



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Sicherheit von Kabelanlagen

Sécurité dans les installations de câblage

Safe Cabling Systems

Amstein + Walther AG, Zürich
U. Welte, dipl. El. Ing. ETH
M. Ochsner, dipl. El. Ing. HTL

Bürkel Baumann Schuler Ingenieure + Planer AG, Winterthur
D. Schuler, dipl. Ing. FH

Forschungsauftrag VSS 2002/705 auf Auftrag des
Schweizerischen Verbandes der Strassen- und Verkehrsfachleute VSS



Sicherheit von Kabelanlagen

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	6
2	Einleitung.....	8
2.1	Ausgangslage.....	8
2.2	Zielsetzungen.....	8
2.3	Abgrenzung.....	9
2.4	Abkürzungen.....	9
3	Grundlagen von Tunnelbränden	11
3.1	Brandszenarien.....	11
3.1.1	Ausgangslage.....	11
3.1.2	Brandlasten und Brandleistungen.....	11
3.1.3	Brandverlauf.....	12
3.2	Brandversuche.....	13
3.2.1	Übersicht.....	13
3.2.2	EUREKA-Projekt 499 Firetun.....	15
3.2.3	Brandversuche im Memorial Tunnel.....	17
3.2.4	Vergleich der Temperaturverläufe.....	19
3.2.5	Erkenntnisse und Schlussfolgerungen.....	20
4	Baulicher Brandschutz.....	22
4.1	Allgemeines.....	22
4.2	Normbrandkurven.....	22
4.2.1	Übersicht.....	22
4.2.2	ISO 834.....	23
4.2.3	Niederländische Normbrandkurve RWS.....	23
4.2.4	Hydrocarbon Kurve HC.....	24
4.2.5	Normbrandkurve gemäss ZTV-ING.....	24
4.2.6	Vergleich der Normbrandkurven mit realen Temperatur-Zeit-Verläufen.....	24



4.2.7	Für die Bemessung von Tunneltragwerken verwendete Normbrandkurven.....	26
4.3	Brandwiderstand von Beton und Betonbauteilen	27
4.3.1	Allgemeines und Übersicht	27
4.3.2	Einflüsse von Betonzusätzen	28
4.3.3	Brandversuche mit Normalbeton und hochbeständigem Beton	29
4.3.4	Abplatzungen bei Tunnelementen aus Beton	30
4.3.5	Brandwiderstand von Tübbing	31
4.3.6	Schlussfolgerungen.....	33
5	Normengrundlagen Kabel.....	34
5.1	Relevante Normen für das Brandverhalten von Kabeln (passive Eigenschaften)	34
5.2	Relevante Normen für den Feuerwiderstand von Kabel (aktive Eigenschaften)	35
5.2.1	Isolationserhalt	35
5.2.2	Isolationserhalt mit mechanischem Schock	36
5.3	Relevante Normen für den Funktionserhalt von Kabelanlagen (z.B. E30):.....	37
5.4	Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, DIN 4102.....	38
5.4.1	Aufbau der Norm DIN 4102.....	38
5.4.2	Beschreibung der Norm DIN 4102-12.....	39
5.4.3	Ablauf und Durchführung der Prüfung gem. DIN 4102-12	39
5.4.4	Trag- und Montagesysteme	41
5.4.5	Prüfungszeugnis / Übereinstimmungsnachweis	41
5.4.6	Kennzeichnung.....	42
5.4.7	Kostenfolgen für Installationen nach DIN 4102-12	42
5.4.8	Übersicht der wichtigsten Punkte der DIN 4102-12	43
5.5	Normenhierarchie / -Vergleich.....	44
5.6	Zweckmässigkeit von Anforderungen des Funktionserhaltes	46



6	Grundlagen Elektromechanik.....	47
6.1	Aufbau von Kabeln	47
6.2	Typische Kabelanlagen in Strassentunneln	49
6.2.1	Vorgaben / Anforderungen an die elektromechanischen Einrichtungen	49
6.2.2	Hochspannungs-Energieversorgungskabel	50
6.2.3	Niederspannungs-Energieversorgungskabel	50
6.2.4	Daten- / Kommunikationskabel	51
6.2.5	Koaxiale Strahlungskabel.....	51
6.3	Kabelschutz	52
6.3.1	Kabelschutzrohr	52
6.3.2	Auflagersystem.....	53
6.3.3	Kanal aus Betonelementen	53
6.4	Typische Kabelverlegearten	53
6.4.1	Verlegung der Kabel im OKK (Oberflächen-Kabelkanal)	54
6.4.2	Verlegung der Kabel im UKK (Unterflur-Kabelkanal / Rohrblock)	54
6.4.3	Querung der Kabel unter der Fahrbahn	54
6.4.4	Verlegung der Kabel im Leitungskanal	55
6.4.5	Kabel-Aufstieg in Wand (einbetoniert oder mit Abdeckung)	55
6.4.6	Kabelquerung in Decke / Zwischendecke	55
6.4.7	Kabelkanal im Lüftungskanal	56
6.4.8	Kabelkanal unter Tunneldecke / an Tunnelwand (im Fahrraum).....	56
6.4.9	Offenen Verlegung für Anschluss elektromechanischer Komponenten.....	56
6.4.10	Verlegung in Nut im Bankett	57
6.4.11	Kabel-Übergänge	57
6.4.12	Befestigungselemente.....	57
7	Gefährdungsanalyse	58
7.1	Grundlagen	58
7.1.1	Isolation / Beton-Überdeckung	58
7.1.2	Temperatureinwirkung.....	58
7.1.3	Lage / Linienführung von Kabelleitungen im Tunnelquerschnitt.....	59



7.2	Gefährdungen der Kabelverlegearten	59
7.3	Erkenntnisse und Schlussfolgerungen der Gefährdungen.....	61
8	Schlussfolgerungen	63
8.1	Brandleistung.....	63
8.2	Tunnelquerschnitt / Dimension	64
8.3	Baulicher Brandschutz.....	64
8.4	Lüftungskonzept	65
8.5	Lage der Kabelanlage im Tunnel.....	65
8.6	Art der Anlage / des Systems	65
8.7	Schlussbemerkung	68
9	Verzeichnisse	69
9.1	Literatur- / Quellenverzeichnis.....	69
9.2	Abbildungsverzeichnis.....	71
10	Glossar.....	74
11	Anhang A: Normen passives Brandverhalten	76
11.1	Flammwidrigkeit (selbstverlöschend) (PVC):	76
11.2	Halogenfreiheit:.....	77
11.3	Korrosivität von Brandgasen:	78
11.4	Rauchdichte:.....	79
11.5	Brandfortleitung:	80
12	Anhang B: Kabeltypen	81
13	Anhang C: Tabellarische Übersicht der Gefährdungsanalyse	82



Impressum

Auftraggeber	Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS) Seefeldstrasse 9 8008 Zürich Tel. 044 269 40 20
Auftragnehmer	AMSTEIN + WALTHERT AG Andreasstrasse 11 CH-8050 Zürich Tel. 044 305 91 11 Fax 044 305 92 14 Bürkel Baumann Schuler Ingenieure + Planer AG Gertrudstrasse 17 8400 Winterthur Tel. 052 213 25 51 Fax 052 212 72 68
Verfasser	U. Welte M. Ochsner D. Schuler



1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde der gegenwärtige Wissensstand im Bau von Kabelanlagen in Strassentunnel sowie deren Gefährdungen bei Brandereignissen aufgearbeitet und mögliche Massnahmen aufgezeigt werden. Für die Beurteilung der Brandeinwirkungen wurden die ermittelten Resultate der Brandversuche im Memorial Tunnel wie auch des Projektes EUREKA Firetun herangezogen und zugrunde gelegt. Dabei konnte die Erkenntnis gewonnen werden, dass Randbedingungen wie die Grösse des Tunnelquerschnittes, der Einsatz einer Brandlüftungsanlage etc. die Temperaturentwicklungen stark beeinflussen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit Beton überdeckte Kabelanlagen grundsätzlich einen sehr guten Schutz gegenüber Brandeinwirkungen aufweisen, wogegen offen oder auf Trassen verlegte Kabel in ihrer Funktion stark beeinträchtigt werden können. Weiter besteht eine direkte Abhängigkeit zwischen dem Gefährdungsgrad der Kabelanlagen und dem Verlegungsort innerhalb des Tunnelfahrtraums.

Für jede Anlage ist festzulegen, was für Ansprüche an die zugehörige Kabelanlage in Bezug auf die Funktionstüchtigkeit bei einem Brandereignis gestellt werden. Unter Berücksichtigung der Kabelverlegeart sind anschliessend die den Anforderungen entsprechenden Kabeltypen inkl. Befestigungssystemen zu definieren. Übertriebene Sicherheitsüberlegungen dürfen aber nicht dazu führen, grundsätzlich alle Kabelanlagen mit dem höchsten Brandschutz (FE180/E30) auszuführen.

Summary

The research project aimed at a detailed analysis of the current know-how in the construction of tunnel cabling systems as well as the impact of fire and heat and the respective measures to be taken. Therefore the results of the test projects EUREKA Firetun and MEMORIAL were for the first time scrutinized and evaluated in view of the today's boundary conditions and cross sections applied in Switzerland. It could clearly be shown that the heat distribution is highly dependant on the cross section and the ventilation system.

Further it could be outlined that concrete slabs well protect cables from heat and damage even if the coverage is low and that open mounted installation channels are highly endangered.

For every single cabling system it has to be decided which requirements and specifications regarding fire and heat resistance are required. The cable specifications can be defined depending on the kind of installation. "Oversized" safety specifications lead to general requirements like FE180/E30 and are not generally reasonable.



Résumé

Dans le cadre de ce rapport le savoir actuel concernant l'infrastructure des galeries est résumé et le risque en cas de feu est également étudié; particulièrement on va donner une liste des contre mesures, pour minimiser les risques. Pour évaluer correctement le risque de feu et sa conséquence en cas d'un incendie, on se base sur des résultats des projets modèles « Memorial Tunnel » et « EUREKA-Firetun ». Dans ces essais on a observé, que les facteurs primaires sont la section du tunnel et la technique de la ventilation.

L'enquête a démontré, que le système de câble derrière une structure du béton est considérablement bien protégé. Au contraire une trassée de câble non protégée contre l'irradiation IR est vite détruite gravement en perdant la fonctionnalité du réseau électrique (énergie ou signaux). En plus, on a pu vérifier, qu'il y a un rapport direct, entre le risque et le lieu de montage des câbles relatif à la position de la section du tunnel.

Pour chaque type d'équipage il faut fixer le degré de la protection en relation à la fonction opérationnelle, aussi en cas d'un incendie. Relative à la choix du trassée il faut choisir correctement le type de câble (anti-flamme, anti corrosion ou non ou les deux) y inclus la technique de la fixation. Il faut mentionner également, qu'il faut éviter absolument un « over design » de sorte que, tout les câbles automatiquement doivent refléter la plus haute classe de protection (FE180/E30).

Riassunto

Il seguente rapporto tratta in modo più profondo aspetti della "Sicurezza dell' equipaggio elettro – meccanico per l'infrastruttura delle gallerie autostradali (rete autovia statale)" in caso d'incendio ed il rischio del non funzionamento dei sistemi cavi; particolarmente si propone delle soluzioni per minimare i rischi. Per analizzare ed valutare correttamente il rischio di prendere fuoco e per conseguenza in caso di un incendio, il lavoro seguente si basa su due esperimenti noti: "Memorial Tunnel" e "Eureka-Firetune". Questi esperimenti hanno dimostrato chiaramente, che i parametri della sezione della Galleria et il modo della ventilazione sono i fattori i più importanti da rispettare.

La ricerca ha confermato che i sistemi cavi protetti da cemento armato dimostrano una protezione efficace, a causa dell' alta capacità termica ed il coefficiente basso della thermo-conduttività del cemento. In contrario, un cavo non protetto dalla irradiazione IR non si dimostra per niente resistente al calore e perde in breve tempo la sua funzionalità. In più si ha rilevato, che si può notare una relazione diretta entro il rischio e la posizione in quale si trova il montaggio in rispetto alla sezione della galleria.

In oltre si deve valutare il grado della protezione di un sistema secondo la funzionalità, ma anche sotto l'aspetto di emergenza in caso di un incendio. Utilizzando un tracciato differente, si deve anche definire il tipo di cavo e la sua composizione chimica del sistema isolante, ma anche il suo modo del montaggio. In ogni caso si deve rendersi conto di evitare in ogni caso un "over design", chiedendo indifferentemente d'appertutto la classe più alta di protezione (FE180/E30).



2 Einleitung

2.1 Ausgangslage

Im Rahmen des Managements der Strassenerhaltung wurde seit den Tunnelbränden das Augenmerk vermehrt auf die Kabelanlagen gelenkt. Alle elektromechanischen Systeme eines Tunnels sind vom Funktionieren der entsprechenden Kabel abhängig – seien dies die Energieversorgung, die Beleuchtung, die Lüftung oder die Kommunikation. Es wird allgemein anerkannt, dass dem Funktionserhalt der Kabelanlagen im Brandfall grosse Beachtung geschenkt werden muss. Die Gefährdung erfolgt einerseits direkt durch die Hitzeeinwirkung am Brandort, andererseits aber auch indirekt durch Wärmeleitung oder Brandausbreitung über die Kabelanlage.

Kabel werden in Strassentunneln an unterschiedlichen Orten untergebracht: in Unterflur-Kabel-Kanal-Systemen (UKK), beinhaltend Rohrblöcke und Schächte, auf Trassen an der Tunneldecke (Beleuchtung, Kommunikation, Brandschutz), auf Trassen hinter der Wandverkleidung sowie in diversen Anlagen (Schächte, Aufstiege, im Lüftungskanal, in Querungen, in speziellen, begehbaren Kabelschächten).

2.2 Zielsetzungen

Das Forschungsvorhaben hat zum Ziel, den gegenwärtigen Wissensstand im Bau von Tunnel-Kabelanlagen, deren entsprechende Verlegearten sowie die Gefährdungen bezüglich Brandeinwirkungen aufzuarbeiten. Im Blickpunkt des Interesses stehen dabei vor allem die am häufigsten eingesetzten Kabelsysteme, wie Kabelrohranlagen unter den seitlichen Banketten, Aufstiege hinter den Verkleidungen und auf Trassen verlegte Kabel im Innern der Tunnelröhre. Spezielles Augenmerk wird auf folgende Themen gerichtet:

- Kanäle
- Kabelrohranlagen
- Werkleitungskanäle, Leitungstunnel
- Trassen

Im Zentrum der Forschungsarbeit steht der *grundsätzliche Aspekt der Gefährdung der Kabelanlagen durch Brand* und nicht die Fragen bez. Redundanz von Kabeln untereinander oder die Verminderung von Folgen von Kabelausfällen durch technische Massnahmen. Berücksichtigt wird jedoch der Stand der Technik bez. Kabelauswahl für sicherheitsrelevante Kabel bei Brandmeldeanlagen, Lüftungsventilatoren im Fahrraum, Kabeln von unterbrechungsfreien Stromversorgungen.



2.3 Abgrenzung

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit erfolgen keine Untersuchungen und Beurteilungen bezüglich der strukturellen und systematischen Konzepte von Kabelanlagen. Allfällige Schadensumfänge bei Kabelausfällen werden nicht in die Betrachtungen einbezogen.

2.4 Abkürzungen

AIPCR	Association mondiale de la route (Welt Strassen Verband)
ASTRA	Bundesamt für Strassen
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
Cu	Kupfer
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
E(30)	Funktionserhalt (30 min.)
EN	Europäische Norm
EPR	Ethylen Propylen Rubber
ETK	Einheits-Temperatur-Kurve
EUREKA	Project EU 499, Fire in Transport Tunnels, Ed: Studiengesellschaft Strahlenanwendung e.V. Düsseldorf
FE(180)	Isolationserhalt (180 min.)
FEP	Fluorethylenpropylen (Teflon)
HC	Hydrocarbon (Kohlenwasserstoff)
HFFR	Halogen Free Flame Retardant
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Standardization Organization
kV	Kilovolt
LWL	Lichtwellenleiter
min	Minuten
MJ	Megajoule



MPa	Mega Pascal
MW	Megawatt
NBN	Norm Belge / Belgische Norm
OKK	Oberflächen Kabelkanal
PA	Polyamid
PE	Polyethylen
PEHD	Polyethylen High Density
PELD	Polyethylen Low Density
PP	Polypropylen
PP	Polypropylenfasern
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
PW	Personenwagen
RWS	Rijkswaterstaat (holländisches Transport und Wasserbau Ministerium)
SIA	Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein
SIS	Swedish Standards Institute
TNO	Netherlands Organisation for Applied Scientific Research
TU	Technische Universität
UKK	Unterflur Kabelkanal
XLPE	X-Linked Polyethylen
ZTV-ING	Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Ausstattung für den Bau von Strassentunneln

3 Grundlagen von Tunnelbränden

3.1 Brandszenarien

3.1.1 Ausgangslage

Brandunfälle in Tunneln können auf Grund der eingeschränkten räumlichen Verhältnisse hohe Temperaturen und eine starke Verrauchung des Tunnelraums zur Folge haben. Trotzdem laufen zahlreiche Fahrzeugbrände, wegen den vergleichsweise geringen Brandlasten, glimpflich ab. Die Brandkatastrophen im Tauern-, Montblanc- und Gotthardtunnel zeigten jedoch, dass Tunnelbrände bei grossen Brandbelastungen und trotz nach damals gültigen Vorschriften und Richtlinien dimensionierten Lüftungssystemen verheerende Auswirkungen haben können.

3.1.2 Brandlasten und Brandleistungen

Abhängig vom Fahrzeugtyp und von der Ladung kann die Intensität eines Fahrzeugbrandes sehr stark variieren. Ausgehend von den Ergebnissen von Brandversuchen gibt der Weltstrassenverband AIPCR die folgenden maximalen Brandleistungen an. Diese werden bei Fahrzeugbränden während einer signifikanten Branddauer erreicht. Die gleichen Werte sind auch für die Auslegung von Lüftungsanlagen gemäss den Richtlinien des ASTRA [1] massgebend.

Anzahl Fahrzeuge/Fahrzeugtyp	Brandleistung in MW
Personenwagen	2 - 5
Lieferwagen	15
Bus	20
Lastwagen beladen	20 - 30

Abb. 1: Brandleistungen [1]

Beim Brand von schweren Lastfahrzeugen mit brennbarer Ladung und speziell im Fall von Tankfahrzeugen mit brennbaren Flüssigkeiten, können wesentlich höhere Spitzenleistungen in der Grössenordnung von 100 bis 120 MW erreicht werden.



In der Norm SIA 197/2 [2] werden die Brandlasten von verschiedenen Fahrzeugen sowie die bei Brandversuchen in Tunneln erreichten Maximaltemperaturen angegeben.

Fahrzeugtyp	Brandlast (Brandenergie) in MJ	maximale Brandtemperatur in °C
Personenwagen	3'000 - 6'000	200
Kleinbus / Kleinlastwagen		700
Autobus	41'000	820
Gefahrgut-Transport (TIR)	65'000	1'000
Schwerlastwagen	88'000	1'200
Tanklastwagen mit 50 m ³ Benzin oder Petrol, ohne Abfluss in Kanalisation	1'500'000	1'400

Abb. 2: Brandenergie und Brandtemperatur [SIA 197/2]

3.1.3 Brandverlauf

Bei einem Brandereignis in einem Tunnel findet im Allgemeinen ein rascher Temperaturanstieg, verbunden mit einer schnellen Ausbreitung von Rauchgasen, statt. Im Verhältnis zur gesamten Branddauer von rund einer Stunde, wird die nominelle Brandleistung nur während weniger Minuten erreicht oder überschritten. Die folgende Abbildung zeigt den im Rahmen des EUREKA Projekts 499, Firetun, gemessenen zeitlichen Verlauf der Energiefreisetzung beim Brand verschiedener Strassenfahrzeuge. Beim Bus wird die nominelle Brandleistung von 20 MW während rund zehn Minuten erreicht bzw. überschritten. Der Maximalwert beträgt rund 30 MW. Bei Lastwagen ist die Brandleistung wesentlich von der Ladung abhängig. Im dargestellten Fall wurden während des Brandes kurzzeitig eine sehr grosse Leistungen von 100 MW gemessen.

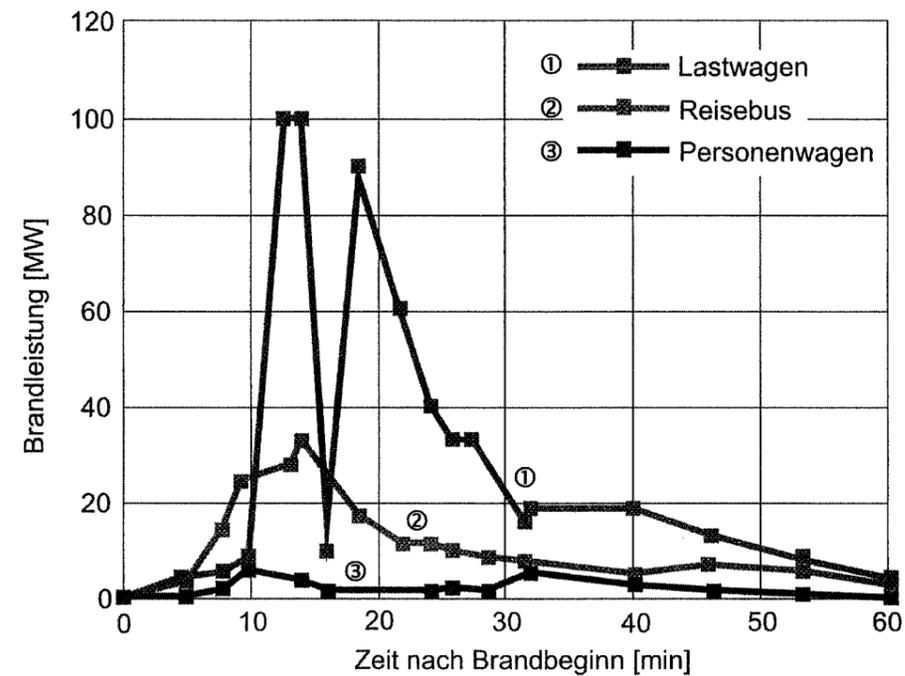


Abb. 3: Bei Brandversuchen gemessener zeitlicher Verlauf der Brandleistung [EUREKA]

3.2 Brandversuche

3.2.1 Übersicht

In den 90iger Jahren wurden in Europa und in den USA zahlreiche Brandversuche in Tunneln im Massstab 1:1 durchgeführt. Die heute verwendeten Grundlagen zur Bemessung und Projektierung von Tunnelanlagen basieren hauptsächlich auf den beiden nachfolgend beschriebenen Versuchsprogrammen.

- EUREKA-Projekt 499 Firetun (1990 - 1992)
- Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program (1993 - 1995)

In der nachfolgenden Abbildung sind die Tunnelquerschnitte der beiden Versuchstunnel dargestellt.



Brandversuche EUREKA 499 Firetun
1990 - 1992

Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program
1993 - 1995

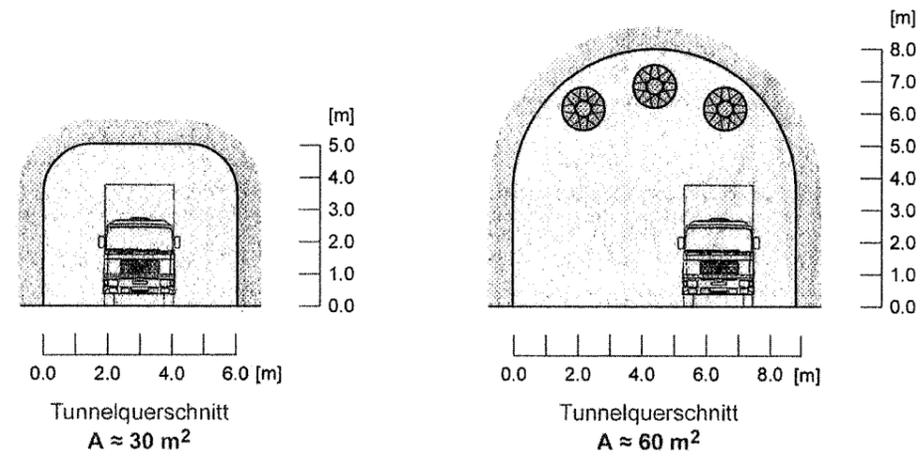


Abb. 4: Querschnitte Versuchstunnel

Der Vergleich der Querschnitte der beiden Versuchstunnel mit einem typischen Tunnelquerschnitt eines zweistreifigen Strassentunnels gemäss der Norm SIA 197/2 [2] zeigt, dass der Memorial Tunnel mit einer Querschnittsfläche von rund 60 m^2 etwa dem Querschnitt eines heutigen Strassentunnels entspricht.

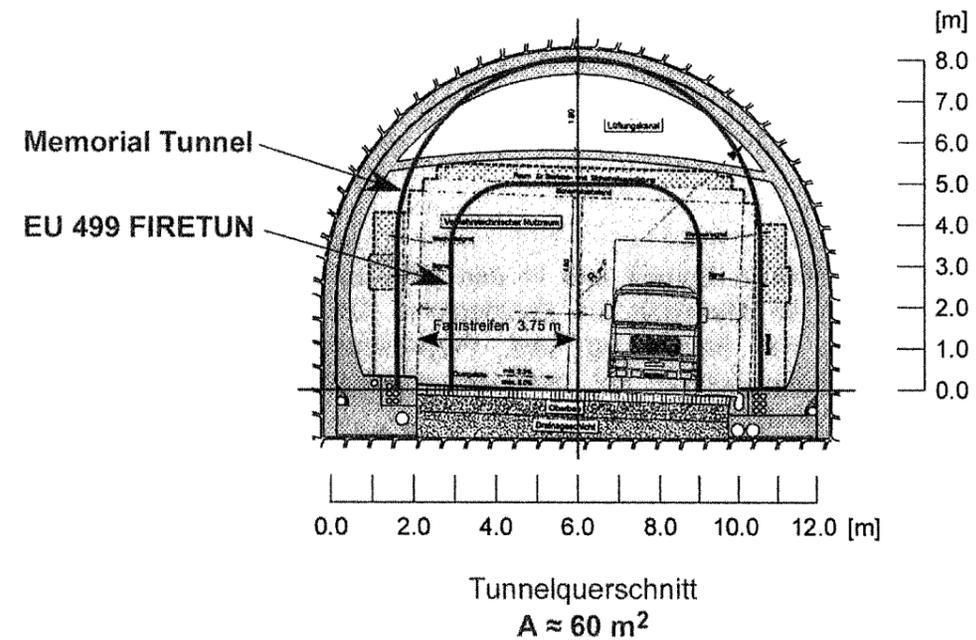


Abb. 5: Vergleich der Querschnitte der Versuchstunnel mit einem Tunnelquerschnitt gemäss Norm SIA 197/2

3.2.2 EUREKA-Projekt 499 Firetun

Forschungspartner aus England, Finnland, Frankreich, Italien, Norwegen Österreich, Schweden und der Schweiz führten zwischen 1990 und 1992 in einem ausser Betrieb genommen Bergwerkstollen in Norwegen insgesamt 20 Brandversuche durch. Dabei wurden die Brände von vier verschiedenen Strassenfahrzeugen, von zahlreichen Schienenfahrzeugen sowie von Holz, Reifen und Kunststoffen simuliert.

Der Querschnitt des Bergwerkstunnels ist mit einer Fläche von rund 30 m² nur etwa halb so gross, wie derjenige eines zweistreifigen Strassentunnels. Die Länge des EUREKA-Versuchstunnels betrug 2,3 km. Seine Steigung war kleiner als 1%.

Die folgenden Abbildungen zeigen die bei den Brandversuchen mit Strassenfahrzeugen gemessenen maximalen Temperaturen. Diese Temperaturmaxima wurden jeweils im Deckenbereich des Tunnels oberhalb des Brandes gemessen. Beim Lastwagenbrand erreichte die Temperatur 1000°C. Beim Brand eines Personenwagens kühlten sich die Rauchgase schnell stark ab, so dass die Temperatur auch über dem Brand nicht auf über 200°C anstieg. Die Maximaltemperaturen nahmen mit zunehmendem Abstand vom Brand stark ab.

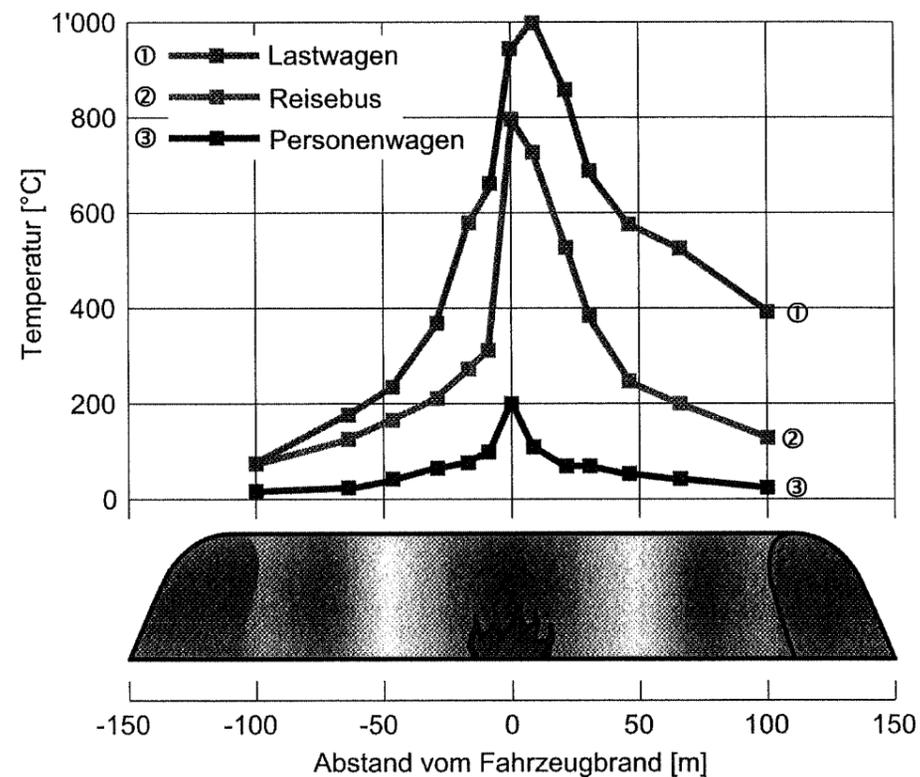


Abb. 6: Maximale Temperaturen im Deckenbereich [EUREKA]

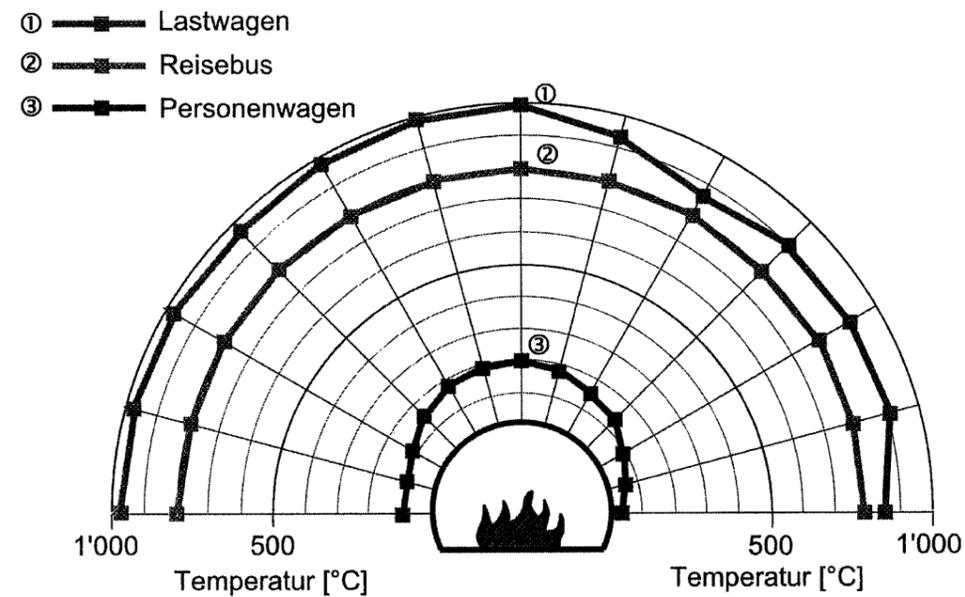


Abb. 7: Temperaturen im Tunnelquerschnitt [EUREKA]

Die folgende Abbildung zeigt den zeitlichen Temperaturverlauf, welcher bei den Brandversuchen gemessen wurde. Bei allen Versuchen erfolgte der Temperaturanstieg sehr schnell, innerhalb von wenigen Minuten. Die Temperaturmaxima wurden während einigen Minuten gemessen. Danach wurde ein exponentieller Temperaturabfall registriert. Beim Bus- und auch beim Lastwagenbrand waren die Temperaturen im Deckenbereich über dem Brand nach einer Stunde auf rund 200°C abgesunken.

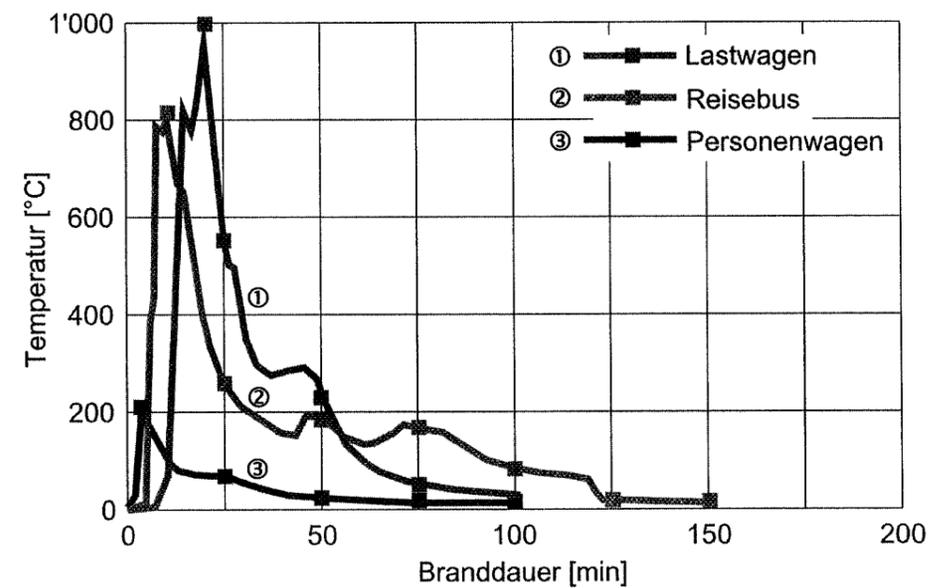


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf der Maximaltemperaturen [EUREKA]



3.2.3 Brandversuche im Memorial Tunnel

In den Jahren 1993 - 1995 wurden im Memorial Tunnel, einem stillgelegten Strassentunnel im US Bundesstaat West Virginia, im Rahmen eines gross angelegten Versuchsprogramms Brandversuche durchgeführt. Der Memorial Tunnel weist eine Länge von 850 m und eine Steigung von 3,2% auf. Ohne Zwischendecke entspricht sein Querschnitt mit einer Fläche von rund 60 m² einem typischen Tunnelquerschnitt gemäss den heutigen Tunnelbaunormen in der Schweiz.

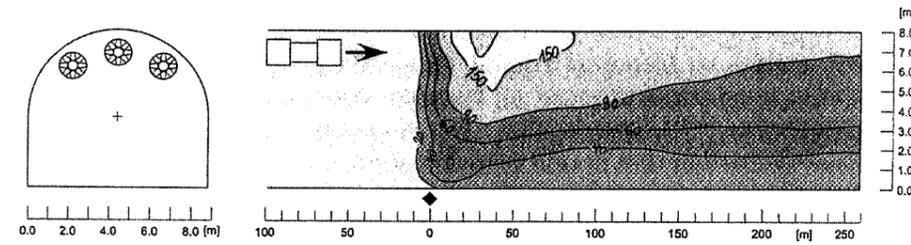
Mit Vergleichsbränden mit 10, 20, 50 und 100 MW Leistung wurden insgesamt 98 Brandversuche durchgeführt. Die hauptsächlichsten Versuchsparameter neben der Brandleistung waren die Tunnelbelüftungssysteme. Versuche wurden unter anderem mit den folgenden Belüftungssystemen [1] durchgeführt:

- Natürliche Belüftung
- Längslüftung mit Strahlventilatoren
- Querlüftung
- Halbquerlüftung
- Halbquerlüftung mit Rauchgasabsaugung

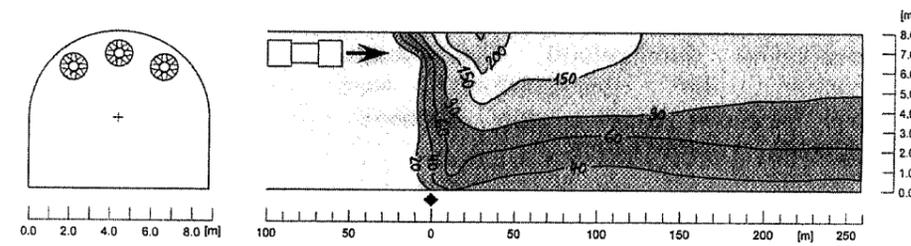
Das primäre Ziel der äusserst umfassenden Versuchesreihe war die Erforschung der Wirkung der unterschiedlichen Tunnelbelüftungsarten bezüglich der Temperatur- und Rauchgasausbreitung. Zu diesem Zweck wurden die Temperaturen, die Luftgeschwindigkeiten, die CO₂- und die CO-Konzentrationen sowie die Sichttrübungen im ganzen Tunnel an zahlreichen Stellen gemessen. Neben der Brandleistung wurden bei den verschiedenen Versuchen vor allem die Luftmengen und die Luftgeschwindigkeiten in Brandnähe sowie die Anlaufverzögerung der Brandlüftung variiert.

In der unten stehenden Abbildung ist der zeitliche Verlauf der Temperatureausbreitung bei einem 20 MW Brand in einem Tunnel mit Längslüftung dargestellt. Beim Versuch wurden die heissen Rauchgase mit Hilfe der Strahlventilatoren entgegen der Kaminwirkung in Richtung des tiefer liegenden Tunnelportals verdrängt. Die Temperaturen im Deckenbereich erreichten in Brandnähe 300°C. Im 250 Meter entfernten Portalbereich betrug die Temperaturen maximal noch 150°C.

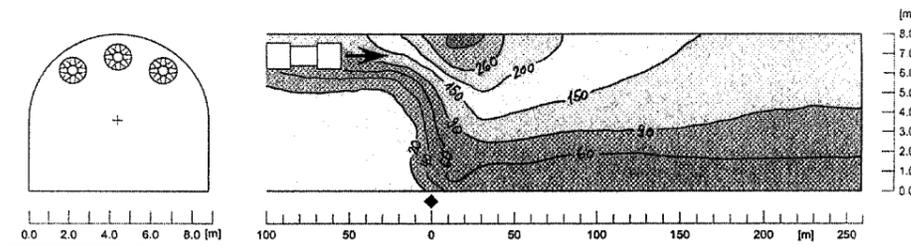
2 Minuten nach Brandbeginn



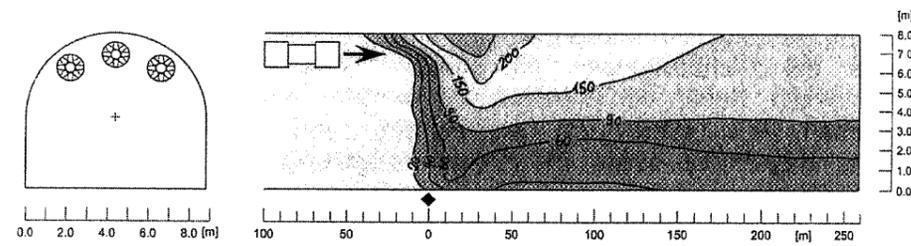
5 Minuten nach Brandbeginn



10 Minuten nach Brandbeginn



20 Minuten nach Brandbeginn



30 Minuten nach Brandbeginn

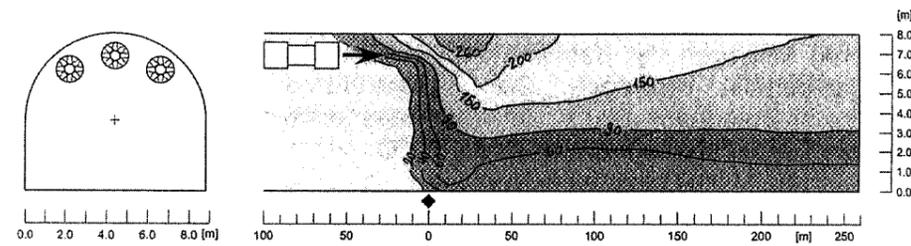
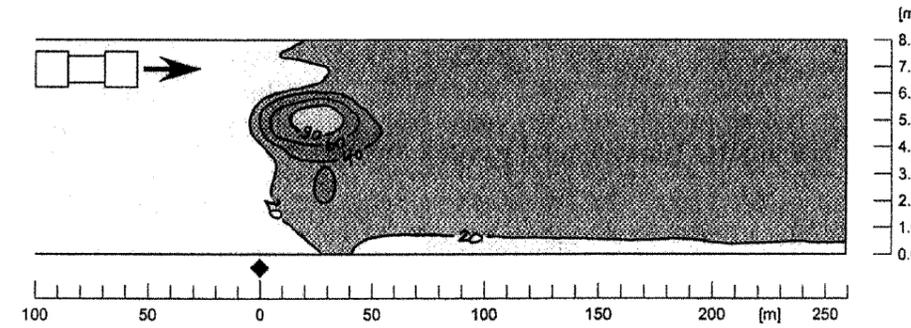


Abb. 9: Bei einem 20 MW Brand und Längslüftung zu verschiedenen Zeiten gemessenen Temperatursbreitung [Memorial Tunnel]

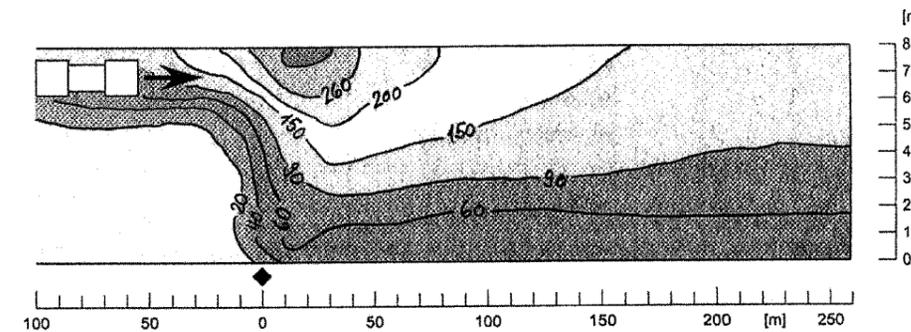
In der folgenden Abbildung ist die Temperatursbreitung bei einem längsbelüfteten Tunnel zehn Minuten nach Brandbeginn bei Vergleichsbränden mit 10 MW, 20 MW und 50 MW dargestellt. Man

erkennt, dass bei einer kleinen Brandleistung von 10 MW (PW Brand) nur eine sehr geringe Erwärmung eintrat und die Brandgase durch die Lüftung stark abgekühlt wurden. Bei einer nominellen Leistung von 50 MW (Lastwagenbrand) wurden im Deckenbereich in Brandnähe maximale Temperaturen von 400 bis 500°C erreicht.

10 MW Brand



20 MW Brand



50 MW Brand

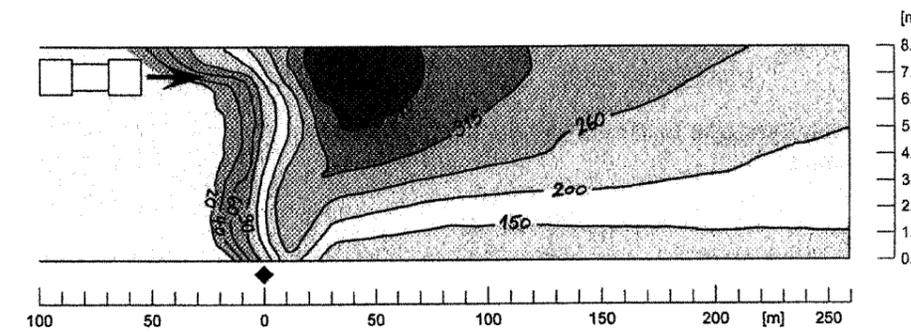


Abb. 10: Bei unterschiedlichen Brandleistungen und Längslüftung zehn Minuten nach Brandbeginn gemessenen Temperaturentwicklung [Memorial Tunnel]

3.2.4 Vergleich der Temperaturverläufe

Die nächste Abbildung zeigt die im Deckenbereich in unmittelbarer Nähe des Brandes bei den im Rahmen des EUREKA Projekt 499 Firetun und



bei den Memorial Tunnel Versuchen, mit Längslüftung gemessenen Temperaturverläufe. Davon ausgehend, dass der Brand des Personenwagens, des Reisebusses und des Lastwagens bei den EUREKA Versuchen etwa den Brandleistungen von 10, 20 bzw. 50 MW der Memorial Versuche entsprechen, zeigt der Vergleich der Temperaturen, dass die im Memorial Tunnel erreichten Maximalwerte nur etwa halb so gross wie diejenigen der EUREKA Versuche sind. Eine Ursache für diese grosse Differenz besteht darin, dass bei realen Fahrzeugbränden kurzzeitig Brandleistungen erreicht werden, welche deutlich über den Nominalleistungen liegen. Primär sind die wesentlich tieferen Temperaturen im Memorial Tunnel jedoch auf den wesentlich grösseren Tunnelquerschnitt und den Betrieb der Tunnellüftung zurückzuführen.

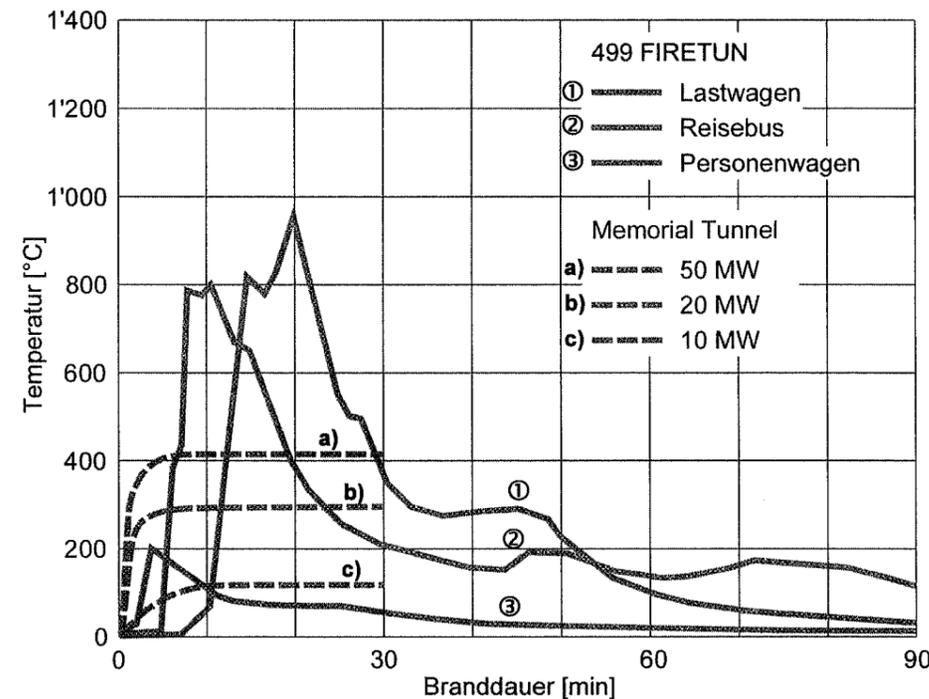


Abb. 11: Temperaturverläufe der Versuche EUREKA 499 Firetun und Memorial Tunnel mit Längslüftung

3.2.5 Erkenntnisse und Schlussfolgerungen

Die umfangreichen Brandversuche im Memorial Tunnel zeigten den grossen Einfluss, welche die Tunnellüftung auf den Brandverlauf bei einem Ereignis in einem Tunnel hat. Dagegen sind die im Rahmen des EUREKA Projekts durchgeführten Brandversuche auf Grund des kleinen Tunnelquerschnitts als weniger aussagekräftig zu beurteilen. Die Memorial Tunnel Versuche zeigten, dass die Temperatur- und Rauchausbreitung durch die Lüftung auch bei grossen Brandleistungen massgeblich beeinflusst werden kann. Mit einer Längslüftung mit Strahlventilatoren konnten die heissen Rauchgase beispielsweise bis zu einer Brandleistung von 100 MW auf eine Seite verdrängt werden. Generell konnte man nachweisen, dass die Temperatur- und Rauchausbreitung mit einer



leistungsfähigen Tunnellüftung erheblich reduziert werden kann. Mit modernen Rauchabsaugungen, wie sie heute gemäss den Richtlinien zur Projektierung von Strassentunneln [2] [3] konzipiert werden, kann der verrauchte Bereich bei einem Brandfall in einem Tunnel auf 100 bis 200 Meter Länge begrenzt werden. Die Lüftung in einem Strassentunnel ist damit das zentrale sicherheitstechnische Element in einem Brandfall. In Tunnels mit neuen Lüftungsanlagen bzw. effektiven Brandlüftungen kann die Temperatur- und Rauchausbreitung im Brandfall massiv reduziert werden, woraus ein sehr grosser Sicherheitsgewinn resultiert.



4 Baulicher Brandschutz

4.1 Allgemeines

Der bauliche Brandschutz beinhaltet grundsätzlich die Aspekte der *Brandeinwirkungen* sowie diejenigen des *Brandwiderstandes* der betroffenen Bauteile bzw. Bauwerke. Kenntnisse der Brandeinwirkungen, d.h. der Brandlasten und des Brandverlaufs, sind die Grundlagen für die Beurteilung und den Einsatz von Brandschutzmassnahmen. Für den Fall von Tunnelbränden sind diese Grundlagen im vorhergehenden Kapitel 3 erläutert. Die Aspekte des Brandwiderstands bzw. die Grundlagen zur brandschutztechnischen Prüfung von Baustoffen, Bauteilen oder Bausystemen werden im folgenden Kapitel beschrieben.

4.2 Normbrandkurven

Die praktische Prüfung des Brandverhaltens von Baustoffen, Bauteilen oder Bausystemen beruht auf genormte Temperatur-Zeit-Verläufe. Das Einhalten solcher Normbrandkurven bei der Prüfung des Brandverhaltens von Bauteilen ermöglicht es, dass die Prüfergebnisse bewertet und mit anderen Prüfungen verglichen werden können. Diverse Organisationen haben für unterschiedliche Anwendungsgebiete verschiedene Normbrandkurven definiert und festgelegt.

Normbrandkurven entsprechen einem realen Brandverlauf nur sehr bedingt. Allenfalls beschreibt der mit einer Normbrandkurve festgelegte Temperatur-Zeit-Verlauf einen sehr ungünstigsten Brandverlauf ("worst case"). Im Abschnitt 4.2.6 werden die normierten Temperatur-Zeit-Verläufe mit den bei den Brandversuchen gemessenen Temperaturen verglichen. Einige der gebräuchlichen Normbrandkurven sind zudem zeitlich nicht begrenzt. Definiert ist bei diesen Kurven nur der Temperaturanstieg. Beim Test des Brandverhaltens wird gemäss solchen Kurven ermittelt, wie lange der Feuerwiderstand des geprüften Bauteils ist.

4.2.1 Übersicht

In der nachfolgenden Abbildung sind die vier gebräuchlichsten Normbrandkurven dargestellt. In den folgenden Abschnitten werden diese Temperatur-Zeit-Verläufe, ihre Zwecke, Anwendungsgebiete und Grenzen beschrieben [9].

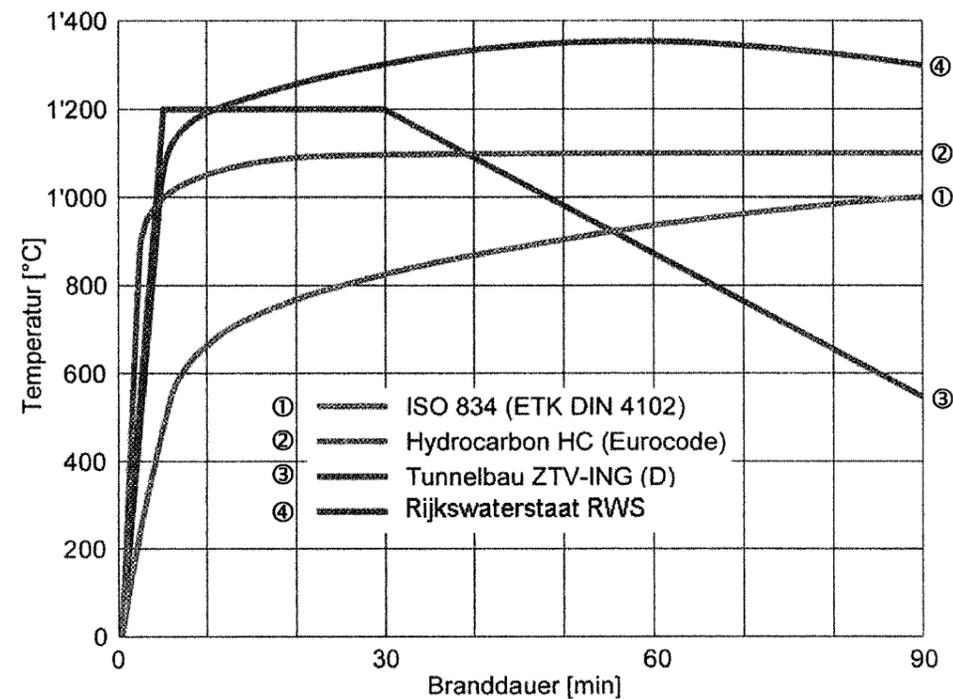


Abb. 12: Normbrandkurven

4.2.2 ISO 834

Die normgemässe Prüfung und Beurteilung des Brandverhaltens von Bauteilen und Bauwerken beruht in den häufigsten Fällen auf der international in der ISO-Norm 834 beschriebenen Normbrandkurve. Der Temperaturverlauf von Bränden in Hochbauten hat zur Festlegung dieser auch als Einheits-Temperaturzeit-Kurve (ETK) bezeichneten Normbrandkurve geführt. Die ETK wird auch der Prüfung von Baustoffen und Bauteilen gemäss der der Norm DIN 4102 [4] zu Grunde gelegt.

Aus Erfahrungen mit wirklichen Fahrzeugbränden sowie auf Grund der Erkenntnisse von Brandversuchen ist bekannt, dass bei Bränden in Tunnels ein im Vergleich zur ISO-Standard-Kurve wesentlich schnellerer Temperaturanstieg stattfinden kann.

4.2.3 Niederländische Normbrandkurve RWS

Diese Kurve wurde von Rijkswaterstaat (RWS), dem Transport und Wasserbau Ministerium von Holland, entwickelt. Der RWS-Kurve liegen die Resultate von Tests zugrunde, welche die TNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research) im Jahre 1979 durchgeführt hat. Dabei wurde als "worst case" Szenario der Brand eines mit Benzin gefüllten Tanklastwagens in einem Tunnel, mit der dabei resultierenden hohen Brandleistung über einen Zeitraum von 120 Minuten, angenommen.



Die RWS-Normbrandkurve zeichnet sich durch einen raschen Temperaturanstieg in den ersten Brandminuten und einem grossen Temperaturmaximum von 1350°C aus, welches nach 60 Minuten Branddauer erreicht wird. Bei solch hohen Temperaturen wird die Schmelztemperatur einiger Isoliermaterialien überschritten. Die RWS-Kurve wird deshalb unter anderem für die Prüfung und Beurteilung der thermischen und mechanischen Eigenschaften von Isoliermaterialien und Schutzsystemen verwendet, welche in Tunneln, in denen der Transport gefährlicher Güter zugelassen ist, eingesetzt werden.

4.2.4 Hydrocarbon Kurve HC

Die Hydrocarbon Kurve wurde im Bereich der Off-Shore Technik vom Mineralölkonzern Mobil mit dem Ziel entwickelt, die Temperaturentwicklung bei einem Kohlenwasserstoffbrand wiederzugeben. Diese Normbrandkurve wird aus diesem Grund auch als Mobil-Kurve bezeichnet. Heute werden auch modifizierte Hydrocarbon Kurven HC_{inc} mit unterschiedlichen Temperaturmaxima verwendet. Eine solche Hydrocarbon Normbrandkurve wird unter anderem auch der Bemessung von Tragwerken gemäss den europäischen Tragwerksnormen (Eurocode 1) zu Grunde gelegt (vgl. auch Ziffer 4.2.7).

4.2.5 Normbrandkurve gemäss ZTV-ING

In Deutschland wird der in den "Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Strassentunneln, ZTV-ING" (früher in der Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln, RABT) [5] [10] festgelegte Temperatur-Zeit-Verlauf für die brandschutztechnische Bemessung von Strassentunneln verwendet. Gemäss dieser Normbrandkurve steigt die Temperatur in der oberen Hälfte des Tunnelraums innerhalb von fünf Minuten auf 1200 °C an und bleibt bis 30 Minuten nach Brandausbruch auf diesem Niveau. Danach sinkt die Temperatur linear während 110 Minuten auf den Ausgangswert zurück. Die Annahme, die diesem Temperaturrückgang zu Grunde liegt, ist ein 30 Minuten nach Brandausbruch beginnender Löscheinsatz der Feuerwehr.

4.2.6 Vergleich der Normbrandkurven mit realen Temperatur-Zeit-Verläufen

Der Vergleich der Normbrandkurven mit den realen bei Brandversuchen in Tunnels gemessenen Temperaturverläufen (siehe Kapitel 3), ist in den folgenden beiden Abbildungen dargestellt. Er führt zu den folgenden Erkenntnissen:

- Der Brand in einem Tunnel hat im Allgemeinen einen schnellen Temperaturanstieg zur Folge. Dieser wird mit der ISO-Normbrandkurve



nicht ausreichend, mit den übrigen Kurven aber genügend genau beschrieben.

- Mit Ausnahmen der ISO-Kurve, sehen die Normbrandkurven maximale Temperaturen vor, die auch kurzzeitig und bei den ungünstigen Verhältnissen der EUREKA Versuche nicht erreicht wurden.
- Die Temperatureinwirkung bei den Fahrzeugbränden der EUREKA Versuche war wesentlich kürzer als diejenigen, die durch die Normbrandkurven beschrieben werden.
- Die bei den Memorial Tunnel Versuchen gemessenen, im Vergleich zu den EUREKA Versuchen, realitätsnäheren Temperaturen sind wesentlich tiefer, als die durch die Normbrandkurven definierten Maximaltemperaturen.

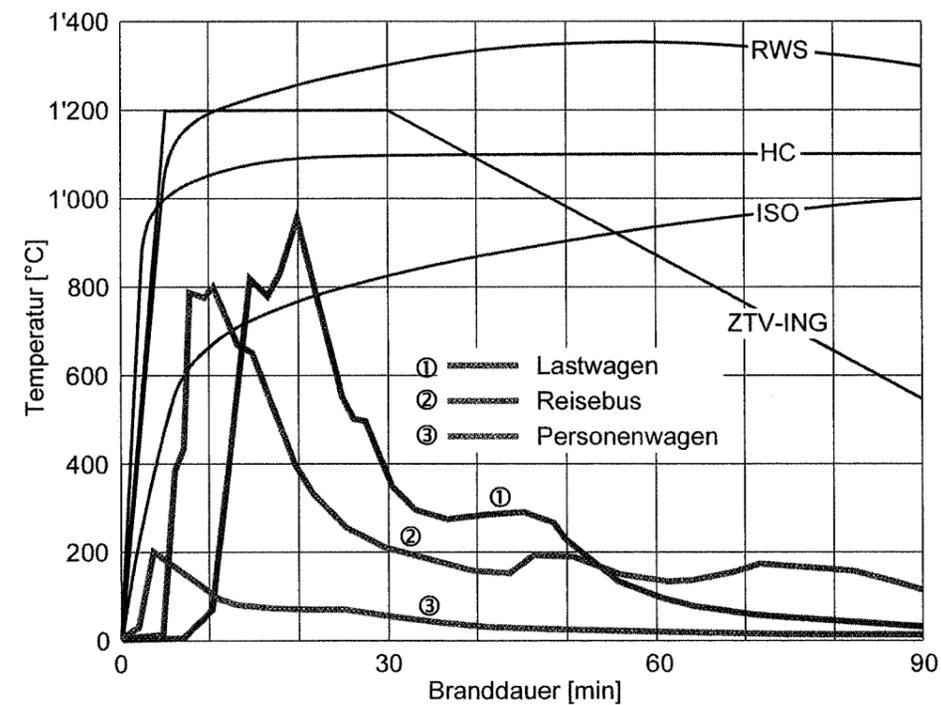


Abb. 13: Vergleich der Normbrandkurven mit den bei den EUREKA Versuchen gemessenen Temperaturverläufen

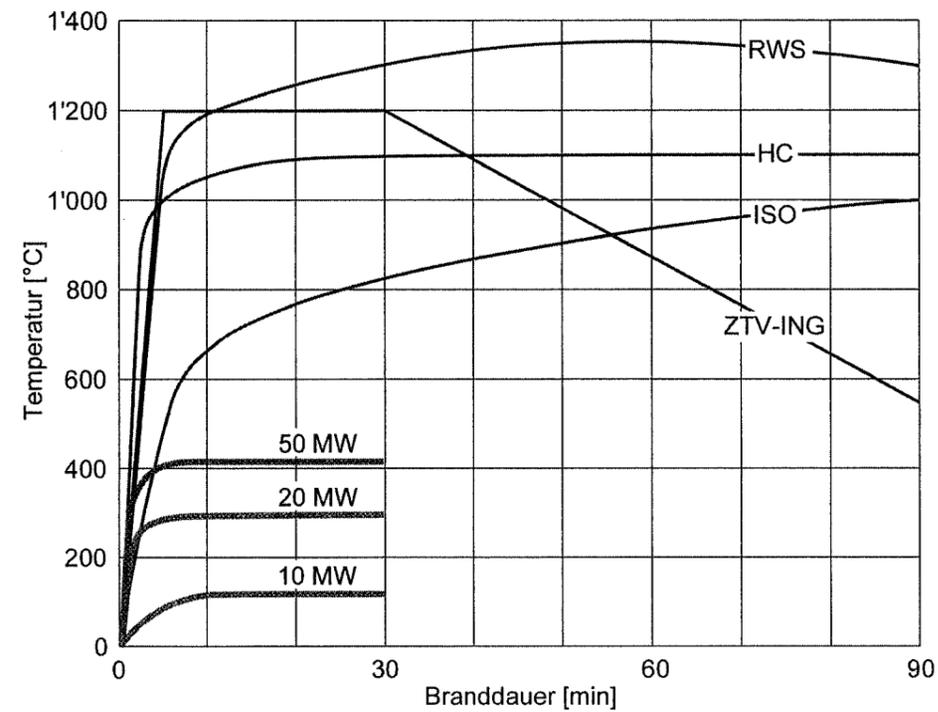


Abb. 14: Vergleich der Normbrandkurven mit den bei den Memorial Tunnel Versuchen gemessenen Temperaturverläufen

Auf Grund der Vergleiche erkennt man, dass die verbreitete ISO-Normbrandkurve in den vielen Fällen ausreicht, um einen Tunnelbrand zu beschreiben. Die Verwendung anderer Normbrandkurven für die brandschutztechnische Prüfung, Beurteilung und Bemessung ist allenfalls bei grossen Gefährdungen sinnvoll. Dies ist auch die Grundlage der im folgenden Abschnitt erläuterten Wahl der Bemessungskurve gemäss der Norm SIA 197/2 [2].

4.2.7 Für die Bemessung von Tunneltragwerken verwendete Normbrandkurven

Abhängig von der Art des Tunneltragwerks sowie von der Gefährdung empfiehlt der SIA in einer Norm [2], der Bemessung von Bauteilen des Tunneltragwerks sowie sekundären Bauteilen (Lüftungskanäle, Zwischendecken), die in der folgenden Tabelle angegebenen Normbrandkurven und Brandeinwirkungszeiten zu Grunde zu legen.

Tunnel Fahrzeug	Tunnel (Tragwerk)				Sekundäre Bauteile
	Einschwimm-tunnel und Tunnel unter oder durch Gebäude	Tunnel in instabilem Gebirge	Tunnel in standfestem Gebirge	Tagbau-tunnel	Lüftungs-kanäle und Zwischen-decke
Personen- und Liefer-wagen	ISO 60 min	ISO 60 min	ISO ²⁾ 60 min	ISO ²⁾ 60 min	ISO 30 min
Last- und Tankwagen	RWS/HC _{inc} ¹⁾ 120 min	RWS/HC _{inc} ¹⁾ 120 min	ISO ³⁾ 120 min	ISO ³⁾ 120 min	ISO 120 min

Bemerkungen zu Tabelle:

- 1) AIPCR (Association mondiale de la route) empfiehlt bei einem hohen Anteil an Tanklastwagen mit brennbaren Flüssigkeiten eine Branddauer von 180 min.
- 2) Der Tragwiderstand ist in der Regel nicht kritisch
- 3) Der Tragwiderstand ist in der Regel nicht kritisch. Bei besonderen Risiken, z.B. bei geringer Überdeckung unter einem Gebäude, ist gegebenenfalls eine grössere Brandlast zu berücksichtigen, die objektspezifisch festzulegen ist.

Abb. 15: Wahl der Bemessungskurve [SIA 197/2]

4.3 Brandwiderstand von Beton und Betonbauteilen

4.3.1 Allgemeines und Übersicht

Aus dem Bereich des baulichen Brandschutzes ist allgemein eine sehr grosse Zahl von Forschungen und praktischen Versuchsergebnissen zum Brandverhalten und Brandwiderstand von Beton verfügbar. Alle diese Forschungsergebnisse zeigen generell, dass der Schutz von Kabeln mit Betonelementen unabhängig von der Betonsorte und den Abmessungen der Bauteile, grundsätzlich über eine lange Branddauer gewährleistet werden kann. Im Folgenden ist das Verhalten von Beton unter Brandbelastung beschrieben. Danach werden exemplarisch einige Ergebnisse von Brandversuchen dargestellt.

4.3.2 Einflüsse von Betonzusätzen

Zur Erhöhung des Brandwiderstandes von Betonbauteilen können dem Beton Fasern sowie andere Zuschläge beigemischt werden. In Bezug auf die Brandresistenz von Beton kann die folgende Typisierung getroffen werden:

- Normalbeton
- Beständiger Beton mit Faserzusatz (Kunststofffasern)
- Hochbeständiger Beton
 - Beton mit Faserzusatz und geblähter Hochofenschlacke als Zuschlagstoff
 - Beton mit Tonerdezement als Bindemittel

Bei den Zuschlägen von Schlacke oder gesinterter Asche handelt es sich um Zuschlagstoffe mit einer geringen Dichte. Durch solche Leichtzuschlagstoffe wird die Wärmeleitfähigkeit des Betons herabgesetzt und damit seine Brandresistenz erhöht.

Der Zusatz von hochfesten korrosions- und alkalibeständigen Kunststofffasern, zur Verminderung von Schwindrissen und zur Steigerung der Zähigkeit, ist im Betonbau seit Jahren üblich. Der Zusatz von Polypropylenfasern (PP-Fasern) führt aber auch zu einer Verminderung von Betonabplatzungen im Brandfall und damit zu einer Erhöhung des Brandwiderstandes von Betonbauteilen. Bei Brandeinwirkung schmelzen die Fasern im Beton bei ca. 160°C und geben dabei ein Kapilarnetz frei, durch das der entstehende Wasserdampf entweichen kann [6]. Abplatzungen an der Betonoberfläche werden dadurch erheblich reduziert (Abbildung 16).

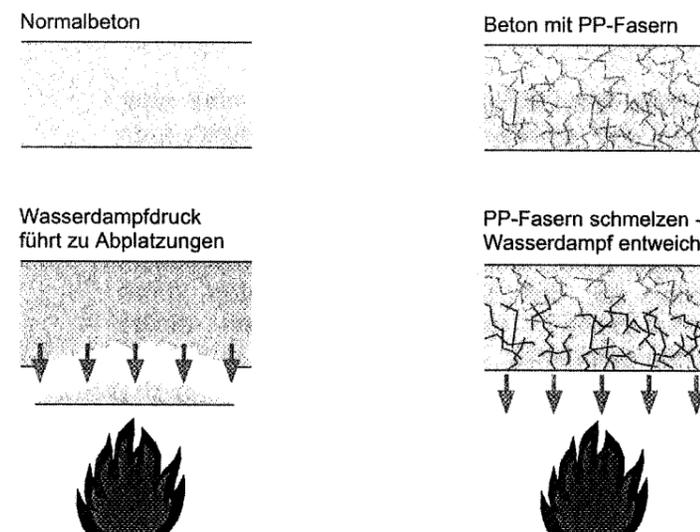
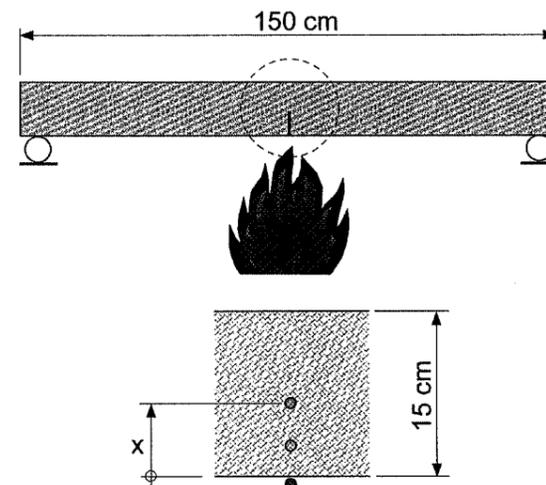


Abb. 16: Abplatzverhalten von Normalbeton und Beton mit Faserzusatz

4.3.3 Brandversuche mit Normalbeton und hochbeständigem Beton

Die nachfolgend beschriebenen Brandversuche mit Normalbeton und mit hochbeständigem Beton wurden in einem Brandprüfstand mit 1,50 x 1,50 m messenden und 15 cm dicken Betonplatten durchgeführt [6]. Die Brandbelastung wurde gemäss der RWS-Normbrandkurve (rote Kurve in nachfolgender Abbildung) gewählt.

- Bei den Versuchen mit *Normalbeton* kam es fünf Minuten nach Versuchsbeginn zu den ersten Betonabplatzungen. Durch diese Abplatzungen bedingt erreichten die Temperaturen in 3 cm Tiefe schon nach einer halben Stunde Werte von 300°C.
- Bei Versuchen mit *hochbeständigem Beton* mit Zuschlägen von geblähter Hochofenschlacke (Lytag) und PP-Fasern traten keine Abplatzungen auf. Die in der Abbildung dargestellten Temperaturmessungen in 3 cm und 7 cm Tiefe zeigen, dass der Temperaturanstieg schon bei geringen Betonüberdeckungen langsam und stark verzögert stattfand. Zudem ist gut erkennbar, dass die Temperatur beim Erreichen von 100°C längere Zeit konstant blieb. In dieser Zeitspanne wurde das im Beton freigewordene Wasser verdampft.



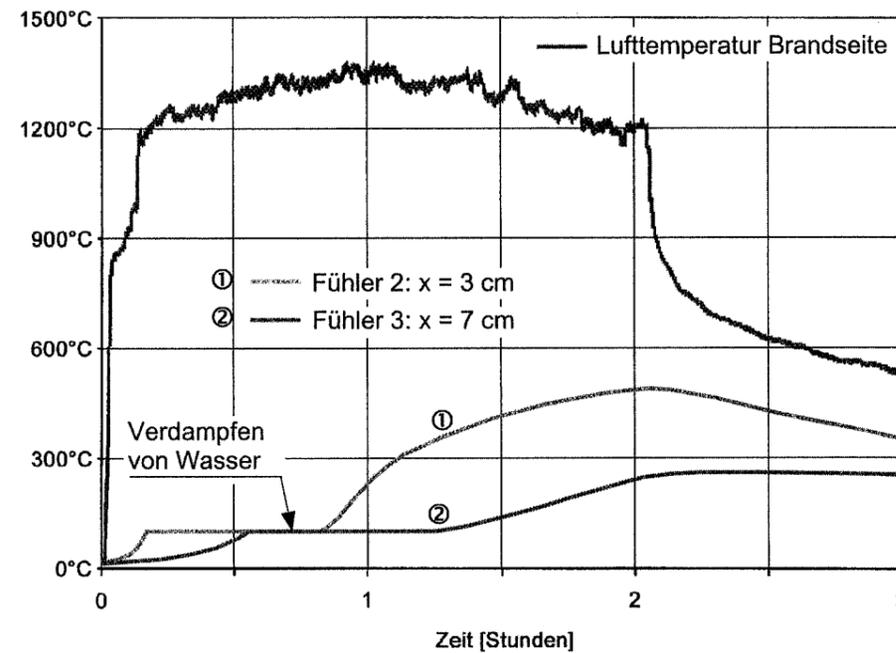


Abb. 17: Brandversuch mit hochbeständigem Beton [Memarco/Fortatech, 2000]

4.3.4 Abplatzungen bei Tunnelelementen aus Beton

In [7] werden an der TU Braunschweig durchgeführte Brandversuche an Tunnelauskleidungssystemen mit unterschiedlicher Bauweise beschrieben. Brandversuche wurden mit den folgenden Tunnelelementen unterschiedlicher Bauweise durchgeführt:

- Stahlbeton, 24 cm dick, beidseitig bewehrt
- Unbewehrter Beton, 24 cm dick
- Unbewehrter Stahlfaserbeton, 24 cm dick
- Stahlbeton-Tübbing, 30 cm dick

Die Betonelemente wurden mit einer Brandbeanspruchung gemäss der ISO-Normbrandkurve belastet. In der folgenden Tabelle sind die Versuchsdauer, die maximale an der Oberseite der Elemente gemessenen Temperatur und die Tiefe der am Rand und in der Mitte gemessenen Abplatzungen zusammengestellt.

Tunnelauskleidungs- element	Versuchsdauer [min]	Maximale Temperatur an der Oberseite [°C]	Abplatztiefe Rand / Mitte [cm]
Beton 24 cm, beidseitig bewehrt	90	60	7,5 / 9,5
Beton 24 cm, unbewehrt	73	25	6,0 / 18
Stahlfaserbeton 24 cm, unbewehrt	90	25	8,0 / 12
Stahlbeton-Tübbing, 30 cm, bewehrt	100	40	5,0 / 5,0

Abb. 18: Resultate von Brandversuchen mit Tunnelauskleidungselementen
[Kordina, 1995]

Der Brandwiderstand von Betonbauteilen wird durch Abplatzungen stark beeinflusst. Allgemein treten dabei grössere Abplatzungen auf, wenn der Beton feucht und wenn keine Bewehrung vorhanden ist. Bei den beschriebenen Versuchen gab es bis zu 20 cm tiefe Abplatzungen. Nach realen Bränden wurden schon bis in 30 cm Tiefe reichende Abplatzungen beobachtet. Generell ergaben die Versuche, dass die Abplatztiefe durch die untere Bewehrung deutlich verringert wird. Günstig wird diesbezüglich auch Stahlfaserbeton beurteilt.

4.3.5 Brandwiderstand von Tübbing

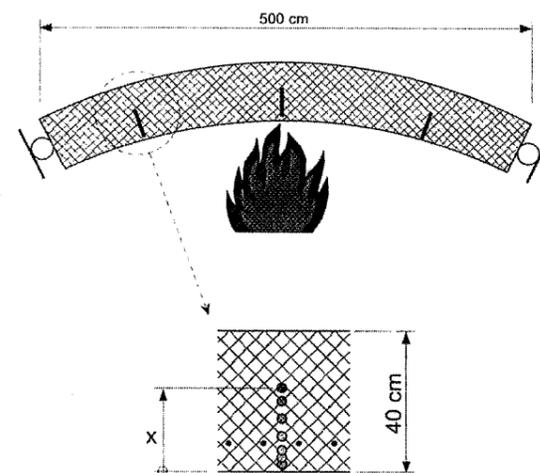
Im Jahre 1998 führte die TU Braunschweig Brandversuche mit 40 cm dicken Beton-Tübbing durch [8]. Die Versuche wurden mit Elementen mit unterschiedlicher Betonzusammensetzung gemacht, wobei insbesondere auch der Einfluss von Faserzuschlägen getestet wurde. Die Brandbelastung entsprach der modifizierten Hydrokarbon-Kurve.

Die Versuche zeigten, dass der Temperaturanstieg im Querschnitt massgeblich von der Grösse der Abplatzungen abhängt. Die Betonabplatzungen reichten teilweise bis auf die 8 cm überdeckte Bewehrung (Abbildung 19). Bei Beton mit Kunststofffasersätzen waren sie erheblich geringer.



Abb. 19: Grossflächige bis auf die Bewehrung reichende Betonabplatzungen an einem Tübbing [Hosser, D. et al., 1998]

In der folgenden Abbildung ist die Versuchsanordnung der Brandversuche mit den Beton-Tübbing und die mit geringen Abplatzungen gemessenen Temperaturverläufe in verschiedenen Tiefen x im Beton dargestellt. In $x = 4$ cm Tiefe erreichte die Temperatur nach eineinhalb Stunden etwa 450°C . An der Bewehrung in $x = 8$ cm Tiefe wurden zwei Stunden nach Versuchsbeginn noch rund 250°C gemessen. In der Mitte der Tübbinge in einer Tiefe von $x = 20$ cm traten noch maximale Temperaturen von knapp 100°C auf.



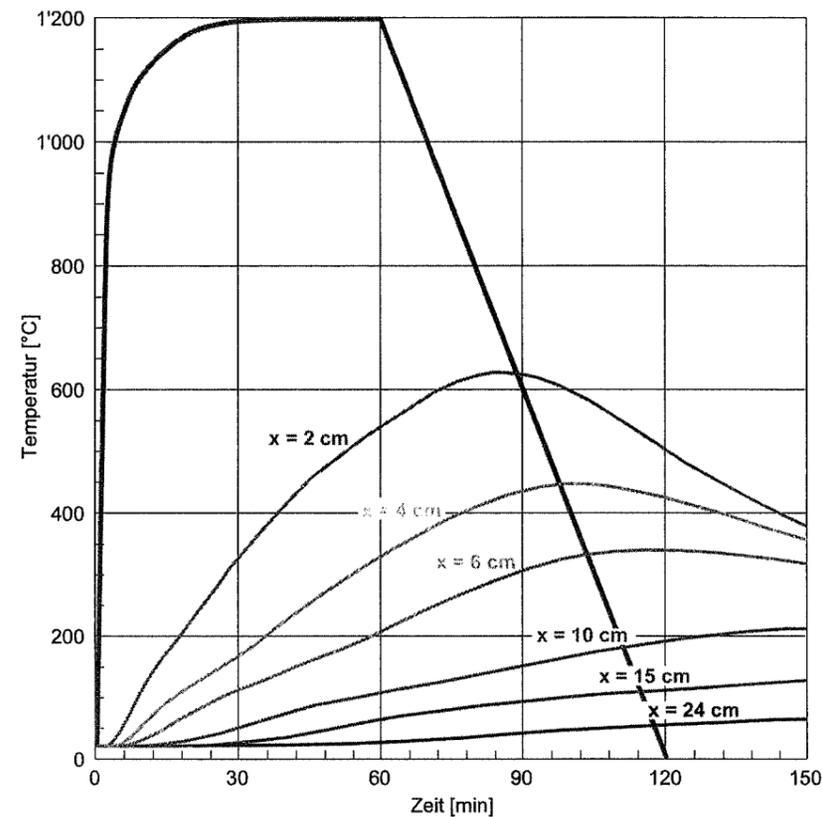


Abb. 20: Temperaturverläufe in Beton-Tübbing in verschiedenen Tiefen bei einer Belastung gemäss der HC_{mod} -Kurve [Hosser, D. et al., 1998]

Bei einem Brandversuch wurden die Tübbinge mit einer 16 mm dicken Brandschutzisolierung verkleidet. Es kam bei diesem Versuch zu keinerlei Abplatzungen und die Temperaturen des Betons waren deutlich tiefer. Sie erreichten an der Betonoberfläche nach einer Stunde Werte in der Grössenordnung von etwa 400 - 500°C.

4.3.6 Schlussfolgerungen

Bauteile aus Beton weisen generell eine hohe Brandwiderstandsfähigkeit auf. Auch bei intensiven und lange andauernden Brandeinwirkungen wie sie durch Normbrandkurven wie (beispielsweise die RWS-Kurve), vorgegeben sind, findet die Temperaturausbreitung in brandbeanspruchten Betonelementen nur stark verzögert und sehr langsam statt.

Herabgesetzt wird der Brandwiderstand von Betonbauteilen allenfalls durch im Brandfall auftretende Abplatzungen an der Betonoberfläche, durch welche die Bewehrung freigelegt wird. Brandbeständige Betone mit Faserzusätzen sind diesbezüglich weniger empfindlich. Das Verhindern von Abplatzungen im Brandfall ist zur Gewährleistung der Tragsicherheit von Betonbauteilen von Bedeutung. In Bezug auf den Schutz von Kabeln durch Betonelemente ist dieser Aspekte jedoch nur von untergeordneter Wichtigkeit.



5 Normengrundlagen Kabel

Bei Kabelanlagen interessieren das Brandverhalten (Reaction to fire, passive Eigenschaften) sowie der Feuerwiderstand (Resistance to fire, aktive Eigenschaften) von Kabeln bei äusseren Brandeinwirkungen.

Nach dem heutigen Stand der Technik sind für die unterschiedlichen Kabeltypen teilweise bereits explizite Normen betreffend deren Brandfestigkeit entwickelt worden. In den nachfolgenden Abschnitten werden diese aufgelistet, kurz beschrieben und miteinander verglichen.

5.1 Relevante Normen für das Brandverhalten von Kabeln (passive Eigenschaften)

Nachfolgend aufgeführte gültige Normenwerke definieren das passive Brandverhalten von Kabeln. Dabei sind Forderungen bezüglich der Entflammbarkeit, der Entwicklung giftiger Brandgase und der Rauchdichte sowie der Brandfortsetzungsgeschwindigkeit formuliert.

Eigenschaft	International	Europa	Schweiz
flammschwer	IEC 60332-1	EN 50265-2-1	TP 20B/3C, 3.4.1
halogenfrei	IEC 60754-1	EN 50267-2-1	TP 20B/3C, 3.4.5
keine korrosiven Gase	IEC 60754-2	EN 50267-2-3	TP 20B/3C, 3.4.4
raucharm	IEC 61034	EN 50268	TP 20B/3C, 3.4.3
geringe Brandfortleitung	IEC 60332-3-24	EN 50266-2-4	TP 20B/3C, 3.4.1.3

Abb. 21: Relevante Normen passives Brandverhalten

Im Anhang A finden sich zu den einzelnen Prüfungen detaillierte Angaben.

5.2 Relevante Normen für den Feuerwiderstand von Kabel (aktive Eigenschaften)

Die in den nachfolgenden Abschnitten aufgeführten gültigen Normenwerke definieren das aktive Brandverhalten von Kabeln. Dabei sind Forderungen bezüglich der Funktionstüchtigkeit von Kabeln oder Kabelsystemen, bei verschiedenen Betriebszuständen und äusseren Brandeinwirkungen, formuliert.

5.2.1 Isolationserhalt

Eigenschaft	International	Schweiz
Isolationserhalt - nur Feuer - Starkstrom (<1kV) - Datenkabel - LWL	IEC 60331 -11 -21 -23 -25	TP 20B/3C, 3.4.2

- Beschrieb:
- definierte Isolierfähigkeit bei freiliegenden Kabeln, ohne Kurzschlussentstehung / Unterbruch
- Prüfbedingung:
- Kabel horizontal auf Bügeln
 - Beflammung während vorgegebener Zeit, mit vordefinierter Temperatur und elektrischer Spannung

Grafische Darstellung:

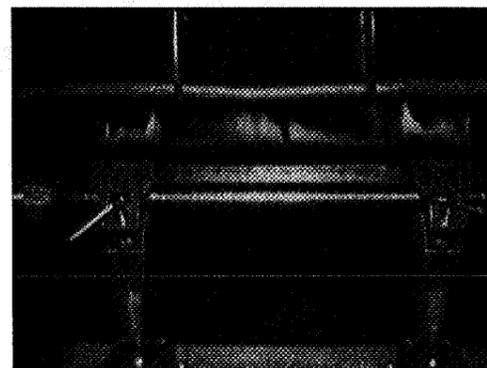


Abb. 22: Kabelbeflammung [Studer]

Sollen Kabel nach Brandausbruch über einen gewissen Zeitraum ihre Isolierfähigkeit beibehalten ohne dass ein Kurzschluss entsteht, muss die Isolation über eine gewisse Feuerwiderstandsfähigkeit verfügen. Damit ein definierter Funktionserhalt einer Kabelanlage gewährleistet werden kann, muss das gesamte Kabelverlegesystem miteinbezogen werden.



5.2.2 Isolationserhalt mit mechanischem Schock

Eigenschaft	International	Europa
Isolationserhalt - nur Feuer - Starkstrom (<1kV)	IEC 60331 -12 -31	-- EN 50200 / EN 50362

Beschrieb:

- definierte Isolierfähigkeit bei freiliegenden Kabeln bei mechanischer Belastung, ohne Kurzschlussentstehung / Unterbruch

Prüfbedingung:

- Kabel U-förmig auf Platten / Rahmen
- Beflammung während vorgegebener Zeit, mit vordefinierter Temperatur und Spannung
- periodischer mech. Schock

Grafische Darstellung:

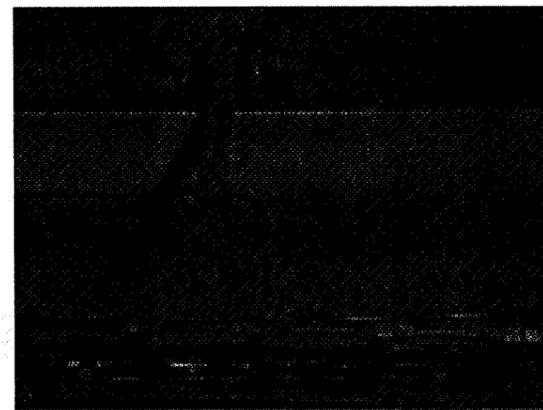


Abb. 23: Mechanischer Schock [Studer]

Zusätzlich zu den dem Nachweis des Isolationserhaltes nach IEC 60031-.. wird bei den Prüfungen nach den oben aufgeführten Normen der Einfluss einer mechanischen Beanspruchung untersucht.



5.3 Relevante Normen für den Funktionserhalt von Kabelanlagen (z.B. E30):

Alle bis dahin beschriebenen Normenwerke befassen sich ausschliesslich mit den Eigenschaften des Kabels (Isolationsmaterialien). Im Zuge der verstärkten Sicherheitsaspekte entstanden diverse, sehr umfangreiche Normenwerke, welche nicht nur Ansprüche an das Brandverhalten von Kabeln sondern von gesamten Kabelsystemen beschreiben. Dabei umfasst ein Kabelsystem nebst dem Kabel auch Tragsysteme, Befestigungen etc.

In Diskussionen werden die Begriffe Isolations- und Funktionserhalt oft in falschen Zusammenhängen verwendet oder es treten Verwechslungen auf.

Um diesen teilweise vorherrschenden Unklarheiten etwas entgegenwirken zu können, wird in den nachfolgenden Kapiteln auf die Thematik des Funktionserhaltes von Kabelanlagen ausführlicher eingegangen. Weiter wird vom ASTRA für bestimmte Systeme im Tunnel bereits eine Installation mit einem Funktionserhalt von E30 gefordert.

Eigenschaft	International	Europa	Schweiz
Funktionserhalt	diverse	DIN 4102-12 diverse	--

Beschrieb: - Funktionserhalt einer Kabelanlage inkl. Befestigungs- und Verlegesystem im Brandfall

Prüfbedingung: - Befeuerung Kabelsystem in abgeschottetem Ofen mit Temperaturverlauf ISO 834
- vordefinierte Zeiträume

Grafische Darstellung:



Abb. 24: DIN-Brandofen [Studer]



5.4 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, DIN 4102

Wie bereits vorgängig erwähnt, beschreibt die Norm DIN 4102, Teil 12 die Prüfung für den Funktionserhalt eines ganzen Kabelsystems [4]. Diese Norm wurde in Deutschland entwickelt. Daneben gibt es im europäischen Raum weitere ähnliche spezifische Tests wie z.B. die NBN 713020 Add 3 (Belgien) oder SIS 024820 (Schweden). Zurzeit liegt keine vergleichbare internationale Norm vor.

5.4.1 Aufbau der Norm DIN 4102

Die DIN-Norm 4102 über das Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen setzt sich aus folgenden Teilen zusammen:

Teil 1	Baustoffe
Teil 2	Bauteile
Teil 3	Brandwände und nichttragende Aussenwände
Teil 4	Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe, Bauteile und Sonderbauteile
Teil 5	Feuerschutzabschlüsse, Abschlüsse in Fahrstachtwänden und gegen Feuer widerstandsfähige Verglasungen
Teil 6	Lüftungsleitungen
Teil 7	Bedachungen
Teil 8	Kleinprüfstand
Teil 9	Kabelabschottungen
Teil 10	--
Teil 11	Rohrummantelungen, Rohrabschottungen, Installationsschächte und -kanäle sowie Abschlüsse ihrer Revisionsöffnungen
Teil 12	Funktionserhalt von elektrischen Kabelanlagen
Teil 13	Brandschutzverglasungen
Teil 14	Bodenbeläge und Bodenbeschichtungen; Bestimmung der Flammenausbreitung bei Beanspruchung mit einem Wärmestrahler
Teil 15	Brandschacht
Teil 16	Durchführung von Brandschachtprüfungen
Teil 17	Schmelzpunkt von Mineralfaser-Dämmstoffen
Teil 18	Feuerschutzabschlüsse; Nachweis der Eigenschaft "selbstschliessend" (Dauerfunktionsprüfung)
Teil 19	Wand- und Deckenbekleidung in Räumen; Versuchsraum für zusätzliche Beurteilungen
Teil 20	--
Teil 21	Beurteilung des Brandverhaltens von feuerwiderstandsfähigen Lüftungsleitungen
Teil 22	Anwendungsnorm zu DIN 4102-4 auf der Bemessungsbasis von Teilsicherheitsbeiwerten

Im Teil 12 dieser umfangreichen Norm werden die Gebäude-Verkabelungssysteme im Bereich der Niederspannungs-Installationskabel ($\leq 1\text{kV}$) und der Signalkabel behandelt. Für andere Bereiche wie z.B. für Energieübertragungskabel-Systeme ($> 1\text{kV}$) und LWL-Kabel existieren bis zum heutigen Zeitpunkt bezüglich dem Funktionserhalt keine vergleichbaren Normen.



5.4.2 Beschreibung der Norm DIN 4102-12

Diese Norm beschreibt Anforderungen und Massnahmen zur Erzielung des Funktionserhaltes von elektrischen Kabelanlagen im Brandfall. Der Anwendungsbereich beschränkt sich ausschliesslich auf Niederspannungs-Installations- ($\leq 1\text{kV}$) und Signalkabel. Nicht anwendbar ist diese Norm für Energieübertragungs-, Telekom- und Datenkabel.

Nebst dem Kabel müssen bei diesen Betrachtungen des Funktionserhaltes zwingend auch die gesamten Tragsysteme (Kabelleiter, Gitterkanal etc.), Verbindungselemente (Dosen etc.) und Befestigungen (Dübel, Bügelschelle etc.) mit einbezogen werden.

Der Funktionserhalt einer Kabelanlage ist gegeben, wenn in einer Kabelanlage bei der definierten Brandprüfung kein Kurzschluss auftritt und keine Unterbrechung des Stromflusses entsteht, sodass das Kabelsystem im Brandfall während einer definierten Zeitdauer seine Stromleit- und Isolierfähigkeit beibehält.

Es wird zwischen folgenden Funktionserhaltsklassen unterschieden:

Funktionserhaltsklassen	Funktionserhalt [min.]
E 30	≥ 30
E 60	≥ 60
E 90	≥ 90

Abb. 25: Funktionserhaltsklassen

Unberücksichtigt bleibt bei der Beurteilung des Funktionserhaltes von Kabelanlagen ein allfälliger Spannungsabfall bzw. eine reduzierte Strombelastbarkeit, welche durch eine temperaturbedingte Widerstandserhöhung des Leitermaterials verursacht wird.

In der Normenschrift der DIN 4102-12 wird unter Punkt 3.2.1 ausdrücklich darauf hingewiesen, dass der definierte Funktionserhalt gemäss DIN 4102-12 in keinem Zusammenhang mit dem Isolationserhalt gemäss IEC 60331 steht.

Es ist somit nicht möglich, ein Kabel mit einem Funktionserhalt beim Lieferanten zu bestellen. Nur ein/e Kabelsystem/-anlage (Kabel inkl. Befestigung und Verlegematerial) kann über diese Eigenschaft verfügen.

5.4.3 Ablauf und Durchführung der Prüfung gem. DIN 4102-12

Um das Kabelsystem den geforderten Temperaturen aussetzen zu können, wird ein geeigneter hitzebeständiger abgeschlossener Raum benötigt. Die



Probestücke der Kabelanlagen werden mit vordefinierten Längen und Abständen praxisgerecht in horizontaler Anordnung montiert.

Während der gesamten Prüfdauer sind über die Kabelanlagen ohmsche Verbraucher (Lampen) mit 400/230 V zu speisen.

Als Modell für den dieser Prüfung zugrunde gelegten Normbrand dient die ISO-Kurve, welche im Abschnitt 3.1 vorgängig beschrieben ist. Nach ca. 5 Minuten erreicht dieser Normbrand bereits eine Temperatur von über 500 °C, nach 30 Minuten sind ca. 820°C erreicht, nach 60 Minuten ca. 925°C und nach 90 Minuten knapp 1000°C. In den ersten 5 Minuten nach Prüfbeginn dürfen die Abweichungen der mittleren Temperatur im Brandraum $\pm 100^\circ\text{C}$ nicht übersteigen. Der Unterschied des Integrals zwischen der gemessenen und der Einheits-Temperaturkurve darf im Zeitraum zwischen der 5. und der 30. Minute $\pm 10\%$, bei längerer Prüfdauer $\pm 5\%$ nicht überschreiten.

Im Gegensatz zum Prüfablauf gemäss den britischen Normen, welche zusätzlich eine Beanspruchung auf Schock- und Wassereinflüsse vorsieht, werden die Kabelanlagen gemäss den Standards der DIN 4102 ausschliesslich auf Hitze und Flammeneinwirkung beansprucht.

Die nachfolgenden Bilder zeigen einen möglichen Prüfaufbau:

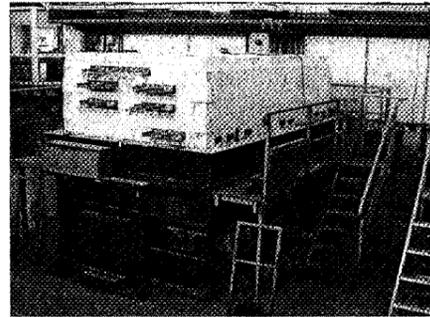


Abb. 26: Aussenansicht Brandofen
[Nexans]



Abb. 27: Kabelanlage vor Brandtest
[Nexans]

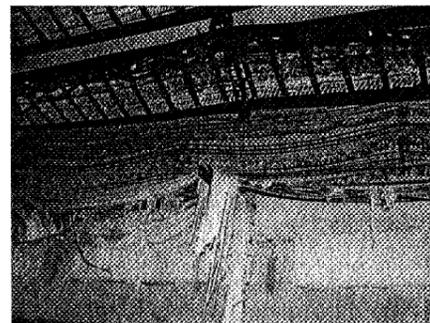


Abb. 28: Kabelanlage nach Brandtest
[Nexans]

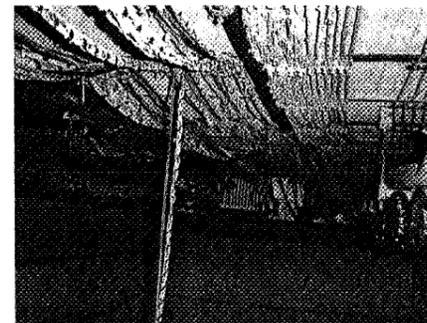


Abb. 29: Kabelanlage nach Brandtest
[Nexans]



5.4.4 Trag- und Montagesysteme

Für den Funktionserhalt einer Kabelanlage ist nebst den in den Abschnitten 5.1 bis 5.3 beschriebenen Anforderungen an das Brandverhalten der Kabel auch das Verhalten der Trag- und Montagesysteme im Brandfall von Relevanz [11]. Es ist zu beachten, dass im Gegensatz zu den üblichen Tragsystemen nach der DIN 4102 geprüfte Tragsysteme eine geringere Traglast aufweisen können.

Dabei werden folgende drei Unterschiede gemacht:

Norm-Trag- und Montagesysteme gemäss DIN 4102-12

Trag- und Montagesystem-Komponenten wurden mit entsprechenden Kabeln gemäss den Vorgaben der DIN 4102 erfolgreich geprüft. Diese in horizontaler Lage geprüften Kombinationen sind auch für vertikale Montagen anwendbar. Die Ergebnisse sind, unter Berücksichtigung einiger Randbedingungen, auf andere Hersteller übertragbar.

Trag- und Montagesysteme in Anlehnung an Norm-Tragsysteme gemäss DIN 4102

Werden bereits auf ihr Brandverhalten erfolgreich geprüfte typische Trag- und Montagesysteme in einzelnen Bereich verändert, können die Testresultate nicht auf andere Hersteller übertragen werden, um den Funktionserhalt des Systems für die horizontale und vertikale Verlegung gewährleisten zu können.

Sonderkonstruktionen von Trag- und Montagesystemen in Anlehnung an Norm-Tragsysteme gemäss DIN 4102

Werden zusätzliche Trag- und Montagesysteme auf ihr Brandverhalten erfolgreich geprüft, können diese Testresultate nicht auf andere Hersteller übertragen werden. Der Funktionserhalt des Systems wird dabei nur für die horizontale Verlegung gewährleistet.

5.4.5 Prüfungszeugnis / Übereinstimmungsnachweis

Die Durchführung und die Ergebnisse der Brandprüfung sind zwingend in einem Prüfzeugnis, gemäss den Vorgaben der DIN 4102-12, nachvollziehbar zu dokumentieren.

Wird eine Kabelanlage mit einem Funktionserhalt erstellt, muss von der ausführenden Unternehmung für jedes Bauvorhaben eine Übereinstimmungserklärung ausgestellt werden. Mit dieser Erklärung erfolgt die Bestätigung, dass die Kabelanlage nur aus Kabeln inkl. Befestigungsmaterial und Tragekonstruktionen mit vorliegenden Prüfungszeugnissen erstellt wurde. Es ist auch zulässig, nebst den im System geprüften Materialien und Konstruktionen einer Kabelanlage auch Materialien anderer Hersteller mit entsprechenden Prüfzeugnissen



einzusetzen. Die Gültigkeit der Prüfung des Funktionserhaltes bleibt dabei erhalten.

5.4.6 Kennzeichnung

Nachdem eine Kabelanlage mit einem Funktionserhalt von einer Unternehmung erstellt wurde, hat diese nachfolgende Kennzeichnung anzubringen:

- Name des Unternehmers, der die Kabelanlage hergestellt hat
- Bezeichnung der Kabelanlage gemäss Prüfzeugnis
- Funktionserhaltsklasse gemäss Prüfzeugnis
- Herstellungsjahr

5.4.7 Kostenfolgen für Installationen nach DIN 4102-12

Die höhere Verfügbarkeit der Kabelanlagen, welche nach oder in Anlehnung an die DIN 4102-12 erstellt werden, bringen auch Mehrkosten in der Materiallieferung wie auch bei der Montage mit sich. Nachfolgende Zusammenstellung gibt für ausgewählte Beispiele eine Übersicht möglicher Mehrkosten. Diese Angaben beruhen auf Daten, welche die Studer Draht- und Kabelwerk AG zur Verfügung gestellt hat. Sie sind als Richtwerte zu betrachten.

Basis-Anforderungen	Erhöhte Anforderungen	Mehrkosten	
		1.5 mm ²	16 mm ²
Kabel:			
FE 0	FE 180 – E 30	60 - 100%	30 - 50%
FE 5	FE 180 – E 30	20 - 40%	10 - 20%
FE 180	E 30	0%	0%
Abzweigdosen			
ohne Brandschutz	E 30	60 - 100%	
Kabeltragsystem			
Material: ohne Brandschutz	E 30	60 - 100%	
Montage: ohne Brandschutz	E 30 (geringerer Stützenabstand)	20 - 30%	

Abb. 30: Mehrkosten für Installationen nach DIN 4102-12



5.4.8 Übersicht der wichtigsten Punkte der DIN 4102-12

- Funktionserhalt für gesamte Kabelanlage inkl. Befestigungs- und Verbindungsmaterial
- Brandprüfung wird mit Kabelanlagen durchgeführt, welche an einen Stromkreis inkl. vordefiniertem Verbraucher angeschlossen sind
- Anwendungsbereich für Kabelanlagen mit einer Nennspannung ≤ 1 kV und Signalkabel (ausgenommen Lichtwellenleiterkabel)
- Brandverhalten wird mit Normbrandkurve ISO 834 ermittelt
- Nachweis mittels Prüfzeugnis
- Verwendung anderer gleichwertig geprüfter Materialien ist zulässig
- Ähnliche Vorschriften für Hochspannungs- und Datenkabel sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht vorhanden
- Mehrkostenfolge mit Faktor 1.2 – 2 im Vergleich zu Installationen FE0 / FE5



5.5 Normenhierarchie / -Vergleich

Um eine Gesamtübersicht der in den Abschnitten 5.1 bis 5.4 beschriebenen Normenwerke für Kabel und -anlagen zu geben, sind diese nachfolgend in tabellarischer Darstellung zusammengefasst:

Eigenschaft	International	Europa	Schweiz
flammwidrig	IEC 60332-1	EN 50265-2-1	TP 20B/3C, 3.4.1
halogenfrei	IEC 60754-1	EN 50267-2-1	TP 20B/3C, 3.4.5
keine korrosiven Gase	IEC 60754-2	EN 50267-2-3	TP 20B/3C, 3.4.4
raucharm	IEC 61034	EN 50268	TP 20B/3C, 3.4.3
geringe Brandfortleitung	IEC 60332-3-24	EN 50266-2-4	TP 20B/3C, 3.4.1.3
Isolationserhalt - nur Feuer - Starkstrom (<1kV) - Datakabel - LWL	IEC 60331 -11 -21 -23 -25	--	TP 20B/3C, 3.4.2
Isolationserhalt (zukünftig) - Feuer + mech. Schock - Starkstrom (<1kV)	IEC 60331 -12 -31	-- EN 50200 / EN 50362	--
Funktionserhalt	--	DIN 4102-12 diverse	--

Abb. 31: Zusammenstellung relevanter Normen bez. Brandverhalten von Kabel

Die Kabel können weiter gemäss den Eigenschaften bezüglich ihres Brandverhaltens in drei Kategorien eingeteilt werden [12]:

Halogenfreie und flammwidrige Kabel (FE 0):

- Personen und Sachschutz
 - geringe Rauchentwicklung
 - keine giftigen und korrosiven Gase
 - selbstverlöschend
- ⇒ Sie bieten einen Schutz gegen die Folgen eines Feuers

Sicherheitskabel (≥ FE 5):

- Personen und Sachschutz, ohne Brandfortleitung
 - schwerbrennbar
 - brandhemmend
- ⇒ Sie bieten einen Schutz gegen die Folgen und die Ausbreitung eines Feuers



Sicherheitskabel mit Funktionserhalt (FE 180 / E 30 ... E90):

- sichert den zeitlich begrenzten Notbetrieb
- brandhemmend
- geprüfte Kabelanlage (Kabel mit Isolationserhalt inkl. geprüftem Befestigungssystem)
 - ⇒ Sie bieten einen Schutz gegen die Folgen und die Ausbreitung eines Feuers sowie gegen einen sofortigen Funktionsausfall

Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Eigenschaften sowie den relevanten Normenwerken:

Eigenschaft	IEC-Norm	Halogenfreie und flammwidrige Kabel (FE 0)	Sicherheitskabel (≥ FE 5)	Sicherheitskabel mit Funktionserhalt (E30 - E90)
flamwidrig	60332-1	X	X	X
halogenfrei	60754-1	X	X	X
keine korrosiven Gase	60754-2	X	X	X
raucharm	61034	X	X	X
geringe Brandfortleitung	60332-3-24	--	X	X
Isolationserhalt	60331-11	--	--	X
Funktionserhalt	-- / DIN 4102/12	--	--	X

Abb. 32: Kabeleigenschaften beim Verhalten im Brandfall

Nachfolgende Zusammenstellung zeigt auf, für welche Kabeltypen nach dem heutigen Stand der Technik welche Anforderungen bezüglich Brandverhalten erfüllt werden können:

Eigenschaft	HS- / MS- / NS-Netzkabel	Installations-/ Signalkabel ≤1kV	Fernmelde-Netzkabel (Cu)	Fernmelde-Netzkabel (LWL)	Strahlungskabel (koaxial)
halogenfrei IEC 60754-1	Standard	Standard (je nach Einsatzgebiet)	Standard	Standard	Auf Wunsch lieferbar
+ flamwidrig IEC 60332-1	Auf Wunsch lieferbar	Standard (je nach Einsatzgebiet)	Auf Wunsch lieferbar	Auf Wunsch lieferbar	Auf Wunsch lieferbar
+ geringe Brandfortleitung IEC 60332-3-24	Auf Wunsch lieferbar	Standard (je nach Einsatzgebiet)	Auf Wunsch lieferbar	Auf Wunsch lieferbar	Standard
+ Isolationserhalt IEC 60331	-- (keine Normengrundlage)	Standard (je nach Einsatzgebiet)	-- (keine Normengrundlage)	Auf Wunsch lieferbar (nicht metallfrei)	-- (funktionsbedingt)
Funktionserhalt (Gesamtsystem) DIN 4102-12	-- (keine Normengrundlage)	Auf Wunsch lieferbar	-- (keine Normengrundlage)	-- (in Anlehnung an DIN möglich)	-- (funktionsbedingt)

Abb. 33: Übersicht Normenrelevanz



5.6 Zweckmässigkeit von Anforderungen des Funktionserhaltes

In den vorliegenden Normen und Vorschriften für Strassentunnel sind bereits heute Forderungen formuliert, welche für ausgewählte Einrichtungen Kabelanlagen mit einem Funktionserhalt verlangen. Als Grundlage wird hauptsächlich die Norm DIN 4102 hinzugezogen.

Der Funktionserhalt gemäss DIN 4102 findet seinen Ursprung in der Gebäudetechnik, die Prüfungen sind dementsprechend konzipiert. Für allfällige Anwendungen in Strassentunneln müssen diese evtl. überprüft und entsprechend den Gegebenheiten/Anforderungen in einem Strassentunnel ausgelegt werden. Die Vorgaben (z.B. zur Prüfanordnung) sind spezifisch für die Verlegung von Kabelanlagen in Gebäuden ausgelegt.

Für mögliche Anwendungen in Strassentunneln besteht die Möglichkeit, Installationen in Anlehnung an die DIN 4102 auszuführen. Dabei ist der grundsätzliche Sicherheitsgedanke beizubehalten, wenn nötig aber von der DIN abzuweichen. Die gültigen Normen, Vorschriften und anerkannten Regeln der Technik für die Erstellung von Kabelanlagen müssen dabei eingehalten werden.



6 Grundlagen Elektromechanik

6.1 Aufbau von Kabeln

Für die Erschliessung der elektromechanischen Komponenten in einem Strassentunnel finden in den unterschiedlichen Einsatzgebieten und Verwendungszwecken angepasste Kabel ihren Einsatz. Dabei kann grob zwischen Energieversorgungs-Netzkaabel im Hoch- und Niederspannungsbereich, Kommunikationskabel mit Kupfer oder Glas als Übertragungsmedium sowie strahlende Koaxialkabel diversifiziert werden. Grafische Darstellungen des Aufbaus von verschiedenen Kabeltypen sind im Anhang B zu finden.

Grundsätzlich besteht ein Kabel aus einem Leitermedium (Kupfer, Aluminium, Glas) sowie Isoliermaterial und bei Bedarf aus einer mechanischen Schutzhülle.

Als Leitermedium in der Energie- und Datenübertragung wird hauptsächlich Kupfer, Aluminium und Glas eingesetzt.

Material	Betriebs-temperatur	Erweichungs-temperatur	Leitfähigkeit	Zugfestigkeit
Kupfer	900 °C	1080 °C	57 m/Ωmm ²	250 MPa
Aluminium	600 °C	660 °C	34 m/Ωmm ²	80 MPa
Glasfasern	150 °C	ca. 1500 °C	--	300 MPa

Abb. 34: Kenndaten Leitermaterial [Quelle Nexans]

Damit der geforderte mechanische Schutz und Kurzschluss-Festigkeit der Leitermedien in den unterschiedlichsten Einsatzgebieten und Umgebungsbedingungen gewährleistet werden kann, sind angepasste Isolationsmaterialien inkl. deren Kombinationen zu verwenden. Nachfolgende Zusammenstellung gibt eine Übersicht über die standardmässig eingesetzten Isoliermedien inkl. relevanter Eigenschaften:

Material	Brennbarkeit	Erweichungs-temperatur	tox. / kor. Brandgase	Ölbeständigkeit
PVC (Polyvinylchlorid)	schlecht	150 °C	ja	mittel
PE (Polyethylen)	gut	115 °C	nein	mittel
PA (Polyamid)	gut	200 °C	ja	sehr gut
Silikon	schlecht	180 °C	nein	gut
HFFR (Halogen Free Flame Retardant)	schlecht	90 °C	nein	schwach

Abb. 35: Kenndaten Isoliermaterial [Quelle Nexans]

Nachfolgende Grafik zeigt das Temperaturverhalten verschiedener Thermoplaste [13].

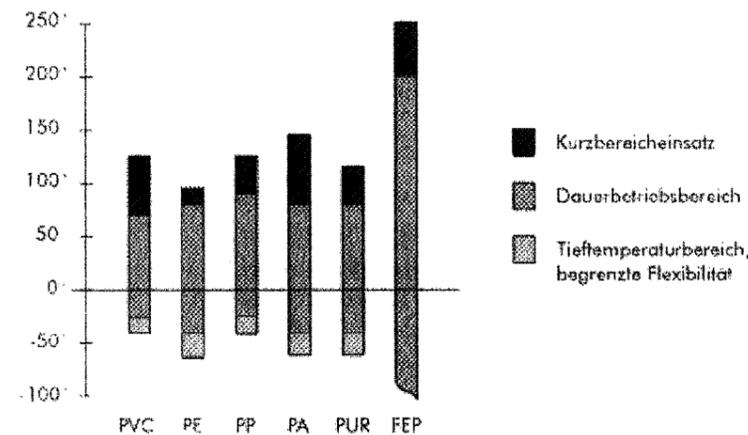


Abb. 36: Temperaturverhalten verschiedener Thermoplaste [Dätwyler]

Thermoplaste werden hauptsächlich für Kabelisolierungen von Datenübertragungsleitungen eingesetzt. Die Thermoplaste können in halogenhaltige und halogenfreie Kunststoffe unterteilt werden. Bei der Verbrennung von halogenhaltigen Kunststoffen (z.B. PVC) entstehen toxische Gase, welche die Atemwege verätzen können, während dem die durch den Kontakt mit dem Löschwasser entstehenden korrosiven Gase und aggressiven Säuren Stahlbeton und Metallteile angreifen. Weiter kann eine starke Rauchentwicklung entstehen. Durch die Verwendung von halogenfreien Kunststoffen kann die Bildung von korrosiven Gasen ganz verhindert und von hochgiftigen Gasen auf ein Minimum reduziert werden. Durch geeignete Mischungen können den Kunststoffen zusätzliche raucharme und flammwidrige Eigenschaften gegeben werden. Gebräuchliche Thermoplaste (halogenhaltige und -freie) sind z.B. PVC Polyvinylchlorid, PE Polyethylen, PUR Polyurethan etc.

Elastomere werden mehrheitlich für Kabelanlagen von Energieübertragungsleitungen eingesetzt. Die vernetzte Elastomere-Isolation ist temperaturunabhängig und kann je nach Zusammensetzung über halogenfreie Eigenschaften verfügen. Gebräuchliche Elastomere-Isolationen sind z.B. XLPE X-Linked PolyEthylen, oder EPR Ethylen-Propylen-Rubber, wobei auf dem Kabelmarkt ein klarer Trend für die Verwendung des Isolierwerkstoffes XLPE zu beobachten ist.

Weiter verfügt eine vernetzte Isolation über bessere thermische Eigenschaften als nicht vernetzte Isolationen, d.h. bei Erwärmung des Kabels über die gewährleistete Betriebstemperatur hinaus erfolgt keine Erweichung und darauf folgende Verformung der Isolation; somit kann auch die Gefahr einer Verklebung mit dem Kabelschutzrohr reduziert werden.

Nebst den vorhergenannten Isoliermedien wurde früher, vor allem bei Energieversorgungskabel, auch eine Papierisolierung (oder Baumwolle- und Zellulosefasern-Isolierung) eingesetzt. Heute werden diese sowohl aus Umweltschutz-Gründen als auch infolge des technischen Fortschrittes bei der Entwicklung neuer Kunststoffe kaum mehr für Neuanlagen eingesetzt. Die Isolation besteht aus in Isolieröl getränkten Papierbändern.



Soll ein Kabel nun einen Isolationserhalt über einen vordefinierten Zeitraum aufweisen, müssen geeignete, bis zum Schmelzpunkt von Kupfer hitzebeständige Materialien eingesetzt werden.

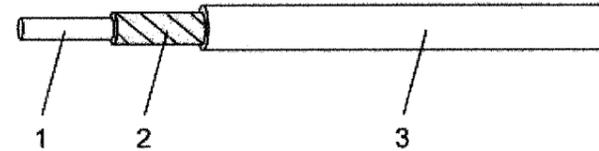


Abb. 37: Detail Isolationaufbau

1. Leitermedium (Kupfer, Aluminium etc.)
2. Feuerfeste, nichtbrennbare Isolation für Nennspannung
(Verhindert beim Schmelzen der Thermoplaste eine Kurzschluss zwischen den Leitern)
3. Thermoplast

6.2 Typische Kabelanlagen in Strassentunneln

6.2.1 Vorgaben / Anforderungen an die elektromechanischen Einrichtungen

In diesem Abschnitt werden die in den SIA-Normen und ASTRA-Richtlinien formulierten Anforderungen an Kabelanlagen der verschiedenen elektromechanischen Anlagen im Tunnel bezüglich ihres Brandschutzes kurz beschrieben und zusammengefasst. Auf jene Anlageteile, für welche zurzeit keine gültigen Anforderungen an das Brandverhalten der Kabelanlage vorliegen, wird nicht näher eingegangen.

6.2.1.1 Beleuchtungsanlage

Für die Beleuchtungsanlage in Strassentunneln sind gemäss "SIA 197/2 Projektierung Tunnel, Strassentunnel" [2] nur halogenfreie Kabel einzusetzen.

6.2.1.2 Lüftung / Ventilation

Gemäss der ASTRA-Richtlinie "Lüftung der Strassentunnel" [1] muss die Funktion von Ventilatoren bei Absaugung, der Strahlventilatoren sowie steuerbare Abluftklappen für eine Temperatur von 250 °C über 120 Minuten gewährleistet sein.

Muss bei Abluftventilatoren die gesamte Luftmenge durch eine einzige Öffnung aus dem Fahrraum befördert werden und ist der Abstand zwischen einem möglichen Brandort und der Ventilatoren kleiner 50m, sind die



Installationen inkl. Kabelanlage für eine Temperatur von 400 °C während 120 Minuten auszulegen.

Es ist sicherzustellen, dass die Funktion der Kabelanlagen inkl. deren Installationen bei diesen Umgebungsbedingungen und Einwirkungen nicht beeinträchtigt wird.

6.2.1.3 Sicherheits-Anlagen

Für die Stromversorgung der Signale sollen gemäss ASTRA-Richtlinie "Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in den Tunneln" [14] Kabelsysteme mit einem Funktionserhalt von mindestens E30 eingesetzt werden. Die Speisung hat über eine Notstromversorgung zu erfolgen, welche bei einem Netzausfall die Versorgung der Signale mit elektrischer Energie während einer vordefinierten Zeitdauer sicherstellen soll.

6.2.2 Hochspannungs-Energieversorgungskabel

In Strassentunneln wird dieser Kabeltyp für die eigene Energieversorgung und Grobverteilung wie auch als Transitleitungen von externen Energieversorgungsunternehmen verwendet. Diese Kabel sind entweder in einbetonierten Rohrblöcken im UKK, in Oberflächen-Kabelkanälen (OKK) oder offen auf geeigneten Kabelträgersystemen im Leitungstunnel verlegt. Die Verlegeart im OKK von Nationalstrassen-Tunnel wird vom ASTRA nicht empfohlen [19].

Grundsätzlich bestehen diese Kabel aus den Elementen Leiter, Isolierung und mechanische Schutzhüllen. Als Werkstoff für den Leiter wird Elektrolytkupfer oder Aluminium verwendet. Für die Isolierung werden organische- (z.B. Papier-), Thermoplaste- sowie Elastomere-Isolierungen verwendet.

Nach dem Stand der Technik werden heutzutage hauptsächlich halogenfreie Isoliermedien eingesetzt.

6.2.3 Niederspannungs-Energieversorgungskabel

Die Speisung der elektromechanischen Einrichtung im Tunnel wie z.B. die Lüftungsanlage, Beleuchtung etc. erfolgt über Niederspannungs-Energieversorgungskabel. Die Verlegung dieser Kabel erfolgt über das Längsverteilsystem in den Banketten und durch Aufstiege in den Tunnelwänden sowie offen geführte Kabeltrassen.

Nach dem Stand der Technik werden heutzutage hauptsächlich halogenfreie und flammwidrige Isoliermedien für die Kabelisolation eingesetzt, welche über einen definierten Isolationserhalt (z.B. FE180) oder sogar über einen integrierten Funktionserhalt (z.B. E30) verfügen.



6.2.4 Daten- / Kommunikationskabel

Diese Kabel werden in Strassentunneln für die Übertragung von Signalen (z.B. Kamera, Kommunikationnetzwerke, etc.) eingesetzt [16]. Dabei kommen sowohl Kabel mit Kupfer als Leitermedium als auch Lichtwellenleiter (Multi-/Singlemode) zum Einsatz.

In früheren Jahren wurde für diesen Kabeltyp ausschliesslich Kupfer als Leitermedium verwendet. Die Entwicklung der Technik und die gestiegenen Anforderungen an die Datenübertragung führten dazu, dass nebst dem Kupfer auch Glasfasern als Übertragungsmedium eingesetzt werden. Der Einsatzbereich erstreckt sich von der Telefonie über die Signalübermittlung bis zur Datenkommunikation.

Diese Kabelleitungen werden sowohl in den einbetonierten Rohranlagen im Bankett als auch auf Kabeltrassen und Aufstiegen verlegt. Üblicherweise werden keine speziellen Anforderungen bezüglich brandfesten Isoliermaterialien gestellt. Für spezifische Fälle mit Sicherheitsrelevanz werden diese Kabeltypen für eine erhöhte Brandfestigkeit mit einem halogenfreien und flammwidrigen Isoliermantel versehen.

6.2.5 Koaxiale Strahlungskabel

Sowohl für die Übertragung und Verbreitung von Rundfunk- wie auch Funksignalen werden Koaxialkabel verwendet [15]. Dabei wird zwischen so genannten Verbindungs- und Strahlungskabel unterschieden.

Bei den Verbindungskabeln, welche die Verbindung zwischen den Strahlungskabel-Abschnitten und den Funkstationen herstellt, schirmt der mit der Masse verbundene Aussenleiter die Hochfrequenzsignale komplett ab. Die Verbindungskabel werden meist in Kabelschutzrohren im Bankett oder im Leitungstunnel und in Aufstiegen verlegt.

Bei den Strahlungskabeln ist dieser Aussenleiter mit geeigneten Öffnungen versehen, sodass die Hochfrequenzsignale definiert in den Fahrraum ausgestrahlt werden können. Diese Kabel können sowohl unter der Decke, an der Tunnelwand, im Bankett oder im Zuluftkanal montiert werden.

Die Kabel werden mittels Clips direkt an der Tunnelwand oder -Decke befestigt werden. Weiter können die Strahlungskabel auch auf Fiberglas-Kabelkanäle verlegt werden. Metallische geschlossene Kanäle dürfen nicht eingesetzt werden, da sie die Abstrahlcharakteristik stark beeinträchtigen. Bei der Verlegung des Strahlungskabels im Bankett oder im Zuluftkanal muss mit einer Reduktion der Versorgungslängen im Fahrraum gerechnet werden.

Nach dem Stand der Technik werden heutzutage hauptsächlich halogenfreie Isoliermedien mit geringer Brandfortleitung verwendet.

6.3 Kabelschutz

6.3.1 Kabelschutzrohr

Üblicherweise werden für den Schutz der Kabel Kunststoffrohre aus Polyethylen (PELD (Polyethylen Low Density), PEHD (Polyethylen High Density) oder DIL-Kabelschutzrohre aus verstärktem strukturiertem Polyethylen mit Innendurchmesser zwischen 60 und 150 mm eingesetzt. Die Rohre mit den kleineren Querschnitten werden hauptsächlich für die Wandaufstiege wie auch für die Deckenquerung verwendet. Für den Kabelschutz im Bankett kommen üblicherweise Rohre mit den grösseren Querschnitten zum Einsatz.

Während die Kabelschutzrohre für einen störungsfreien Kabelzug vom Typ PELD zwingend mit einer Betonumhüllung versehen werden müssen, können die Kabelschutzrohre Typ PEHD und DIL direkt in Sand oder anderem feinen Kiesmaterial verlegt werden.

Kabelschutzrohre aus PVC (Polyvinylchlorid) werden üblicherweise im Tunnelbau infolge toxischer Gasentwicklung bei Brandeinwirkung nicht verwendet.

Die Hitzebeständigkeit von Kabelschutzrohren Typ PELD und PEHD beträgt ca. 90 °C.

Auf dem Markt sind auch Kabelschutzrohre erhältlich, welche keine Halogene wie Chlor- und Bromverbindungen beinhalten. Sie sind flammwidrig und es entstehen keine korrosiven Gase und die toxischen Gase können auf ein Minimum reduziert werden [17].

Nachfolgende Grafik zeigt das Temperaturverhalten von Standard-Kunststoff bis zu den hoch entwickelten Spezialkunststoffen.

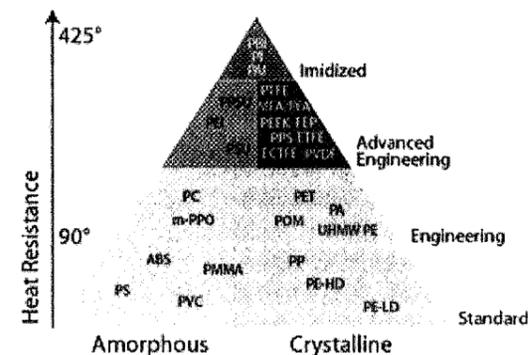


Abb. 38: Temperaturverhalten verschiedener Kunststoffe [Simalit AG]



6.3.2 Auflagersystem

Kabelanlagen in Leitungskanälen oder in abgedeckten Aufstiegen können mittels magnetischen oder nichtmagnetischen Kabelschellen (je nach Kabeltyp) direkt an die Wand auf geeignete Halfenschiene montiert werden. Weiter werden auf den Boden, an die Wand oder an die Decke befestigte Kabelpritschen, geschlossene Kanäle oder Konsolen als Auflagersystem für die Kabelanlagen verwendet.

Bei Kabelpritschen wird darauf geachtet, dass die Auflagefläche nicht durchgehend ist und die Kabel untereinander einen vertikalen und horizontalen Abstand aufweisen und möglichst ordnungsgemäß verlegt sind. Damit kann eine ungehinderte Wärmeabfuhr gewährleistet werden.

Diese Kabelpritschen sind in der Regel nur bedingt feuerfest. Auf dem Markt sind heute Schutzverkleidungen vorhanden, mit welchen die Brandfestigkeit dieses Verlegesystems massiv erhöht werden kann.

6.3.3 Kanal aus Betonelementen

In den Banketten sind Kabelkanäle aus Betonfertigelementen eingelassen. In diesen Kanälen werden beim Nichtvorhandensein von Leitungskanal und Rohrblock alle benötigten Kabel durch den Tunnel verlegt. Seitens ASTRA wird der Einsatz von Kabelkanälen in Tunneln des Nationalstrassennetzes nicht empfohlen.

6.4 Typische Kabelverlegearten

Die Erschliessung der elektromechanischen Ausrüstung in einem Tunnel erfolgt ab Haupt- und Unterstationen, welche sich sowohl im Portalbereich wie auch innerhalb des Tunnels befinden können. Die dafür benötigten Kabel werden in Kanäle, Kabelschutzrohren und Trassen so verlegt, dass keine mechanische Beanspruchung die Funktionsfähigkeit und Betriebssicherheit beeinträchtigt.

Der Einsatz der jeweiligen Verlegeart wird u.a. durch die statischen und konstruktiven Randbedingungen des Gewölbes bestimmt; sie sind diesen baulichen Bedingungen untergeordnet.

In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die heute eingesetzten typischen Kabelverlegearten näher eingegangen.



6.4.1 Verlegung der Kabel im OKK (Oberflächen-Kabelkanal)

Nebst den im Beton eingelassenen Rohrblöcken finden sich vor allem in Tunnelbauten älteren Datums auch in die Bankette eingelassene gedeckte Beton-Kabelkanäle. Der Verwendungszweck entspricht demjenigen des UKK. Das ASTRA empfiehlt auf den Einsatz dieser Kabelkanäle in Tunnelanlagen des Nationalstrassennetzes zu verzichten.

6.4.2 Verlegung der Kabel im UKK (Unterflur-Kabelkanal / Rohrblock)

Ein UKK wird üblicherweise in die zwischen der Fahrbahn und der Tunnelwand leicht erhöht liegenden Bankette integriert. Als Kabelschutz werden Polyethylen-Rohre verwendet, welche unter dem Gehweg einbetoniert sind. Diese Kabelschutzrohre werden selten einzeln verlegt, sondern sind meist in einem Rohrblock zusammengeführt. Dieser kann vor Ort erstellt, oder als Fertigelement eingebracht werden. Unterbrochen werden diese Rohrblöcke einzig durch Einzugs-, Muffen- oder Anschlussschächte, welche zugleich auch die Anbindung an das übrige Kabel-Verteilssystem darstellen.

In diesen Rohrblöcken werden sowohl Kabel für die Energieversorgung, Kommunikations- und Sicherheitseinrichtungen als auch Transitleitungen nach den verschiedenen Systemen geordnet in separate Rohre eingezogen.

6.4.3 Querung der Kabel unter der Fahrbahn

Kabelquerungen in einem Strassentunnel werden üblicherweise in einem rechten Winkel zum Bankett unter der Fahrbahn vorgenommen. Sowohl am Anfangs- wie auch am Endpunkt wird dazu ein Kabelschacht benötigt, welche zugleich die Anbindung zum restlichen Kabel-Verteilssystem darstellen. Diese Querungen werden hauptsächlich in der Nähe von Haupt-/Unterstationen benötigt, können aber auch bei Bedarf im restlichen Bereich eines Tunnels vorkommen.

In einem Tunnel mit einem Leitungskanal erfolgt die Unterquerung der Fahrbahn über diesen. Zusätzliche Rohre werden meistens nicht benötigt.

In diesen Unterquerungen werden Kabel für die Energieversorgung, Kommunikations- und Sicherheitseinrichtungen nach den verschiedenen Systemen geordnet in separate Rohre eingezogen.

Die Kabelschutzrohre werden unter der Fahrbahn sowohl einbetoniert wie auch im Sand oder feinem Kies eingelegt. Je nach der gewählten Verlegungsart wird der dafür benötigte Kabelschutzrohr-Typ eingesetzt.



6.4.4 Verlegung der Kabel im Leitungskanal

Ein Leitungskanal kann sowohl unter der Fahrbahn, wie auch neben der Fahrbahn als separater Stollen parallel zum Strassentunnel geführt werden. Dieser Leitungskanal ist gemäss der SIA-Norm 197/2 so auszubauen, dass er begehbar ist und bei einem Ereignis im Bedarfsfall als Fluchtstollen genutzt werden kann. Die Kabel werden auf ein an die Wand montiertes geeignetes Auflagesystem, z.B. Kabelpritschen, Konsolen etc. verlegt. Die Anbindung an das restliche Kabel-Verteilssystem erfolgt über Kabelschutzrohre. Alle Endgeräte wie Signale, Überwachungs- und Messapparaturen etc. werden direkt über Rohraufstiege aus dem Leitungskanal erschlossen.

Auf die Auflagesysteme im Leitungskanal werden sowohl Kabel für die Energieversorgung, Kommunikations- und Sicherheitseinrichtungen als auch Transitleitungen nach den verschiedenen Systemen geordnet verlegt.

6.4.5 Kabel-Aufstieg in Wand (einbetoniert oder mit Abdeckung)

Damit die elektromechanischen Endgeräte im Tunnel wie Signal-, Überwachungs- und Beleuchtungsanlagen elektrisch erschlossen werden können, sind vom Leitungskanal oder UKK bei den meisten Standorten Rohraufstiege in der Verkleidung vorgesehen. Die Anzahl der eingelegten Kabelschutzrohre sind den jeweiligen Bedürfnissen an den verschiedenen Standorten angepasst.

Eingesetzt werden üblicherweise Kabelschutzrohre mit einem Innendurchmesser von 60 oder 80 mm. Die Betonüberdeckung zum Fahrraum beträgt dabei ca. 100 - 150 mm.

Damit die elektromechanischen Endgeräte an der Tunnelwand oder unter der Tunneldecke elektrisch erschlossen werden können, sind geeignete Aussparungen mit Anschluss an die Rohranlage vorgesehen.

Nebst den eingelegten Kabelschutzrohren können Kabel-Aufstiege auch in offenen Schlitzern erstellt werden. Die Kabel werden direkt mittels geeigneten Befestigungsmaterialien an die Wand montiert. Um den mechanischen Schutz zu gewährleisten, wird der gesamte Schlitz mit einer Abdeckung versehen.

6.4.6 Kabelquerung in Decke / Zwischendecke

Nebst der Querung von Kabeln unter der Fahrbahn gibt es auch Querungen in der Decke. Durch diese Kabelschutzrohre erfolgt die Erschliessung der sich im Deckenbereich befindlichen elektrischen Komponenten. Dafür werden meist Kabelschutzrohre (Innendurchmesser von 60 - 80 mm) verwendet. Die Anbindung an das restliche Kabel-



Verlegesystem erfolgt beidseitig in der Verkleidung der Tunnelwand über die Rohraufstiege. In der Tunneldecke sind die Rohre gegenüber dem Fahrraum mit 100 - 150 mm dickem Beton überdeckt, in der Zwischendecke (Dicke ca. 250 – 300 mm) kommen auch geringere Überdeckungen vor.

6.4.7 Kabelkanal im Lüftungskanal

Im Fall einer mechanischen Lüftung mit separatem Kanal für die Zuluft und/oder Abluft stehen diese für die Kabelführung zur Verfügung.

Auf geeigneten Auflagesystemen sollten Kabel z.B. für die Versorgung der Beleuchtung sowie von steuerbaren Abluftklappen wie auch das Strahlungskabel für Funkssysteme ausschliesslich im Zuluftkanal verlegt werden. Durch den Abluftkanal können in einem Ereignisfall Rauchgase mit sehr hohen Temperaturen strömen, welche die evtl. darin verlegten Kabelanlagen in ihrer Funktion beeinträchtigen.

6.4.8 Kabelkanal unter Tunneldecke / an Tunnelwand (im Fahrraum)

Für die Erschliessung der Beleuchtungsanlage werden geeignete Auflagesysteme unter die Tunneldecke oder an die Tunnelwand montiert. Die Erschliessung erfolgt pro Versorgungsabschnitt über Rohraufstiege und Aussparungen.

Je nach Tunnelkonstruktion kann auch das Strahlungskabel für die Funkssysteme auf diesem Auflagersystem verlegt werden. Es ist auch möglich, das Strahlungskabel direkt mit speziellen Clips an die Tunnelwand zu montieren.

Das Brandmeldekabel im Scheitel wird ähnlich dem Strahlungskabel direkt mit geeignetem Befestigungsmaterial auf den Beton montiert.

6.4.9 Offenen Verlegung für Anschluss elektromechanischer Komponenten

Der Anschluss der elektromechanischen Komponenten im Tunnel wie z.B. Kameras, Signale etc. erfolgt ab den Aussparungen in der Decke oder Tunnelwänden. Wenn sich das Endgerät in unmittelbarer Umgebung befindet, wird das Kabel ab der Aussparung frei verlegt. Muss das Kabel von der Aussparung bis zum Endgerät über eine längere Strecke geführt werden, wird es zum Schutz vor mechanischen Einwirkungen in ein Kabelschutzrohr eingezogen und an der Wand befestigt.



6.4.10 Verlegung in Nut im Bankett

Auf beiden Seiten des Tunnels werden am Rande des Bankettes optische Leiteinrichtungen installiert. Die Erschliessung derselben erfolgt über Kabel, welche entweder in ein im Bankett eingelegtes Kabelschutzrohr oder in einem nachträglich in das Bankett eingefrästen Schlitz verlegt sind. Dieser Schlitz wird nachträglich z.B. mit Bitumen wieder ausgegossen.

6.4.11 Kabel-Übergänge

Die Übergänge zwischen den einzelnen Kabelverlegearten können verschieden ausgebildet sein. Zwischen den Verteilschränken in den Zentralen und der Rohranlage im Tunnel werden die Kabel über Durchführungen verlegt. Diese Durchführungen verfügen teilweise über eine Brandschottung, welche das Übergreifen eines Feuers durch die Kabel in den nebenan liegenden Raum effektiv verhindern soll. Für die Übergänge zwischen einer im Bankett eingelegten Rohranlage und den Aufstiegen werden üblicherweise Kabelschächte in den Banketten vorgesehen. Die Feinerschliessung an der Tunnelwand oder -decke erfolgt über den Bedürfnissen angepasster Aussparungen. Bei diesen Übergängen werden üblicherweise keine speziellen Massnahmen ergriffen, um der Ausweitung eines Brandes entgegenzuwirken.

6.4.12 Befestigungselemente

Die Befestigungsarten der Kabel sind sehr unterschiedlich; verschiedenste Systeme sind im Einsatz. Je nach Anwendung werden Profilschienen, Gitterbahnen, Kabelrinnen, Kabelleitern mit Zubehör wie Bügel, Schellen und Dübel eingesetzt. Für höhere Brandschutzanforderungen müssen auch die Befestigungselemente geprüft sein, bei Anforderungen nach DIN 4102/12 gemeinsam mit den entsprechenden Kabeln. Namhafte Hersteller liefern Befestigungselemente nach E30 bis E90.



7 Gefährdungsanalyse

7.1 Grundlagen

Als Bewertungsgrundlage für die Ermittlung der Gefährdungen von verschiedenen Kabelverlegearten im Tunnel bei einem Brandereignis, werden folgende Grössen verwendet.

7.1.1 Isolation / Beton-Überdeckung

Aus den durchgeführten Untersuchungen kann dem Abschnitt 4 dieses Forschungsberichtes entnommen werden, dass bereits bei einer geringen Betonüberdeckung von wenigen Zentimetern die Temperaturen im Beton Werte von 100°C nicht mehr überschreiten. Weiter betragen die tiefsten Erweichungstemperaturen der für die Kabelisolation verwendeten Kunststoffe etwa 90°C oder mehr. Diese Erkenntnisse lassen die Folgerung zu, dass infolge der guten Wärmeleitung und der hohen Wärmekapazität die im Tunnelbau in grossen Massen eingesetzten Werkstoffes Beton darin verlegte Kabel von direkten Einwirkungen eines Brandereignisses wirksam geschützt werden können.

Entstehen bei den im Beton eingelegten Kabelschutzrohren hohe Temperaturen, welche den Erweichungspunkt des Kunststoffes überschreiten, kann es zu Verklebungen mit den darin verlegten Kabeln kommen. Es muss dabei nicht auch zwingend eine Funktionsstörung / -Beeinträchtigung entstehen. Eine allfällige Auswechslung des Kabels nach dem Ereignis kann dann nicht mehr gewährleistet werden. Mit der Verwendung von vernetzten Kabel-Isolationen kann diesem Effekt entgegengewirkt werden.

7.1.2 Temperatureinwirkung

Es wird zwischen einer direkten und indirekten Temperatureinwirkung unterschieden. Eine Kabelanlage, welche auf die Wand oder im Deckenbereich montiert wurde, ist im Falle eines Fahrzeugbrandes im Tunnelfahrraum ohne Schutz den Flammen und Brandgasen ausgesetzt. In einbetonierten Schutzrohren verlegte Kabel erfahren hingegen keine direkte Temperatureinwirkung. Handelt es sich um ein länger andauerndes Brandereignis mit hohen Temperaturen, erfahren sie eine indirekte Einwirkung durch die Wärmeleitung. Lokale Schwachpunkte dieser Verlegearten können Aussparungen etc. sein, welche nicht mit einer wärmeisolierenden Abdeckung versehen sind.

7.1.3 Lage / Linienführung von Kabelleitungen im Tunnelquerschnitt

Von grundlegender Bedeutung ist die Lage/Linienführung/Montage der jeweiligen Kabelleitungen im Tunnelquerschnitt. Werden die Kabel unter oder neben der Fahrbahn in Rohrblöcken/Leitungskanälen verlegt, kann das Gefährdungsrisiko um einiges tiefer gehalten werden, als wenn die Kabel auf entsprechenden Auflagersystemen unter der Tunneldecke offen montiert werden.

Wie aus der Zusammenfassung der Brandversuche im Memorial Tunnel im Abschnitt 3 ersichtlich ist, entstehen im Tunnelfahrraum Temperaturen im Bereich von ca. 400°C bei einem Brand mit einer Leistung von 50MW. Solch hohe Temperaturen wurden ausschliesslich im oberen Bereich unter der Decke gemessen. Im unteren Bereich ist die Temperaturentwicklung um einiges geringer.

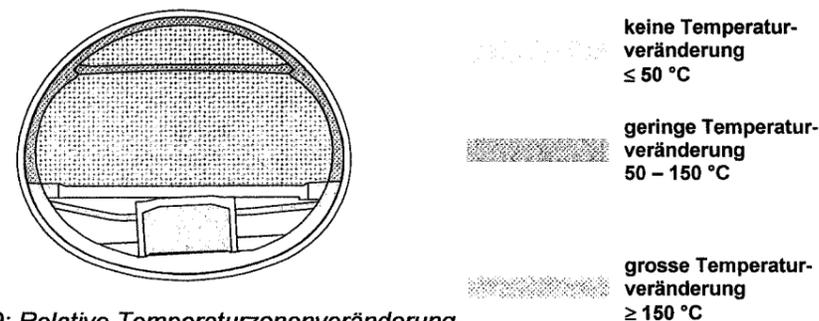


Abb. 39: Relative Temperaturzoneneränderung im Tunnel

7.2 Gefährdungen der Kabelverlegearten

Standardmässig eingesetzte Kabelisolationen können bis zu einem Temperaturbereich von +90°C problemlos eingesetzt werden (teilweise nur bis +70°C). Ab dieser Temperatur kann die Isolation, in Abhängigkeit des verwendeten Kunststoffes, erweichen und die Isolationsfestigkeit nimmt kontinuierlich ab, bis sie in einem Kurzschluss endet. Durch geeignete Zusatzstoffe oder zusätzliche Isolierungen kann der Kurzschlusschutz und die Isolationssicherheit massiv erhöht werden.

Um die Gefährdungen der definierten Kabelverlegearten gemäss Abschnitt 6.4 im Falle eines Brandereignisses bestimmen zu können, werden folgende Gefährdungsgrössen und Stufenwerte definiert.

Gefährdungen	gering	mittel	gross
Beton-Überdeckung	> 10 cm	5 - 10 cm	0 - 5 cm
Temperatureinwirkung	gering (< 70 °C)	mittlere (100 - 200 °C)	hohe (400 °C)
vertikale Lage im Tunnel	unten	mitte	oben

Abb. 40: Definition der Gefährdungsgrössen



Mit Hilfe dieser Definition werden die Gefährdungsgrade für jede Kabelverlegeart ermittelt. Sie sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Nr.	Kabelverlegeart	Parameter der Gefährdung			Gefährdung
		Überdeckung, Abdeckung, Schutz allgemein	Lage im Tunnel	Temperatureinwirkung im Brandfall	
1	OKK (Oberflächenkabelkanal)	Kanalabdeckung (Stahl, Beton)	in Bankette integriert	gering	gering
2	UKK (Unterflur-Kabelkanal / Rohrblock)	Beton Dicke > 10 cm	in Bankette einbetoniert	nicht relevant	nicht vorhanden
3	Rohr-Querung unter Fahrbahn	Fahrbahn Dicke > 10 cm	unter Fahrbahn	nicht relevant	nicht vorhanden
4	Leitungskanal	Fahrbahn	unter Fahrbahn	nicht relevant	nicht vorhanden
5	Aufstieg in Wand	Beton Dicke 5 - 10 cm	in Tunnelwand	mittel	mittel
6	Querung in Decke / Zwischendecke	Beton Dicke 5 - 10 cm	in Tunneldecke	mittel - gross	mittel
7a	Kabelkanal im Lüftungskanal (Zuluft)	Beton Dicke > 10 cm	in Zwischendecke	gering	gering
7b	Kabelkanal im Lüftungskanal (Abluft)	Beton Dicke > 10 cm	in Zwischendecke	hoch	mittel - hoch
8	Kabelkanal unter Tunneldecke / an Wand	marginaler Schutz durch Kanal	unter Tunneldecke im Fahrraum	hoch	hoch
9	Offene Verlegung für Anschluss elektromech. Komponenten	marginaler Schutz durch Kabelschutzrohr	an Tunnelwand	hoch	hoch
10	Verlegung in Nut im Bankett	z.B. Bitumen	in Bankette	gering	gering

Abb. 41: Übersicht Gefährdungen

Im weiteren findet sich im Anhang C eine Zusammenstellung, welche eine Übersicht der möglichen Kabelverlegearten für die unterschiedlichen Tunnel-Normalprofilen wiedergibt.

Kann das Kabel durch eine genügend dicke isolierende Überdeckung von einem Brandereignis im Tunnelfahrraum abgeschirmt und damit eine direkte Einwirkung des Feuers längerfristig verhindert werden, besteht nur eine *geringe Gefährdung* für eine funktionelle Beeinträchtigung der Kabelanlage.

Sind gewisse Abschnitte der Kabelanlage nur mit einer geringen isolierenden Schicht überdeckt und/oder liegt die Kabelanlage in einem sehr exponierten Ort bezogen auf den Brandherd, sind die darin verlegten Kabel einer *mittleren Gefährdung* ausgesetzt.

Verfügt die Kabelanlage über keinen wirksamen baulichen Schutz gegenüber Einflüssen eines Brandes, besteht für die Kabel eine *grosse Gefährdung*. Ihre Funktionstüchtigkeit wird im Falle eines Brandereignisses stark eingeschränkt und es kann bei längerem Anhalten dieses Zustandes zur Zerstörung der Kabelanlage führen.



7.3 Erkenntnisse und Schlussfolgerungen der Gefährdungen

Die vorgenommenen Recherchen in der einschlägigen Fachliteratur und die im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchgeführten Untersuchungen ergaben, dass alle Kabelanlagen, welche über ein genügend dicke Betonüberdeckung verfügen und/oder im unteren Bereich des Tunnel verlegt sind, keine relevante Gefährdungen erfahren. Eine geringe Gefährdung kann dadurch hervorgerufen werden, dass bei sehr hohen Temperaturwerten Abplatzungen am Beton entstehen oder die Hitzestrahlung/direkte Feuereinwirkung über z.B. Aussparungen die Kabelanlage lokal angreifen kann.

Somit kann festgehalten werden, dass alle Kabelanlagen, welche in einbetonierten Rohren sowohl in den Banketten und unter der Fahrbahn wie auch in den Tunnelwänden und -decken verlegt sind, grundsätzlich einer sehr geringen Gefährdung im Falle eines Brandereignisses ausgesetzt werden. Bei den Kabelaufstiegen und den Querungen in der Tunneldecke können einzig die mit einer nicht wärmeisolierenden Blindabdeckung versehenen Reserve-Aussparungen ein Schwachpunkt darstellen.

Die Gefährdung von Kabelanlagen in den Leitungskanälen unter der Fahrbahn durch ein Brandereignis kann ebenfalls als sehr gering eingestuft werden. Dasselbe gilt für die Verlegung von Kabel in Lüftungskanälen unter der Decke. Dabei empfiehlt es sich, die Kabel nur im Zuluftkanal zu verlegen. In einem Ereignisfall können die heißen Brandgase, welche über den Abluftkanal aus der Tunnelröhre gezogen, den darin verlegten Kabelanlagen Schaden zufügen.

Im Gegensatz zu den in einbetonierten Rohren verlegten Kabeln, können sowohl die offen als auch die auf Auflagersystemen verlegten Kabelanlagen ohne Funktionserhalt im Tunnelraum, bereits beim Brand eines Personenaufwagens (je nach Tunnelquerschnitt) durch die Wärmeentwicklung in Ihrer Funktionsweise beeinträchtigt oder zerstört werden.

Die bis anhin in diesem Abschnitt vorgenommenen Bewertungen berücksichtigen nur die Brandfestigkeit von Standard-Kabelanlagen ohne den Funktionserhalt der verschiedenen Kabelverlegearten. Die Brandfestigkeit einer Kabelanlage ist jedoch nur ein Aspekt, in welchem die Relevanz der Funktionstüchtigkeit einer Anlage / eines Systems während einem Brandereignisfall nicht berücksichtigt ist.

Zuerst ist abzuklären und zu definieren, ob es sich bei der betrachteten Anlage im Falle eines Brandereignisses um eine sicherheitstechnisch relevante Einrichtung handelt. Dabei sind die Vorgaben der gültigen Normenwerke und Richtlinien zu beachten. In diesen Werken wird üblicherweise für sicherheitstechnische Einrichtungen ein Zeitraum vorgegeben, über welchen sie in einem Brandereignisfall funktionstüchtig sein muss. Nach Ablauf dieser definierten Zeit wird ein Ausfall der Einrichtung toleriert.

Für diese Anlagen empfiehlt es sich, Kabelanlagen mit einem vordefinierten Funktionserhalt zu erstellen. Dabei ist nicht zwingend eine geprüfte Anlage



gemäss DIN 4102/12 erforderlich, sondern es ist genügend, wenn Kabel mit einem Isolationserhalt FE180 verwendet und zusammen mit dem definierten Funktionserhalt geprüften Befestigungsmaterialien verlegt werden. Mit diesem Vorgehen kann eine Kabelanlage in Anlehnung an die DIN 4102/12 erstellt werden.

Es ist zu beachten, dass der Funktionserhalt einer Kabelanlage keine absolute Garantie über die Funktionstüchtigkeit einer Anlage über den geforderten Zeitraum gibt. Nebst den qualitativen Eigenschaften der eingesetzten Materialien spielt das Konzept einer Anlage eine wesentliche Rolle.



8 Schlussfolgerungen

Wie die Untersuchungen im Rahmen dieser Forschungsarbeit gezeigt haben, hängt die Gefährdung von Kabelanlagen im Strassentunnel bei einem Brandereignis von verschiedenen Grössen ab:

- Brandleistung
- Tunnelquerschnitt / Dimension
- Baulicher Brandschutz
- Lüftungskonzept
- Lage der Kabelanlage im Tunnel
- Arte der Anlage / des Systems

8.1 Brandleistung

Die entstehende Brandleistung in einem Ereignisfall steht in Zusammenhang mit der vorherrschenden Verkehrszusammensetzung im entsprechenden Strassentunnel. Je grösser der Anteil des Schwerverkehrs am gesamten Verkehrsaufkommen und je grösser die Brandleistung der transportierten Ladung ist, mit desto intensiveren möglichen Brandeinwirkungen muss gerechnet werden. Sowohl die maximale Temperatur wie auch die zeitliche Branddauer sind abhängige Grössen der Brandleistung.

Für die Temperaturverläufe von Bränden stehen diverse Temperatur-Zeit-Kurven zur Verfügung. Diese beruhen entweder auf Versuchsergebnissen oder simulierten Szenarien, welche oft den schlechtest-möglichen Fall beschreiben. Dabei sind die jeweiligen Randbedingungen dieser Resultate in die Betrachtungen einzubeziehen.

In der SIA 197/2 [2] sind die ungefähren vorhandenen Brandenergien der verschiedenen Fahrzeugarten zusammen mit der maximal zu erwartenden Temperatur aufgelistet. Diese Angaben beruhen u.a. auf den EUREKA-Versuchen. Dabei handelt es sich um maximale Messwerte, ohne Berücksichtigung der räumlichen Verteilung innerhalb des Tunnel-Querschnittes sowie der Beeinflussung einer wirksamen Brandlüftung.

Schlussfolgerung: Die Brandleistung, welche in Abhängigkeit der Fahrzeugart inkl. einer allfälligen Ladung steht, ist nur ein Aspekt in Bezug auf die effektive Gefährdung. Eine weitere Einwirkungsgrösse beschreibt in Zusammenhang mit der Zeit die Temperaturverteilung. Die in den vorliegenden Normenwerken



angegebenen Temperaturen beziehen sich meist auf die mögliche maximale Temperatur, welche nur im Bereich unter der Decke im Tunnelscheitel zu erwarten ist. Unter Berücksichtigung der Temperaturverteilung ist im unteren Bereich des Querschnittes mit geringeren Werten zu rechnen.

8.2 Tunnelquerschnitt / Dimension

Die Grösse des Tunnelquerschnittes trägt zusammen mit der auftretenden Brandleistung entscheidend für die maximal auftretende Temperatur inkl. deren Verteilung bei. In den durchgeführten Brandversuchen wurden oft Tunnelquerschnitte mit geringeren Querschnittsflächen für die Versuche/Messungen verwendet. Diese den Messwerten zugrunde gelegten unterschiedlichen Querschnittsflächen und deren allfälligen Auswirkungen/Beeinträchtigung der Versuchsergebnisse müssen in die Betrachtungen mit einbezogen werden.

Schlussfolgerung: In einer typischen Tunnelröhre entstehen infolge der geometrischen Form des Profils im Scheitel die höchsten Temperaturen. Im unteren Bereich sowie auf Höhe der Bankette kann mit massiv tieferen Temperaturen gerechnet werden. Weiter ergeben sich in Tunnellängsrichtung starke Temperaturabnahmen, wobei die Lüftungsanlage einen grossen Einfluss auf die Temperaturverteilung ausübt. Nur in unmittelbarer Nähe des Brandherdes, können Temperaturen von gegen 1000 °C oder im Extremfall auch höher auftreten.

8.3 Baulicher Brandschutz

Bei einem grossen Teil der untersuchten typischen Kabelverlegearten werden die Kabeleinlagen durch eine Betonüberdeckung von Einflüssen aus dem Tunnelfahrraum geschützt. Ausgenommen sind dabei die offen verlegten Kabelarten.

Schlussfolgerung: Der Werkstoff Beton weist eine hohe Brandwiderstandsfähigkeit auf, sodass auch bei intensiven und lang andauernden Brandeinwirkungen nur eine stark verzögerte und sehr langsame Temperaturausbreitung im Werkstoff stattfindet. Mit Beton überdeckte Kabelanlagen verfügen somit über einen sehr guten Brandschutz.



8.4 Lüftungskonzept

Eine nach den neuen Erkenntnissen ausgelegte Brandlüftungsanlage mit einem optimalen Konzept und Steuerung kann die bei einem Brandereignis auftretenden Temperaturen und Rauchkonzentrationen massiv beeinflussen. Diese Einflüsse stehen in direktem Zusammenhang mit den möglichen Brandeinwirkungen auf eine Kabelanlage.

Schlussfolgerung: Aus den in Abschnitt 3 beschriebenen Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die Temperatur- und Rauchausbreitung mit einer leistungsfähigen Brandlüftung erheblich reduziert werden kann und damit die Brandeinwirkungen auf eine Kabelanlage massiv reduziert werden.

8.5 Lage der Kabelanlage im Tunnel

Wie die Untersuchungen im Rahmen dieser Forschungsarbeiten gezeigt haben, sind die vertikale und horizontale Anordnung sowie die Lage der Kabelanlagen in einem Strassentunnel für einen sicheren und funktionierenden Betrieb im Falle eines Brandereignisses von grosser Bedeutung. Dabei sind fast ausschliesslich jene Kabelanlagen gefährdet, welche im Tunnelfahrraum ohne speziellen Brandschutz montiert und verlegt wurden. Diese werden vor allem für die Erschliessung der elektromechanischen Anlagenteile wie Strahlventilatoren, Beleuchtung etc. verwendet.

Sobald die Kabelanlagen mit einer genügend dicken Betonschicht überdeckt sind (> 10 cm), besteht nur noch ein sehr geringe Gefahr einer Funktionsbeeinträchtigung im Falle eines Brandereignisses.

Schlussfolgerung: Alle Kabelanlagen, welche nicht zwingend für die Erschliessung von elektromechanischen Einrichtungen im Tunnelfahrraum benötigt werden, sind möglichst anderweitig zu verlegen. Den besten Schutz dabei bildet eine Betonüberdeckung grösser 10 cm.

8.6 Art der Anlage / des Systems

Es ist für jede Kabelanlage separat zu betrachten, ob sie Bestandteil einer sicherheitsrelevanten Anlage ist oder nicht [18].

Wenn die Funktionstüchtigkeit einer Kabelanlage im Falle eines Ereignisses nur von untergeordneter Bedeutung sein wird, bestehen im Prinzip keine Anforderungen bezüglich der Brandsicherheit dieser Kabel. Es wird jedoch verlangt, generell halogenfreie und flammwidrige Kabel einzusetzen (FE0).



Soll nebst vorher genannten Anforderungen zusätzlich eine Ausbreitung des Feuers über die nicht sicherheitsrelevante Kabelanlage verhindert werden, sind Kabel mit einem Isolationserhalt von mindestens FE5 zu verwenden.

Ist die Kabelanlage Bestandteil einer sicherheitsrelevanten Anlage ist, gilt es abzuklären, wo diese Kabel verlegt und/oder montiert werden. Sobald Kabelinstallationen in eingelegten Schutzrohren mit geringer Betonüberdeckung oder offen im Tunnelfahrraum erstellt werden müssen, empfehlen wir Kabel mit einem Isolationserhalt von mind. FE180 zu verwenden oder die Installation mit einem minimalen Funktionserhalt von E30 auszuführen.

Schlussfolgerung: Es kann keine grundsätzliche Empfehlung betr. der zu verwendenden Kabel abgegeben werden. Für jeden separaten Fall muss abgeklärt werden, ob die Kabelanlage ein Bestandteil einer sicherheitsrelevanten Anlage ist oder nicht. Weiter muss abgeklärt werden, wo und wie die Kabel eingezogen und verlegt werden. Anhand dieser Grundlagen und Tatsachen können sowohl der sicherheitstechnisch geeignete Kabeltyp wie auch die entsprechende Verlegeart bestimmt werden. Um die Entscheidungsfindung etwas zu vereinfachen, steht nachfolgendes Ablaufdiagramm zur Verfügung.

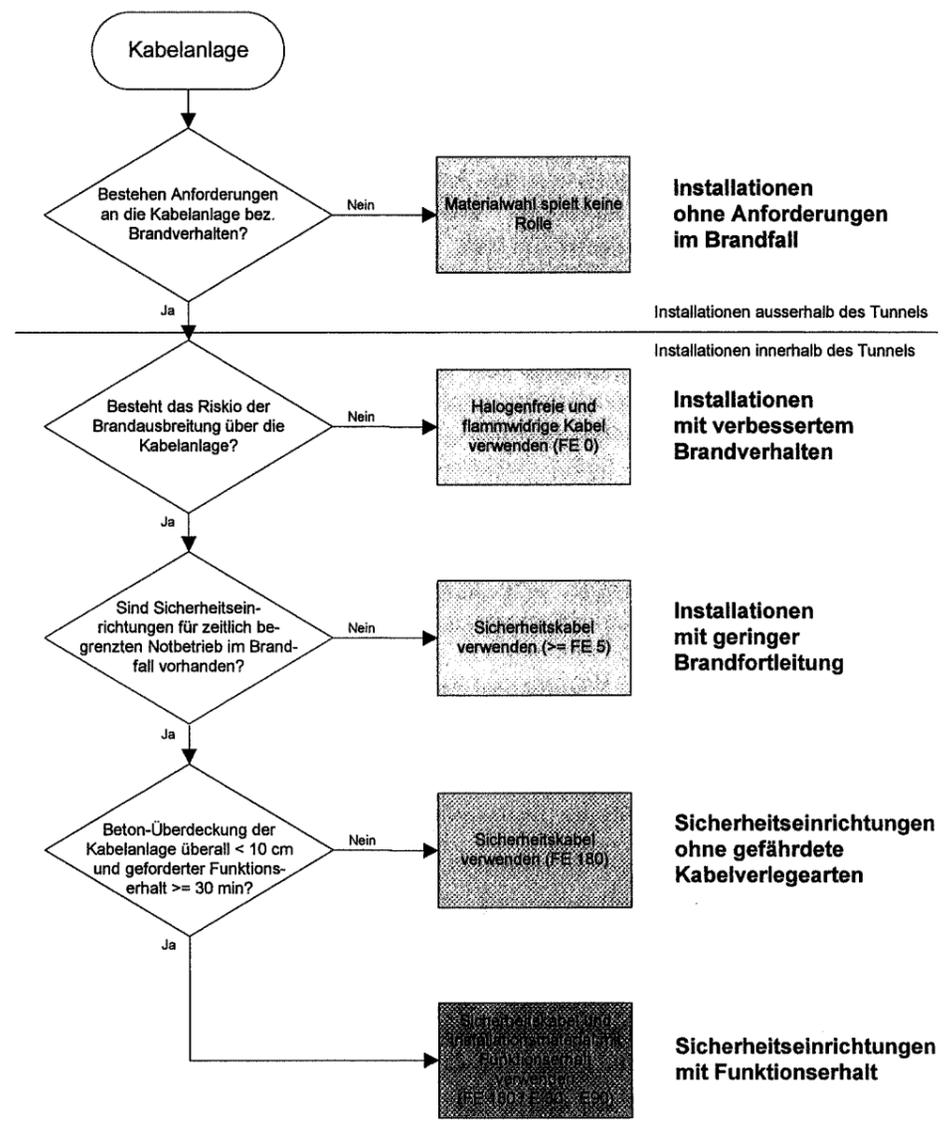


Abb. 42: Ablaufdiagramm Auswahl Kabelanlage



8.7 Schlussbemerkung

Bei Brandunfällen in Strassentunnel können durch die stark eingeschränkten räumlichen Verhältnisse sehr hohe Temperaturen entstehen. Die Intensität des Brandes ist dabei von der Art und der Grösse des Fahrzeuges sowie deren Ladung abhängig. Weiter spielen die Randbedingungen wie z.B. die Querschnittsfläche des Tunnelprofils als auch der Einsatz einer zweckmässigen Brandlüftung eine grosse Rolle bei der Temperaturentwicklung.

Die Gefährdung der Kabelanlage hängt einerseits von der Brandleistung der am Brand beteiligten Fahrzeuge ab. Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Gefährdung beschreibt die Temperaturverteilung innerhalb des Tunnels. Die in den Normenwerken beschriebenen Temperaturen beschreiben immer die maximal auftretenden Werte, welche nur im oberen Bereich des Scheitels unter der Decke zu erwarten sind. Im unteren Bereich herrschen bei einem Brandereignis massiv tiefere Temperaturen vor. Durch den Einsatz einer leistungsfähigen Brandlüftung können die Brandeinwirkungen (Temperaturen) erheblich reduziert werden.

Der Werkstoff Beton verfügt über eine hohe Brandwiderstandsfähigkeit und bietet darin verlegten Kabelanlagen einen hohen Schutz gegenüber Brandeinwirkungen. Bei genügend dicker Überdeckung ($\geq 10\text{cm}$) kann eine Gefährdung der Kabelanlagen ausgeschlossen werden. Im Gegensatz dazu sind offen oder im Abluftkanal verlegte Kabelanlagen bei einem Brandereignis stark gefährdet.

In einem Strassentunnel sollen grundsätzlich nur halogenfreie und flammwidrige Kabel eingesetzt werden. Dadurch kann die Entstehung von giftigen Gasen bei der Verbrennung der Kabelisolation sowie ein selbständiges Weiterbrennen wirksam verhindert werden. Sind die Kabelanlagen ein Bestandteil einer sicherheitsrelevanten Anlage oder Einrichtung, empfiehlt es sich, unter Berücksichtigung der geltenden Vorschriften und Richtlinien, Kabel mit erhöhtem Isolationserhalt einzusetzen, oder bei offener Verlegung eine Kabelanlage mit einem vordefinierten Funktionserhalt zu erstellen.

Der Sicherheitsgedanke sollte aber nicht dazu führen, in Zukunft grundsätzlich alle elektrischen Installationen von Strassentunnel in Anlehnung an die DIN-Norm 4102-12 mit einem definierten Funktionserhalt zu erstellen. Dies hätte zur Folge, dass sowohl die Kosten für die Kabelanlagen massiv steigen würden als auch für gewisse nicht sicherheitsrelevante Systeme sicherheitstechnisch stark überdimensionierte Kabelanlagen erstellt würden, durch welche kein zusätzlicher Nutzen entstünde.



9 Verzeichnisse

9.1 Literatur- / Quellenverzeichnis

- [1] ASTRA Richtlinie: Lüftung der Strassentunnel, Systemwahl, Dimensionierung und Auswahl, Ausgabe 2004
- [2] SIA 197/2, Ausgabe 2004-10: Projektierung Tunnel, Strassentunnel
- [3] SIA 197, Ausgabe 2004-10: Projektierung Tunnel, Grundlagen
- [4] DIN 4102-12, Ausgabe 1998-11: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 12 Funktionserhalt von elektrischen Kabelanlagen, Anforderungen und Prüfungen
- [5] Bundesminister für Verkehr, Abteilung Strassenbau; Bund/Länder-Fachausschuss Brücken- und Ingenieurbau: ZTV-Tunnel – Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Strassentunneln, Teil 1, 1995
- [6] Memarco AG / Fortatech AG: Brandversuche an Betonelementen, Versuchstollen Hagerbach AG, Sargans, 12. April 2000
- [7] Kordina, K.: Brandversuche an Tunnelauskleidungssystemen, Brandschutz in Verkehrstunnels, Internationale Konferenz, Dresden, September 1995
- [8] Hosser, D., Richter, E., Paliga, K.: Ermittlung von Rechengrundlagen für den Brandfall, TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, März 1998
- [9] Richter, E.: Temperatur- und Rauchausbreitung: Auswirkungen auf den baulichen Brandschutz, Brandschutz in Verkehrstunnels, Internationale Konferenz, Dresden, September 1995
- [10] Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln (RABT), 1994
- [11] Nexans Schweiz AG
(Div. Präsentations- und Informationsmaterial)
- [12] Studer Draht- und Kabelwerk AG
(Div. Präsentation- und Informationsmaterial)
- [13] Dätwyler AG
(Informationsmaterial von Handbuch aus dem Internet)



- [14] ASTRA Richtlinie: Signalisation der Sicherheitseinrichtungen in Tunneln, Entwurf Ausgabe 2004
- [15] ASTRA Richtlinie: Funksysteme in Tunneln, Tunnel & Elektromechnik, Entwurf Ausgabe 2003
- [16] ASTRA Richtlinie: Verkehrsfernsehen, Tunnel & Elektromechnik, Entwurf Ausgabe 2003
- [17] Symalit AG
(Produkteinformationen aus dem Internet)
- [18] KBOB-Empfehlung, Einsatz von Elektrokabeln, Funktionserhalt und Brandverhalten
- [19] ASTRA Richtlinie: Elektromechanische Anlagen, Leitsätze und Empfehlungen für den Umbau von Oberflächen-Kabel-Kanal-Systemen (OKK) auf Unterflur-Kabel-Kanal-Systemen (UKK), Ausgabe August 1991



9.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Brandleistungen [AIPCR, ASTRA].....	11
Abb. 2: Brandenergie und Brandtemperatur [SIA 197/2].....	12
Abb. 3: Bei Brandversuchen gemessener zeitlicher Verlauf der Brandleistung [EUREKA]	13
Abb. 4: Querschnitte Versuchstunnel.....	14
Abb. 5: Vergleich der Querschnitte der Versuchstunnel mit einem Tunnelquer-schnitt gemäss Norm SIA 197/2.....	14
Abb. 6: Maximale Temperaturen im Deckenbereich [EUREKA]	15
Abb. 7: Temperaturen im Tunnelquerschnitt [EUREKA].....	16
Abb. 8: Zeitlicher Verlauf der Maximaltemperaturen [EUREKA].....	16
Abb. 9: Bei einem 20 MW Brand und Längslüftung zu verschiedenen Zeiten gemessenen Temperatursausbreitung [Memorial Tunnel]..	18
Abb. 10: Bei unterschiedlichen Brandleistungen und Längslüftung zehn Minuten nach Brandbeginn gemessenen Temperatursausbreitung [Memorial Tunnel]	19
Abb. 11: Temperaturverläufe der Versuche EUREKA 499 Firetun und Memorial Tunnel mit Längslüftung	20
Abb. 12: Normbrandkurven.....	23
Abb. 13: Vergleich der Normbrandkurven mit den bei den EUREKA Versuchen gemessenen Temperaturverläufen.....	25
Abb. 14: Vergleich der Normbrandkurven mit den bei den Memorial Tunnel Versuchen gemessenen Temperaturverläufen.....	26
Abb. 15: Wahl der Bemessungskurve [SIA 197/2]	27
Abb. 16: Abplatzverhalten von Normalbeton und Beton mit Faserzusatz..	28
Abb. 17: Brandversuch mit hochbeständigem Beton [Memarco/Fortatech, 2000].....	30
Abb. 18: Resultate von Brandversuchen mit Tunnelauskleidungselementen [Kordina, 1995]	31
Abb. 19: Grossflächige bis auf die Bewehrung reichende Betonabplatzungen an einem Tübbing [Hosser, D. et al., 1998]..	32
Abb. 20: Temperaturverläufe in Beton-Tübbing in verschiedenen Tiefen bei einer Belastung gemäss der HC _{mod} -Kurve [Hosser, D. et al., 1998].....	33



Abb. 21: Relevante Normen passives Brandverhalten	34
Abb. 22: Kabelbeflammung [Studer]	35
Abb. 23: Mechanischer Schock [Studer]	36
Abb. 24: DIN-Brandofen [Studer]	37
Abb. 25: Funktionserhaltsklassen	39
Abb. 26: Aussenansicht Brandofen [Nexans]	40
Abb. 27: Kabelanlage vor Brandtest [Nexans]	40
Abb. 28: Kabelanlage nach Brandtest [Nexans]	40
Abb. 29: Kabelanlage nach Brandtest [Nexans]	40
Abb. 30: Mehrkosten für Installationen nach DIN 4102-12	42
Abb. 31: Zusammenstellung relevanter Normen bez. Brandverhalten von Kabel	44
Abb. 32: Kabeleigenschaften beim Verhalten im Brandfall	45
Abb. 33: Übersicht Normenrelevanz	45
Abb. 34: Kenndaten Leitermaterial [Quelle Nexans]	47
Abb. 35: Kenndaten Isoliermaterial [Quelle Nexans]	47
Abb. 36: Temperaturverhalten verschiedener Thermoplaste [Dätwyler]	48
Abb. 37: Detail Isolationaufbau	49
Abb. 38: Temperaturverhalten verschiedener Kunststoffe [Symalit AG]	52
Abb. 39: Relative Temperaturzonenveränderung im Tunnel	59
Abb. 40: Definition der Gefährdungsgrössen [Studer]	59
Abb. 41: Übersicht Gefährdungen	60
Abb. 42: Ablaufdiagramm Auswahl Kabelanlage	67
Abb. 43: Beflammung Kabelprüfling [Studer]	76
Abb. 44: Isolationsverbrennung [Studer]	78
Abb. 45: Lichttransmissionsmessung [Studer]	79
Abb. 46: Vertikale Beflammung [Studer]	80
Abb. 47: HS- / MS-Energieversorgungskabel [Nexans]	81
Abb. 48: NS-Energieversorgungskabel [Nexans]	81



Abb. 49: Fernmeldekabel mit Kupferleiter [Nexans].....	81
Abb. 50: Fernmeldekabel mit Glasfasern [Nexans].....	81
Abb. 51: Koaxiales Strahlungskabel [Nexans]	81



10 Glossar

Abplatzungen:	Die im Beton eingeschlossene Feuchtigkeit (Wasser) verdampft bei äusserer Brandeinwirkung. Der Wasserdampf benötigt infolge seiner physikalischen Gegebenheit ein grösseres Volumen. Kann der Wasserdampf nicht entweichen, entsteht im Beton ein Überdruck, welcher zu klein- oder grossflächigen Abplatzungen führen kann.
Befestigungen:	Materialien, welche benötigt werden, um ein Kabel ordentlich zu befestigen und zu verlegen, z.B. Dübel, Bügelschelle etc.
Brandeinwirkung:	Brandlasten (MW, MJ) und Brandverlauf (t)
Brandkurve:	Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Zeit
Brandwiderstand:	Beschreibt, wie rasch sich bei einer Brandbeanspruchung die Ausbreitung der Temperatur innerhalb des Elementes entwickelt.
EUREKA	Forschungspartner aus England, Finnland, Frankreich, Italien, Norwegen Österreich, Schweden und der Schweiz führten zwischen 1990 und 1992 in einem ausser Betrieb genommen Bergwerkstollen in Norwegen insgesamt 20 Brandversuche durch (Projekt Firetun 499). Dabei wurden die Brände von vier verschiedenen Strassenfahrzeugen, von zahlreichen Schienenfahrzeugen sowie von Holz, Reifen und Kunststoffen simuliert.
Funktionserhalt:	Aussage, wie lange die Isolier- und Stromleitfähigkeit eines Kabelsystems (Kabel + Befestigungssystem) gewährleistet ist, ohne dass ein Kurzschluss oder Unterbruch entsteht.
Isolationserhalt:	Aussage, wie lange die Isolierfähigkeit eines Kabels im Brandfall gewährleistet ist, ohne dass ein Kurzschluss oder Unterbruch entsteht (Feuerwiderstandsfähigkeit).
Kabel:	Leitermaterial, inkl. Isolation, welches Bestandteil einer Kabelanlage ist.
Kabelanlage:	System, das nebst dem Kabel auch allfällige Schutzrohre, Verlege- und Befestigungsmaterialien beinhaltet.
MEMORIAL	In den Jahren 1993 - 1995 wurden im Memorial Tunnel, einem stillgelegten Strassentunnel im US



Bundesstaat West Virginia, im Rahmen eines gross angelegten Versuchsprogramms Brandversuche durchgeführt. Mit Vergleichsbränden mit 10, 20, 50 und 100 MW Leistung wurden insgesamt 98 Brandversuche durchgeführt

Tragsysteme: Material, welches benötigt wird, um Kabel geordnet zu verlegen, z.B. Kabelleiter, Gitterkanäle, etc.

Tübbing: Beton-Stahlguss-Elemente zur Auskleidung und Abstützung von Tunneln

Verbindungselemente: Material, welches benötigt wird, um zwei Kabel miteinander zu verbinden, z.B. Dosen, Klemmen etc.

11 Anhang A: Normen passives Brandverhalten

11.1 Flammwidrigkeit (selbstverlöschend) (PVC):

Eigenschaft	International	Europa	Schweiz
flammwidrig	IEC 60332-1	EN 50265-2-1	TP 20B/3C, 3.4.1

Beschrieb:

- Minimalste Anforderung bezüglich Brandverhalten an Kabelisolation bezogen auf einzelne Adern oder Kabel
- Selbstverlöschende Kabelisolation
- kein selbständiges Weiterbrennen
- begrenzte Abbrandhöhe

Prüfbedingung:

- Beflammung einzelner Kabel durch Bunsenbrenner (Propan-Luft-Gemisch)
- Zeitdauer abhängig von Kabeldurchmesser

Grafische Darstellung:

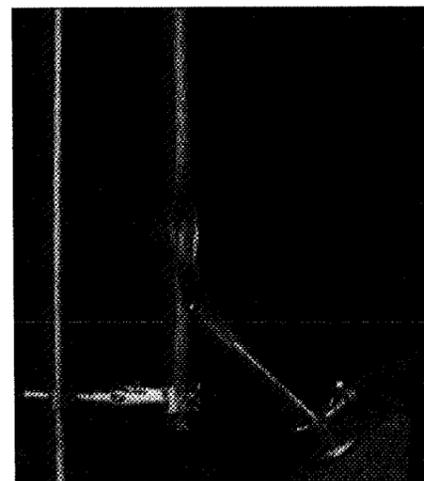


Abb. 43: Beflammung Kabelprüfung [Studer]

Damit die Kunststoffe der Kabelisolation im Brandfall nicht als Energiequelle wirken, werden Additive wie z.B. Brom, Chlor (Halogene) und mineralische Füller zur Verbesserung der Brandeigenschaften eingesetzt.



11.2 Halogenfreiheit:

Eigenschaft	International	Europa	Schweiz
halogenfrei	IEC 60754-1	EN 50267-2-1	TP 20B/3C, 3.4.5

- Beschrieb:
- Kabelisolation ohne Halogene (Chlor-, Fluor-, Brom- und Jodelemente)
 - Verminderung des Gefahrenpotenzial durch toxische Brandgase
- Prüfbedingung:
- Chemische Analyse
 - Verfärbung des Isolationsmaterial auf ausgeglühtem Kupferdraht an Gasflamme

Halogene bilden in Verbindung mit Laugen Salze. Im Brandfall entstehen durch halogenhaltige Kunststoffe hochgiftige Gase, z.B. Salzsäure bei Brand von PVC.



11.3 Korrosivität von Brandgasen:

Eigenschaft	International	Europa	Schweiz
keine korrosiven Gase	IEC 60754-2	EN 50267-2-3	TP 20B/3C, 3.4.4

Beschrieb:

- Kabelisolation ohne Halogene (Chlor-, Fluor-, Brom- und Jodelemente)
- Verminderung des Gefahrenpotenzial durch toxische Brandgase
- pH-Wert > 4.3, Leitfähigkeit > 10 $\mu\text{S}/\text{mm}$

Prüfbedingung:

- Verbrennung von Isolation im Ofen (> 900°C) mit vordefinierter Temperatur und Luftzufuhr

Grafische Darstellung:

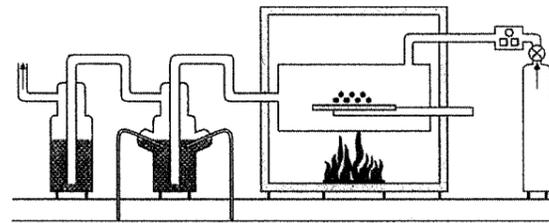


Abb. 44: Isolationsverbrennung [Studer]

Halogene bilden in Verbindung mit Laugen Salze. Im Brandfall entstehen durch halogenhaltige Kunststoffe stark korrosive Gase, welche sich in Verbindung mit Feuchtigkeit zu aggressiven Säuren entwickeln und metallische Teile angreifen sowie beschädigen können.



11.4 Rauchdichte:

Eigenschaft	International	Europa	Schweiz
raucharm	IEC 61034	EN 50268	TP 20B/3C, 3.4.3

Beschrieb:

- Minimale Beimischung von Additiven als Weichmacher in Kabelisolation
- Verhinderung / Einschränkung von Sichttrübung, Rauchvergiftungen

Prüfbedingung:

- Verbrennung vordefinierten Kabelproben mit Alkohol als Beschleuniger. Messung der Lichttransmission.

Grafische Darstellung:

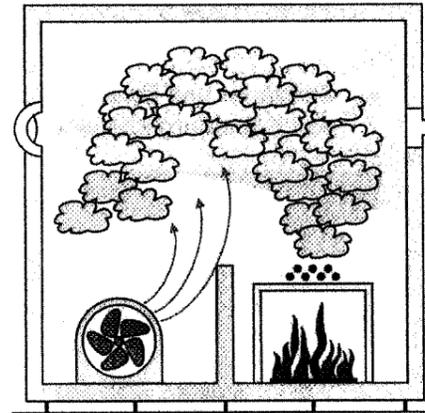


Abb. 45: Lichttransmissionsmessung [Studer]

Die als Weichmacher der Kabelisolation hinzugefügten Additiven können im Brandfall zu starker Rauchentwicklung führen. Einerseits beeinträchtigt dies die Sicht und Fluchtmöglichkeiten, andererseits können dadurch Rettungsmassnahmen im Tunnel behindert werden.



11.5 Brandfortleitung:

Eigenschaft	International	Europa	Schweiz
geringe Brandfortleitung	IEC 60332-3-24	EN 50266-2-4	TP 20B/3C, 3.4.1.3

Beschrieb:

- Flammwidrigkeit bei Häufung
- Selbstverlöschende Kabelisolation
- kein selbständiges Weiterbrennen
- begrenzte Abbrandhöhe

Prüfbedingungen:

- Beflammung von Kabelbündel durch Bunsenbrenner (Propan-Luft-Gemisch)
- Zeitdauer und Brandleistung abhängig von Kabeldurchmesser

Grafische Darstellung:



Abb. 46: Vertikale Beflammung [Studer]

Werden flammwidrige Kunststoffe in grosser Masse oder in sehr ungünstiger Anordnung eingesetzt, besteht im Brandfall die Gefahr der Brandfortleitung ohne zusätzlicher externer Wärmeeinwirkung, sodass sich Brände in Kabelrohranlagen oder -kanälen selbständig fortsetzen.

12 Anhang B: Kabeltypen

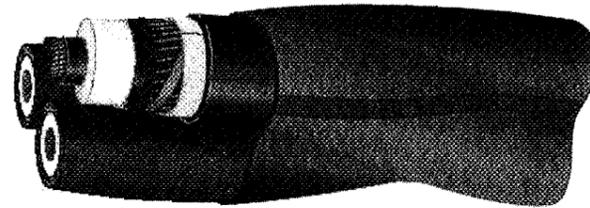


Abb. 47: HS- / MS-Energieversorgungskabel [Nexans]

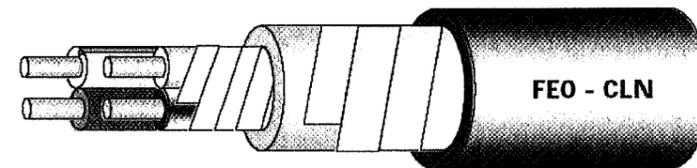


Abb. 48: NS-Energieversorgungskabel [Nexans]



Abb. 49: Fernmeldekabel mit Kupferleiter [Nexans]

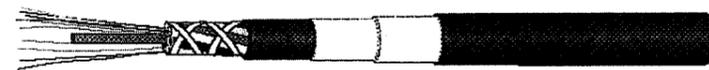


Abb. 50: Fernmeldekabel mit Glasfasern [Nexans]



Abb. 51: Koaxiales Strahlungskabel [Nexans]



13 Anhang C: Tabellarische Übersicht der Gefährdungsanalyse

Graphik	Bezeichnung	vorkommende Kabelverlegearten				Temperatur 10 Min nach Brandbeginn (Memorial Tunnel)																		
		1 OKK (Oberflächenkabelkanal)	2 UKK (Rohrblock)	3 Rohr-Querung unter Fahrbahn	4 Leitungskanal	5 Aufstieg in Wand	6 Querung in Decke / Zwischendecke	7 Kabelkanal im Lüftungskanal (Abluft)	8 Kabelkanal unter Tunneldecke / an Wand	9 Offene Verlegung für Anschl. el.mech. Komp.	10 Verlegung in gefräster Nut im Bankett	Brandleistung	10 MW	20 MW	50 MW	10 MW	20 MW	50 MW						
												Dist. zum Brandherd	0m	0m	0m	100m	100m	100m						
	ohne Zwischendecke	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Scheitel	20 °C	300 °C	450 °C	20 °C	200 °C	300 °C						
		X	X	X	X		X	X	X	X		+4.0m	90 °C	150 °C	300 °C	20 °C	100 °C	250 °C						
		X	X	X	X		X	X	X	X		+0.0m (Fahrb.)	20 °C	60 °C	150 °C	20 °C	40 °C	100 °C						
	mit Zuluftkanal	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Scheitel	20 °C	300 °C	450 °C	20 °C	200 °C	300 °C						
		X	X	X	X		X	X	X	X		+4.0m	90 °C	150 °C	300 °C	20 °C	100 °C	250 °C						
		X	X	X	X		X	X	X	X		+0.0m (Fahrb.)	20 °C	60 °C	150 °C	20 °C	40 °C	100 °C						
	mit Zu- / Abluftkanal	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Scheitel	20 °C	300 °C	450 °C	20 °C	200 °C	300 °C						
		X	X	X	X		X	X	X	X		+4.0m	90 °C	150 °C	300 °C	20 °C	100 °C	250 °C						
		X	X	X	X		X	X	X	X		+0.0m (Fahrb.)	20 °C	60 °C	150 °C	20 °C	40 °C	100 °C						
	ohne Zwischendecke	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Scheitel	20 °C	300 °C	450 °C	20 °C	200 °C	300 °C						
		X	X	X	X		X	X	X	X		+4.0m	90 °C	150 °C	300 °C	20 °C	100 °C	250 °C						
		X	X	X	X		X	X	X	X		+0.0m (Fahrb.)	20 °C	60 °C	150 °C	20 °C	40 °C	100 °C						
	mit Zuluftkanal	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Scheitel	20 °C	300 °C	450 °C	20 °C	200 °C	300 °C						
		X	X	X	X		X	X	X	X		+4.0m	90 °C	150 °C	300 °C	20 °C	100 °C	250 °C						
		X	X	X	X		X	X	X	X		+0.0m (Fahrb.)	20 °C	60 °C	150 °C	20 °C	40 °C	100 °C						
	mit Zu- / Abluftkanal	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Scheitel	20 °C	300 °C	450 °C	20 °C	200 °C	300 °C						
		X	X	X	X		X	X	X	X		+4.0m	90 °C	150 °C	300 °C	20 °C	100 °C	250 °C						
		X	X	X	X		X	X	X	X		+0.0m (Fahrb.)	20 °C	60 °C	150 °C	20 °C	40 °C	100 °C						
	Tagbautunnel	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Scheitel	20 °C	300 °C	450 °C	20 °C	200 °C	300 °C						
		X	X	X	X		X	X	X	X		+4.0m	90 °C	150 °C	300 °C	20 °C	100 °C	250 °C						
		X	X	X	X		X	X	X	X		+0.0m (Fahrb.)	20 °C	60 °C	150 °C	20 °C	40 °C	100 °C						
LEGENDE:		Gefährdung nicht vorhanden																						
		geringe Gefährdung																						
		mittlere Gefährdung																						
		grosse Gefährdung																						

