

Mit Klebebewehrungen verstärkte Stahlbetondecken im Brandfall

Schadenbegrenzung als Teil des
vorbeugenden Brandschutzes



Gebäudeversicherungsanstalt des Kantons St.Gallen
Davidstrasse 37, Postfach 744
CH-9001 St.Gallen



Amt für Feuerschutz des Kantons St.Gallen
Davidstrasse 37, Postfach 744
CH-9001 St.Gallen

Oktober 1995

1 Allgemeines

Geklebte Lamellenverstärkungen werden heute in der Schweiz oft angewendet. Neben den bisherigen Stahl-Lamellen finden neuerdings auch die CFK-Lamellen (kohlenstoffaserverstärkter Kunststoff) vermehrt Anwendung. Durch Versuche und theoretische Forschungsarbeiten sind bereits sehr viele – aber noch nicht alle – Probleme gelöst worden.

Dazu beigetragen haben vor allem die an der EMPA seit 1970 intensiv durchgeführten Forschungen (Meier, Ladner, Weder, Kaiser, Pralong, Schwegler, Deuring).

In der praktischen Anwendung der Lamellenverstärkungen wurde bisher der gerade für diese Konstruktion sehr wichtige Brandschutz oft vernachlässigt. Deuring [1] hat erstmals Brandversuche an lamellenverstärkten Stahlbetonträgern durchgeführt und damit die Grundlage für weitere Überlegungen geschaffen.

2 Praktische Ausführung

Bei der bauhandwerklichen Ausführung von Lamellenverstärkungen und -verkleidungen handelt es sich um sehr anspruchsvolle Baukonstruktionen. Zum Erfolg führen kann nur eine grosse Erfahrung sowie zuverlässiges und verantwortungsbewusstes Handeln. Die Qualitätssicherung hat dementsprechend einen hohen Stellenwert.

Der Raum zwischen Betondecke und Brandschutzverkleidungen muss auch bei vollflächigen Verkleidungen luftdicht abgeschlossen sein. Dementsprechend ist den Wand- und allfälligen Stützenanschlüssen spezielle Beachtung zu schenken.

Zusätzlich sind nach Möglichkeit auch die einzelnen Luftkammern von Rost zu Rost luftdicht auszubilden. Damit kann in einem kleineren Brandfall die allfällige Beschädigung der Klebebewehrungen örtlich begrenzt werden.

3 Verstärkungen an der Deckenoberfläche

Normalerweise werden die Lamellen an der Deckenuntersicht angebracht, d. h. die Deckenplatten werden im Feld verstärkt. Eine Verstärkung der Stützenbereiche an der Deckenoberfläche ist mit Stahl-Lamellen möglich, sofern trotz der Verstärkung noch eine genügende Rotationsfähigkeit des Stahlbetonquerschnitts vorhanden ist. Hingegen ist die über den Stützen erforderliche Rotationsfähigkeit des mit CFK-Lamellen

verstärkten Stahlbetonquerschnitts nicht zu erreichen. Im Gegensatz zu den Stahllamellen ist bei den CFK-Lamellen kein Fliessbereich vorhanden, d. h. sie weisen keine plastische Verformungsreserve auf. Im Folgenden wird nur der Fall Lamellen an der Deckenuntersicht behandelt.

4 Brandschutz-Verkleidungen für die Lamellen

Brandschutzverkleidungen von Lamellen sollen in der Regel aus zwei Platten bestehen. Einerseits kann damit das Problem von durchgehenden Plattenfugen durch Versetzen der beiden Fugen gelöst werden, und andererseits – vor allem bei stärkeren Verkleidungen –, können die z. T. etwas spröden Plattenmaterialien die im Brandfall allenfalls auftretenden grossen Deckendurchbiegungen besser mitmachen, ohne zu brechen.

5 Temperaturen im Brandfall

Um Aussagen über die im Kleber zu erwartenden Temperaturen machen zu können, wurden bei der Firma Geilinger AG in Bülach Computer-Berechnungen in Auftrag gegeben. Verwendet wurde das 2D-Programm MAPTEMP, das am Polytecnico di Milano weiterentwickelt wurde aus dem FE-Programm FIRES-T3 der University of California. Das Programm berücksichtigt temperaturabhängige thermische Materialeigenschaften.

Als Brandbeanspruchung wurde der ISO-Normbrand angenommen.

Die Berechnungen wurden mit Promatect-Brandschutzplatten durchgeführt. Für Plattendicken ≤ 20 mm wurden die schwereren Platten H ($\rho \cong 900$ kg/m³) und für ≥ 20 mm die leichteren Platten L ($\rho \cong 450$ kg/m³) eingesetzt.

Mit den von der Firma Promat AG angegebenen Werten für die Wärmeleitfähigkeit λ und die Wärmekapazität c wurden die in den EMPA-Brandversuchen mit Promatect-Verkleidung gemessenen Werte nicht erreicht. Zur Kalibrierung konnte nur der EMPA-Versuch mit 40 mm Promatect-L (BR 05) [1] verwendet werden. In der Lamelle ergab sich eine gute Übereinstimmung bis ca. 100 °C – d. h. für den massgebenden Bereich – wenn die Werkangaben für λ und c um je 15% ungünstiger angenommen wurden: $\lambda' = 1.15 \cdot \lambda$, $c' = 0.85 \cdot c$. Der Feuchtigkeitsgehalt der Promatect-Platten wurde nicht direkt berücksichtigt. Die der Berechnung zugrunde gelegten Werte λ' und c' sind in den Tabellen 1 und 2 enthalten.

Temperaturen	Wärmeleitfähigkeit λ' W / m · K	Wärmekapazität c' J / kg · K
0 - 100 °C	0.195	612
100 - 200 °C	0.197	718
200 - 300 °C	0.201	785
300 - 400 °C	0.209	833
400 - 500 °C	0.219	878
500 - 600 °C	0.231	938
600 - 700 °C	0.246	1030
700 - 800 °C	0.264	1180
800 - 900 °C	0.284	1390
900 - 1000 °C	0.307	1700
1000 - 1100 °C	0.333	2100

Tabelle 1. Angenommene Wärmeleitfähigkeit λ' und Wärmekapazität c' für Promatect-H.

Temperaturen	Wärmeleitfähigkeit λ' W / m · K	Wärmekapazität c' J / kg · K
0 - 100 °C	0.078	612
100 - 200 °C	0.082	717
200 - 300 °C	0.087	787
300 - 400 °C	0.094	836
400 - 500 °C	0.104	878
500 - 600 °C	0.116	929
600 - 700 °C	0.131	1000
700 - 800 °C	0.150	1120
800 - 900 °C	0.173	1280
900 - 1000 °C	0.199	1510
1000 - 1100 °C	0.231	1830

Tabelle 2. Angenommene Wärmeleitfähigkeit λ' und Wärmekapazität c' für Promatect-L.

Für die übrigen Baustoffe wurden folgende Werte angenommen:

- CFK-Lamellen: $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$,
 $\lambda = 0,55 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (quer zur Lamelle), $c = 600 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.
- Stahl-Lamellen: gemäss [2]
- Beton: gemäss [2]
- Luftspalt: $H =$ Abstand zwischen Betondecke und Brandschutzplatten;
 $H = 25 \text{ mm} : \lambda = 0.200 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,
 $c = 1000 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$;
 $H = 10 \text{ mm} : \lambda = 0.091 \text{ W/m} \cdot \text{K}$,
 $c = 1000 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.
Die Dichte wurde nach [3] in Funktion der Temperatur angenommen.
Weiter wurde angenommen, dass der Luftraum zwischen Betonuntersicht und den zwei Brandschutzplatten luftdicht abgeschlossen sei.

In der Computer-Berechnung wurde die im Mittel ca. 1 mm dicke Kleberschicht vernachlässigt. In einem Fall wurde der Einfluss der Kleberschicht an einer Stahl-Lamelle untersucht (s. 8.9).

Wiedergegeben werden in dieser Arbeit nur jeweils die speziell interessierenden Klebertemperaturen.

6 Zwei Fälle von Verstärkungen sind zu unterscheiden

Bei der Verstärkung von Stahlbetonplatten mit Lamellen müssen zwei Fälle grundsätzlich unterschieden werden:

A Die vorhandene Stahlbetondecke wird nicht geschwächt.

Die Deckenverstärkung ist z. B. erforderlich zur Erhöhung der zulässigen Nutzlast.

B Die vorhandene Stahlbetondecke wird geschwächt.

Z. B. durch eine grössere Deckenöffnung.

7 Fall A: Stahlbetondecke wird nicht geschwächt

7.1 Einführung

Normale statische Feuerwiderstandsnachweise, die sogenannten Klassierungsnachweise mit dem Normbrand, werden nach folgendem Prinzip geführt:

Die Sicherheitsreserve auf der vollen Belastung (Eigengewicht, Auflasten, Kennwert der Nutzlasten) darf durch die Festigkeitseinbusse des Betons in Stützenbereichen und der einbetonierten Bewehrungen in den Feldbereichen infolge Temperatureinwirkungen durch Brand aufgebraucht werden, d. h. der Gesamtsicherheitsfaktor von z. B. ca. 1.65 darf für die konstant bleibende volle Belastung auf 1.0 sinken.

Betrachtet wird hier eine Decke, bei der die zulässige Nutzlast erhöht werden soll. Für den Kaltzustand wird dies durch Ankleben von Lamellen erreicht. Diese Lamellenkonstruktionen vor den Brandeinwirkungen zu schützen ist aber sehr aufwendig, weil die Kleber unter Temperaturbeanspruchung ihre Festigkeit sehr schnell verlieren.

7.2 Überlegungen zum Fall Brand

Bei der erforderlichen Tragwerk-Sicherheit im Brandfall geht es vor allem um eine ausreichende Sicherheit gegen Einsturz.

Wenn die vorhandene Stahlbetondecke durch eine vollflächige Brandschutzverkleidung (Bild 1) so geschützt wird, dass die Feldbewehrungen und der Beton im Stützbereich keine bedeutende Festigkeitseinbuße erfahren, dann ist auch bei Vernachlässigung der Lamellenverstärkungen im Brandfall die volle Traglast (z. B. ca. 1.65 x volle Belastung) der ursprünglich nicht verstärkten Decke noch vorhanden. Das heisst, wenn keine Festigkeitseinbuße vorhan-

den ist, kann die Sicherheitsspanne von ca. 1.65 im Kaltzustand bis 1.0 im Brandfall als Lasterhöhung für den Kaltzustand ausgenützt werden.

Somit ist im Brandfall die erforderliche Sicherheit 1.0 vorhanden, auch wenn die Lamellen-Verstärkungen ausfallen. Die für die Vermeidung von Festigkeitseinbußen im Beton und der einbetonierten Bewehrung notwendige Brandschutzverkleidung ist aber immerhin noch in der Lage, bei kleinen Bränden auch die Klebebewehrung vor zu hohen Temperaturen zu schützen.

Keine Bedeutung hat dabei, ob es sich um Stahl- oder CFK-Lamellen handelt, und ob diese vorgespannt sind oder nicht.

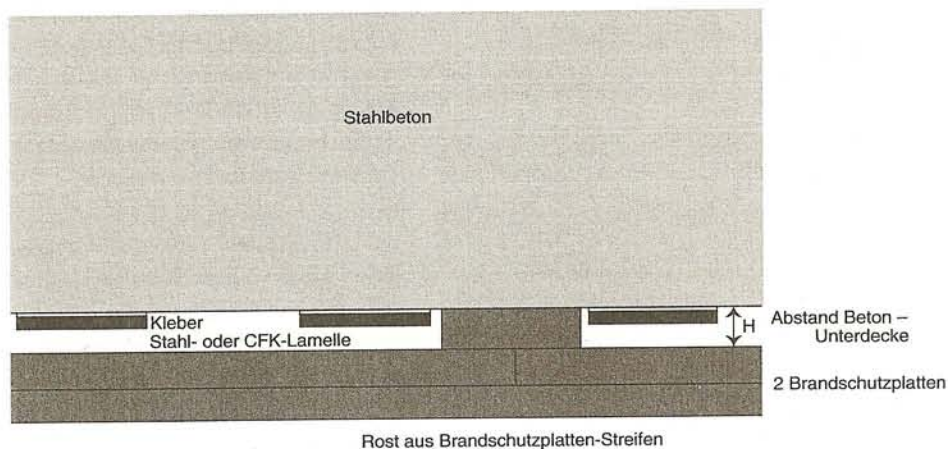


Bild 1. Querschnitt für vollflächige Brandschutzverkleidung der Lamellen (Fall A und B).
H = Abstand zwischen Betondecke und Verkleidung (Unterdecke).

7.3 Berechnung der Lasterhöhung im Fall Brand

Damit kann die aus Brandschutzüberlegungen maximal mögliche Erhöhung der Decken-Gesamtlast p_{neu} abgeleitet werden.

Unter der Voraussetzung, dass Durchlaufplatten mit den Methoden der Plastizitätstheorie bemessen sind, und genügende Rotationsfähigkeiten vorhanden sind, ergibt sich bei Annahme eines mittleren Lastfaktors γ_L von ca. 1.4 näherungsweise:

$$\underline{p_{neu}} \cong \frac{\gamma_R \cdot \gamma_L}{\gamma_B} p_{alt} \cong \frac{1.2 \cdot 1.4}{1.0} p_{alt} \cong \underline{1.65 \cdot p_{alt}} \quad (1)$$

$\gamma_R = 1.2$: Widerstandsbeiwert (Unsicherheiten in Konstruktion), im Stahlbeton 1.2;

$\gamma_B = 1.0$: Gesamtsicherheit im Brandfall bei voller Belastung.

Ist die Kaltbemessung nach Elastizitätstheorie vorgenommen worden, ergibt sich bei durchlaufenden

Decken mit genügender Rotationskapazität in der Regel eine etwas höhere Gesamtbelastung p_{neu} .

7.4 Berechnung der Lasterhöhung im Kaltzustand

Ausser der Begrenzung der Erhöhung der Gesamtbelastung aus Brandfall-Überlegungen ist noch eine weitere Grenze zu berücksichtigen.

Weil ein Versagen des Verbundes zwischen Lamellen und Beton auch im Kaltzustand nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann (z. B. durch mutwillige Beschädigungen oder Fehler bei der heiklen Applikation), ist im Kaltzustand nach Empfehlung EMPA ein Sicherheitsnachweis ohne Lamellen-Verstärkung mit einem Restsicherheitsfaktor von $\gamma = 1.1 \div 1.2$ zu führen. Massgebend für die Höhe dieses Wertes sind die Kenntnisse über die bestehende Konstruktion bezüglich Lasten, Querschnitts-Geometrie, Materialfestigkeiten etc.

$$\gamma \cong \gamma_R \cdot \gamma_L \frac{p_{alt}}{p_{neu}} \cong 1.1 \div 1.2 \quad (2)$$

Umgeformt ergibt sich die erhöhte Gesamtlast:

$$p_{neu} \cong \frac{\gamma_R \cdot \gamma_L}{1.1 \div 1.2} p_{alt} \cong 1.5 \div 1.4 \cdot p_{alt} \quad (3)$$

Aus dem Vergleich der Formeln (1) und (3) ergibt sich, dass der Nachweis im Kaltzustand die kleinere Gesamtlast ergibt und damit massgebend wird (sofern der Restsicherheitsfaktor grösser als 1.0 gewählt wird).

7.5 Zahlenbeispiel

Erhöhung der Nutzlast von 1000 auf 2000 kg/m²
(mit effektiven Lastfaktoren)

30 cm Beton	750 kg/m ²	
5 cm Belag	100 kg/m ²	
g	$\frac{850 \text{ kg/m}^2 \cdot \gamma_L = 1.3}{:}$	1105 kg/m ²
q _{alt}	$\frac{1000 \text{ kg/m}^2 \cdot \gamma_L = 1.5}{:}$	1500 kg/m ²
p _{alt}	$\frac{1850 \text{ kg/m}^2 \cdot \gamma_L = 1.41}{:}$	2605 kg/m ²

Fall Brand

$$p_{neu} \cong \frac{1.2 \cdot 1.41}{1.0} 1850 \cong 3100 \text{ kg/m}^2$$

g (Eigengewicht)	- 850 kg/m ²	
q _{neu, max} (Nutzlast)	<u>~ 2250 kg/m²</u>	> 2000 kg/m ²

Mit der Brandsicherheitsüberlegung ist eine Erhöhung der Nutzlast auf 2250 kg/m² möglich.

Kaltzustand

Grenzwert für den Kaltzustand unter Annahme, dass im vorliegenden Fall der kleinstmögliche Restsicherheitsfaktor von $\gamma = 1.1$ genüge.

$$p_{neu} \cong \frac{1.2 \cdot 1.41}{1.1} 1850 \cong 2850 \text{ kg/m}^2$$

g (Eigengewicht)	- 850 kg/m ²	
q _{neu, max} (Nutzlast)	<u>~ 2000 kg/m²</u>	$\hat{=} 2000 \text{ kg/m}^2$

Mit der Restsicherheitsüberlegung für den Kaltzustand ist eine Nutzlasterhöhung von 1000 auf 2000 kg/m² gerade noch möglich.

Die spezielle Sicherheitsüberlegung für den Kaltzustand setzt hier engere Grenzen (q_{neu, max} = 2000 kg/m²) als der Fall Brand (q_{neu, max} = 2250 kg/m²).

Wenn die erforderliche Nutzlasterhöhung grösser als 1000 kg/m² wäre, müsste allfällig nach Fall B vorgegangen werden.

7.6 Mindestdicken der Brandschutz-Verkleidungen

Bei der Festlegung der Plattendicken wurde von konstruktiven Minimaldicken ausgegangen, die genügen, um bis 60 Minuten Normbrand Festigkeitsabminderungen von Bedeutung im Beton und in der einbetonierten Bewehrung zu vermeiden. Darüber hinaus sollen die Plattendicken bei (nicht näher definierten) kleinen Bränden verhindern, die Temperatur im Kleber über 50 °C ansteigen zu lassen, und so Schäden an den Klebebewehrungen vermeiden.

Entsprechend den höheren Anforderungen an F 90 und F 120 wurden die erforderlichen Minimalstärken gefühlsmässig etwas erhöht (Tabelle 3).

Brandschutzplatten (Dicken in mm)	F 30	F 60	F 90	F 120
Spezial-Brandschutzplatten, z.B. Promatect-H, Pical H, Supalux-S	2 x 12	2 x 12	2 x 15	2 x 18
Gipsfaser, z.B. Fermacell	2 x 15	2 x 15	2 x 18	2 x 20
Gipskarton, z.B. Rigips	2 x 18	2 x 18	2 x 20	3 x 15

Tabelle 3. Mindestdicken für vollflächige Verkleidungen der Lamellen im Fall A, d. h. nur, wenn die vorhandene Decke nicht geschwächt wird.

Für die Befestigung der Verkleidungen ist in der Regel ein Rost aus Brandschutzplatten-Streifen von ca. 80 ÷ 100 mm Breite zu erstellen. Befestigungen aus Metall dürfen niemals durchgehend ausgeführt werden.

Mit dem Computer wurden Temperaturen berechnet. Der angenommene Lamellen-Achsabstand von 300 mm dürfte allgemein gültige Resultate ergeben (Tabelle 4).

erf. Feuerwiderstand der Decke	F 30	F 60	F 90	F 120
Promatect-H, Dicke in mm	2 x 12	2 x 12	2 x 15	2 x 18
Temperatur nach 30 min Normbrand	57 °C	57 °C	46 °C	~ 39 °C
Brandzeit bis 50 °C erreicht werden	26 min	26 min	33 min	~ 40 min
Brandzeit bis 100 °C erreicht werden	57 min	57 min	80 min	~ 95 min

Tabella 4. Klebertemperaturen nach 30 min sowie Brandzeiten bis zur Erreichung von 50 resp. 100 °C im Kleber. Stahl-Lamellen 10/120 mm, Abstand Verkleidung von Betondecke $H = 25$ mm.

Wird ausnahmsweise bei 10 mm starken Stahl-Lamellen die Brandschutzverkleidung ohne Zwischenraum zu den Lamellen auf $H = 10$ mm befestigt, werden die Klebertemperaturen erwartungsgemäss höher. Nach 30 min Brandzeit ergeben sich bei einer Verkleidungsdicke von 2 x 12 mm bereits 96 °C anstatt 57 °C bei einem Abstand H von 25 mm.

Von Interesse sind noch die Temperaturen an der Betonunterseite und den einbetonierten Feldbewehrungen. Für den Verkleidungsabstand 25 mm ergibt sich nach 120 Minuten Branddauer bei 2 x 18 mm Promatect-H eine Betontemperatur von ca. 135 °C und in der Bewehrung maximal ca. 100 °C.

Bei einem Verkleidungsabstand von 10 mm und 10 mm dicken Stahl-Lamellen resultiert nach 60 Minuten mit 2 x 12 mm Promatect-H im Beton ca. 160 °C und in der Bewehrung ca. 105 °C. Auch diese Temperaturen haben im Beton und in der Feld-Bewehrung noch keinen Festigkeitsverlust von Bedeutung zur Folge.

7.7 Forderung Nichtbrennbarkeit

Wird für einen Bauteil Nichtbrennbarkeit gefordert, ist wegen der Brennbarkeit des Klebers und allfällig der CFK-Lamellen eine Verkleidung mit Brandschutzplatten für die Anforderung F 30 zu empfehlen.

7.8 Stützen

Stahlbetonstützen sind mindestens auf 200 mm Höhe unter der Deckenverkleidung mit Brandschutzplatten zu verkleiden und dicht abzuschliessen, z. B. durch Brandschutz-Spachtelmasse und -Kitt. Unverkleidete Stahlstützen sind immer – wegen ihrer sehr guten Wärmeleitfähigkeit – auf die ganze Raumhöhe mit Brandschutzplatten zu verkleiden.

8 Fall B: Einhaltung der erforderlichen Restsicherheit ist nicht möglich

8.1 Einführung

Die Einhaltung der Restsicherheit $\gamma = 1.1 \div 1.2$ im Kaltzustand kann aus zwei Gründen nicht möglich sein:

- Es handelt sich um eine grössere Lasterhöhung;
- die Decke wird durch einen Umbau geschwächt; z. B. durch eine Änderung des statischen Systems, beispielsweise durch eine grössere Deckenöffnung.

Ob oder unter welchen Bedingungen dieser Fall im Kaltzustand zugelassen werden kann, muss hier offen gelassen werden.

Hier wird gezeigt, wie bei allfälliger Anwendung des Falles B die aussergewöhnliche Einwirkung Brand bewältigt werden könnte.

In diesem Fall müssen die Lamellen auch im Brandfall einen Beitrag an die Tragfähigkeit leisten. Dies ist nur möglich, wenn die geklebten Lamellen mit qualitativ hochwertigen und verhältnismässig dicken Brandschutzverkleidungen geschützt werden (Einzelverkleidungen oder vollflächige Deckenverkleidung).

8.2 Festigkeitsverhalten von Klebstoffen auf Epoxidharzbasis

Nach [4] Seite 6 und nach Bestätigungen durch Spezialisten aus der Praxis kann für die Bemessung von folgendem Festigkeitsverhalten unter Temperaturbeanspruchung ausgegangen werden:

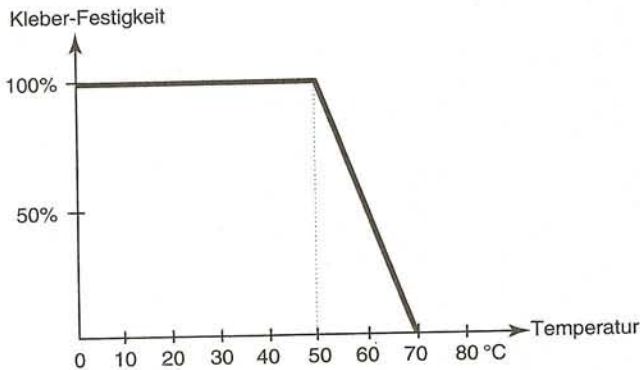


Bild 2. Relative Kleber-Festigkeit in Funktion der Temperatur.

Massgebend sind nicht mittlere Festigkeitswerte, sondern reduzierte Bemessungswerte.

Das Festigkeitsverhalten unter Temperaturbeanspruchung ist sehr ungünstig. Der Bemessungswert muss berücksichtigen, dass neben dem Festigkeitsverhalten auch das Temperaturverhalten der Kleber durch die Applikationsbedingungen negativ beeinflusst werden können. Zudem kann die im Kleber effektiv vorhandene Temperatur kaum exakt vorausbestimmt werden (Versuche streuen ziemlich stark und zuverlässige Materialkennwerte für Temperaturberechnungen sind kaum zu finden).

Zu berücksichtigen sind die Temperaturen am Rande des Lamellenquerschnitts. Diese Werte sind bei Stahl-Lamellen etwas höher – und bei CFK-Lamellen deutlich höher als in der Lamellenmitte.

Im Kaltzustand tritt Scherbruch in der Lamellen-Längsrichtung nicht im Kleber ein, sondern immer im Beton, wenige cm über dem Kleber.

Unter Temperatureinwirkung sinkt die Kleber-Festigkeit deutlich schneller ab als die Betonfestigkeit. Daher kann der Bruch in Lamellen-Längsrichtung sowohl im Beton als auch im Kleberbereich auftreten. Mehrheitlich tritt er zwischen Lamelle und Kleber auf. Offenbar befindet man sich mit den heute erhältlichen Klebern bei Temperaturbeanspruchung im Grenzbereich zwischen Beton- und Kleberversagen.

Es wird vorgeschlagen, diesen Grenzbereich mit der Bemessungsfestigkeit des Klebers unter Temperatureinwirkung zu erfassen.

8.3 Stahl-Lamellen

Der Tragwiderstand von mit Stahl-Lamellen verstärkten Stahlbetonquerschnitten kann mit den üblichen einfachen Gleichgewichtsbetrachtungen für Stahlbeton ermittelt werden.

Im Feld wirken auf der Zugseite die Fließkraft der Bewehrung und der Stahl-Lamellen. Bei Temperaturen über 50 °C bis 70 °C ist die reduzierte Festigkeit des Klebers zu ermitteln. Mit dieser Festigkeit kann die im Brandfall noch vorhandene Verankerungskraft für die Lamellen und damit die noch mögliche Lamellenkraft berechnet werden.

Die Beton-Druckkraft ergibt sich aus der Summe der Zugkräfte. Betonbruch vor Fließen der Bewehrung und der Lamellen – d. h. Spröbruch – ist zu vermeiden.

Die Traglast des Einzelfeldes (Feldmomente und allfällige Stützenmomente bei genügender Rotationsfähigkeit) kann im Brandfall nach den Methoden der Plastizitätstheorie berechnet werden.

Stahl-Lamellen sind immer gegen Herunterfallen infolge Versagen des Klebers – z. B. durch mechanische Beschädigung oder Brand – zu sichern.

8.4 CFK-Lamellen

Wegen des Fehlens eines Fließbereichs bei CFK-Lamellen kann der Tragwiderstand im Feldquerschnitt nicht nach den Regeln des Stahlbetons ermittelt werden. Er kann z. B. nach [5] berechnet werden.

Sofern im Brandfall nicht zuerst das Versagen des Feldquerschnittes erfolgt – was schon wegen den negativen Zwängungsmomenten über den Stützen aus Temperaturbeanspruchung von unten unwahrscheinlich ist – ergibt sich die Traglast des Einzelfeldes aus dem Tragwiderstand der Feld- und allfälliger Stützenquerschnitte, sofern genügende Rotationsfähigkeit vorhanden ist.

In Decken sind CFK-Lamellen nur anwendbar, wenn nicht vor dem Biegeversagen Schubrisse an der Platten-Unterseite auftreten. Die durch den Höhenversatz der Schubrisse erzeugten Zug-Ablenkräfte in den Lamellen hätten unverzüglich ein Ablösen der CFK-Lamellen zur Folge.

8.5 Im Brandfall ungeschützter Stützenbereich

Im Normalfall mit Lamellenverstärkungen im Feldbereich kann bei genügender Rotationsfähigkeit im Kaltzustand über den Stützen die volle Fließkraft der oberen Bewehrung eingesetzt werden. Hingegen führt die Temperatur beim Fehlen einer Brandschutzverkleidung an der ungeschützten Unterseite zu einem Festigkeitsverlust im Beton. Dieser kann näherungsweise nach CEB so berücksichtigt werden, dass der Beton über der Temperaturkurve 500 °C ohne Abminderung voll berücksichtigt werden darf und der darunterliegende Beton ganz vernachlässigt wird. Als Näherung kann die zu vernachlässigende Betonschicht nach [6] wie folgt angenommen werden:

F 30 : 5 mm	F 90 : 26 mm
F 60 : 17 mm	F 120 : 33 mm

8.6 Lösung für die Praxis

Die Kleberfestigkeit fällt nach 50 °C sehr steil ab. Wenn die Traglast ungefähr erhalten werden soll, müssen die Brandschutzverkleidungen so bemessen sein, dass im Kleber 50 °C an keiner Stelle überschritten werden. Dann sind in den verkleideten Bereichen noch ungefähr die vollen Baustoff-Festigkeiten und damit die vollen Tragwiderstände vorhanden.

Bei Einzelverkleidungen von Lamellen in Feldbereichen ist darauf zu achten, dass neben bzw. zwischen den Brandschutzverkleidungen die vollen Brandtemperaturen auf die Betonunterseite wirken, und dementsprechend der Beton und die unteren Bewehrungen an Festigkeit verlieren. Dies gilt mindestens auch teilweise für den Randbereich über den Verkleidungen, z. B. bis in eine Tiefe von ca. 5 cm.

Werden zwei oder mehr Lamellen nebeneinander angeordnet, kann eine allfällige Überschreitung der Temperatur 50 °C akzeptiert werden, wenn die über 50 °C liegenden Bereiche der beiden äusseren Lamellen in der Berechnung vernachlässigt werden. Näherungsweise kann im Temperaturbereich um 50 °C der Temperaturabfall im Kleber vom Lamellenrand bis zum nächstliegenden Sechstelstpunkt mit –60% der Temperaturdifferenz Mitte (M) – Rand (R) nach Tabelle 5 angenommen werden. Bedeutung hat dies vor allem für die CFK-Lamellen, weil hier die Temperaturdifferenz innerhalb der Lamelle wesentlich grösser ist als bei den Stahl-Lamellen.

8.7 Konsequenzen aus der Nichteinhaltung der Restsicherheit γ im Kaltzustand

Das Nichteinhalten einer Restsicherheit $\gamma = 1.1 \div 1.2$ im Kaltzustand ist eine einschneidende Einbusse für die Qualität und Sicherheit einer Konstruktion.

Mit der Beschränkung der Klebertemperatur auf 50 °C wird in der Regel die Brandsicherheit $\gamma_B \geq 1.0$ erfüllt. Die Sicherheit einer Decke kann z. B. mit der sich für Brandwiderstands-Berechnungen sehr gut eignenden Bruchlinientheorie nachgewiesen werden.

Bei Restsicherheiten unter $1.1 \div 1.2$ – z. B. bei grösseren Deckenöffnungen – sind Verstärkungs-Massnahmen für den Kaltzustand zwingend erforderlich, um die Nachteile der Konstruktion wenigstens teilweise zu kompensieren. Es scheint auch sinnvoll, für

den Fall Brand – um die Wahrscheinlichkeit eines plötzlichen Versagens der Lamellen-Verstärkungen und daraus allenfalls der Decke möglichst tief zu halten – die Brandschutzverkleidung zu verstärken. Damit wird der schwächste Punkt der Konstruktion – der Kleber – besser geschützt.

Denkbar wäre für den Kaltzustand eine Erhöhung des Widerstandbeiwertes γ_R z. B. bis 50%, von 1.2 auf maximal 1.8 bei sehr kleiner Restsicherheit, d. h. wenn γ weit unter 1.0 liegt –, inkl. entsprechender Verstärkung der Verankerung – und für den Fall Brand eine grössere Dicke der Brandschutzverkleidung, ebenfalls z. B. bis 50%. Bei einzeln verkleideten Lamellen sind die Verkleidungen auch zu verbreitern. Je stärker die Tragsicherheit der Decken im Kaltzustand von der Klebebewehrung abhängt, desto grössere Verstärkungs-Massnahmen sind erforderlich.

Bei Stahl-Lamellen besteht die Möglichkeit, die Verankerungen durch Stahldübel oder -anker zusätzlich mechanisch in den Beton zu verankern. Bei Stahl- und CFK-Lamellen kann durch Tellerfedern oder Anpressplatten ein Querdruck auf den Verankerungsbereich erzeugt und dadurch die Verankerungskraft erhöht werden. Wie weit im Brandfall bei Tellerfedern und Anpressplatten die erhöhte Verankerungskraft erhalten bleibt, muss allerdings noch geklärt werden.

Im Moment dürften daher bei allfälliger Anwendung des Falles B Stahl-Lamellen mit mechanischen Verankerungen im Vordergrund stehen.

8.8 Bemessung wenn Restsicherheit γ zu gering

1. Brandschutzverkleidung so wählen, dass Klebertemperatur nirgends 50 °C übersteigt.
2. Wenn Restsicherheit γ im Kaltzustand $< 1.1 \div 1.2$: Es werden Verstärkungsmassnahmen erforderlich. Empfohlen werden Konstruktionsverstärkungen (a) und Verbesserung des Temperaturschutzes im Brandfall (b).
 - a) Widerstandsbeiwert γ_R im Kaltzustand entsprechend dem vorhandenen Restsicherheitsfaktor γ im Kaltzustand bis maximal 50% erhöhen. Bei Stahl-Lamellen evtl. Verstärkung der Verankerungen durch Stahldübel oder -anker.
 - b) Brandschutzverkleidung bis maximal 50% verstärken.

8.9 Temperaturberechnungen mit Computer

In den Tabellen 5 und 7 sind die Klebertemperaturen für die Normbrand-Zeiten 30, 60, 90 und 120 min bis

ca. 100 °C wiedergegeben. Bild 3 zeigt ein Beispiel eines Resultat-Ausdruckes der Computer-Berechnung.

Aufgetragen ist ein Deckenquerschnitt bis zur Lamellenmitte für eine einzeln verkleidete Lamelle.

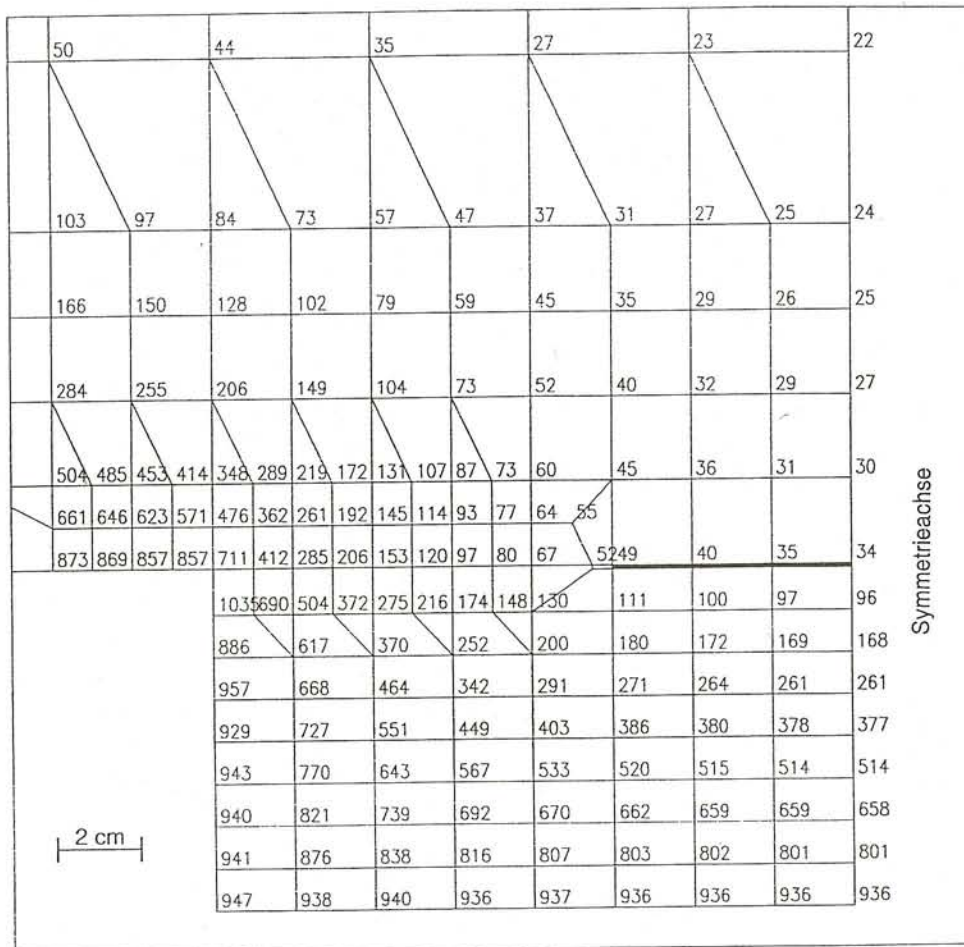


Bild 3. Deckenausschnitt bis Lamellenmitte für einzeln verkleidete Lamelle im Fall B. Temperaturen in °C aus Computer-Berechnung für 60 min Normbrand. CFK-Lamelle 1/120 mm, Promatect-L 80/320 mm.

Wie bereits erwähnt, wurde der Einfluss der im Mittel ca. 1 mm dicken Kleberschicht in der Computer-Berechnung vernachlässigt. Die temperaturspezifischen Eigenschaften des Klebers dürften denen der CFK-Lamellen ähnlich sein.

Die Temperaturdifferenzen zwischen 1 und 2 mm starken CFK-Lamellen sind sehr klein. Sie betragen bis ca. 1°C. Daraus darf geschlossen werden, dass auch die Berücksichtigung der Kleberschicht über den CFK-Lamellen Temperaturänderungen in der gleichen Größenordnung zur Folge haben könnte.

Weil die CFK-Lamellen wegen der schlechteren Wärmeleitfähigkeit als der Stahl höhere Randtemperaturen aufweisen, wurde an einem Fall untersucht, ob die Berücksichtigung der Kleberschicht auf den Stahl-Lamellen eine ähnliche Auswirkung habe. Berechnet wurden die Temperaturen für den Fall

Stahl-Lamelle 10/120 mm, Verkleidung Promatect-L 2 x 30 mm.

Die Klebertemperaturen haben sich am Lamellenrand bis ca. 2°C, entsprechend ca. 4%, erhöht und in der Lamellenmitte um ähnliche Werte gesenkt. Grundsätzlich hat die Kleberschicht also die gleiche Wirkung wie die CFK-Lamellen (s. 8.9.1.1); in der Größe allerdings stark gemildert durch die zusätzlich vorhandene Wärmeleiter-Wirkung der Stahl-Lamellen.

Bei der Bestimmung der erforderlichen Verkleidungsdicken wurde der Einfluss der Kleberschicht auf die Brandtemperaturen vernachlässigt. Er wird – wenn die Temperatur bereits ohne Kleberschicht ca. 50°C beträgt – als Toleranz in Kauf genommen.

Lamelle			Verkleidung		30 min		60 min		90 min		120 min									
Material	Breite mm	Dicke mm	Breite mm	Dicke mm	M °C	R °C	M °C	R °C	M °C	R °C	M °C	R °C								
Stahl	120	4	320	40 2 X 20	40	41	80	83	(119)	(122)										
		10			36	36	72	74	(110)	(112)										
		16			33	34	66	68	(102)	(104)										
CFK	1	42			45	81	94	(120)	(131)											
	2	41			44	80	93	(119)	(130)											
Stahl		4			60 2 x 30	60 2 x 30	25	26	50	54	83	88	(115)	(119)						
		10	24	25			47	48	77	80	(109)	(111)								
		16	24	24			43	45	72	74	(102)	(104)								
Stahl	240	10	640	640			23	23	37	38	56	57	75	76						
		CFK					120	1	320	25	29	49	63	80	101	(112)	(130)			
Stahl		4					80 2 x 40	80 2 x 40	22	23	37	41	63	68	92	97				
		10							22	22	35	37	59	62	87	90				
		16							21	22	34	35	56	58	82	84				
CFK		1							440	440	21	25	34	49	58	81	86	(111)		
		240									21	25	29	49	44	80	62	(108)		
Stahl	120	4									320	100 2 x 50	21	22	32	36	53	58	78	84
		10											21	22	31	33	50	53	74	78
		16			21	21							30	31	48	50	70	73		
CFK		1			640	640							20	24	28	44	46	71	70	98
		2											20	24	28	44	46	70	70	98

Tabelle 5. *Einzel verkleidete Lamellen im Fall B. Klebertemperaturen bei Verkleidung mit Promatect-L in Lamellenmitte (M) und am Lamellenrand (R).*

8.9.1 Einzel verkleidete Lamellen

Die Lamellenbreite beträgt in der Regel 120 mm, in drei Fällen 240 mm. Die Dicken der Stahl-Lamellen betragen 4, 10 und 16 mm, und der CFK-Lamellen 1 und z. T. auch 2 mm. Für die Lamellenverkleidungen wurde mit zwei Ausnahmen der heute in der Regel angewendete seitliche Überstand von je 100 mm be-

rücksichtigt. Für die angenommene Regelbreite der Lamellen von 120 mm ergibt sich somit im Normalfall eine Verkleidungsbreite von 320 mm. Bei zwei Lamellen wurden die Überstände vergrößert auf je 200 mm. Als Dicken für die Brandschutzverkleidungen wurden 40, 60, 80 und 100 mm berücksichtigt (Tabelle 5). Im Folgenden werden einige Ergebnisse kommentiert.

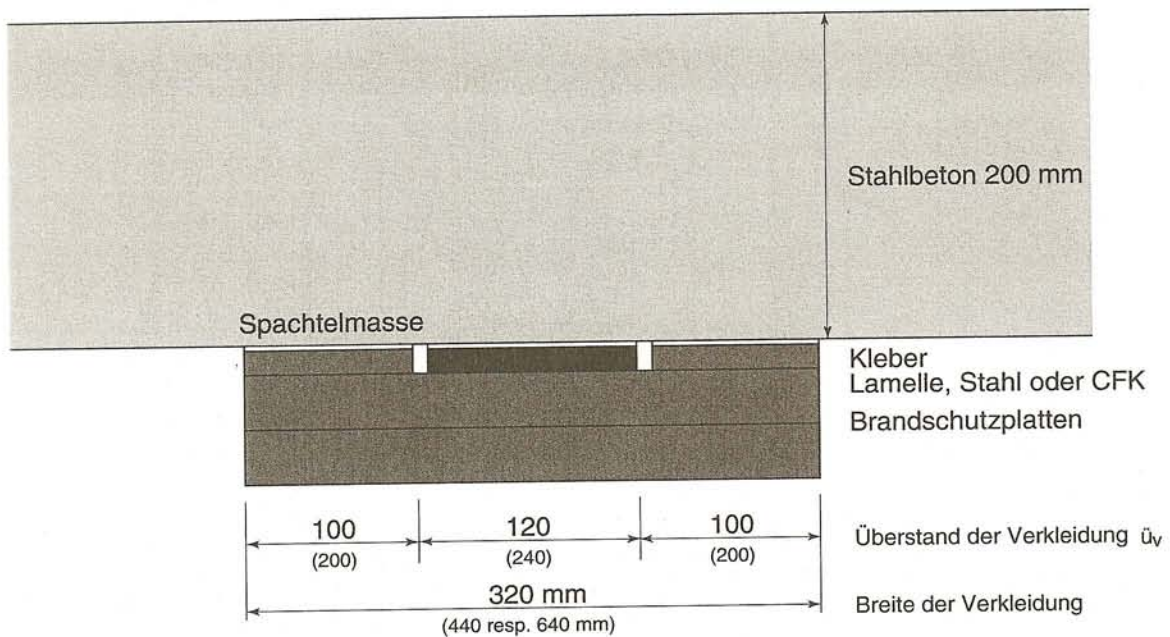


Bild 4. Normalquerschnitt für einzeln verkleidete Lamellen im Fall B.

8.9.1.1 Einfluss des Lamellenwerkstoffes (Stahl/CFK) auf die Temperaturverteilung im Kleber quer zur Lamelle

Die Temperaturdifferenzen im Kleber zwischen Lamellenmitte und -rand sind bei den CFK-Lamellen bedeutend grösser als bei den Stahl-Lamellen. Beispiel für 60 min Branddauer:

- Stahl 4/120 mm, 60 mm Promatect-L:
 $\Delta = 4 \text{ °C} \hat{=} 8\%$;
- CFK 1/120 mm, 80 mm Promatect-L:
 $\Delta = 14 \text{ °C} \hat{=} 44\%$.

Die höheren Temperaturen am Lamellenrand ergeben sich aus der Betonerwärmung neben der Verkleidung und dem dazu gehörenden Wärmefluss gegen die Lamelle. Die in Lamellenquerrichtung ungefähr um den Faktor 100 höhere Wärmeleitfähigkeit λ des Stahls im Vergleich zu CFK wirkt als effizienter Wärmeleiter, der die Wärme von den wärmeren Betonzonen am Lamellenrand in die weniger warmen Betonzonen in der Querschnittsmittte abführt. Der Temperatenausgleich wird in den Stahl-Lamellen mit zunehmender Dicke stärker.

Die Temperatur-Mittelwerte über den Lamellen-Querschnitt sind bei Stahl-Lamellen tendenziell etwas tiefer als bei CFK-Lamellen. Massgebend könnten hier die schnellere Weiterleitung der Wärme durch die Stahl-Lamellen an die Betonplatte und die wesentlich grössere Wärmeaufnahme-Kapazität der Stahl-Lamellen sein.

8.9.1.2 Einfluss der Verbreiterung der CFK-Lamellen von 120 auf 240 mm auf die Klebertemperatur

Der Vergleich von 240 mit 120 mm breiten CFK-Lamellen von 1 mm Dicke, 80 mm Brandschutzverkleidung und einem Überstand dieser Platten von je 100 mm zeigt praktisch identische Klebertemperaturen am Lamellenrand, jedoch werden die Temperaturen in Lamellenmitte bei den 240 mm breiten Lamellen deutlich geringer: nach 60 min – 15%, nach 90 min – 24% und nach 120 min – 38%. Der Grund liegt darin, dass der Einfluss des seitlich befeuerten Betons in der Lamellenmitte – wegen grösserem Abstand – kleiner wird.

8.9.1.3 Einfluss der Verkleidungs-Überstände 200 mm anstatt 100 mm auf die Klebertemperaturen

Weil die Temperaturunterschiede im Kleber bei einzeln und vollflächig verkleideten Lamellen recht gross wurden, interessierte die Frage, wie stark sich die Klebertemperaturen in einzeln verkleideten Lamellen durch Vergrösserung der seitlichen Überstände der Verkleidung von 100 auf 200 mm reduzieren lassen.

Bei den Stahl-Lamellen 10/120 bzw. 10/240 mm beträgt die Temperatur-Reduktion am Rande ungefähr zwischen 8% (F 30) und 32% (F 120).

Für die CFK-Lamellen 1/240 mm und 80 mm Promatect-L sind die Rand-Temperaturen in Tabelle 6 aufgeführt.

Branddauer	30 min	60 min	90 min	120 min
seitlicher Überstand je 100 mm	25 °C	49 °C	80 °C	(108 °C)
seitlicher Überstand je 200 mm	21 °C	29 °C	44 °C	61 °C
Reduktion	- 16 %	- 41 %	- 45 %	- 44 %

Tabelle 6. Klebertemperaturen am Rande einer einzeln verkleideten CFK-Lamelle 1/240 mm mit 80 mm Promatect-L bei 100 und 200 mm seitlichen Überständen der Verkleidung.

Der Einfluss der seitlichen Befuerung der Deckenuntersicht auf die Klebertemperatur am Lamellenrand nimmt bei 200 mm Überstand der Verkleidung im Vergleich zu 100 mm sowohl für Stahl- als auch CFK-Lamellen wesentlich ab. Die Klebertemperaturen am Lamellenrand sind dementsprechend deutlich tiefer.

Über der Lamellenmitte nimmt die Temperatur bei CFK-Lamellen hingegen wesentlich geringer ab als am Rande, z. B. um ca. 0% (F 30) bis maximal 11% (F 120).

Grundsätzlich hängt die Maximaltemperatur im Kleber über dem Lamellenrand – ausser von der Verkleidungsdicke – vom Lamellenwerkstoff (Stahl oder CFK) und von der Grösse der Verkleidungs-Überstände ab. Die Breite der Lamelle beeinflusst im

wesentlichen nur die Klebertemperatur in Lamellenmitte.

8.9.2 Vollflächig verkleidete Lamellen

Für die Temperatur-Berechnungen an den vollflächig verkleideten Lamellen wurde die Dicke der Stahl-Lamellen mit 10 mm und der CFK-Lamellen mit 1 mm angenommen. Der Achsabstand der Stahl-Lamellen beträgt 150 und 300 und der CFK-Lamelle 300 mm. Als Abstand H zwischen der Deckenuntersicht und der Brandschutzverkleidung wurden im Normalfall 25 mm und in einem Fall 10 mm berücksichtigt. Die Dicken der Verkleidungen betragen 40, 60 und 80 mm (Tabelle 7).

Lamelle			Verkleidung		30 min	60 min	90 min	120 min	
Material	Dicke mm	Abstand mm	Abstand H mm	Dicke mm	°C	°C	°C	°C	
Stahl	10	150	25	40 2 x 20	29	52	74	95	
					30	53	77	99	
		300		60 2 x 30	22	32	46	61	
					22	33	48	64	
CFK	1	300			23	35	51	68	
Stahl	10	150	10	80 2 x 40	23	37	55	72	
					23	37	55	73	
		300			25	20	24	31	41
						20	24	32	42

Tabelle 7. Vollflächig verkleidete Lamellen im Fall B. Klebertemperaturen bei Verkleidung mit Promatect-L.

Erwartungsgemäss wirkt sich das Luftpolster zwischen Verkleidung und Betondecke und die fehlende seitliche Befeuerung der Deckenunterschicht günstig auf die Klebertemperaturen im Brandfall aus.

Weil der seitliche Einfluss durch die direkte Beton-erwärmung nicht vorhanden ist, ist die Temperatur-Differenz zwischen Lamellenmitte und -rand sehr klein, sie übersteigt in den Beispielen 1°C nirgends und hat somit keine Bedeutung. Aufgeführt sind die Randtemperaturen.

Bei einem Achsabstand der Lamellen von 300 mm ergeben sich tendenziell etwas höhere Kleber-Temperaturen als bei 150 mm. Im Bereich bis 50 °C wird aber die Differenz nicht höher als 2 °C und hat damit geringen Einfluss. Es ist nicht anzunehmen, dass ein grösserer Abstand als 300 mm merkbare Temperaturerhöhungen ergeben könnte.

8.10 Erforderliche Dicken der Brandschutzverkleidungen

In den Tabellen 8 und 9 sind die minimalen Verkleidungsdicken für den Fall B in Funktion der erforderlichen Feuerwiderstandszeit für Stahl- und CFK-Lamellen mit Überständen der Verkleidungen von 100 bzw. 200 mm aufgeführt; in Tabelle 8 für einzeln verkleidete Lamellen und in Tabelle 9 für vollflächig verkleidete Lamellen. Mit diesen Dicken wird im Kleber 50 °C in der Regel nicht überschritten.

Die aufgeführten Dicken verstehen sich ohne Zuschläge für den Fall Restsicherheit $\gamma < 1.1 \div 1.2$, die allfällig als Verstärkungs-Massnahme erforderlich werden.

Die Dicken wurden aufgrund der Temperaturberechnungen für Promatect-L ermittelt, wobei z. T. interpoliert bzw. extrapoliert werden musste.

Pical L weist ungefähr die gleichen Eigenschaften wie Promatect-L auf.

Feuerwiderstand	Stahl-Lamellen		CFK-Lamellen	
	$\ddot{u}_v = 100 \text{ mm}$	$\ddot{u}_v = 200 \text{ mm}$	$\ddot{u}_v = 100 \text{ mm}$	$\ddot{u}_v = 200 \text{ mm}$
F 30	2 x 20 mm	2 x 20 mm	2 x 20 mm	2 x 20 mm
F 60	2 x 30 mm*	2 x 25 mm*	2 x 40 mm	2 x 30 mm
F 90	2 x 40 + 30 mm*	2 x 40 mm*	> 110 mm	2 x 40 mm
F 120	> 110 mm	2 x 40 + 30 mm*	> 110 mm	> 110 mm

* $t_L \geq 8 \text{ mm}$

Tabelle 8. Einzeln verkleidete Lamellen im Fall B. Minimale Dicken der Brandschutzverkleidungen (ohne Zuschläge für Fall Restsicherheit im Kaltzustand $\gamma < 1.1 \div 1.2$). \ddot{u}_v = seitlicher Überstand der Verkleidung, t_L = Lamellendicke.

Feuerwiderstand	Stahl- und CFK-Lamellen	
	$H \geq 25 \text{ mm}$	$H \geq 10 \text{ mm}$
F 30	2 x 20 mm	2 x 20 mm
F 60	2 x 25 mm	2 x 30 mm
F 90	2 x 30 mm	2 x 35 mm
F 120	2 x 40 mm	2 x 45 mm

Tabelle 9. Vollflächig verkleidete Lamellen im Fall B. Minimale Dicken der Brandschutzverkleidung (ohne Zuschläge für Fall Restsicherheit im Kaltzustand $\gamma < 1.1 \div 1.2$). H = Abstand zwischen Betondecke und Brandschutz-Verkleidung (Unterdecke). Angenommene konstruktive Mindestdicke: 2 x 20 mm.

Literatur

- [1] *M. Deuring*: Brandversuche an nachträglich verstärkten Trägern aus Beton. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, EMPA-Bericht Nr. 148'795, 1994.
- [2] Eurocode 4, Part 1.2. ENV 1994-1-2.
- [3] The SFPE Handbook of fire protection engineering. Society of fire protection engineers. NFPA National fire protection association. 1988.
- [4] *M. Ladner, J. Pralong, Ch. Weder*: Geklebte Bewehrung: Bemessung und Erfahrungen. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, EMPA-Bericht Nr. 116/5, 1990.
- [5] *M. Deuring*: CFK-Lamellen im Bauwesen. Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 26, 1994.
- [6] CEB, Bulletin d'Information n° 145, Paris, 1982.

Jörg Rutz, Bauingenieur SIA

Für die Unterstützung während der Entstehung der vorliegenden Arbeit danken wir den Herren Dr. M. Deuring, Dr. Deuring + Oehninger AG, Winterthur; W. Steiner und G. Krämer, Sika AG, Zürich; Ch. Ruggli, StahlTon AG, Zürich; R. Wagner, Promat AG, Winterthur, und M. Braun, Geilinger AG, Bülach.