im Einflussbereich eines Tunnels (Lage B, H)	22
1.7	Spezielle zusätzliche Anforderungen bei Lichtsignalregelung	23
1.8	Spezielle Anforderungen bei Anordnung eines Kleinkreisels	27
1.9	Spezialfälle	30
1.10	Die wichtigsten Änderungen gegenüber den Resultaten aus Forschungsauftrag 18/87	30
1.11	Erreichung der Forschungsziele (vgl. Kap. 4)	30
1.12	Fazit	31
 2.	 EMPFEHLUNGEN FÜR DAS WEITERE VORGEHEN	 32
2.1	Übersicht	32
2.2	Lichtsignalanlagen, Kleinkreisel in den Bereichen B, D2, E, (F) und G	33
2.3	Weitere Untersuchungen im Bereich von Tunneln	33
2.4	Knoten in Galerien	34
 3.	 EINLEITUNG	 35
3.1	Ausgangslage	35
3.2	Vorgeschichte	36
3.3	Auftrag/Zweck	36
3.4	Projektorganisation	37
3.5	Projektablauf	38
 4.	 ZIELSETZUNGEN	 39
 5.	 GRUNDLAGEN, RANDBEDINGUNGEN, VORENTSCHEIDE	 40
5.1	Grundlagen	40
5.1.1	Normen	40
5.1.2	Bisherige Forschungsarbeiten	43
5.1.3	Übrige Literatur	45
5.1.4	Geräte	45
5.2	Randbedingungen und Abgrenzungen	46
5.3	Wichtige Vorentscheide	46
 6.	 METHODIK	 47

7.	VERKEHRSTECHNISCHE VORANALYSE	48
7.1	Zweck der Voranalyse	48
7.2	Einflussfaktoren	48
7.3	Erkennbarkeit und Wahrnehmung eines Knotens	52
7.4	Typisierung der Knoten	52
7.5	Problembereiche	53
7.6	Abgrenzung der Untersuchungen	54
7.7	Feldversuch Kleinkreisel	55
7.7.1	Einleitung und Zielsetzung	55
7.7.2	Versuchsanordnung und -durchführung	57
7.7.3	Auswertungen	58
7.7.4	Versuchsergebnisse	60
7.7.5	Interpretation der Versuchsergebnisse	61
7.8	Erhebung eingeschalteter Fahrzeuglichter	61
8.	WAHRNEHMUNGSPSYCHOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN	62
8.1.	Einleitung	62
8.2.	Wahrnehmungsprobleme beim Befahren von Tunneln	64
8.2.1	Einfluss von Streulicht	64
8.2.2	Dunkeladaptation	65
8.2.3	Helladaptation	66
8.3.	Fragestellung der wahrnehmungspsychologischen Untersuchung	66
9.	SIMULATION DER KNOTEN UND DES RÜCKSTAUS IN EINEM TUNNEL	68
9.1.	Einleitung	68
9.2.	Simulation der Knoten und des Rückstaus	68
9.3	Tunnelzonen	69
9.4	Videoaufnahmen	72
9.5.	Leuchtdichtemessungen	72
10.	LABORVERSUCHE	73
10.1	Zielsetzung	73
10.2	Versuchsanlage	73
10.3	Experiment I: Knoten und Rückstau in der Einfahrtsstrecke	75
10.3.1	Versuchsbedingungen	75
10.3.2	Versuchspersonen	75
10.3.3	Versuchsdurchführung	76
10.3.4	Resultate	76
10.3.5.	Diskussion und Schlussfolgerungen	79
10.4.	Experiment II: Knoten und Rückstau in der Innenstrecke (E), Ausfahrtsstrecke (F) und in der Anschlussstrecke (H)	80
10.4.1	Versuchsbedingungen	80
10.4.2	Versuchspersonen	81
10.4.3	Versuchsdurchführung	81
10.4.5	Resultate	81
10.4.6	Diskussion und Schlussfolgerungen	84

10.5	Experiment III: Knoten und Rückstau in der Einfahrtsstrecke (D1) unter Variation der Kontraste	85
10.5.1	Versuchsbedingungen	85
10.5.2	Versuchspersonen	86
10.5.3	Versuchsdurchführung	86
10.5.4	Resultate	86
10.5.5	Diskussion	89
10.6	Zusammenfassung der Resultate	92
10.7	Schlussfolgerungen aus den Experimenten	93

VERZEICHNISSE

Abbildungen

Tabellen

Literatur

ANHÄNGE

- 1. Geräte: CapCalc System**
- 2. Verkehrstechnische Voranalyse: Typisierung der Knoten**
- 3. Resultate Feldversuch Kleinkreisel Steffisburg**
- 4. Resultate Laborversuche: Kumulative Verteilungen der Reaktionsdistanzen**

DIE WICHTIGSTEN RESULTATE

Dieser Berichtsteil enthält die Forschungsergebnisse und 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 Folgerungen aus den wahrnehmungspsychologischen Untersuchungen (Kap. 1.2)
- Grundsätzliche Machbarkeit von Knoten im Bereich von Tunneln (Kap. 1.3)
- Allgemeine Anforderungen an die Knotengestaltung im Bereich von Tunneln (Kap. 1.4)
- Spezielle zusätzliche Anforderungen an unterirdische Knoten (Kap. 1.5)
- Spezielle zusätzliche Anforderungen an Knoten ausserhalb, aber im Einflussbereich eines Tunnels (Kap. 1.6)
- Spezielle zusätzliche Anforderungen bei Lichtsignalregelung (Kap. 1.7)
- Spezielle zusätzliche Anforderungen bei Anordnung eines Kleinkreisels (Kap. 1.8)
- Spezialfälle (Kap. 1.9)
- Die wichtigsten Änderungen gegenüber den Resultaten aus Forschungsauftrag 18/87 (Kap. 1.10)
- Erreichung der Forschungsziele (Kap. 1.11)
- Fazit (Kap. 1.12)

Die vorliegenden Anforderungen an die Gestaltung eines A-Niveau-Knotens 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 wird.

1.2 Resultate und Folgerungen aus den wahrnehmungspsychologischen Untersuchungen

Bei zwei Altersgruppen von Versuchspersonen wurde die Sichtbarkeit von Knoten und Rückstau in den verschiedenen Tunnelbereichen experimentell untersucht. Bei den Knoten handelte es sich um einen Kleinkreis mit massivem Kern, einen Kleinkreis mit freier Durchsicht und um eine Lichtsignalanlage. Die Beleuchtungsbedingungen wurden variiert in Übereinstimmung mit den effektiven Lichtverhältnissen in der Realität. Im folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse kurz dargestellt:

- **Altersunterschiede**

Die älteren Versuchspersonen (Durchschnittsalter 68.2 Jahre) erkannten in allen Tunnelbereichen Knoten und Rückstau signifikant später als die jungen Versuchspersonen (Durchschnittsalter 28.7 Jahre). Es sollten daher die Normen für die Gestaltung von Knoten in Tunneln auf die Population der älteren Lenkerinnen und Lenker ausgerichtet werden.

- **Kriterium für eine ausreichende Sichtbarkeit von Knoten und Rückstau**

Ausreichende Sichtbarkeit wurde so definiert, dass 85% der Stichprobe der älteren Versuchspersonen Knoten und Rückstau mindestens aus der Anhaltestanz für eine Geschwindigkeit von 70 km/h und eine Längsneigung der Strasse von -3% erkennen mussten. Die Geschwindigkeit von 70 km/h wurde gewählt aus der Annahme einer signalisierten Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h im Bereich von Knoten, zu der ein Sicherheitsbereich von 10 km/h hinzugefügt wurde.

Der Grenzwert 85 % ist aus folgenden Gründen zulässig:

 - Die erforderliche Anhaltesichtweite gemäss SN 640 090a beinhaltet in sich schon gewisse Sicherheitsreserven.
 - Für die Projektierung wird ein Sicherheitszuschlag von 10 km/h auf die signalisierte Höchstgeschwindigkeit dazugegeben.
 - Ältere Verkehrsteilnehmer senken ihre Fahrzeuggeschwindigkeit bei schwierigen Verkehrssituationen, fahren sehr vorsichtig bzw. meiden für sie schwierige und ungewohnte Situationen grundsätzlich.
- **Sichtbarkeit von Knoten und Rückstau in den einzelnen Tunnelbereichen**
 - **Einfahrtsstrecke (D1)**

Kleinkreisel, Lichtsignalanlage und Rückstau wurden am schlechtesten erkannt, wenn sie in der Einfahrtsstrecke positioniert waren. Dies ist hauptsächlich eine Folge der durch Streulicht reduzierten Kontraste im Gesichtsfeld. Das oben definierte Kriterium für eine ausreichende Sichtbarkeit wurde weder für die Knoten noch für den Rückstau erreicht.
 - **Übergangsstrecke (D2)**

In den Untersuchungen zeigten die Versuchspersonen unmittelbar nach der Einfahrt in den Tunnel Auswirkungen einer noch nicht vollständig erfolgten Dunkeladaptation, wodurch das Erkennen von Knoten und Rückstau in der Übergangsstrecke erschwert wird.
 - **Innenstrecke (E)**

Die Sichtbarkeit von Knoten und Rückstau in der Innenstrecke war nach obigem Kriterium ausreichend mit Ausnahme des Kleinkreisels mit massivem Kern. In diesem Fall bewirkte die Gegenstrahlbeleuchtung niedrige Kontraste. Durch eine direkte Beleuchtung und eine optimale Strukturierung des massiven Kerns könnte aber eine ausreichende Sichtbarkeit erreicht werden.
 - **Ausfahrtsstrecke (F)**

Für Knoten und Rückstau, die in der Ausfahrtsstrecke positioniert waren, wurde das obige Kriterium deutlich überschritten. Wegen des hohen Kontrasts zum hellen Tunnelausgang sind Kleinkreisel und Rückstau sehr gut sichtbar.
 - **Anschlussstrecke (H)**

Für den Kleinkreisel mit freier Durchsicht und den Rückstau, die sich ausserhalb des Tunnels befanden, wurde das Kriterium ebenfalls deutlich überschritten. Die Hindernisse waren aus dem Tunnel heraus sehr gut sichtbar. Hier entsteht nachts ein Problem der Sichtbarkeit, wenn der Knoten ungenügend beleuchtet ist.
- **Aufmerksamkeit und Erwartungshaltung der Lenkerinnen und Lenker**

Aus der Wahrnehmungspsychologie ist bekannt, dass die Wahrnehmung von Objekten sehr stark von der Erwartungshaltung einer Person beeinflusst wird. Objekte, die erwartet werden, werden schneller entdeckt und unerwartete Objekte werden oft gar nicht be-

wusst wahrgenommen. Da es heute noch kaum Knoten in Tunneln gibt, werden sie auch nicht erwartet. Es ist daher ausserordentlich wichtig, durch Vorsignalisation und Wegweisungstafeln, die beim Knoten angebracht sind, klar zu machen, dass es sich um einen Knoten handelt.

Dies gilt insbesondere für Knoten, die durch Lichtsignalanlagen geregelt werden. Da Lichtsignalanlagen gegenwärtig in Tunneln in anderer Funktion verwendet werden, können sie zu falschen Erwartungen mit gravierenden Konsequenzen führen. Die Sichtbarkeit von Lichtsignalanlagen hingegen ist nicht schlechter als auf offener Strecke.

Bei Knoten in der Ausfahrtsstrecke (F) haben Wegweisungstafeln auch die zusätzliche Wirkung, eine allfällige einseitige Konzentration der Aufmerksamkeit auf die helle Tunnelöffnung zu korrigieren.

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 eines A-Niveau-Knotens im Bereich F zulässig.

Auch bei lichtsignalgeregelten Knoten bewirkt der helle Hintergrund (Blick auf das Tunnelende) einen genügenden Kontrast zwischen Ampel/Wegweisungstafel und der Umgebung. Die Lichtzeichen der Ampelanlage sind in jedem Fall besser wahrnehmbar als in einer vergleichbaren oberirdischen Situation mit starker Sonnenblendung.

Die Erwartungshaltung der Fahrer für einen Knoten in einem Kurztunnel kann mit einer entsprechenden Vorsignalisation vor dem oder am Tunneleinfahrtsportal erhöht werden.

Trotz verminderter Wahrnehmungsprobleme in D1 (geringere Wirkung des schwarzen Loches und der Dunkeladaptation) gegenüber einem Tunnel ohne Durchsicht ist in diesem Bereich die Anordnung eines Knotens unzulässig.

1.3 Grundsätzliche Machbarkeit von Knoten im Bereich von Tunneln und Galerien

Die Realisierung eines A-Niveau-Knotens im Bereich von Tunneln ist unter Einhaltung der nachfolgenden Einschränkungen und Anforderungen (vgl. auch Abb. 1.1) für 2streifige Knotenzufahrten (1 Fahrstreifen pro Richtung) mit Ausnahme in Zone D1 grundsätzlich machbar.

Als denkbare Betriebsarten des Knotens kommen aufgrund der Untersuchungen im Forschungsvorhaben vorläufig nur eine Lichtsignalregelung oder ein Kleinkreisel in Frage. Die Betriebsform "Knoten mit signalisierter Vortrittsregelung" muss insbesondere im Portalbereich noch weiter untersucht werden. Von einer Knotenregelung mit Rechtsvortritt wird grundsätzlich abgeraten.

Die Anordnung eines A-Niveau-Knotens im Bereich D1 (Tunneleinfahrtsbereich, vgl. Abb. 1.2) wird nicht zugelassen. Eine allfällige Machbarkeit eines Knotens in dieser Lage bedarf weiterer detaillierterer Untersuchungen, welche den zeitlichen und finanziellen Rahmen des vorliegenden Forschungsauftrages gesprengt hätten.

In allen übrigen Bereichen (B, D2, E, F, H) können unter Einhaltung der entsprechenden Anforderungen (vgl. folgende Kap.) Knoten in Form von Lichtsignalanlagen oder Kleinkreisel realisiert werden.

Mit Rückstau ist grundsätzlich bei jeder Knotenform zu rechnen. Bei Realisierung von Knoten im Bereich von Tunneln ist in jedem Fall mit 99 %iger Wahrscheinlichkeit auszuschliessen, dass sich ein Rückstau in die Zone D1 ausdehnt.

Die Bereiche C (Zone ausserhalb des Tunneleinfahrtsportals mit Sichtdreieck in den Tunnel hinein) und G (Bereich ausserhalb des Tunnelausfahrtsportales mit Sichtdreieck in den Tunnel hinein) werden hier nicht behandelt und dargestellt, da sie nur für Knoten mit regeltem Vortritt geradeaus von Bedeutung sind.

Abb 1.1 Prüfung der Machbarkeit eines A-Niveau-Knotens im Bereich von Tunneln

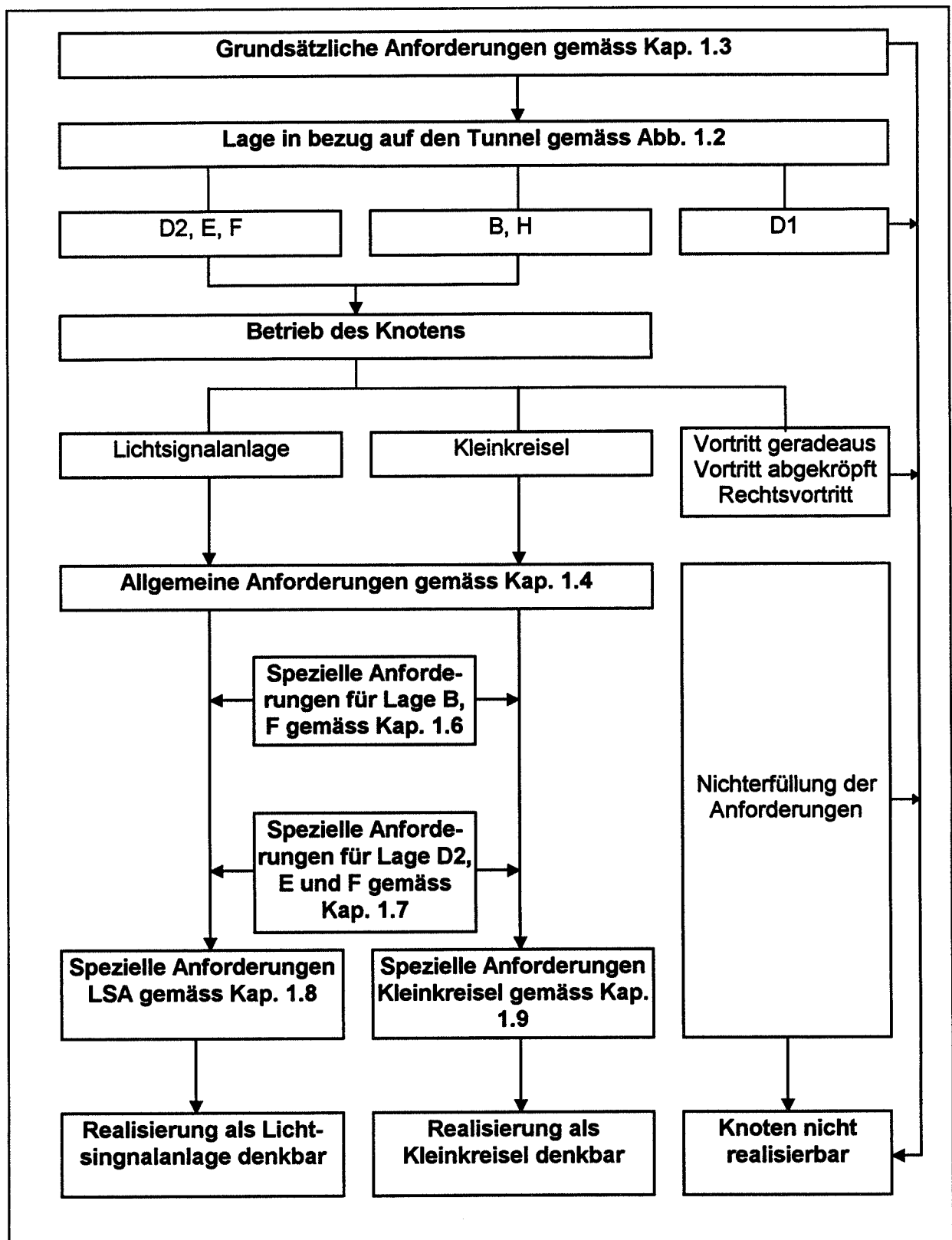
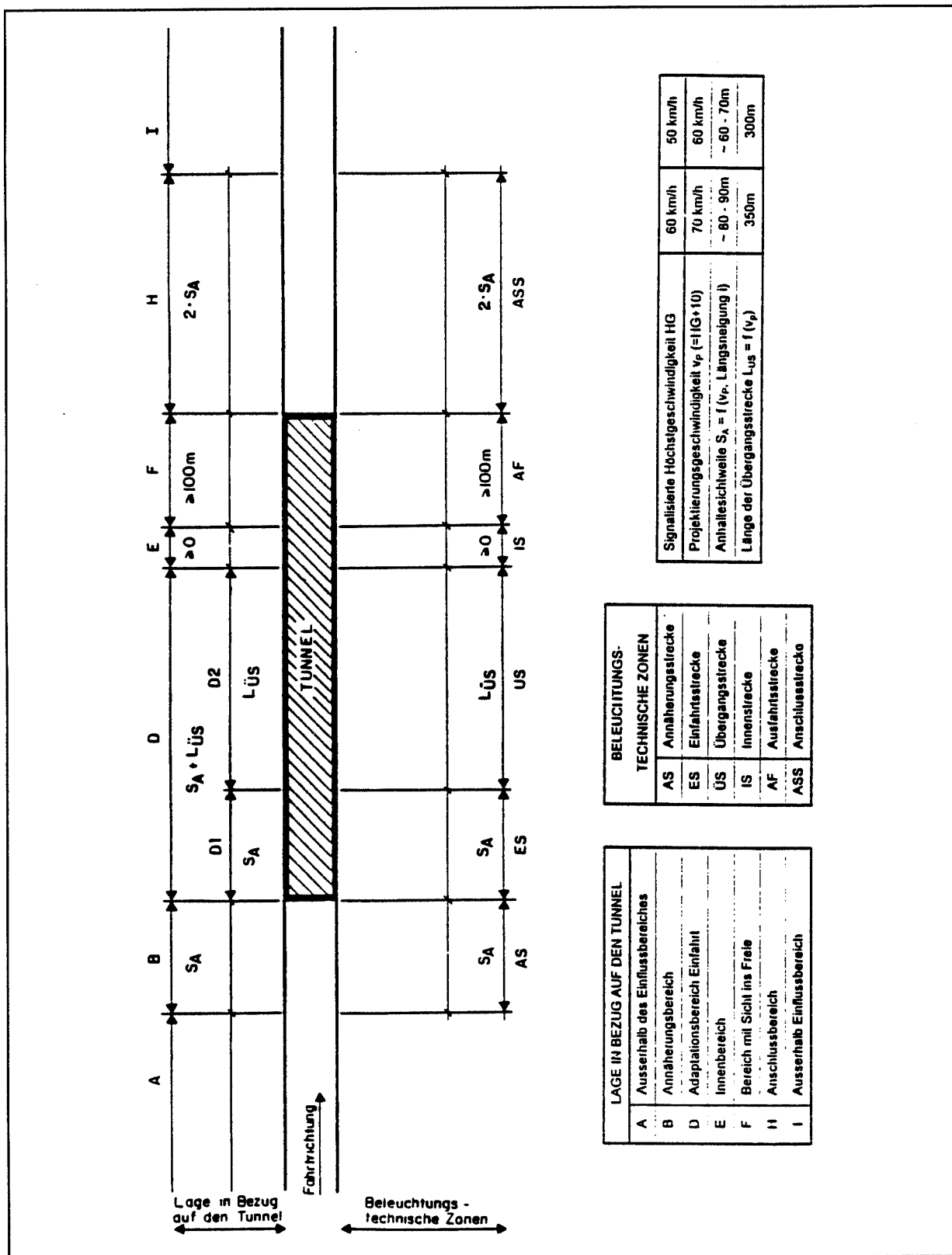


Abb 1.2 Lage in bezug auf den Tunnel, Definitionen



1.4 Allgemeine Anforderungen an die Knotengestaltung im Bereich von Tunneln

Tab 1.1 Allgemeine Anforderungen an A-Niveau-Knoten im Bereich von Tunneln

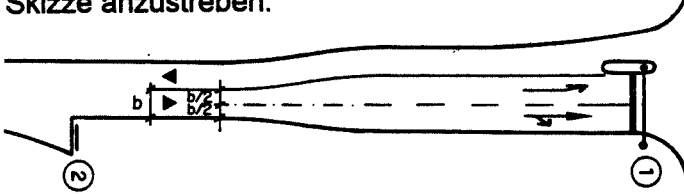
Lage in bezug auf den Tunnel	- Eine Knotenlage im Bereich D1 ist nicht zulässig. - Eine Knotenlage F ist demzufolge nur bei Einrichtungsverkehr möglich (Gegenrichtung = Lage D1) - Anzustreben ist eine Lage im Bereich B/H oder E - Eine Lage in D2 erfordert spezielle Anforderungen an die Beleuchtung (erhöhtes Leuchtdichteniveau gegenüber der Beleuchtungsnorm, vgl. Punkt Beleuchtung) und eine entsprechend sorgfältige Planung, da sie sich im Adaptationsbereich hell/dunkel befindet
Betriebsart	Der Knoten darf nur mit einer LSA oder in Form eines Kleinkreisels betrieben werden.
Maximal zulässige signalisierte Höchstgeschwindigkeit im Knotenannäherungsbereich	Die signalisierte Höchstgeschwindigkeit HG darf im Knotenannäherungsbereich (= mindestens die maximal erwartete Rückstaulänge + Anhaltesichtweite S_A) maximal 60 km/h betragen.
Trassierung des Knotens und der Zufahrten	Knoten im Bereich von Tunneln sind so zu gestalten, dass eine optimale Erkennbarkeit des Knotens, der (Vor-) Signalisation und des maximal zu erwartenden Rückstaus gewährleistet werden kann. Es sind möglichst grosse Knotensichtweiten vorzusehen.
Projektierungsgeschwindigkeit v_p	Um die rechtzeitige Wahrnehmung eines Knotens zu erreichen, ist aus Sicherheitsgründen für die Trassierung im Knotenbereich und Knotenannäherungsbereich eine um 10 km/h höhere Projektierungsgeschwindigkeit v_p als die signalisierte Höchstgeschwindigkeit HG zu berücksichtigen. $HG = 50 \text{ km/h} \rightarrow v_p = 60 \text{ km/h}$ $HG = 60 \text{ km/h} \rightarrow v_p = 70 \text{ km/h}$ Eine tiefere HG kann beispielsweise festgelegt werden, wenn ein Knoten in einen bestehenden Tunnel hineingebaut wird und die vorhandene Tunnelgeometrie keine höhere V_p zulässt.

Anhaltesichtweiten S_A Horizontale Linienführung Vertikale Linienführung Fahrbahnquerschnitt	Die erforderlichen Anhaltesichtweiten auf der Basis der festgelegten Projektierungsgeschwindigkeit sind im ganzen Bereich zwischen Knoten und dem maximal zugelassenen Rückstauende zu gewährleisten. Der Knotenannäherungsbereich (mindestens Länge des maximal zulässigen Rückstaus und der Anhaltesichtweite) ist in Geraden bzw. in sehr grosse Radien (Vielfaches der zulässigen Minimalwerte nach Norm) zu legen. Eine Knotenlage in einer Kuppe bzw. Wanne mit geringem Ausrundungsradius ist zu vermeiden. Der Fahrbahnquerschnitt ist so eng auszubilden, dass der Fahrzeuglenker durch einen überbreiten Strassenraum nicht zur Überschreitung der Höchstgeschwindigkeit verleitet wird. Breite Bankette, Nischen und leere Flächen sind im Knotenbereich zu vermeiden.
Rückstaubereich (Bereich vor dem Knoten; Länge entspricht dem maximal erwarteten Rückstau)	Für beide Knotenformen (LSA und Kleinkreisel) ist für alle Knotenzufahrten, die in den definierten Bereich eines Tunnels fallen, eine maximal zulässige Staulänge festzulegen, welcher mit einer 99 %iger Wahrscheinlichkeit im Normalbetrieb (ohne Auswirkungen von Unfällen, Pannen) nicht überschritten werden darf. Bei Ausdehnung des Rückstaus über das festgelegte Ende sind - insbesondere bei einer Stauausdehnung in den Bereich D1 - folgende Massnahmen zu ergreifen: - mehr Grün bei LSA für den betroffenen Knotenast (nicht möglich bei Kleinkreisel) - Verkehrsdosierung am Tunnelportal

Vorläufige Anforderungen an die Beleuchtung	Die Anforderungen an die Beleuchtung gelten in- und ausserhalb des Tunnels (Nachtproblem innen/ausser in den Zonen B und H). Insbesondere bei Anordnung eines Knotens in den Zonen B und H ist der Knotenbereich für die Nachtsituation ausreichend zu beleuchten (Problem der Fahrt aus dem hellen Tunnel in die dunkle Nacht). Die Beleuchtung erfolgt grundsätzlich gemäss SN 418915 (Tunnelleitsätze) 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) mindestens im Knotenannäherungsbereich um 50% zu erhöhen. Diese Anforderungen an die Beleuchtung gelten mindestens für den definierten Bereich des begrenzten Rückstauraumes und der entsprechenden Anhaltesichtweite vor dem Rückstauende. Es wird empfohlen, die Erkennbarkeit des Knotens mit einer deutlichen optischen Anordnung der Leuchten zu optimieren.
Tunnel-Belüftung	Für die Dimensionierung der Lüftungsanlage ist der maximal erwartete Rückstau zu berücksichtigen (Höferschaltung wegen erhöhten Schadstoffemissionen bei Rückstau).
Diverses	Im unmittelbaren Kreuzungsbereich sind keine Pannenbuchten, Nischen und Leerflächen vorzusehen.

1.5 Spezielle zusätzliche Anforderungen an unterirdische Knoten (Lage D2, E, F)

Tab 1.2 Spezielle Anforderungen an unterirdische Knoten

Verkehrszusammensetzung	Auf unterirdischen Knoten dürfen in der Regel keine Fussgänger und Radfahrer zugelassen werden. Ausnahmen sind nur auf untergeordneten Strassen (keine Hauptverkehrsstrassen) bei vollständig getrennter Führung vom motorisierten Verkehr und bei vollständig getrennter bzw. konfliktfreier Regelung zugelassen.
Trassierung bei LSA Knotenform bei lichtsignalgeregelten Einmündungen Vorsortierstreifen	 Die "Y-Form" hat gegenüber der "T"-Form den Vorteil einer besseren Wahrnehmung des Knotens aus allen 3 Richtungen, da jeder auf den Knoten Zufahrende gegen ein Hindernis "Wand" fährt, was ihn frühzeitig zur Verzögerung seiner Geschwindigkeit zwingt. Für die Vorsortierung (2 Vorsortierstreifen) ist eine symmetrische Knotenaufweitung nach folgender Skizze anzustreben:  1,2 Wegweisung (vgl. Tab1.5, Punkt Signalisation und Wegweisung) Diese Aufweitung ermöglicht einen frühzeitigen Blick auf die vorhandenen Vorsortierstreifen inkl. auf die diesen zugeordneten überkopf angeordneten Ampeln und Wegweisungstafeln.
lichte Höhe bei LSA	Erhöht gegenüber der Tunnelstrecke ausserhalb des Knotenbereiches wegen überkopf angeordneten Ampeln und Wegweisungstafeln. Richtwert: 5.70 m (lichte Höhe 4.70 m + Ampeln/Wegweisung 1.00 m). Überkopf angeordnete Wegweisungstafeln erlauben eine frühzeitige Wahrnehmung einer Knotensituation. Insbesondere kann damit eindeutig gezeigt werden, dass es sich nicht um Ampeln einer Tunnelsteuerungsanlage handelt, welche erfahrungsgemäss schlecht akzeptiert und häufig nicht beachtet werden.

1.6 Spezielle zusätzliche Anforderungen an Knoten ausserhalb, aber im Einflussbereich eines Tunnels (Lage B, H)

Tab 1.3 Zusätzliche Anforderungen an Knoten ausserhalb des Tunnelportales

Verkehrszusammensetzung	Auf Knoten ausserhalb der Tunnelportale sind Fussgänger und Radfahrer zugelassen. Bei Lichtsignalanlagen sind konfliktfreie Phasen vorzusehen.
--------------------------------	--

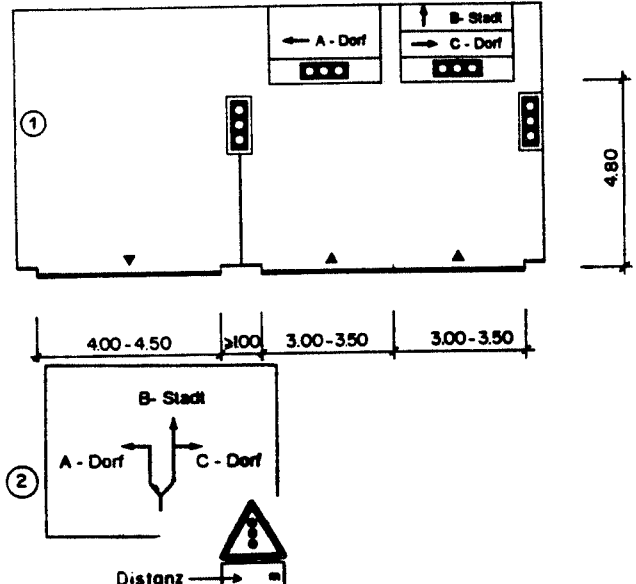
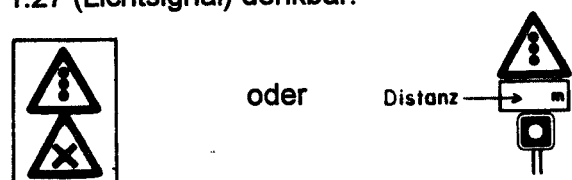
1.7 Spezielle zusätzliche Anforderungen bei Lichtsignalregelung

Tab 1.4 LSA, denkbare Lagen in bezug auf den Tunnel

Lage	Skizze	Parameter	Bemerkungen
B		$x \geq 0$	
D1		$0 < y < S_A + L_{STAU}$	Tunnelportal im Knotenan- näherungs- bereich nicht zulässig
D2, E		$y > S_A + L_{STAU}$	klar begrenz- ter und über- wachter Rück- stau
F		$x > S_A + L_{STAU}$ für Gegenrich- tung	$0 < x < S_A + L_{STAU}$ nur zulässig, falls kein Ge- genverkehr
H		$y > 0$	

Tab 1.5 Zusätzliche Anforderungen bei Lichtsignalregelung

Trassierung des Knotens Knotensichtweiten Inseln	Für LSA-Knoten dürfen die minimalen Knotensichtweiten nach SN 640 273 unterschritten werden, da eine vollständig redundante Anlage vorzusehen ist. Die Knotengeometrie ist so zu wählen, dass auf Inseln verzichtet werden kann. Ausnahme: Mittelinseln. Inseln beanspruchen unnötigerweise die Aufmerksamkeit des Fahrzeuglenkers.
Lichtsignalsteuerung	Bei einer Knotenregelung mit Lichtsignalanlage sind vollständig konfliktfreie Phasen vorzusehen. Demzufolge sind für Linksabbieger im allgemeinen separate Vorsortierstreifen anzuordnen. Die Lichtsignalanlage ist auf eine grösstmögliche Betriebssicherheit und Funktionsfähigkeit auszulegen. Dazu gehören: - Vollständige Redundanz von Stromversorgung, Verkehrsdatenerfassung, Steuergerät und Ampeln - automatische Tunnelsperrung bei Ausfall der LSA - Rückmeldung von Defekten in der Verkehrserfassung sowie Softwarefehlern in die Betriebsleitzentrale, damit Störungen raschmöglichst erkannt und behoben werden können. - Doppelfadenlampe oder Reflektoren für 2 Lampen in den roten und grünen Signalgebern. - Stauraumüberwachung mit Eingriff in die Regelung: - o "rückwärts" mittels Zufahrtsdosierung am Tunnelportal bzw. am rückliegenden Knoten und/oder - o "vorwärts" mittels Grün für die Fahrstreifen mit Rückstau und prioritärem Grün am nachfolgenden Knoten. Die Stauraumüberwachung muss sicherstellen, dass der Rückstau nicht über den definierten Bereich hinaus wächst. - Eine tunnelkapazitätsabhängige Verkehrsregelung. Damit können die Rückstaulängen möglichst gering gehalten werden, unplausible Wartezeiten werden vermieden und die Belüftung entlastet. - Wartestand Allesrot erheischt die Aufmerksamkeit der Fahrzeugführer. Dadurch erscheint bei schwachem Verkehr nirgends dauerndes Grün, an das sich die Lenker gewöhnen.

Signalgeber	Nachweis Leuchtdichte Ampel vor Inbetriebnahme (Zone F). Für die Gestaltung der Signalgeber ist die SN 640836 zu berücksichtigen (in Vorbereitung).
Signalisation und Wegweisung	Um ein optimales Erkennen des Knotens zu ermöglichen, sind die Ampeln sowohl über jedem Fahrstreifen als auch seitlich anzuordnen. Gleichzeitig sind über den Fahrstreifen Wegweisertafeln vorzusehen. Auf eine optimal erkennbare seitlich oder überkopf angeordnete Vorwegweisung (gute Sicht auf die angeleuchtete Tafel, klare Darstellung der Knoten, der Fahrstreifenaufteilung und der Ziele) ist grosses Gewicht zu legen.  1, 2 Standorte gemäss Tab. 1.2 Folgende Punkte sind zwingend erforderlich: - Ampeln überkopf und seitlich - Wegweisungsziele über jedem Fahrstreifen - Vorwegweiser mit Fahrstreifenaufteilung und Symbol "Lichtsignal" Falls die Platzverhältnisse keine Vorwegweisung zulässt, ist an dieser Stelle die Kombination der SSV Signale 3.06 (Verzweigung mit Rechtsvortritt) und 1.27 (Lichtsignal) denkbar.  oder Für die Verwendung des Signales 3.06 ist allerdings eine Anpassung der SSV erforderlich, da dieses Symbol zur Zeit nur für Kreuzungen mit Rechtsvortritt verwendet werden darf.

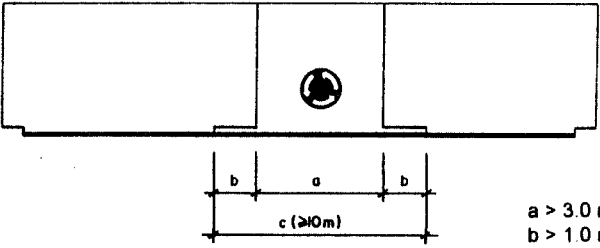
Betriebliche Ausnahmezustände	Für auftretende Betriebsstörungen werden folgende Massnahmen empfohlen:	
	Störung	Massnahme
	<i>Hindernis auf der Fahrbahn (Unfall/Panne)</i>	Verkehrsdosierung am Tunnelportal oder Tunnelsperre
	<i>Ausfall LSA</i>	Redundanz; falls die ebenfalls ausfällt: Tunnelsperre
	<i>Ausfall Beleuchtung/Panne Tunnelbeleuchtung</i>	Tunnelsperre

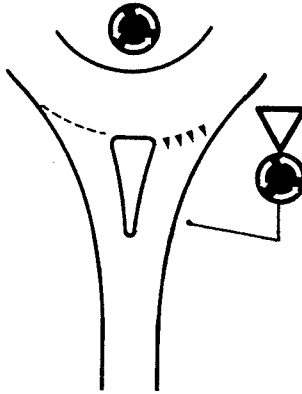
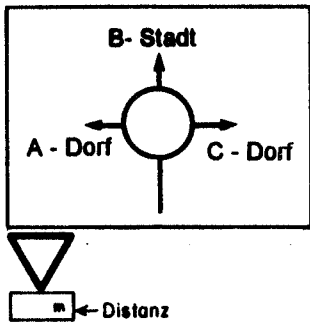
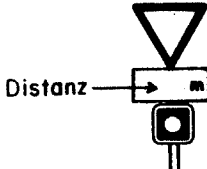
1.8 Spezielle Anforderungen bei Anordnung eines Kleinkreisels

Tab 1.6 Kleinkreisels, denkbare Lage in bezug auf den Tunnel

Lage	Skizze	Parameter	Bemerkungen
B		$x \geq 0$	Mittelinsel mit freier Durchsicht oder mit vollem Kern denkbar
D1		$0 < y < S_A + L_{STAU}$	Tunnelportal im Knotenannäherungsbereich nicht zulässig
D2, E		$y > S_A + L_{STAU}$	klar begrenzter und überwachter Rückstau voller Kern
F		$x > S_A + L_{STAU}$ für Gegenrichtung	$0 < x < S_A + L_{STAU}$ nur zulässig, falls kein Gegenverkehr voller Kern
H		$y > 0$	Mittelinsel mit freier Durchsicht oder vollem Kern denkbar

Tab 1.7 Spezielle Anforderungen bei Kleinkreisen

Trassierung Knotensichtweiten Mittelinsel	Die Form von Kleinkreisen im Bereich von Tunneln soll nach den in der heutigen Praxis verwendeten Grundsätzen für oberirdischen Kleinkreis festgelegt werden. gemäss SN 640 273 In den Bereichen D2, E und F ist eine Mittelinsel mit "vollem Kern" (ohne Durchsicht) anzuordnen (vgl. Kap. 7.7). Für den vollen Kern werden folgende Masse empfohlen:  Das minimale Mass ergibt sich aus dem optimalen Sehwinkel von 2 Grad aus der Anhaltesichtweite auf die Mittelinsel. Lösungen mit vollem Kern anstelle von Mittelinseln mit freier Durchsicht sind auch denkbar. Im Bereich B/H erfolgt die Gestaltung der Mittelinsel grundsätzlich entsprechend der heutigen Praxis für oberirdische Kleinkreis.
Vorläufige Anforderungen an die Beleuchtung	Bei Kleinkreisen ist die Mittelinsel zusätzlich so zu beleuchten, dass die mittlere Leuchtdichte der Inselwände mindestens doppelt so gross ist wie die Fahrbahn- und Wandleuchtdichte des Tunnels im Bereich der Insel.

Signalisation und Wegweisung	Folgende Punkte sind zwingend erforderlich: - Vortrittssignalisation gemäss Signalisationsverordnung - Symbol "Kreisel" auf der Mittelinsel - Vorwegweiser oder "kein Vortritt" mit Distanzangabe  Vorwegweiser  Falls die Platzverhältnisse keine Vorwegweisung zulässt, ist an dieser Stelle eine Voranzeige der Vortrittsregelung denkbar: 						
Betriebliche Ausnahmezustände	Für auftretende Betriebsstörungen werden folgende Massnahmen empfohlen: <table border="1"> <thead> <tr> <th>Störung</th><th>Massnahme</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td><i>Hindernis auf der Fahrbahn (Unfall/Panne)</i></td><td>Verkehrsdosierung am Tunnelportal oder Tunnelsperre</td></tr> <tr> <td><i>Beleuchtung/Panne Tunnelbeleuchtung</i></td><td>Tunnelsperre</td></tr> </tbody> </table>	Störung	Massnahme	<i>Hindernis auf der Fahrbahn (Unfall/Panne)</i>	Verkehrsdosierung am Tunnelportal oder Tunnelsperre	<i>Beleuchtung/Panne Tunnelbeleuchtung</i>	Tunnelsperre
Störung	Massnahme						
<i>Hindernis auf der Fahrbahn (Unfall/Panne)</i>	Verkehrsdosierung am Tunnelportal oder Tunnelsperre						
<i>Beleuchtung/Panne Tunnelbeleuchtung</i>	Tunnelsperre						

1.9 Spezialfälle

Galerien

Der Fall von Knoten in Galerien wurde nicht gesondert betrachtet.

Unter Einhaltung der Leitsätze für die Tunnelbeleuchtung haben die für Tunnel aufgestellten Anforderungen auch für Galerien ihre Gültigkeit.

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

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

Plangleiche Knoten mit Lichtsignalregelung oder mit Kreisvortritt

- Im Bereich D1 werden keine A-Niveau-Knotenpunkte zugelassen.
- A-Niveau-Knoten im Bereich von Tunneln werden auch ausserorts zugelassen, die Geschwindigkeit ist aber in jedem Fall auf 60 km/h zu beschränken.
- Für die Trassierung beträgt der Sicherheitszuschlag für die Ermittlung der Anhaltesichtweite im Staubereich des Knotens nur noch 10 statt 20 km/h.
- Fussgänger und Radfahrer im Knotenbereich werden nur innerhalb des Tunnels ausgeschlossen.
- Die Beleuchtung erfolgt grundsätzlich nach den Leitsätzen für die Tunnelbeleuchtung. Im Knotenbereich wird eine gegenüber der Norm um 50% erhöhte Beleuchtung empfohlen (vgl. Tab. 1.2).
- Auf eine Anordnung von Seitenstreifen bei Kleinkreiseln kann verzichtet werden.
- Die Ausdehnung eines Rückstaus in den Tunnel hinein ist mit Ausnahme der Ausdehnung in Zone D1 unter Einhaltung der zuvor formulierten Anforderungen zulässig.

Plangleiche Knoten mit Vortritt geradeaus

Die vorläufigen Empfehlungen aus Forschungsauftrag 18/87 werden aufrechterhalten.

1.11 Erreichung der Forschungsziele (vgl. Kap. 4)

Die für die Forschungsarbeit gesteckten Ziele konnten weitgehend erreicht werden.

Die Fragen der Wahrnehmung von vortrittsberechtigten Fahrzeugen und des Blicks in den vortrittsberechtigten Tunnel aus vortrittsbelasteter Strassen konnten im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit nicht beantwortet werden. Aufgrund der Voruntersuchungen wurde festgestellt, dass man bei diesem Fall an die Grenzen einer genügenden Wahrnehmung stösst. Deshalb wurden die verfügbaren Mittel auf die Untersuchung lösbarer Probleme beschränkt.

1.12 Fazit

Die Untersuchungen haben einerseits gezeigt, dass unter Einhaltung gewisser Bedingungen die Realisierung von Knoten im Bereich von Tunneln und Galerien mit Lichtsignalanlagen oder Kleinkreiseln vertretbar ist. Ausgenommen wird vorläufig die unmittelbare Tunnel-einfahrtszone D1, welche der Länge der Anhaltesichtweite ab Tunnelportal entspricht.

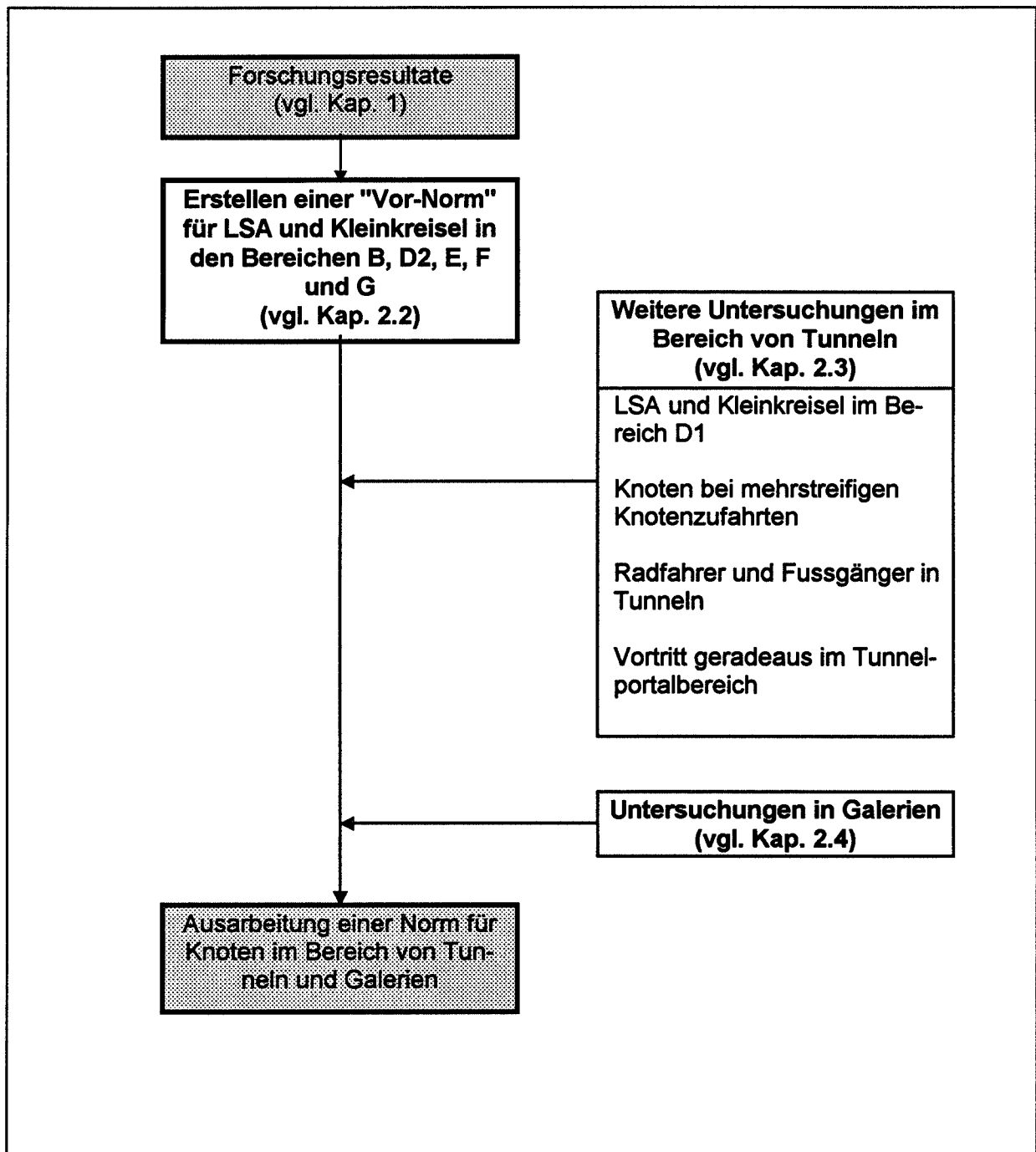
Andererseits wurde im Rahmen der Forschungsarbeiten festgestellt, dass einige Fragen offen bleiben. So zum Beispiel die Frage der Fussgänger und Velofahrer bei Knoten im Tunnel oder insbesondere im Portalbereich eine Knotenregelung mit Vortritt geradeaus. Zur Lösung dieser und weiterer Fragen sind folglich weitergehende Untersuchungen erforderlich.

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 Lichtsignalanlagen, Kleinkreisel in den Bereichen B, D2, E, (F) und G

Aufgrund der vorliegenden Resultate empfehlen wir folgendes weitere Vorgehen:

1. Die in Kap. 1 formulierten Anforderungen sind ab sofort bei Planung und Realisierung von Knoten und Galerien im Bereich von Tunneln zu berücksichtigen.
2. Für die Planung erster solcher Knoten ist auf der Basis dieser Anforderungen eine "Vornorm" zu erstellen. Diese hat Gültigkeit, bis die endgültige Norm vorliegt.
3. Erste gebaute Knoten sind ab Inbetriebnahme bezüglich Verkehrsablauf, Unfallgeschehen und Fehlverhalten zu überwachen und auszutesten. Aufgrund erster ausgewerteter Untersuchungen müssen die vorliegenden Anforderungen allenfalls überarbeitet werden.
4. Die aufgrund erster Betriebserfahrungen überarbeiten Anforderungen können im Anschluss in eine definitive Norm über Lichtsignalanlagen und Kleinkreisel im Bereich von Tunneln und Galerien überführt werden.
5. Die vorläufigen Anforderungen an die Tunnelbeleuchtung 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 stellt. 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.

2.3 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. Lichtsignalanlagen und Kleinkreisel im Bereich D1

Nebst Knoten direkt ausserhalb bzw. am Tunnelportal (Bereich B) sind Knoten unmittelbar nach dem Portal (Bereich D1) für die Praktiker sowohl verkehrs- als auch bautechnisch von grossem Interesse. Eine definitive Aussage zu der Machbarkeit einer Knotenlage im Bereich D1 kann nur gewonnen werden, indem für die Tunneleinfahrtszone eine weitergehende Simulationsanlage aufgebaut wird, mit welcher die Leuchtdichte (inkl. Schleierleuchtdichte) vor und im Tunnel und die Kontraste möglicher Hindernisse (Stau, Knoten, Signalisation usw.) flexibel variiert werden können.

B. Radfahrer und Fussgänger in Tunneln

Ob Radfahrer und Fussgänger bei Knoten im Bereich E allenfalls zugelassen werden sollen, könnte mit folgenden Untersuchungen geprüft werden:

- Analyse von bereits bestehenden Knoten im Bereich B/H (Unfallanalysen, Verkehrsverhalten, auftretende Probleme usw.) bei Kurztunneln und Unterführungen.
- Analyse von Kurztunneln und Unterführungen mit Fussgänger- und Velo-Längsverkehr
- Laborversuche mit entsprechender Anlage gemäss Punkt A (Kontraste Tunnelumgebung - Radfahrer/Fussgänger)

C. Vortritt geradeaus im Tunnelportalbereich

Im Bereich von Tunnelportalen stellt sich die Frage, ob bei denkbaren Knoten mit geringem Verkehr auf eine aufwendige Betriebsform wie Lichtsignalanlage und Kleinkreisel verzichtet werden kann. Von besonderem Interesse ist hier die Frage nach der notwendigen Sicht des vortrittsbelasteten Verkehrs in den Tunnel hinein.

Für diesen Fall empfehlen wir die Durchführung eines entsprechenden Feldversuches mit folgendem stufenweisen Vorgehen:

- Erhebung der Sichtweite in den Tunnel hinein in Abhängigkeit der Wartezeit an der Kreuzung und des Abstandes zum Tunnelportal mit Versuchspersonen
- Abschätzung der Zeitlücken (Entscheid über Einmündung ja/nein) mit Versuchspersonen
- Bei positiven Resultaten aus 1 und 2: Versuch mit Testpersonen mit echtem Einmünden
- Versuch mit "Echtbetrieb"

D. Mehrstreifige Knotenzufahrten

Insbesondere auf städtischen Hauptverkehrsstrassen stellt sich die Frage, ob im Bereich von Knoten in Tunneln mehrstreifige Knotenzufahrten ermöglicht werden können.

Für diesen Fall muss insbesondere der Fahrstreifenwechsel in Zone D1 detailliert untersucht werden.

2.4 Knoten in Galerien

Um abzuklären, inwieweit die zuvor festgelegten Anforderungen für A-Niveau-Knoten in Galerien gelockert werden können, empfehlen wir folgendes Vorgehen:

1. Durchführung von Leuchtdichte- und Kontrastmessungen in bestehenden Galerien
2. Feststellen von Abweichungen zu den bereits vorhandenen entsprechenden Messungen in Tunneln
3. Bei im Vergleich zu Tunneln besseren Resultaten: Durchführung von Laborversuchen und je nach Resultat allenfalls Lockerung der Anforderungen

HINTERGRÜNDE UND DETAILLIERTE RESULTATE

3. EINLEITUNG

3.1 Ausgangslage

Strassenknoten im Bereich von Tunneln und Galerien erlauben Linienführungen und Anschlusskonzepte, welche sowohl den Forderungen nach unterirdischer Strassenführung wie auch nach genügender Anschlussdichte Rechnung tragen.

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

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

Speziell in städtischen Verhältnissen wird der Druck auf die Praxis bzw. die zuständigen Behörden zur Realisierung unterirdischer Kreuzungen und Einmündungen immer grösser.

Im VSS Forschungsbericht Nr. 187 zum Forschungsauftrag 18/87 "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 Voraussetzungen bezüglich

- A-Niveau-Knotenpunkte in Tunneln und Galerien sowie
- A-Niveau-Knotenpunkte ausserhalb, aber im Einflussbereich des Portales von Tunneln und Galerien

vor allem auch unter Beachtung der Wahrnehmungsprobleme näher zu untersuchen.

Aus folgenden Gründen wurde ursprünglich eine getrennte Behandlung dieser beiden Fragestellungen festgelegt:

- Bei Knoten ausserhalb von Tunneln spielt die Sicht in den Tunnel hinein für vorfahrtsbelastete Fahrzeuge eine wesentliche Rolle. Bei Knoten im Tunnel entfällt dieser Aspekt.
- Der Nachtbetrieb (Tunnel hell - aussen dunkel) stellt besondere Probleme dar.
- Für Knoten ausserhalb des Tunnels wurde eine raschere Normierung als nützlich erachtet.

Aufgrund dieser Betrachtung wurde die Bearbeitung zweier getrennter Forschungsaufträge festgelegt.

Im Verlaufe der Bearbeitung zeigte es sich jedoch, dass Knoten ausserhalb des Portales und solche im Tunnel nicht strikte getrennt behandelt werden konnten. Die Übergänge sind fliegend. Methodik und Vorgehen im Forschungsablauf waren ähnlich.

Deshalb sind die Untersuchungsergebnisse beider Forschungsaufträge in einem einzigen Bericht zusammengefasst.

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 Knotenpunkte im Bereich von Tunneln und Galerien formuliert.

Die im Rahmen jenes Forschungsauftrages durchgeführten Arbeiten lassen die grundsätzliche Folgerung zu, dass Knotenpunkte im Bereich von Tunneln unter Berücksichtigung der formulierten Empfehlungen und Voraussetzungen und bei sorgfältiger Projektierung verkehrssicher ausgestaltbar sind. Unterirdische A-Niveau-Knotenpunkte wurden als lichtsignalgeregelte Knoten oder als Kleinkreislauf erlaubt, wobei besondere Bedingungen unter anderem in Bezug auf die Lage, das Geschwindigkeitsniveau, die Beleuchtung, die Sichtverhältnisse und die Verkehrssteuerung zu berücksichtigen sind.

Gleichzeitig hat sich aber gezeigt, dass mit zusätzlichen Untersuchungen zahlreiche Wissenslücken zu schliessen sind, damit eine erhöhte Sicherheit in der Beurteilung kritischer Knotenpunkte 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 dieser weiteren 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 A-Niveau-Knotenpunkten ausserhalb des Portales sowie in Tunneln und Galerien erlaubt.

Die Problematik der Wahrnehmung von Knoten im Bereich von Tunneln war anhand von Laborversuchen und anhand von für die Grundlagenbeschaffung allenfalls erforderlichen Feldversuchen 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, 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, Bern, mit folgenden Mitarbeitern:

- R. Lanz, dipl. Ing. ETH
- W. Schaufelberger, dipl. Ing. ETH
- F. Marino, Verkehrstechniker

zuständig für Gesamtkoordination und Fachbereiche Strassenbau, Verkehrstechnik

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

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

zuständig für Fachbereich visuelle Wahrnehmung / Laborversuche

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

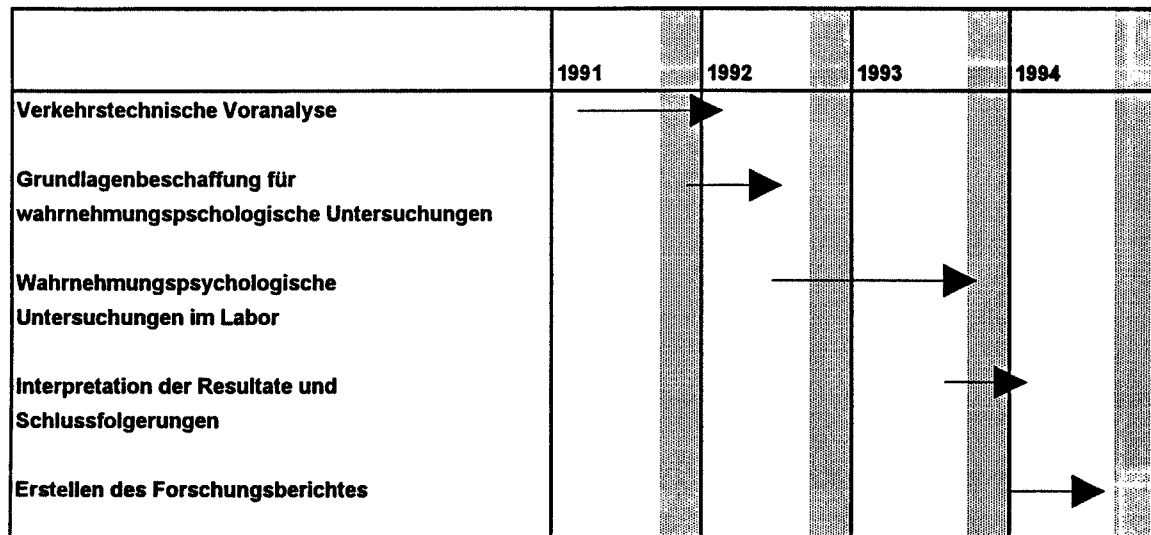
Bei der Zusammensetzung der Subkommission und der Forschungsstelle wurde grosses Gewicht auf eine gute Ausgewogenheit gelegt:

- 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 festgelegte Vorgehen festgelegt.

Abb 3.1 Projektablauf



4. ZIELSETZUNGEN

Mit der Forschungsarbeit sollten folgende Ziele erreicht werden:

- Aussage, ob und allenfalls unter welchen Bedingungen im Einflussbereich von Tunneln und Galerien zukünftig A-Niveau-Knotenpunkte realisiert werden können
- Überprüfung und Konkretisierung der im Forschungsauftrag 18/87 formulierten vorläufigen Empfehlungen
- Die Resultate sollten in erster Linie durch Feld- und Laborversuche und weniger durch theoretische Betrachtungen gewonnen werden
- Erstellen eines ersten Hilfsmittels für Praktiker, welches die Beurteilung der Machbarkeit solcher Knotenpunkte erlaubt und als Grundlage für die Projektierung gelten soll
- Schaffen einer Grundlage für eine "Vor-Norm", welche die Realisierung und den Test erster Knoten 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 waren insbesondere A-Niveau-Knoten 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 unter den besonderen Bedingungen von Knotenpunkten im Einflussbereich von Tunneln und Galerien 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 Labor- und Feldversuchen
Hier stand die Behandlung folgender Fragen im Vordergrund:
 - Erkennen von Rückstau vor dem Knoten
 - Erkennen und Begreifen des Knotens
 - Wahrnehmung von vortrittsberechtigten Fahrzeugen
 - Blick in den vortrittsberechtigten Tunnel aus vorfahrtsbelasteter Strasse
- Festlegen von Kriterien für eine genügende Wahrnehmung bzw. Verkehrssicherheit
- Beurteilung der grundsätzlichen Machbarkeit von A-Niveau-Knoten im Bereich von Tunneln
- Aussage, wo und unter welchen Bedingungen im Bereich von Tunneln A-Niveau-Knoten angeordnet werden können
- Formulierung von konkreten Anforderungen bezüglich Knotengeometrie, Ausrüstung und Betrieb für die Machbarkeit von unterirdischen Knoten
- Aussagen zu konventionellen A-Niveau-Knotenpunkten mit/ohne Lichtsignalanlage und zu Kleinkreiseln

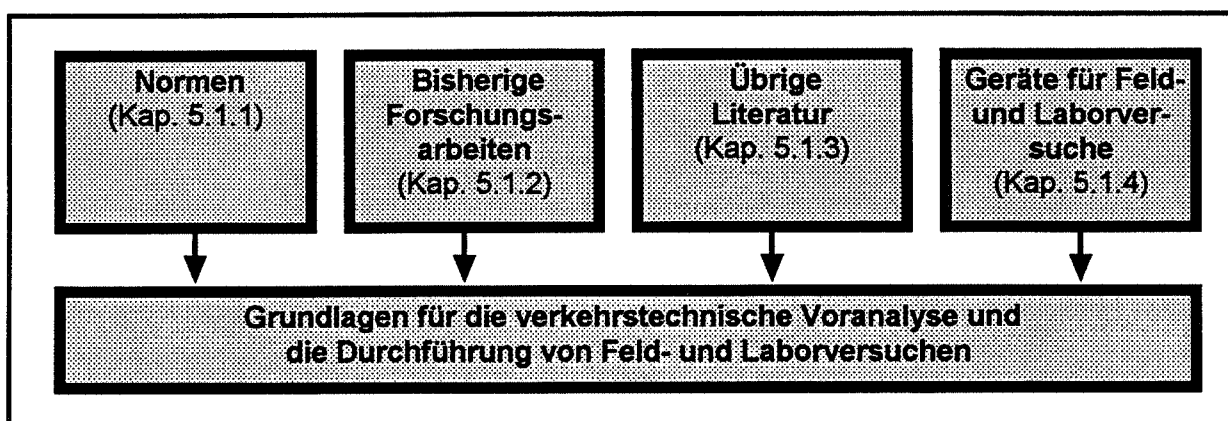
5. GRUNDLAGEN, RANDBEDINGUNGEN, VORENTSCHEIDE

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.

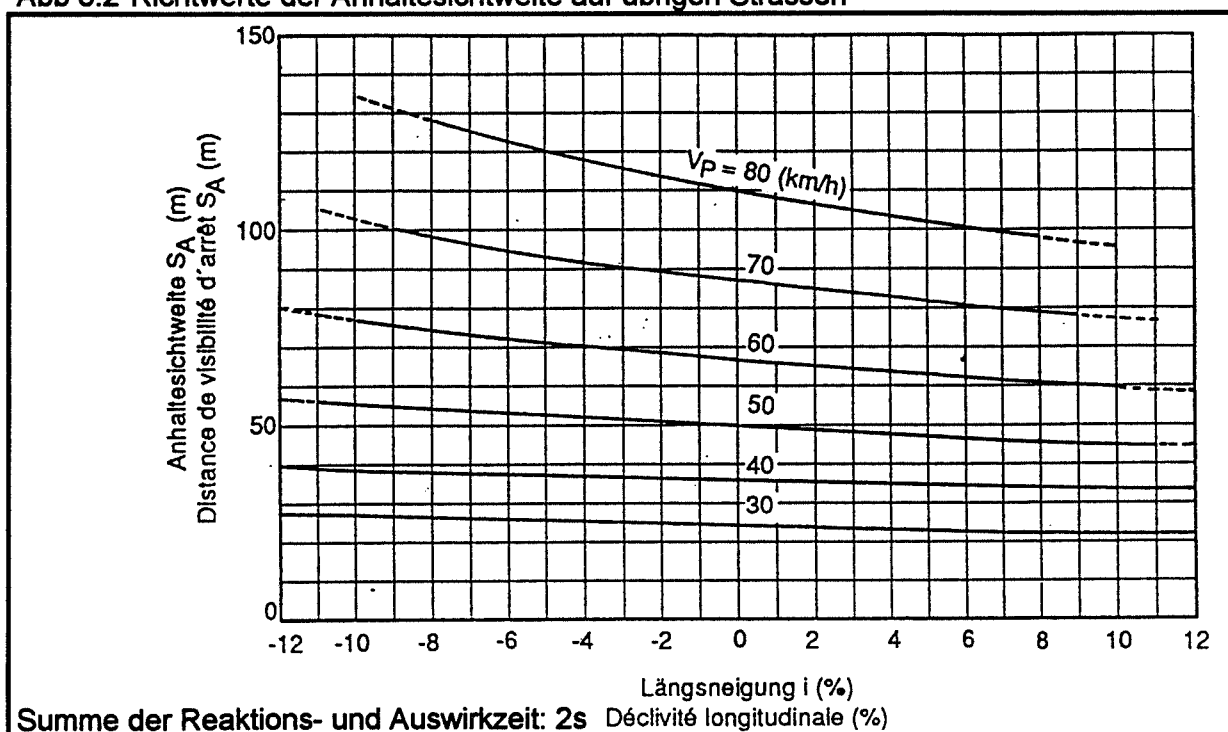
Abb 5.1 Die wichtigsten Grundlagen



5.1.1 Normen

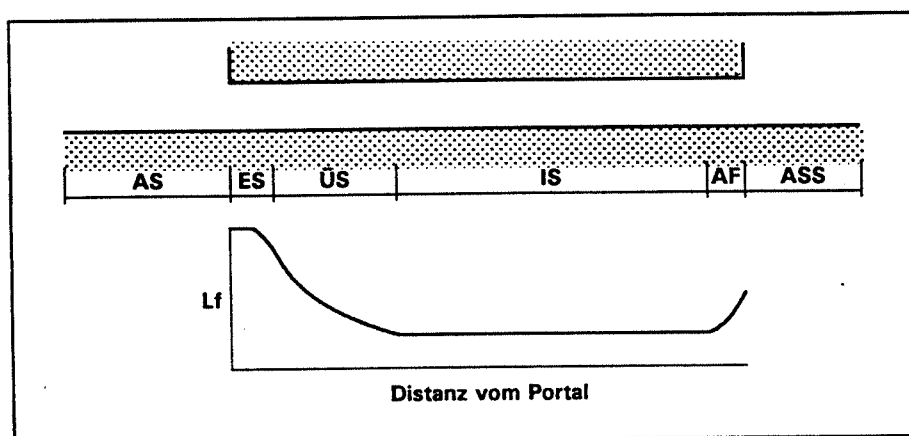
SN 640 090 a, Sichtweiten. 04/92, VSS-Norm

Abb 5.2 Richtwerte der Anhaltesichtweite auf übrigen Strassen



SN 640 273, Knoten, Sichtverhältnisse, 18.6.92, VSS-Norm**Tab 5.1 Minimale Knotensichtweiten auf Strassen mit Gemischtverkehr**

	Massgebende Knotenzufahrtsgeschwindigkeit des vortrittsberechtig- ten Motorfahrzeugstromes						
	20 km/h	30 km /h	40 km /h	50 km /h	60 km /h	70 km /h	80 km /h
Knotensichtweite A (m)	10..20	20..35	35..50	50..70	70..90	90..110	120..140

SN 418915, Öffentliche Beleuchtung, Strassentunnels, -galerien und -unterführungen, 3.6.92, Norm SEV, Leitsätze SLG**Abb 5.3 Tunnelbeleuchtung: Streckenübersicht und Definitionen**

Streckenübersicht. AS: Annäherungsstrecke, ES: Einfahrtstrecke, ÜS: Übergangsstrecke, IS: Innenstrecke, AF: Ausfahrtstrecke, ASS: Anschlussstrecke

Tab 5.2 Notwendige k-Werte zur Erzielung der Leuchtdichte der Einfahrtsstrecke L_{fe}

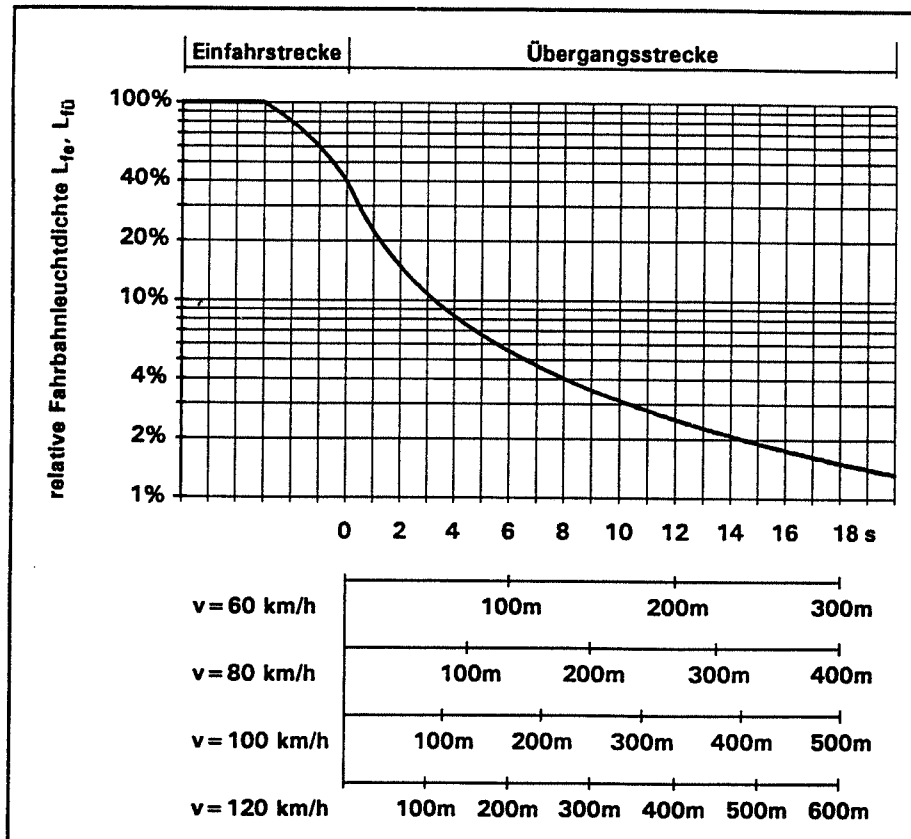
Die mittlere Leuchtdichte der Einfahrtsstrecke L_{fe} soll mindestens den durch die folgende Gleichung gegebenen Wert aufweisen:

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

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 5.4 Zeitlicher Verlauf der Leuchtdichten der Einfahrts- und Übergangsstrecke



Tab 5.3 Mittlere Leuchtdichten der Innenstrecke Lfl (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 5.4 Mittlere Leuchtdichten der Innenstrecke Lfl (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 Forschungsauftrag 18/87 "Voraussetzungen für Strassenknoten in Tunneln und Galerien", Mai 1990; wichtigste Forschungsergebnisse

Vorläufige Empfehlungen für plangleiche Knoten mit Lichtsignalregelung:

- Plangleiche Knoten im Bereich von Tunneln und Galerien mit Lichtsignalanlage können vorläufig bei Berücksichtigung der allgemeinen Anforderungen und der nachfolgenden Empfehlungen zugelassen werden. Anlagen im Adaptationsbereich sowie Einzelanlagen sind dabei besonders sorgfältig zu konzipieren, insbesondere bezüglich Erkennbarkeit der Signale
- nur im innerörtlichen Bereich
- auf höchstens 60 km/h beschränkte Geschwindigkeit
- pro Fahrtrichtung ausserhalb des Knotens nur 1 Fahrstreifen
- Trassierung und Anhaltesichtweiten im Knotenannäherungsbereich für eine um 20 km/h höhere als die signalisierte Geschwindigkeit
- für unterirdische Knotenpunkte: Konfliktfreie Freigabe der einzelnen Verkehrsströme; kein Gelbblinken
- Ausschluss der Radfahrer; mindestens jedoch keine Radfahrer in den unterirdischen Stauräumen für Motorfahrzeuge
- gute und frühzeitige Erkennbarkeit der Signale; gut unterscheidbar von der Beleuchtung

- Bei Knotenpunkten im Bereich der Durchgangsbeleuchtung ist eine auf 10 cd/m² erhöhte Beleuchtungsstärke vorzusehen und zwar mit Vor- und Nachlauf einer 3 Sekunden Fahrzeit entsprechenden Strecke
- Regeltechnische Sicherung, dass der Stau nicht den vorgesehenen Stauraum überschreitet
- Redundanz in der Lichtsignalanlage und der Stromversorgung, so dass der Normalbetrieb auch bei Störungen gewährleistet ist, mindestens bis die kritischen Zufahrten zu Knoten gesperrt und geräumt sind

Vorläufige Empfehlungen für plangleiche Knoten ohne Lichtsignalanlage

- Die Anlage unterirdischer plangleicher Knotenpunkte ohne Lichtsignalanlage kommt vorläufig nicht in Frage, ausser bei Parkgaragen und parkgaragen-ähnlichen Verhältnissen mit ihrem geringen Geschwindigkeitsniveau und entsprechender baulicher Gestaltung
- Knoten ohne Lichtsignalanlage ausserhalb von Tunneln und Galerien sind unter folgenden Voraussetzungen denkbar:
 - kein Rückstau im Tunnel durch genügende Leistungsreserve bzw. Dosierung der Zufahrt vor dem Tunnelportal für vortrittsbelastete Verkehrsströme
 - Sichtdreiecke vollständig ausserhalb des Tunnels

Vorläufige Empfehlungen für Kleinkreisel

- Rückstau nur im unmittelbaren Knotenbereich durch Vorsehen grosser Leistungsreserven bzw. Dosierung der Zufahrt oder durch Sicherung des Stauraumes analog den Bedingungen für Knotenpunkte mit Lichtsignalanlagen
- Weitere Bedingungen analog Knoten mit Lichtsignalanlage
- In der Mittelinsel kann unter Berücksichtigung der notwendigen Sichtweiten ein geschlossener Kern bis zur Decke geführt werden
- Sorgfältige geometrische Ausgestaltung insbesondere in den Ausfahrtsbereichen mehrstreifiger Kreisel zur Vermeidung von Streifkollisionen
- Anordnung von Seitenstreifen zur Sicherstellung einer reduzierten Kapazität bei leichten Unfällen

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 Knotenströmen
 - Unterscheidung von Fahrzeugtypen
 - Erkennen von Verkehrsstörungen / kritischen Situationen
 - Erfassung des Anteils nicht eingeschalteter Fahrzeug-Lichter

Wahrnehmungspsychologische Untersuchungen

(Capcalc, Laborversuchsanlage usw. vgl. Kap. 8 bis 10, Anhang 1)

5.2 Randbedingungen und Abgrenzungen

Im Forschungsauftrag 13/90 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 (Abb. 1.1):

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

5.3 Wichtige Vorentscheide

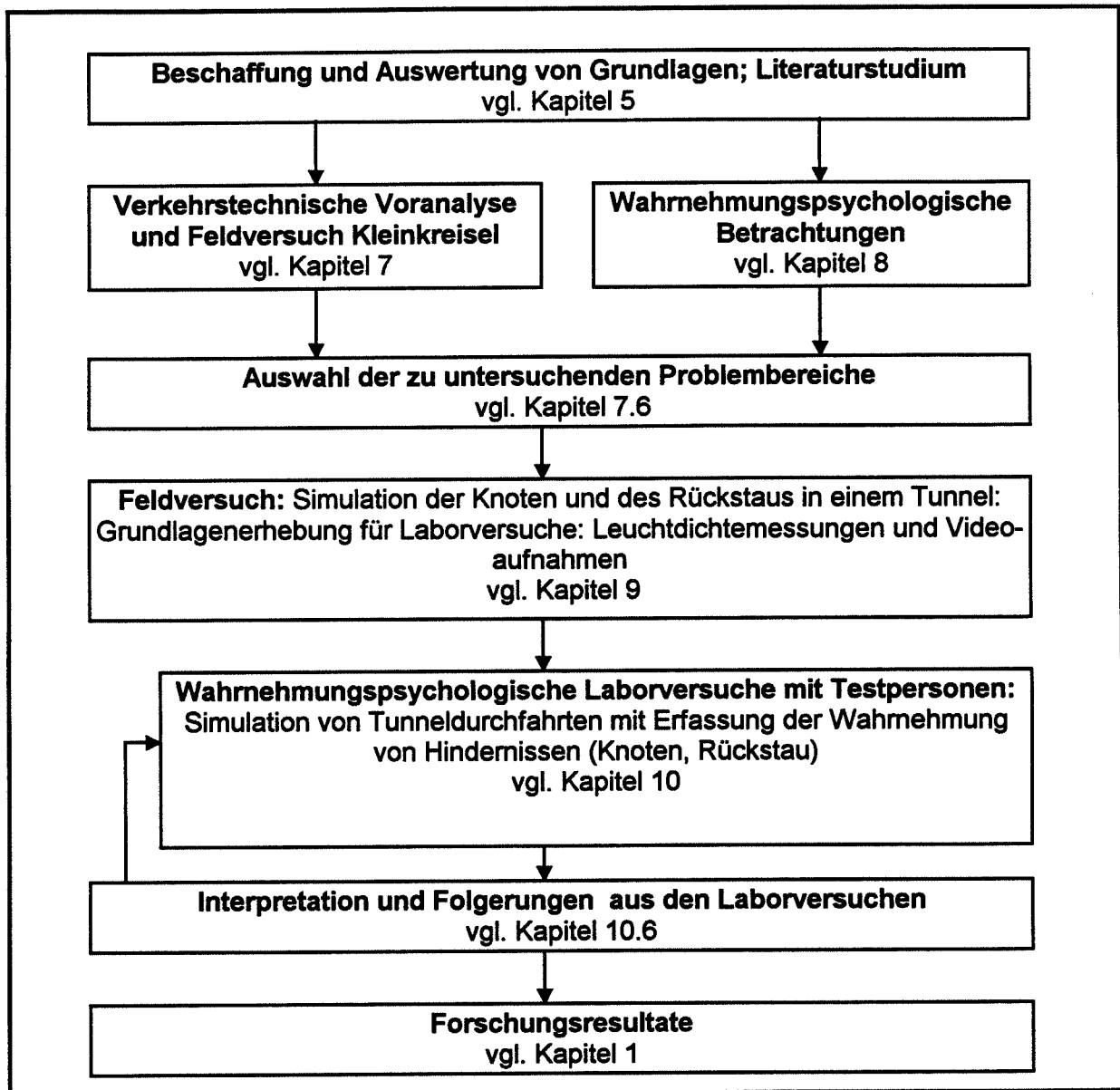
Im Verlaufe der Bearbeitung wurden durch die Begleitkommission (VSS Subkommission 172.20) folgende wichtigen Vorentscheide gefällt:

1. Nach Abschluss der verkehrstechnischen Voranalyse (vgl. Kap. 7) wurden die weiteren Untersuchungen auf die 3 Schwerpunkte Knotenpunkte mit Lichtsignalregelung, Kleinkreisel und Rückstau eingeschränkt. Diese 3 Fälle decken die dringendsten Anliegen aus der Praxis ab. Weitergehende Untersuchungen konnten aufgrund des gesteckten zeitlichen und finanziellen Rahmens nicht durchgeführt werden.
2. Nach Vorliegen der Resultate aus dem Versuch Kleinkreisel Steffisburg (vgl. Kap. 5.7) wurde im Tunnelinnern auf weitere Laborversuche für Kleinkreisel mit freier Durchsicht über die Mittelinsel verzichtet.

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 A-Niveau-Knotenpunkten im Einflussbereich von Tunneln entstehen können, erkannt und systematisiert werden. Aufgrund einer Gewichtung dieser Problembereiche waren die nachfolgenden Untersuchungen abzugrenzen und auf die wesentlichsten und realistischsten Punkte zu reduzieren.

7.2 Einflussfaktoren

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

- (1) Lage des Knotens in bezug auf den Tunnel
- (2) Geometrie des Tunnels
- (3) signalisierte Höchstgeschwindigkeit
- (4) Knotenform
- (5) Betrieb des Knotens
- (6) Verkehrsbeziehungen
- (7) Verkehrszusammensetzung
- (8) 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.

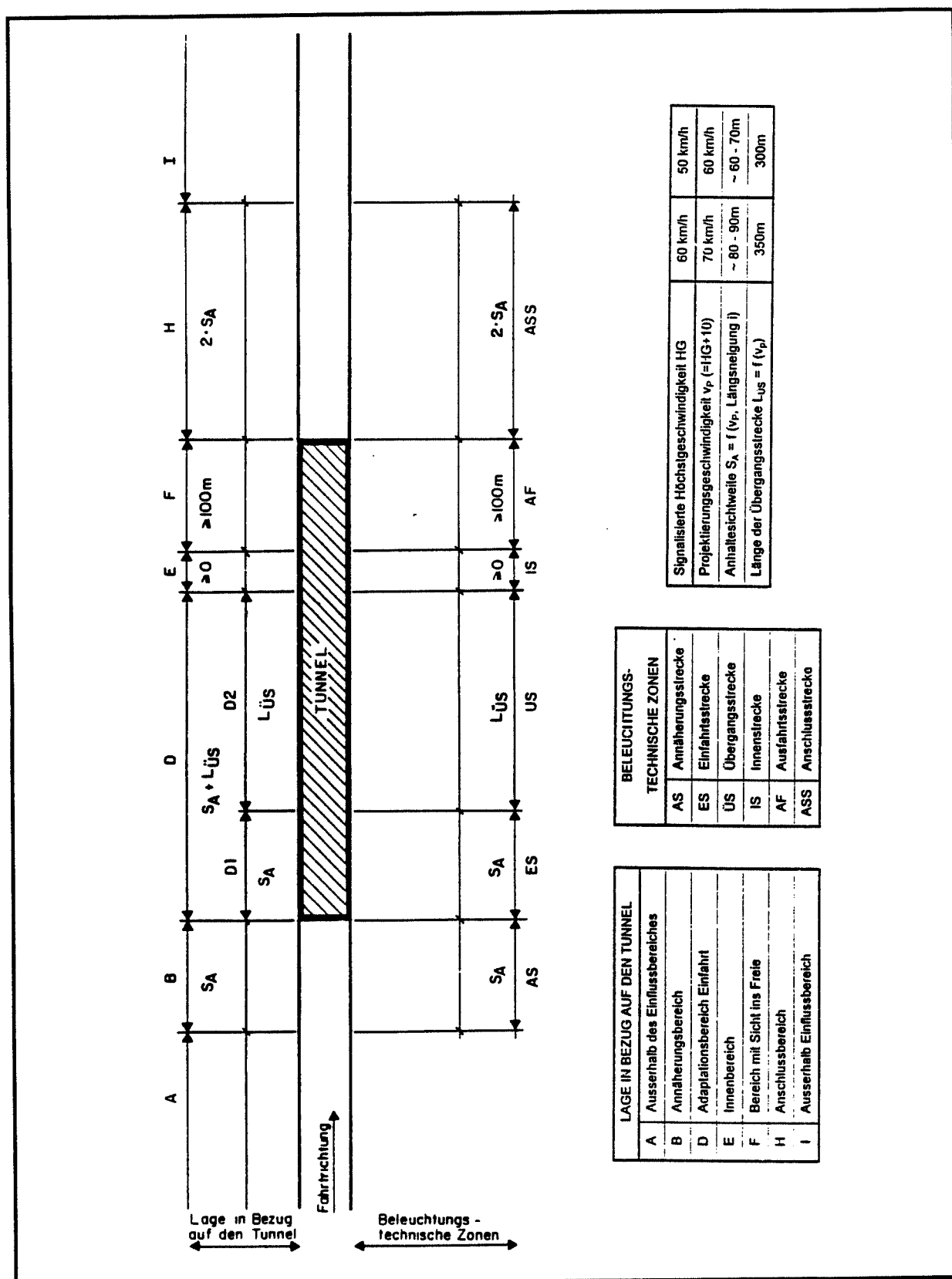
Aufgrund dieser Problematik wurde der Tunnel in verschiedene Bereiche unterteilt (Abb. 7.1).

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

Auf die Darstellung der ursprünglich ebenfalls definierten Bereiche C (Bereich ausserhalb des Einfahrtsportales mit Knoten-Sichtdreieck in den Tunnel hinein) und G (Bereich ausserhalb des Ausfahrtsportales mit Knoten-Sichtdreieck in den Tunnel hinein) wurde verzichtet, da diese nur für den nicht weiter untersuchten Fall eines Knotens mit Vortritt geradeaus von Bedeutung sind.

Die einzelnen Knotenname können sich in unterschiedlicher Lage in bezug auf den Tunnel befinden. Für einzelne Knotenbetriebsformen sind die entsprechend möglichen Kombinationen zu berücksichtigen.

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 auf die rechtzeitige Wahrnehmung eines unterirdischen Knotens. Insbesondere drängen sich folgende Fragen auf:

- Kann die Trassierung (horizontale und vertikale Radien) eines Tunnels mit unterirdischem Knoten, zwecks rechtzeitiger Ermöglichung der Wahrnehmung der Knotensituation, 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 Knotensituation eine restriktivere Anforderung an die maximal zulässige Höchstgeschwindigkeit gestellt werden soll, z.B. eine Beschränkung auf maximal 50 oder 60 km/h (inner- und ausserorts).

(4) Knotenform

Es gilt, die beiden Knotenformen "Kreuzung" (vierarmiger Knoten) und "Einmündung" (dreiarmer Knoten) zu betrachten. Bei einer "Einmündung" gilt es zu beachten, dass - in Hauptfahrtrichtung gesehen - die Fahrzeuge entweder von links oder von rechts einmünden können.

(5) Betrieb des Knotens

Für einen Knoten sind folgende Betriebsarten denkbar:

- Lichtsignalregelung, wobei es zwischen konfliktträchtigen und konfliktfreien Lösungen zu unterscheiden gilt
- Regelung mit Kreisvortritt
- geregelter Vortritt geradeaus
- geregelter Vortritt abgekröpft (Links- bzw. Rechtsabbieger haben Vortritt)
- Rechtsvortritt

Muss oder soll bei der Gestaltung von Knoten im Tunnelbereich auf Betriebsformen, welche kaum der Erwartungshaltung eines Automobilisten entsprechen und schlecht erkennbar sind, verzichtet werden?

(6) Verkehrsbeziehungen

In Abhängigkeit der Betriebsform eines Knotens können folgende Verkehrsbeziehungen auftreten:

- geradeaus vortrittsberechtigt
- geradeaus vortrittsbelastet
- Linksabbieger vortrittsberechtigt
- Linksabbieger vortrittsbelastet
- Rechtsabbieger vortrittsberechtigt
- Rechtsabbieger vortrittsbelastet

Die Wahrnehmungsverhältnisse können an einem Knoten für einzelne Verkehrsbeziehungen unterschiedlich sein (Blick vom Hellen ins Dunkle bzw. umgekehrt, konstante Lichtverhältnisse: hell oder dunkel).

(8) Verkehrszusammensetzung

Betreffend Verkehrszusammensetzung sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- ortskundige und ortsunkundige Fahrer
- Schwerverkehrsanteil
- zugelassene Verkehrsarten wie motorisierter Verkehr, Velos, Fussgänger

Sind Radfahrer und Fussgänger bei unterirdischen Knoten genügend wahrnehmbar?
Wie wirkt sich die fehlende Sicht hinter einem Lastwagen auf die Erkennung und Wahrnehmung eines Knotens aus?

(9) Beleuchtung

Folgende Problembereiche müssen näher betrachtet werden:

- Tunnelbeleuchtung im Knoten-Annäherungsbereich
- Beleuchtung im Knotenbereich
- Ungenügende Fahrzeugbeleuchtung (zu spät oder gar nicht eingeschaltete bzw. zu früh wieder ausgeschaltete Fahrzeuglichter)

Kann die Wahrnehmung im Übergangsbereich hell-dunkel mit erhöhter Beleuchtung verbessert werden?

Sind für das Erkennen von Rückstau Fahrzeuge ohne oder mit Licht massgebend?

7.3 Erkennbarkeit und Wahrnehmung eines Knotens

Für die Erkennbarkeit und Begreifbarkeit eines Knotens im Tunnelbereich müssen folgende Punkte erfüllt sein:

- a) Erkennen des Knotens
- b) Erkennen der Vortrittsregelung
- c) Erkennen von Rückstau
- d) Erkennen von vortrittsberechtigten Motorfahrzeugen
- e) Erkennen von querenden Fussgängern
- f) Erkennen von vortrittsberechtigten Radfahrern
- g) Abschätzen von Zeitlücken, Distanzen und Geschwindigkeiten von vortrittsberechtigten Fahrzeugen
- h) Erkennen von Fehlverhalten (nicht vortrittsberechtigte Fahrzeuge)
- i) Beeinträchtigung der Einstellung auf die Tunneleinfahrt durch Konzentration auf den davorliegenden Knoten

Ob bei der Zufahrt auf den Knoten und beim Befahren des Knotens 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)
- Blendung durch entgegenkommende und einmündende Fahrzeuge
- Erwartungshaltung des Fahrzeuglenkers (unterirdische Knoten werden heute nicht erwartet, da sie praktisch nicht vorkommen)
- Geometrie (genügende Sichtweiten)

7.4 Typisierung der Knoten

Aufgrund der Lage des Knotens im Tunnel, der Knotenform und der Betriebsart können die Knoten typisiert werden. Folgende Einflussgrößen wurden berücksichtigt:

Tab 7.1 Lage des Knotens im Tunnel

Lage 1. Arm	Lage 2. Knotenarm				
	A	B	C	D	E
A		AB	AC		
B	AB	BB	BC		
C	AC	BC	CC		
D				DD	DE
E				DE	EE

Knotenform

- Kreuzung
- Einmündung rechts
- Einmündung links

Betrieb des Knotens

- Lichtsignalanlage, konfliktfrei geregelt
- Kleinkreisel
- Vortritt geradeaus
- Rechtsvortritt

Der Fall "Vortritt abgekröpft" wurde nicht berücksichtigt, da eine solche Knotenform aus Sicherheitsgründen vermieden werden sollte und heute auch oberirdisch nur in Ausnahmesituationen realisiert wird.

Die Liste der typisierten Knoten ist in Anhang 2 dargestellt.

7.5 Problembereiche

Anhand dieser Knoten-Typisierung kann festgestellt werden, dass sich die zu erwartenden Probleme in folgende Bereiche zusammenfassen lassen:

Lichtsignalgeregelter Knoten mit konfliktfreien Verkehrsströmen

- Erkennen des Knotens in allen Tunnellagen, insbesondere Bereich D/F
- Erkennen der Vortrittsregelung/Lichtsignalregelung in allen Tunnellagen, insbesondere Bereich D/F
- Erkennen von Rückstau in allen Tunnellagen, insbesondere Bereich D/F wegen Schleierleuchtdichte und Adaptation

Kleinkreisel

- Erkennen des Knotens in allen Tunnellagen, insbesondere Bereich D/F
- Erkennen von Rückstau, insbesondere Bereich D/F wegen Schleierleuchtdichte und Adaptation
- Erkennen vortrittsberechtigter Fahrzeuge im Kreis
- Erkennen querender Fussgänger auf den Kreislaufzufahrten
- Erkennen vortrittsberechtigter Radfahrer im Kreis
- Abschätzen von Zeitlücken, Distanzen, Geschwindigkeiten im Kreis
- Erkennen von Fehlverhalten

Knoten mit geregelter Vortritt geradeaus

- Erkennen des Knotens
- Erkennen der Vortrittsregelung
- Erkennen von Rückstau
- Erkennen vortrittsberechtigter Fahrzeuge für nichtvortrittsberechtigten Verkehrsbeziehungen
- Erkennen querender Fussgänger
- Erkennen vortrittsberechtigter Radfahrer
- Abschätzen von Zeitlücken, Distanzen, Geschwindigkeiten
- Erkennen von Fehlverhalten

Knoten mit Rechtsvortritt

- Erkennen des Knotens
- Erkennen der Vortrittsregelung
- Erkennen von Rückstau
- Erkennen vortrittsberechtigter Fahrzeuge für nichtvortrittsberechtigte Verkehrsbeziehungen
- Erkennen querender Fussgänger
- Erkennen vortrittsberechtigter Radfahrer
- Abschätzen von Zeitlücken, Distanzen, Geschwindigkeiten
- Erkennen von Fehlverhalten

7.6 Abgrenzung der Untersuchungen

Im Verlaufe der Arbeiten zeigte es sich, dass die Untersuchung aller Problembereiche und dabei insbesondere die Durchführung von entsprechenden Laboruntersuchungen in allen zuvor typisierten Knoten im zeitlich und finanziell vorgegebenen Rahmen zu aufwendig wird. Folglich mussten die weiteren Untersuchungen auf die wesentlichsten Problembereiche beschränkt werden. Ausschlaggebend für die Auswahl waren in erster Linie die Bedeutung des Problems und die Chancen auf einen Erfolg der entsprechenden Untersuchung.

Aufgrund dieser verkehrstechnischen Voranalyse wurde die weitere Untersuchung auf die folgenden wichtigsten Problembereiche konzentriert:

- Wahrnehmung eines lichtsignalgeregelten Knotens
- Wahrnehmung eines Kleinkreisels mit freier Durchsicht über die Mittelinsel
- Wahrnehmung eines Kleinkreisels mit "vollem Kern"
- Wahrnehmung von Rückstau im Knotenbereich

7.7 Feldversuch Kleinkreisel

7.7.1 Einleitung und Zielsetzung

Im Verlaufe der Untersuchungen zur Wahrnehmung von unterirdischen Kleinkreisen stellte sich die Frage, ob ein Kleinkreis mit vollem Kern (Mittelinsel) oder mit freier Durchsicht mehr Vorteile bietet. Für einen vollen Kern sprachen konstruktive Gründe und die bessere Wahrnehmbarkeit (Zufahrt auf eine Wand). Da praktisch alle in der Schweiz realisierten Kleinkreise eine Mittelinsel mit freier Durchsicht aufweisen, waren aber die Auswirkungen auf den Verkehrsablauf allein aufgrund von theoretischen Betrachtungen nicht abschätzbar. Insbesondere wurde bei einem vollen Kern eine Kapazitätseinbusse befürchtet.

Deshalb wurde von der Begleitkommission beschlossen, an einem bestehenden Kleinkreis einen Feldversuch durchzuführen. Ziel der Untersuchungen war es, festzustellen, ob bei unterirdischen Anordnungen, d.h. in Tunneln und Galerien, ein voller Kern gegenüber einer Mittelinsel aus verkehrstechnischer Sicht gewichtige Nachteile aufweist.

7.7.2 Versuchsanordnung und -durchführung

Mit dem Kleinkreis Stuckikreuzung in Steffisburg bei Thun konnte ein geeignetes Versuchsobjekt gefunden werden. Mit einem durchschnittlichen Werktagsverkehr DTV von ca. 25'400 Fahrzeugen und einem während des Versuchs gemessenen Spitzenstundenwert von 2542 Fahrzeugen wird die Kapazitätsgrenze regelmässig erreicht, und es tritt praktisch täglich während der Morgen- und Abendspitzenstunde Rückstau auf.

Folgende 3 Versuchsanordnungen wurden durchgeführt (vgl. Abb. 7.2 und 7.3):

- **V1** Ist-Zustand mit freier Durchsicht über die Mittelinsel
- **V2** voller Kern; keine Durchsicht über die Mittelinsel
- **V3** voller Kern und Seitenwände auf der Zufahrt Stockhornstrasse mit zusätzlich eingeschränkten Sichtverhältnissen (Simulation einer Tunnelsituation)

Abb 7.2 Kleinkreisell Stuckikreuzung, Versuchsanordnungen V2 und V3

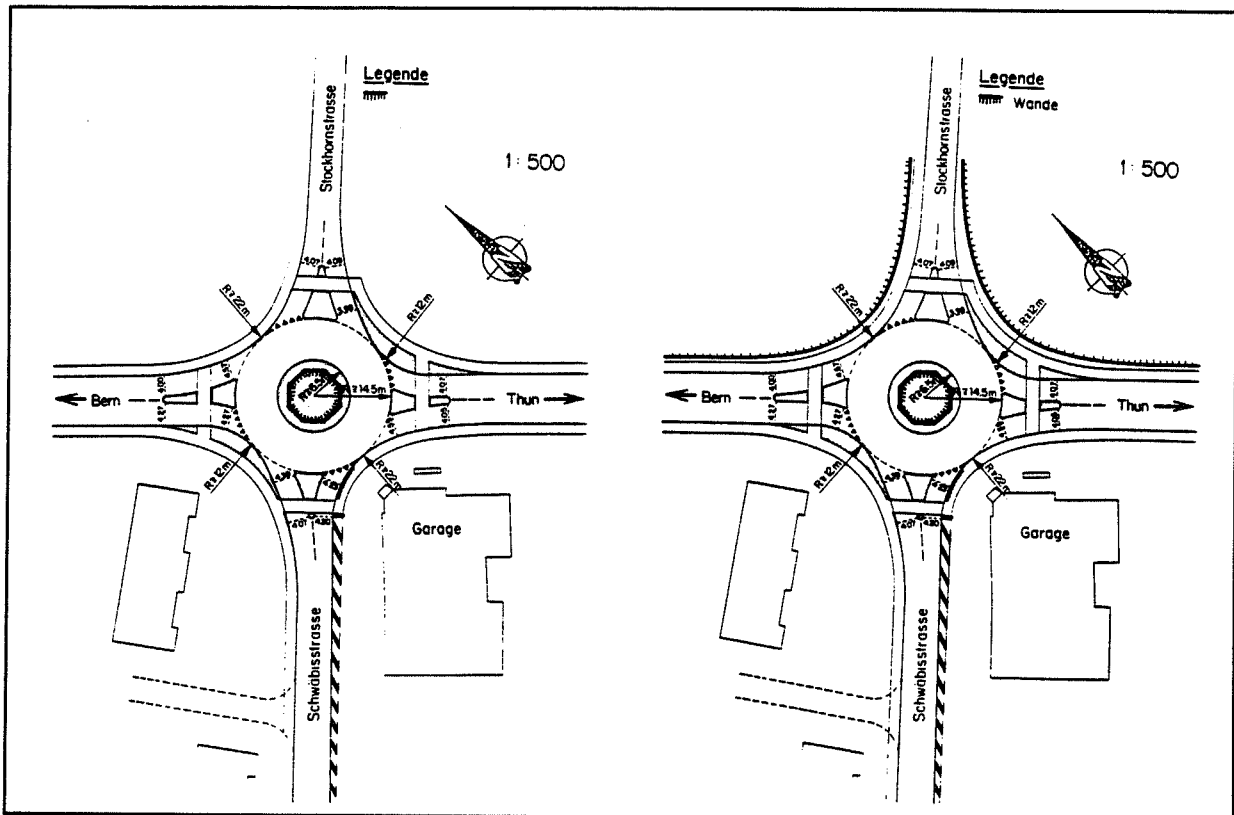
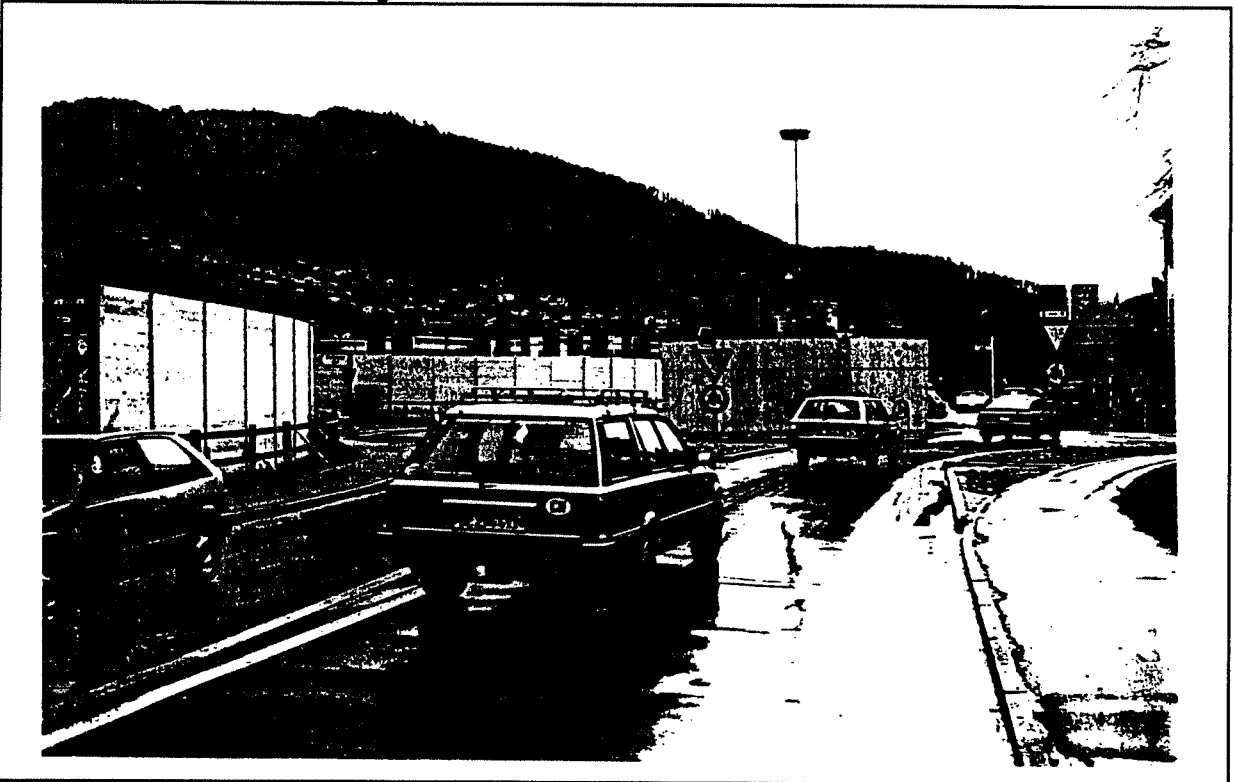


Abb 7.3 Versuchsanordnung V3



Die 2.5 m hohen Wände wurden mit Schalttafeln errichtet.

Anhand der 3 Versuchsanordnungen wurde der Verkehrsablauf verglichen:

- Geschwindigkeitsverhalten auf den Zufahrten und im Kreisel
- Leistungsfähigkeit und Rückstau
- Besondere Probleme

Der Versuch wurde mit Oktober bis Dezember 1992 wie folgt durchgeführt:

V1	Einrichtungsarbeiten	Woche 41
	Messungen	Woche 42
V2	Einrichtungsarbeiten	Woche 43
	Gewöhnungsphase	Woche 44
	Messungen	Woche 45
V3	Einrichtungsarbeiten	Woche 46
	Gewöhnungsphase	Woche 47
	Messungen	Woche 48

7.7.3 Auswertungen

Für die 3 Versuchsanordnungen wurden aus den vorhandenen Mess-Serien vergleichbare Messintervalle (gleiche Tageszeit, vergleichbare Frequenzen und ähnliche Verteilung der Verkehrsbelastung auf die 4 Zufahrten) ausgeschieden (Tab 7.2). Diese Messintervalle werden im folgenden als Belastungsfälle bezeichnet.

Tab 7.2 Feldversuch Kleinkreisel Stuckikreuzung, Fälle und Verkehrsbelastungen

	Ausfahrt rtg Bern	Ausfahrt rtg Thun	Ausfahrt rtg Steffisburg	Ausfahrt rtg Schwäbis	Im Kreisel	Anzahl Fälle	
						Werk.	Sa + So
Fall 1	200 - 400	200 - 400	0 - 100	0 - 200	200 - 400	2	4
Fall 2	400 - 600	400 - 600	100 - 200	100 - 300	400 - 600	14	4
Fall 3	400 - 600	600 - 800	100 - 200	100 - 300	400 - 600	7	1
Fall 4	600 - 800	400 - 600	100 - 200	200 - 300	600 - 800	15	
Fall 5	600 - 800	600 - 800	100 - 200	200 - 400	600 - 800	10	2
Fall 6	600 - 800	800 - 1000	100 - 200	200 - 300	600 - 800	3	
Fall 7	800 - 1000	400 - 600	100 - 200	300 - 400	800 - 1000	3	
Fall 8	800 - 1000	600 - 800	200 - 300	300 - 400	800 - 1000	7	
Fall 9	800 - 1000	800 - 1000	100 - 200	300 - 400	800 - 1000		1
Fall 10	1000 - 1200	800 - 1000	200 - 300	400 - 500	1000 - 1200	1	
Fall 11	0 - 200	200 - 400	0 - 100	0 - 100	0 - 200	1	
Fall 12	200 - 400	0 - 200	0 - 100	0 - 100	200 - 400	1	
Fall 13	200 - 400	400 - 600	0 - 100	100 - 200	200 - 400		1
TOTAL						64	13

Folgende Auswertungen wurden durchgeführt:

Automatische Verkehrszählgeräte (Auswertung über die ganze Messzeit)

- Geschwindigkeitsverhalten bei der Zufahrt (ca. 30 m vor Einfahrt auf Kreiselfahrbahn) auf den Kleinkreis aus allen Richtungen
- Geschwindigkeitsverhalten unmittelbar bei der Einfahrt in den Kreis auf allen Ästen
- Geschwindigkeitsverhalten bei der Ausfahrt aus dem Kreis in alle Richtungen
- Geschwindigkeitsverhalten im Kleinkreis

Videoaufnahmen

- Verkehrsbelastungen auf den Kreiselfahrten und im Kreis
- Wartezeiten bei der Einfahrt in den Kreis
- Rückstau auf den Zufahrten
- Besondere Verhaltensweisen

7.7.4 Versuchsergebnisse

Eine Zusammenfassung der Resultate ist in Anhang 3 dargestellt.

Automatische Verkehrszählgeräte

Eine Zusammenstellung der Geschwindigkeit v85 und der Anteile an Langsamfahrzeugen (Anteil Fahrzeuge mit $v < 15$ km/h) ist in den Tabellen 7.3 und 7.4 wiedergegeben.

Tab 7.3 Feldversuch Kleinkreis Stuckikreuzung: v85, werktags, alle Fälle

	V1		V2		V3	
	in km/h	in %	in km/h	in %	in km/h	in %
Zufahrt Bern	41	100%	39	95%	38	93%
Einfahrt Bern	27	100%	25	93%	23	85%
Ausfahrt Bern	37	100%	36	97%	37	100%
Einfahrt Schwäbisstrasse	22	100%	22	100%	20	91%
Ausfahrt Schwäbisstrasse	34	100%	34	100%	34	100%
Zufahrt Thun	49	100%	46	94%	42	86%
Einfahrt Bern	42	100%	41	98%	26	62%
Ausfahrt Bern	40	100%	38	95%	36	90%
Zufahrt Stockhornstrasse	41	100%	40	98%	40	98%
Einfahrt Stockhornstrasse	25	100%	25	100%	22	88%
Ausfahrt Stockhornstrasse	36	100%	36	100%	35	97%
Kreiselfahrbahn	29	100%	28	97%	28	97%

Tab 7.4 Feldversuch Kleinkreis Stuckikreuzung: Anteil Langsamfahrzeuge ($v < 15$ km/h)

	V1	V2	V3
	in %	in %	in %
Zufahrt Bern	8%	10%	12%
Einfahrt Bern	28%	32%	41%
Einfahrt Schwäbisstrasse	56%	57%	61%
Zufahrt Thun	7%	8%	9%
Einfahrt Thun	7%	8%	36%
Zufahrt Stockhornstrasse	1%	2%	2%
Einfahrt Stockhornstrasse	46%	48%	53%
Kreiselfahrbahn	2%	2%	2%

Die vorliegenden Resultate erlauben folgende Aussagen:

- Im Durchschnitt nimmt das Geschwindigkeitsniveau mit Versuchsanordnung 2 (volle Mittelinsel) im Vergleich zu Versuchsanordnung 1 (Normalzustand mit freier Durchsicht über die Mittelinsel) je nach Messstelle bis zu 6 % ab. Der grösste Geschwindigkeitsrückgang ist auf der Achse Thun - Bern zu verzeichnen, wo im Normalzustand sehr flüssig gefahren wird.
- Mit Versuchsanordnung 3 ("eingeschalter" Ast Stockhornstrasse) sinkt das Geschwindigkeitsniveau stärker als mit Versuchsanordnung 2. Hier zeigen sich erwartungsgemäss grössere Differenzen zwischen Messstellen, welche von der Einschaltung stärker betroffen sind und den übrigen. Im Vergleich zu Anordnung 1 sinken die Geschwindigkeiten bis zu 38 %. Die markantesten Geschwindigkeitsabnahmen werden auf dem Ast Thun verzeichnet.
- Der Anteil der Langsamfahrzeuge nimmt von Versuchsanordnung 1 zu 2 um wenige %, von 1 zu 3 recht deutlich (Einfahrt Thun von 7 auf 36%, Einfahrt Bern von 28 auf 41%) zu.

Videoaufnahmen

Aufgrund der Videoaufnahmen konnten folgende Resultate ermittelt werden:

- Verkehrsbelastungen, Rückstau und Leistungsfähigkeitsbetrachtungen für die Abendspitzenstunde (Durchschnitt aus je 2 Messserien) gemäss den Tabellen im Anhang 3
- In der Abendspitzenstunde wird in allen 3 Versuchsanordnungen die Leistungsfähigkeit des Kleinkreisels teilweise erreicht bzw. überschritten und es bilden sich auf der Hauptachse Thun - Bern teilweise Stausituationen von weit über 60 m Länge. Die theoretische Leistungsfähigkeit nach CH-Formel wird auf dem Ast Bern ganz und auf dem Ast Thun zu ca. 85 % erreicht. Wesentliche Unterschiede in der Staubildung und in der Staulänge lassen sich beim Vergleich der 3 Versuchsanordnungen nicht erkennen. Für die Kapazität viel entscheidender als die reduzierten Sichtverhältnisse zeigt sich aufgrund von Beobachtungen der Videoaufnahmen das Verhalten von unsicheren Fahrzeuglenkern, welche beim Einmünden in den Kreisell allzu lange zögern.
- Während der Zeit der Videoaufnahmen konnten bei keiner Versuchsanordnung kritische Situation (Unfälle, Fastunfälle) entdeckt werden

Sonstige Beobachtungen und subjektive Eindrücke

Sämtliche beteiligten Behörden (Tiefbauamt des Kantons Bern, Kantonspolizei Bern, Gemeindebehörden Steffisburg) beurteilen den Versuch grundsätzlich als positiv. Seitens Verkehrspolizei wurden keine Verkehrsunfälle registriert und kritische Situationen konnten auch nicht beobachtet werden.

Von zahlreichen Verkehrsteilnehmern wurde das tiefere Geschwindigkeitsniveau begrüsst, da es insbesondere den Fahrzeugen aus Richtung Steffisburg und Schwäbis das Einmünden in den Kreisell erleichterte.

Betreffend Rückstau und Leistungsfähigkeit gibt es unterschiedliche, sich widersprechende Aussagen durch Vertreter des Tiefbauamtes, der Kantonspolizei, von Gemeindebehörden und weiteren Passanten.

Als kritisch wurde der Fussgängerübergang Stockhornstrasse bei Anordnung 3 bezeichnet, weil die Sicht durch die Wand eingeschränkt wurde und nicht alle Fahrzeuglenker ihr Tempo den geringeren Sichtweiten entsprechend angepasst haben. Beim kantonalen Tiefbauamt und bei der Gemeinde Steffisburg sind auch einzelne Beschwerden über den Versuch eingegangen.

7.7.5 Interpretation der Versuchsergebnisse

Aus den vorliegenden Resultate können folgende Schlüsse gezogen werden:

Volle Mittelinsel (V2)

1. Eine volle Mittelinsel trägt zu einer Beruhigung des Verkehrsablaufes im Bereich eines Kleinkreisels bei (leicht tieferes Geschwindigkeitsniveau), erleichtert somit das Einmünden in die Kreiselfahrbahn und erhöht die Verkehrssicherheit.
2. Die Leistungsfähigkeit des Kleinkreisels mit voller Mittelinsel entspricht etwa derjenigen eines Kreisels mit freier Durchsicht.

Volle Mittelinsel und seitliche Wände (V3)

3. Die Einflüsse der seitlichen Wände auf den Verkehrsablauf im Bereich eines Kleinkreisels gewichten stärker als die volle Mittelinsel
4. Aufgrund der Seitenwände sinkt das Geschwindigkeitsniveau beträchtlich ab, erleichtert somit das Einmünden in Kreiselfahrbahn und erhöht die Verkehrssicherheit stärker als die alleinige volle Mittelinsel
5. Bei einem einzigen Ast mit Seitenwänden lassen sich keine signifikanten Änderungen in der Kreisleistungsfähigkeit feststellen. Die Übertragung dieser Aussage auf Knoten mit mehreren Zufahrten mit Seitenwänden ist aus dem Versuch nicht ableitbar.

Freie Durchsicht und seitliche Wände

Dieser Fall wurde im Rahmen des Versuches nicht untersucht. Es kann jedoch vermutet werden, dass das Geschwindigkeitsniveau wegen den reduzierten Sichtweiten ebenfalls absinkt und die Kapazität etwa derjenigen aus dem Fall volle Mittelinsel und seitliche Wände entspricht.

Nach Vorliegen der grundsätzlich positiven Versuchsergebnisse über einen Kleinkreisels mit voller Mittelinsel wurde durch die Begleitkommission entschieden, bei unterirdischer Knotenlage auf weitergehende Laborversuche zu Kleinkreiseln mit freier Durchsicht zu verzichten.

7.8 Erhebung eingeschalteter Fahrzeuglichter

Für die Wahrnehmung von Rückstau in Tunneln, insbesondere im Bereich D, wurde ein stehendes Fahrzeug (kein Bremslicht) als massgebend und 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 Wahrnehmungsuntersuchungen (Laborversuche) für den Problembereich Rückstau ein Fahrzeug mit oder ohne eingeschaltetem Rücklicht berücksichtigt werden sollte.

Aufgrund dieser Ausgangslage wurden in 2 Tunneln (Tab 7.5 und 7.6) in Abhängigkeit der Distanz zum Tunneleinfahrtsportal der Anteil Fahrzeuge ohne Licht erhoben.

Tab 7.5 N12 Brünnentunnel, Anteil Fahrzeuge 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 7.6 N2 Belchentunnel, 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 Wahrnehmungsuntersuchungen im Bereich Rückstau Fahrzeuge ohne eingeschaltetes Rücklicht als massgebend zu berücksichtigen sind.

8. WAHRNEHMUNGSPSYCHOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

8.1. Einleitung

In der verkehrstechnischen Voranalyse wurden alle Fälle von Knotentypen in den verschiedenen Tunnelzonen analysiert. Aus diesen wurden nach verschiedenen Kriterien die wichtigsten für eine wahrnehmungspsychologische Untersuchung ausgewählt. Es waren dies Knoten, die durch eine Lichtsignalanlage oder durch einen Kleinkreis geregelt werden. Beim Kleinkreis werden zwei Fälle betrachtet, ein Kreis mit freier Durchsicht und einer mit massivem Kern, der die Durchsicht vermindert aber statische Vorteile im Tunnel hat. Es stellt sich nun die Frage, wie diese Knoten in den verschiedenen Tunnelzonen gestaltet sein müssen, damit sie rechtzeitig erkannt werden. Da jeder Knoten bei einer bestimmten Verkehrsmenge Rückstau erzeugt, muss auch die Frage des rechtzeitigen Erkennens von Rückstau in den einzelnen Tunnelzonen untersucht werden.

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 Sehschärfenaufgaben. 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. 8.1 zeigt die Kontrastempfindlichkeit in Abhängig-

keit der Ortsfrequenz eines Sinusstreifenmusters. Die Daten stammen aus einer Untersuchung von van Nes und Bouman (1967). 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.

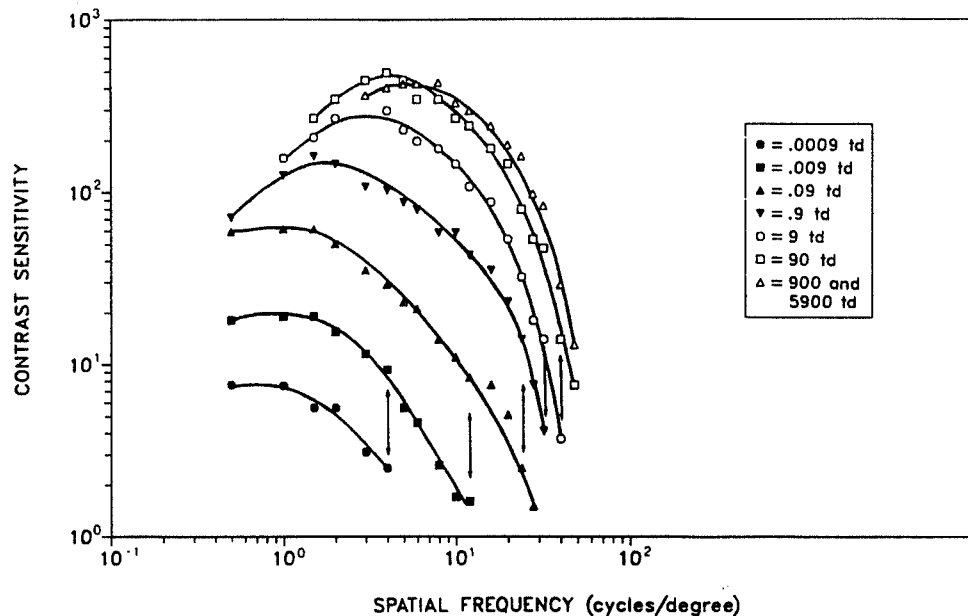


Abb 8.1 Kontrastsensitivität in Abhängigkeit der Ortsfrequenz (Perioden pro Grad Sehwinkel) eines Sinusstreifenmusters. Der Parameter ist die mittlere Leuchtdichte gemessen in Troland.

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 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. Das menschliche Wahrnehmungssystem operiert zwar wie erwähnt über viele Zehnerpotenzen von Hintergrundsleuchtdichten, 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 Anhaltestrecke 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 Einfahrtsstrecke 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 Einfahrtsstrecke entspricht der Anhaltedistanz. Nach den neuen Tunnelbeleuchtungsnormen SEV 8915 (1992) bleibt die Leuchtdichte über die halbe Länge der Einfahrtsstrecke konstant und sinkt dann bis zu ihrem Ende linear auf 40% des 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 L_{20} 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, um so länger dauert die Adaptation.

Der verminderten Sensitivität des visuellen Systems wird in der Tunnelbeleuchtung dadurch Rechnung getragen, dass in der Übergangsstrecke die Leuchtdichte der Einfahrtsstrecke langsam vermindert wird, bis sie die Leuchtdichte der Innenstrecke erreicht, die je nach Höchstgeschwindigkeit und Verkehrsmenge zwischen 1 und 6 cd/m^2 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 Einfahrtsstrecke 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 Ausgangsleuchtdichte, an die die Versuchspersonen für eine Minute adaptiert wurden, betrug 4000 cd/m^2 . 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 Leuchtdichte 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 Leuchtdichte erst 100 bis 160m im Tunnelinnern auftreten würde.

In einer weiteren Untersuchung fanden Bourdy et al. (1988), dass der Anstieg der Kontrastschwelle von der Ausgangsleuchtdichte abhing. Bei 2000 cd/m^2 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 Tunnelinnenstrecke 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 Ausfahrtsstrecke wird gegenüber der Innenstrecke nicht erhöht.

8.3. Fragestellung der wahrnehmungspsychologischen Untersuchung

Unter Berücksichtigung der Probleme, die sich für die Wahrnehmung beim Durchfahren eines Tunnels bei Tageslicht ergeben und der tunnelbeleuchterischen Massnahmen zu ihrer Reduktion, lässt sich nun die Fragestellung für das vorliegende Projekt genauer formulieren. Wäre die Sichtbarkeit von Knoten, die als Kleinkreisell konzipiert sind oder durch eine Lichtsignalanlage geregelt werden, unter den gegenwärtigen Normen der Tunnelbeleuchtung in den einzelnen Tunnelzonen ausreichend? Ausreichend bedeutet, dass die Knoten aus der Anhaltstrecke entdeckt und als solche erkannt würden. Dieselbe Frage stellt sich auch für das Erkennen des Rückstaus.

Eine erste Möglichkeit zur Beantwortung dieser Fragen sollte in den Erkenntnissen liegen, aus denen die Prinzipien der Tunnelbeleuchtung abgeleitet wurden (CIE Nr. 61, 1984). Das Ziel der Tunnelbeleuchtung war folgendermassen festgelegt worden: sie sollte so gestaltet sein, dass es möglich war, ein kleines Objekt (20cm x 20cm) auf der Fahrbahn aus 100m Entfernung zu entdecken. Mithilfe von Laborexperimenten wurde der Zusammenhang untersucht zwischen der Aussenleuchtdichte L1, die das Adaptationsniveau bestimmt, und der Entdeckungsschwelle für einen kleinen Reiz mit der Leuchtdichte L3 bei einer Hintergrundleuchtdichte L2, die der Beleuchtung in der Einfahrtsstrecke entspricht. Beim Reiz handelte es sich um ein homogenes Quadrat von 7x7 Minuten Sehwinkel, das auf einem homogenen Hintergrund den Versuchspersonen für 200 msec gezeigt wurde, nachdem sie vorher für einige Zeit an die Leuchtdichte L1 adaptiert worden waren. Die Schwelle wurde durch die 75%-Schwelle definiert. Aus diesen Daten konnte unter Berücksichtigung der Reflexionsfaktoren der möglicherweise auf der Fahrbahn liegenden Gegenstände, die benötigte Beziehung zwischen der Aussenleuchtdichte L1 und der Fahrbahnleuchtdichte L2 in der Einfahrtsstrecke abgeleitet werden.

Die auf diesen Experimenten basierenden Richtlinien für die Tunnelbeleuchtung erwiesen sich in der Praxis als erfolgreich gemessen an der Zahl der Unfälle, die eher geringer war

als auf vergleichbaren offenen Strecken. Könnte man daraus ableiten, dass die Sichtbarkeit auch für einen Kleinkreis, eine Lichtsignalanlage und Rückstau genügend wäre? Ein grosser Unterschied besteht in der Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins des Hindernisses, das entdeckt werden muss. Während es relativ selten ist, dass ein Gegenstand in einem Tunnel auf der Fahrbahn liegt, ist der Knoten ständig da, und auch die Wahrscheinlichkeit von Rückstau ist je nach Verhältnissen gross. Ein einmaliges Nicht-Entdecken kann hier schon gravierende Konsequenzen haben. Daraus folgt, dass einige Bedingungen der Referenzaufgabe geändert werden müssten. Es müsste eine höhere Schwelle verwendet werden und es müsste die Population der älteren Leute miteinbezogen werden, da die Kontrastempfindlichkeit mit dem Alter abnimmt.

In der Beleuchtungsforschung gibt es analytische Modelle zur Vorhersage der Sichtbarkeit von Zielobjekten, bei denen Faktoren wie Alter, Dauer der Präsentation des Zielobjekts, Vorzeichen des Kontrasts (Adrian, 1989) oder okulomotorische Parameter (CIE 19/2.1, 1981) miteinbezogen sind. Sie beruhen aber alle auf Experimenten mit einfachen homogenen Objekten, die meistens auf homogenem Hintergrund statisch für eine bestimmte Zeit präsentiert werden. Im Falle des Kleinkreisels und Rückstaus handelt es sich dagegen um komplexe Objekte, die sich nicht durch einen Kontrastwert charakterisieren lassen, deren Grösse sich bei der Annäherung auf der Netzhaut verändert und die sich sogar im Falle des Rückstaus langsam bewegen können. In dieser Situation war es das beste, die Frage der Sichtbarkeit der Knoten und des Rückstaus in einem möglichst realen Experiment direkt zu untersuchen.

Da es in der Schweiz noch keine A-Niveau Knoten in Tunneln gibt, mussten diese in einem Tunnel simuliert werden. Die besten Aussagen hätte ein Feldexperiment gebracht. Die Versuchspersonen wären in den Tunnel gefahren, in dem in den verschiedenen Zonen die Knoten und der Rückstau aufgestellt worden wären, und man hätte die Distanz aus der sie die Hindernisse erkannt hätten, unter Variation der Tunnelbeleuchtung messen können. Dies hätte aber im Falle der wichtigsten Zone, der Einfahrtsstrecke, wegen der grossen Variation der Streuleuchtdichten durch Tagesablauf und atmosphärische Veränderungen zu einem kaum bewältigbaren Aufwand geführt.

Es wurde daher beschlossen, Videoaufnahmen von Knoten und Rückstau in den verschiedenen Tunnelzonen unter verschiedenen Beleuchtungen herzustellen und diese im Labor zu verwenden, wo sich die Streuleuchtdichten und damit auch die Adaptation kontrollieren liessen.

9. SIMULATION DER KNOTEN UND DES RÜCKSTAUS IN EINEM TUNNEL

9.1. Einleitung

Für die Laborexperimente wurden Videoaufnahmen der untersuchten Knoten und des Rückstaus benötigt. Zusätzlich sollten auch die Leuchtdichten dieser Objekte und des Tunnelhintergrunds unter verschiedenen Beleuchtungen gemessen werden. Vom Kanton Uri wurde dafür ein Tunnel der Axenstrasse (N4) zur Verfügung gestellt, der für den Durchgangsverkehr gesperrt war. Es handelte sich um den Stutzegg Tunnel, der in Nord-Süd Richtung angelegt ist und eine Länge von 320 m aufweist. Der Tunnel wird auf der ganzen Länge mit FL-Röhren beleuchtet, die Einfahrzonen zusätzlich mit NaH-Lampen.

Die Leuchtdichtemessungen und Videoaufnahmen wurden am 24. und 25. Juni 1992 durchgeführt.

9.2. Simulation der Knoten und des Rückstaus

Die Lichtsignalanlage bestand aus vertikal angeordneten Lichtsignalen am rechten Straßenrand und horizontal angeordneten Lichtsignalen über der Fahrbahn mit einem zusätzlichen Wegweiser für Hauptstrassen.

Der Kleinkreis mit massivem Kern wurde durch eine schwarz-weiss schräg gestreifte Wand simuliert, die in Abb. 9.1 dargestellt ist. Der Kleinkreis mit Durchsicht wurde durch eine schwarz-weiss gestreifte Holzplatte von 50cm Höhe markiert (Abb. 9.2). In beiden Fällen befand sich in der Mitte vor dem Kreis das selbstleuchtende Signal "Hindernis rechts umfahren", das als Ersatz für das Kleinkreiselsignal verwendet wurde.

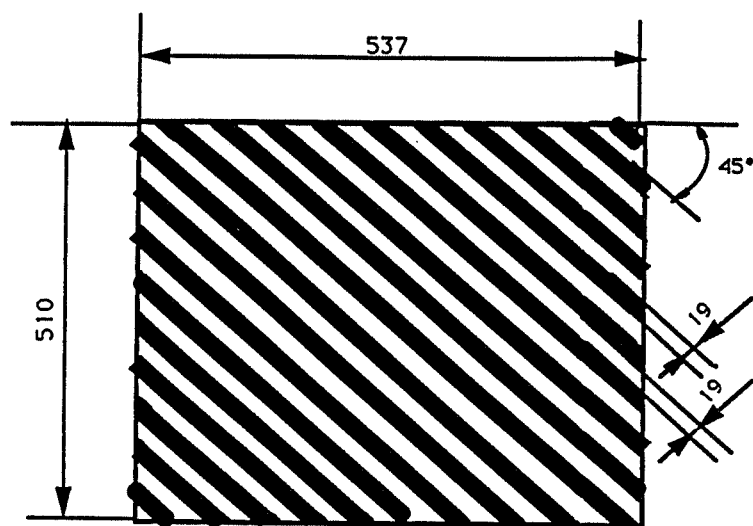


Abb 9.1 Wand, die den Kreis mit massivem Kern darstellte. Masse in cm

Der Rückstau wurde durch einen stehenden oder im Schrittempo fahrenden Personenwagen von heller Farbe simuliert. Die Videoaufnahmen und Leuchtdichtemessungen wurden mit und ohne eingeschalteten Rücklichter gemacht.

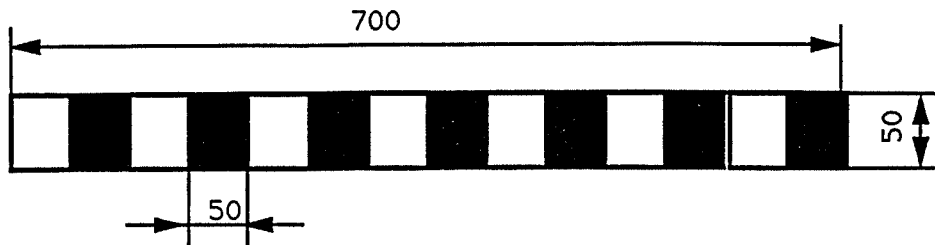


Abb 9.2 Band, das den Kreisels mit Durchsicht markierte. Masse in cm

9.3 Tunnelzonen

Die Knoten und der Rückstau wurden in den folgenden Zonen positioniert:

- Einfahrtsstrecke (D1)

Die Einfahrtsstrecke des Südportals wurde gewählt, da sich hier eine gerade Annäherungsstrecke von ca. 180m befand. Zusätzlich war auch das Streulicht grösser als beim Nordportal. Die Lichtsignalanlage wurde 20m, der Kleinkreisels mit Durchsicht 20 und 40m und der Kleinkreisels mit massivem Kern 20, 40 und 80m innerhalb des Tunnels aufgestellt. Die letzteren Positionen galten auch für den Rückstau.

- Innenstrecke (E)

Alle Hindernisse ausser der Lichtsignalanlage wurden 160m innerhalb des Tunnels aufgebaut. Die Videoaufnahmen und Leuchtdichtemessungen wurden in diesem Fall nachts gemacht, um einen allfälligen Einfluss des Lichts vom andern Tunnelende auszuschliessen.

- Ausfahrtsstrecke (F)

Aus topologischen Gründen wurde die Ausfahrtsstrecke des Südportals gewählt. Lichtsignalanlage, Kleinkreisels mit Durchsicht und Rückstau wurden 20m innerhalb des Tunnels aufgebaut.

- Anschlussstrecke (H)

Hier wurden 20m vom Portal ausserhalb des Tunnels der Kleinkreisels und der Rückstau positioniert.

Die Abbildungen 9.3 und 9.4 zeigen die beiden Knotentypen in verschiedenen Tunnelzonen.

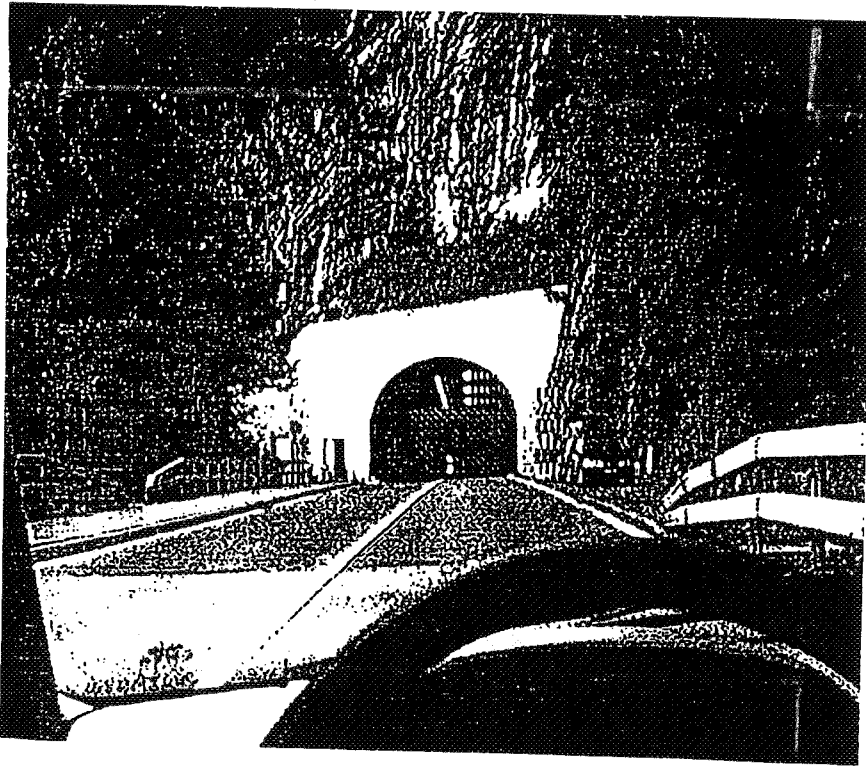


Abb 9.3. Kleinkreis mit massivem Kern in der Zone D1

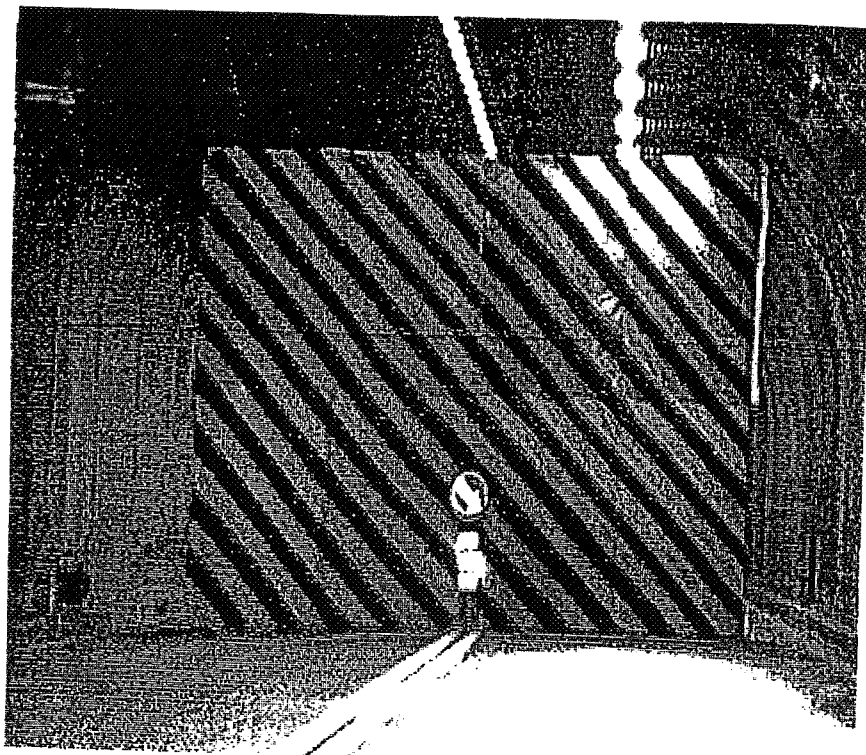
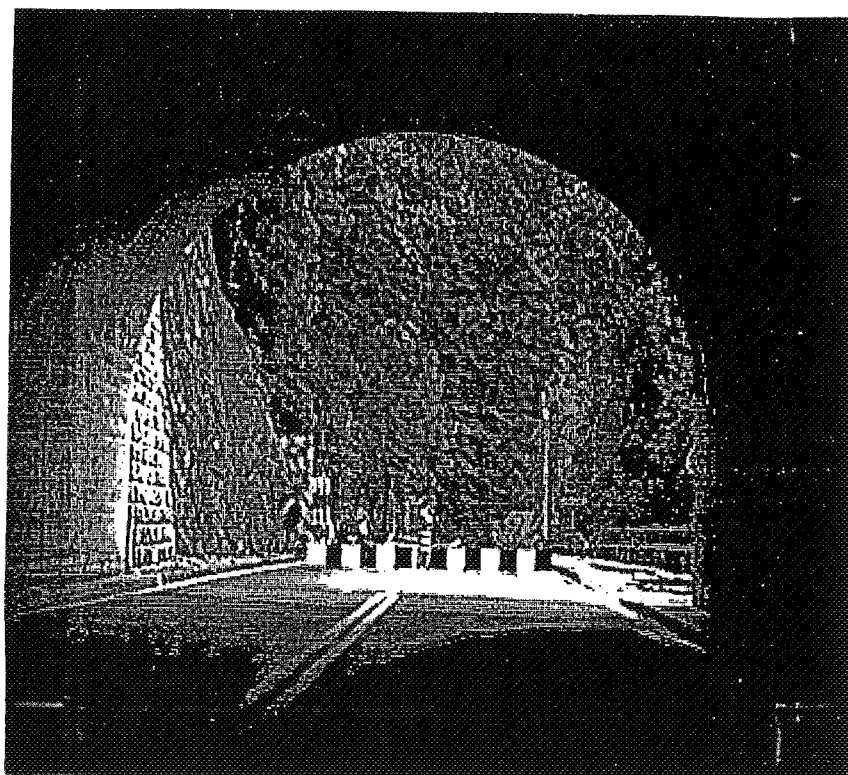
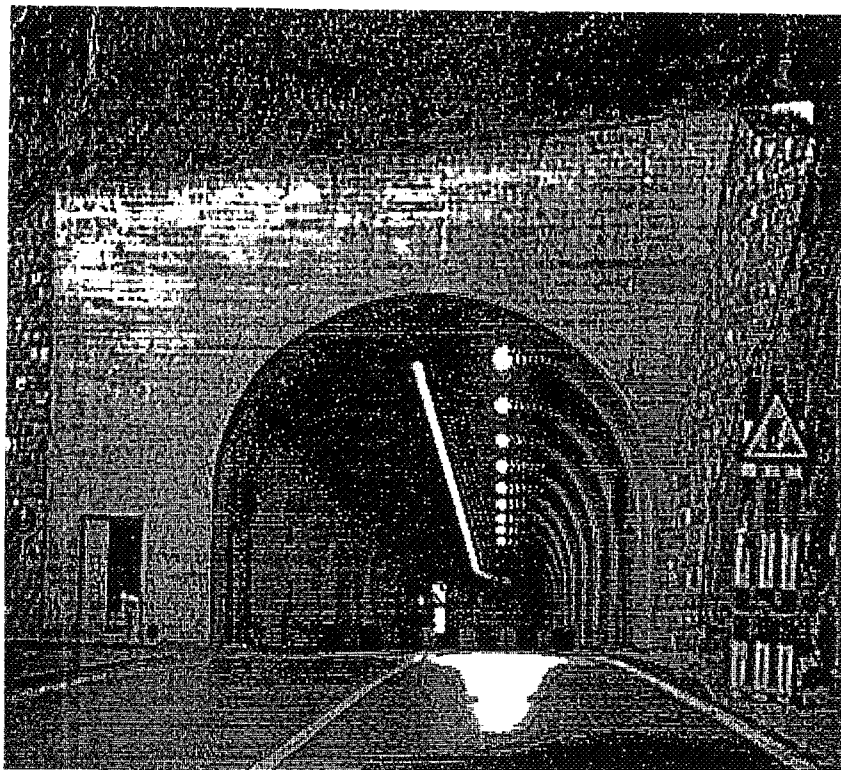


Abb 9.4 Kleinkreis mit Durchsicht in den Zonen D1 und H



9.4 Videoaufnahmen

Von allen unter 9.3 erwähnten Situationen wurden Videoaufnahmen gemacht. Bei der Kamera handelte es sich um eine Sony CCD V6000 Hi8. Die Kamera befand sich in einem Ford Sierra nahe der Position des Fahrerkopfes. Die Fahrt begann jeweils ca. 200m vor dem Tunneleingang, führte auf den Tunnel zu und in diesen hinein bis zum jeweiligen Hindernis. Die Geschwindigkeit betrug 50 km/h. Die Aufnahmen wurden mit verschiedenen Blenden und unter verschiedenen Tunnelbeleuchtungen gemacht.

9.5. Leuchtdichtemessungen

Als Grundlage für die Laborexperimente wurden die Leuchtdichten der unter 9.3. erwähnten Situationen mit dem CapCalc-Photometer ausgemessen. Dabei wurden Tunnelbeleuchtung und Distanz zum Hindernis variiert. Das Gerät befand sich in einem Opel Astra an der Fahrerposition. Pro Bild misst es die Luminanz von 512 x 480 Punkten und speichert sie ab.

In der nachfolgenden Auswertung musste die riesige Datenmenge reduziert werden. Bei den Kleinkreisen wurde ein Gitter über das Bild gelegt und entlang horizontalen und vertikalen Linien wurden über weisse und schwarze Regionen der gestreiften Objekte Mittelwerte der Leuchtdichten gebildet. Ebenfalls wurden über Regionen ähnlicher Grösse des Tunnelhintergrundes mittlere Leuchtdichten berechnet. Entlang der Grenze des Objekts und auch innerhalb zwischen den schwarzen und weissen Streifen wurden Kontraste berechnet nach der Formel

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

Beim Rückstau wurde über homogen erscheinende Zonen des Autos die Leuchtdichte gemittelt und entlang der Kontur der Kontrast zum Hintergrund berechnet. Dabei wechselte der Kontrast das Vorzeichen und variierte über einen grossen Bereich.

Im allgemeinen wurde festgestellt, dass die Leuchtdichten der Tunnelszenen von der Strasse zur Tunneldecke zunahm und von der Mitte gegen die Wände hin abnahm, was durch die Position der Lampen erklärt werden kann. Ein Vergleich der Leuchtdichten derselben Szene von innerhalb und ausserhalb des Tunnels gemessen ergab höhere Werte für die Messung von aussen. Die Differenzen, die durch Streulicht in der Atmosphäre und an der Windschutzscheibe verursacht wurden, variierten stark mit dem Sonnenstand und den atmosphärischen Bedingungen. Im Maximum betrugen sie etwa 250 cd/m². Für die Kontraste der Hindernisse zum Tunnelhintergrund bedeutete dies eine erhebliche Reduktion.

Die aus den Leuchtdichten berechneten Kontraste, aber auch unsere Beobachtungen der verschiedenen Situationen vor Ort zeigten, dass die Wahrnehmung der simulierten Knoten und des Rückstaus am schwierigsten war, wenn sich diese in der Einfahrtzone befanden. Aus den Leuchtdichtemessungen geht zum Beispiel hervor, dass die gestreifte Wand, die den Kleinkreis mit massivem Kern darstellte, sehr geringe Kontraste zu den Tunnelwänden aufwies. Dies führte dazu, dass die Wand, 40 m innerhalb des Tunnels aufgestellt, von aussen bei hoher Schleierleuchtdichte praktisch nicht sichtbar war.

Die Wahrnehmbarkeit der Hindernisse in der Ausfahrtzone (F) schien hingegen wegen der Silhouettenwirkung gut zu sein. Die Lichtsignalanlage war wegen ihrer hohen Leuchtdichte überall sehr gut sichtbar.

10. LABORVERSUCHE

10.1 Zielsetzung

Es war das Ziel der folgenden Experimente, die Wahrnehmbarkeit der Lichtsignalanlage, der beiden Kleinkreiseltypen und des Rückstaus in den verschiedenen Tunnelzonen zu untersuchen. Genauer gesagt ging es um die Frage, ob diese Objekte bei den gegenwärtigen Normen der Tunnelbeleuchtung und den vor Tunneln gemessenen Streuleuchtdichten rechtzeitig erkannt würden. "Rechtzeitig erkannt" bedeutet, dass die Distanzen, aus denen die Versuchspersonen die Objekte entdeckten, mindestens gleich der Anhaltstrecke für die vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit sein müssten. Sollte dies nicht der Fall sein, dann sollte man aus den Experimenten ableiten können, um wieviel die Sichtbarkeit der Knoten und des Rückstaus erhöht werden müsste.

Ein zentraler Punkt dabei war die Frage, welcher Teil der autofahrenden Population in die Untersuchung miteinbezogen werden sollte. Da die Kontrastempfindlichkeit mit dem Alter abnimmt, sollten die beiden hinsichtlich Alter extremen Stichproben untersucht werden, damit man bei einem Unterschied allfällige Massnahmen zur Erhöhung der Sichtbarkeit aus den Resultaten der schlechteren Stichprobe ableiten könnte.

Um diese Fragen zu beantworten, wurden den Versuchspersonen die Knoten und der Rückstau in den verschiedenen Tunnelzonen dynamisch in Form von Videofilmen präsentiert. Variiert wurden die Aussenleuchtdichte, an die die Versuchspersonen adaptierten und die Beleuchtungsverhältnisse im Tunnel. Gemessen wurde die Distanz, aus der die Versuchspersonen von den Knoten und den Rückstau erkannten. Dadurch war es in einigen Fällen möglich, eine quantitative Beziehung zwischen dem mittleren Kontrast der zu entdeckenden Objekte in den verschiedenen Tunnelzonen und der Distanz, aus der ein vorgegebener Prozentsatz einer Stichprobe das Objekt erkannte, herzustellen.

Zwei wichtige Variablen, die einen Einfluss auf die Reaktionsdistanz haben, die Aufmerksamkeit und die Erwartungshaltung der Personen, konnten nicht untersucht werden, da sie in der Laborsituation schwer zu manipulieren sind. Diese Variablen müssen in der Gestaltung der Knoten nach den anerkannten Grundsätzen der Verkehrstechnik berücksichtigt werden.

10.2 Versuchsanlage

Die Versuchsanlage, die in Abb. 10.1 dargestellt ist, bestand aus einem transparenten Bild eines Tunneleingangs, das von hinten beleuchtet wurde. Die Beleuchtung erfolgte mit Hilfe von zwölf Scheinwerfern à 500 Watt. Die Leuchtdichte liess sich stufenlos regeln und es konnte eine maximale Leuchtdichte von ca. 15000 cd/m² erreicht werden. Im Tunnelmund befand sich ein Bildschirm, auf dem die Videoszenen gezeigt wurden. Das ganze Bild der Tunnelumgebung war 1.31m breit und 0.85m hoch. Der Bildschirm mass 0.51 x 0.38 m.



Abb. 10.1 Versuchsanlage

Die Versuchspersonen saßen in einem Abstand von 150 cm vor dem Bildschirm. Der Sehwinkel betrug 19.3 Grad horizontal und 14.4 Grad vertikal. Für das ganze Bild der Tunnelumgebung betrug der Sehwinkel von 47.2 Grad horizontal und 31.6 Grad vertikal. Vor den Versuchspersonen befand sich im Abstand von 45 cm eine mit Staub beschichtete Scheibe, die von oben beleuchtet wurde. Sie hatte die Funktion, die notwendige Streuleuchtdichte zu erzeugen.

Die Szenen, die die Vpn beurteilen mussten, begannen jeweils in einer Kurve ca. 200 m vor dem Tunneleingang und zeigten die Fahrt auf den Tunneleingang zu und in den Tunnel hinein. Beim Eintritt in den Tunnel erlosch die ganze Umgebungsbeleuchtung. An einer Position im Tunnel befand sich ein Knoten (LSA, Kleinkreis) oder ein stehendes Fahrzeug (Rückstau). Die Vpn hatten die Aufgabe, während ihrer Fahrt möglichst frühzeitig zu erkennen, was sich im Tunnel befand. Zugleich wurde ihnen nahegelegt, nur zu antworten, wenn sie das Hindernis sicher erkannt hatten. Um voreiliges Antworten zu erkennen und zu verhindern, wurden auch Fahrten ohne Hindernisse gezeigt.

Die Antworten der Vpn erfolgten über einen Knopfdruck, der den Film anhielt und den Bildschirm sofort löschte, so dass die Vpn keine weitere Information aus dem stehenden Bild erlangen konnten. Unmittelbar nach dem Knopfdruck mussten die Vpn das Hindernis benennen. Gemessen wurde die Distanz, aus der das Hindernis erkannt wurde. Versuchsdurchgänge, bei denen das Hindernis falsch benannt wurde, wurden in der nachfolgenden Auswertung nicht berücksichtigt.

10.3 Experiment I: Knoten und Rückstau in der Einfahrtsstrecke

10.3.1 Versuchsbedingungen

Aufgrund der gemessenen Leuchtdichten und der Beurteilung der Situationen vor Ort wurde beschlossen, in einem ersten Experiment die Wahrnehmbarkeit der Knoten und des Rückstaus in der Einfahrtsstrecke (D1) zu untersuchen. Hätte sich diese als genügend erwiesen, hätte man eventuell auf die Untersuchung der andern Zonen verzichten können.

Für das Experiment wurden die folgenden zwölf verschiedenen Videoszenen ausgewählt: der Kleinkreis mit massivem Kern (W) 20, 40 und 80m im Tunnel, der Kleinkreis mit Durchsicht (B) 20 und 40m im Tunnel, die Lichtsignalanlage (LSA) 20m im Tunnel und der Rückstau (R) mit und ohne eingeschaltete Rücklichter je 20, 40 und 80m im Tunnel. Dazu kamen zwei Szenen ohne Hindernisse.

Die vierzehn Szenen wurden den Vpn unter je drei Beleuchtungsbedingungen präsentiert, die folgendermassen definiert waren:

Bed.	mittlere Leuchtdichte der Peripherie	Streuleuchtdichte an der Position der Vpn	Bildschirmkontrast
A	4457.8 cd/m ²	188.0 cd/m ²	6.36
B	4457.8 cd/m ²	188.0 cd/m ²	37.03
C	1888.2 cd/m ²	78.8 cd/m ²	6.36

Die mittlere Leuchtdichte der Peripherie wurde über zwei Stufen variiert. Das höhere Niveau entspricht ungefähr dem, welches für den Stutzeggtunnel bei Sonnenlicht gemessen wurde. Die daraus resultierende Streuleuchtdichte beeinflusst das Adaptationsniveau der Vpn. Helligkeit und Kontrast des Bildschirms wurden so gewählt, dass unter den Bedingungen A und C die Leuchtdichteverhältnisse im Innern des Tunnels weitgehend denjenigen entsprachen, die im Stutzeggtunnel unter maximaler Beleuchtung der Einfahrzone gemessen wurden. Die Leuchtdichten der Versuchsanlage wurden mit einem Spectra Pritchard Photometer bestimmt, das uns vom Amt für Messwesen freundlicherweise zur Verfügung gestellt wurde.

Der angegebene Bildschirmkontrast bezieht sich auf den hellsten und dunkelsten Punkt eines Referenzbildes. Wird die Streuleuchtdichte miteinbezogen, so ergeben sich für die beiden Punkte des Referenzbildes die folgenden Kontraste an der Position der Versuchsperson: A: 0.41, B: 0.24, und C: 0.90.

10.3.2 Versuchspersonen

Am Experiment nahmen zwei Stichproben von je 24 Vpn aus zwei Altersgruppen teil. In der Seniorengruppe betrug der Altersbereich 62-75 Jahre bei einem Mittelwert von 68.2 Jahren, in der Juniorengruppe 21-50 Jahre bei einem Mittelwert von 28.7 Jahren. Unter den Senioren befanden sich 18, unter den Junioren 14 Brillenträger. Alle fahren aktiv Auto.

10.3.3 Versuchsdurchführung

Zu Beginn wurden den Vpn alle möglichen vorkommenden Hindernisse gezeigt, wobei die Beleuchtungsverhältnisse nicht denen im Experiment entsprachen. Dann wurde mit jeder Szene ein Übungsdurchgang gemacht. Diese Phase dauerte 10 Minuten. Danach folgte das eigentliche Experiment, das 45 Minuten dauerte. Die vierzehn experimentellen Situationen wurden in Zufallsreihenfolge unter den drei Beleuchtungsbedingungen gezeigt, die blockweise dargeboten wurden. Nach einer Pause wurde das Experiment wiederholt.

10.3.4 Resultate

Zur statistischen Überprüfung der Mittelwertsunterschiede wurde mit den Daten (Reaktionsdistanzen) eine dreifaktorielle Varianzanalyse (Alter x Situationen x Beleuchtung) mit Wiederholung in den Faktoren "Situationen" und "Beleuchtung" gerechnet. Dabei ergaben sich die folgenden hochsignifikanten Haupteffekte, Alter ($F(1,46) = 15.1, p < 0.001$), Situationen ($F(11,506) = 60.19, p < 0.001$) und Beleuchtung ($F(2,92) = 17.79, p < 0.001$) sowie die hochsignifikanten Interaktionen, Alter x Situationen ($F(11,506) = 5.02, p < 0.001$) und Situationen x Beleuchtung ($F(22,1012) = 3.32, p < 0.001$).

Der Alterseffekt besteht darin, dass die Junioren im Durchschnitt eine um 22m bessere Reaktionsdistanz aufweisen als die Senioren.

Zwischen den Situationen bestehen grosse Unterschiede, die Lichtsignalanlage wird am besten wahrgenommen, der Kleinkreis mit massivem Kern 40m im Tunnel am schlechtesten. Die Beleuchtung C führt zu den besten Reaktionsdistanzen, gefolgt von A und B. Die Interpretation der Haupteffekte wird modifiziert durch die Interaktionen, die im folgenden graphisch dargestellt sind.

Abbildung 10.2 zeigt die Mittelwerte und zugehörigen Standardfehler der Reaktionsdistanzen für die zwölf Situationen und die beiden Altersgruppen. Die Junioren zeigen für alle Situationen, ausser dem Kleinkreis mit massivem Kern bei 40 und 80m im Tunnel, eine bessere Reaktionsdistanz. Unter diesen beiden Bedingungen wurde der Knoten nicht von ausserhalb des Tunnels wahrgenommen. Interessanterweise führen die eingeschalteten Rücklichter nicht zu einer generell verbesserten Wahrnehmung des Rückstaus.

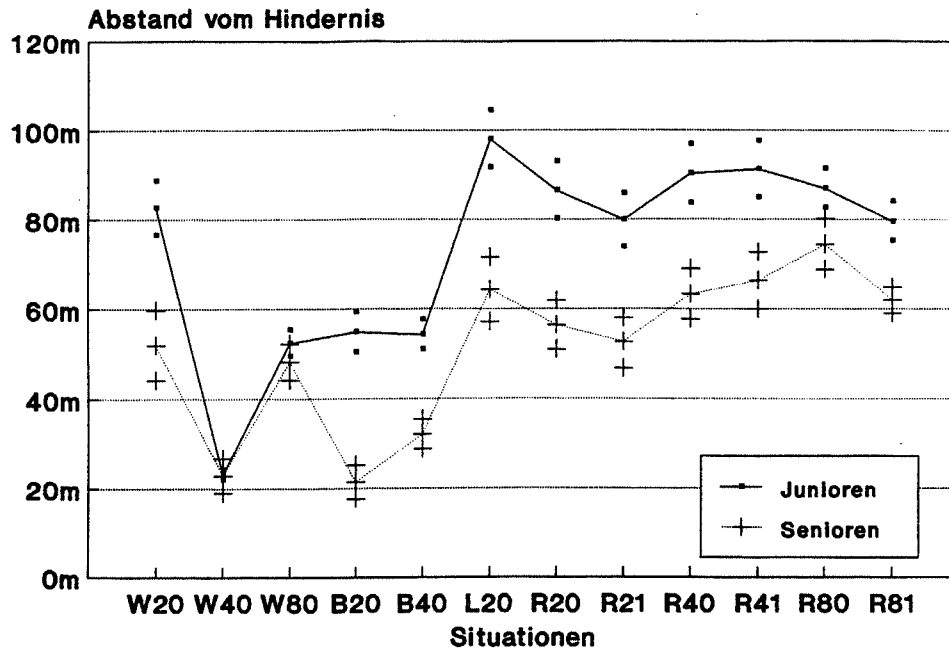


Abb 10.2 Mittelwerte und Standardfehler der Reaktionsdistanzen für die verschiedenen Situationen und Altersgruppen

Abbildung 10.3 zeigt den Einfluss der drei Beleuchtungsbedingungen. Dargestellt sind die Mittelwerte der Reaktionsdistanzen für die zwölf Situationen.

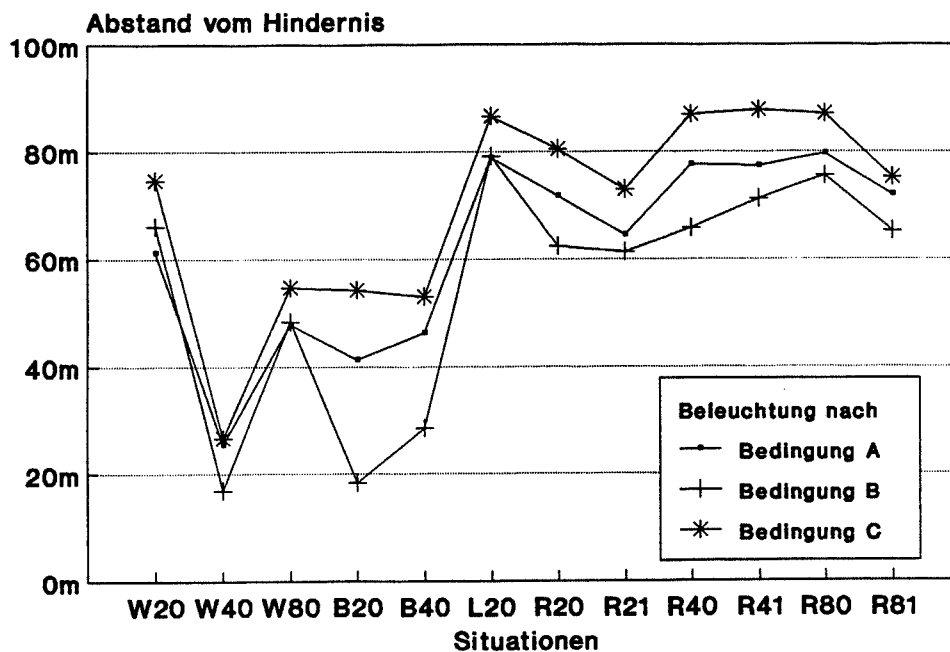


Abb. 10.3 Mittelwerte der Reaktionsdistanzen für die verschiedenen Situationen. W: Kreisel mit massivem Kern, B: Kreisel mit Durchsicht, L: Lichtsignalanlage, R: Rückstau, 2. Ziffer: 0 : ohne Rücklichter, 1: mit Rücklichtern. Die Zahl bedeutet die Distanz vom Tunnelleingang (m).

Bei fast allen Situationen führt die Beleuchtung C zu den besten Leistungen gefolgt von A und B. Diese Reihenfolge entspricht den effektiven Kontrasten an der Position der Vpn.

Die Daten wurden weiter aufgeschlüsselt nach Brillenträgern. Hier konnte keine Varianzanalyse gerechnet werden, da dieser Faktor im Experiment nicht systematisch eingeführt worden war. Abbildung 10.4 zeigt die Mittelwerte der Reaktionsdistanzen für die zwölf Situationen und vier verschiedenen Gruppen von Vpn. Hier zeigen sich deutliche Unterschiede in den Reaktionsdistanzen, indem die Brillenträger in beiden Altersgruppen kürzere Distanzen aufweisen.

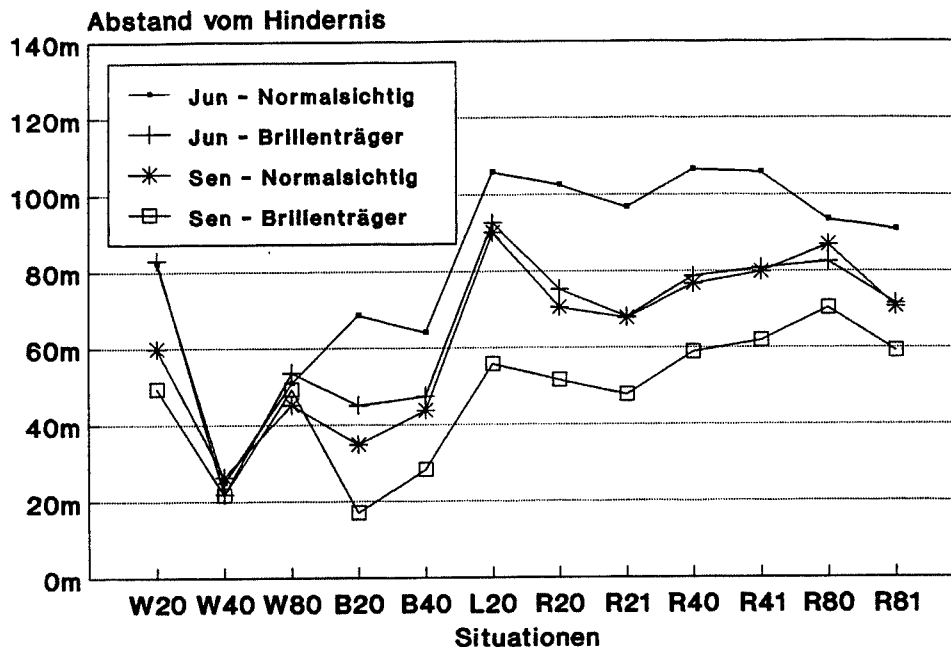


Abb. 10.4 Mittelwerte der Reaktionsdistanzen nach Brillenträgern und Altersgruppen getrennt

Die Darstellung der kumulativen Verteilung der Reaktionsdistanzen für die beiden Altersgruppen erlaubt es, festzustellen, welcher Prozentsatz der beiden Gruppen eine Situation aus einer bestimmten Distanz erkannt hat. Abb. 10.5 zeigt ein Beispiel einer solchen kumulativen Verteilung für den Kleinkreis mit Durchsicht 40m im Tunnel unter Beleuchtungsbedingung C. Im Anhang befinden sich die kumulativen Verteilungen für alle zwölf Situationen und drei Beleuchtungen.

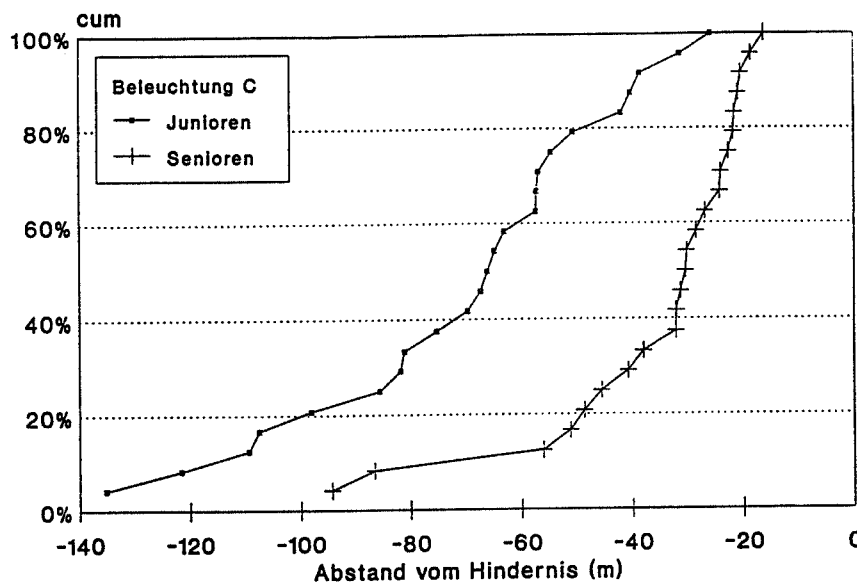


Abb 10.5 Kumulative Verteilungen der Reaktionsdistanzen für den Kleinkreis mit Durchsicht 40m im Tunnel (Beleuchtung C).

10.3.5. Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Daten zeigen signifikante Unterschiede in den mittleren Reaktionsdistanzen hinsichtlich der verschiedenen Knoten, des Rückstaus und ihrer Position im Tunnel. Weiter führen die verschiedenen Beleuchtungsbedingungen, das Alter der Vpn und der Umstand, ob sie eine Brille tragen oder nicht, zu unterschiedlichen Reaktionsdistanzen. Bei den drei Beleuchtungsbedingungen zeigte es sich, dass der durch die Streuleuchtdichte reduzierte Kontrast für das Erkennen massgebend war. Die besten Leistungen wurden unter Bedingung C erreicht gefolgt von A und B. Diese Reihenfolge entspricht der Reihenfolge der effektiven Kontraste.

Die schlechtere Leistung der Senioren gegenüber den Junioren kann zurückgeführt werden auf die schlechteren optischen Bedingungen im Auge, die eine reduzierte Kontrastempfindlichkeit zur Folge haben. Auch die motorische Reaktion, die Teil der Reaktionsdistanz ist, verlangsamt sich im Alter. Brillen scheinen die Leistung ebenfalls zu reduzieren.

Welche Schlüsse man aus dem Experiment hinsichtlich des Erkennens von Knoten und Rückstau unter gegenwärtigen Tunnelbeleuchtungsnormen in der Einfahrtsstrecke ziehen? Nimmt man an, dass die zulässige Höchstgeschwindigkeit in einem Tunnel mit Knoten auf 60km/h gesetzt werden könnte und gibt man noch einen Zuschlag von 10 km/h dazu, so ergäbe das bei einer Längsneigung der Strasse von -3% gemäss SN 640 090a eine Anhaltstrecke von 77 m. Bei dieser Berechnung der Anhaltstrecke wurde die Distanz für 0.7

sec Wahrnehmungsszeit abgezogen, um sie mit den Reaktionsdistanzen des Experiments vergleichen zu können. Betrachtet man in Abbildung 10.3 die mittleren Reaktionsdistanzen unter der Beleuchtungsbedingung A, die hinsichtlich Streuleuchtdichte und Tunnelbeleuchtung realen Bedingungen bei Sonnenlicht entspricht, stellt man fest, dass mit Ausnahme der Lichtsignalanlage die Reaktionsdistanzen kleiner sind als die Anhaltstrecke von 77m nicht ausreichen. In dieser Abbildung sind die Daten über beide Altersgruppen gemittelt. Nimmt man als Kriterium, dass die Reaktionsdistanz von 85% der Seniorenstichprobe mindestens der Anhaltstrecke entsprechen müsste - und dieses Kriterium ist keineswegs zu hoch angesetzt - so stellt man in den kumulativen Verteilungen fest, dass dies für keine der zwölf untersuchten Situationen der Fall ist. Die Sichtbarkeit der Knoten und des Rückstaus in der Einfahrtsstrecke wäre also nach dieser Untersuchung unter den gegenwärtigen Tunnelbeleuchtungsnormen ungenügend.

Der Grenzwert 85% ist aus folgenden Gründen zulässig:

- Die erforderliche Anhaltesichtweite gemäss SN 640 090 a beinhaltet in sich schon gewisse Sicherheitsreserven.
- Für die Projektierung wird ein Sicherheitszuschlag von 10 km/h auf die signalisierte Höchstgeschwindigkeit dazugegeben.
- Ältere Verkehrsteilnehmer senken ihre Fahrzeuggeschwindigkeit bei schwierigen Verkehrssituationen, fahren sehr vorsichtig bzw. meiden für sie schwierige und ungewohnte Situationen grundsätzlich.

Allerdings muss noch angefügt werden, dass im Experiment die Ausmasse der Objekte in Sehwinkel kleiner waren als in der Realität. Wegen der räumlichen Integration könnte das ein Nachteil im Experiment gewesen sein. Nicht in jeder Beziehung ist aber das Experiment auf der konservativen Seite. Dadurch, dass die Vpn ihre ganze Aufmerksamkeit auf das Entdecken der Knoten und des Rückstaus richten, ist ihre Leistung sicher besser als in der realen Situation.

In einem weiteren Experiment musste nun die Wahrnehmbarkeit der Knoten und des Rückstaus in den andern Tunnelzonen untersucht werden (Experiment II). Da die Sichtbarkeit der Knoten und des Rückstaus in der Einfahrtsstrecke ungenügend war, musste weiter untersucht werden, um wieviel die Beleuchtung der Objekte im Tunnel erhöht werden müsste, damit diese von aussen sichtbar wären. Dies wurde im Experiment III untersucht.

10.4. Experiment II: Knoten und Rückstau in der Innenstrecke (E), Ausfahrtsstrecke (F) und in der Anschlussstrecke (H)

10.4.1 Versuchsbedingungen

Die konstanten Versuchsbedingungen waren die gleichen wie im Experiment I. Die folgenden Videoszenen waren ausgewählt worden:

- Innenstrecke (E), 160m im Tunnel:
Kleinkreis mit massivem Kern, Kleinkreis mit Durchsicht,
Rückstau mit und ohne eingeschaltete Rücklichter
- Ausfahrtsstrecke (F), 20m im Tunnel:
Kleinkreis mit Durchsicht, Rückstau mit und ohne
eingeschaltete Rücklichter
- Anschlussstrecke (H), 20 m ausserhalb des Tunnels:
Kleinkreis mit Durchsicht, Rückstau ohne eingeschaltete
Rücklichter

Diesen neun Szenen wurde noch eine Szene ohne Hindernisse hinzugefügt.

Helligkeit und Kontrast am Bildschirm wurden in drei Stufen über einen grossen Teil des Variationsbereichs des Bildschirms variiert. Bedingung A wies grosse, B mittlere und C kleine Leuchtdichten auf. Dies ergab die folgenden Kontraste zwischen dem hellsten und dunkelsten Bereich des Referenzbildes: A: 33.7, B: 37.0 und C: 17.8. Die Leuchtdichten der Objekte und des Tunnelhintergrunds unter der Bedingung B entsprachen weitgehend den mit dem CapCalc-System im Stutzegg Tunnel gemessenen Werten.

10.4.2 Versuchspersonen

Am Experiment nahmen je 18 Vpn aus zwei Altersgruppen teil. Alle Vpn hatten schon am ersten Experiment teilgenommen. Der Altersbereich der Senioren betrug 66-75 Jahre bei einem Mittelwert von 70.2 Jahren, derjenige der Junioren 25-48 Jahre bei einem Mittelwert von 30.8 Jahren. Unter den Senioren gab es 8 unter den Junioren 6 Brillenträger. Alle Vpn fahren aktiv Auto.

10.4.3 Versuchsdurchführung

Die Durchführung war dieselbe wie im Experiment I. Nachdem alle Hindernisse den Vpn gezeigt worden waren, folgte ein Übungsdurchgang. Danach begann die Experimentalphase mit der Präsentation der 10 Szenen unter drei verschiedenen Beleuchtungen. Die Reihenfolge der Szenen war randomisiert mit der Einschränkung, dass sich ein realistischer Ablauf ergab, der in einer Abfolge von Süd-Nord- und Nord-Süd-Durchfahrten bestand. Die Beleuchtungen wurden blockweise präsentiert. Das ganze Experiment dauerte ca. 35 Minuten.

10.4.5 Resultate

Um Mittelwertsunterschiede zu überprüfen, wurde mit den Reaktionsdistanzen eine dreifache Varianzanalyse (Situationen x Beleuchtung x Altersgruppen) gerechnet. Dabei ergaben sich die folgenden statistisch signifikanten Haupteffekte: Alter ($p < 0.05$) und Situationen ($p < 0.001$). Zusätzlich waren die folgenden Interaktionen statistisch signifikant: Altersgruppen x Situationen ($p < 0.001$) und Beleuchtung x Situationen ($p < 0.001$).

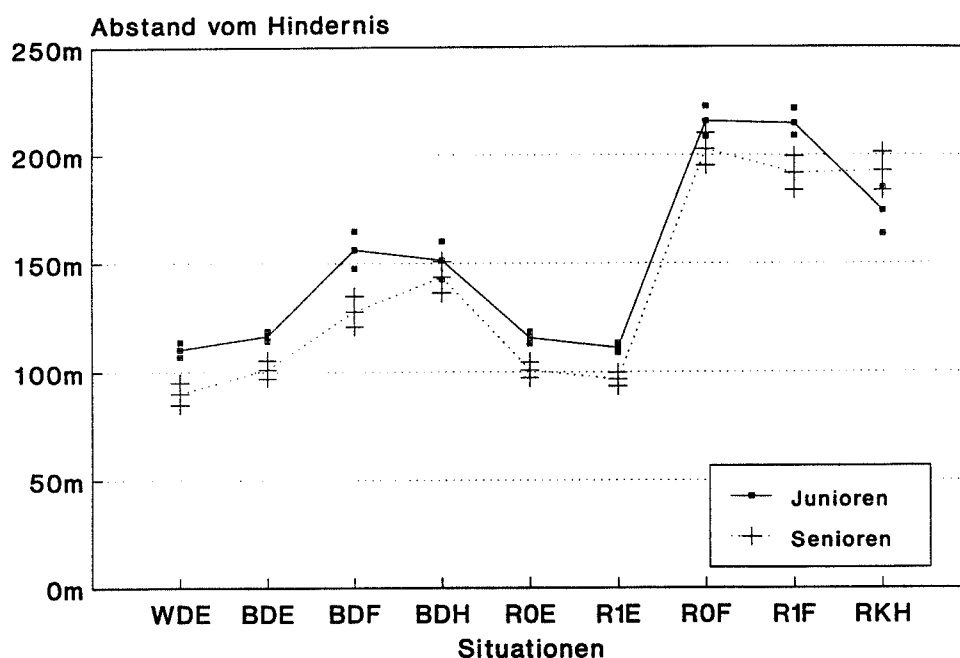


Abb 10.6 Mittelwerte und Standardfehler der Reaktionsdistanzen. WD: Kreisel mit massivem Kern, BD: Kreisel mit Durchsicht, R0: Rückstau mit ausgeschaltetem Rücklicht, R1: Rückstau mit eingeschaltetem Rücklicht. Der dritte Buchstabe bezeichnet die Tunnelzone.

Wieder zeigte sich ein Alterseffekt. Die Junioren reagierten über alle Situationen gemittelt 13.2 m früher auf die Hindernisse als die Senioren. Abb 10.6 zeigt die Mittelwerte der Reaktionsdistanzen und die Standardfehler für beide Altersgruppen und alle Situationen. Die Mittelwerte der Reaktionsdistanzen für die Knoten und den Rückstau in der Innenzone bewegen sich zwischen 100 und 120m. In den Zonen F und H wird der Kleinkreis im Mittel aus einer Distanz von etwa 150 m wahrgenommen. Am besten wird der Rückstau in der Ausfahrtsstrecke wahrgenommen wegen des Silhouetteneffekts. Hier betragen die mittleren Reaktionsdistanzen zwischen 200 und 220m.

Abb 10.7 zeigt die mittleren Reaktionsdistanzen aufgeschlüsselt nach Brillenträgern und Nicht-Brillenträgern. Hier zeigen sich nicht mehr die dieselben Unterschiede wie im Experiment I. Sie sind geringer und zeigen auch nicht mehr einen Trend der Brillenträger zu schlechterer Wahrnehmungsleistung.

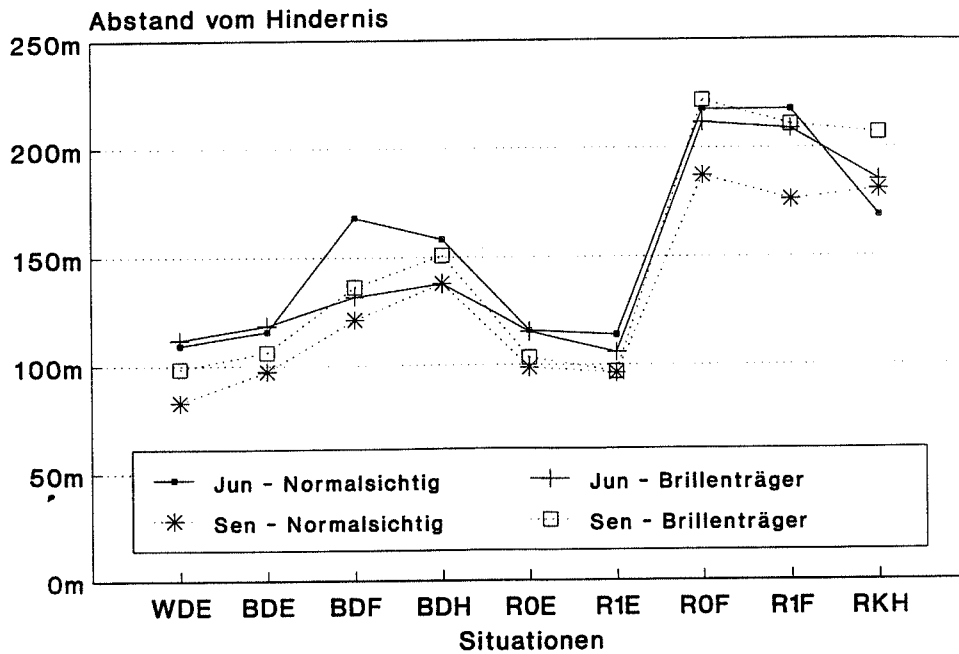


Abb 10.7 Mittelwerte der Reaktionsdistanzen nach Brillenträgern und Altersgruppen getrennt

Abb 10.8 zeigt den Einfluss der drei Beleuchtungsbedingungen, die sich je nach Situation unterschiedlich ausgewirkt haben. In der Innenstrecke (E) ergibt sich kein Unterschied in der Reaktionsdistanz zwischen Bedingung A und B. Bedingung C hingegen führt bei allen Objekten ausser beim Rückstau mit Rücklicht zu deutlich kürzeren Reaktionsdistanzen. Dies entspricht den Kontrasten, die durch die drei Beleuchtungsbedingungen erzeugt werden.

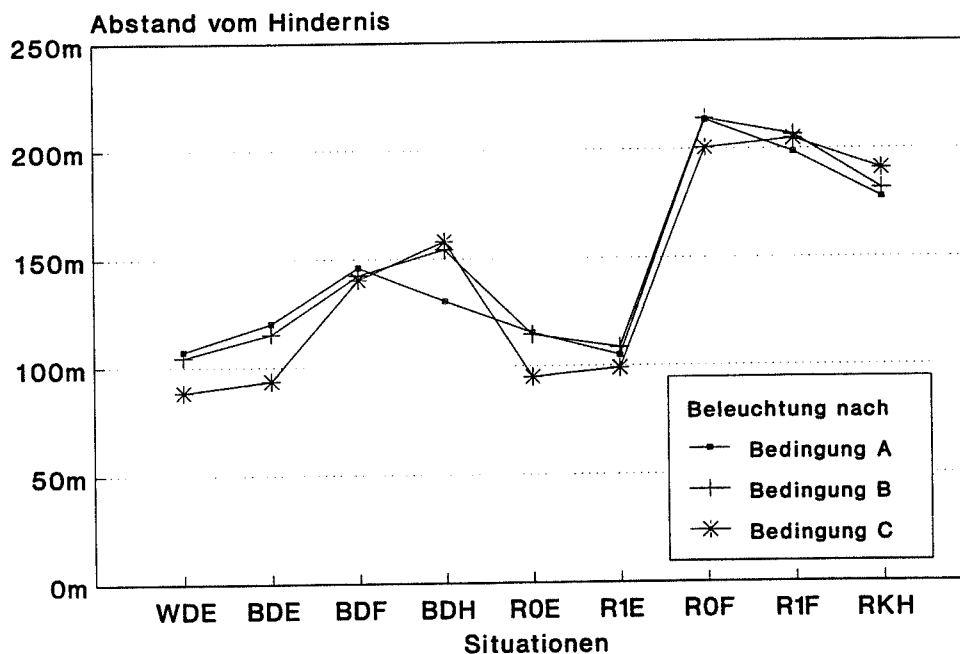


Abb 10.8 Mittelwerte der Reaktionsdistanzen für die drei Beleuchtungsbedingungen

In den Tunnelzonen F und H haben sich die Beleuchtungsbedingungen weniger bzw. gar nicht auf die Kontraste der Objekte zum Hintergrund ausgewirkt. Entsprechend finden sich auch kaum Unterschiede in den mittleren Reaktionsdistanzen ausser beim Kleinkreis mit Durchsicht (BDG) in der Zone H.

10.4.6 Diskussion und Schlussfolgerungen

Um zu entscheiden, ob die Sichtbarkeit der Knoten und des Rückstaus genügend ist, werden dieselben Kriterien angewendet wie im Experiment I. Die Anhaltestrecke bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h beträgt 77m, wenn sie für die Wahrnehmungszeit von 0.7 sec korrigiert ist. Die Reaktionsdistanz von 85% der Seniorenstichprobe müsste diesen Wert erreichen oder überschreiten. Die kumulativen Verteilungen der Reaktionsdistanzen, die sich im Anhang befinden, zeigen, dass die Anhaltestrecke in der Ausfahrtsstrecke F und in der Anschlussstrecke H deutlich überschritten wird. In der Innenstrecke E dagegen sind die Reaktionsdistanzen für den Kleinkreis mit massivem Kern unter allen drei Beleuchtungsbedingungen kürzer als die Anhaltestrecke. Unter Bedingung B, die den Verhältnissen im Stutzeggtunnel entspricht, beträgt die Reaktionsdistanz 60m. Die gestreifte Wand, die den massiven Kern darstellte, ist relativ schlecht sichtbar, da sie durch die Gegenstrahlbeleuchtung ungünstig beleuchtet wird. Um die Sichtbarkeit zu erhöhen, müsste der massive Kern von vorne mit Scheinwerfern beleuchtet werden.

Für den Kleinkreis mit Durchsicht und den Rückstau sind die Reaktionsdistanzen unter Beleuchtung B ausreichend.

10.5 Experiment III: Knoten und Rückstau in der Einfahrtsstrecke (D1) unter Variation der Kontraste

10.5.1 Versuchsbedingungen

Das Experiment sollte Aufschluss geben über den Zusammenhang zwischen dem Kontrast der Hindernisse und der Reaktionsdistanz einer Stichprobe von Senioren. Der experimentellen Variation von Kontrasten sind technische Grenzen gesetzt. Der Bereich, über den ein Bildschirmkontrast variiert werden kann, ist relativ gering und wurde schon im ersten Experiment ausgeschöpft. Eine Veränderung der Intensität einzelner Pixel des Videobildes mit Hilfe eines Computers schied wegen des zu grossen Aufwands aus.

Realisiert wurde eine andere Lösung, bei der die Kontraste durch eine Reduktion der Streuleuchtdichte erhöht wurden. Aus einem funktionalen Zusammenhang zwischen Kontrast und Reaktionsdistanz konnte dann für einige Fälle abgeleitet werden, wie hoch der Kontrast im Tunnel für eine gegebene Höchstgeschwindigkeit und Schleierleuchtdichte sein müsste.

Die Versuchsanlage war dieselbe wie in den beiden vorangegangenen Experimenten. Es wurden dieselben Szenen verwendet wie im ersten Experiment zur Einfahrtsstrecke. Es waren dies: Der Kleinkreis mit massivem Kern 20, 40 und 80m im Tunnel, der Kleinkreis mit Durchsicht 20 und 40m im Tunnel, die Lichtsignalanlage 20m im Tunnel, der Rückstau mit und ohne eingeschaltete Lichter 20, 40 und 80m im Tunnel. Zusätzlich wurden zwei Szenen ohne Hindernisse verwendet. Die 14 Szenen wurden mit 6 Stufen von Streuleuchtdichten zwischen 96.7 und 0 cd/m² kombiniert. Erzeugt wurden sie durch Variation der Leuchtdichte der Peripherie.

Weiter wurde die Beleuchtungsbedingung B aus dem ersten Experiment in die Analyse miteinbezogen. Dort hatte die Streuleuchtdichte bei sonst gleichen Bedingungen 188 cd/m² betragen. Diese Variation der Streuleuchtdichte führte zu den folgenden Veränderungen in ausgewählten Kontrasten:

Kleinkreis mit massivem Kern	20 m (W20):	0.120 - 0.900
	40 m (W40):	0.014 - 0.130
	80 m (W80):	0.035 - 0.186
Kleinkreis mit Durchsicht	20 m (B20):	0.043 - 0.400
	40 m (B40):	0.030 - 0.550
Rückstau ohne Rücklichter	20m (R200):	0.175 - 1.070
	40m (R400):	0.235 - 2.387
	80m (R800):	0.365 - 2.780
Rückstau mit Rücklichtern	20m (R201):	0.250 - 2.120
	40m (R401):	0.237 - 1.845
	80m (R801):	0.390 - 2.180
Lichtsignalanlage	20m (LSA):	0.622 - 22.300

Bei den hier angegebenen Kontrasten handelt es sich um Mittelwerte von Kontrasten, die zwischen bestimmten Regionen der Objekte und dem benachbarten Hintergrund nach folgender Formel berechnet wurden:

$$C = (|L_{ob} - L_h|) / L_h$$

wobei L_{ob} Leuchtdichte des Objekts und L_h Leuchtdichte des Hintergrunds bedeutet. Die Leuchtdichten wurden mit einem Spectra Pritchard Photometer gemessen, das uns vom Amt für Messwesen freundlicherweise zur Verfügung gestellt worden war. Der Messöffnungswinkel betrug 5 Bogenminuten. Da das Vorzeichen des Kontrasts entlang der Kontur der Objekte variierte, wurde die absolute Differenz verwendet.

Bei dem Kleinkreisel mit massivem Kern gingen 6 Kontrastwerte, beim Kleinkreisel mit Durchsicht 11 Kontrastwerte entlang der Kontur in den Mittelwert ein. Beim Rückstau wurden 5 Kontraste zwischen dem Auto und dem Hintergrund berechnet und gemittelt, wobei hier die Werte aufgrund von Reflexen der Lampen sehr stark variierten und es sich die Frage stellt, ob ein solch inhomogenes Gebilde wie ein Auto sinnvollerweise durch einen einzelnen Kontrastwert charakterisiert werden kann. Bei der Lichtsignalanlage wurden die Kontraste zwischen Signal und Hintergrund in vier Richtungen gemessen und gemittelt.

10.5.2 Versuchspersonen

In diesem Experiment wurde nur noch eine Stichprobe von 24 Senioren verwendet. Ihr Alter variierte zwischen 60 und 75 Jahren mit einem Mittelwert von 66.75 Jahren. Alle Vpn besitzen den Führerschein und fahren aktiv Auto. Unter den Versuchspersonen waren 16 Brillenträger.

10.5.3 Versuchsdurchführung

Das Experiment lief gleich ab wie die beiden vorangegangenen. Die Szenen wurden in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Die Streulichbedingungen wurden blockweise dargeboten aber über die Vpn randomisiert. Das ganze Experiment dauerte ca. 55 Minuten.

10.5.4 Resultate

Um Mittelwertsunterschiede zu prüfen, wurde mit den Daten (Reaktionsdistanzen) eine Varianzanalyse (Situationen x Beleuchtung) mit wiederholter Messung in den Faktoren "Situationen" und "Beleuchtung" gerechnet. Dabei waren beide Haupteffekte, Situationen ($p < 0.001$) und Beleuchtung ($p < 0.001$) statistisch hochsignifikant. Ebenfalls hochsignifikant war die Interaktion "Situationen x Beleuchtung" ($p < 0.001$).

In Abb. 10.9 sind die Mittelwerte der Reaktionsdistanzen für die zwölf Situationen dargestellt. Die sechs Kurven entsprechen den sechs Streuleuchtdichtebedingungen. Generell gilt, wie zu erwarten war, dass tiefere Streuleuchtdichten zu besseren Reaktionsdistanzen geführt haben, wobei die drei tiefsten Streuleuchtdichten kaum zu Unterschieden geführt haben. Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass sich die Variation der Streuleuchtdichte bei verschiedenen Situationen unterschiedlich stark auf die Reaktionsdistanz ausgewirkt hat. Die grössten Unterschiede finden sich für den Kleinkreisel mit Durchsicht bei 20 und 40m im Tunnel.

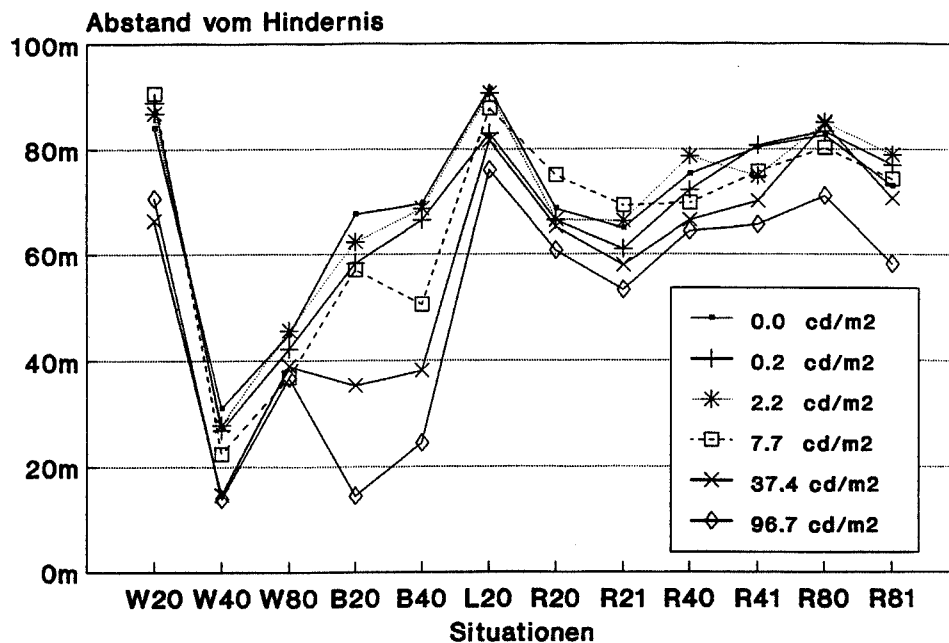


Abb 10.9 Reaktionsdistanzen für verschiedene Situationen und Streuleuchtdichten.

In den Abbildungen 10.10 und 10.11 wurden die Mittelwerte der Reaktionsdistanzen für Brillenträger bzw. Nicht-Brillenträger aufgeschlüsselt. Abb. 10.10 zeigt die Mittelwerte für die verschiedenen Situationen gemittelt über die Streuleuchtdichten, Abb. 10.11 die Mittelwerte für die verschiedenen Streuleuchtdichten gemittelt über die Situationen. Im Gegensatz zum ersten Experiment zeigen sich keine grossen oder systematischen Unterschiede in der Reaktionsdistanz zwischen den 16 BrillenträgerInnen und den 8 Nicht-BrillenträgerInnen. Dieses unterschiedliche Resultat dürfte eine Folge der Stichprobenauswahl sein.

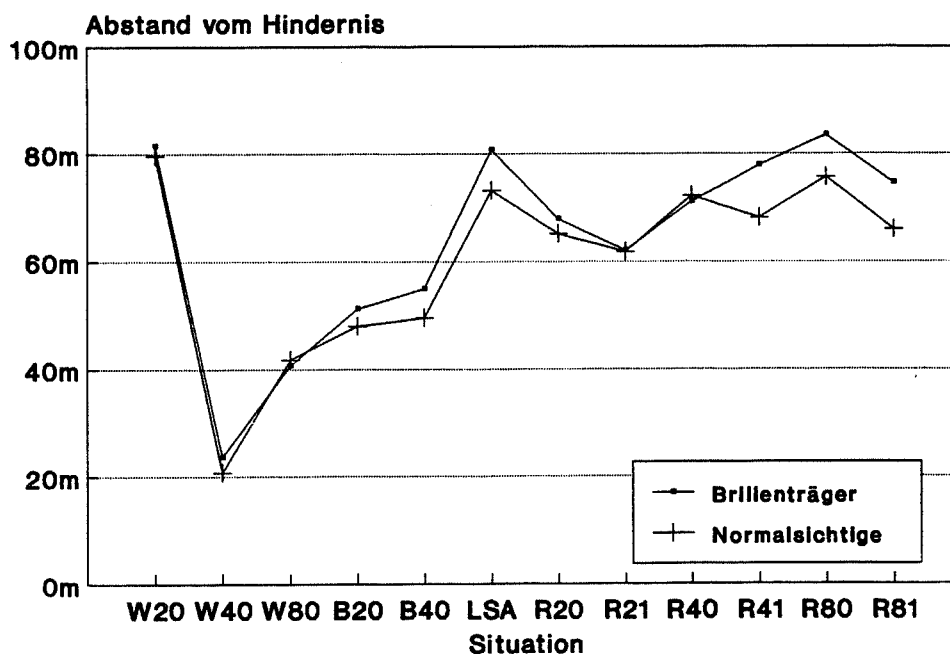


Abb 10.10 Mittelwerte der Reaktionsdistanzen nach Brillenträgern getrennt, gemittelt über die Streuleuchtdichten

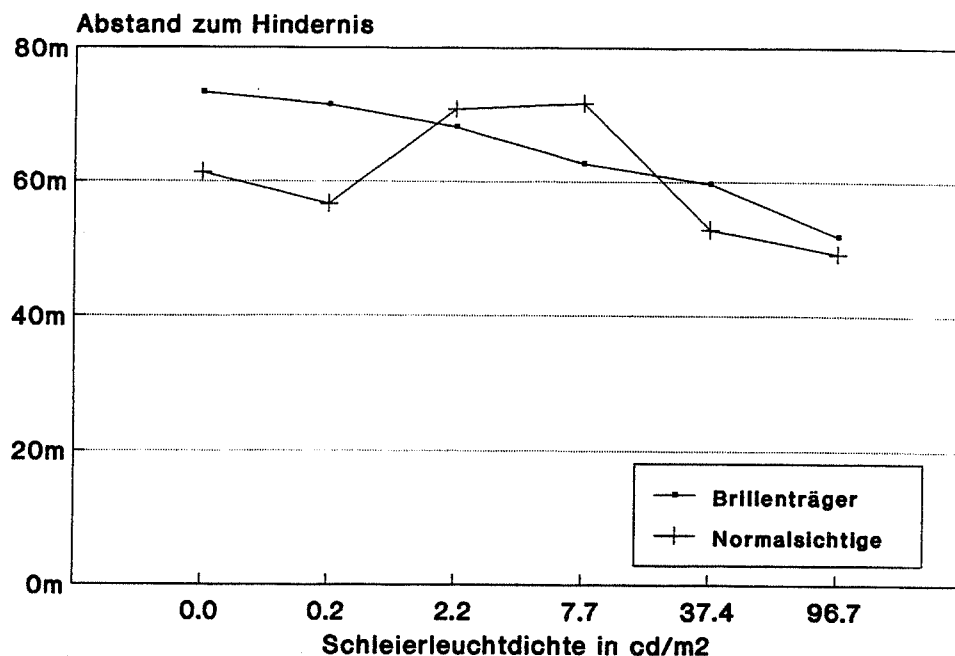


Abb 10.11 Mittelwerte der Reaktionsdistanzen nach Brillenträgern getrennt, gemittelt über die Situationen

Im Anhang 4 befinden sich die kumulativen Verteilungen der Reaktionsdistanzen. Durch polynomiale Approximation an die kumulative Verteilung wurde die numerische Reaktionsdistanz für 85% der Stichprobe bestimmt. Diese Reaktionsdistanzen sind in Tabelle 8.1 dargestellt. Den 6 Beleuchtungsbedingungen wurde die Bedingung B aus dem ersten Experiment beigelegt. Dort hatte die Streuleuchtdichte bei sonst gleichen Bedingungen 188 cd/m² betragen.

Tab 10.1 Reaktionsdistanzen in Meter für 85% der Senioren bei verschiedenen Streuleuchtdichten und Situationen.

Situationen	Streuleuchtdichte (cd/m²)						
	0.0	0.2	2.2	7.7	37.4	96.7	188.0
W20	65	65	57	61	35	36	9
W40	23	17	21	14	9	9	8
W80	36	37	37	27	34	29	34
B20	38	25	36	34	6	1	0
B40	50	29	41	28	17	17	18
R200	47	44	48	49	42	39	23
R201	44	28	43	48	32	33	24
R400	48	55	50	54	41	36	33
R401	59	57	48	62	46	38	28
R800	53	56	60	61	54	53	49
R801	60	54	52	55	50	44	47
LSA20	53	34	33	53	38	31	26

W: Kleinkreis mit massivem Kern, B: Kleinkreis mit Durchsicht, LSA: Lichtsignalanlage, R: Rückstau. Die Zahlen bedeuten die Distanz in Metern vom Tunnelportal. Letzte Ziffer beim Rückstau: 0 bedeutet Rücklicht ausgeschaltet, 1 Rücklicht eingeschaltet.

Die Tabelle zeigt, dass in keinem Fall 85% der Stichprobe die Knoten und den Rückstau aus der geforderten Anhaltedistanz von 77m wahrgenommen hatten. In einem weiteren Schritt wurde nun die Beziehung zwischen dem oben beschriebenen mittleren Kontrast des zu entdeckenden Objekts und der Reaktionsdistanz für alle Situationen mit Hilfe der Regressionsanalyse untersucht. In einigen Fällen ergab sich keine Beziehung, in andern eine lineare, aus der sich dann ein mittlerer Kontrast für die Anhaltestrecke von 77m abschätzen liess. Diese als massgebend festgelegte Anhaltestrecke gilt nach SN 640 090a für 70km/h und -3% Längsneigung der Strasse. Die Reaktionszeit von 2 sec wurde um 0.7 sec verkürzt, da die Reaktionsdistanz im Experiment die Entdeckungszeit für das Hindernis ebenfalls nicht enthält.

10.5.5 Diskussion

Die Variation der Streuleuchtdichte bewirkte eine grosse Variation der Kontraste. Für einige Situationen konnten aber die Kontraste trotz Reduktion der Streuleuchtdichte auf Null nicht so stark angehoben werden, dass die Hindernisse von ausserhalb des Tunnels sichtbar waren. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in diesen Fällen bereits der Videofilm einen starken Schleier aufwies. Aus diesen Daten konnten dann keine Aussagen bezüglich der Beleuchtung in der Tunnelzone D1 abgeleitet werden.

Der Bereich der Kontraste, die im Experiment realisiert wurden, schliesst auch die Werte ein, die für die Knoten und den Rückstau im Stutzeggtunnel ermittelt wurden. Die niedrigsten dort bei Sonnenlicht festgestellten Kontraste liegen in der Grösse zwischen denen, die im Experiment mit den beiden höchsten Streuleuchtdichten erzielt wurden.

Im folgenden wird die Beziehung zwischen Kontrast und Reaktionsdistanz im Hinblick auf die benötigte Anhaltestrecke von 77m für die einzelnen Situationen getrennt diskutiert.

Kleinkreis mit massivem Kern

- 20m im Tunnel: der Kreis wurde in allen Fällen ausser bei der höchsten Streuleuchtdichte von ausserhalb des Tunnels wahrgenommen und es ergab sich eine lineare Beziehung zwischen dem oben definierten mittleren Kontrast zwischen Objekt und Hintergrund und der Reaktionsdistanz. Gemäss dieser Beziehung müsste dieser Kontrast für eine Anhaltestrecke von 77m 0.94 betragen.

- 40m im Tunnel: der Kreis wurde kaum von ausserhalb des Tunnels wahrgenommen. Der Anteil der Personen, denen dies gelang, sinkt mit zunehmender Streuleuchtdichte von 18% auf 0%. Dies ist nicht verwunderlich, da die mittleren Kontraste zwischen der Wand und dem Hintergrund (0.014 - 0.13) und auch zwischen den weissen und schwarzen Streifen (0.007 - 0.078) sehr gering waren und teilweise unter der Schwelle für einfache Laborreize lagen. Nach dem Verschwinden des Streulichts beim Einfahren in den Tunnel wurde dann der Kleinkreis nicht unter allen Bedingungen gleichzeitig erkannt, sondern es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen den Beleuchtungsbedingungen und der Reaktionsdistanz, derart, dass mit zunehmender Streuleuchtdichte der Knoten später erkannt wird. Dies wird als Folge der Dunkeladaptation interpretiert. Je höher die Ausgangsleuchtdichte ist, um so länger dauert das Wiedererlangen der reduzierten Sensitivität.

- 80m im Tunnel: der Kreisel wurde in keinem Fall von aussen erkannt. Die Reaktionsdistanzen liegen alle zwischen 27 und 37m, obwohl die Kontraste etwa denen des Kreisels in der Innenzone E (160m) entsprechen, der von 85% der Senioren aus einer Distanz von 60m entdeckt wurde. Auch hier scheint sich die mangelnde Dunkeladaptation auszuwirken. Allerdings zeigte sich kein Zusammenhang zwischen Streuleuchtdichte und Reaktionsdistanz.

Im Einfahrtsbereich des Tunnels, der durch die Anhaltesichtweite definiert ist, wies der massive Kern des Kreisels bei der heute bestehenden Tunnelbeleuchtung als Folge der Streuleuchtdichte sehr geringe Kontraste auf, sowohl zwischen den weissen und schwarzen Streifen wie auch gegenüber dem Hintergrund. Im Experiment reichten diese Kontraste nicht für ein rechtzeitiges Erkennen. Im Fall von W20 wurde eine Beziehung zwischen Streuleuchtdichte und Kontrast gefunden, die es erlaubt, den notwendigen Kontrast für eine Reaktionsdistanz von 77m abzuschätzen. Danach sollte der mittlere Kontrast zwischen dem massiven Kern des Kreisels und dem Hintergrund 0.94 betragen. Daraus lassen sich für eine gegebene Schleierleuchtdichte und Hintergrundsleuchtdichten die notwendigen Kontraste und Leuchtdichten des Objekts berechnen.

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

C bezeichnet den Kontrast zwischen Objekt und Hintergrund im Tunnel, C_{red} den effektiven Kontrast im Auge, L_s die Schleierleuchtdichte und L_h die Hintergrundsleuchtdichte.

Für eine Schleierleuchtdichte von zum Beispiel 300 cd/m² ergeben sich die folgenden Werte für ausgewählte Hintergrundsleuchtdichten:

L_h (cd/m ²)	100	80	50	20
C	3.76	4.46	6.58	15.04
L_{ob} (cd/m ²)	476	436	379	321

L_{ob} bezeichnet die Leuchtdichte, die das Objekt aufweisen müsste, um diesen Kontrast zum Hintergrund zu produzieren.

Die Fälle, in denen die Hindernisse erst im Tunnel entdeckt wurden, zeigen, dass die Dunkeladaptation in der Einfahrzone noch nicht abgeschlossen zu sein scheint. Dieses Resultat stimmt überein mit den Untersuchungen von Bourdy et al. (1987,1988). Danach müsste man sich bei Knoten im Bereich der Übergangszone überlegen, ob eine Absenkung der Leuchtdichten schon nach der halben Länge der Einfahrzonen, wie das nach den heutigen Tunnelbeleuchtungsnormen der Fall ist, zulässig ist.

Kleinkreisel mit freier Durchsicht

- 20m im Tunnel: der Kreisel wurde bis auf die drei Bedingungen mit den höchsten Streuleuchtdichten von aussen erkannt. Die Distanzen sind aber alle ungenügend. Aufgrund der linearen Beziehung zwischen dem mittleren Kontrast des Objekts zum Hintergrund und der Reaktionsdistanz müsste dieser Kontrast 0.71 betragen, für eine Anhaltestrecke von 77m. Daraus ergeben sich nach der obigen Berechnung für eine Schleierleuchtdichte von 300 cd/m² die folgenden Werte:

L_h (cd/m ²)	100	80	50	20
C	2.84	3.37	4.97	11.36
L_{ob} (cd/m ²)	384	350	298	247

- 40m im Tunnel: der Kreisel wurde für die drei niedrigsten Streuleuchtdichten von 80% bis 85% der Stichprobe von ausserhalb des Tunnels erkannt, für die andern Streuleuchtdichten liegt der Anteil bei 30% bis 5%. Es besteht eine lineare Beziehung zwischen dem mittleren Kontrast des Objekts zum Hintergrund und der Reaktionsdistanz, aus der sich ein Kontrast von 1.02 für eine Reaktionsdistanz von 77m ableiten lässt. Für das Beispiel einer Schleierleuchtdichte von 300 cd/m² erhält man dann die folgenden Kontraste:

L_h (cd/m ²)	100	80	50	20
C	4.08	4.84	7.14	16.32
L_{ob} (cd/m ²)	508	467	407	346

Hier ist diese Berechnung nicht ganz gerechtfertigt, da das Objekt nicht unter allen Bedingungen von ausserhalb des Tunnels erkannt wurde.

Rückstau

- 20m im Tunnel: der Wagen wurde mit und ohne Rücklichter unter allen Bedingungen von ausserhalb des Tunnels erkannt. Aus der linearen Beziehung zwischen dem mittleren Kontrast des Autos zum Hintergrund und der Reaktionsdistanz lässt sich für die Anhaltstrecke von 77m ein Kontrast von 1.93 im Fall der ausgeschalteten Rücklichter berechnen. Im Fall der eingeschalteten Rücklichter bestand keine statistisch signifikante Beziehung.

- 40m im Tunnel: ausser bei den zwei grössten Streuleuchtdichten wurde der Wagen mit und ohne Rücklichter von ausserhalb des Tunnels erkannt. Im Fall der ausgeschalteten Rücklichter ergab die lineare Beziehung für die Anhaltstrecke von 77m einen mittleren Kontrast des Autos zum Hintergrund von 4.37, im Falle der eingeschalteten Rücklichter von 2.54.

- 80m im Tunnel: der Wagen wurde mit und ohne Rücklichter unter keiner Bedingung von ausserhalb des Tunnels wahrgenommen, sondern zwischen 20m und 35m nach dem Tunnelleingang. Die Reaktionsdistanz betrug zwischen 45m und 60m. Vergleicht man diese Werte mit denen für den Rückstau in der Innenzone unter Beleuchtung B, die je nach Rücklichtbedingung 83m bzw. 94m betrugen, so stellt man auch hier einen Effekt der Dunkeladaptation fest.

Lichtsignalanlage

- 20m im Tunnel: das Lichtsignal wurde unter allen Bedingungen von aussen entdeckt. Es besteht keine statistisch signifikante Beziehung zwischen dem mittleren Kontrast des Signals zum Hintergrund und der Reaktionsdistanz.

Die Entdeckungsbedingungen auf dem Videofilm waren für das Lichtsignal viel schlechter als in Wirklichkeit. Die Farbe war wegen der Überbelichtung der CCD-Sensoren kaum sichtbar. Auch spielt bei den geringen Ausmassen des Signals die gegenüber der Wirklichkeit im Film reduzierte Grösse für die Entdeckbarkeit eine Rolle. Von den Kontrasten her gesehen gibt es keinen Grund, warum das Lichtsignal im Tunnel schlechter als auf offener Strecke sichtbar sein sollte.

10.6 Zusammenfassung der Resultate

In zwei Laborexperimenten wurde die Sichtbarkeit von Knoten und Rückstau in den verschiedenen Tunnelzonen mit Hilfe von Videofilmen untersucht. Bei den Knoten handelte es sich um einen Kleinkreis mit massivem Kern, einen Kleinkreis mit Durchsicht und um eine Lichtsignalanlage. An den Versuchen nahm eine Stichprobe von jungen (Mittelwert 28.7 Jahre) und älteren Leuten (Mittelwert 68.2 Jahre) teil. Die Beleuchtungsbedingungen wurden variiert, sie entsprachen annähernd denen in der Realität.

Über alle Bedingungen hinweg zeigten die jungen Leute im Durchschnitt eine signifikant bessere Leistung als die älteren, indem sie die Knoten und den Rückstau aus grösserer Distanz erkannten. Am schwierigsten zu erkennen waren die Knoten und der Rückstau in der Einfahrtsstrecke (D1) des Tunnels. Durch die zusätzliche Streuleuchtdichte waren die Kontraste der Objekte zum Tunnelhintergrund sehr gering, so dass sie kaum von ausserhalb des Tunnels wahrgenommen wurden. Nach der Tunneleinfahrt wurde das Erkennen der Objekte kurzzeitig erschwert durch Dunkeladaptation.

Als Kriterium für eine ausreichende Sichtbarkeit der Knoten und des Rückstaus wurde das Erkennen dieser Objekte durch 85% der Stichprobe der älteren Leute aus einer vorgegebenen Distanz gesetzt. Diese Distanz wurde definiert durch die Anhaltstrecke bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h (60km/h signalisierte Höchstgeschwindigkeit + 10km/h Sicherheitszuschlag) und einer Längsteilung der Strasse von -3%. In der Einfahrtsstrecke wurde dieses Kriterium weder für die Knoten noch für den Rückstau erreicht. In der Ausfahrtsstrecke (F) und in der Anschlussstrecke (H) hingegen wurde es deutlich überschritten. In der Innenstrecke (E) wurde das Kriterium mit Ausnahme des Kleinkreisels mit massivem Kern erreicht.

Um abschätzen zu können, wie die Beleuchtung in der Einfahrtsstrecke verändert werden müsste, um das Kriterium zu erreichen, wurde ein drittes Experiment mit einer Stichprobe von älteren Leuten (Mittelwert 66.8 Jahre) durchgeführt. In dieser Untersuchung wurden die Kontraste im Tunnel durch Variation der Streuleuchtdichte verändert. Aus technischen Gründen war es jedoch nicht möglich, die Kontraste so zu erhöhen, dass das Kriterium erreicht wurde. Immerhin ergab sich in einigen Fällen eine systematische Beziehung zwischen dem Kontrast der Objekte zum Tunnelhintergrund und der Distanz, aus der 85% der Stichprobe das Objekt erkannten. Aus dieser Beziehung liess sich dann der notwendige Kontrast für die Kriteriumsdistanz abschätzen. Aus diesem Kontrast kann dann in einem weiteren Schritt unter Annahme einer Schleierleuchtdichte und Hintergrundleuchtdichten im Tunnel die notwendige mittlere Leuchtdichte des Objekts berechnet werden.

Für eine Schleierleuchtdichte von 300 cd/m² und verschiedene realistische Tunnelhintergrundleuchtdichten ergaben sich so Leuchtdichten von bis zu 500 cd/m² für die Kleinkreise. Diese Werte könnten zwar durch direkte Beleuchtung mit Scheinwerfern unter grossem Aufwand erreicht werden, hingegen ist es kaum möglich, die erforderlichen Kontrastbedingungen für den Rückstau zu erreichen.

10.7 Schlussfolgerungen aus den Experimenten

In den Experimenten war mit Stichproben von jüngeren und älteren Versuchspersonen die Sichtbarkeit von Knoten und Rückstau unter gegenwärtigen Beleuchtungsbedingungen in den verschiedenen Tunnelzonen untersucht worden. Dabei wurde gefunden, dass die älteren Leute allgemein Knoten und Rückstau signifikant später erkannten als die jüngeren Leute. Dies zeigt, dass zur Definition von Beleuchtungsnormen die Population der älteren FahrerInnen herangezogen werden sollte.

Als Kriterium für eine ausreichende Sichtbarkeit wurde festgelegt, dass 85% der Stichprobe der älteren FahrerInnen die Knoten und den Rückstau mindestens aus der Anhaltedistanz für 70 km/h und eine Längsneigung der Strasse von -3% erkennen mussten. Dieses Kriterium wurde für Kleinkreisel und Rückstau in der Ausfahrtsstrecke, in der Anschlussstrecke und in der Innenstrecke mit Ausnahme des Kleinkreisels mit massivem Kern erfüllt. Mit einer Erhöhung der Beleuchtung im Umfeld des Knotens, die ja nach gegenwärtigen Tunnelbeleuchtungsnormen vorgesehen wäre, oder durch eine Vergrößerung des Kontrasts des Objekts zum Hintergrund durch direkte Beleuchtung mit Scheinwerfern könnte das Kriterium sicher erreicht werden. Ausserdem könnte die räumliche Frequenz des Streifenmusters so gewählt werden, dass die Sensitivität für das Muster aus der Anhaltedistanz maximal wäre.

Bezüglich Einfahrtsstrecke konnte in den Versuchen trotz Erhöhung des Kontrasts das Kriterium für Knoten und Rückstau nicht erreicht werden. Aus systematischen Beziehungen zwischen Reaktionsdistanz und Kontrast der Objekte im Tunnel, die sich in einigen Fällen ergaben, konnten die für das Kriterium notwendigen Kontraste der Objekte zum Tunnelhintergrund abgeschätzt werden. Für die Kleinkreisel ergeben sich daraus durchschnittliche Leuchtdichten von bis zu 500 cd/m² unter der Annahme einer Schleierleuchtdichte von 300 cd/m². Diese Werte könnten unter grossem Aufwand beleuchtungstechnisch erreicht werden. Beim Rückstau lassen sich aus den berechneten, für das Kriterium benötigten Kontrasten kaum Schlüsse ziehen, da die Sichtbarkeit von Objekten mit solch komplexer Oberfläche wie Autos nicht mit einem einzelnen Kontrastwert beschrieben werden kann. Ausserdem können die Kontraste zum Hintergrund im Falle des Rückstaus beleuchtungstechnisch kaum erhöht werden.

Die Lichtsignalanlage wurde nur in der Einfahrtsstrecke 20 m im Tunnel untersucht. Das Kriterium wurde auch hier nicht erfüllt. Die Lichtsignalanlage war im Experiment aus verschiedenen Gründen, die oben diskutiert wurden, schlecht sichtbar. Es ist nicht anzunehmen, dass eine Lichtsignalanlage in der Realität im Tunnel schlechter sichtbar sein sollte als auf offener Strecke. Bei der Lichtsignalanlage im Tunnel als Kontrolle eines Knotens besteht weniger das Problem der Sichtbarkeit als vielmehr dasjenige der richtigen Interpretation. Da Lichtsignalanlagen in Tunneln heute hauptsächlich dazu verwendet werden, Fahrspuren zu sperren, werden beim Anblick eines Lichtsignals im Tunnel hinsichtlich eines Knotens falsche Erwartungen erzeugt. Es ist daher ausserordentlich wichtig, durch Vorsignale und Wegweisungstafeln bei der Lichtsignalanlage ganz klar zu machen, dass das Lichtsignal einen Knoten kontrolliert.

Die Versuche mit den Knoten und dem Rückstau am Ende der Einfahrtsstrecke hatten gezeigt, dass die Dunkeladaptation abhängig von der Aussenleuchtdichte für einige Sekunden nach der Einfahrt in den Tunnel die Entdeckung von Objekten beeinträchtigt. Sie scheint also nicht bei der Tunneleinfahrt schon vollständig abgeschlossen zu sein. Diese Ergebnisse stehen in Einklang mit Experimenten von Bourdy et al. (1987, 1988). Im Hinblick auf Knoten in der Übergangsstrecke müsste man überlegen, ob eine Absenkung der Leuchtdichte in der zweiten Hälfte der Einfahrtsstrecke, wie das nach gegenwärtigen Beleuchtungsnormen vorgesehen ist, zulässig ist.

Ein weiteres Problem stellen die Brillenträger dar. Im ersten Experiment hatten sie deutlich schlechtere Erkennensleistungen gezeigt als die Nicht-BrillenträgerInnen. Im zweiten und dritten Experiment war das nicht mehr eindeutig der Fall. Um entscheiden zu können, ob es sich hier um einen robusten Effekt handelt oder nur um einen Stichprobenfehler, müssten systematische Untersuchungen mit dieser Variablen gemacht werden.

Die Resultate aus den Versuchen können nur als ersten Hinweis für die Praxis betrachtet werden, da die Stichproben sehr klein waren. Es müssten weitere Untersuchungen folgen.

Im Experiment nicht untersucht wurden der Einfluss der Erwartung und der Aufmerksamkeit auf das Erkennen der Knoten und des Rückstaus. Die Versuchspersonen erwarteten Knoten und Rückstau im Tunnel und sie richteten ihre ganze Aufmerksamkeit auf das Entdecken und Identifizieren dieser Objekte. Im Hinblick auf diese Faktoren waren die Bedingungen im Experiment optimal. In der Realität muss die Aufmerksamkeit durch gestalterische Massnahmen wie Signaltafeln, Blinklichter usw. auf Knoten und Rückstau gelenkt werden. Ebenso sollte die Erwartung, dass ein Knoten folgt, rechtzeitig erzeugt werden.

VERZEICHNISSE

Verzeichnis der Abbildungen

Abb 1.1	Prüfung der Machbarkeit eines A-Niveau-Knotens im Bereich von Tunneln	16
Abb 1.2	Lage in bezug auf den Tunnel, Definitionen	17
Abb 2.1	Empfehlungen für das weitere Vorgehen, Übersicht	32
Abb 3.1	Projektablauf	38
Abb 5.1	Die wichtigsten Grundlagen	40
Abb 5.2	Richtwerte der Anhaltesichtweite auf übrigen Strassen	40
Abb 5.3	Tunnelbeleuchtung: Streckenübersicht und Definitionen	41
Abb 5.4	Zeitlicher Verlauf der Leuchtdichten der Einfahrts- und Übergangsstrecke	42
Abb 6.1	Vorgehen	47
Abb 7.1	Lage in bezug auf den Tunnel: Definitionen und Distanzen (entspricht Abb. 1.1)	49
Abb 7.2	Kleinkreisel Stuckikreuzung, Versuchsanordnungen V2 und V3	56
Abb 7.3	Versuchsanordnung V3	56
Abb 8.1	Kontrastsensitivität in Abhängigkeit der Ortsfrequenz (Perioden pro Grad Sehwinkel) eines Sinusstreifenmusters. Der Parameter ist die mittlere Leuchtdichte gemessen in Troland	63
Abb 9.1	Wand, die den Kreisel mit massivem Kern darstellte. Masse in cm	68
Abb 9.2	Band, das den Kreisel mit Durchsicht markierte. Masse in cm	69
Abb 9.3	Kleinkreisel mit massivem Kern in der Zone D1	70
Abb 9.4	Kleinkreisel mit Durchsicht in den Zonen D1 und H	71
Abb 10.1	Versuchsanlage	74
Abb 10.2	Mittelwerte und Standardfehler der Reaktionsdistanzen für die verschiedenen Situationen und Altersgruppen	77
Abb 10.3	Mittelwerte der Reaktionsdistanzen für die verschiedenen Situationen	77
Abb 10.4	Mittelwerte der Reaktionsdistanzen nach Brillenträgern und Altersgruppen getrennt	78
Abb 10.5	Kumulative Verteilungen der Reaktionsdistanzen für den Kleinkreisel mit Durchsicht 40m im Tunnel (Beleuchtung C)	79
Abb 10.6	Mittelwerte und Standardfehler der Reaktionsdistanzen	82
Abb 10.7	Mittelwerte der Reaktionsdistanzen nach Brillenträgern und Altersgruppen getrennt	83
Abb 10.8	Mittelwerte der Reaktionsdistanzen für die drei Beleuchtungsbedingungen	83
Abb 10.9	Reaktionsdistanzen für verschiedene Situationen und Streuleuchtdichten	87
Abb 10.10	Mittelwerte der Reaktionsdistanzen nach Brillenträgern getrennt, gemittelt über die Streuleuchtdichten	87
Abb 10.11	Mittelwerte der Reaktionsdistanzen nach Brillenträgern getrennt, gemittelt über die Situationen	88

Verzeichnis der Tabellen

Tab 1.1	Allgemeine Anforderungen an A-Niveau-Knoten im Bereich von Tunneln	18
Tab 1.2	Spezielle Anforderungen an unterirdische Knoten	21
Tab 1.3	Zusätzliche Anforderungen an Knoten ausserhalb des Tunnelportales	22
Tab 1.4	LSA, denkbare Lagen in bezug auf den Tunnel	23
Tab 1.5	Zusätzliche Anforderungen bei Lichtsignalregelung	24
Tab 1.6	Kleinkreisel, denkbare Lage in bezug auf den Tunnel	27
Tab 1.7	Spezielle Anforderungen bei Kleinkreisen	28
Tab 5.1	Minimale Knotensichtweiten auf Strassen mit Gemischtverkehr	41
Tab 5.2	Notwendige k-Werte zur Erzielung der Leuchtdichte der Einfahrtsstrecke L_{fe}	42
Tab 5.3	Mittlere Leuchtdichten der Innenstrecke L_{fi} (cd/m ²) bei Tag	43
Tab 5.4	Mittlere Leuchtdichten der Innenstrecke L_{fi} (cd/m ²) bei Nacht	43
Tab 7.1	Lage des Knotens im Tunnel	52
Tab 7.2	Feldversuch Kleinkreisel Stuckikreuzung, Fälle und Verkehrsbelastungen	57
Tab 7.3	Feldversuch Kleinkreisel Stuckikreuzung: v85, werktags, alle Fälle	58
Tab 7.4	Feldversuch Kleinkreisel Stuckikreuzung: Anteil Langsamfahrzeuge ($v < 15$ km/h)	58
Tab 7.5	N12 Brünnetunnel, Anteil Fahrzeuge ohne Licht, 1115 bis 1315 Uhr	61
Tab 7.6	N2 Belchentunnel, Anteil Fahrzeuge ohne Licht, 1300 bis 1500 Uhr	61
Tab 10.1	Reaktionsdistanzen in Meter für 85% der Senioren bei verschiedenen Streuleuchtdichten und Situationen	88

Literaturverzeichnis

- Adrian, W. Visibility of targets: Model for calculation. Lighting Research and Technology, 1989, 21, 181-188.
- 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. 19/2.1 An analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance, 1981.
- CIE Publication No. 61 Tunnel entrance lighting. 1984.
- CIE Publication No. 88 Guide for the lighting of road tunnels and underpasses, 1990.
- 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: Öffentliche 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
- SN 640 273, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, Knoten Sichtverhältnisse, 18.6.92
- 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.

ANHÄNGE

- 1. Geräte: CapCalc**
- 2. Verkehrstechnische Voranalyse: Typisierung der Knoten**
- 3. Resultate Feldversuch Kleinkreisel Steffisburg**
- 4. Resultate Laborversuche: Kummulative Verteilungen der Reaktionsdistanzen**

ANHANG 1

Geräte: CapCalc-System

CapCalc-System

Das CapCalc-System ist ein tragbares, computerisiertes Photometer, das in Canada entwickelt wurde. Es besteht aus einer V-lambda korrigierten Videokamera (Burle CCD TC 101), einem Philips Minimonitor, einer Bildverarbeitungskarte und einem portablen PC. Ein Bild, das von der Videokamera aufgenommen wird, wird digitalisiert und als Matrix von Leuchtdichten auf dem PC abgespeichert. Die räumliche Auflösung beträgt 512 x 480 Pixel. Dies ergibt ein Total von 245'760 Pixel, deren Leuchtdichten bei jedem Messvorgang gemessen und abgespeichert werden. Für Leuchtdichten kleiner als 1 cd/m² liefert das System unzuverlässige Werte.

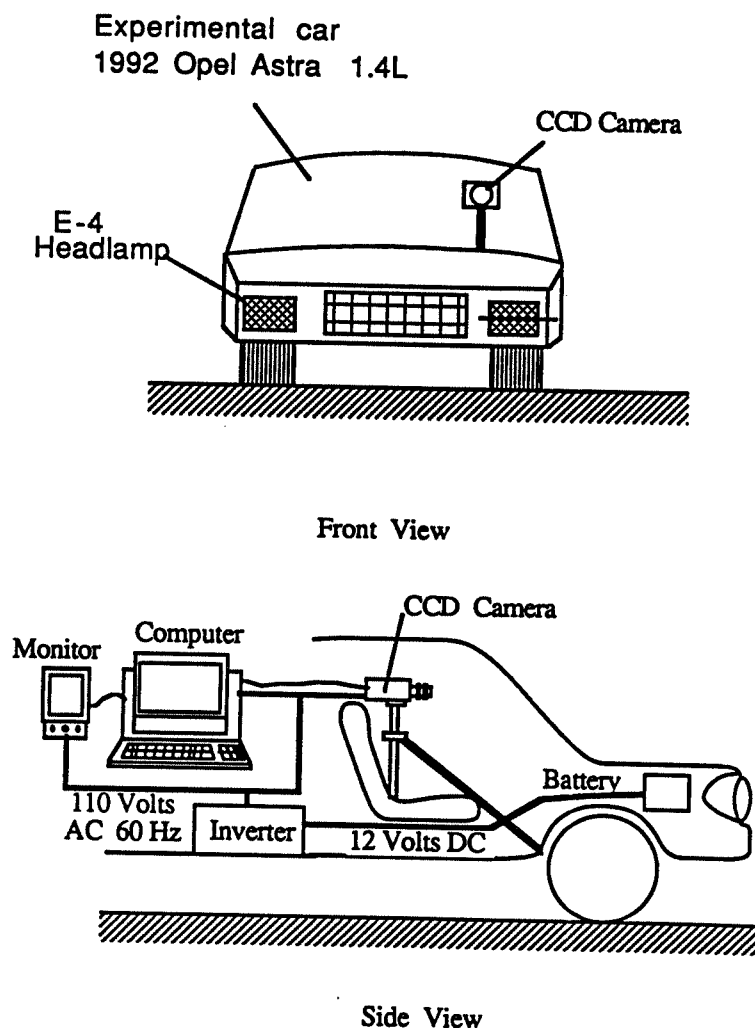
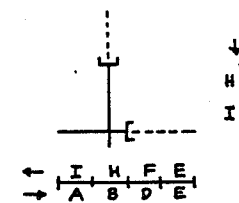
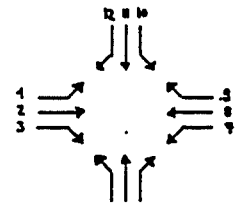
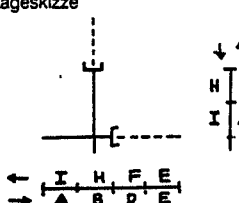
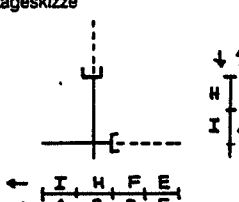
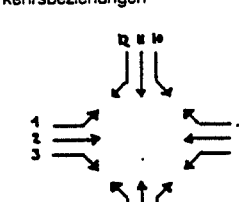
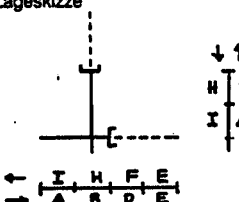
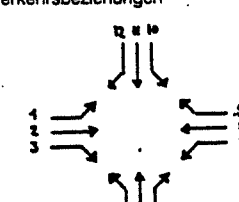
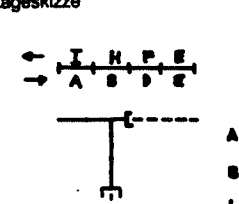
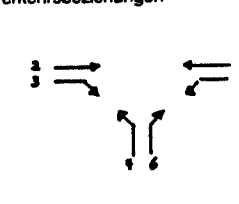
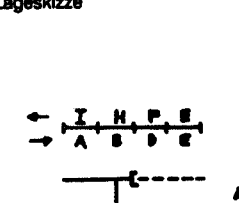


Abb. 3.1 Anordnung des CapCalc-Systems im Messwagen.

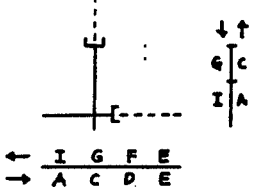
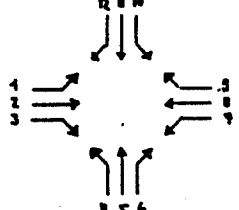
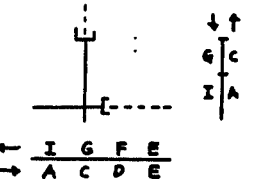
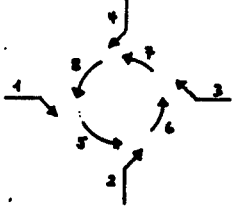
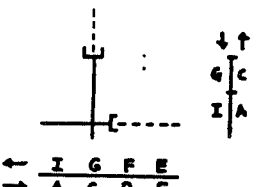
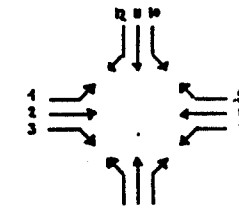
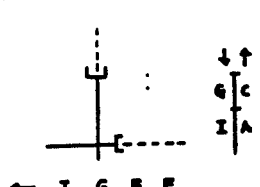
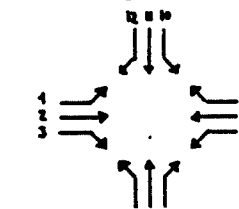
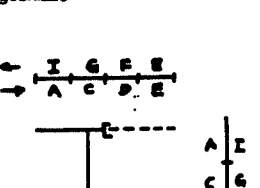
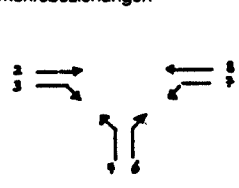
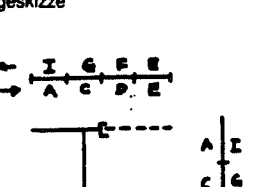
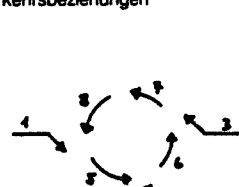
Abb. 3.1 zeigt die Anordnung des Systems im Messwagen. Die Kamera befindet sich an der Position des Fahrers. Es können nur Messungen aus dem stationären Wagen gemacht werden.

ANHANG 2

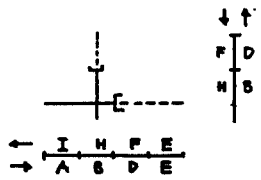
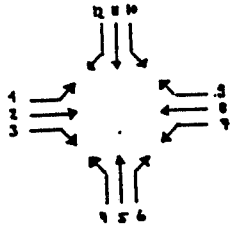
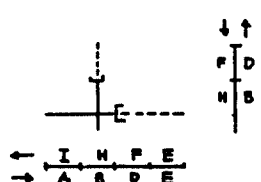
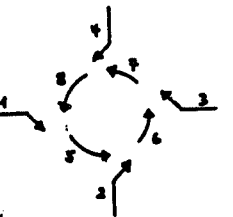
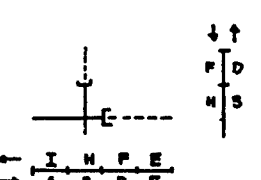
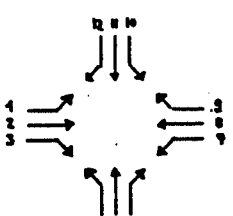
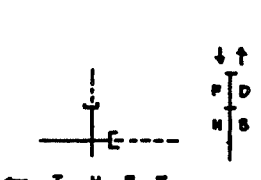
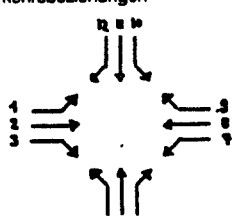
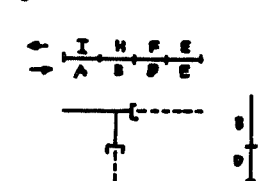
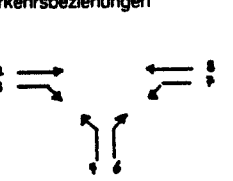
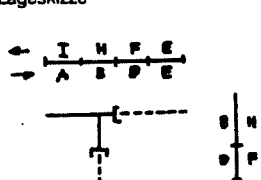
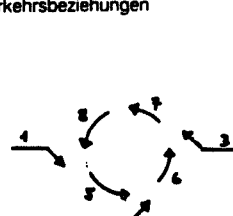
Verkehrstechnische Voranalyse: Typisierung der Knoten

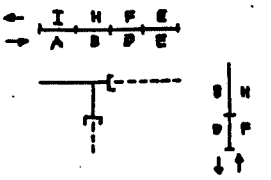
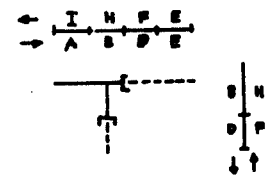
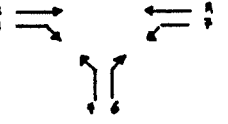
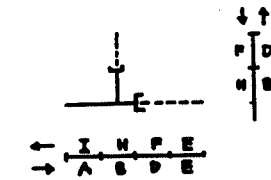
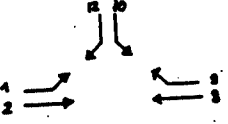
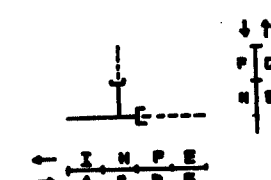
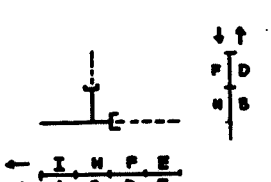
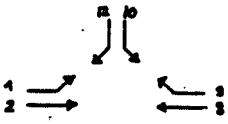
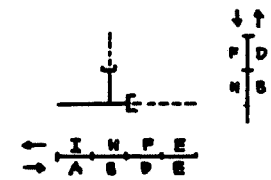
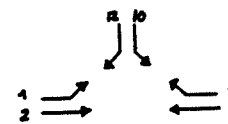
Bezeichnung: AB11 Lage des Knotens: AB Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: AB12 Lage des Knotens: AB Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: AB13 Lage des Knotens: AB Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: AB14 Lage des Knotens: AB Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: AB21 Lage des Knotens: AB Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: AB22 Lage des Knotens: AB Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 

Bezeichnung: AB23 Lage des Knotens: AB Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze	Verkehrsbeziehungen
Bezeichnung: AB24 Lage des Knotens: AB Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze	Verkehrsbeziehungen
Bezeichnung: AB31 Lage des Knotens: AB Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze	Verkehrsbeziehungen
Bezeichnung: AB32 Lage des Knotens: AB Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze	Verkehrsbeziehungen
Bezeichnung: AB33 Lage des Knotens: AB Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze	Verkehrsbeziehungen
Bezeichnung: AB34 Lage des Knotens: AB Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze	Verkehrsbeziehungen

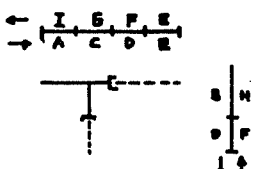
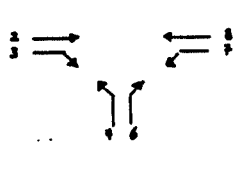
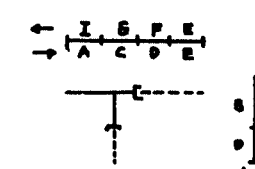
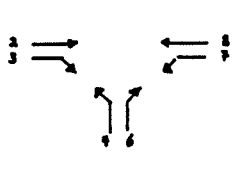
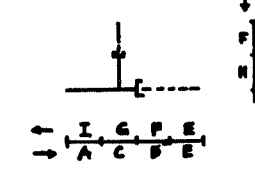
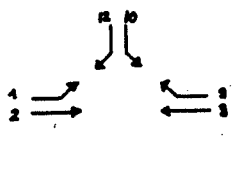
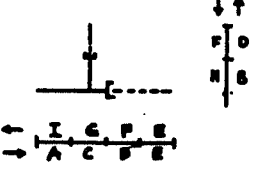
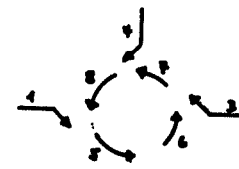
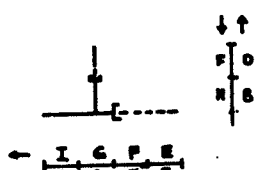
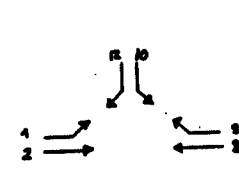
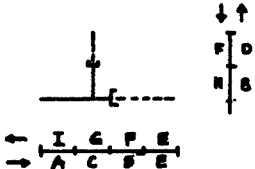
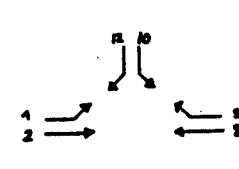
Bezeichnung: AC11 Lage des Knotens: AC Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: AC12 Lage des Knotens: AC Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: AC13 Lage des Knotens: AC Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: AC14 Lage des Knotens: AC Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: AC21 Lage des Knotens: AC Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: AC22 Lage des Knotens: AC Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 

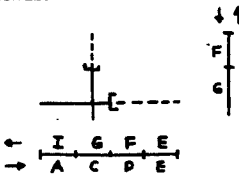
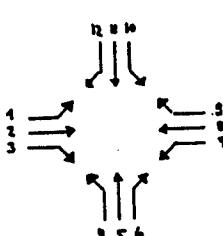
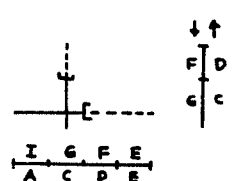
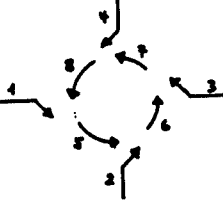
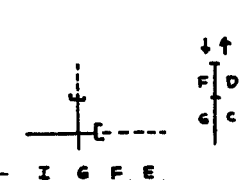
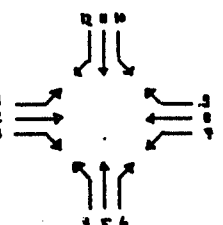
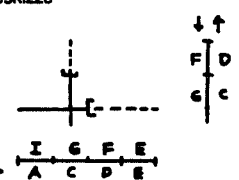
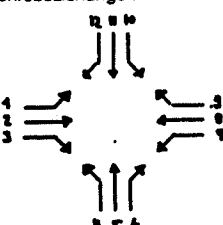
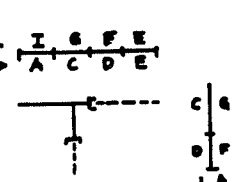
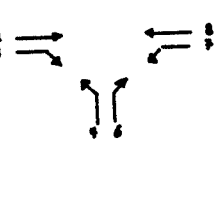
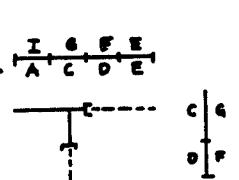
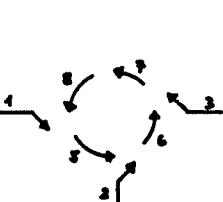
Bezeichnung: AC23 Lage des Knotens: AC Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen
Bezeichnung: AC24 Lage des Knotens: AC Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen
Bezeichnung: AC31 Lage des Knotens: AC Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen
Bezeichnung: AC32 Lage des Knotens: AC Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Kleinkreis	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen
Bezeichnung: AC33 Lage des Knotens: AC Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen
Bezeichnung: AC34 Lage des Knotens: AC Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen

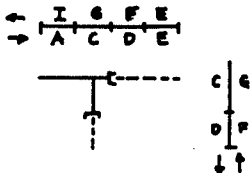
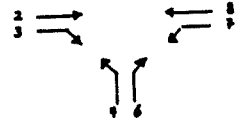
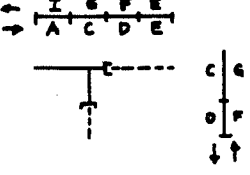
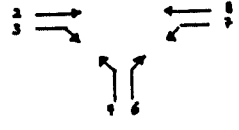
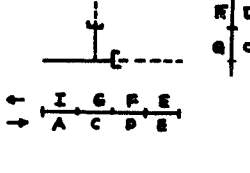
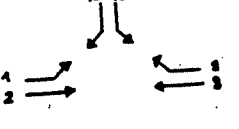
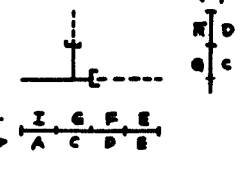
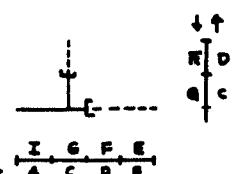
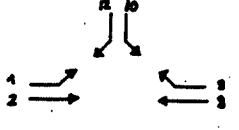
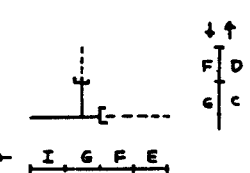
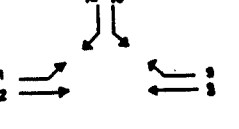
Bezeichnung: BB11 Lage des Knotens: BB Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: BB12 Lage des Knotens: BB Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: BB13 Lage des Knotens: BB Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: BB14 Lage des Knotens: BB Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: BB21 Lage des Knotens: BB Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: BB22 Lage des Knotens: BB Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 

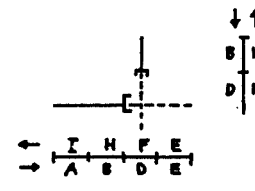
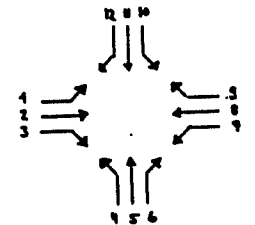
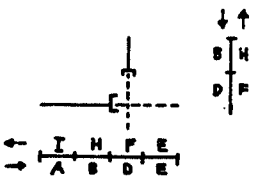
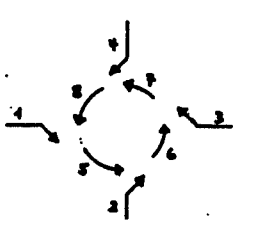
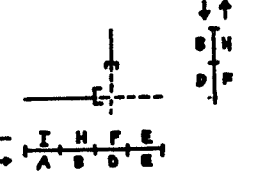
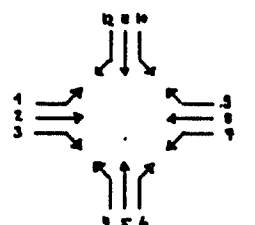
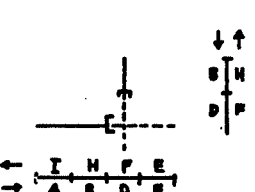
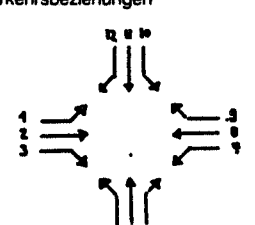
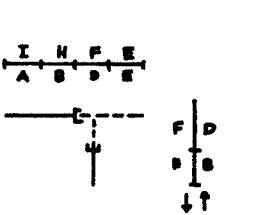
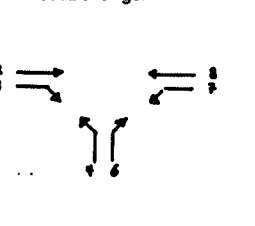
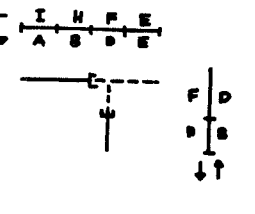
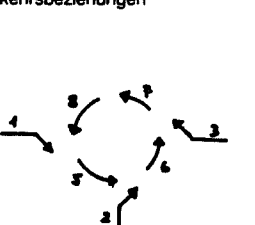
Bezeichnung: BB23 Lage des Knotens: BB Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: BB24 Lage des Knotens: BB Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: BB31 Lage des Knotens: BB Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: BB32 Lage des Knotens: BB Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: BB33 Lage des Knotens: BB Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: BB34 Lage des Knotens: BB Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 

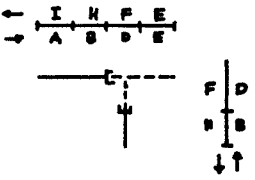
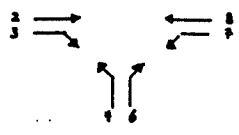
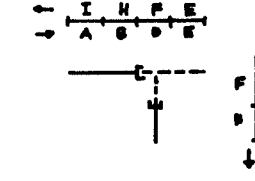
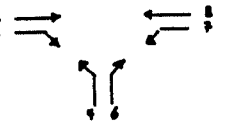
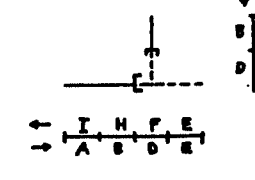
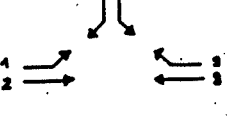
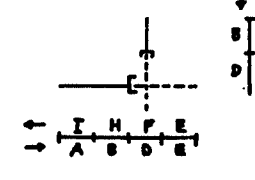
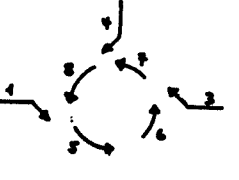
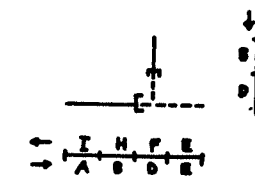
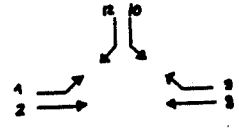
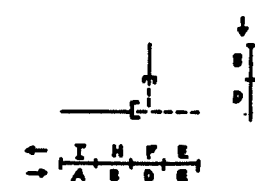
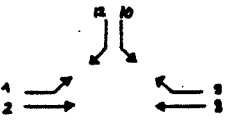
Bezeichnung: BC11 Lage des Knotens: BC Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze	Verkehrsbeziehungen
Bezeichnung: BC12 Lage des Knotens: BC Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze	Verkehrsbeziehungen
Bezeichnung: BC13 Lage des Knotens: BC Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze	Verkehrsbeziehungen
Bezeichnung: BC14 Lage des Knotens: BC Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze	Verkehrsbeziehungen
Bezeichnung: BC21 Lage des Knotens: BC Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze	Verkehrsbeziehungen
Bezeichnung: BC22 Lage des Knotens: BC Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze	Verkehrsbeziehungen

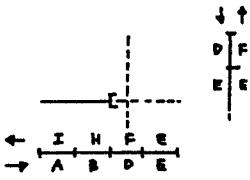
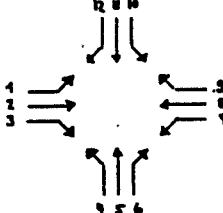
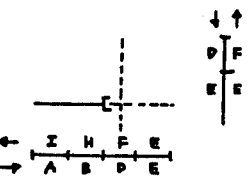
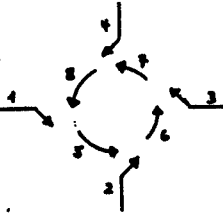
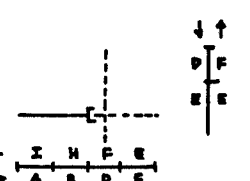
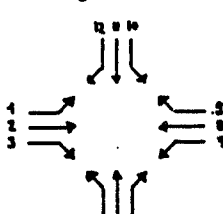
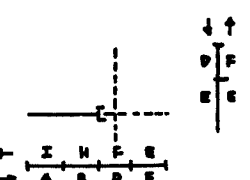
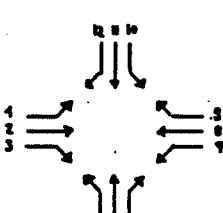
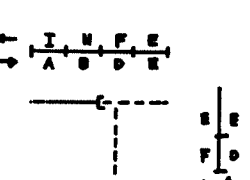
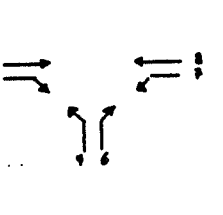
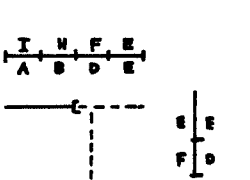
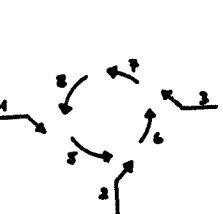
Bezeichnung: BC23 Lage des Knotens: BC Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: BC24 Lage des Knotens: BC Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: BC31 Lage des Knotens: BC Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: BC32 Lage des Knotens: BC Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: BC33 Lage des Knotens: BC Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: BC34 Lage des Knotens: BC Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 

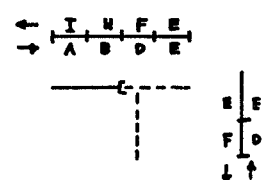
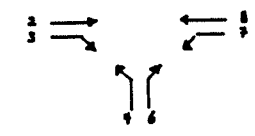
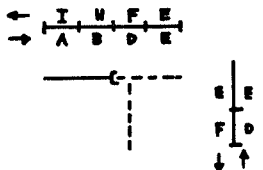
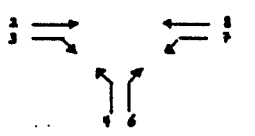
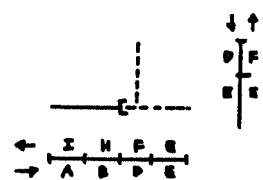
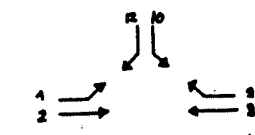
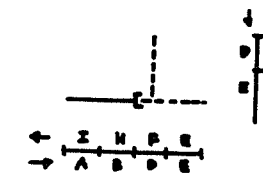
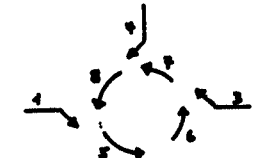
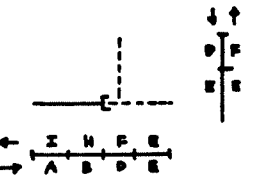
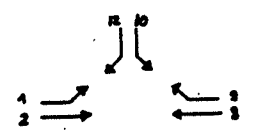
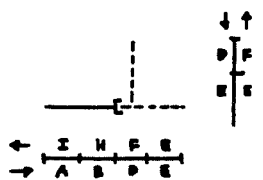
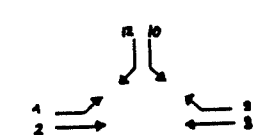
Bezeichnung: CC11 Lage des Knotens: CC Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: CC12 Lage des Knotens: CC Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: CC13 Lage des Knotens: CC Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: CC14 Lage des Knotens: CC Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: CC21 Lage des Knotens: CC Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: CC22 Lage des Knotens: CC Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 

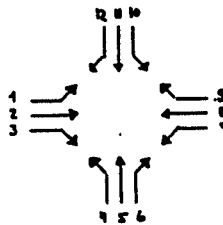
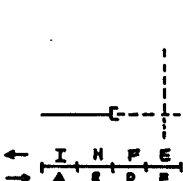
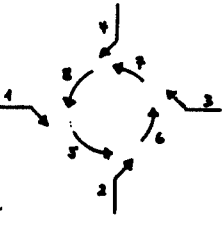
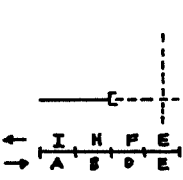
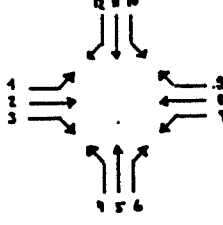
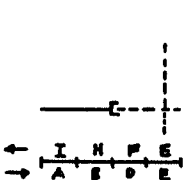
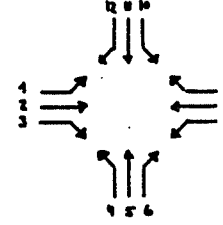
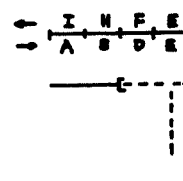
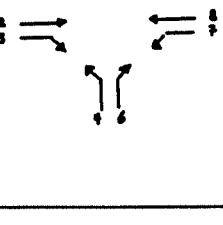
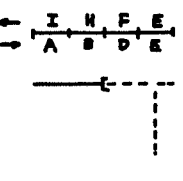
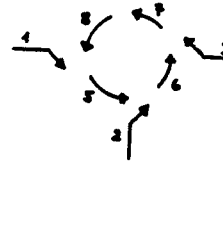
Bezeichnung: CC23 Lage des Knotens: CC Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: CC24 Lage des Knotens: CC Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: CC31 Lage des Knotens: CC Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: CC32 Lage des Knotens: CC Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: CC33 Lage des Knotens: CC Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: CC34 Lage des Knotens: CC Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 

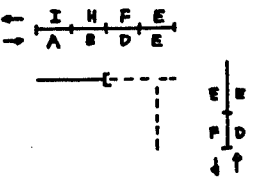
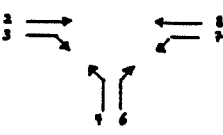
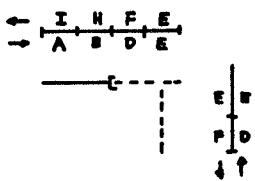
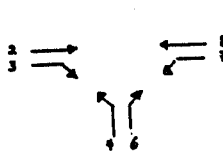
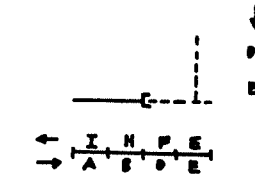
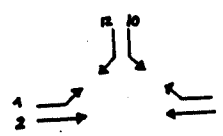
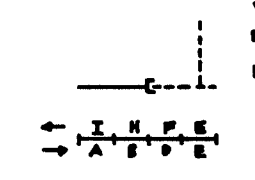
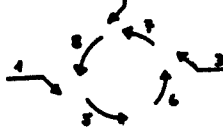
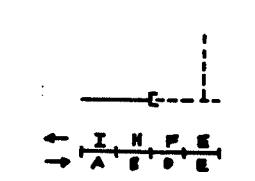
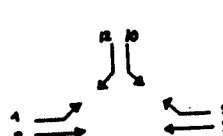
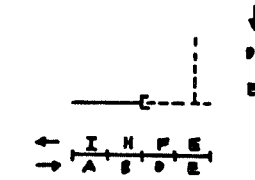
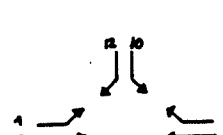
Bezeichnung: DD11 Lage des Knotens: DD Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DD12 Lage des Knotens: DD Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DD13 Lage des Knotens: DD Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DD14 Lage des Knotens: DD Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DD21 Lage des Knotens: DD Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DD22 Lage des Knotens: DD Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 

Bezeichnung: DD23 Lage des Knotens: DD Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DD24 Lage des Knotens: DD Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DD31 Lage des Knotens: DD Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DD32 Lage des Knotens: DD Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DD33 Lage des Knotens: DD Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DD34 Lage des Knotens: DD Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 

Bezeichnung: DE11 Lage des Knotens: DE Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DE12 Lage des Knotens: DE Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DE13 Lage des Knotens: DE Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DE14 Lage des Knotens: DE Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DE21 Lage des Knotens: DE Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DE22 Lage des Knotens: DE Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 

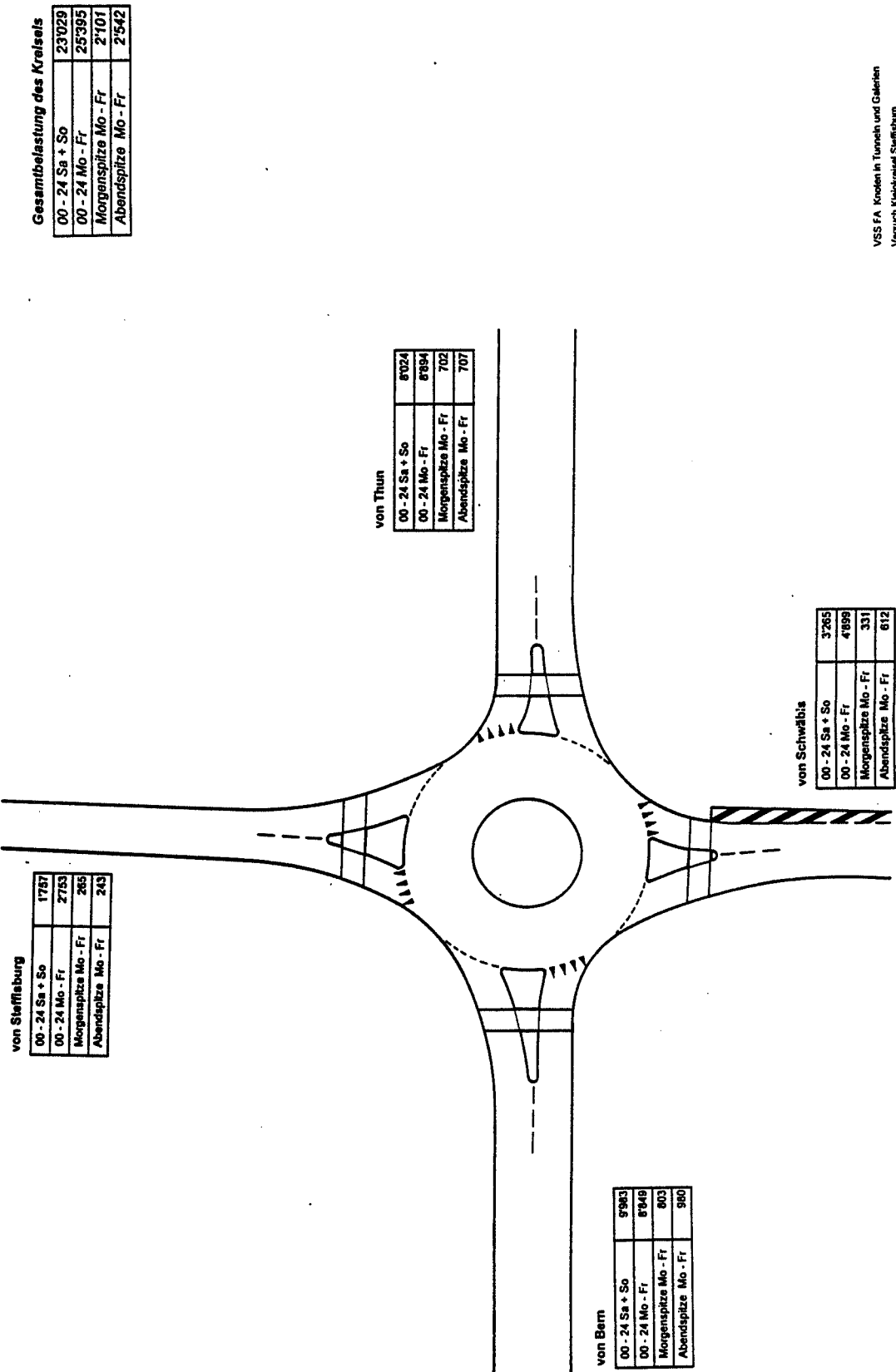
Bezeichnung: DE23 Lage des Knotens: DE Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DE24 Lage des Knotens: DE Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DE31 Lage des Knotens: DE Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DE32 Lage des Knotens: DE Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DE33 Lage des Knotens: DE Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: DE34 Lage des Knotens: DE Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 

Bezeichnung: EE11 Lage des Knotens: EE Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: EE12 Lage des Knotens: EE Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: EE13 Lage des Knotens: EE Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: EE14 Lage des Knotens: EE Form des Knotens: Kreuzung Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: EE21 Lage des Knotens: EE Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: EE22 Lage des Knotens: EE Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 

Bezeichnung: EE23 Lage des Knotens: EE Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: EE24 Lage des Knotens: EE Form des Knotens: Einmündung rechts Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: EE31 Lage des Knotens: EE Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: LSA	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: EE32 Lage des Knotens: EE Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Kleinkreisel	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: EE33 Lage des Knotens: EE Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Vortritt geradeaus	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 
Bezeichnung: EE34 Lage des Knotens: EE Form des Knotens: Einmündung links Betrieb des Knotens: Rechtsvortritt	Lageskizze 	Verkehrsbeziehungen 

ANHANG 3

Resultate Feldversuch Kleinkreisel Steffisburg

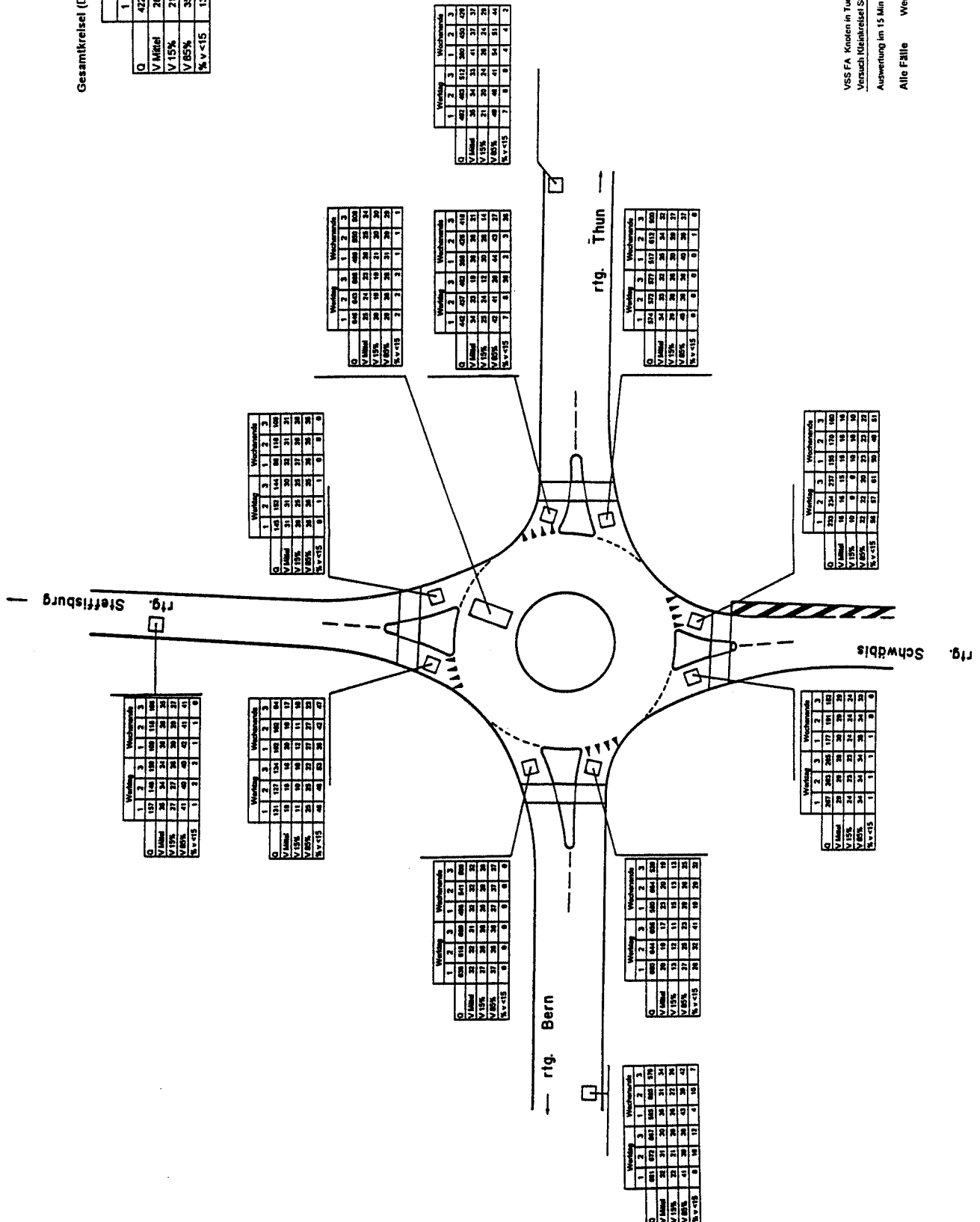


VSS FA Knoten in Tunneln und Galerien
Versuch Markkreis Steffisburg

Durchschnittliche Verkehrsbelastungen
Sa. 28.11.92 - Fr. 4.12.92

Gesamtkreis (Durchschnitt der 12 Messstellen)

	Werktag			Wochenende		
	1	2	3	1	2	3
G	422	418	434	338	305	344
V Mittel	28	28	28	30	29	27
V 15%	21	21	19	23	22	21
V 85%	35	34	32	37	35	33
% v < 15	13	14	18	10	12	14



Ast Stockhornstrasse

	V1 Freie Durchsicht	V2 Mittelinsel Voll	V3 Ast Stock- hornstrasse eingeschalt
Qk (PWE/h)	1097	1046	1057
Qa(PWE/h)	282	280	281
Qe(PWE/h)	300	297	309
kein Stau	55%	60%	56%
Stau < 3 Fz	30%	29%	30%
2 Fz < Stau <	11%	11%	9%
5 Fz < Stau <	3%	10%	4%
7 Fz < Stau	1%	0%	1%
Stau > 10 Fz	0%	0%	0%

Qk Q auf Kreiselfahrbahn

Qa Q auf Kreiselausfahrt

Qe Q auf Kreiseleinfahrt

Vergleich mit Schweizer Formel für Leistungsfähigkeit Kleinreisel innerortsAllgemeine Formel (CH1) $Q_e = 1300 - 0.75 \cdot Q_k \text{ (PWE/h)}$ Spezielle Formel (CH2) $Q_e = 1450 - 0.95 \cdot Q_k \text{ (PWE/h)}$

	Qk	Qe berechnet	Qe vorhanden
Formel 1			
V1	1097	477	300
V2	1046	516	297
V3	1057	507	309
Formel 2			
V1	1097	463	300
V2	1046	509	297
V3	1057	499	309

Ast Thun

	V1 Freie Durchsicht	V2 Mittelinsel Voll	V3 Ast Stock- hornstrasse eingeschalt
Qk (PWE/h)	597	593	575
Qa (PWE/h)	919	904	901
Qe (PWE/h)	783	738	742
kein Stau	43%	42%	44%
Stau < 30 m	1%	1%	1%
30 m < Stau	0%	0%	1%
Stau > 60 m	56%	57%	54%

Qk Q auf Kreiselfahrbahn
 Qa Q auf Kreiselausfahrt
 Qe Q auf Kreiseinfahrt

Vergleich mit Schweizer Formel für Leistungsfähigkeit Kleinreisel innerorts

Allgemeine Formel (CH1) $Q_e = 1300 - 0.75 \cdot Q_k \text{ (PWE/h)}$

Spezielle Formel (CH2) $Q_e = 1450 - 0.95 \cdot Q_k \text{ (PWE/h)}$

	Qk	Qe berechnet	Qe vorhanden
Formel 1			
V1	597	852	783
V2	593	855	738
V3	575	869	742
Formel 2			
V1	597	913	783
V2	593	916	738
V3	575	933	742

Ast Bern

	V1 Freie Durchsicht	V2 Mittelinsel Voll	V3 Ast Stock- hornstrasse eingeschalt
Qk (PWE/h)	263	289	260
Qa (PWE/h)	1130	1074	1053
Qe (PWE/h)	1122	1060	1068
kein Stau	53%	64%	69%
Stau < 30 m	3%	1%	1%
30 m < Stau	2%	1%	0%
Stau > 60 m	42%	34%	30%

Qk Q auf Kreiselfahrbahn
 Qa Q auf Kreiselausfahrt
 Qe Q auf Kreiseinfahrt

Vergleich mit Schweizer Formel für Leistungsfähigkeit Kleinreisel innerorts

Allgemeine Formel (CH1) $Q_e = 1300 - 0.75 \cdot Q_k \text{ (PWE/h)}$

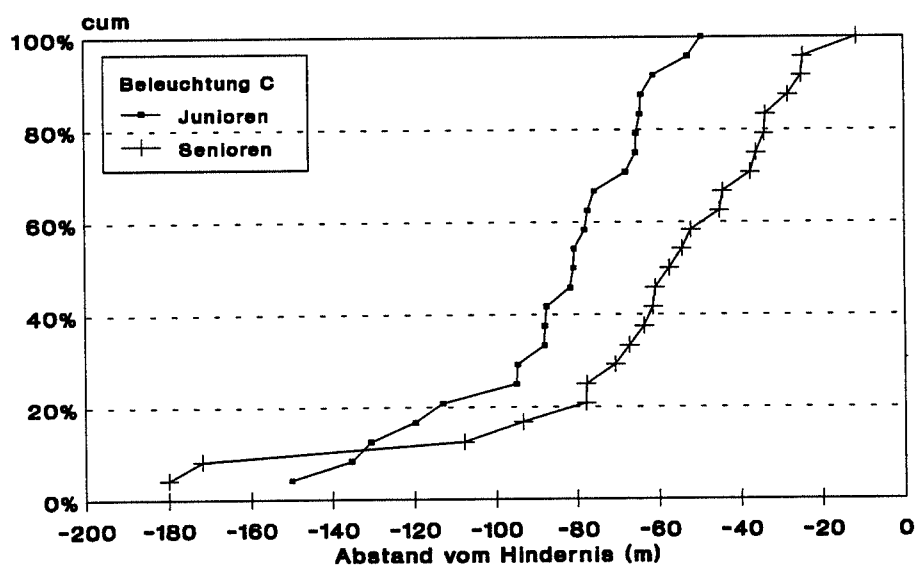
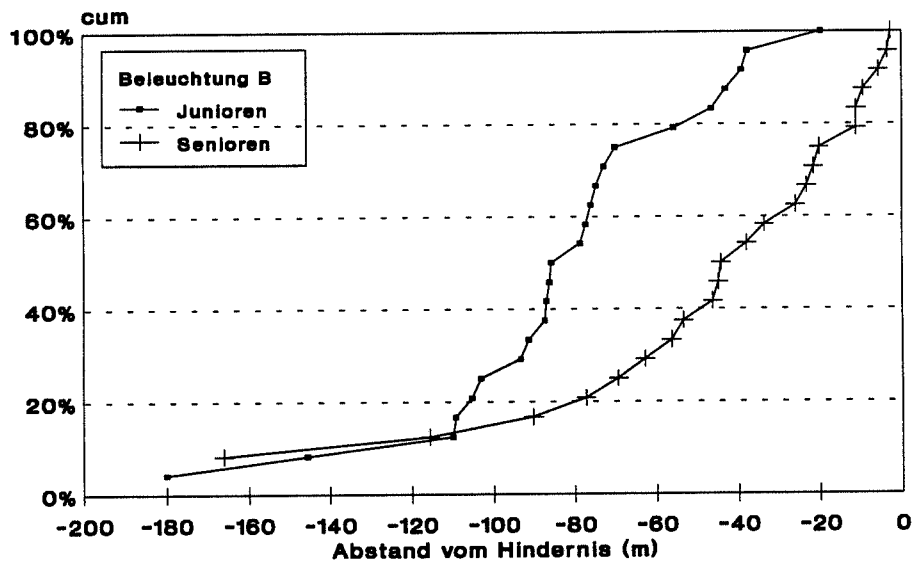
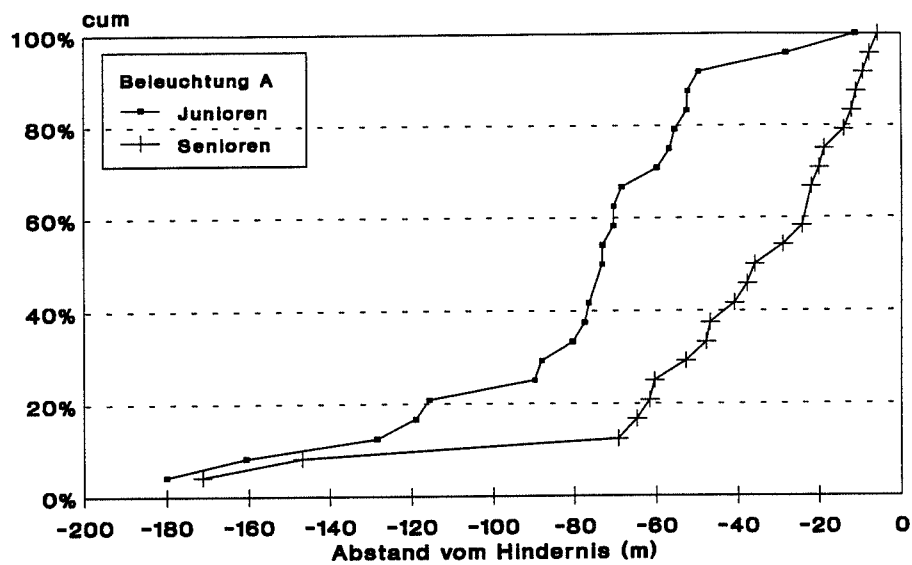
Spezielle Formel (CH2) $Q_e = 1450 - 0.95 \cdot Q_k \text{ (PWE/h)}$

	Qk	Qe berechnet	Qe vorhanden
Formel 1			
V1	263	1103	1122
V2	289	1083	1060
V3	260	1105	1068
Formel 2			
V1	263	1213	1122
V2	289	1190	1060
V3	260	1216	1068

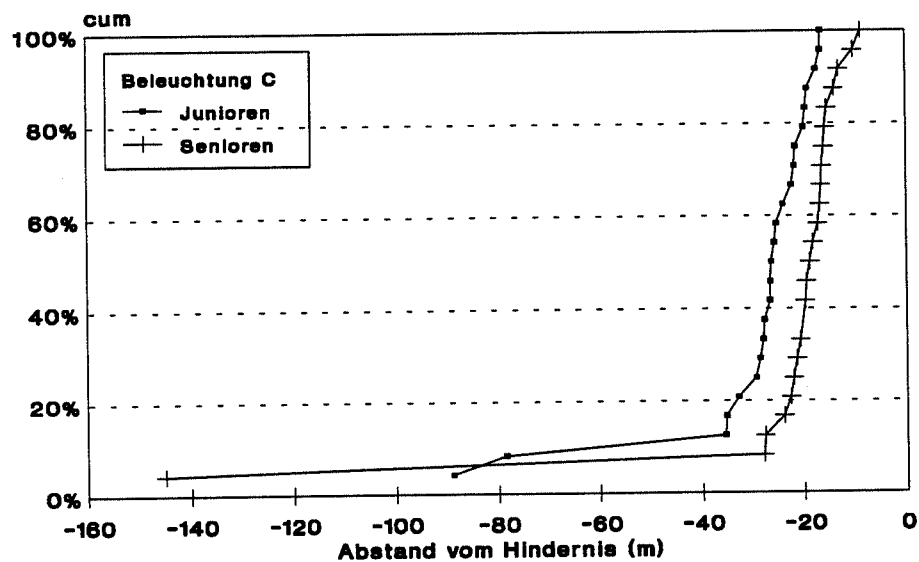
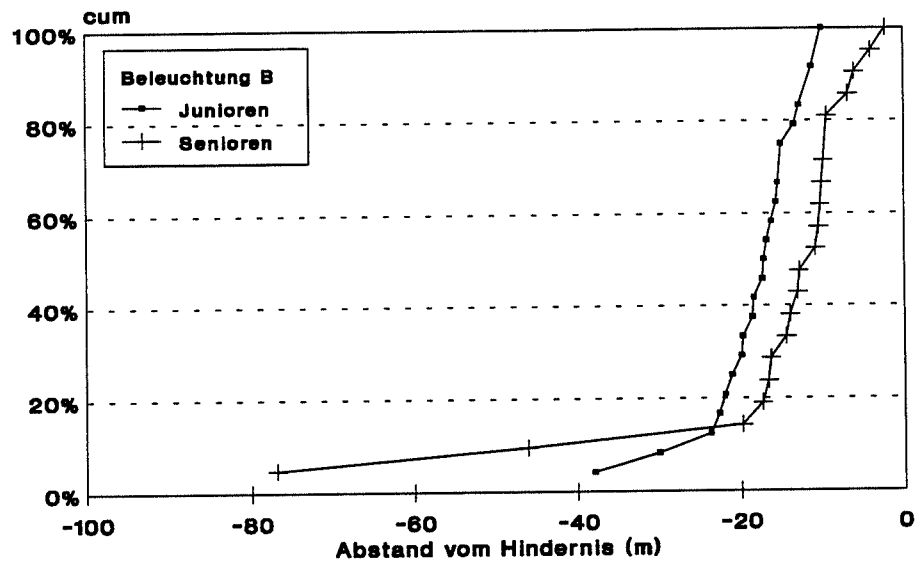
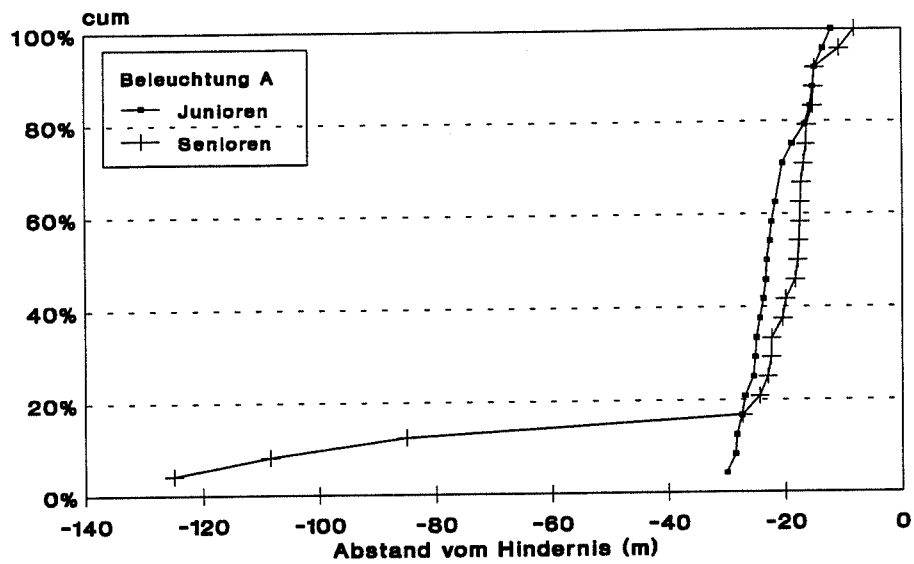
ANHANG 4

Resultate Laborversuche: Kumulative Verteilungen der Reaktionsdistanzen

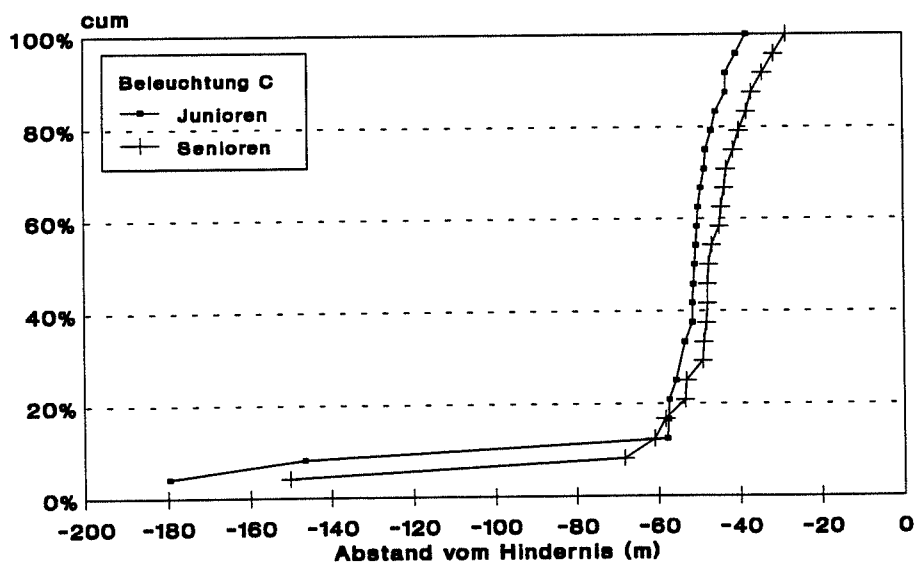
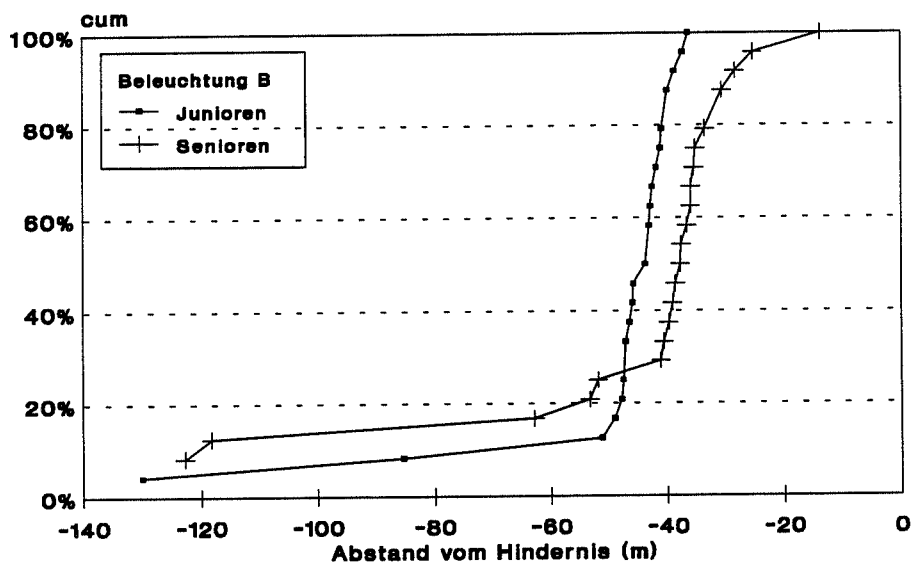
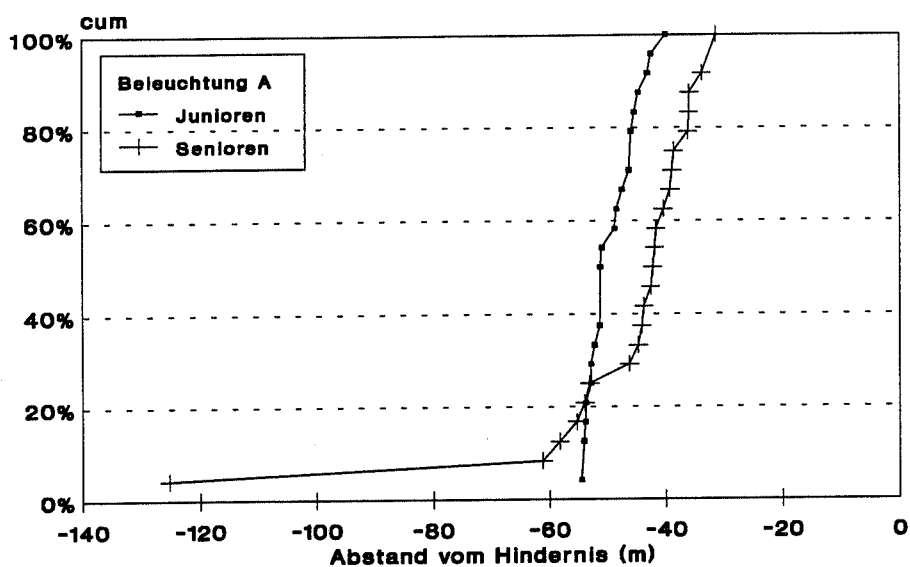
Experiment I
Kleinkreisel massiver Kern - 20 m im Tunnel (Zone D)



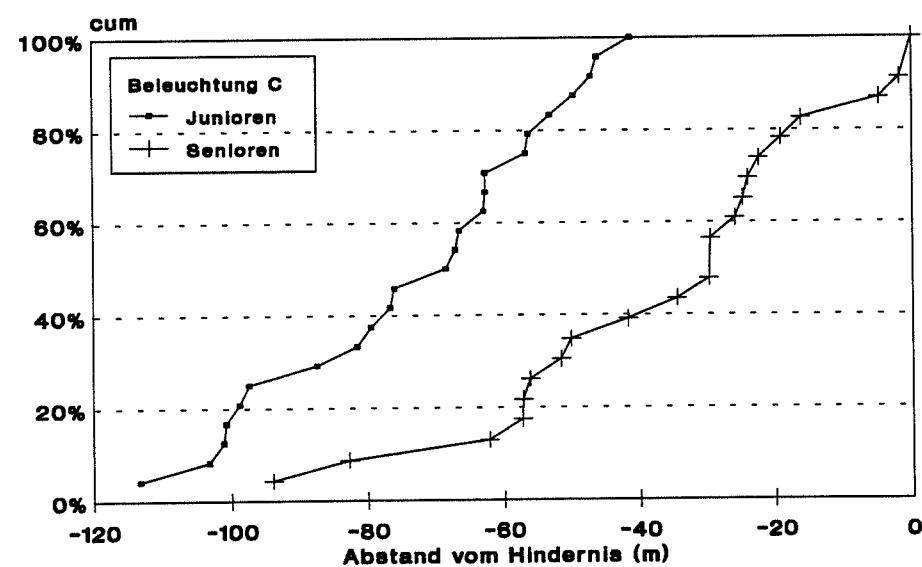
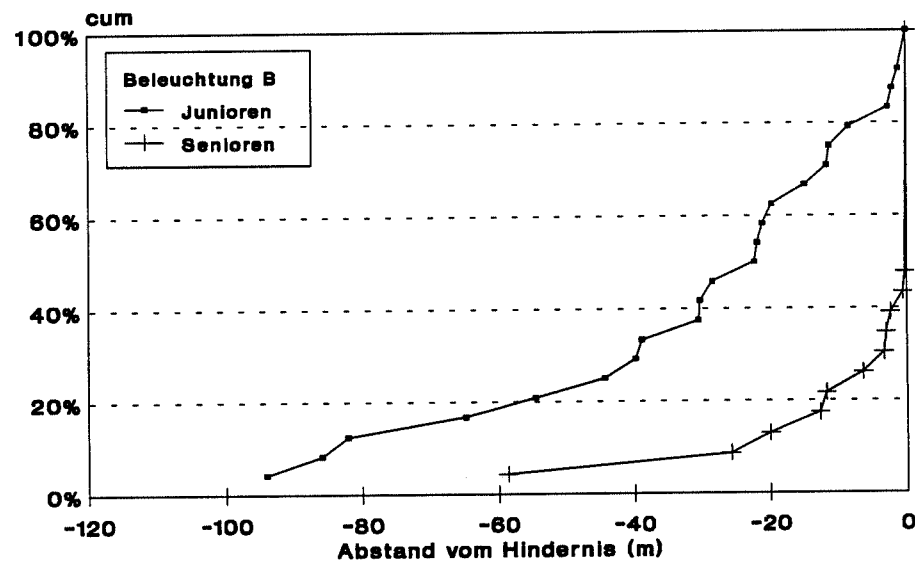
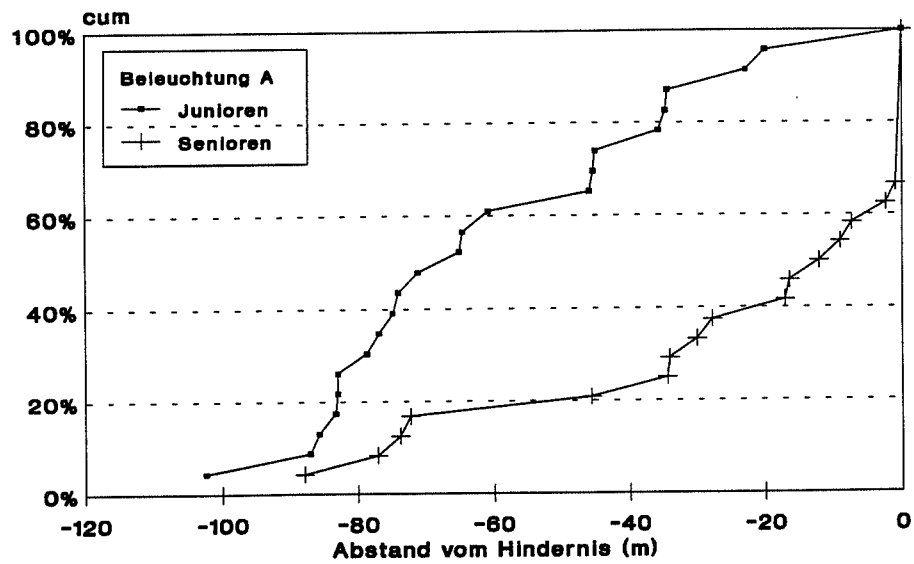
Experiment I
Kleinkreisel massiver Kern - 40 m im Tunnel (Zone D)



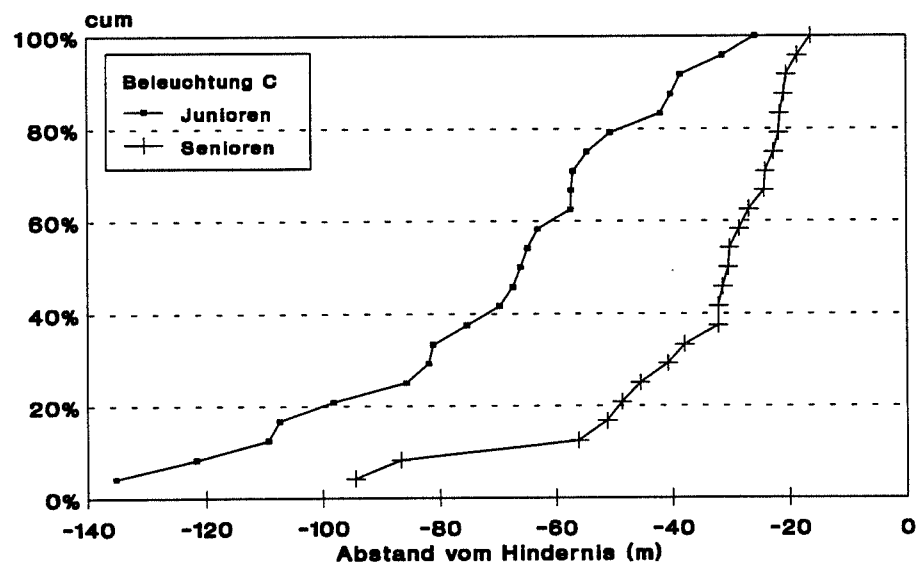
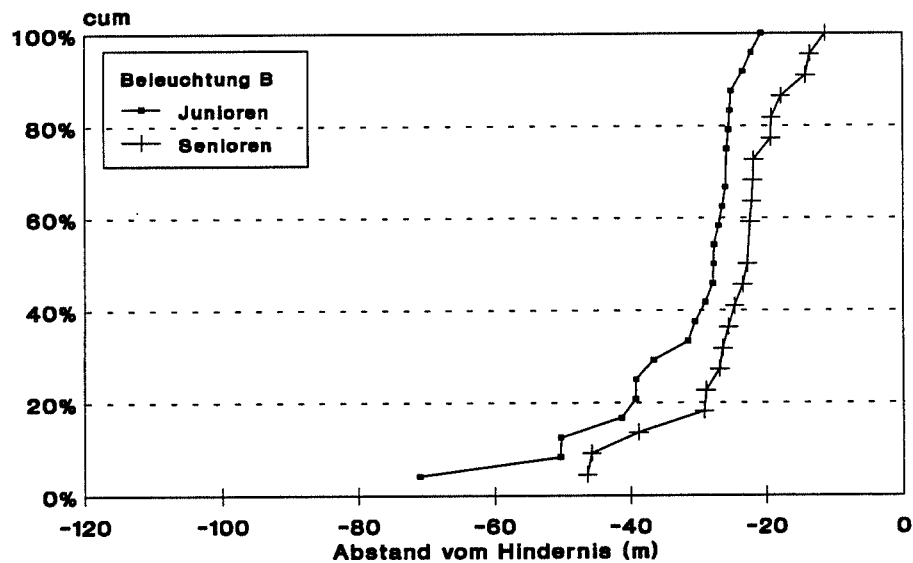
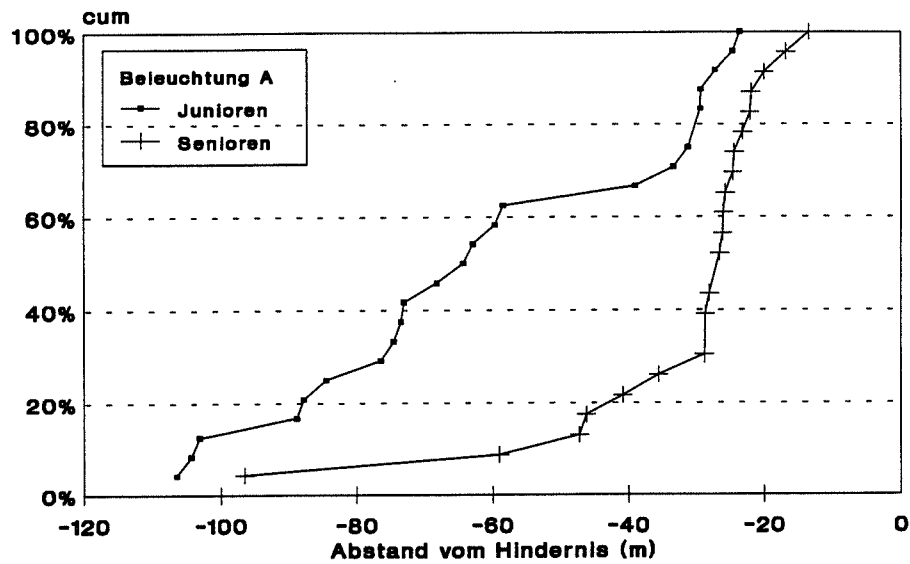
Experiment I
Kleinkreislauf massiver Kern - 80 m im Tunnel (Zone D)



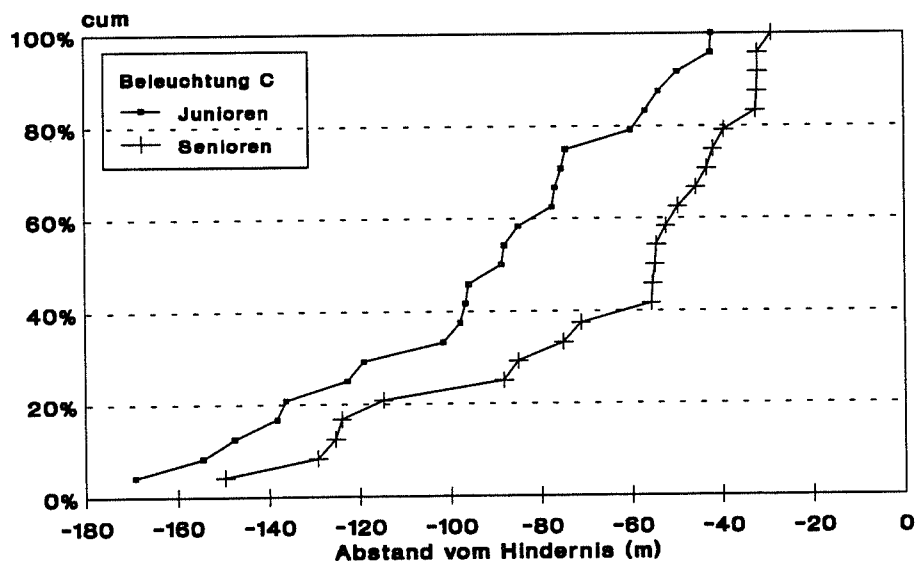
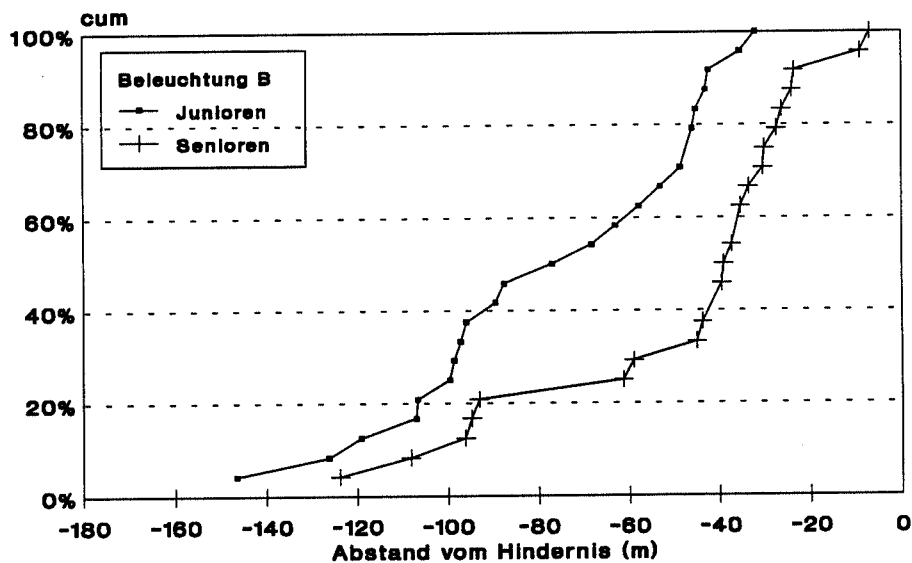
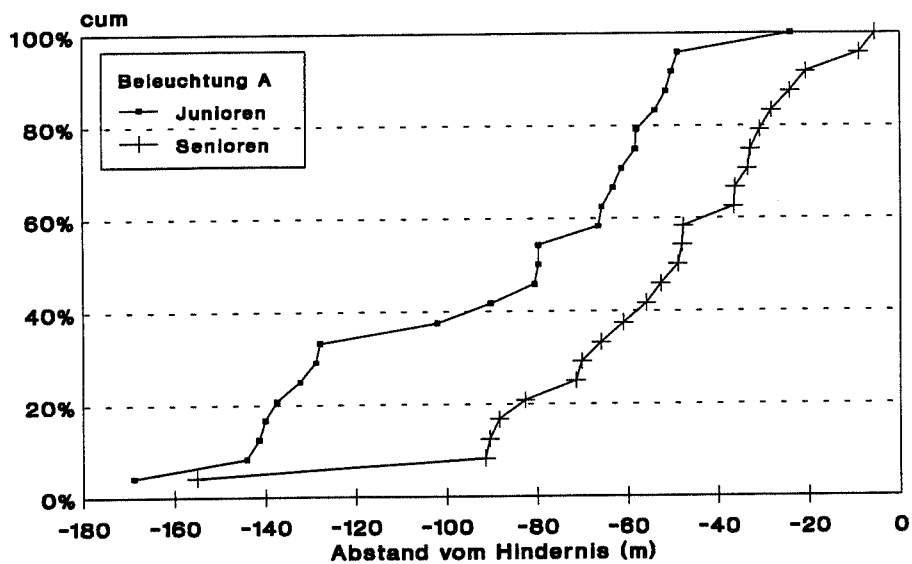
Experiment I
Kleinkreislauf offener Kern - 20 m im Tunnel (Zone D)



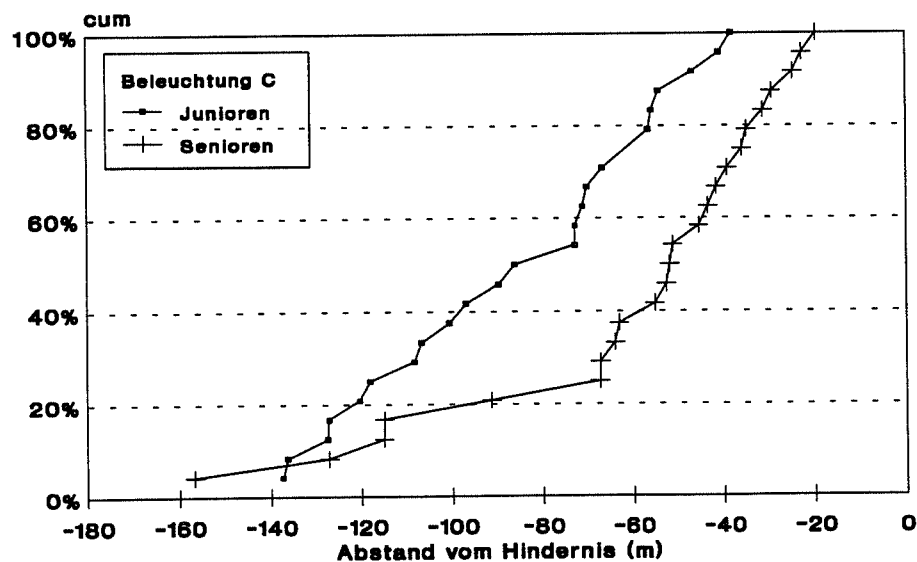
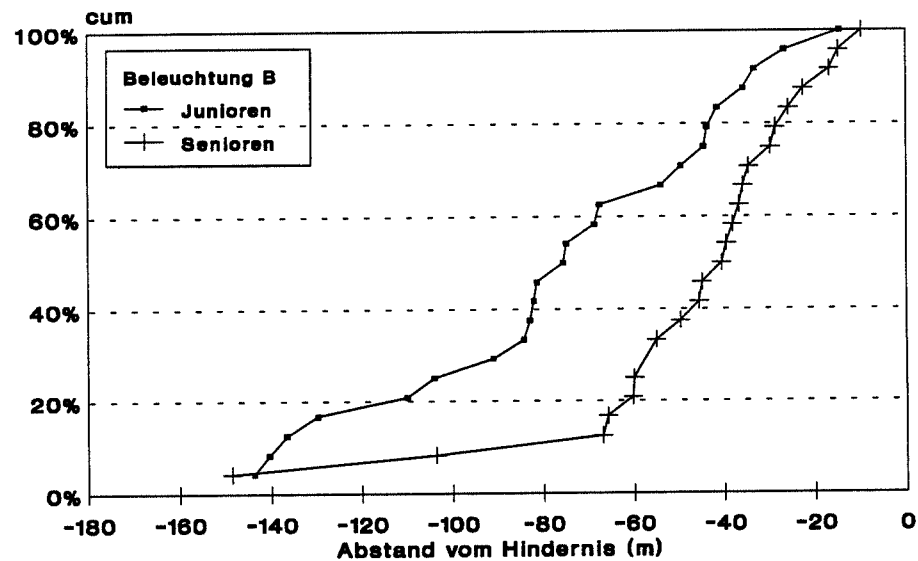
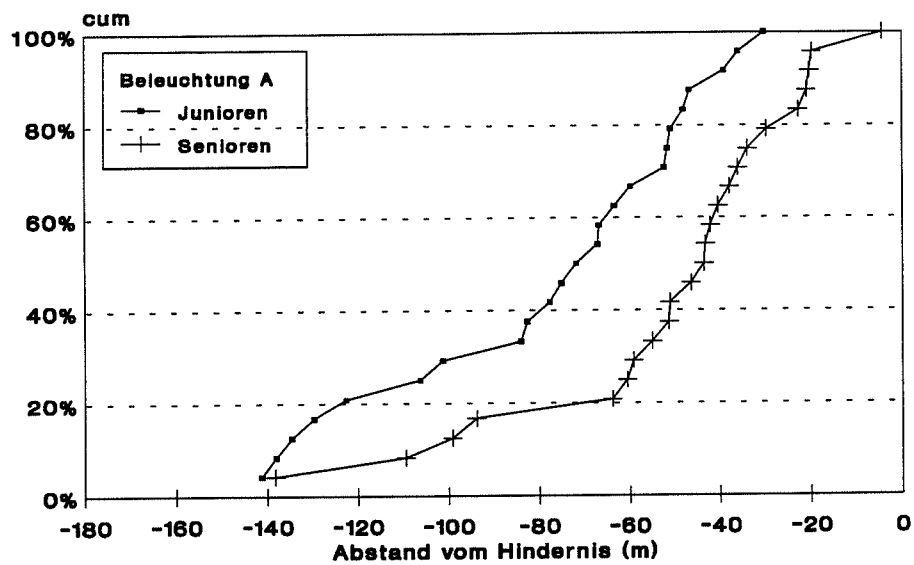
Experiment I
Kleinkreislauf offener Kern - 40 m im Tunnel (Zone D)



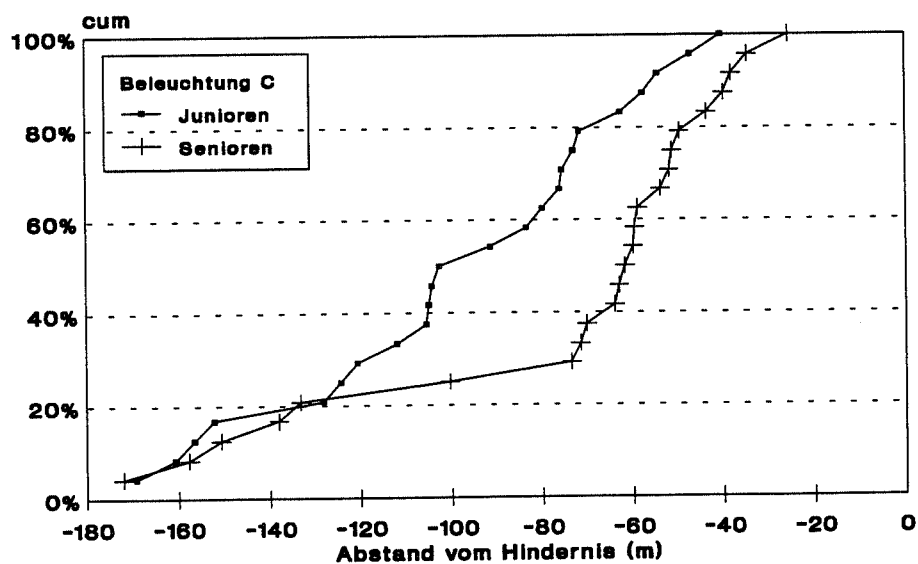
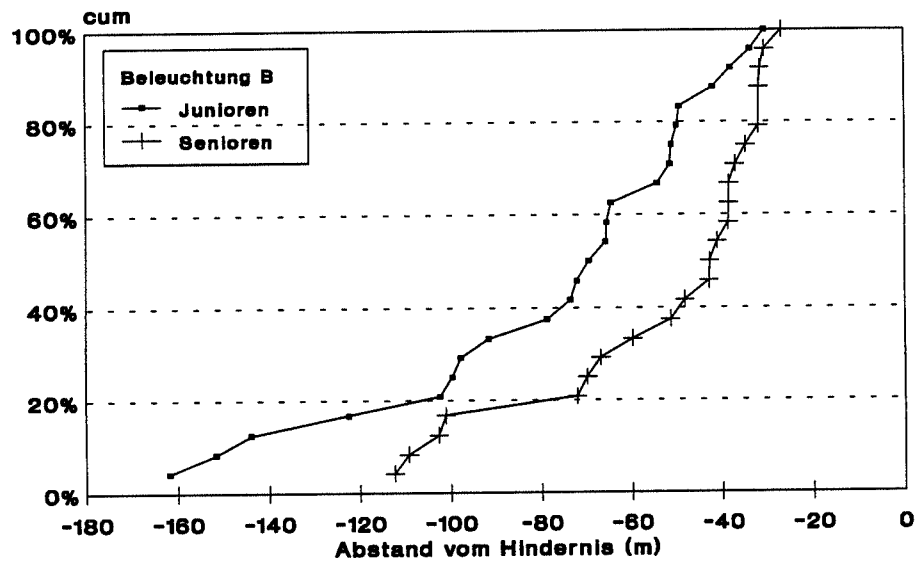
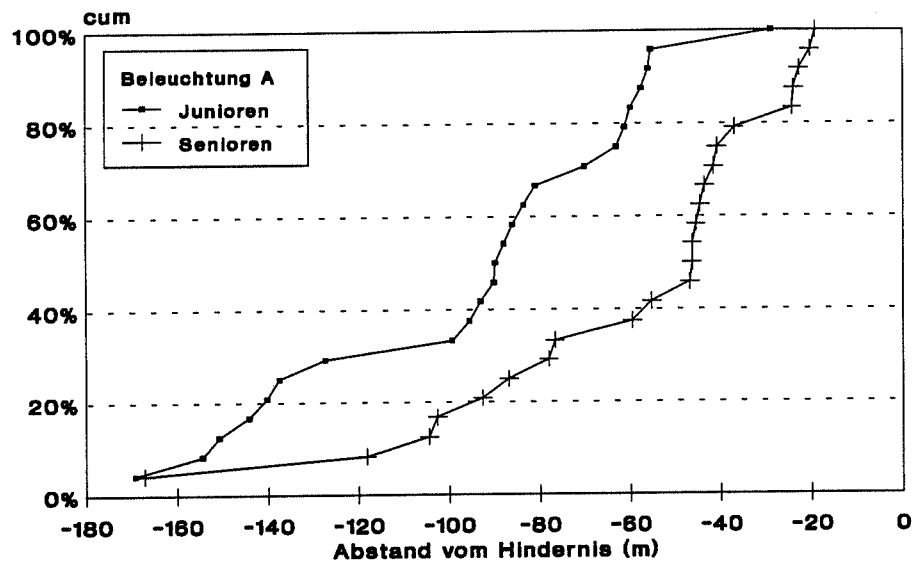
Experiment I
Rückstau Rücklicht aus - 20 m im Tunnel (Zone D)



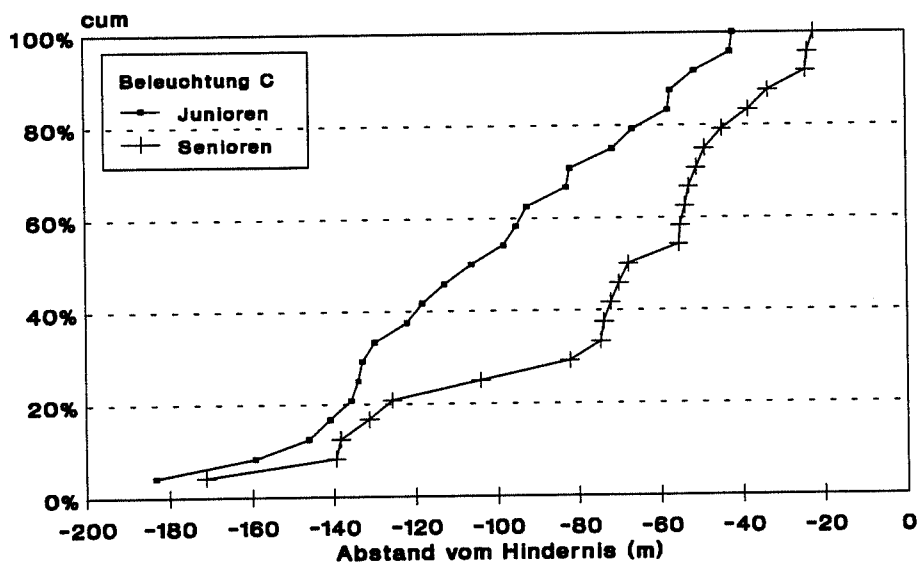
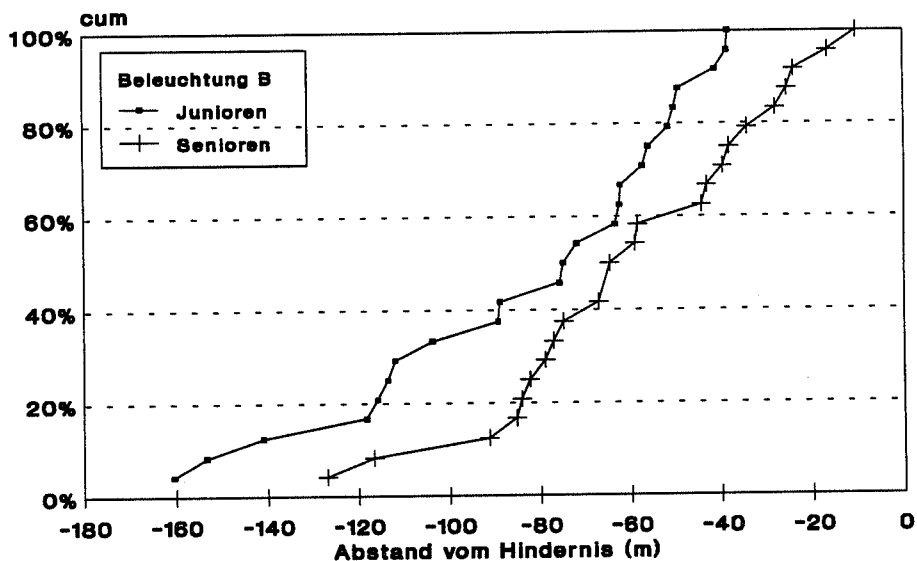
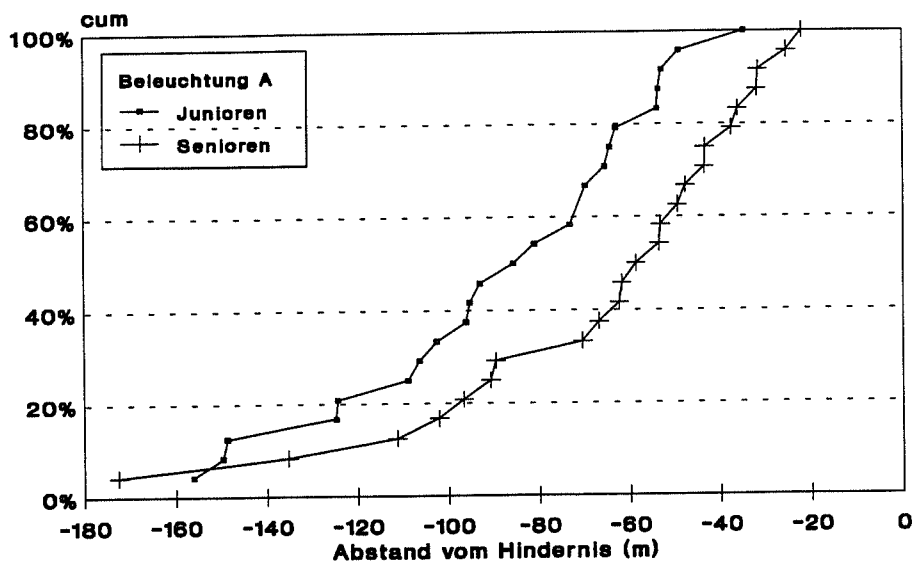
Experiment I
Rückstau Rücklicht an - 20 m im Tunnel (Zone D)



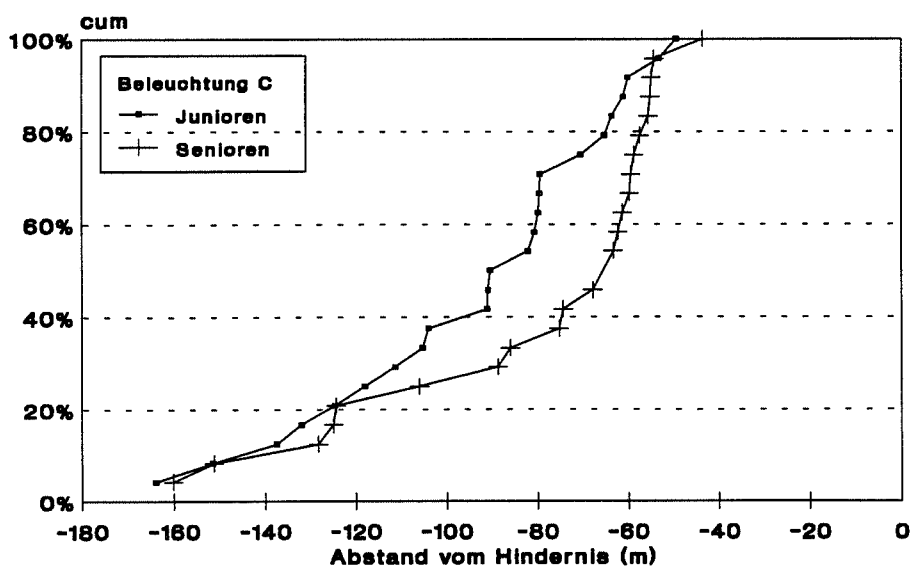
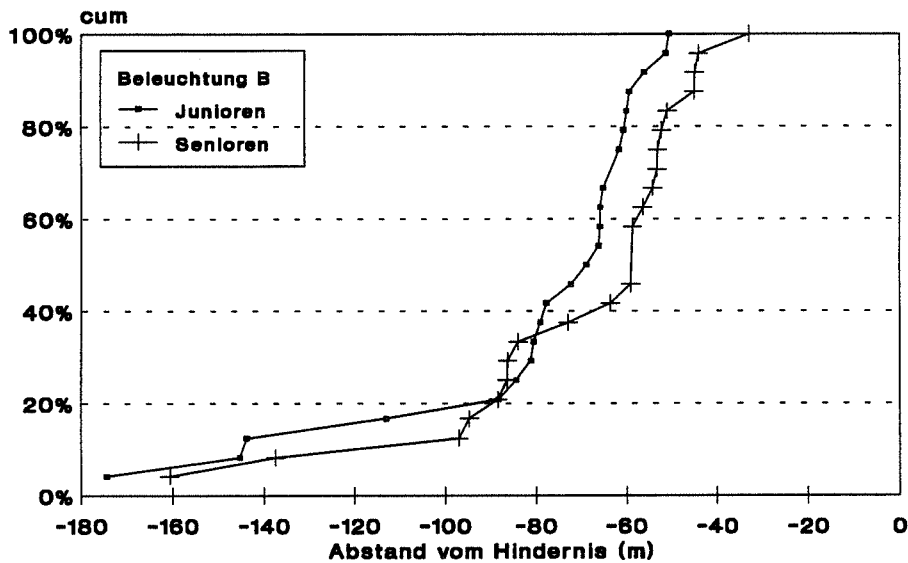
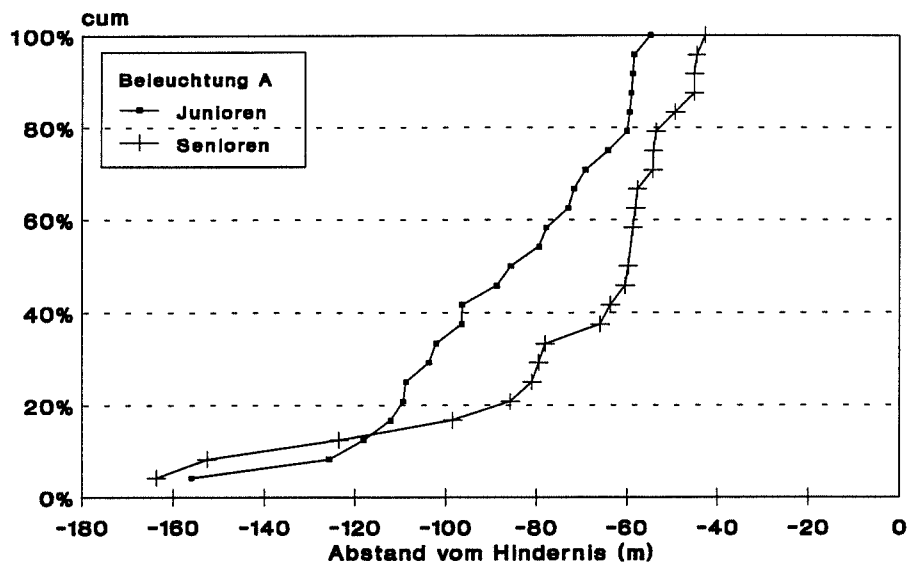
Experiment I
Rückstau Rücklicht aus - 40 m im Tunnel (Zone D)



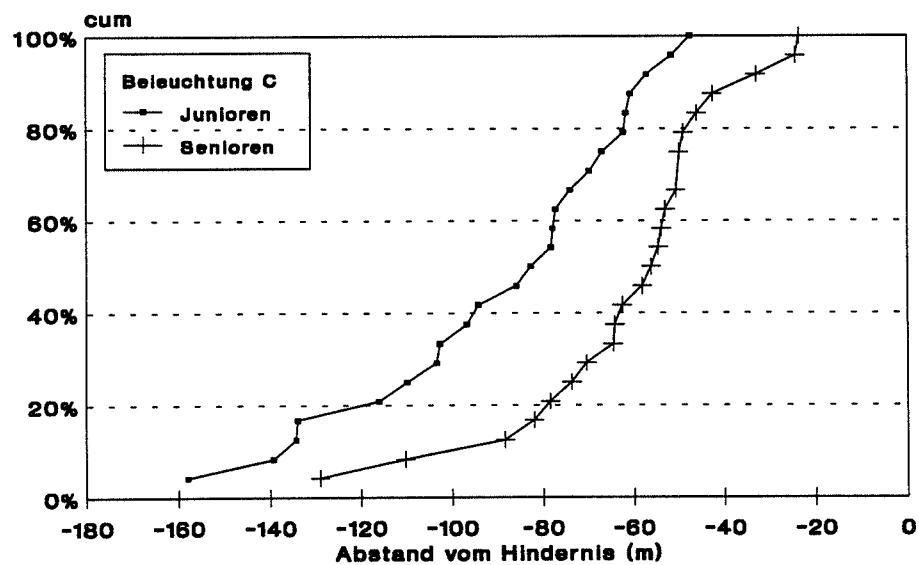
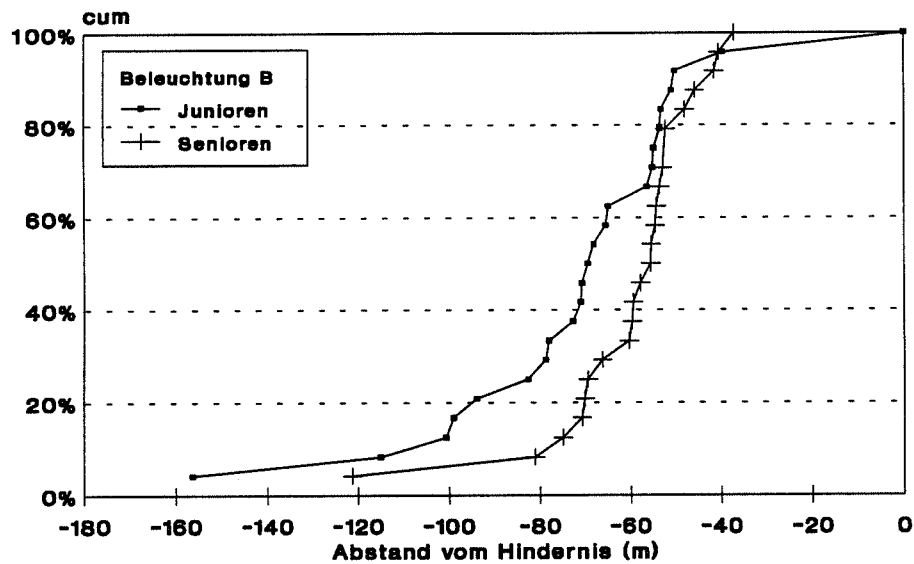
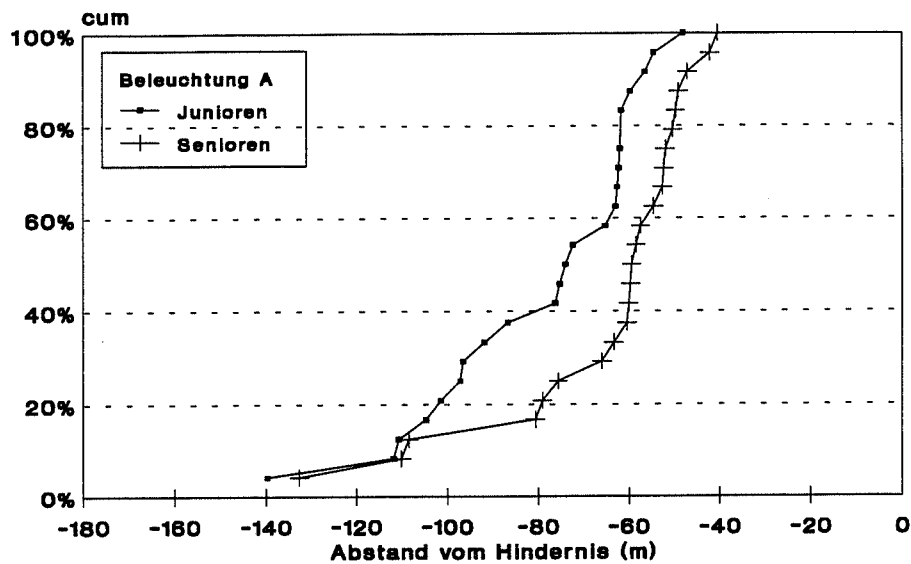
Experiment I
Rückstau Rücklicht an - 40 m im Tunnel (Zone D)



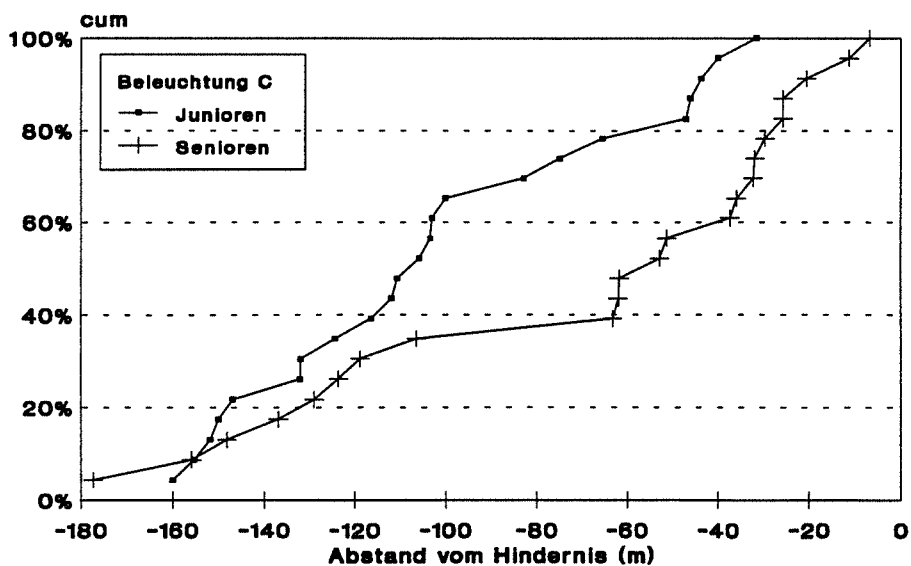
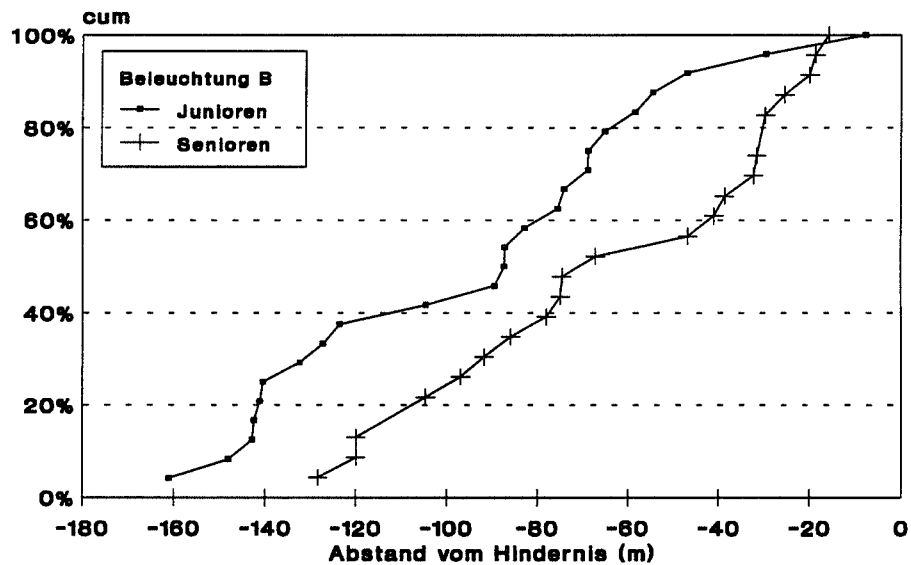
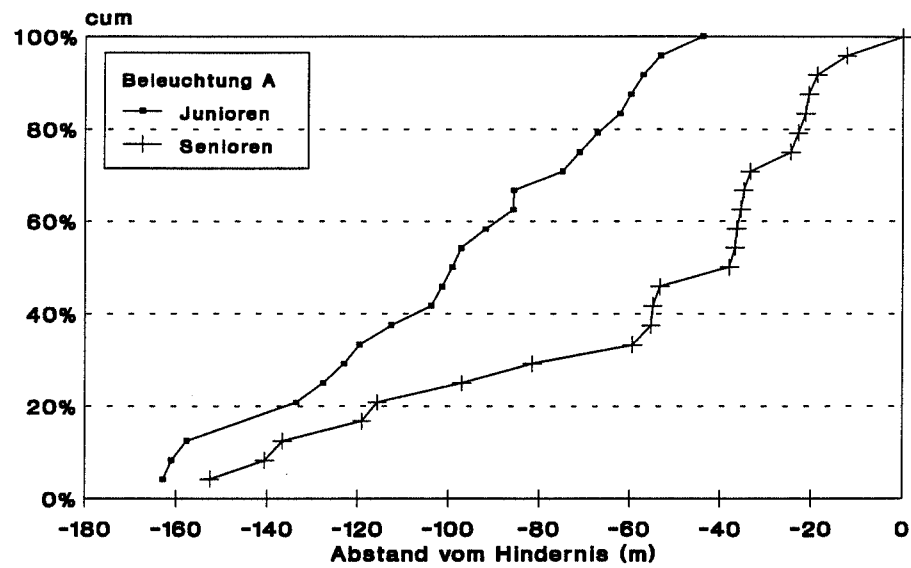
Experiment I
Rückstau Rücklicht aus - 80 m im Tunnel (Zone D)



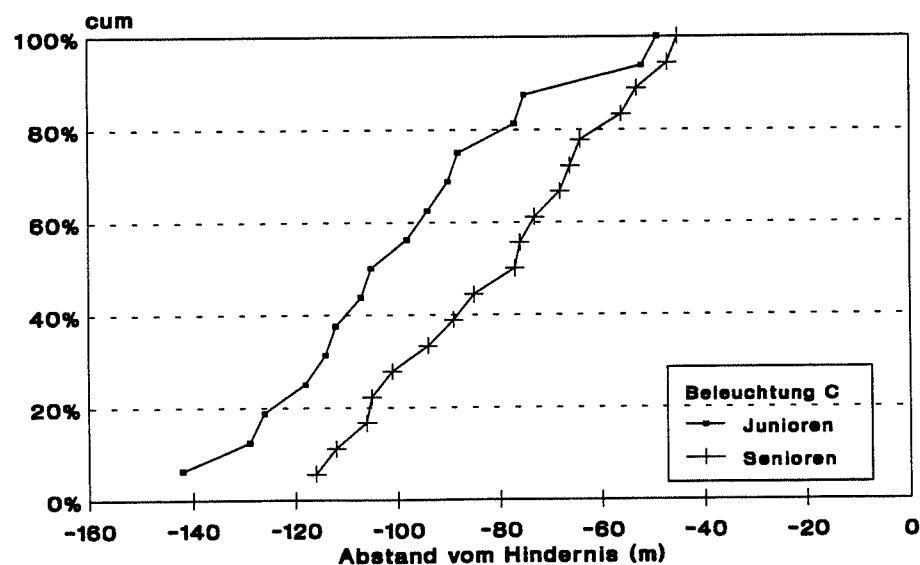
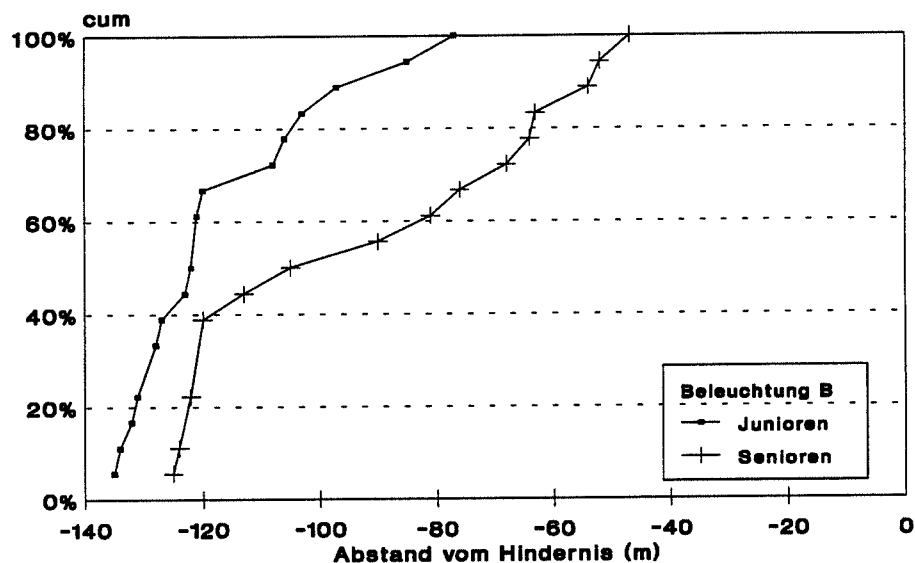
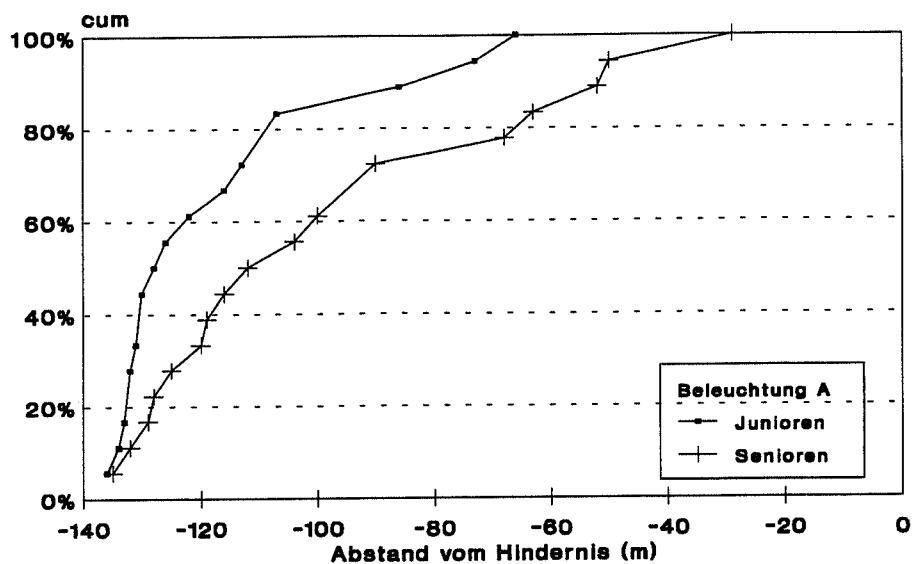
Experiment I
Rückstau Rücklicht an - 80 m im Tunnel (Zone D)



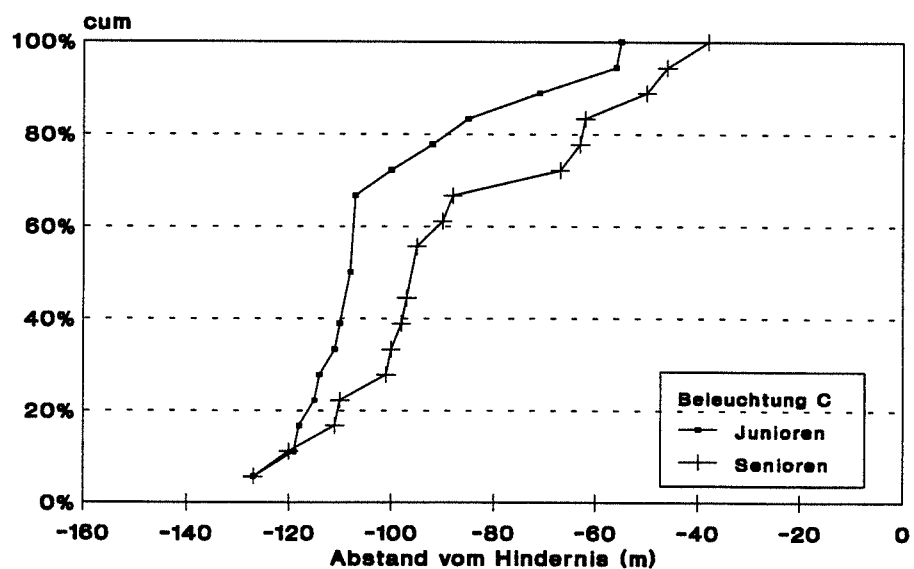
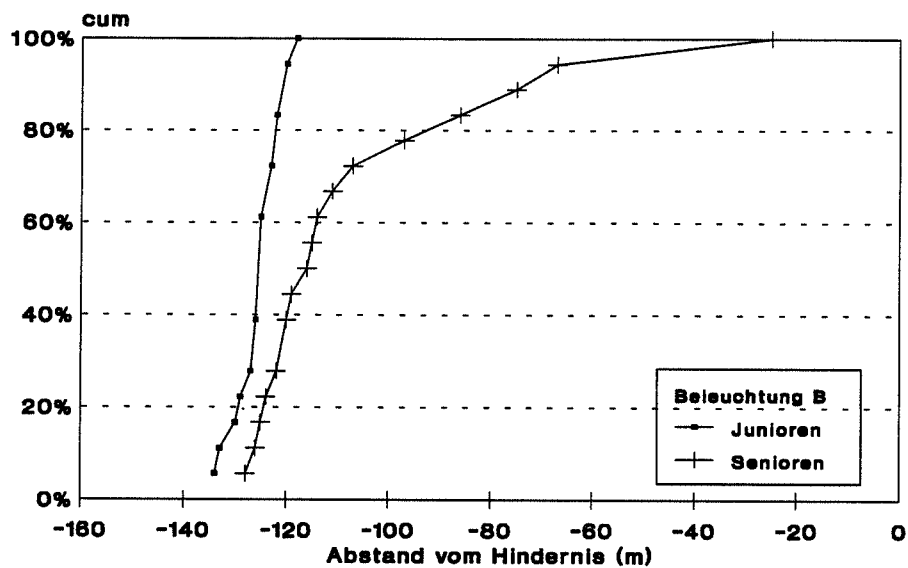
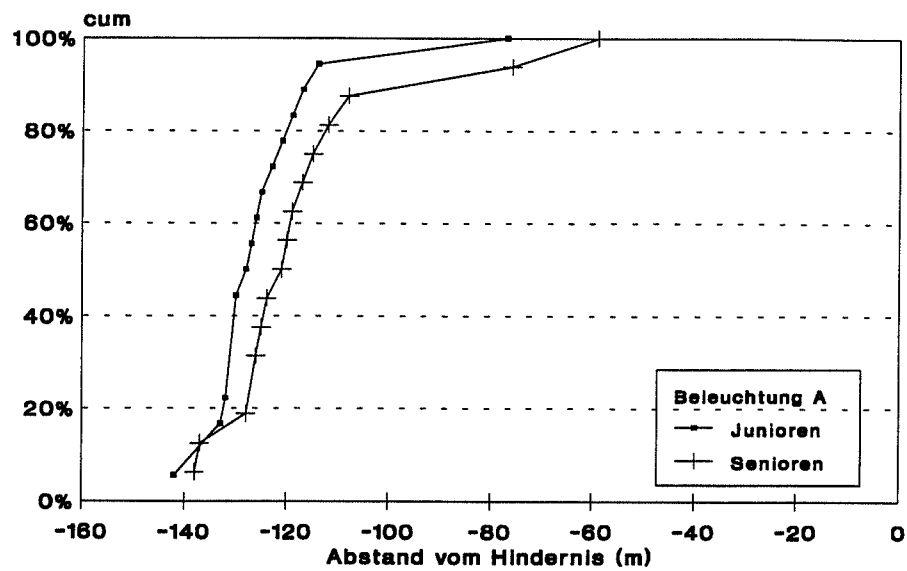
Experiment I
Lichtsignalanlage - 20 m im Tunnel (Zone D)



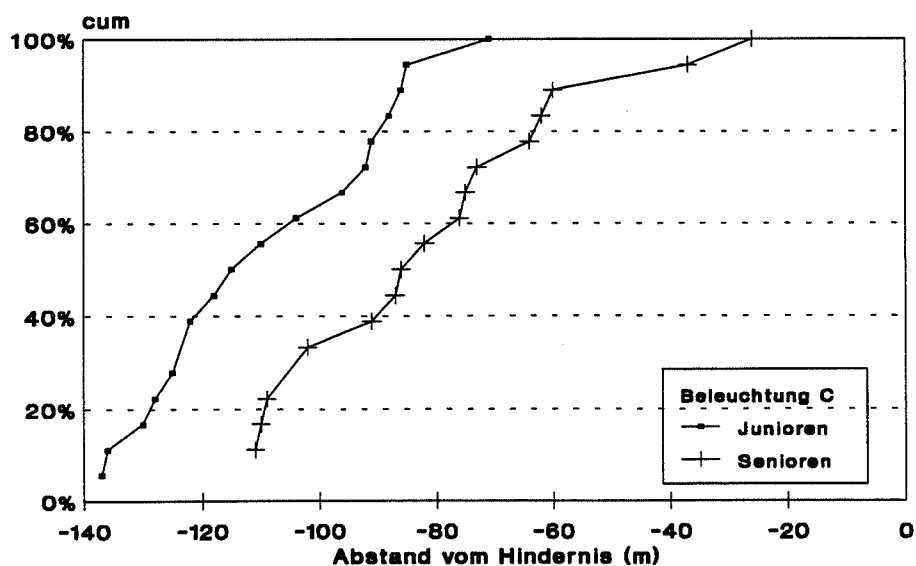
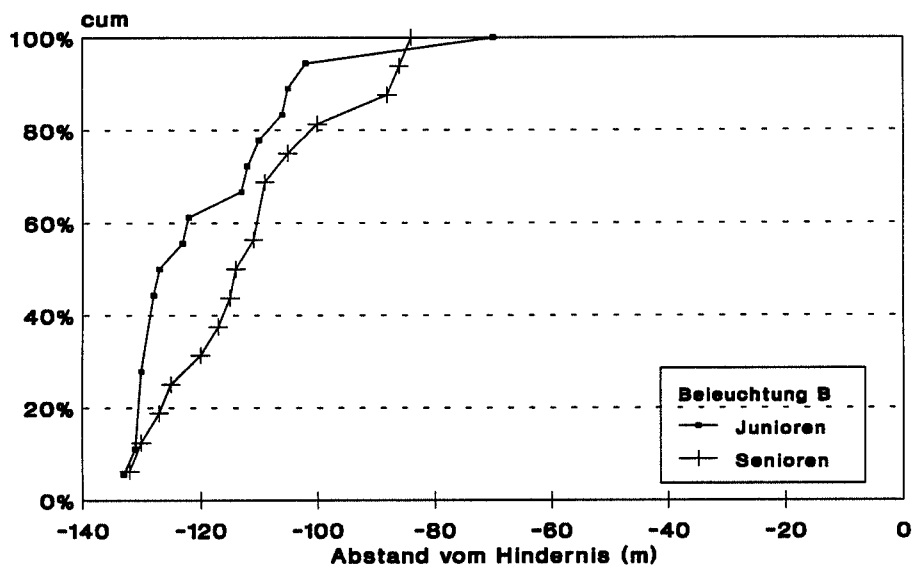
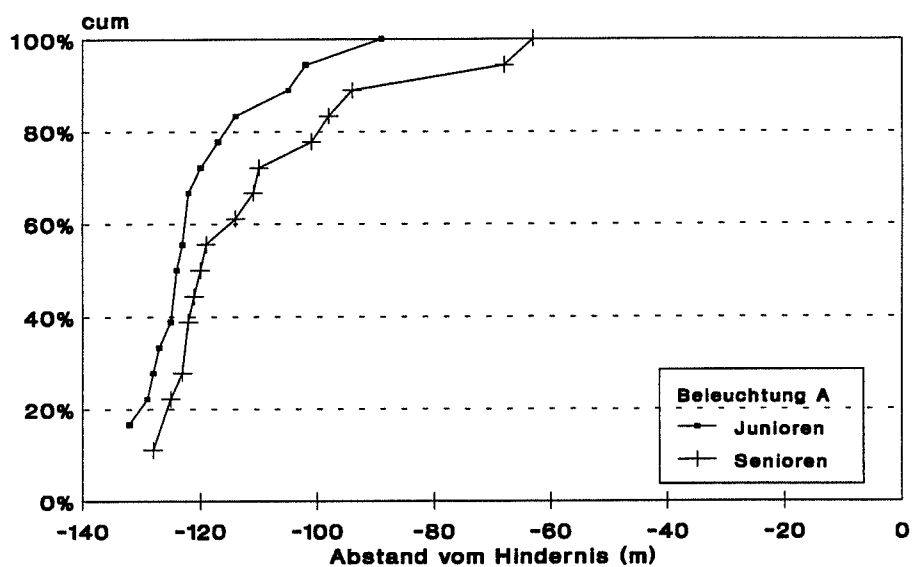
Experiment II Kleinkreisel massiver Kern - 160 m im Tunnel (Zone E)



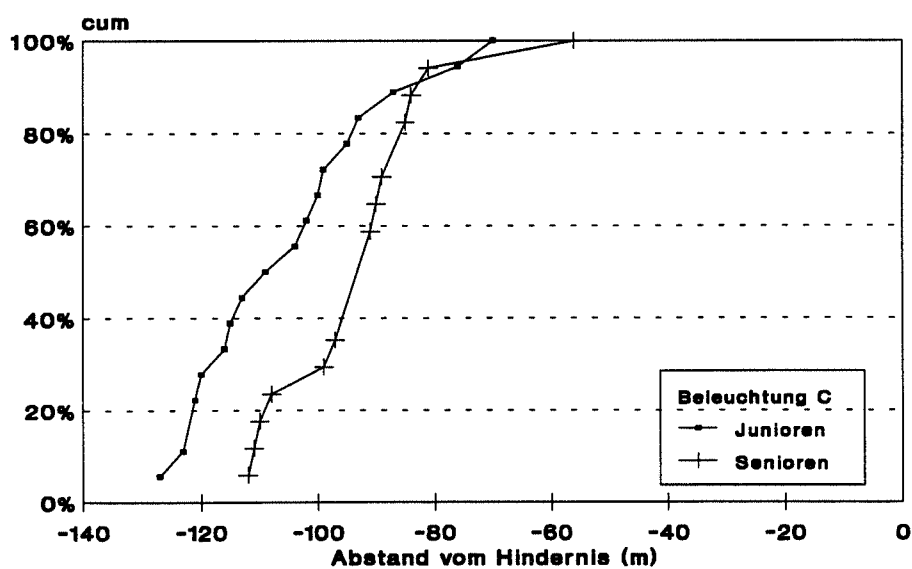
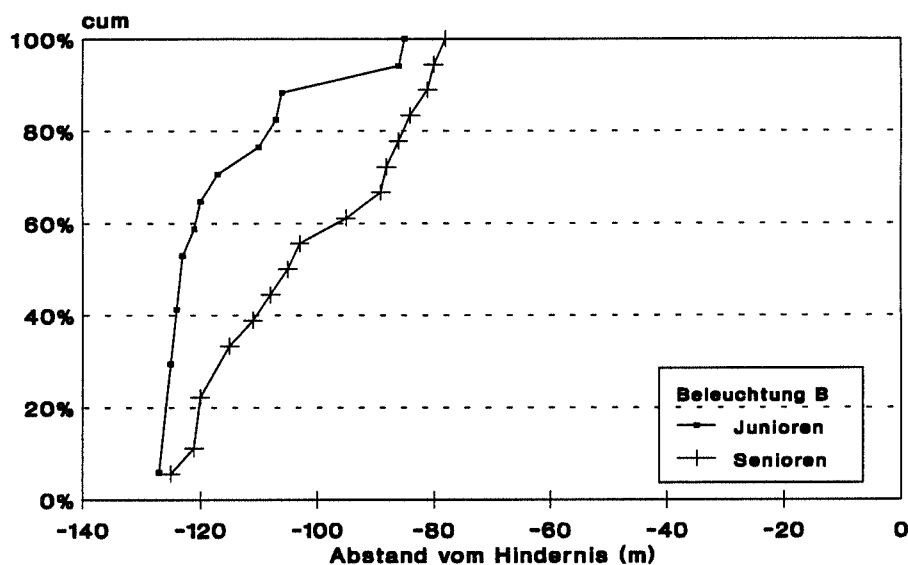
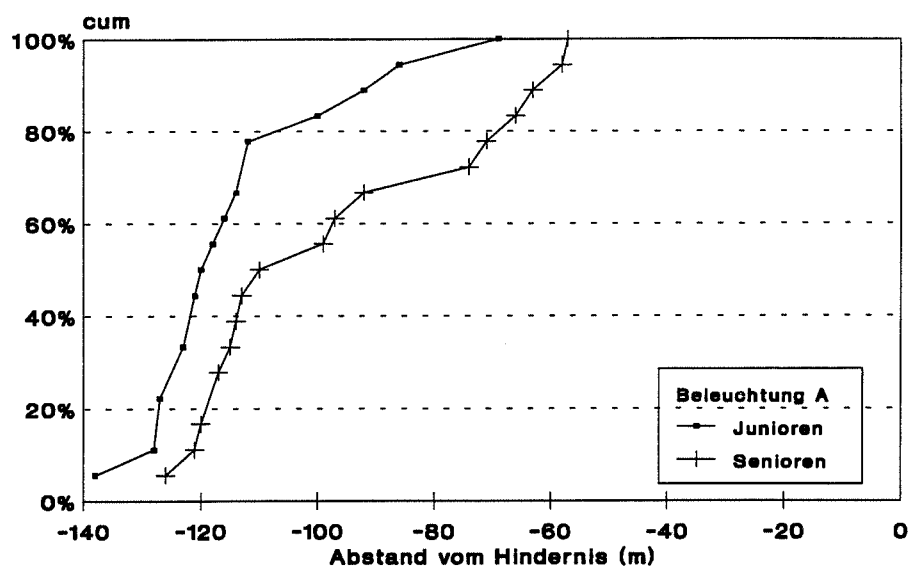
Experiment II
Kleinkreislauf offener Kern - 160 m im Tunnel (Zone E)



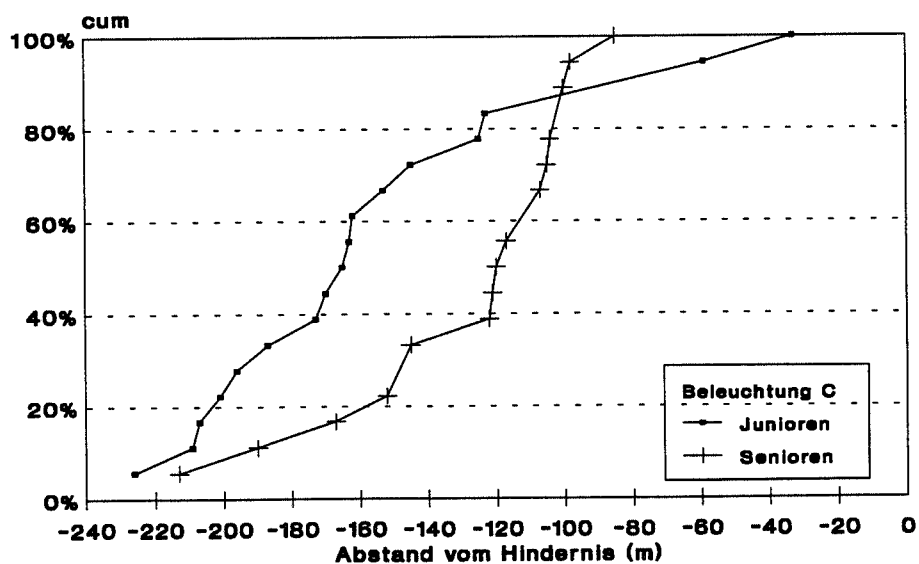
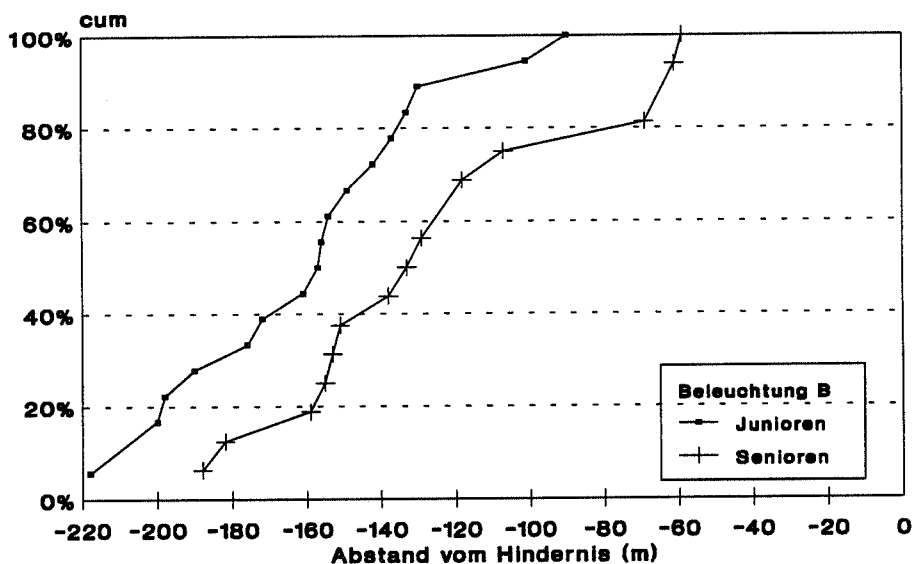
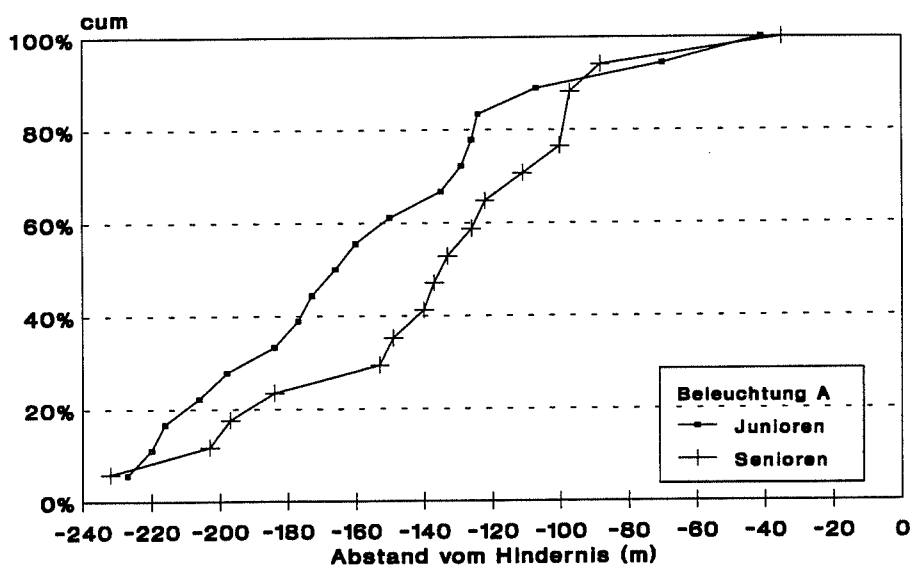
Experiment II
Rückstau Licht aus - 160 m im Tunnel (Zone E)



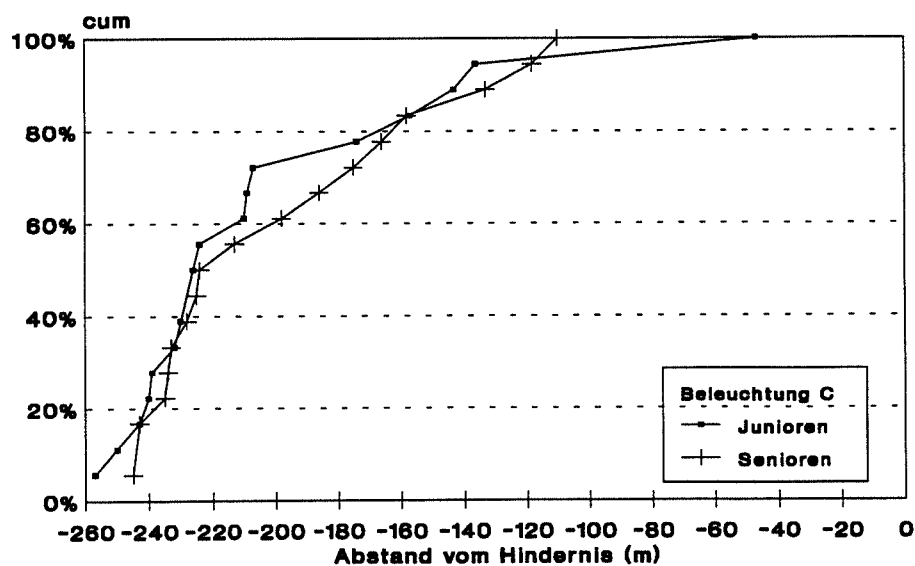
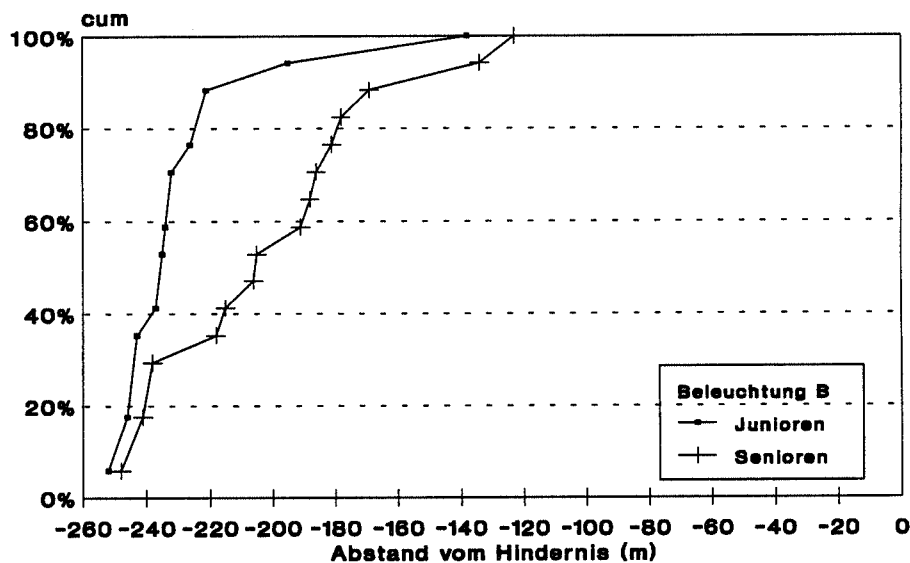
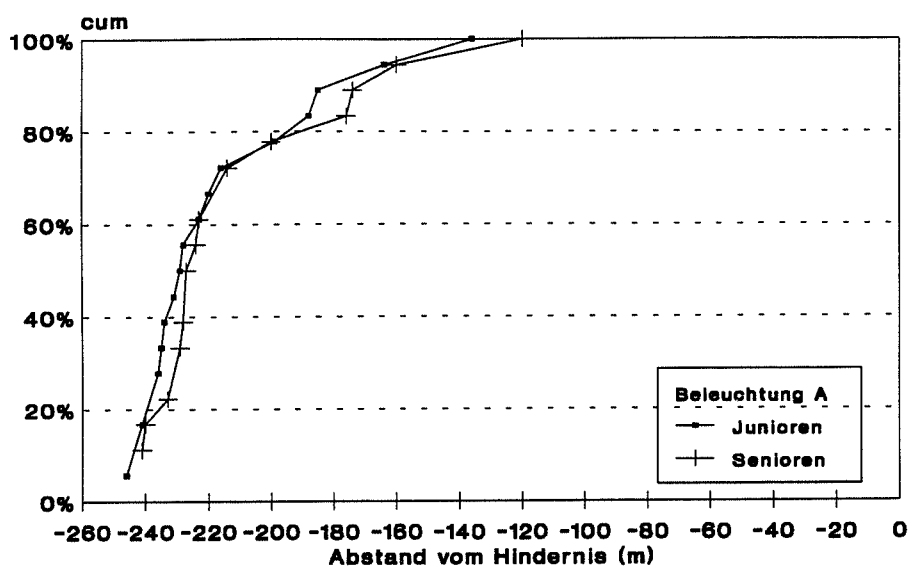
Experiment II
Rückstau Licht an - 160 m im Tunnel (Zone E)



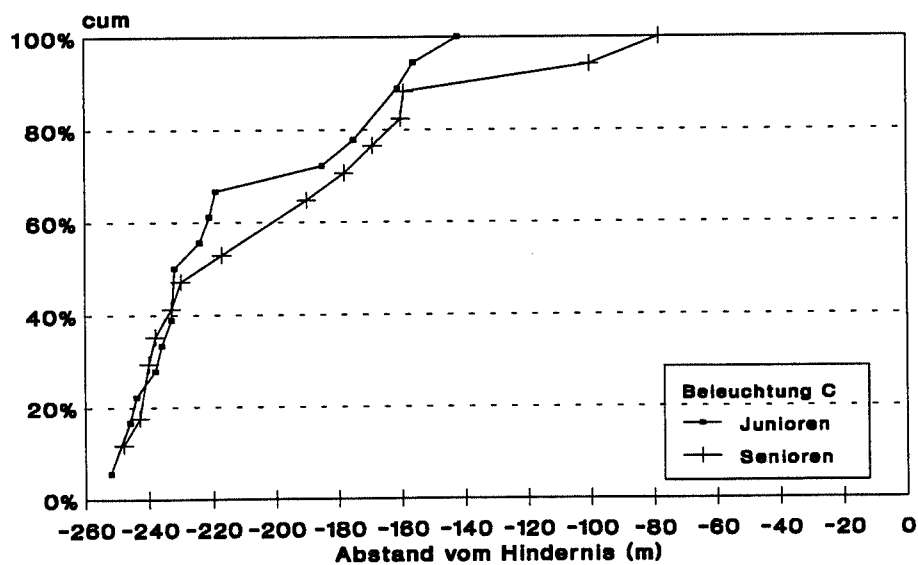
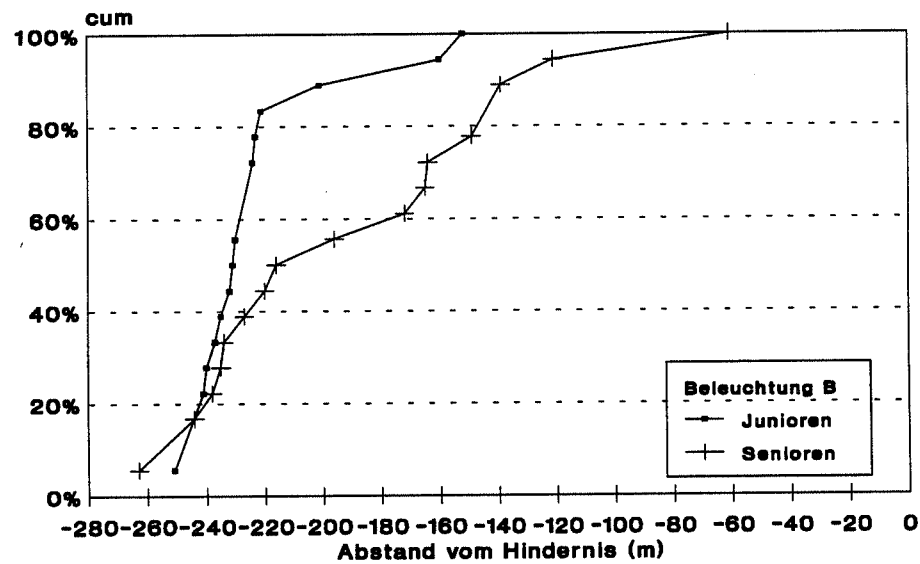
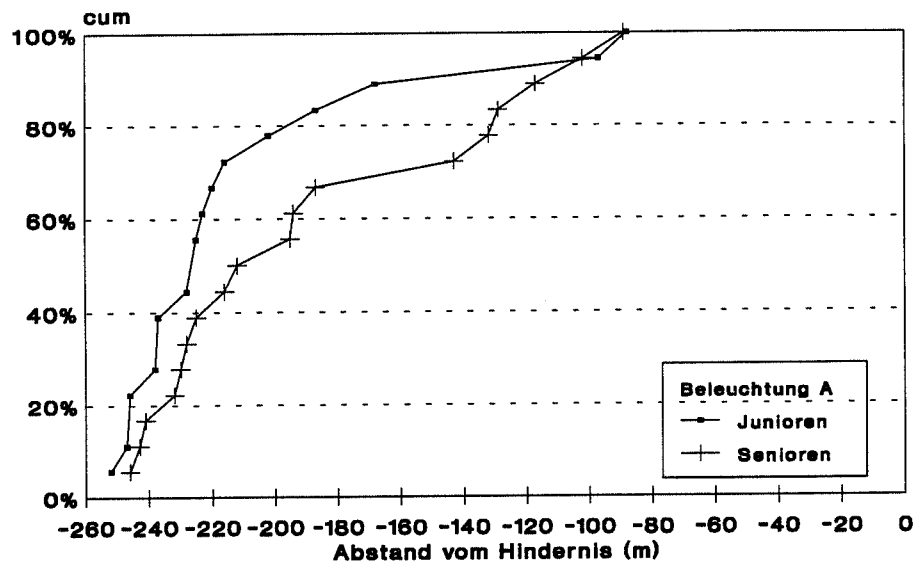
Experiment II
Kleinkreislauf offener Kern - 20 m vor Tunnelausgang (Zone F)



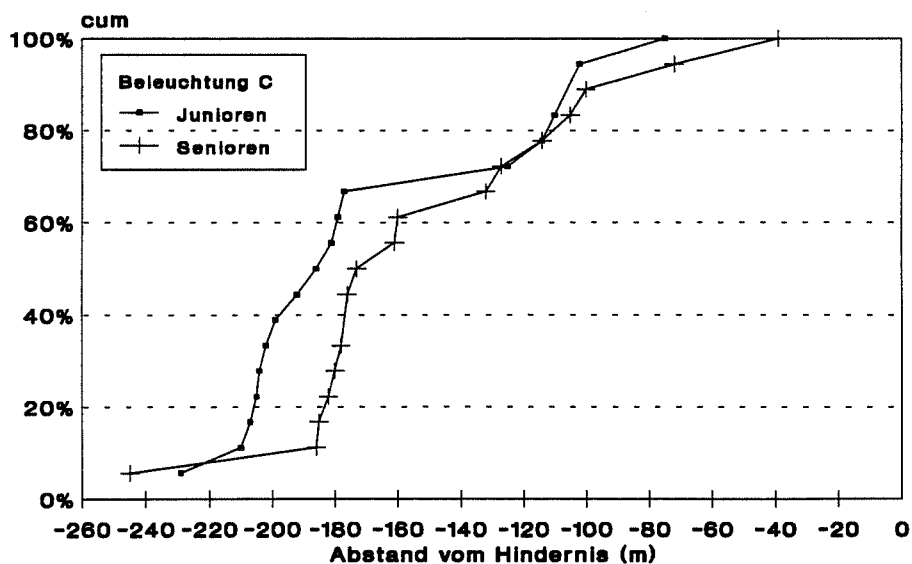
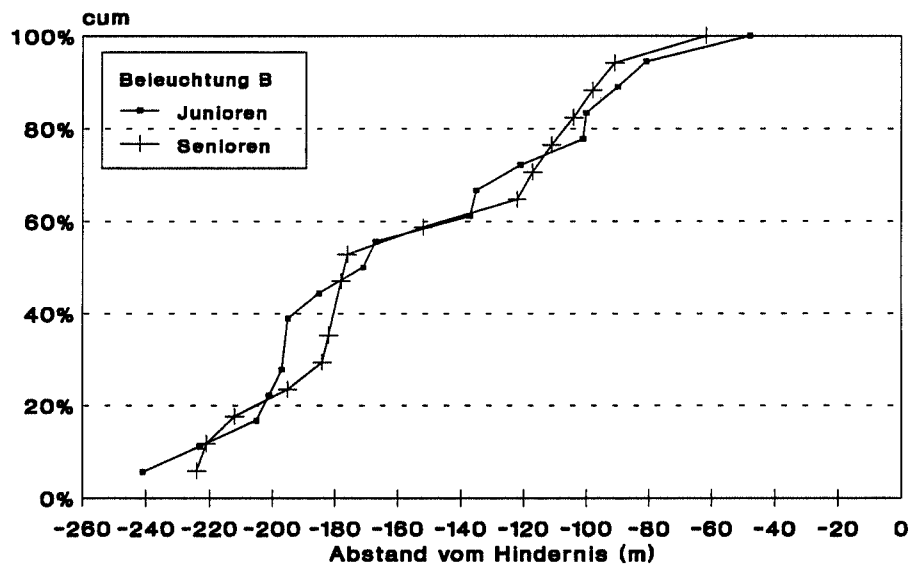
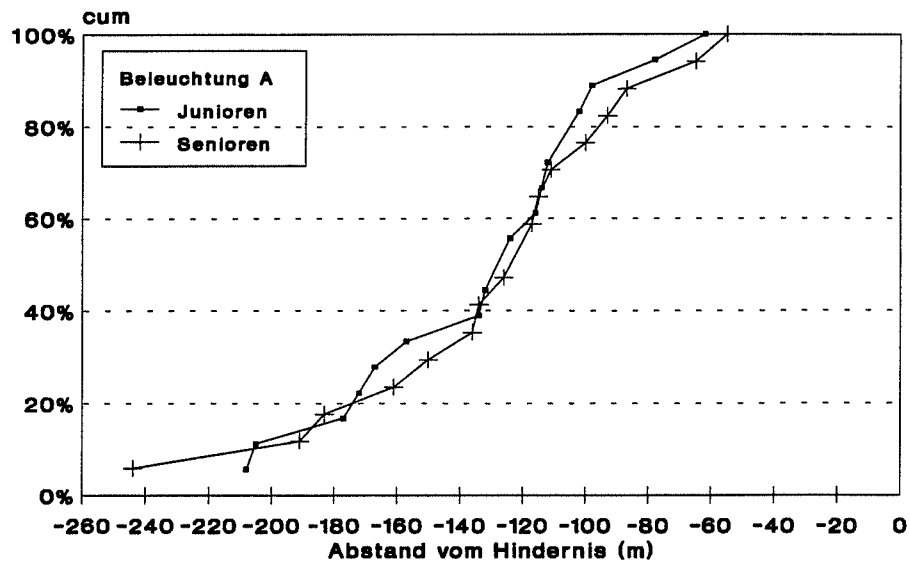
Experiment II
Rückstau Rücklicht aus - 20 m vor Tunnelausgang (Zone F)



Experiment II
Rückstau Rücklicht an - 20 m vor Tunnelausgang (Zone F)

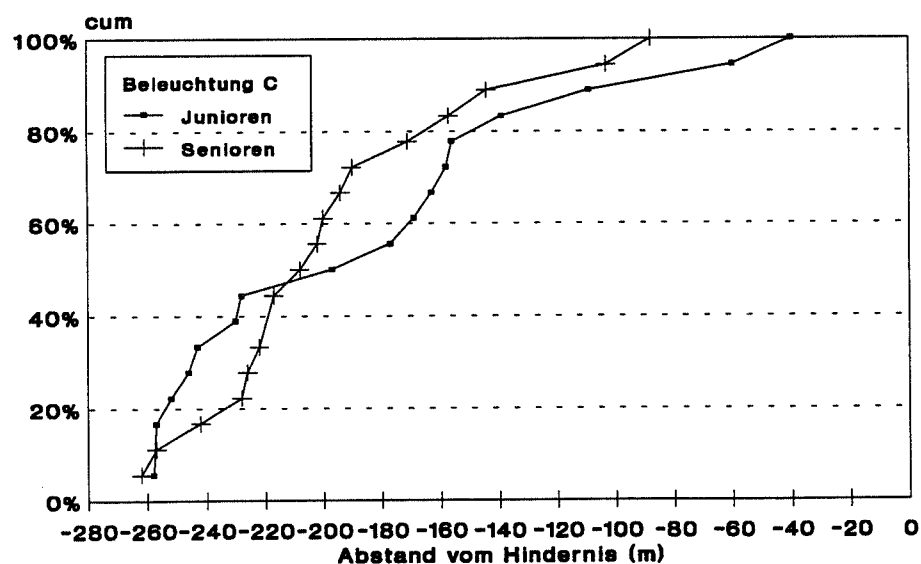
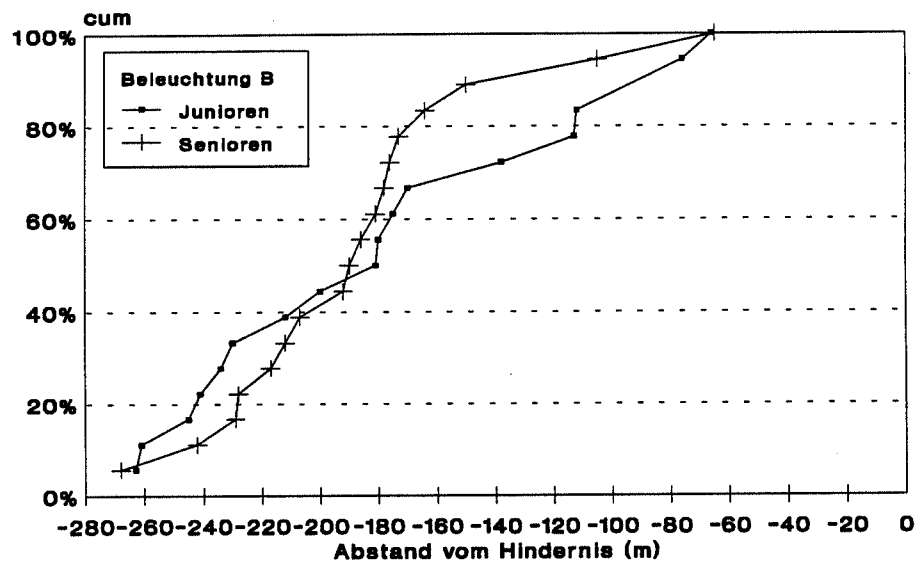
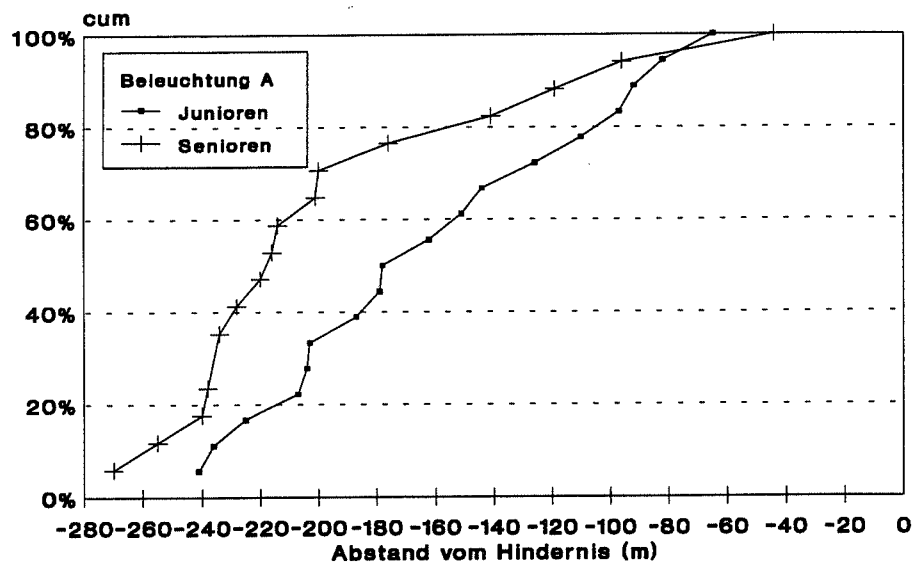


Experiment II
Kleinkreis offener Kern - 20 m vor Tunnelausgang (Zone H)

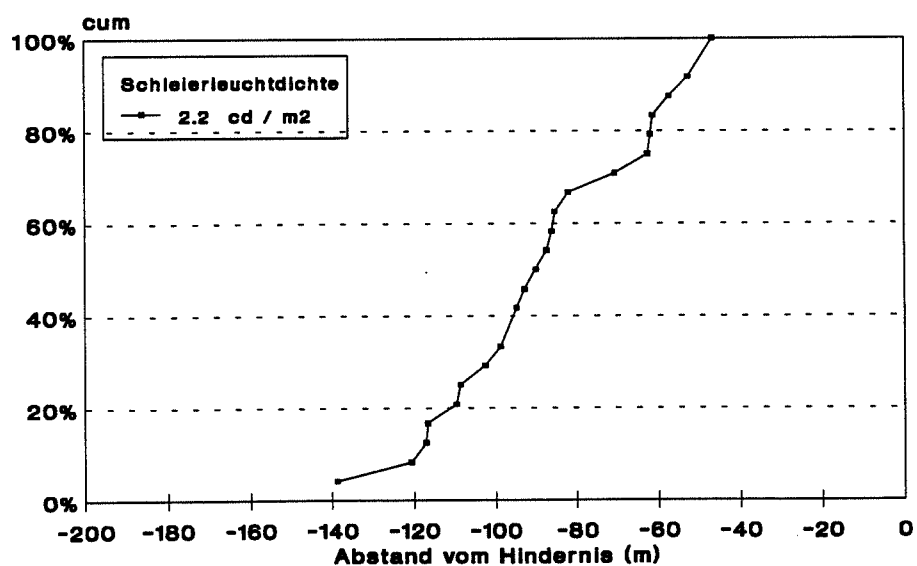
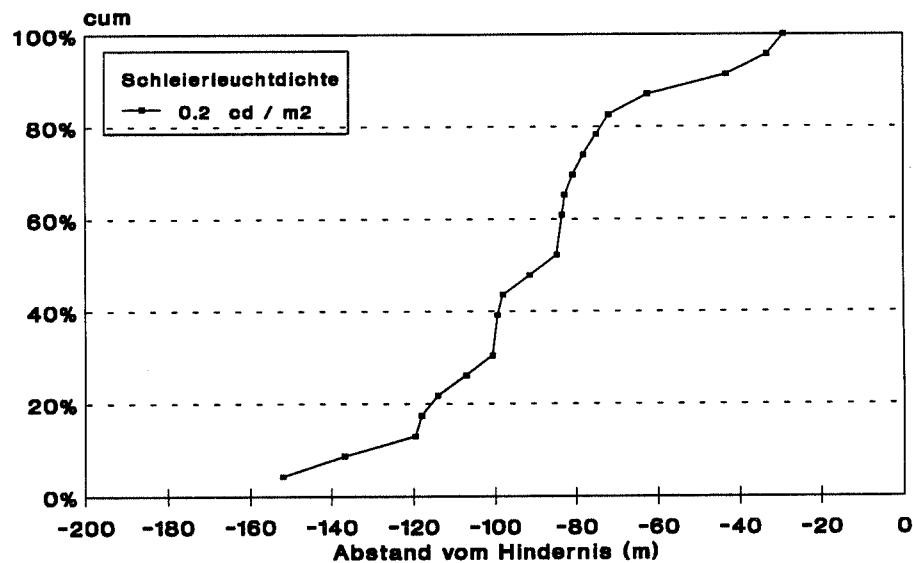
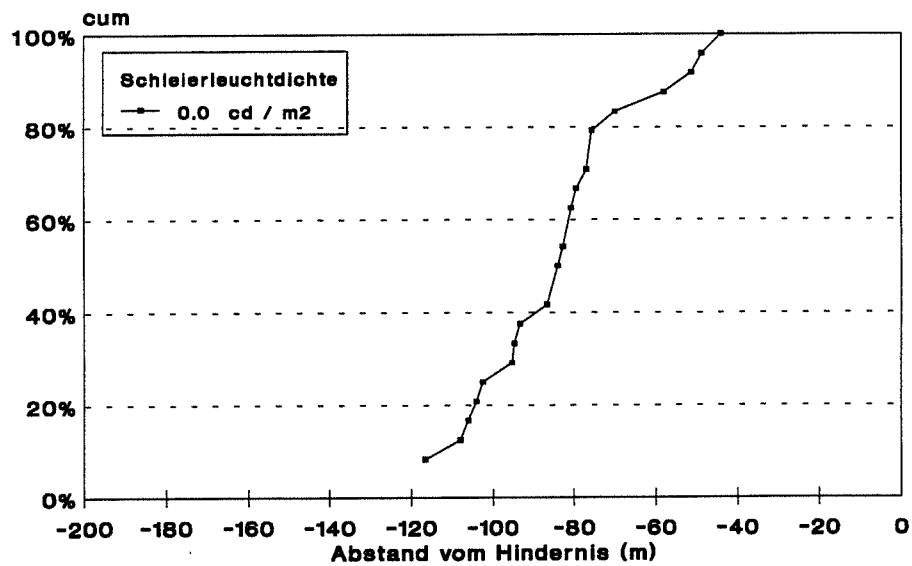


Experiment II

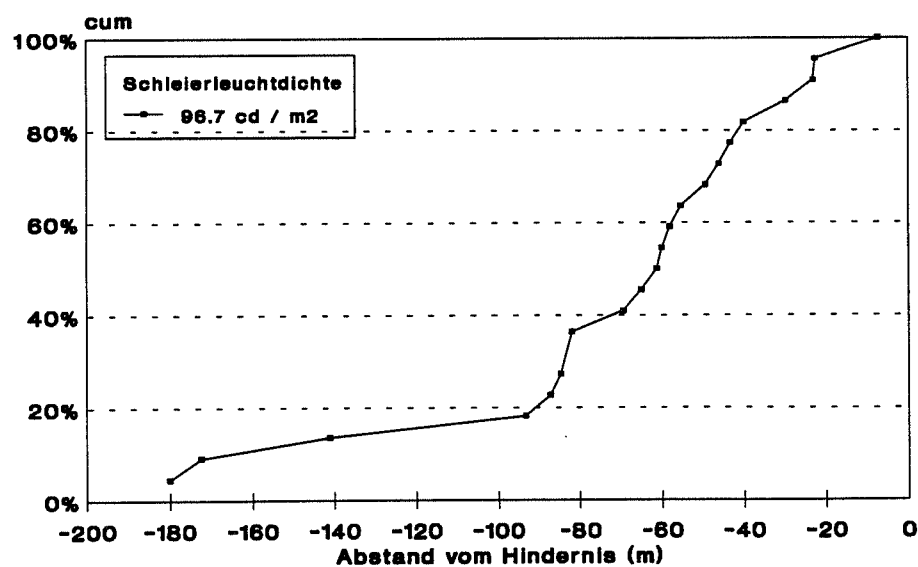
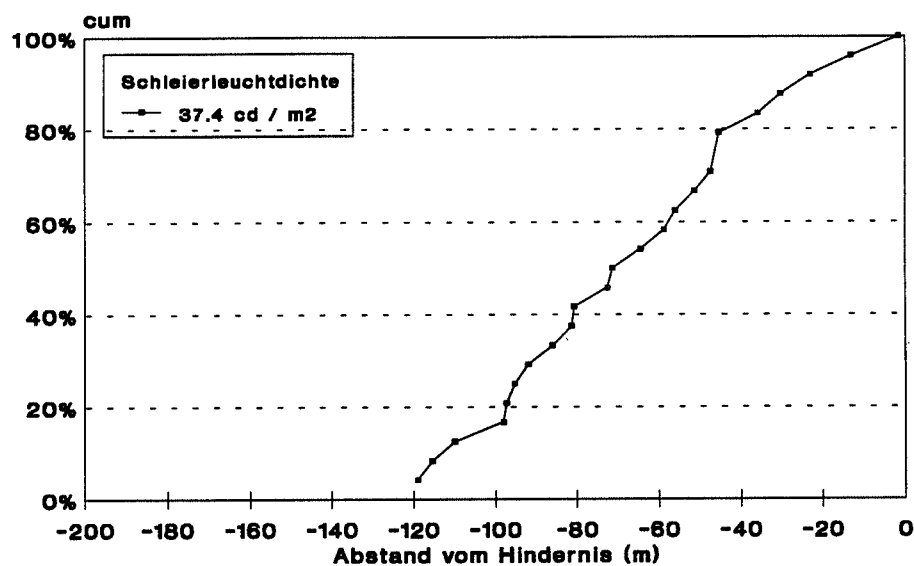
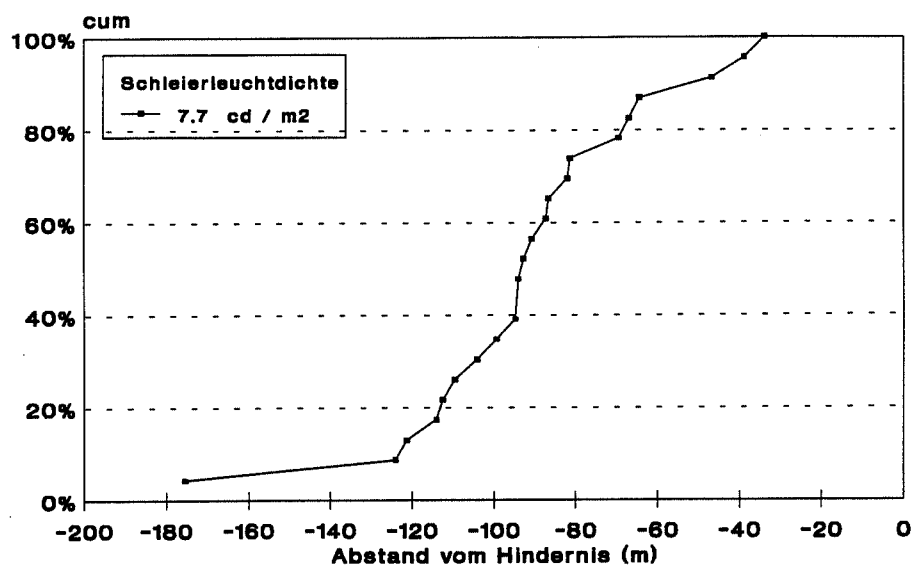
Rückstau Rücklicht aus - 20 m nach Tunnelausgang (Zone H)



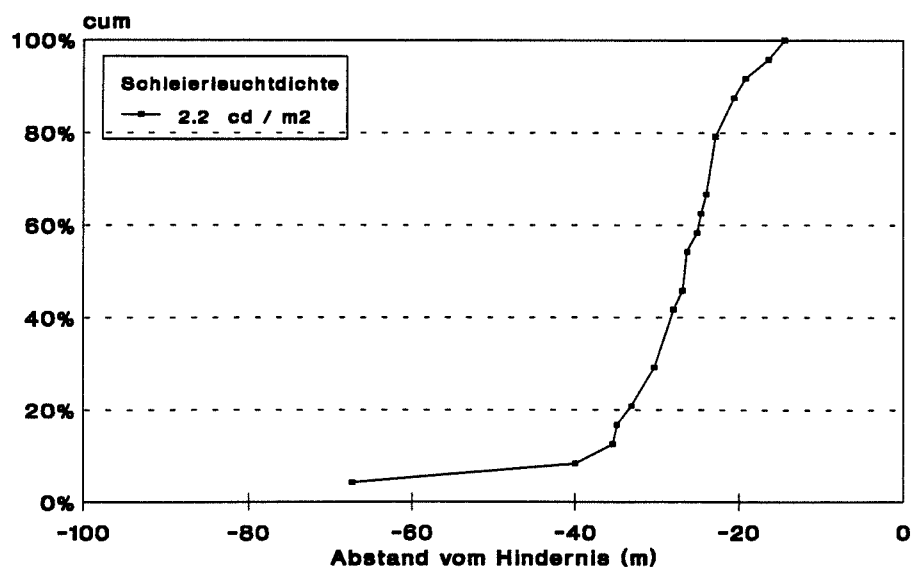
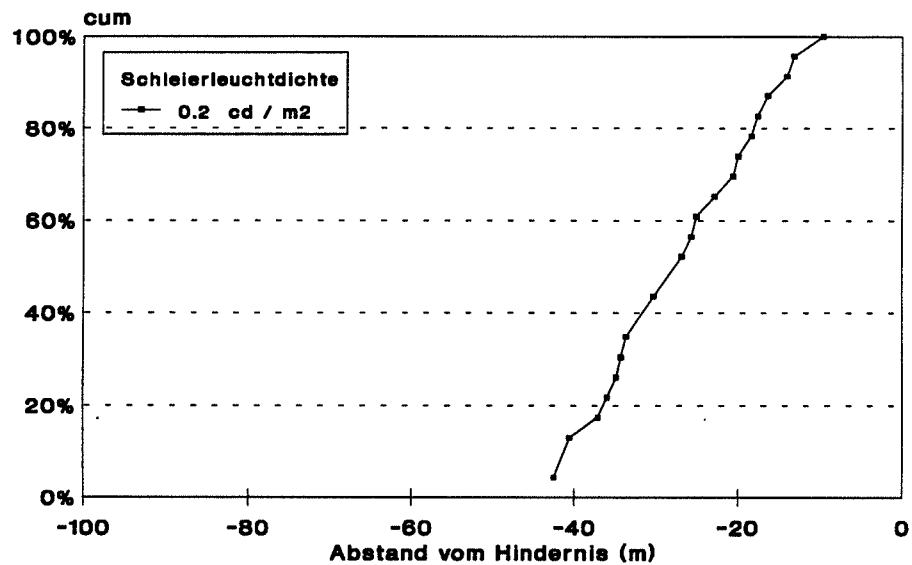
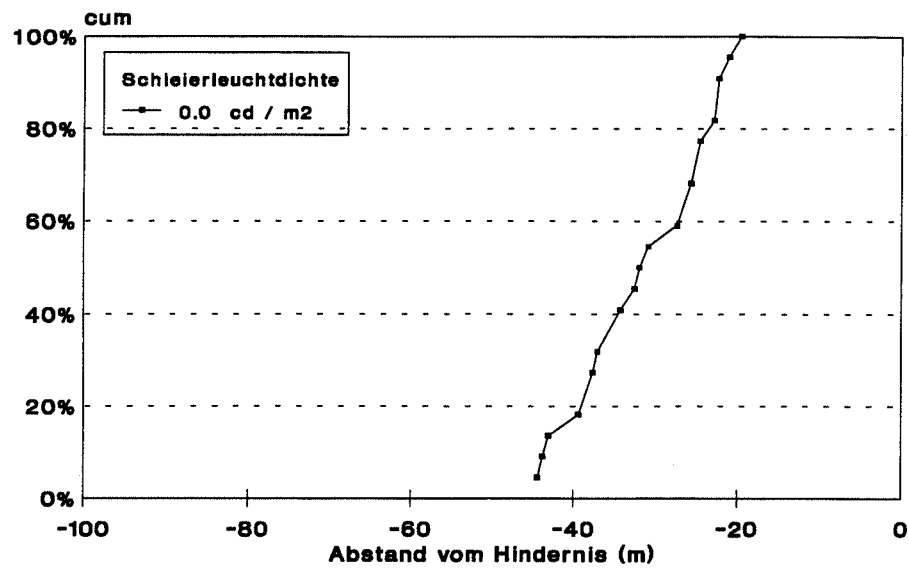
Experiment III
Kleinkreisler massiver Kern - 20 m im Tunnel (Zone D)



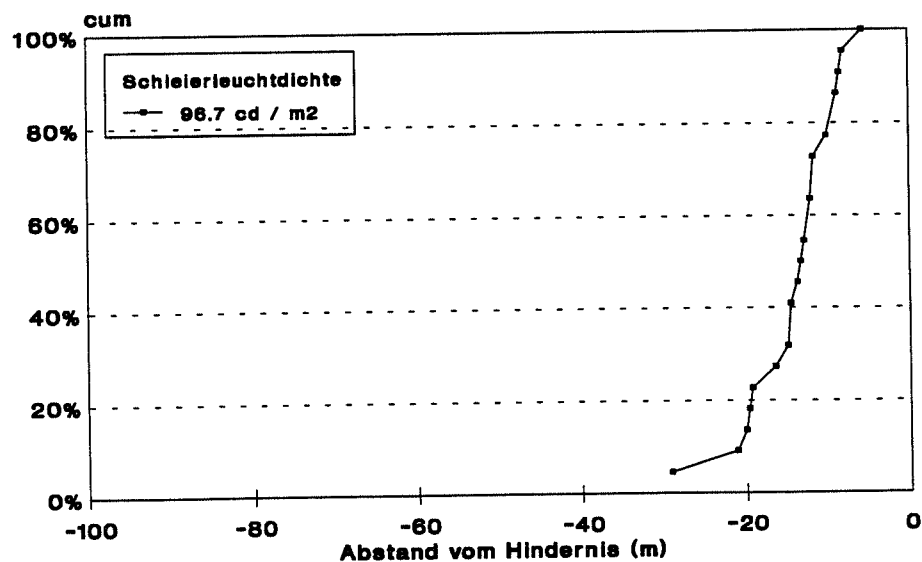
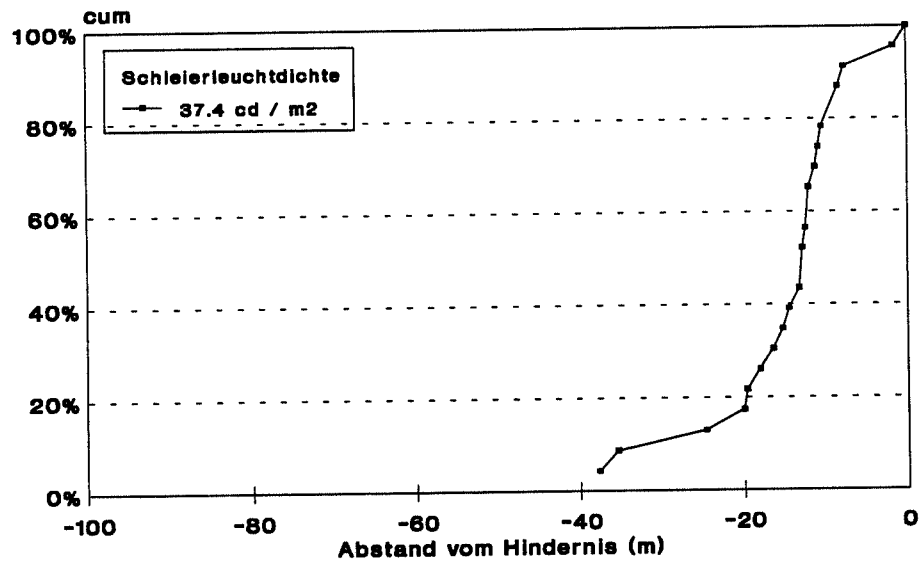
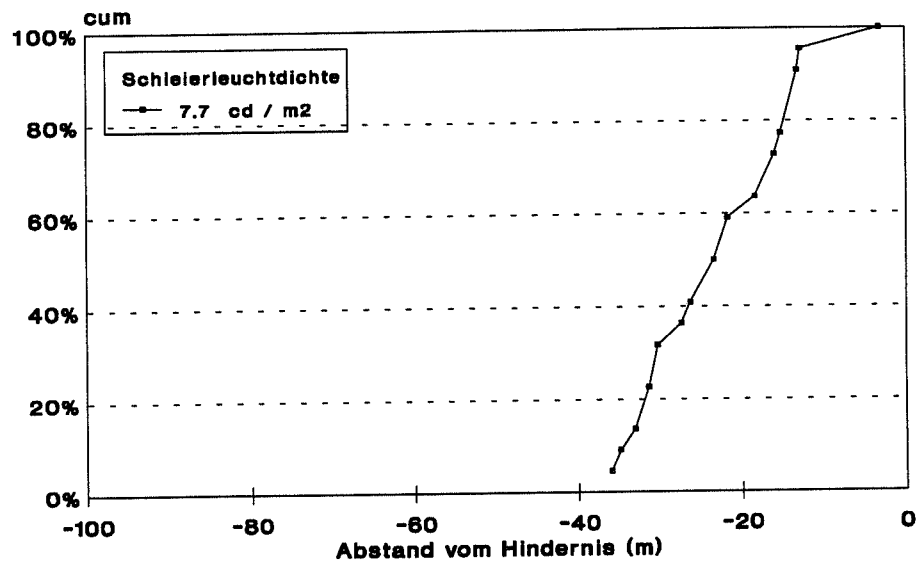
Experiment III
Kleinkreisel massiver Kern - 20 m im Tunnel (Zone D)



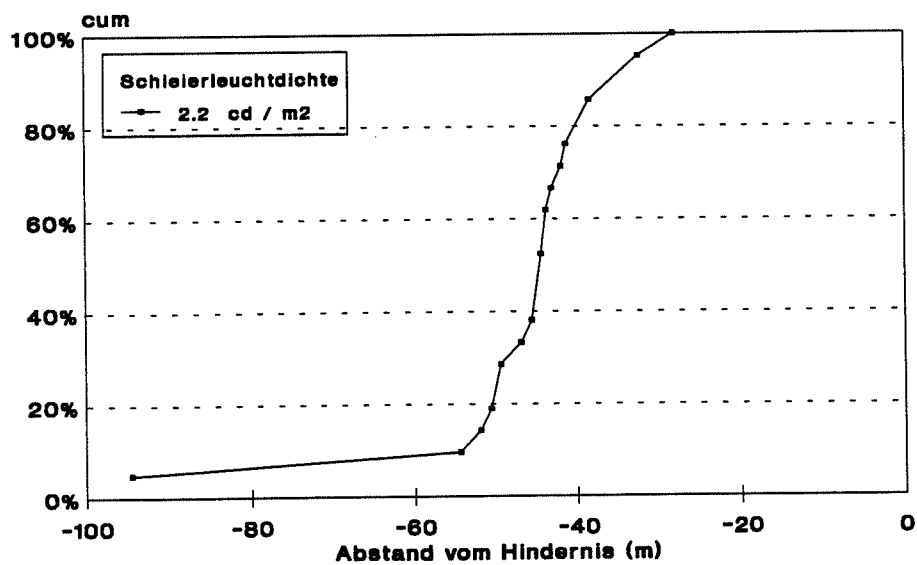
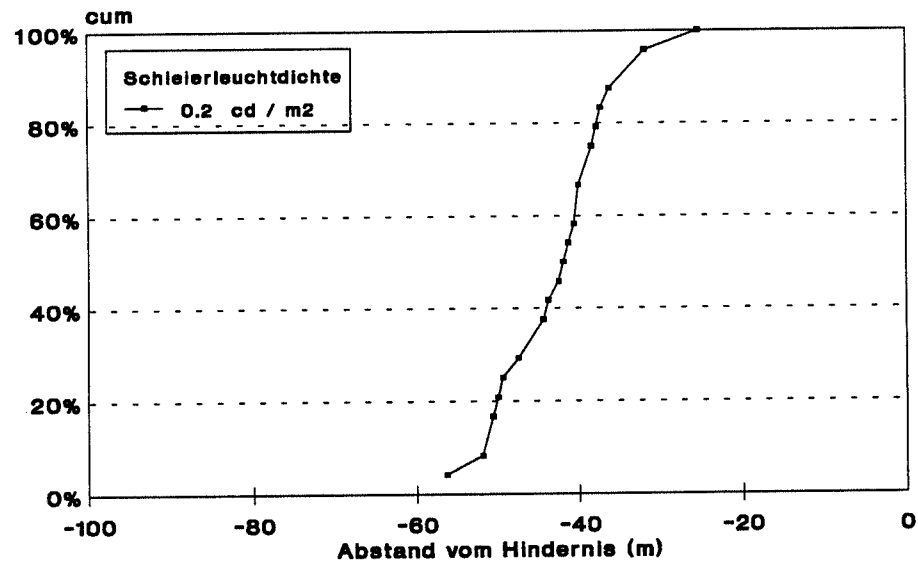
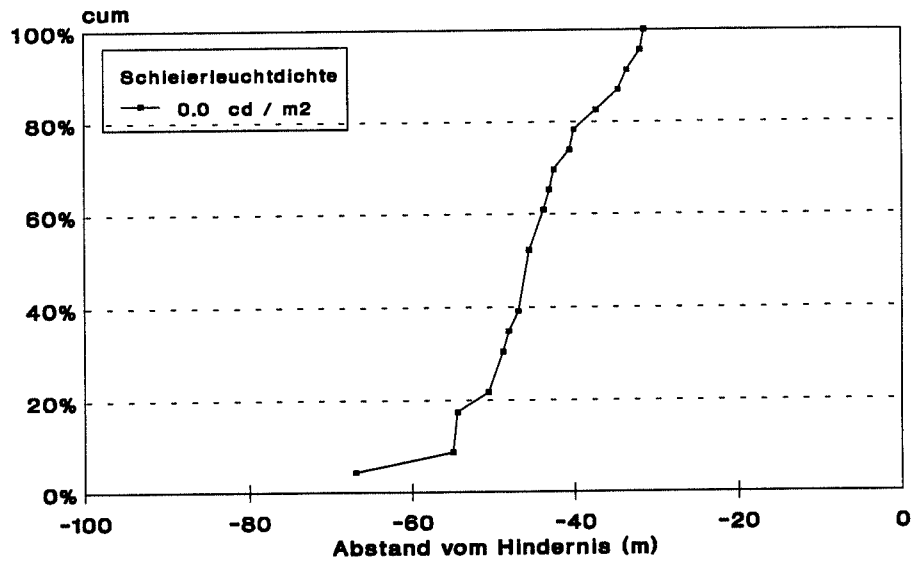
Experiment III
Kleinkreisel massiver Kern - 40 m im Tunnel (Zone D)



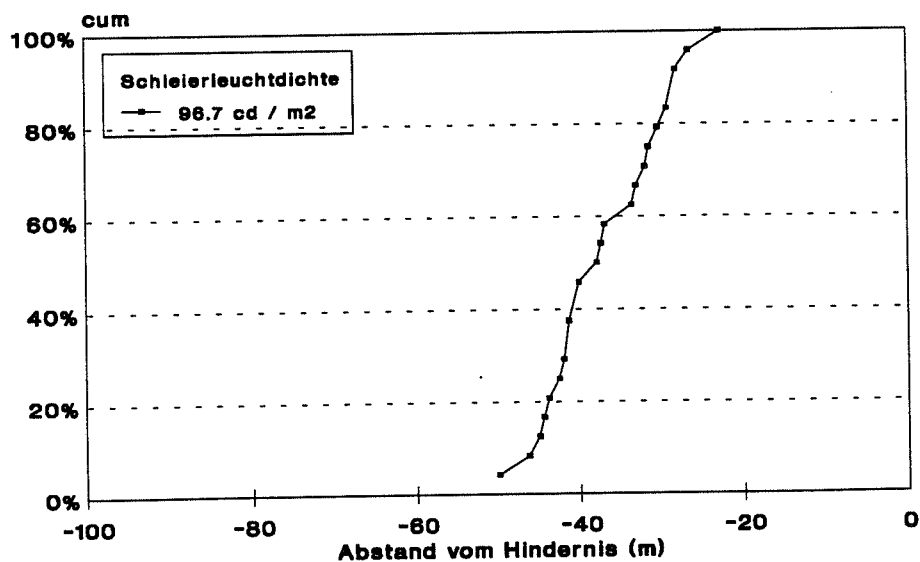
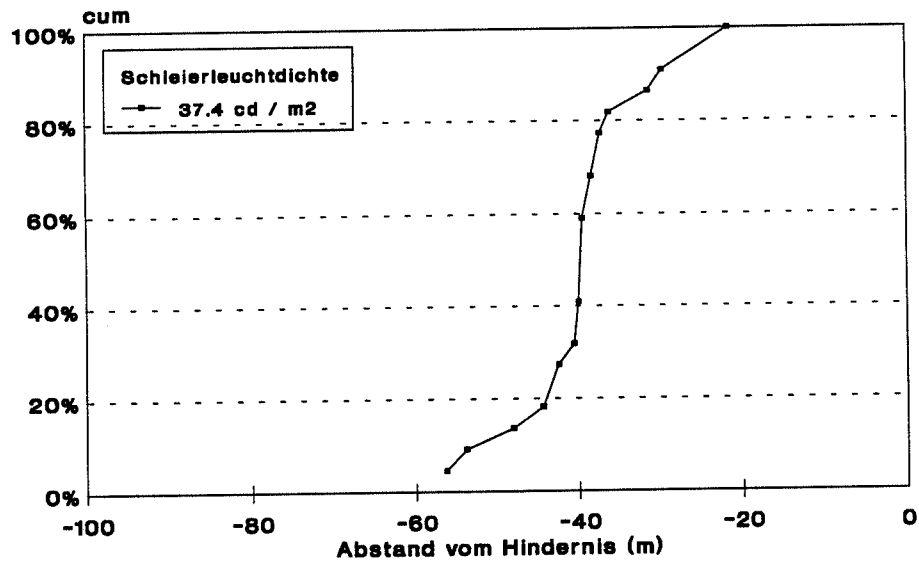
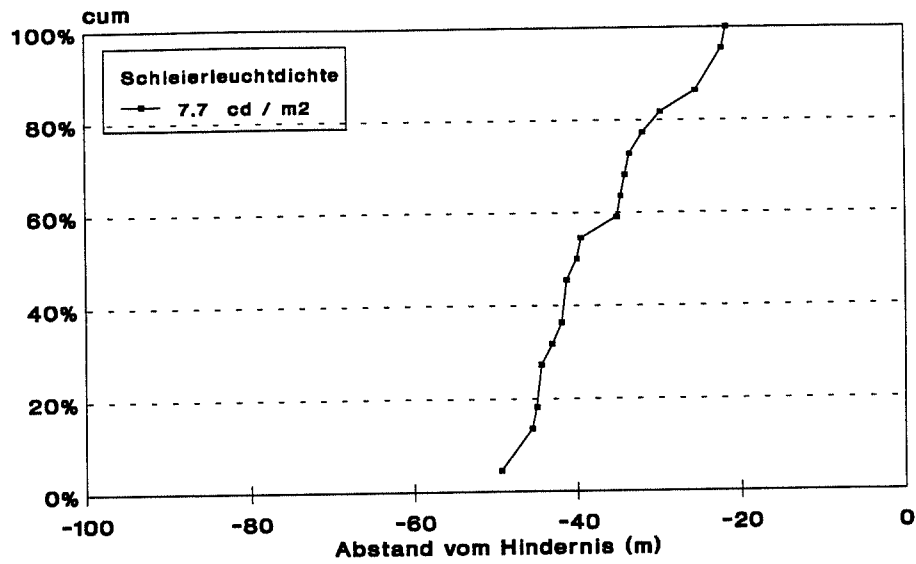
Experiment III
Kleinkreisell massiver Kern - 40 m im Tunnel (Zone D)



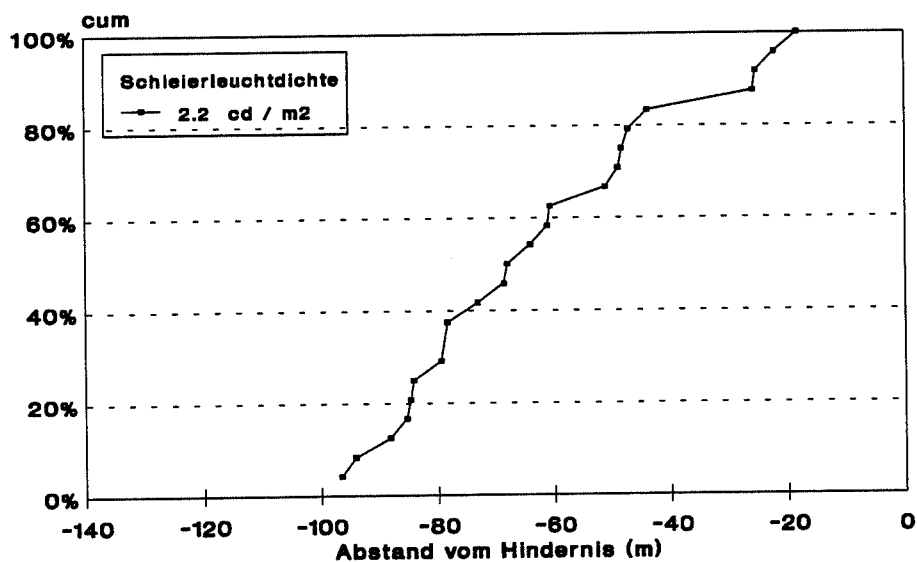
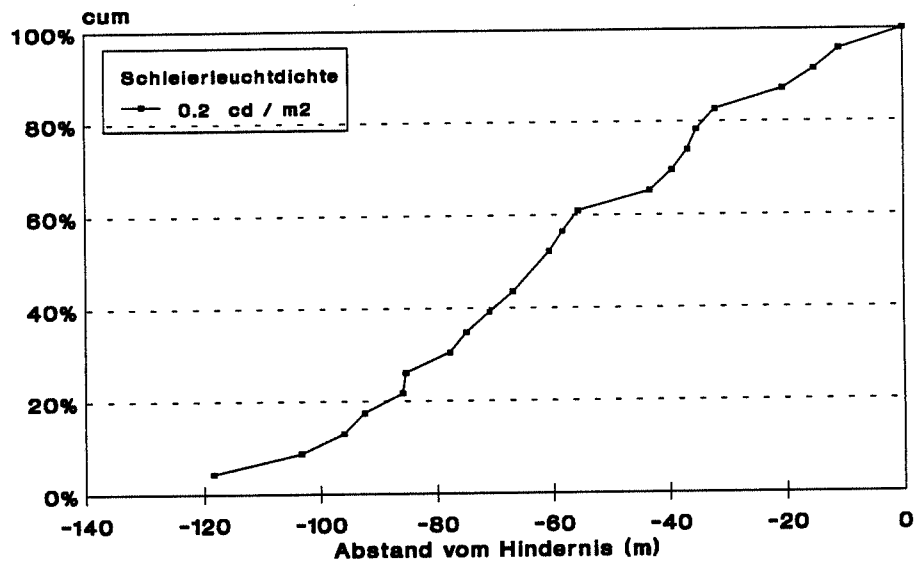
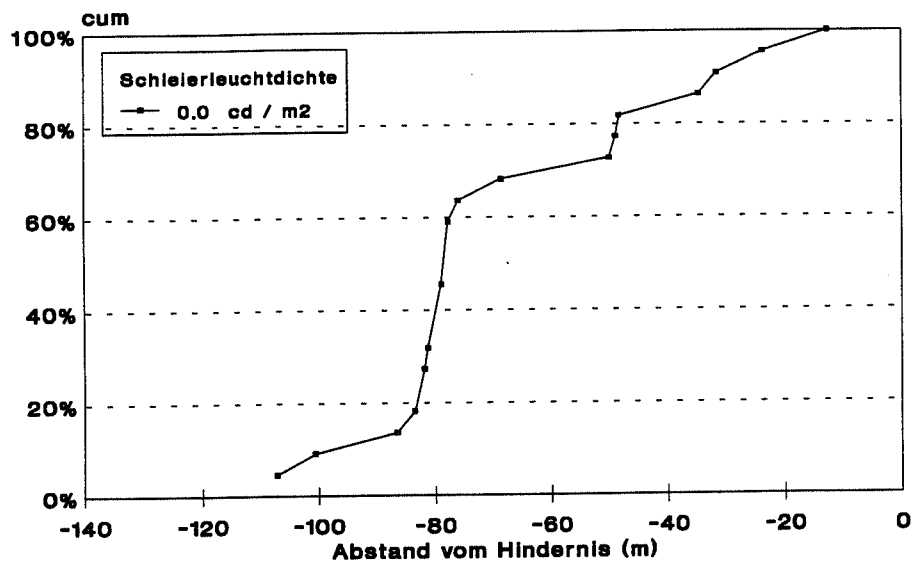
Experiment III
Kleinkreisler massiver Kern - 80 m im Tunnel (Zone D)



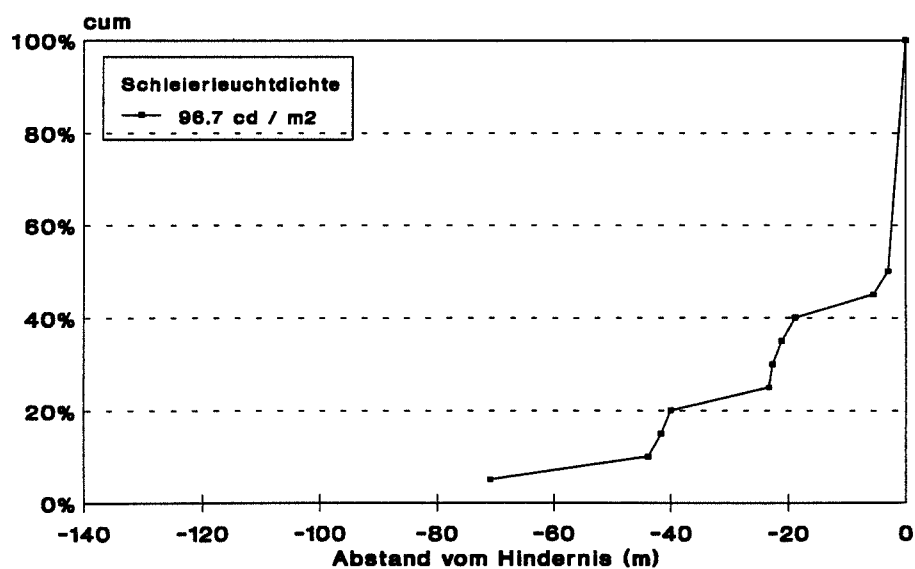
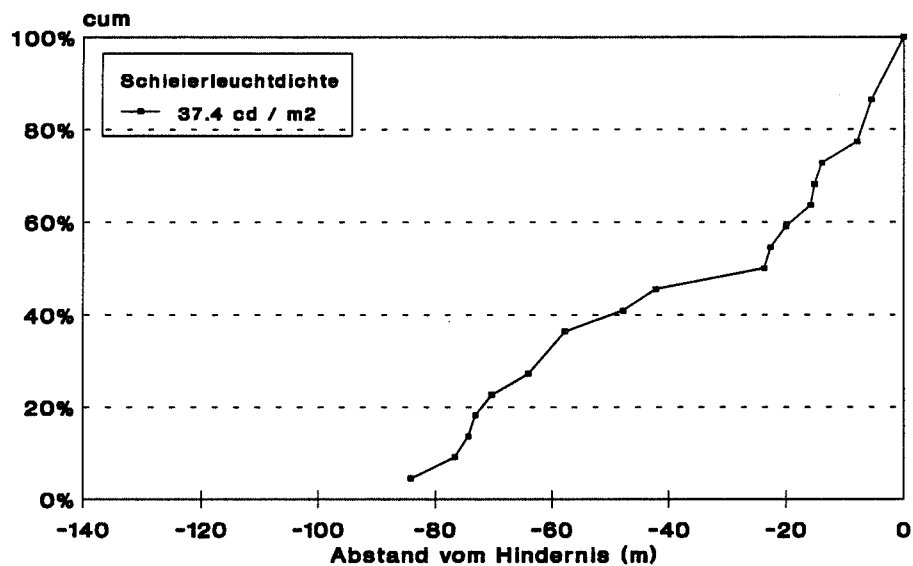
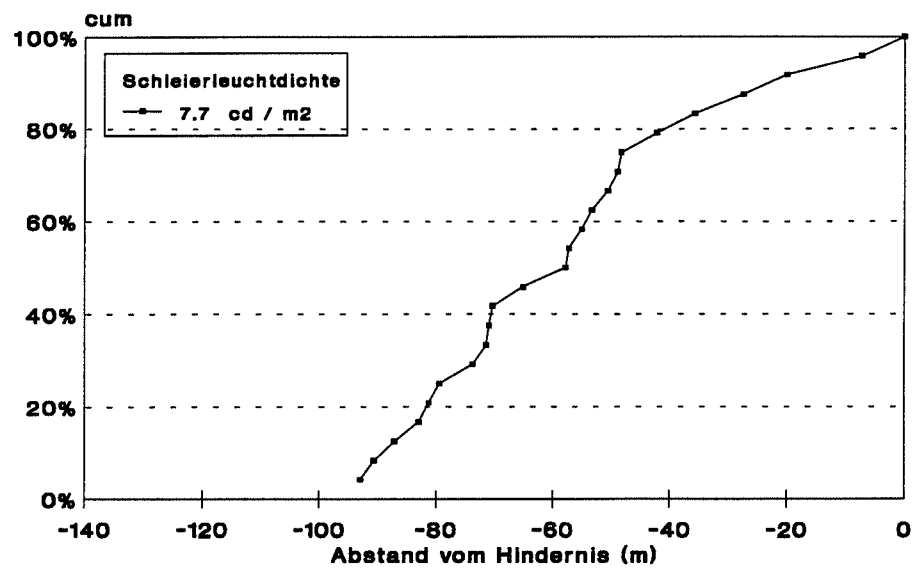
Experiment III
Kleinkreisel massiver Kern - 80 m im Tunnel (Zone D)



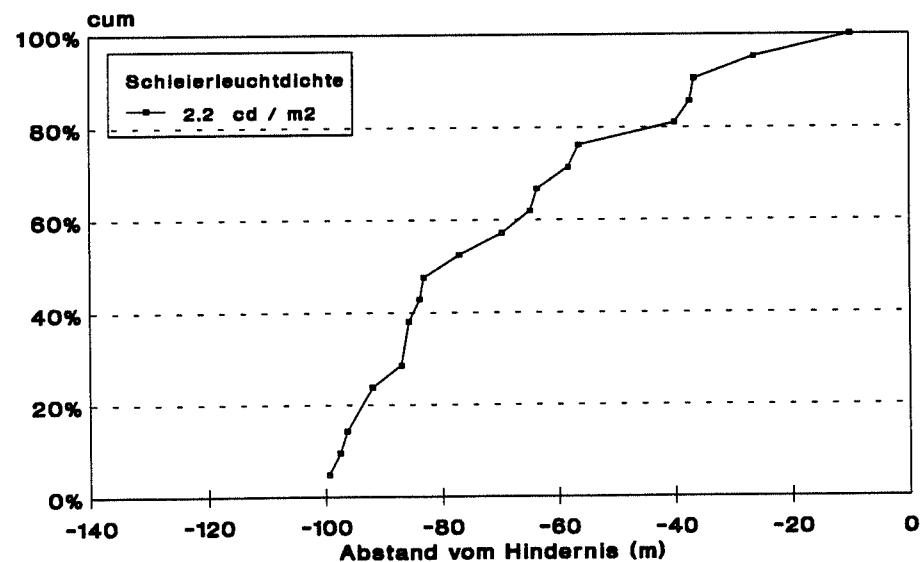
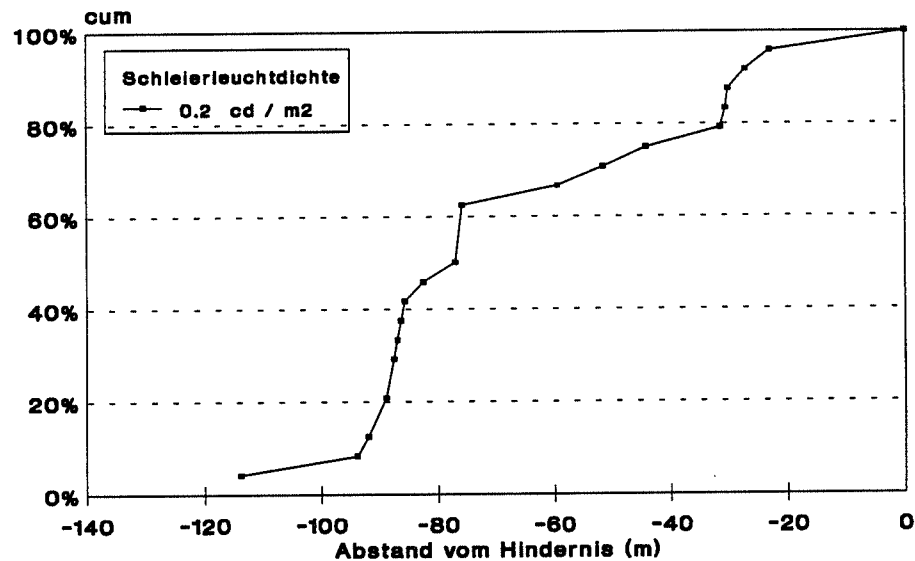
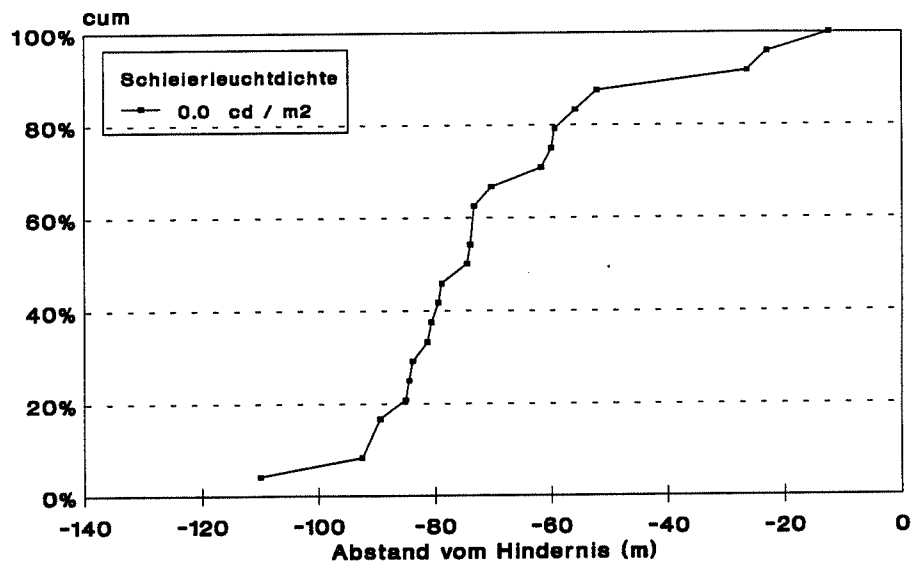
Experiment III
Kleinkreisel offener Kern - 20 m im Tunnel (Zone D)



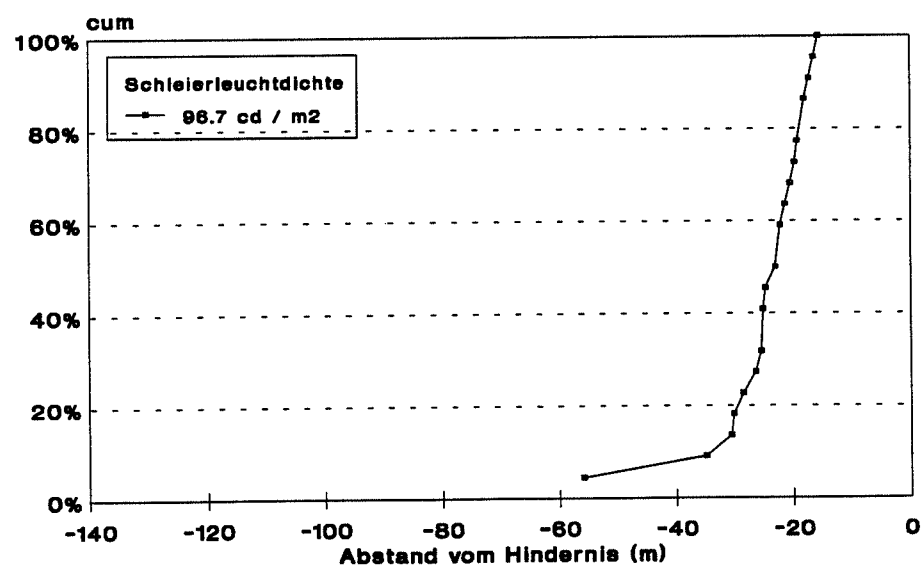
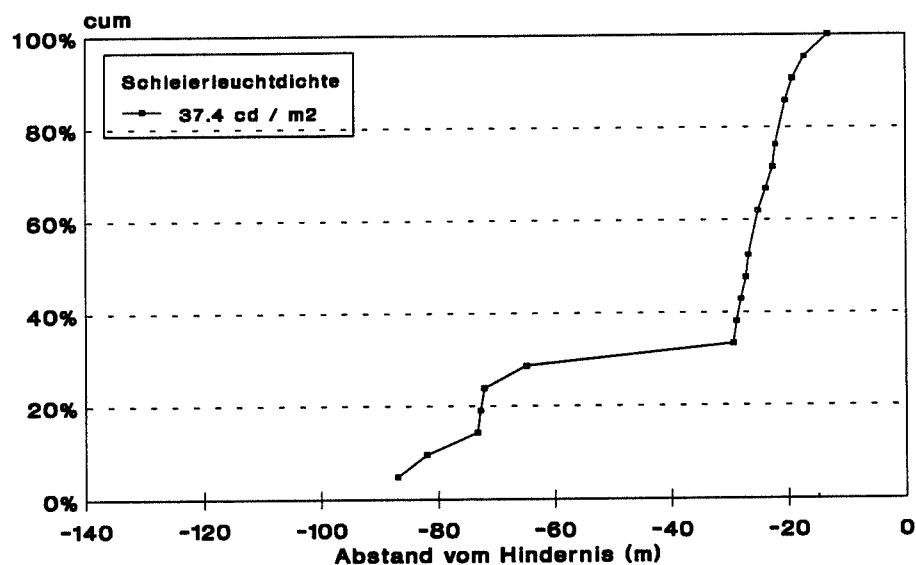
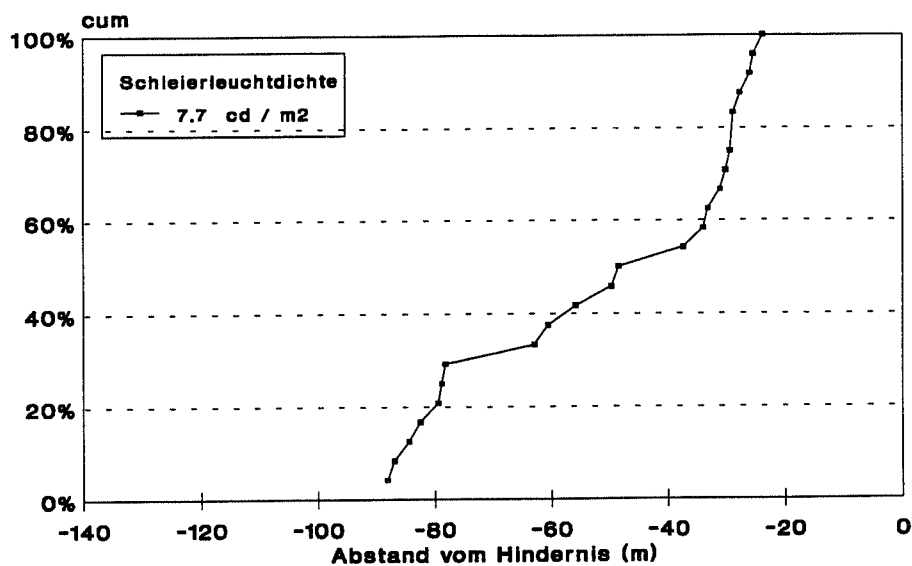
Experiment III Kleinkreisel offener Kern - 20 m im Tunnel (Zone D)



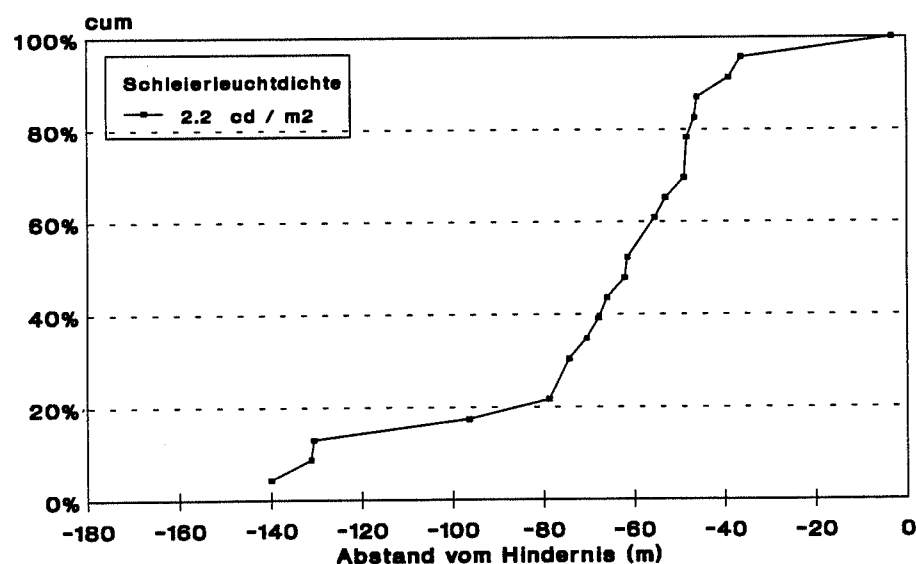
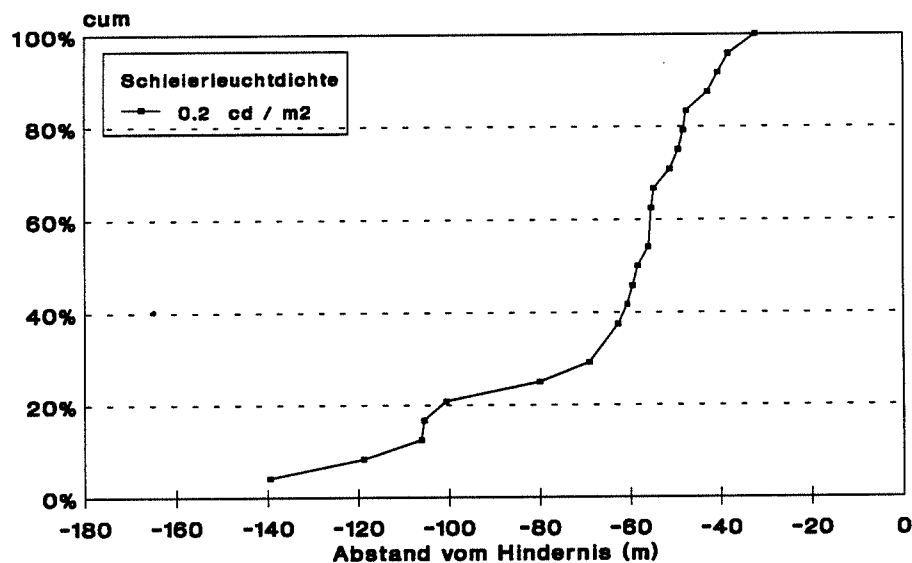
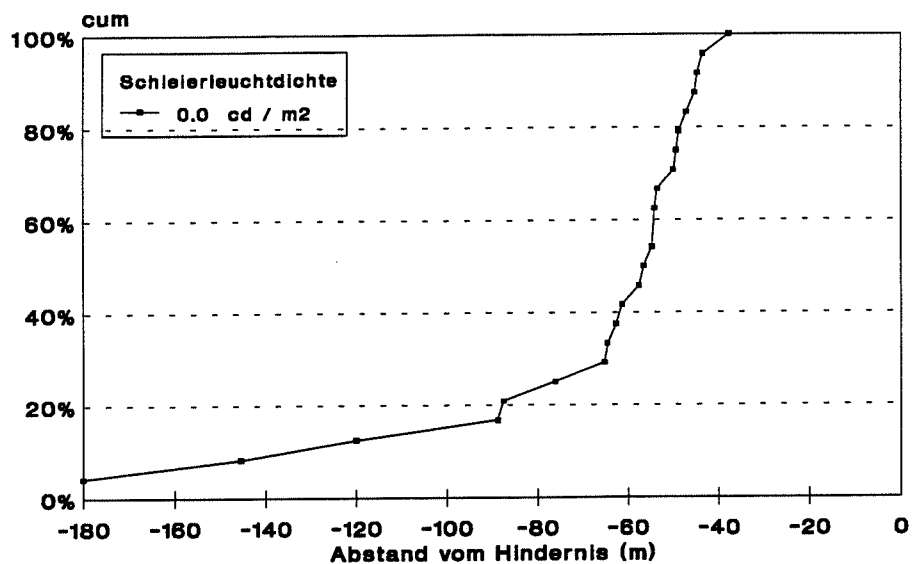
Experiment III
Kleinkreisel offener Kern - 40 m im Tunnel (Zone D)



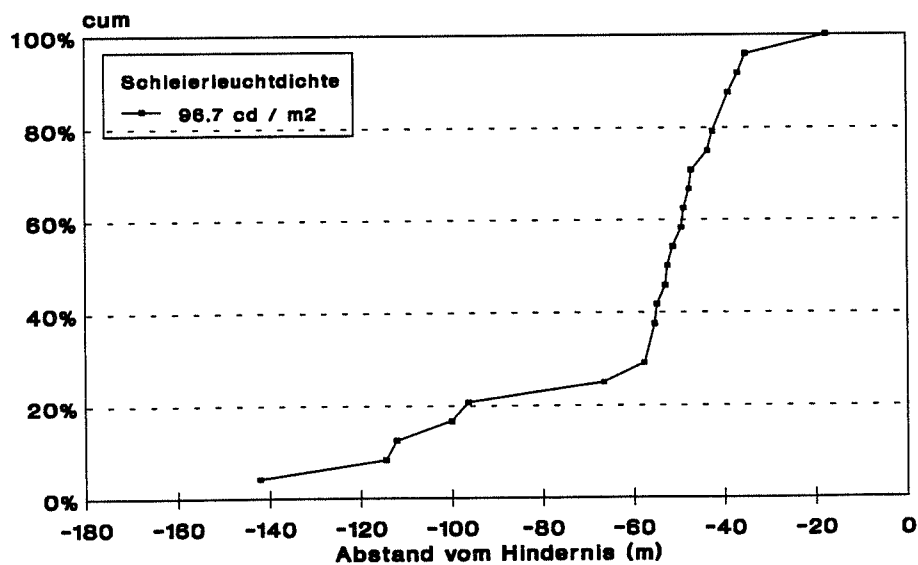
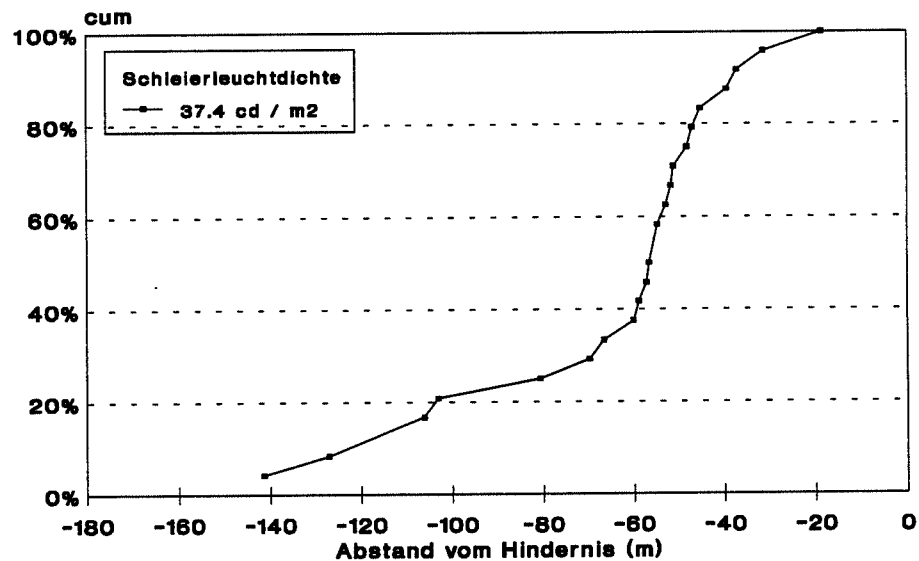
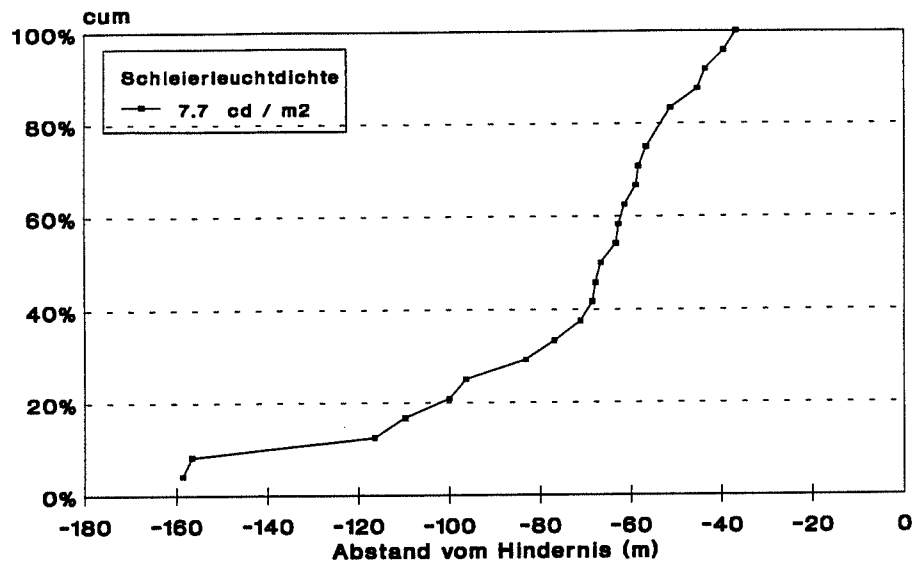
Experiment III
Kleinkreisel offener Kern - 40 m im Tunnel (Zone D)



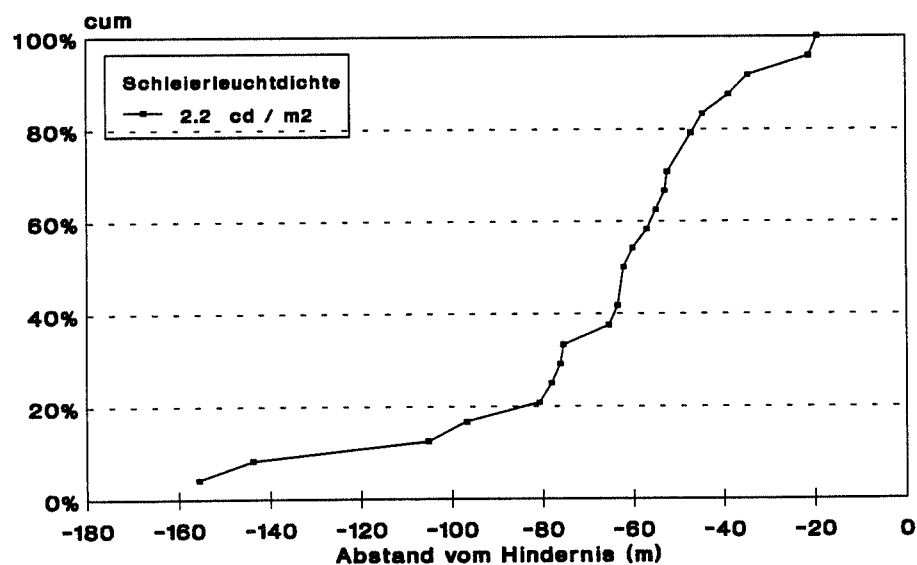
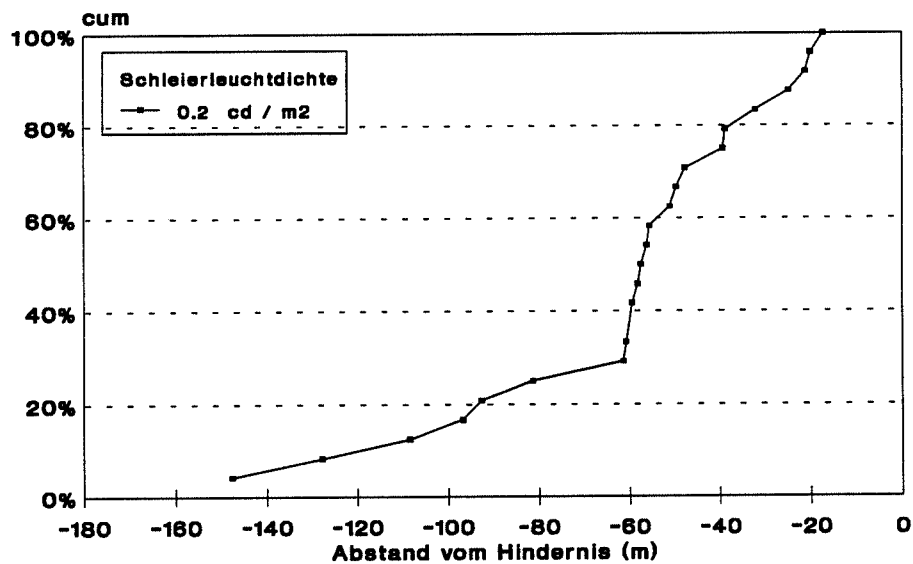
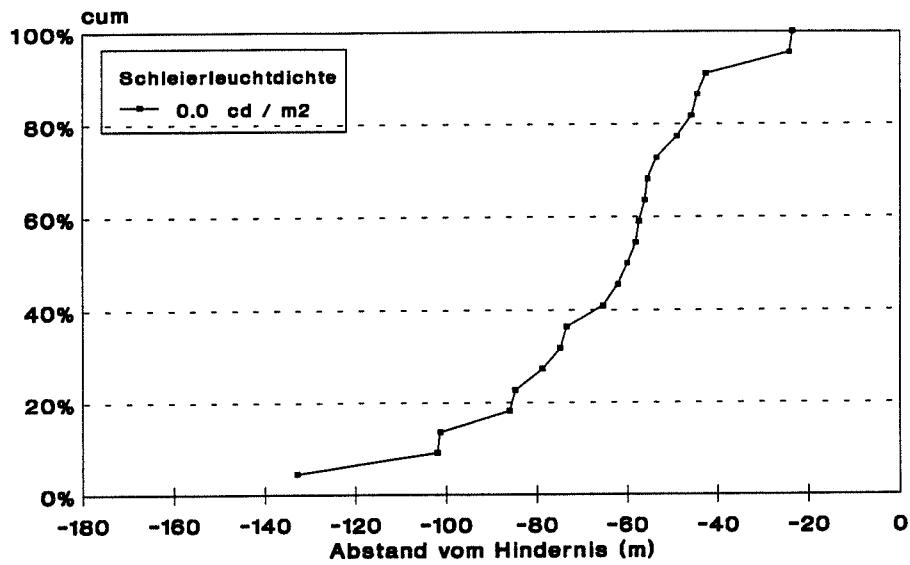
Experiment III
Rückstau Rücklicht aus - 20 m im Tunnel (Zone D)



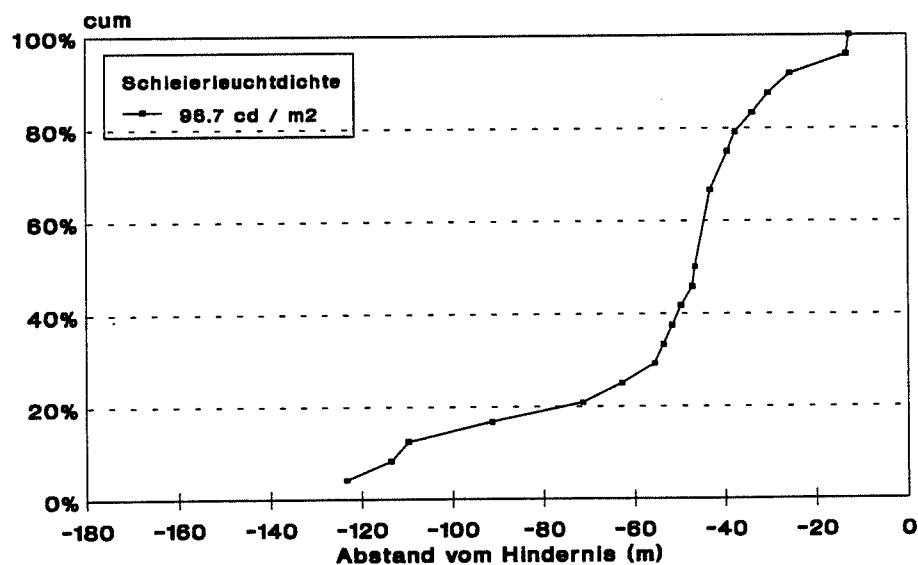
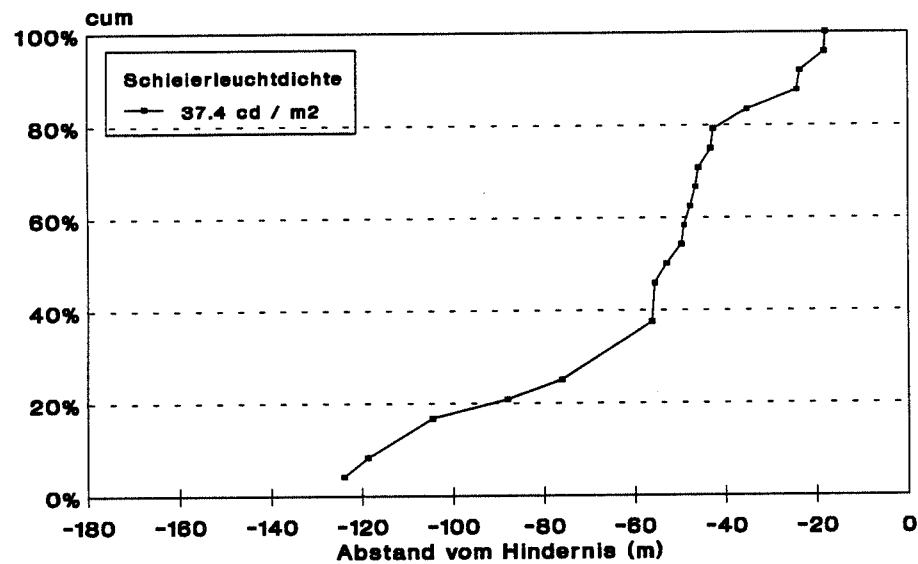
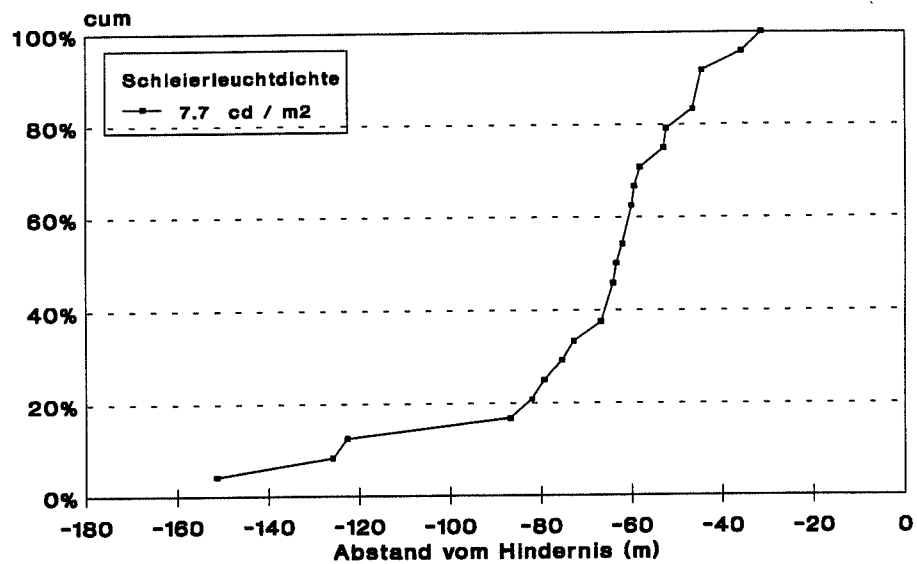
Experiment III
Rückstau Rücklicht aus - 20 m im Tunnel (Zone D)



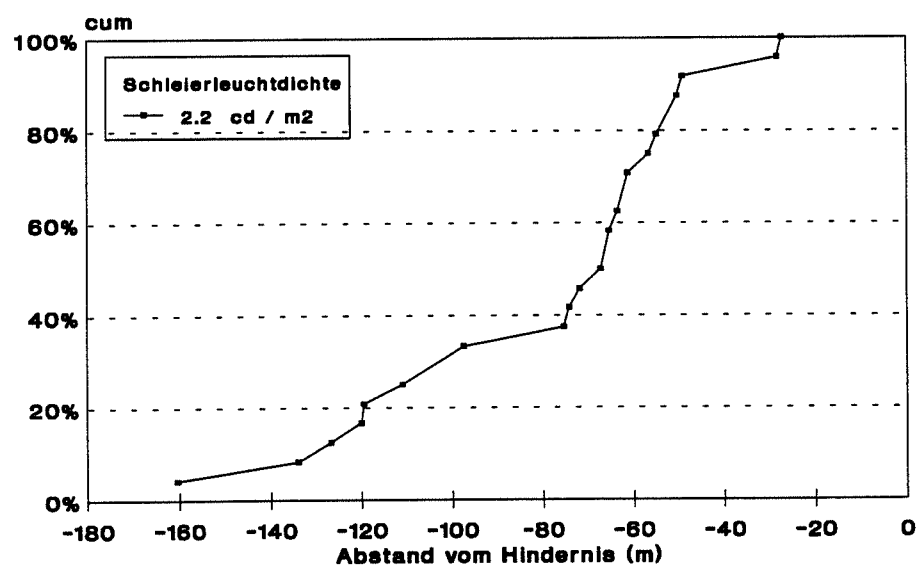
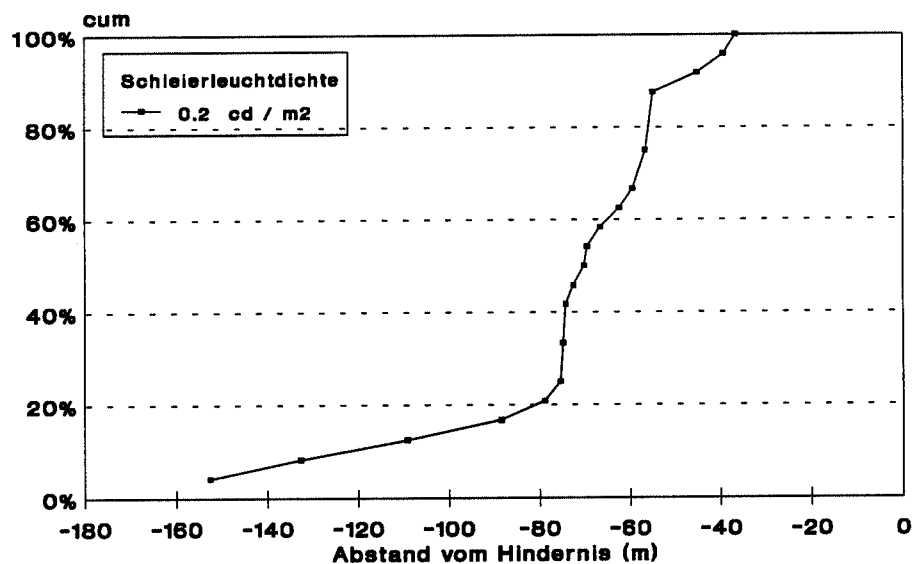
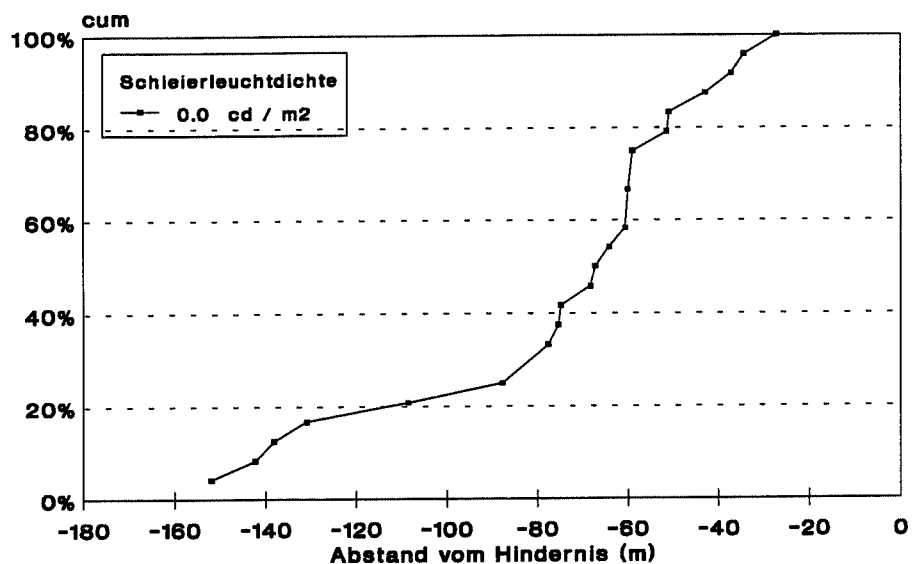
Experiment III
Rückstau Rücklicht an - 20 m im Tunnel (Zone D)



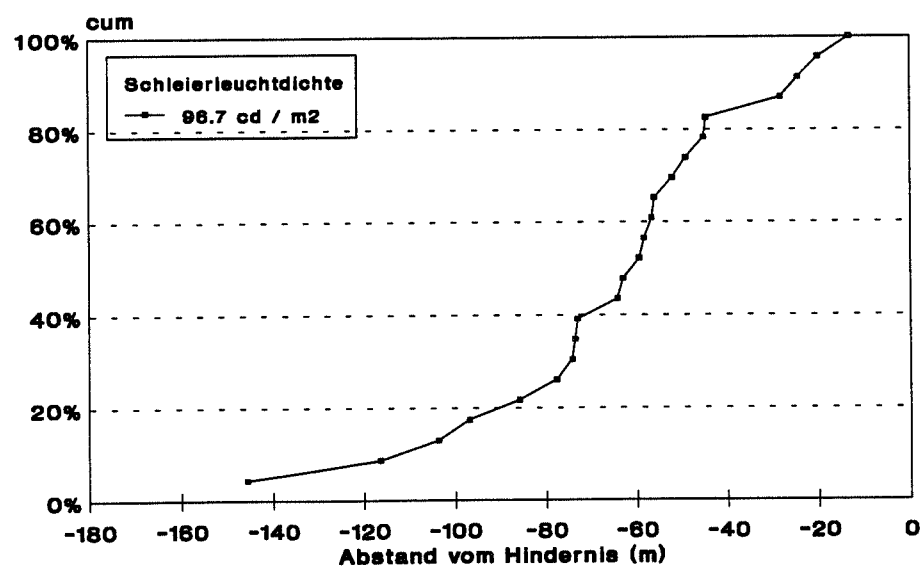
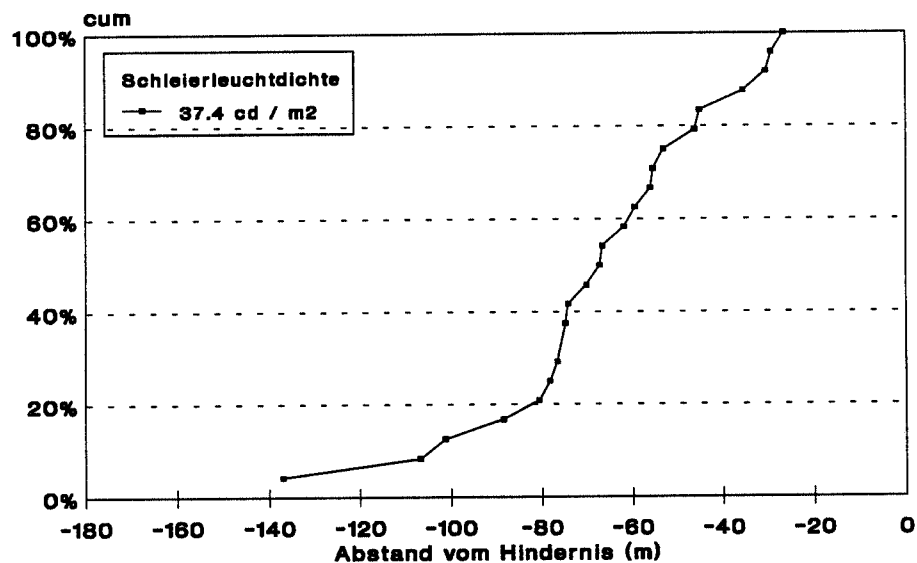
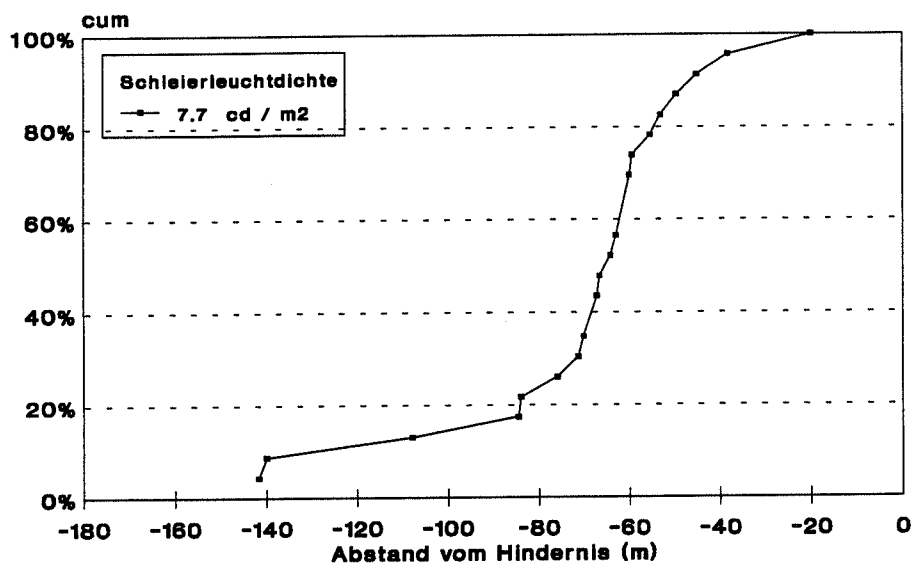
Experiment III
Rückstau Rücklicht an - 20 m im Tunnel (Zone D)



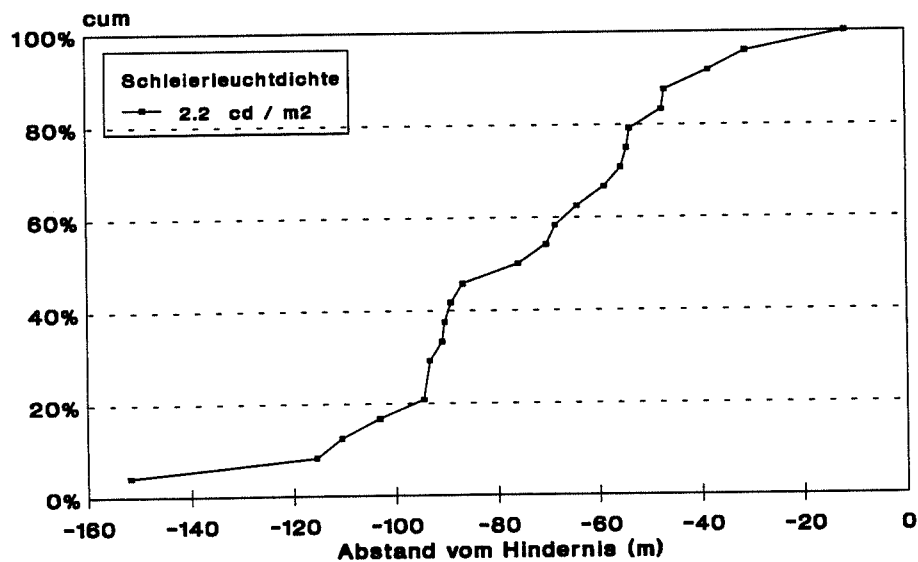
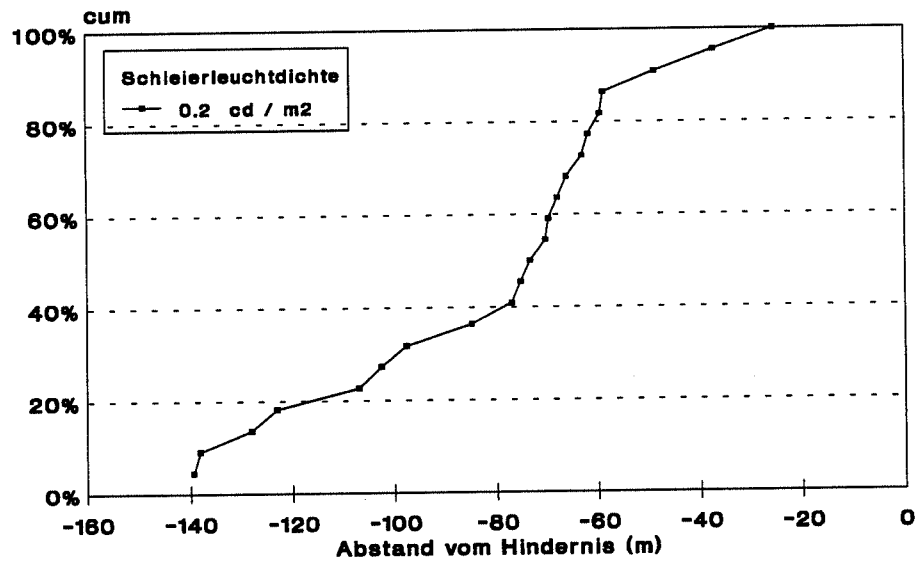
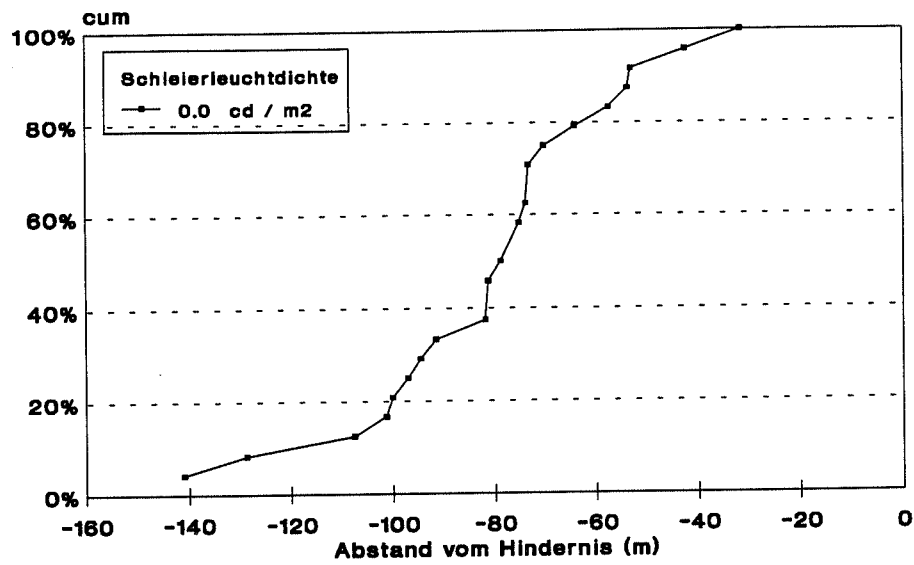
Experiment III
Rückstau Rücklicht aus - 40 m im Tunnel (Zone D)



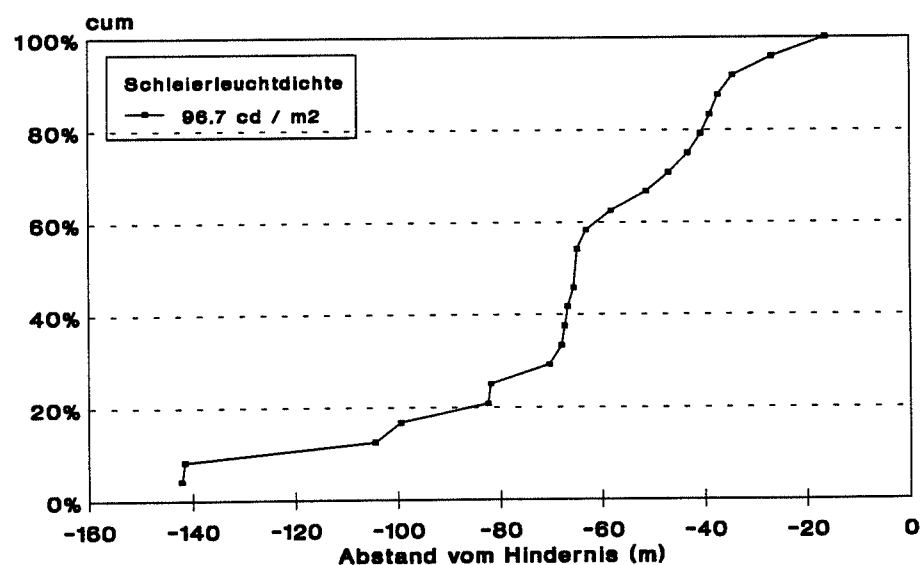
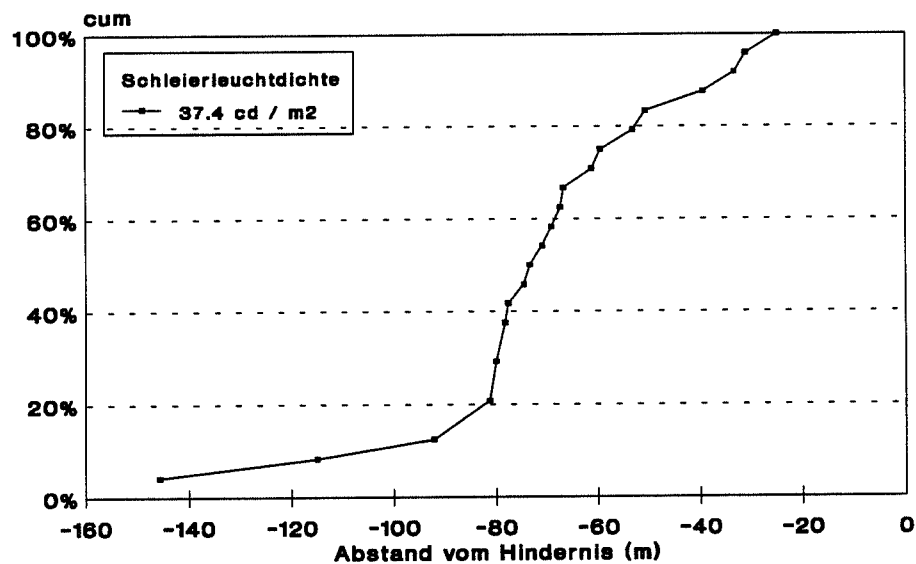
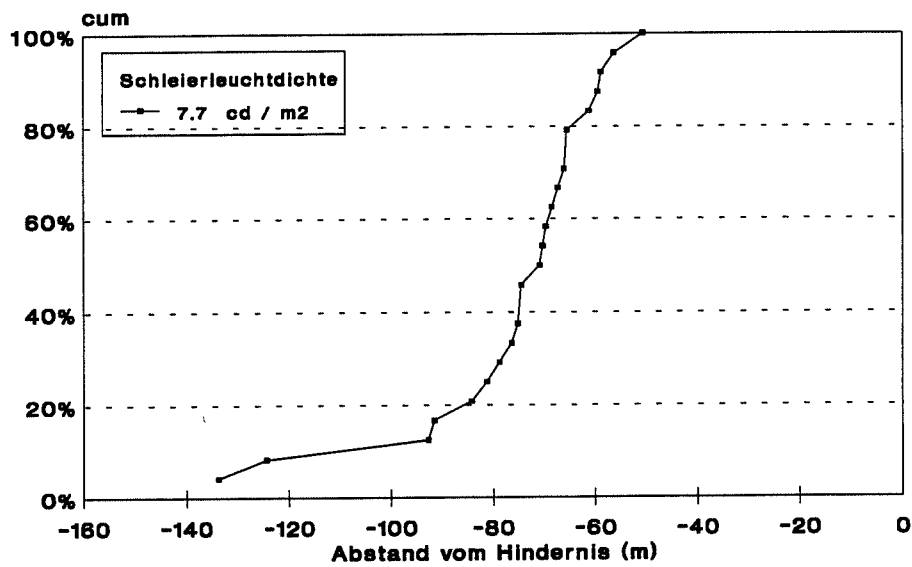
Experiment III
Rückstau Rücklicht aus - 40 m im Tunnel (Zone D)



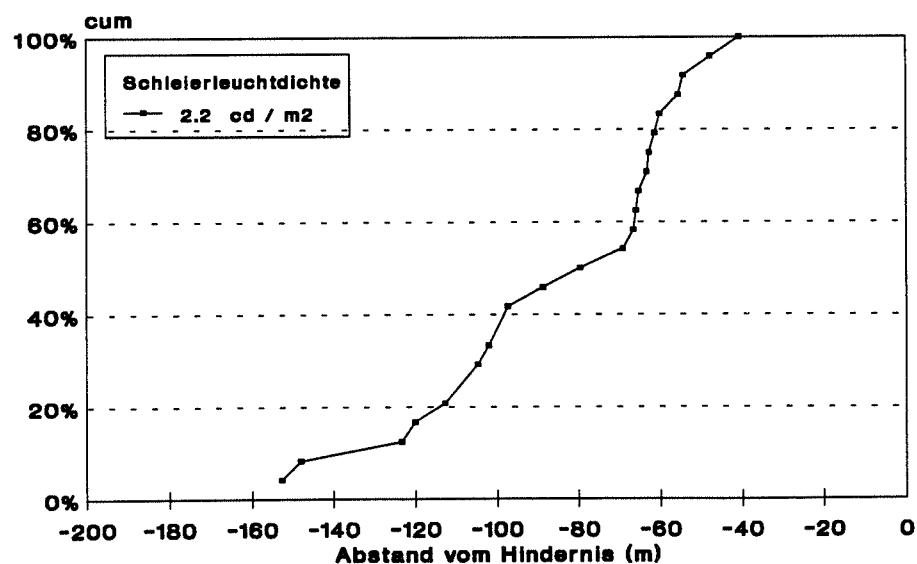
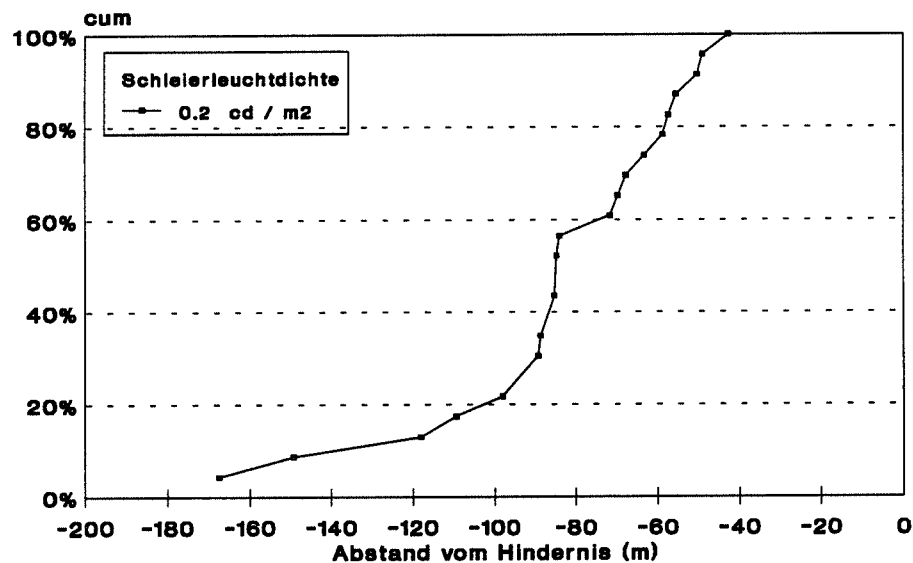
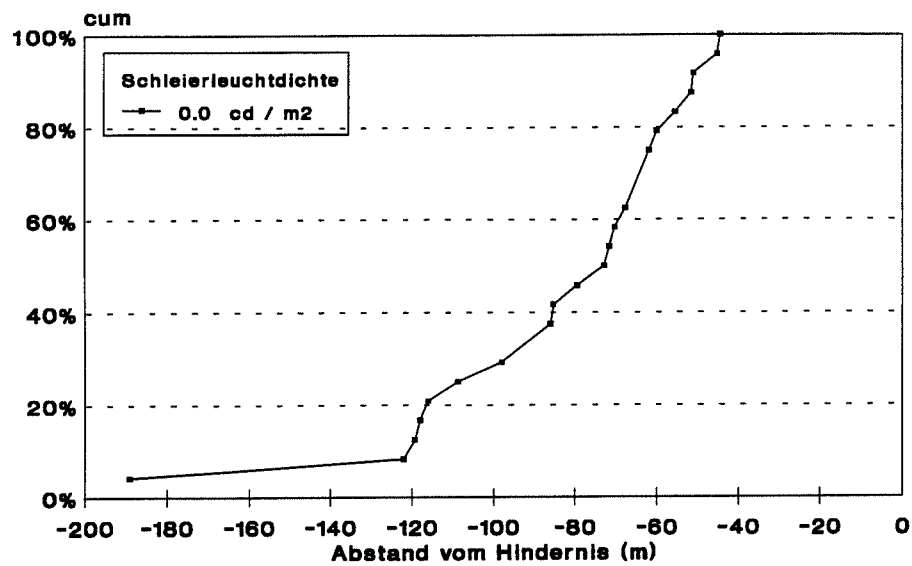
Experiment III
Rückstau Rücklicht an - 40 m im Tunnel (Zone D)



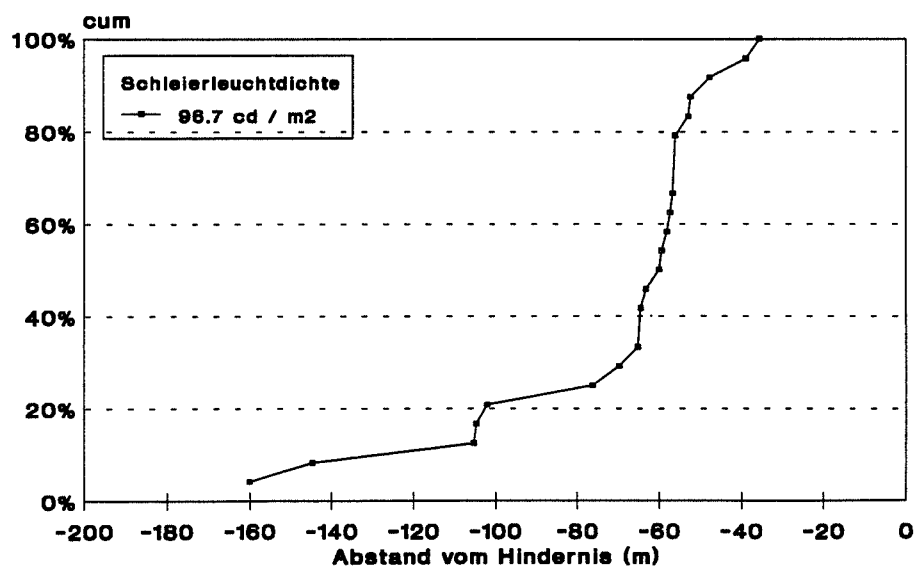
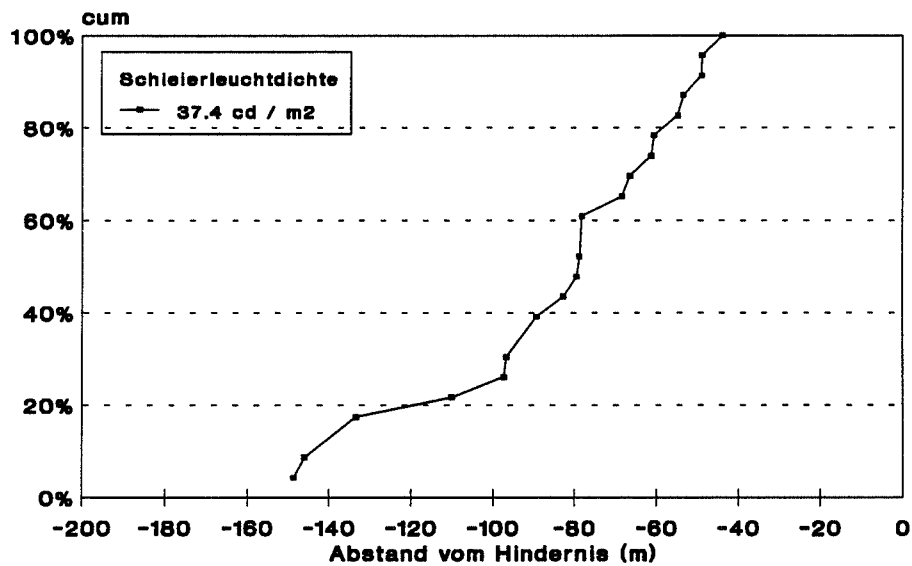
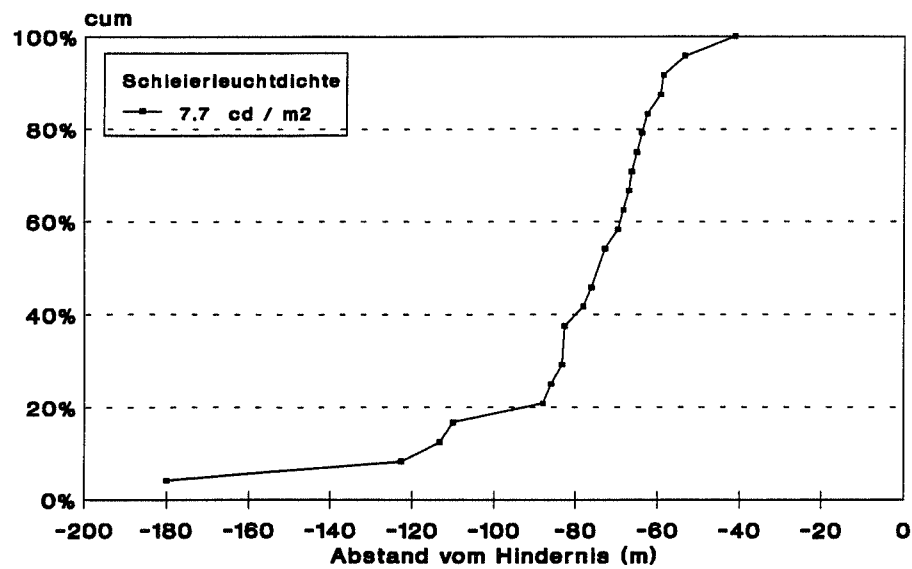
Experiment III Rückstau Rücklicht an - 40 m im Tunnel (Zone D)



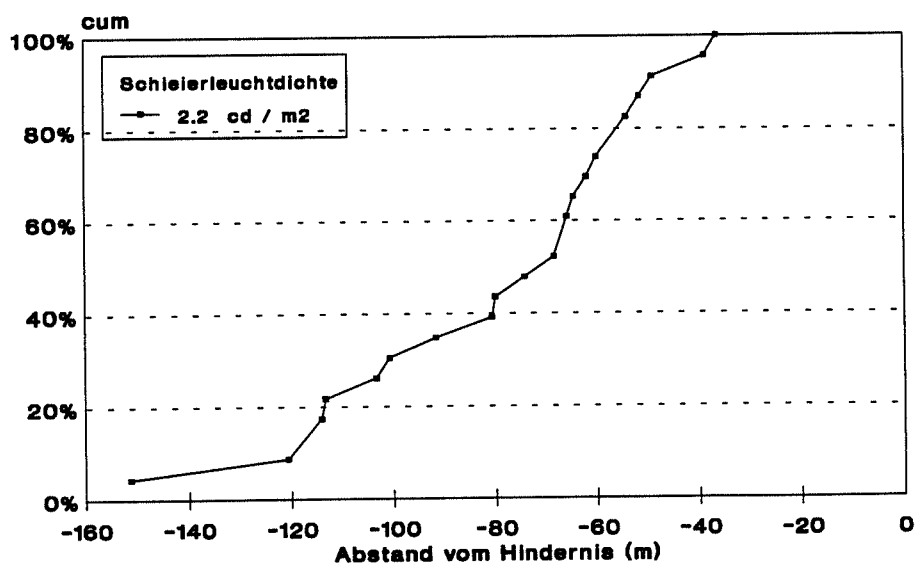
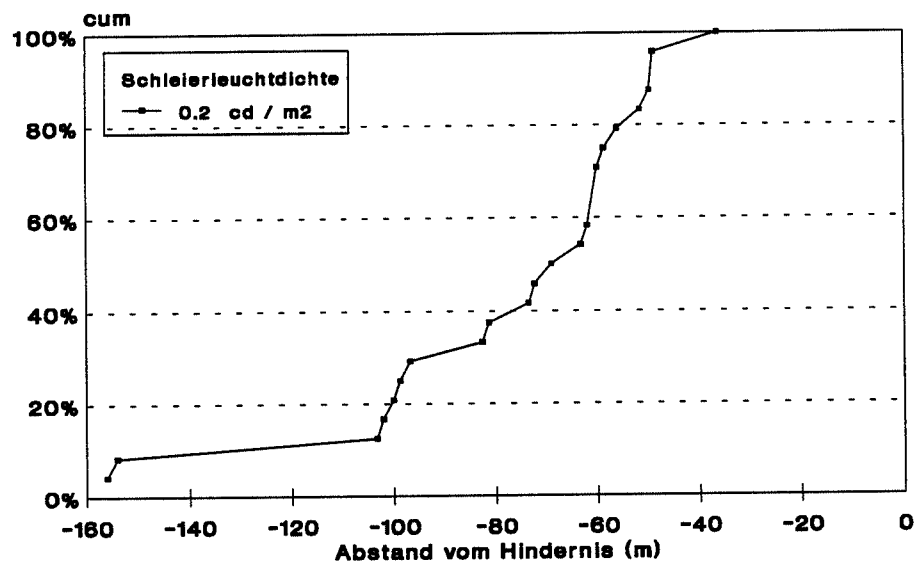
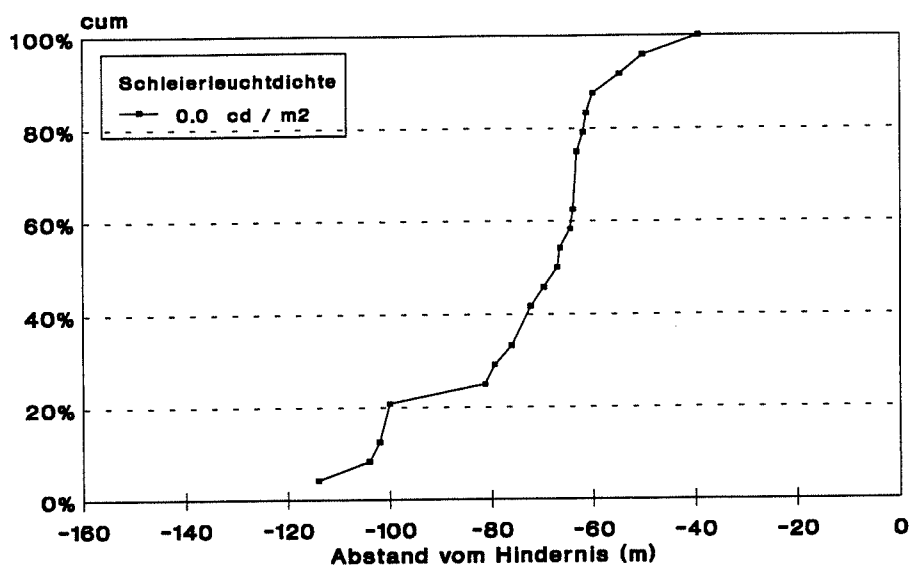
Experiment III
Rückstau Rücklicht aus - 80 m im Tunnel (Zone D)



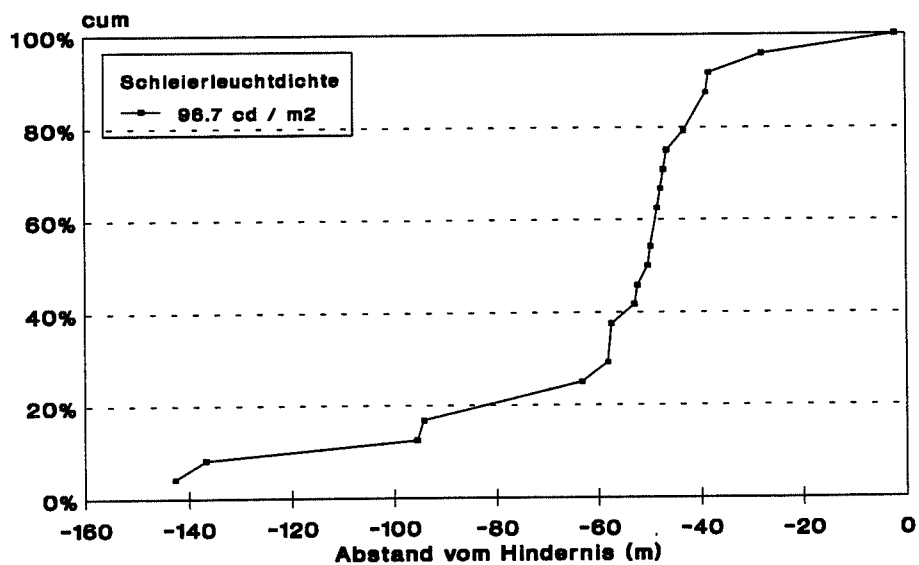
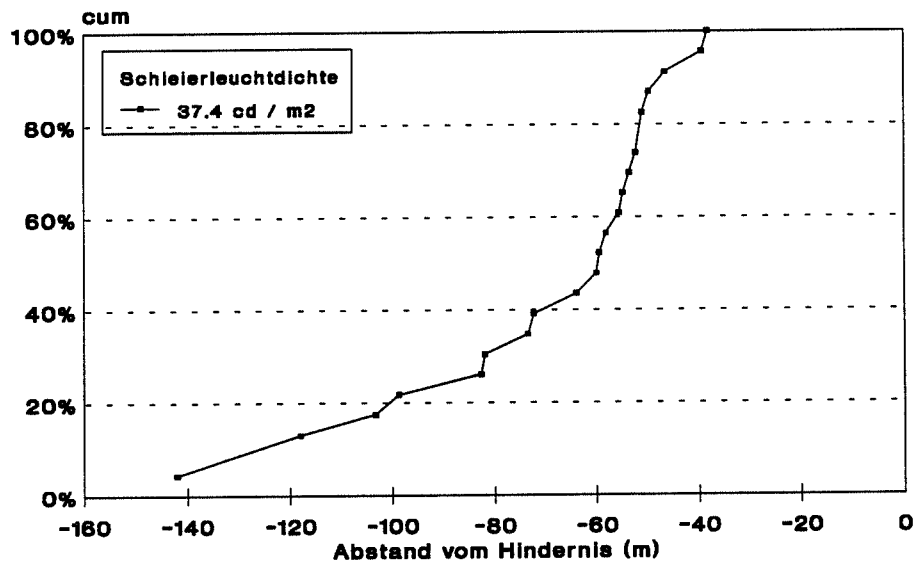
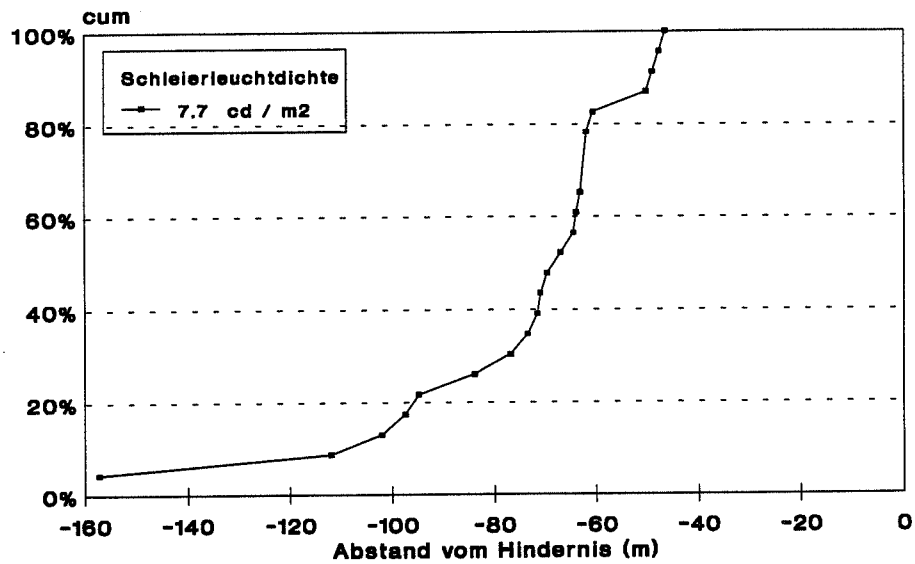
Experiment III Rückstau Rücklicht aus - 80 m im Tunnel (Zone D)



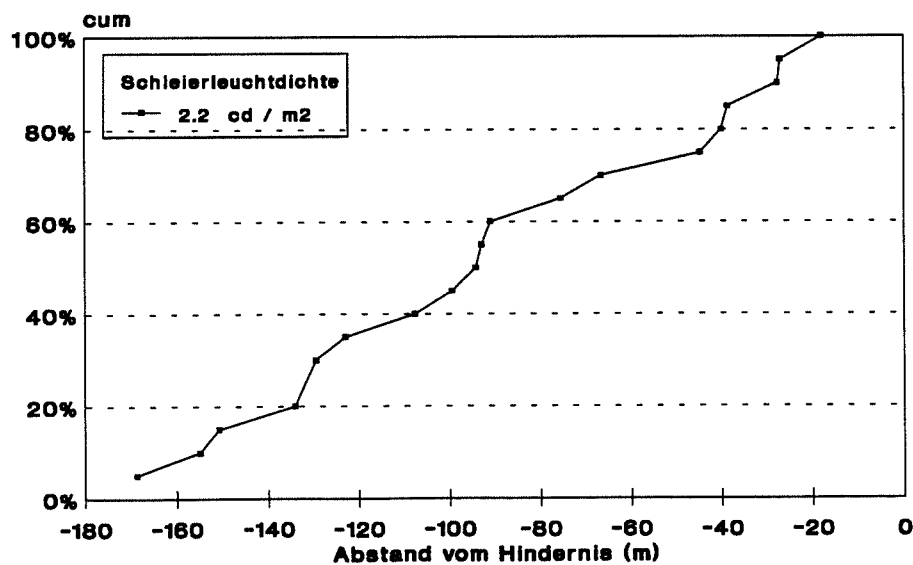
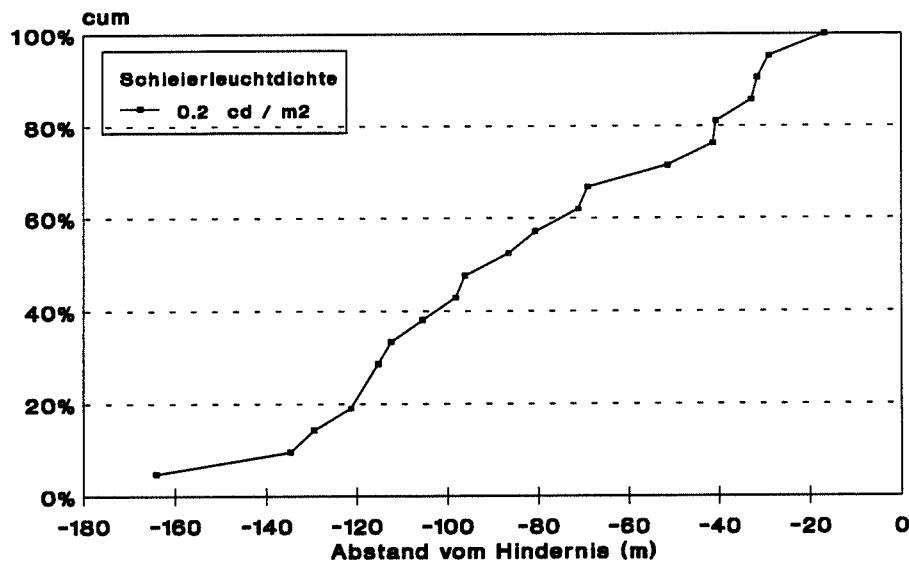
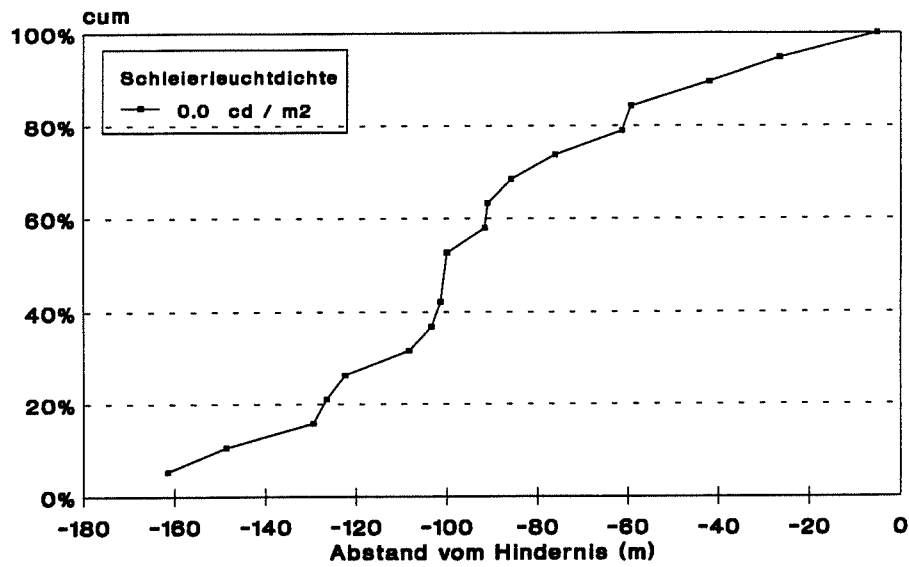
Experiment III
Rückstau Rücklicht an - 80 m im Tunnel (Zone D)



Experiment III
Rückstau Rücklicht an - 80 m im Tunnel (Zone D)



Experiment III
Lichtsignalanlage - 20 m im Tunnel (Zone D)



Experiment III
Lichtsignalanlage - 20 m im Tunnel (Zone D)

