

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 96 (1978)  
**Heft:** 37

**Artikel:** Überwachung der Sichtweite in Strassentunnels  
**Autor:** Sigrist, Willy / Urheim, Hans  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-73741>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 02.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Überwachung der Sichtweite in Strassentunnels

Von Willy Sigrist und Hans Urheim, Zürich

Es ist heute üblich, die Sichtbehinderung durch Aerosole entweder mit Extinktions- oder Streulichtmessungen zu erfassen. Dabei wird die Extinktionsmessung häufig als echtes Mass für die Sichtbehinderung genommen. In der klassischen Sichttheorie nach Koschmieder ist das Kriterium für die Sichtbehinderung jedoch die Kontrastverminderung. Die Frage, ob die Extinktion selbst oder aber eine Kontrastmessung echte Bezugsgrösse sei, wird daher eingehend untersucht. Das gewonnene Urteil fällt eindeutig zugunsten der Kontrastmessung aus.

Hierauf aufbauend werden die beiden Ersatzmethoden Streulicht und Extinktion in einer Reihe von Versuchen mit den entsprechenden Kontrastmessungen verglichen. Es zeigt sich, dass sowohl Extinktionsmessungen wie Streulichtmessungen mit Fehlern behaftete Ersatzmethoden sind. Als Ersatzmethoden sind sie gleichwertig.

Die weit verbreitete Auffassung, wonach das Streulicht bei der Sichtbehinderung von sehr untergeordneter Bedeutung sei, erweist sich als unrichtig. Nach den vorliegenden Messungen muss angenommen werden, dass normalerweise Streulicht und Extinktion in gleichem Masse an der Sichtbehinderung beteiligt sind.

## Bedarf nach Sichtweitemessgeräten

Gute Sicht ist im modernen Verkehr von eminenter Bedeutung. In Tunnels wird die Sicht durch *Dieseleruss*, auf *Flugplätzen* und *Autobahnen* durch *Regen*, *Schnee* und *Nebel* verschlechtert. Die Verschlechterung der Sicht kann so bedeutend sein, dass irgendwelche Massnahmen getroffen werden müssen. In Tunnels wird bei Überschreiten einer gewissen Sichtverminderung die *Ventilation* eingeschaltet; auf *Flugplätzen* wird über die *Benutzbarkeit* des *Flugplatzes* entschieden; auf *Autobahnen* werden entweder die *Beleuchtung* reguliert oder *Warnsignale* eingeschaltet. Die Entscheidung über den Einsatz dieser Massnahmen wird heute aufgrund von *Instrumenten-Anzeigen* gefällt; es sind dies die sogenannten *Sichtweitemessgeräte*.

## Wie wird gemessen?

Als *Sichtweitemessgeräte* haben sich zwei Gerätetypen mit grundlegend verschiedenen Messprinzipien eingebürgert: Die *Extinktions-* und die *Streulichtmessung*.

### Extinktionsmessung

In Bild 1 ist das Messprinzip der Extinktionsmessung schematisch dargestellt. Eine *Photozelle* befindet sich in einem gewissen Abstand von der *Lichtquelle*. Durch die *Schwebestoffe* wird ein Teil des *Lichtes* gestreut und absorbiert. Die *Abschwächung* des *Lichtes* dient als *Mass* für die *Verschlechterung* der *Sicht*. Der *Messwert* wird in *Extinktion/Meter* ausgedrückt.

### Streulichtmessung

Aus Bild 2 ist das Prinzip der *Streulichtmessung* ersichtlich. Von einer *Lichtquelle* her werden die *Schwebestoff-*

teilchen beleuchtet, die einen Teil des *Lichtes* absorbieren. Ausserdem wird ein Teil nach allen *Richtungen* gestreut. Ein Teil des *gestreuten Lichtes* gelangt zur *Photozelle*. Der *Photo-strom* ist ein *Mass* für die *Anzahl Teilchen*. Zwischen den *Messwerten* der *Extinktionsmessung* und der *Streulichtmessung* besteht für eine bestimmte *Aerosolart* strenge *Proportionalität*. Jedes *Streulichtmessgerät* lässt sich daher für eine bestimmte *Aerosolart* auf *Extinktion/Meter* eichen.

### Kontrastmessung

Heute steht noch ein weiterer *Messgerätetyp* zur *Diskussion*: das *Kontrastmessgerät*. Bild 3 enthält das *Schema* einer *Kontrastmessanordnung*. An der Stelle «*Sichtziel*» befindet sich eine *helle* und eine *dunkle Tafel*. Im *Abstand a* befindet sich das *Messgerät*, worin durch ein *Fernrohrobjektiv* ein *Bild* der *beiden Tafeln* erzeugt wird. Die *Auswertung* der *Helligkeit* dieser *Bilder* erfolgt im *Photometer*. Zu diesem *Zwecke* zerlegt ein *Spiegelpaar* das *Bild* des *Gesamtobjektes* in die *beiden Teile* «*Bild der hellen Tafel*» und «*Bild der*

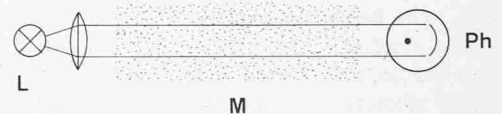


Bild 1. Prinzip der Extinktionsmessung

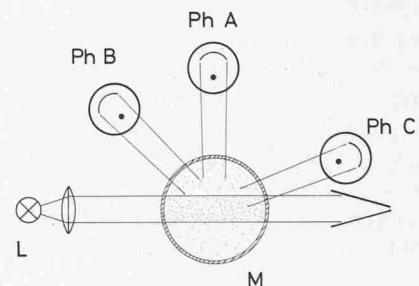
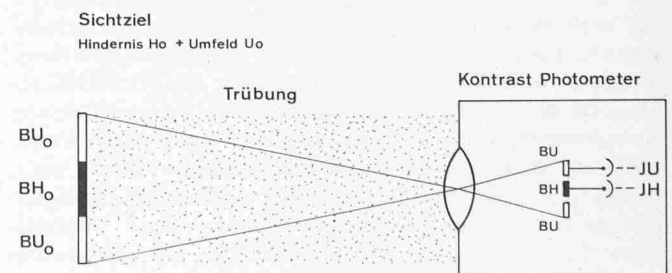


Bild 2. Prinzip der Streulichtmessung



$$A = \frac{BH}{BU}$$

$$CE = -\log A$$

$$C = 1 - A$$

Bild 3. Prinzip der Kontrastmessung

dunklen Tafel». Das von der hellen Tafel stammende Strahlenbündel gelangt in den Vergleichszweig ( $V$ ), das von der dunklen Tafel kommende Bündel in den Messzweig ( $M$ ) des Zweistrahphotometers. Der primäre Messwert entspricht beim Sigrist-Photometer vom Konzept her dem Verhältnis der beiden Helligkeiten. Die Anzeige  $A$  ist:

$$A = \frac{BH}{BU}$$

Aus diesem primären Messwert lassen sich die beiden üblichen Kontrastwerte ableiten:

Der photometrische Kontrast wird:

$$C = \frac{BU - BH}{BU} = 1 - \frac{BH}{BU} = 1 - A$$

Der visuelle Kontrast wird:

$$CE \triangleq \log \frac{BU}{BH} = \log \frac{1}{A} = -\log A$$

Sind beide Tafeln weiss oder von derselben Grautönung, so ist der Kontrast null. Bei einer vollkommen schwarzen und einer weissen Tafel ist der photometrische Kontrast gleich 1 und der visuelle Kontrast gleich  $\infty$ .

Die Schwebestoffe verringern einerseits die Helligkeit der hellen Tafel, andererseits wird der dunkle Gegenstand durch das Streulicht der Partikel aufgehellt. Die Kontrastmessung ist gewissermassen eine Kombination von Extinktions- und Streulichtmessung.

### Was wird gemessen?

Die heute übliche Praxis der Sichtüberwachung mit den eben erwähnten Geräten enthält den Keim zu groben Missverständnissen. Durch ihre Namen «Sichtweitemessgeräte» und ähnliche wird der Eindruck erweckt, es würden Sichtweiten gemessen.

### Die Sichtweite

Die Sichtweite wird aber durch sehr viele Faktoren bestimmt. Zu ihrer Ermittlung müssen im wesentlichen folgende Faktoren berücksichtigt werden:

- Eigenschaften des Auges
- Grösse und Distanz des zu beobachtenden Gegenstandes
- allgemeine Beleuchtung
- Verschlechterung der Erkennbarkeit des Gegenstandes durch Schwebestoffe zwischen Objekt und Beobachter.

### Optische Eigenschaften des Aerosols

Die genannten Sichtweitemessgeräte befassen sich nur mit der letztgenannten Einflussgrösse, d.h. mit den sichtvermindernden Eigenschaften des Aerosols. Mit dem Extinktionsmessgerät wird der Extinktionskoeffizient, mit der Streulichtmessung der Streukoeffizient und mit der Kontrastmessung Kontrastverminderungseigenschaften des Aerosols gemessen. Dies sind Materialeigenschaften, und als solche sind sie unabhängig von der Beleuchtungsstärke, d.h. sie gelten grundsätzlich auch im Dunkeln. Die Veränderung dieser Materialeigenschaften steht nun in der Praxis anstelle der Veränderung der Sichtweite. Dieses Vorgehen hat eine gewisse Berechtigung, sofern - wie z.B. im Tunnel - die sichtvermindernden Eigenschaften des Aerosols die einzigen veränderlichen Grössen sind. In diesem Falle besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Sichtweite und den durch Messungen ermittelten sichtvermindernden Eigenschaften des Aerosols.

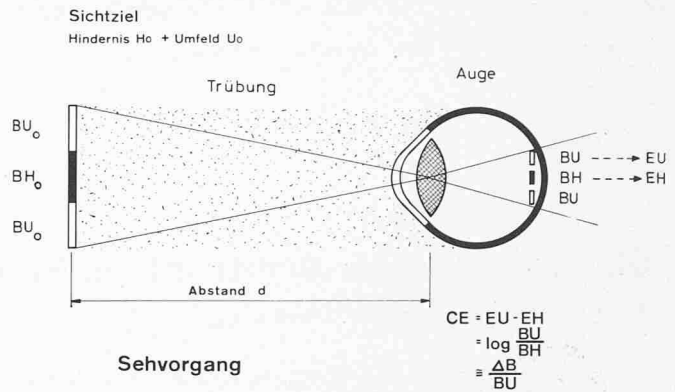


Bild 4. Analogie zwischen Kontrastmessung und Sehvorgang

### Vergleich der verschiedenen Messprinzipien

Wie schon gesagt, ist es heute üblich, die Messwerte sämtlicher Gerätetypen einheitlich als Extinktionskoeffizienten anzugeben. Das heisst, sämtliche Geräte werden nach einem Extinktionsmessgerät geeicht. Dies ist für eine bestimmte Aerosolart ohne weiteres möglich. Bei Veränderungen der Aerosolart entstehen jedoch Schwierigkeiten. Die Eichfaktoren erweisen sich als ausgesprochen aerosolspezifisch. Das heisst, es gibt keine materialunabhängigen Korrelationen. Damit taucht aber automatisch die Frage auf: welcher der drei Messwerte ist für die Sichtveränderung repräsentativ? Diese Frage ist nun zu einer Art Streitfrage angewachsen, denn in der Vergangenheit haben sich bereits feste, aber divergierende Ansichten eingebürgert. Heute erheben - brutal ausgedrückt - zwei von den drei Grössen den Anspruch, für die Sicht repräsentativ zu sein: die Kontrastmessung und die Extinktionsmessung.

Da es auf jeden Fall theoretisch, aber wohl auch praktisch nicht ganz belanglos ist, welche Grösse für die Sicht repräsentativ ist, d.h. welcher Grösse die Eigenschaft einer Basisgrösse zuerkannt werden soll, wird im folgenden dieser Frage näher nachgegangen.

### Welche Grösse ist Bezugsgrösse: Kontrast oder Extinktion?

#### Kontrast

Für den Kontrast spricht die Tatsache, dass die Kontrastmessung eine Nachbildung des Sehvorganges ist.

#### Der Sehvorgang

In Bild 4 sind die für das Sehen massgebenden Elemente dargestellt: Zwei nebeneinander liegende Objekte - das Sichtziel  $H_0$  (Hinderniss) und das Umfeld  $U_0$  mit den Leuchtdichten (Helligkeiten)  $BH_0$  und  $BU_0$  werden aus einer Entfernung  $d$  durch das Auge eines Beobachters betrachtet. Durch die Augenlinse entstehen auf der Netzhaut Bilder der beiden Objekte mit den Leuchtdichten  $BU$  und  $BH$ . Diese erzeugen die Lichtempfindungen  $EU$  und  $EH$  und sind auf diese Weise verantwortlich für die Wahrnehmung der Gegenstände. Sind beide Bilder gleich hell, werden beide Gegenstände als eins empfunden und können nicht unterschieden werden. Je grösser der Unterschied der Empfindungen ist, um so besser können die Gegenstände voneinander differenziert und damit erkannt werden.

Visueller Kontrast. Die Differenz in der Helligkeitsempfindung ist die für die Erkennbarkeit eines Gegenstandes massgebende Grösse. Sie wird visueller Kontrast genannt. Falls die Erkennbarkeit nicht anderweitig, z.B. durch Kleinheit der Gegenstände oder durch zu wenig oder zu viel Licht

eingeschränkt wird, folgt die Empfindung  $E$  approximativ dem *Weber-Fechnerschen Gesetz*, d.h. sie ist annähernd proportional dem Logarithmus der Leuchtdichte der Bilder:

$$EU \triangleq \log BU \text{ bzw. } EH \triangleq \log BH.$$

Der visuelle Kontrast wird damit:

$$CE = EU - EH = \log BU - \log BH = \log \frac{BU}{BH}$$

*Photometrischer Kontrast.* Bei kleinen Leuchtdichte-Differenzen  $\Delta B$  zwischen Sichtziel und Umfeld kann der visuelle Kontrast

$$CE = \log \frac{BU}{BH} \text{ in erster Näherung durch die Form}$$

$$C = \frac{BU - BH}{BU} = \frac{\Delta B}{BU} \text{ ersetzt werden.}$$

Dieser Kontrast wird photometrischer Kontrast genannt. Er wird nun aber bei der Behandlung von Sichtproblemen ganz allgemein, d.h. auch für beliebig grosse Differenzen von  $\Delta B$  verwendet.

Der Kontrast der Tafeln wird *Eigenkontrast*, der Kontrast der Bilder *scheinbarer Kontrast* genannt.

*Kontrast - Aerosol.* Für das Erkennen eines Gegenstandes ist der scheinbare Kontrast im Auge massgebend. Bei absolut klarer Abbildung der Objekte ist der scheinbare Kontrast so gross wie der Eigenkontrast der Objekte selber. Durch die Gegenwart eines lichtstreuenden Mediums (Luft, Aerosole) im Raume zwischen Objekt und Beobachter verändert sich der Eigenkontrast in den scheinbaren Kontrast.

#### Kontrastmessung

Das Prinzip der Kontrastmessung wurde bereits erläutert. Es ist offenbar dem Sehvorgang nachgebildet.

#### Analogie Sehvorgang - Kontrast

Die Analogie zwischen Sehvorgang und Kontrastmessung ist sehr eindrücklich. In beiden Fällen wird eine helle und eine dunkle Tafel auf Distanz betrachtet. Sowohl beim Sehen wie beim Kontrastmessgerät werden mit Hilfe einer Linse Bilder des Sichtzieles erzeugt. Diese Bilder werden sowohl im Auge wie im Kontrastmessgerät in bezug auf den Kontrast ausgewertet, d.h. die massgebende Grösse ist in beiden Fällen der relative Helligkeitsunterschied der zu vergleichenden Tafeln. Die Verschlechterung der Sicht durch das Aerosol wirkt sich als Kontrastverminderung aus.

Die Analogie zwischen Sehvorgang und Kontrastmessung ist so vollkommen, dass kaum daran gezweifelt werden kann, dass die Kontrastmessung wirklich jene Eigenschaften des Aerosols erfasst, die für die Beurteilung der Sicht massgebend sind.

#### Kontrast bei Koschmieder

Diese Offensichtlichkeit kommt auch darin zum Ausdruck, dass *Koschmieder*, der Begründer der Sichttheorie, den Kontrast ohne Kommentar als Basis für alle seine Überlegungen zugrunde legt. Für ihn ist der Kontrast ein eindeutiges Mass für die Erkennbarkeit eines Gegenstandes. Seine Arbeit ist ganz auf die Berechenbarkeit der Veränderung des Eigenkontrastes des Sichtzieles durch das Aerosol konzentriert.

#### Extinktion

Es bleibt daher noch die Frage offen, wie die Extinktion zu dem Ansehen gekommen ist, Basisgrösse für die Sichtverminderung zu sein. Es scheint, dass eine undifferenzierte

Anwendung der Koschmiederschen Normsichtweitebeziehung hierfür verantwortlich ist. In dieser Beziehung tritt die Extinktion als einziger Parameter auf. Wird nun die Normsichtweitebeziehung als Sichtweitebeziehung schlechthin betrachtet, so erhält der Extinktionswert fälschlicherweise das Ansehen, ein absolutes Mass für die Sicht zu sein.

#### Sichttheorie, allgemeine Formel

Ein kurzer Blick auf die Theorie zeigt jedoch, dass die Anwendbarkeit der Normsichtweitebeziehung ausserordentlich beschränkt ist. Nach *Koschmieder* wird die Sichtweite allgemein so berechnet, dass die theoretisch hergeleitete Kontrast-Distanz-Beziehung algebraisch nach der Distanz aufgelöst wird und für den Kontrast ein bekannter Schwellenwert eingesetzt wird. Der für die Sicht allgemein massgebende scheinbare Kontrast ist:

$$C = \frac{\Delta B}{BU} = \frac{\Delta B_0 e^{-\mu d}}{BU_0 e^{-\mu d} + L^\infty (1 - e^{-\mu d})} \quad (\text{allgemeine Kontrastformel})$$

Darin bedeuten:

$\Delta B_0 = BU_0 - BH_0 =$  Eigenleuchtdichtedifferenz des Sichtzieles

$BU_0 =$  Eigenleuchtdichte der Umgebung

$BH_0 =$  Eigenleuchtdichte des Hindernisses

$\Delta B = BU - BH =$  Scheinbare Leuchtdichtedifferenz des Sichtzieles am Ort des Beobachters

$BU =$  Scheinbare Leuchtdichte der Umgebung

$BH =$  Scheinbare Leuchtdichte des Hindernisses

$\mu d =$  Extinktionsmass

$\mu =$  Extinktionskoeffizient

$d =$  Abstand

$L^\infty =$  Luftlichtgrösse

*Luftlichtgrösse  $L^\infty$ .*  $L^\infty$  ist eine von *Koschmieder* in die Sichttheorie eingeführte Grösse. Ist das Sichtziel z.B. ein schwarzer Körper, so wird das Luftlicht direkt wahrnehmbar. Das beleuchtete Aerosol erscheint als aufhellender Schleier, der sich vor das schwarze Sichtziel legt. Mit zunehmender Konzentration des Schwebestoffgehaltes oder mit zunehmendem Abstand des Sichtzieles wird dieser Schleier zunehmend dichter und heller. Der Grenzwert, bei dem ein schwarzes Hindernis ganz verschwindet, ist die Luftlichtgrösse  $L^\infty$ . Sie ist eine sehr komplexe, aber trotzdem sehr wichtige Grösse.

$L^\infty$  kann (grundsätzlich) nach *Koschmieder* als mehrfaches Integral dargestellt werden:

$$L^\infty = f\left(\frac{s}{\mu}, Z, J\right)$$

hierin sind:

$Z =$  Zerstreungsfunktion  $s =$  Streukoeffizient

$J =$  Beleuchtungsstärke (vergl. z.B. ABC-Optik, S. 798)

#### Reduzierte Kontrastformel

Der Gehalt der obigen allgemeinen Kontrastformel kann durch folgende Veränderungen anschaulicher gemacht werden:

1. Sichtziel wird als schwarz angenommen.  $BH_0 = 0$

2. Die Eigenleuchtdichte des Sichtzieles und des Luftlichtes wird relativiert. Dies geschieht, indem sämtliche Helligkeiten auf die Helligkeit der Umgebung bezogen werden.

Damit wird:

$$1. \frac{\Delta B_0}{BU_0} = \frac{BU_0 - 0}{BU_0} = \frac{BU_0}{BU_0} = 1$$

$$2. \frac{L^\infty}{BU_0} = l^\infty$$

Das relativierte Luftlicht  $I^\infty$  hat eine gewisse Anschaulichkeit. Das Luftlicht wird mit der Helligkeit der Umgebung des Sichtzieles (z. B. im Tunnel mit der Helligkeit der Fahrbahn oder der Wände) verglichen. Es ist vergleichbar mit dem Reflexionsvermögen irgend einer Oberfläche. Mit dieser Vereinfachung wird der Kontrast:

$$C_r = \frac{e^{-\mu d}}{e^{-\mu d} + I^\infty (1 - e^{-\mu d})}$$

#### Logarithmierte Kontrastformel

Wird die Beziehung weiterhin in die logarithmische Form gebracht, ergibt sich folgende Beziehung:

$$\ln C_r = -\mu d - \ln [e^{-\mu d} + I^\infty (1 - e^{-\mu d})]$$

Bild 5 enthält diese Beziehung in graphischer Form. Aus dieser Darstellung wird deutlich erkennbar, dass die Luftlichtgrösse  $I^\infty$  den Kontrast wesentlich mitbeeinflusst.

#### Normsichtweite

Die Normsichtweite ist ein Spezialfall der allgemeinen Sichttheorie. Sie bezieht sich auf den Fall eines schwarzen Gegenstandes am Horizont Himmel. Bei diesem Spezialfall übernimmt das Luftlicht selbst die Funktion der Umgebungshelligkeit. Damit wird:

$$BU_0 = L^\infty$$

und

$$I^\infty = \frac{L^\infty}{BU} = \frac{L^\infty}{L^\infty} = 1$$

Damit wird der zweite Term in der logarithmischen Kontrastformel zu null und der Logarithmus des Kontrastes:

$$\ln C = -\mu d$$

In Bild 5 entspricht die Gerade mit dem Parameter  $I^\infty = 1$  dieser Situation. In diesem Spezialfall wird der Kontrast nur durch jene Aerosoleigenschaften bestimmt, die durch eine Extinktionsmessung erfasst werden.

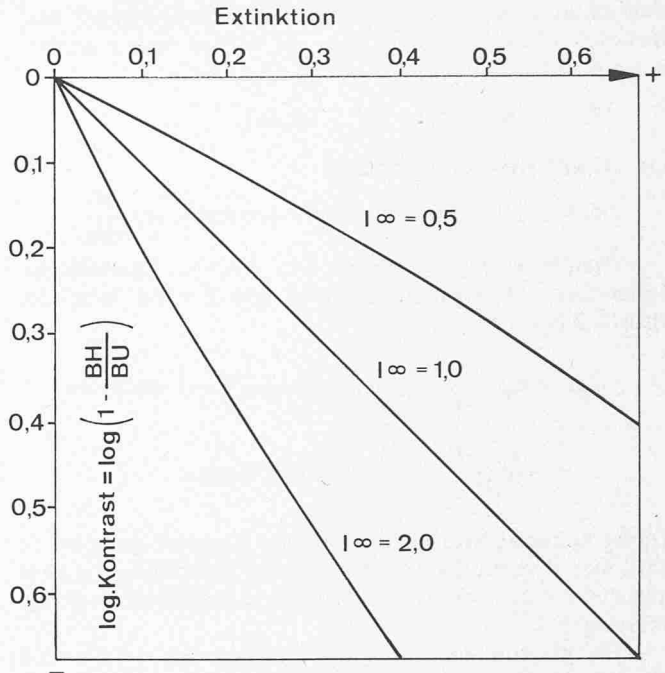


Bild 5. Theoretische Beziehung zwischen Kontrastverminderung und Extinktion bei verschiedenen Aerosolen

Aus dieser Beziehung wird die Normsichtweite ( $\ln C_s = \ln 0,02$ ) abgeleitet

$$d_\mu = \frac{3,91}{\mu}$$

Man darf jedoch nicht vergessen, dass diese Art Sichtweiteberechnung sich auf einen schwarzen Körper am Himmel bezieht. In allen anderen Fällen muss mit der allgemeinen Kontrastbeziehung gerechnet werden. Die Annahme, die Extinktion sei ein allgemeines Mass für die Sicht, lässt sich daher aus der Sichttheorie nach Koschmieder nicht ableiten.

Die Frage, ob Kontrast oder Extinktion das richtige Mass für die Sichtverminderung sei, ist damit wohl eindeutig zu-

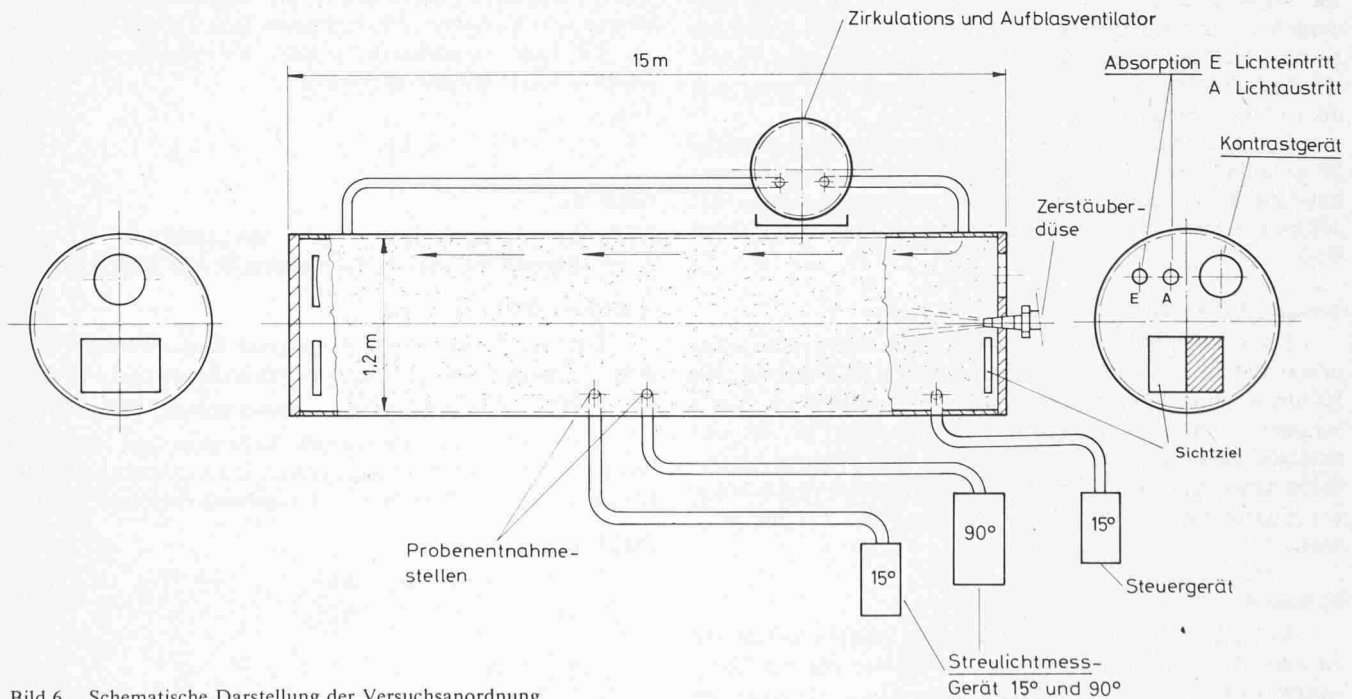


Bild 6. Schematische Darstellung der Versuchsanordnung

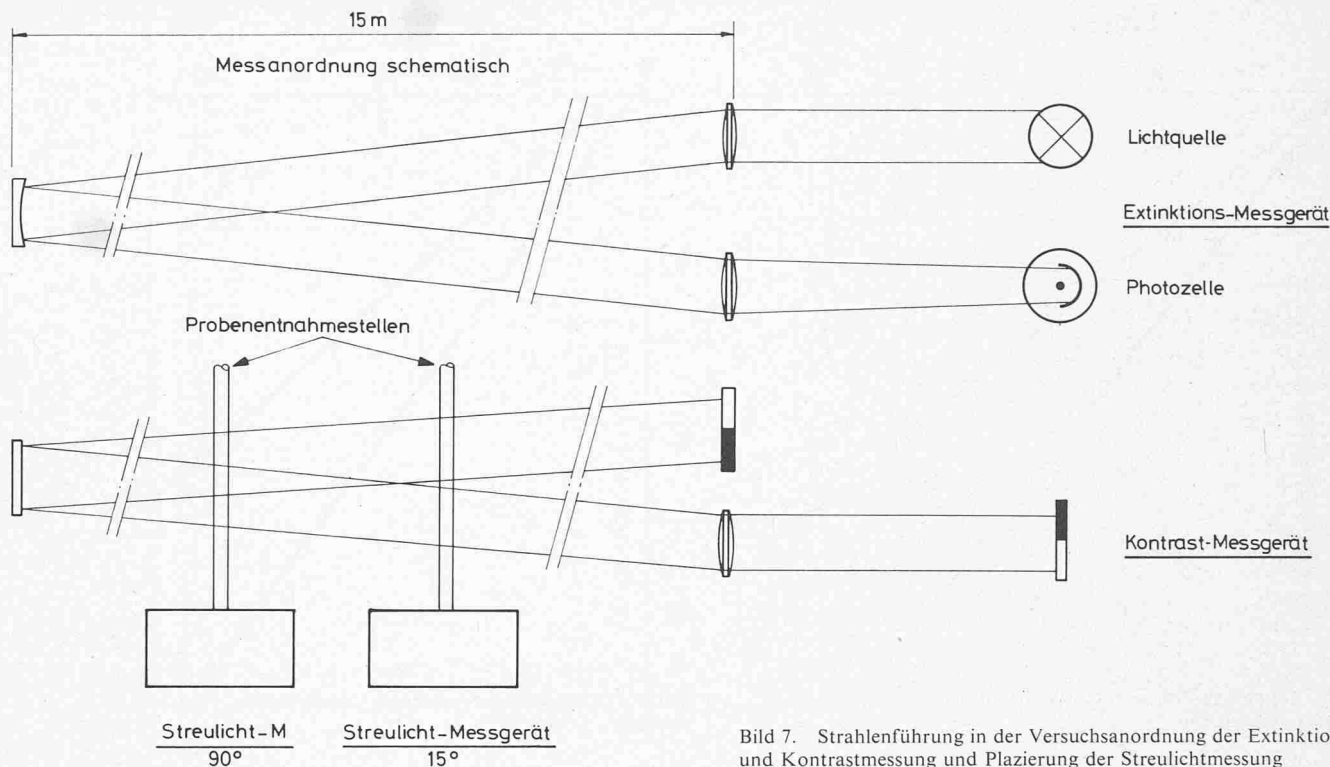


Bild 7. Strahlenführung in der Versuchsanordnung der Extinktions- und Kontrastmessung und Platzierung der Streulichtmessung

gunsten des Kontrastes entschieden. Die Kontrastmessung ist Basis und Bezugsgrösse, an der Extinktions- und Streulichtmessungen gewertet werden können.

### Vergleichende Bewertung der Extinktions- und Streulichtmessung gegen Kontrast

#### Theoretischer Vergleich

Eine quantitativ vergleichende Bewertung der heute üblichen Messgrössen Extinktion und Streulicht bezogen auf Kontrast ist auf theoretischem Weg für die Extinktion anhand von Bild 5 in beschränktem Umfang, für die Streulichtmessung jedoch praktisch unmöglich. Eine vergleichende Bewertung der beiden lässt sich daher nur über das Experiment erreichen.

#### Experimenteller Vergleich

##### Experimentelle Hilfsmittel

*Die Versuchsanordnung.* Der Sichttheorie ist zu entnehmen, dass der scheinbare Kontrast wesentlich durch die Horizontleuchtdichte  $L^\infty$  beeinflusst wird, die wiederum eine Funktion der Beleuchtung und der Streufunktion des Aerosols ist. Aussagekräftige Messwerte werden daher in Laborversuchen nur dann erhalten, wenn die Versuchsanordnung ein möglichst getreues Abbild der Wirklichkeit ist. Diese Forderung führt zu der im folgenden beschriebenen Versuchsanordnung (Bild 6).

Es wird in einem Miniatur-Tunnel gemessen. Er besteht aus einem transparenten Plastikschlauch von 15 m Länge und einem Durchmesser von etwa 1,2 m. Er ist bis auf einen Spalt (etwa 50 cm) schwarz gespritzt. Das durchsichtige Fenster erstreckt sich über die ganze Länge und ist unter  $45^\circ$  gegen Norden gerichtet. Als Beleuchtung dient Tageslicht. Die dadurch bedingten natürlichen Schwankungen der Beleuchtungsstärke haben keinen Einfluss auf die Messwerte. Die generelle Anordnung gibt ein gutes Abbild eines Tunnels mit Beleuchtung.

Die Anordnung der Geräte ist in den Bildern 6 und 7 schematisch dargestellt. Mit Hilfe der Spiegel ist es möglich, die Sichtstrecke zu verdoppeln. Die 30 m lange Messstrecke ist in zwei Hälften zu je 15 m unterteilt. Bei der Extinktionsmessung wird das Licht der Lichtquelle an der Reflexionsstelle durch einen Hohlspiegel auf dem Empfänger gesammelt. Bei der Kontrastmessung betrachtet das Kontrastmessgerät die beiden Tafeln über einen Planspiegel. Die Probeentnahmestelle für die Streulichtmessung befindet sich in der Mitte des Tunnels, um möglichst für den gesamten Tunnel repräsentative Messwerte zu erhalten.

Der Eintrag des Aerosols (Öl, Kohle, Kieselgur) erfolgt durch einen handelsüblichen Zerstäuber. Konstante Konzentrationen im Tunnel über lange Zeit werden erreicht, indem der Staubeintrag über eine automatische Dosiereinrichtung erfolgt, die aus einem Staubmessgerät TN und einem durch Magnetventil steuerbaren Zerstäuber besteht. Bei Unterschreiten des Sollwertes der Staubkonzentration wird das Magnetventil des Zerstäubers automatisch so lange geöffnet, bis die gewünschte Staubkonzentration wieder erreicht ist. Die Probeentnahmestelle des Gerätes befindet sich etwa 1 m vom Zerstäuber entfernt. Die geringe Distanz ist notwendig, um kleine Reaktionszeiten des Regelmechanismus zu erhalten, und damit die Regelschwingungen klein zu halten.

*Messgeräte.* Die Streulichtmessung wird mit zwei verschiedenen Geräten ausgeführt. Gerät 5T65S erfasst im Mittel das  $90^\circ$ -Streulicht, Gerät 9TN erfasst im Mittel  $15^\circ$ -Streulicht.

Die Extinktionsmessung erfolgt mit einem Absorptionmessgerät Typ 5A 30000.

Für die Kontrastmessung wurde ein neu entwickeltes Gerät Typ G 50 verwendet. Sein Aufbau entspricht der eingangs erwähnten Beschreibung.

*Verwendete Schwebestoffe.* Die Messungen wurden mit Ölnebel, Kieselgur ( $\text{SiO}_2$ ) und Kohle ausgeführt. Ölnebel und Kieselgur sind durchsichtige Partikel, Absorptionskohle wurde als Repräsentant für relativ stark absorbierende Staubeile gewählt. Es ist anzunehmen, dass die normalerweise in

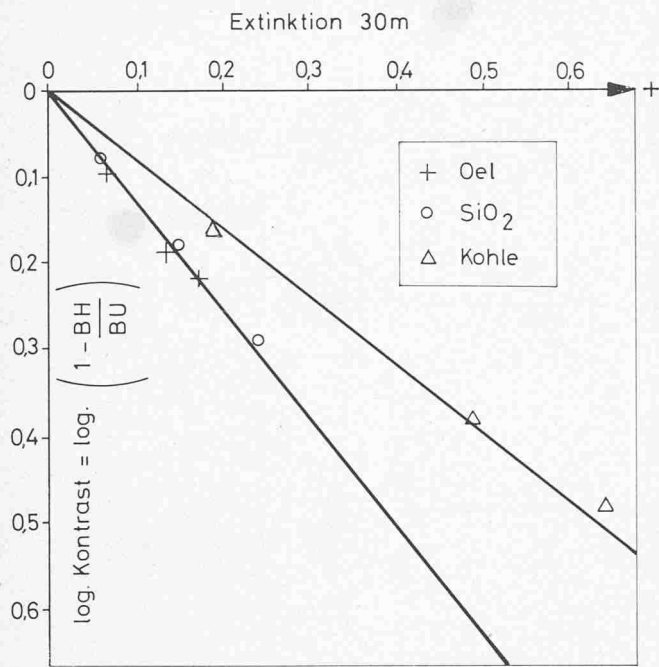


Bild 8. Graphische Darstellung der Messresultate Kontrast - Extinktion

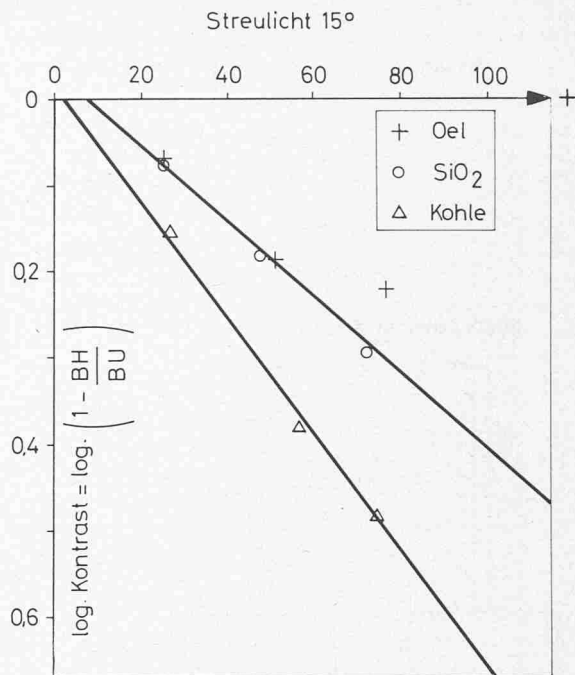


Bild 9. Graphische Darstellung der Messresultate Kontrast - Streulicht

Strassentunnels vorkommenden Schwebstoffarten zwischen diesen Extremwerten liegen. Der Tunnel wurde jeweils mit drei verschiedenen Konzentrationen der Schwebstoffe beschickt. Es handelt sich dabei um rein optisch definierte Konzentrationen, für die keine Beziehung zum Gewicht besteht. Als Konzentrationsmass diente die Anzeige des Steuergerätes. Da bei der Auswertung nur Verhältniszahlen zwischen den Messwerten der verschiedenen Geräte gebildet werden, ist der Absolutbetrag ohne Bedeutung.

## Messergebnisse

### Art der Darstellung

In den Bildern 8 und 9 sind die gemessenen Streulicht- und Extinktionswerte gegen die durch direkte Messungen gefundenen scheinbaren Kontraste aufgezeichnet. Für die Kontraste wurde analog zu den Darstellungen in Bild 5 ein logarithmischer Massstab gewählt. Da eine der beiden Objekttafeln annähernd schwarz ist, wird der scheinbare Kontrast bei den vorliegenden Messungen für aerosolfreie Atmosphäre annähernd gleich 1 und der Logarithmus des Kontrastes gleich 0. Mit zunehmendem Aerosolgehalt wird der Kontrast kleiner und der Logarithmus nimmt entsprechend negative Werte an.

**Kontrast-Extinktion.** Bild 8 enthält die Messwerte in graphischer Form. Die Beziehung Kontrast-Extinktion ist ausgesprochen materialspezifisch. Die zu einer bestimmten Extinktion z. B. 0,45 gehörende Kontrastverminderung variiert im vorliegenden Falle von 0,35 bis 0,6. Bei durchsichtigen Stoffen ist der Kontrast bezogen auf Extinktion relativ gross, bei dunklen relativ klein. Das Verhältnis der Steilheit der beiden Geraden ist 1:1,7.

**Vergleich mit der Theorie.** Sehr eindrücklich ist ein Vergleich der Resultate mit den theoretischen Kurven (Bild 5). Die Kurven sind direkt miteinander vergleichbar, da für beide Fälle derselbe Massstab gilt. Aus dem direkten Vergleich lassen sich einige nähere Angaben über die Eigenschaften des Aerosols gewinnen: Wäre die Leuchtdichte des Luftlichtes des Aerosols gleich der Leuchtdichte der hellen Tafel, so würde  $l^\infty$  gleich 1, und die Kontrast-Extinktions-Gerade würde auf einer 45°-Linie liegen. Die Kohlekurve ist flacher, und das

Luftlicht entspricht ungefähr einem  $l^\infty$  von 0,75. Die Öl- und Kieselgur-Kurven sind steiler, und das Luftlicht entspricht ungefähr einem  $l^\infty$  von 1,4.

Aus dem Vergleich wird ersichtlich, dass das Luftlicht in der Praxis Werte annehmen kann, wie sie in Bild 5 vorerst rein theoretisch angenommen wurden. Die theoretischen Annahmen von  $l^\infty$  2 und 0,5 sind durchaus keine utopischen Annahmen. Damit ist aber auch erwiesen, dass der Einfluss des Luftlichtes nicht vernachlässigbar ist.

**Kontrast-Streulicht.** Die Resultate Kontrast-Streulicht befinden sich in Bild 9. Sie sind den Resultaten Kontrast-Extinktion (Bild 8) sehr ähnlich. Die Ähnlichkeit der Bilder Kontrast-Extinktion und Kontrast-Streulicht ist sehr eindrücklich. Sie ist sogar etwas zu eindrücklich, denn die extreme Ähnlichkeit ist rein optisch und eine Folge des hier absichtlich gewählten Streulicht-Massstabes. Durch die Massstab-Wahl wird aber eine Tatsache optisch leicht erkennbar, die auch unabhängig vom Massstab Gültigkeit hat. Der Quotient der beiden Steilheiten für Streulicht-Kontrast und Extinktion-Kontrast ist praktisch gleich: 1,7 bei der Extinktion und 1,63 beim Streulicht.

## Schlussfolgerungen

Aus den Messergebnissen lässt sich folgendes erkennen:

1. Weder für die Extinktion, noch für das Streulicht besteht eine eindeutige Korrelation zur Kontrastverminderung, d. h. weder die Extinktionsmessung noch die Streulichtmessung ist ein eindeutiger Ersatz für die Sicht.
2. Unter den vorliegenden Versuchsbedingungen sind die systematischen Fehler für die Streulichtmessung praktisch genau gleich gross wie für die Extinktionsmessung. Das heisst, die beiden heute üblichen Ersatzmethoden sind gleichwertig.
3. Den Messresultaten ist zu entnehmen, dass Streulicht und Extinktion an der Sichtverminderung in gleichem Masse beteiligt sind. Die weitverbreitete Ansicht, wonach das Streulicht bei der Sichtbehinderung kaum beteiligt sei, kann nicht bestätigt werden.
4. Da die Fehler für die Streulicht- und die Extinktionsmessung invers sind, führt ein direkter Vergleich Streulicht

gegen Extinktion zu einer Verdoppelung des scheinbaren Fehlers. Dieser Vergleich ist daher auf jeden Fall unzulässig.

5. Die Abweichungen können bei veränderlicher Zusammensetzung des Aerosols beträchtlich werden. Es ist daher von Anwendungsfall zu Anwendungsfall zu untersuchen, ob die bei Anwendung der Extinktions- oder Streulichtmessung entstehenden systematischen Fehler innerhalb der tolerierten Grenzen liegen oder ob eine Kontrastmessung erforderlich ist.

6. Mit dem Kontrastmessgerät werden zwar die für die Sicht massgebenden Eigenschaften des Aerosols korrekt er-

fasst; trotzdem lässt sich aus einer Kontrastmessung die Sichtweite von der Theorie her nicht exakt bestimmen. Da die Kontrastverminderung durch zwei unabhängige Variablen, die Extinktionseigenschaft des Aerosols und die Streueigenschaft desselben, bestimmt wird, ist die Sichtweite grundsätzlich nur mit zwei Messwerten errechenbar. Dies können eine Kontrast- und eine Extinktionsmessung oder aber zwei Kontrastmessungen mit verschiedenen Abständen des Sichtzieles sein.

Adresse der Verfasser: Dr. ing. W. Sigrist und H. Urheim, dipl. Phys. ETH, Sigrist-Photometer AG, Zweierstr. 129, 8036 Zürich.

## Belastungs- und Deformationsmessungen an einer Tunnelschalung

Von Christoph Müller, Altdorf

Grosse teleskopierbare Metallschalungen, wie sie beim Untertagebau für die Auskleidung von Strassentunnels zur Anwendung gelangen, erweisen sich oft als zu schwach. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit besteht beim Unternehmer die Tendenz, einerseits immer leistungsfähigere Betonpumpen einzusetzen, andererseits an den Anschaffungskosten der Schalungen durch Herabsetzung der Konstruktionsgewichte Einsparungen zu erzielen.

Die nachteiligen Folgen treten erst bei der Ausführung der Betonarbeiten auf der Baustelle in Erscheinung. Die Verformungen unterbemessener Tunnelschalungen ergeben oft Ungenauigkeiten beim Bauwerk in einer Grössenordnung, die der Bauherr keineswegs zu tolerieren gewillt ist. Nachträgliche Verstärkungen an den Schalkonstruktionen sind mit erheblichen Aufwendungen verbunden. Sehr oft führen sie auch nicht zum vollständigen Erfolg.

Auf der Baustelle Büel des Seelisberg-Strassentunnels hatte die Bauleitung die Unternehmung Marti AG, Bern, veranlassen können, durch Messungen in situ die statischen Belastungsannahmen ihrer Gewölbeschalung zu überprüfen. Im Verlauf eines Betoniervorganges konnten die effektiven Betonschaldrücke und die Deformationen der Schalung ermittelt werden.

### Versuchsdurchführung

#### Messeinrichtungen

Mit der Durchführung der Messungen wurde die Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA) in Dübendorf beauftragt. Der Betondruck auf die Schalung wurde an fünf Stellen mit besonders konstruierten Kraftmessdosen  $\varnothing$  10 cm gemessen und der zeitliche Verlauf mit einem 6-Kanalkompensationsschreiber registriert. Die Messgenauigkeit lag bei 5%. Die Verschiebung der Nulllinien der aufgezeichneten Betondrücke konnte während der Zeit des Versuches, vor allem wegen Temperatureinflüssen, bis zu 0,05 kp/cm<sup>2</sup> betragen. Gleichzeitig wurden auch die Verschiebungen der Schalung bei bestimmten Betonierphasen an Messuhren abgelesen. Sämtliche Messgeräte lagen in der Mittellinie des Schalelementes.

#### Konstruktion der Schalung

Elementlänge: 8,10 m'  
Umfang: 24,20 m'  
Schalfläche: 196 m<sup>2</sup>

Die teleskopierbare Metallschalung bestand aus zehn verschweissten Kastenträgern in einem Abstand von 0,87 m und einer Schalfläche aus Stahlmuralis. Die Träger waren durch

Tunnelschalung



Schal- und Betonierinstallationen für die Auskleidung des Tunnels

