

Anwendung des Realbrand- Bemessungskonzeptes bei der Tirol-Therme Längenfeld

Gerald Huber
Christian Aste
Thomas Trauner
Jules Mathieu
Claude Klein

Anwendung des Realbrand-Bemessungskonzeptes bei der Tirol-Therme Längenfeld

Im Tiroler Ötztal in Österreich entsteht derzeit unter Nutzung einer natürlichen Heilwasserquelle ein großzügiges Thermenprojekt mit diversen Wasserlandschaften, einem Luxus-Hotel und Parkmöglichkeit für etwa 500 Fahrzeuge. Aus der Forderung einer autofreien Landschaftsgestaltung und dem hoch liegenden Grundwasserspiegel ergab sich die Notwendigkeit einer eingeschossigen Tiefgarage mit einer Dachfläche von ca. 12000 m². Die hohen Lasten aus der massigen Erdeinschüttung und der für diesen Bereich typischen Schneelast in Kombination mit möglichst großzügigen Parkverhältnissen ohne störende Stützen an den Fahrgassenrändern stellte eine Herausforderung für die Tragwerksplaner dar. Eine Stahl-Beton-Verbundkonstruktion stellte sich sowohl in Hinblick auf Ästhetik, Rohbaukosten und Baugeschwindigkeit als Optimum heraus. Dem Wunsch nach einer möglichst wirtschaftlichen Lösung ohne aufwendige Brandschutzmaßnahmen konnte hierbei nur durch eine objektbezogene Realbrandnachweisführung nachgekommen werden. Die Überzeugung der örtlichen Behörden von diesem zeitgemäßen Berechnungsverfahren anstelle der oft unwirtschaftlichen Standardnachweise war dabei von besonderer Bedeutung.

Application of a realistic fire design concept at a Thermal project in Austria. In a tyrolean alpine valley in Austria a generous thermal project with water sceneries, a luxurious hotel and parking area for 500 cars is actually being built using a healing spring water. The demand for a car-free countryside in combination with the given ground water situation led to an underground single park floor with a roof of approx. 12000 m². The high loads due to the massive soil coverage and the severe snow loads together with the wish for generous parking spaces without disturbing columns at the lane borders were a challenge for the engineers. Focussing on the architectural appearance, construction costs and erection time a steel-concrete composite structure proved to be optimal. To fulfil the economical demands avoiding expensive measures for fire protection a comprehensive theoretical investigation on the object-related natural fire conditions had to be carried out. In that regard especially the discussions with the local authorities and the achievement of their conviction for this up-to-date calculation method instead of the uneconomical standard fire design played an important role.

1 Einleitung

1.1 Projektvorstellung

Mit einem Kostenaufwand von ca. 70 Mio. € entsteht in Längenfeld auf 5 ha grüner Wiese eine moderne Erlebnis-Therme mit Schwimmbecken innerhalb einer Glaskristallhalle, Fitness- und Wellnessanlagen, einem 4-Sterne-Hotel mit 240 Betten, Restaurants, Außenbecken in Form punktgestützt-schwebender Schalen, einem Saunadort, einer Kindererlebniswelt mit Rutschen und einer großzügigen unterirdischen Garage (Bild 1). Baubeginn war im August 2002, die Rohbaufertigstellung ist für Oktober 2003 geplant, und im Jahr 2004 wird eröffnet.

Grundlage ist eine natürliche Thermalquelle mit einer Temperatur von 38 °C. Es sieht also so aus, als würden die Öztaler bald nicht nur wegen ihres fünftausendjährigen



Bild 1. Tirol-Therme Längenfeld „Aqua Dome“
Fig. 1. Tyrolean Thermal Project „Aqua Dome“

Urahen und der gepflegten Gletscherskipisten berühmt werden.

1.2 Garagenüberdachung

Die eingeschossige Tiefgarage für Hotel- und Tagesgäste umfasst 500 Stellplätze (Bild 2). Wegen des hohen Grundwasserspiegels infolge der benachbarten Öztaler Ache liegen diese auf nur -1,30 bis -1,60 m unter Terrain. Die Dachebene wird zur Landschaftsgestaltung überschüttet und bepflanzt.

Folgende klassische Ziele waren angestrebt:

- möglichst stützenfreie Konstruktion trotz Erdauflast und hoher Schneelast - für bequemes Rangieren und einen lichtdurchfluteten, übersichtlichen Raum
- schneller Baufortschritt

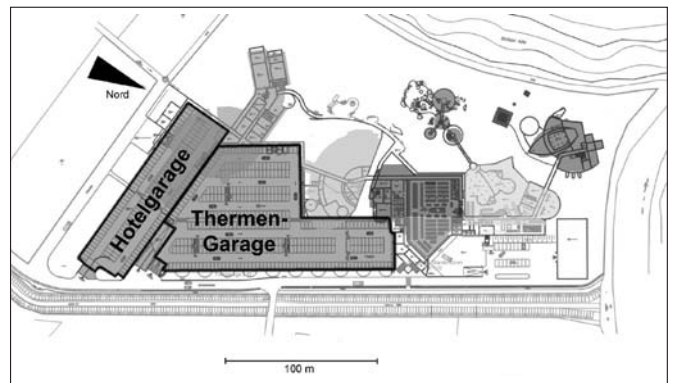


Bild 2. Bereich der eingeschossigen Tiefgarage
Fig. 2. Area of the underground car park

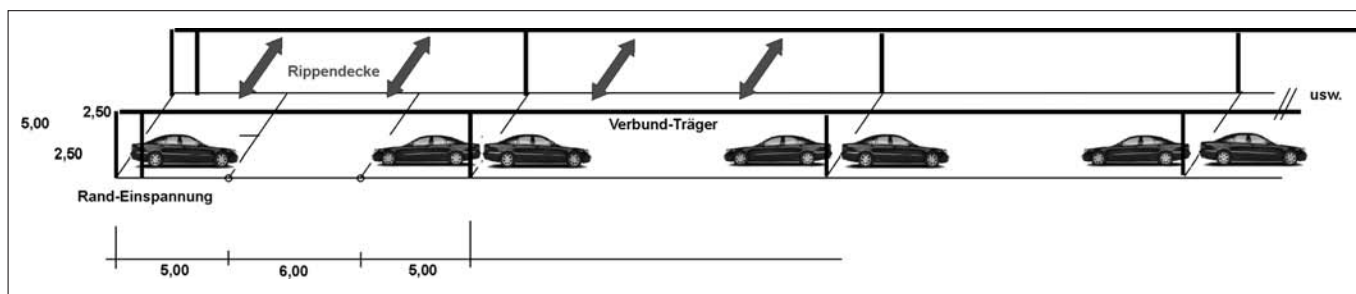


Bild 3. Statisches System: Durchlaufträger mit Randeinspannung

Fig. 3. Structural system: Continuous beams with end restraints

- Kostenoptimierung
- modernes Design, klare Ästhetik.

Daraus ergab sich primär eine Spannweite quer zur Fahr-gasse von 16 m (zwei Parkstreifen à 5 m und Fahrgasse mit 6 m) und damit angesichts der vorgegebenen Belastungs-situation eine Stahl-Beton-Verbundkonstruktion. Bei den Trägern der Thermengarage handelt es sich um durchlau-fende Verbundträger mit 16 m Stützweite (Bild 3). Infolge eines Zug-Druckstützenpaares am Trägerende konnte selbst dort ein nahezu voller Einspanngrad entsprechend einer Durchlaufwirkung erzielt werden. Ein vom Feldmo-ment dominiertes Endfeld liegt damit nicht vor. Die Ga-rage direkt unterhalb des Hotels erhält wegen des Kon-struktionsrasters der vier darüberliegenden Geschosse ein nicht ganz so großzügiges Stützenraster wie in den übrigen, überschütteten Tiefgaragenbereichen. Dort wech-seln sich Zweifeldträger mit 16 m Stützweite und Vier-feldträger mit einem unregelmäßigen Stützenraster (11,6 + 9,2 + 6,7 + 4,8 m) ab.

Folgende Querschnittstypen kamen bei der Warmbe-messung zur Anwendung (Bild 4): Stahlträger HEB 400 (S 355) mit obenliegender Betonplatte (3,5 + 10 cm, B 30/B 300, $f_{ck} = 26,5 \text{ N/mm}^2$) und Bewehrung in den Stützbereichen (BSt 550, $f_{sk} = 550 \text{ N/mm}^2$); Verdübelung mittels Kopfbolzen. Die mitttragende Breite im Feld wurde mit $0,25 \cdot 0,7 \cdot L$ abgeschätzt. Im Stützbereich wurde nur jene Bewehrung im Bereich $3 \cdot B_{\text{Flansch}}$ mitherrangezogen (28,3 cm²). Für die Träger im Bereich der Hotelgarage wurde zusätzlich ein Kammerbeton mit entsprechender

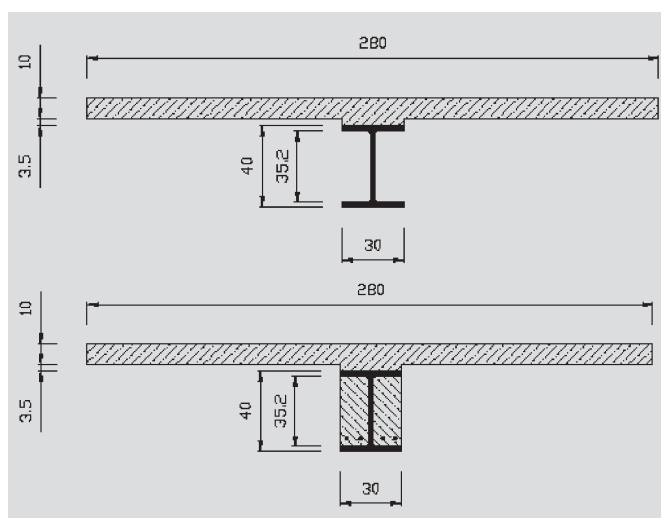


Bild 4. Trägerquerschnitt mit und ohne Kammerbeton

Fig. 4. Beam cross section with and without web encasement

Bewehrung (längs 4 cm² je Kammer + Verbügelung) berück-sichtigt. Bei den insgesamt ca. 12000 m² Überdachungs-fläche kommen ca. 2300 lfm. Träger zur Anwendung, woraus die Notwendigkeit der Optimierung des Decken-systems offensichtlich wird.

Aus der Wahl des Hoesch-Additiv-Deckensystems (Bild 5) quer zu den Verbundträgern folgte der Trägerab-stand mit 5 m im Regelbereich (zwei Stellplätze mit je 2,5 m Breite) und 4,2 m unterhalb des Hotels (1,5 Stell-plätze mit je 2,8 m Breite). Beim Hoesch-System liegt eine Stahlbetonrippendecke (20 + 10 cm) ohne Bügelbe-wehrung in Kombination mit einem hohen, selbsttragen-den Stahl-Trapezprofil vor, das auf Knaggen an den Trä-gerobergurten eingehängt wird. Die Blechtragfähigkeit ermöglicht ein unterstellungsfreies Betonieren.

Die Vorteile der Verbundlösung für die o. a. Rahmen-systeme decken sich mit den Planungszielen. Dazu kom-men die höhere Steifigkeit, das verbesserte Schwingungs-verhalten und geringere Kosten gegenüber einem reinen Stahlbau. Ein Betonfertigteilsystem würde industriehaft, plump und spröde ausfallen. Im Brandfall kommen noch folgende erhebliche Vorteile für die im Einsatz befind-lichen Löschmannschaften hinzu: Durch die Blechver-kleidung der Betonuntersicht gibt es keine knallartigen Oberflächenabplatzungen, und die Stahl-Verbundträger weisen eine große Verformbarkeit bzw. sichtbare Defor-mation (Duktilität) anstelle eines Sprödbrechens ohne Vor-warnung auf.

1.3 Warmbemessung

Verheerende Brandkatastrophen hat es in allen Jahrzehnten und in allen Ländern gegeben. Aber gerade die Schrecken über die jüngsten Unglücksfälle – Tauerntunnel, Gotthardtunnel, Kaprunbahn, Moskauer Fernsehturm und natürlich der 11. September – stecken gehörig in den Knochen. Wir Bauingenieure können und dürfen die Zuständigkeit nicht an das Schicksal, an die Feuerwehr oder auch an die Poli-tiker weiterschieben. „Wir müssen uns nicht nur dafür ver-antworten, was wir tun, sondern auch dafür, was wir nicht tun“ – sagte Molière!

Die Kenntnis über das Verhalten der Tragwerke im Kaltzustand ist bereits sehr umfassend. Die Baumateria-lien sind ausreichend gütegesichert, die Belastungen sind normiert. Auch über das Brandverhalten wissen wir schon sehr viel, und mit Hilfe moderner Berechnungsverfahren lassen sich Temperaturentwicklungen und -verteilungen im Raum und innerhalb der Tragquerschnitte sehr real verfolgen – und damit auch der Verformungsverlauf und der Zeitpunkt eines eventuellen Versagens.

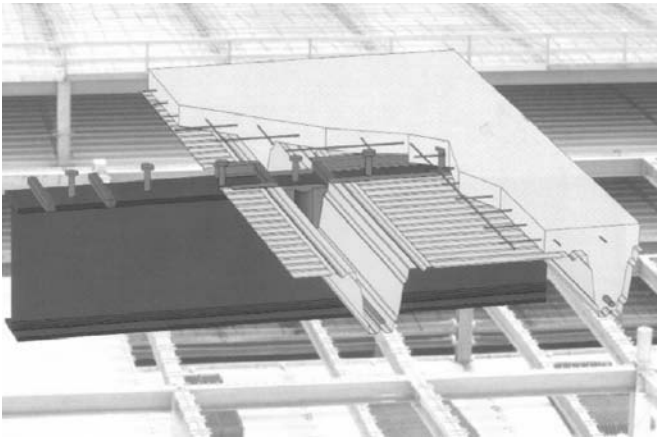


Bild 5. Additive Stahlblech-Stahlbeton-Rippendecke – System Hoesch

Fig. 5. Ribbed concrete floor in addition to steel sheeting – system of Hoesch

Die Temperaturbelastungen resultieren aus der jeweiligen realen Brandlast. Hier gibt es noch Abstimmungsprobleme und unterschiedliches Sicherheitsdenken. Vollgetankte Flugzeuge, Lieferwagen mit Molotow-Cocktails oder z. B. Campingbusse mit mehreren Gasflaschen sind keine Normlastfälle, jedenfalls derzeit nicht.

Der gegenständliche Bericht behandelt ein Realbrand-szenario, keinen Terroranschlag. Wir wollen den allenfalls betroffenen freiwilligen Feuerwehrmännern die Gewißheit geben, daß die Tragkonstruktion keine Überraschungen birgt; daß in der Thermengarage Längenfeld die Deformationen der Träger zwar groß sein würden, ein Einsturz jedoch zu keiner Zeit eintreten würde.

Die ON ENV 1994-1-2, die seit September 1999 in Österreich als Weißdruck verbindlich vorliegt, bietet generell drei verschiedene Nachweiskonzepte:

- klassifizierte Bemessungswerte in Tabellenform für bestimmte Bauteile
- vereinfachte Berechnungsverfahren für bestimmte Bauteile; z. B. F 30 (brandhemmend) bzw. F 90 (brandbeständig), basierend auf der Temperatureinwirkung aus der ISO-Normbrandkurve
- allgemeine Berechnungsverfahren zur Simulation des objektspezifischen Realverhaltens

Dabei heißt es: „Allgemeine Berechnungsverfahren müssen eine wirklichkeitstreue Beschreibung des Tragwerkes im Brandfall liefern. Sie müssen auf grundlegenden physikalischen Gesetzen aufbauen, so daß sie zu einer zuverlässigen Modellierung des zu erwartenden Verhaltens der maßgebenden Bauteile im Brandfall führen. Diese Berechnungsverfahren dürfen auf Einzelbauteile, auf Teil- und Gesamttragwerke und auf jede Art von Querschnitten angewendet werden.“

Während sich die vereinfachten Verfahren durch einen reduzierten Berechnungsaufwand auszeichnen, ist der Arbeitsaufwand beim Nachweis nach einem allgemeinen Berechnungsverfahren zwar wesentlich umfangreicher und nur mit modernen Simulationsprogrammen möglich. Dieser Mehraufwand macht sich dann aber in einer deutlich wirtschaftlicheren Konstruktion bezahlt!

Durch Informationsaufbereitung für die örtlichen Behörden konnte erreicht werden, daß die Offenheit für diese unterschiedlichen Nachweisprinzipien auch in den Baubescheid einfloß. Es wurde folgendes festgelegt: „Die tragenden Bauteile der Thermengarage sind entweder in der Brandwiderstandsklasse F 30 nach ÖNORM B 3800 auszuführen, oder es ist ein Nachweis durch ein Gutachten eines Ziviltechnikers oder einer akkreditierten Prüf-anstalt zu erbringen, daß die Tragfähigkeit der Stahlverbund-Deckenkonstruktion mindestens über einen Zeitraum von 30 Minuten gewährleistet ist.“ Für den Hotelgaragenbereich gilt dasselbe mit 90minütigem Widerstand.

Als Bonus wurde angeboten, anstelle der ursprünglich von den Behörden geforderten 60 Minuten Brandwiderstand in der Thermengarage einen zeitlich unbegrenzten Tragwiderstand im Brandfall nachzuweisen, dafür jedoch anstelle der ISO-Normbrandkurve auf die realen Brandgegebenheiten zurückgreifen zu können.

Die Vorgehensweise im Rahmen eines allgemeinen Berechnungsverfahrens (im weiteren als „Realbrand-Bemessung“ bezeichnet) gliedert sich in folgende Arbeitsschritte:

– thermische Analyse (s. Abschn. 2 und 3 dieses Aufsatzes): Bestimmung der realen Heißgastemperaturen anhand der aktuellen Gegebenheiten (aktuelle Brandlast und aktuelle Umgebungsparameter) und daraus Berechnung der realen Temperaturverteilung im statischen Querschnitt – mechanische Analyse (s. Abschn. 4): Ermittlung der temperaturspezifischen Materialkennwerte und daraus Resttragfähigkeit und Steifigkeit der Einzelquerschnitte bzw. der Gesamttragstruktur.

2 Gastemperatur

Die Ermittlung der objektspezifischen brandlastabhängigen Zeit-Temperaturkurven erfolgte durch das Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung Ges.m.b.H., kurz IBS, staatlich akkreditierte Prüf- und Überwachungsstelle; Prok. Dipl.-Ing. Th. Trauner.

Zur Ermittlung der objektbezogenen Zeit-Temperaturkurven wurde einerseits auf die bauliche Situierung (Zuluft – Abluft, BRE-Anlage, etc.) und andererseits auf die in den einzelnen Brandabschnitten tatsächlich zu erwartenden Brandlasten zurückgegriffen.

2.1 Grundlagen

Der EC 4-1-2 [12] unterscheidet nominelle und parametrische Zeit-Temperaturkurven. Zweitere basieren auf objektbezogenen Brandmodellen und den spezifischen physikalischen Parametern, welche die Bedingungen im Brandabschnitt beschreiben [8], [9].

Im aktuellen Fall wurde das Simulationsprogramm FastLite der NIST, US Department of Commerce, herangezogen. Dabei handelt es um ein Raumbrandsimulationsmodell, welches unter Eingabe der maßgebenden Parameter, wie Brandraumgröße, Ventilationsbedingungen (Zu- und Abluft), Energiefreisetzung, zeitliche Entwicklung des Brandes, Umgebungsparameter (Baustoffe der Wand, des Daches und der Fußbodenkonstruktion), klimatische Parameter (Luftfeuchte und Temperatur), Ergebnisse in Form von Temperaturen an den Bauteilen im Deckenbereich (kritischer Bereich) liefert (Bild 6).

Das Simulationsprogramm kann die Brandausbreitung, Heißgasschichtung und Verrauchung bis zu drei zusammenhängender Räume (Brand in einem dieser Räume) simulieren. Es wurde durch die staatlich akkreditierte Prüf- und Überwachungsstelle IBS anhand von Realbrandversuchen validiert.

2.2 Brandszenarien

Die vorgegebenen, realistischen Brandszenarien zeigen die Auswirkung eines Brandes im Hinblick auf die Temperaturentwicklung in den einzelnen Brandabschnitten. Sie decken allerdings keine worst-case-Szenarien ab. In diesem Sinne wurden auch Explosionen, Terroranschläge, Brandstiftung mit großer Menge von Brandbeschleunigern (Benzin, etc.) nicht weiter untersucht.

Brandszenario Thermengarage

Es wurde der Brand von drei Kfz zeitlich versetzt im Abstand von 10 min angesetzt. Diese Annahme entspricht dem ungünstigsten Fall, wie in der Literatur [15] veröffentlicht. Dabei wurden drei Zonen unterschieden: unmittelbarer Brandeinwirkungsbereich (5×12 m), mittel-

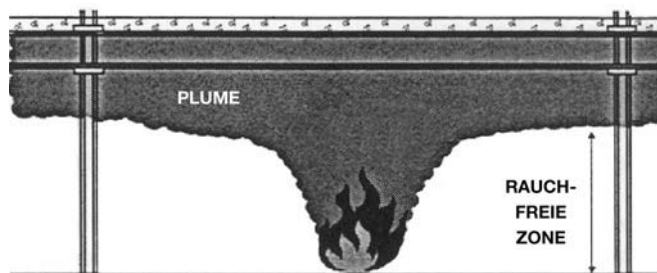


Bild 6. Physikalische Parameter: Heißgasplume, Heißgasschichtung und rauchfreie Zone

Fig. 6. Physical parameters: plume, hot smoke zone and smoke free zone

barer Brandeinwirkungsbereich (10×24 m) und äußerer Brandeinwirkungsbereich (20×48 m). In diesen Zonen wurden die jeweils zu erwartenden Zeit-Temperaturbelastungen auf Grund des vorbeschriebenen Brandszenarios für die minimale und maximale Garagenhöhe von 2,6 und 3,8 m ermittelt.

Brandszenario Hotelgarage

Es wurde der Brand von vier Kfz zeitlich versetzt im Abstand von 10 min angesetzt. Diese Annahme entspricht dem Fall einer „Burning Wave“ und liegt über dem herkömmlich ungünstigsten Fall (Brand 3 Kfz, [15]). Mehr als vier am Brand beteiligte Kfz beim Zustand „Burning Wave“ wurden nicht betrachtet, da es dabei ohnehin zu einer Verschiebung des Brandherdes kommen würde und der direkt betrachtete Stahlträger somit keiner weiteren direkten Temperaturbeanspruchung ausgesetzt wäre. Auch bei diesem Brandszenario wurde in die zuvor beschriebenen drei Zonen unterteilt.

2.3 Brandlast

Aus einer Parameterstudie über Garagenbrände [15] kann der für die weiteren Untersuchungen herangezogene Verlauf der Heat Release Rate für einen einzelnen Pkw der relevanten Kategorie entnommen werden (Bild 7). Mit einem Integralwert von 11200 MJ vom Beginn der Entzündung bis zum vollständigen Abbrand entspricht der untersuchte Pkw-Typ der Kategorie 4 und 5 gem. Bild 8 [6].

Thermengarage

Die Gesamtenergiefreisetzung für drei brennende Pkw basiert grundsätzlich auf der Heat Release Rate des Einzel-

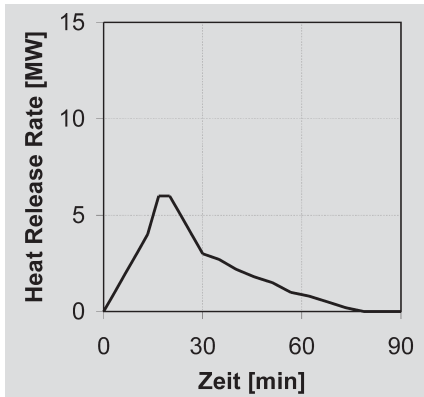


Bild 7. Brandlast eines Einzel-Pkw der Kategorie 4 bzw. 5

Fig. 7. Heat release rate of a single car of category 4 or 5

Marke	Kategorie 1	Kategorie 2	Kategorie 3	Kategorie 4	Kategorie 5
Peugeot	106	306	406	605	806
Renault	Twingo-Clio	Megane	Laguna	Safrane	Espace
Citroen	Saxo	ZX	Xantia	XM	Evasion
Ford	Fiesta	Escort	Mondeo	Scorpio	Galaxy
Opel	Corsa	Astra	Vectra	Omega	Frontera
Fiat	Punto	Bravo	Tempra	Croma	Ulysse
Volkswagen	Polo	Golf	Passat		Sharan
Energie	6000 MJ	7500 MJ	9500 MJ	12000 MJ	

Bild 8. Brandenergie unterschiedlicher Pkw-Typen

Fig. 8. Energy release of different vehicle types

Pkw mit Flammenüberschlag von einem Kfz zum benachbarten in einem Zeitintervall von 10 Minuten. Die simple Addition der Einzel-Pkw-Energiefreisetzung ist zwar theoretisch möglich, entspricht aber aufgrund der sich ändernden thermodynamischen Verhältnisse und der Sauerstoffreduktion im Brandnahbereich nicht dem Realbrand und würde daher einen zu ungünstigen Ansatz des Energieinhaltes bei der Brandkombination von drei Pkw liefern.

Als resultierende Brandlast wurde somit eine Energiefreisetzung gemäß Bild 9 mit einem Maximalwert von 12 MW nach 30 bis 40 Minuten ermittelt [2]. Ein beginnend wirkender Feuerwehreinsatz wurde dabei sogar außer Acht gelassen.

Als Brandausbreitungsgeschwindigkeit wurde der t-square-Ansatz [16] angesetzt. Der Formel $Q = \alpha t^2$ wurde ein Faktor α (Parameter über den Zunahmemechanismus der Wärmefreisetzungsrates) von $3,08 \text{ W/s}^2$ zugrundegelegt, was einer Brandausbreitungsgeschwindigkeit zwischen slow (langsam) und moderate (mittel) entspricht. Diese Ausbreitungsgeschwindigkeit stellt den Realfall des natürlichen Flammenübergreifens von einem Kfz zum Benachbarten dar.

Als weitere Eingangsparameter für das Brandsimulationsprogramm dienten das Klima ($20 \text{ }^\circ\text{C}$ Lufttemperatur

und 50 % Luftfeuchtigkeit) und die Zu- und Abluftflächen, die dem Rauch- und Wärmeabzugsanlagenkonzept (RWA-Konzept) entnommen wurden.

Hotelgarage

Basierend auf der Energiefreisetzung des Einzel-Pkw und dem im Abstand von 10 Minuten erfolgenden Flammenüberschlag mit insgesamt vier in Flammen stehenden Kfz wurde als resultierende Brandlast (ebenfalls ohne Anrechnung eines Feuerwehreinsatzes) eine Energiefreisetzung gemäß Bild 9 mit einem Maximalwert von 14,5 MW nach 35 bis 45 Minuten ermittelt.

Der Brandausbreitungsfaktor α wurde mit $2,49 \text{ W/s}^2$ eingesetzt, was einer realen Brandausbreitungsgeschwindigkeit im Zuge einer „Burning Wave“ entspricht.

2.4 Ergebnisse

2.4.1 Thermengarage – Höhe 2,6 m

Unter Berücksichtigung der behördlich geforderten Brandwiderstandsdauer von 30 Minuten ergibt sich an der Stahltragkonstruktion im unmittelbaren Brandnahbereich ($5 \times 12 \text{ m}$) eine rechnerische Temperatur von $794 \text{ }^\circ\text{C}$. Das Maximum der Heißgastemperatur stellt sich nach 40 Minuten mit $854 \text{ }^\circ\text{C}$ ein.

Im mittelbaren Brandbereich ($10 \times 24 \text{ m}$) ergibt sich nach 30 Minuten Brandeinwirkungsdauer eine Gastemperatur von $491 \text{ }^\circ\text{C}$ (Maximalwert von $513 \text{ }^\circ\text{C}$ nach 40 Minuten), und im äußeren Brandeinwirkungsbereich ($20 \times 48 \text{ m}$) muß man nach 30 Minuten mit $345 \text{ }^\circ\text{C}$ und nach 40 Minuten mit einem Maximalwert von $354 \text{ }^\circ\text{C}$ rechnen.

2.4.2 Thermengarage – Höhe 3,8 m

Folgende Heißgastemperaturen konnten für die verschiedenen Brandeinwirkungszonen nach 30 Minuten (bzw. als Maximalwert nach 40 Minuten) bestimmt werden: im unmittelbaren Brandnahbereich $794 \text{ }^\circ\text{C}$ (max. $841 \text{ }^\circ\text{C}$), im mittelbaren Brandeinwirkungsbereich $486 \text{ }^\circ\text{C}$ (max. $508 \text{ }^\circ\text{C}$) und im äußeren Einwirkungsbereich $294 \text{ }^\circ\text{C}$ (max. $301 \text{ }^\circ\text{C}$).

Die Raumhöhe hat hier also nahezu keinen Einfluß auf die sich im Deckenbereich einstellenden Gastemperaturen. Der Grund liegt darin, daß sich einerseits im Deckenbereich eine dichte Rauchgasschicht einstellt, die bei geringen Garagenhöhen als guter Isolator wirkt, und

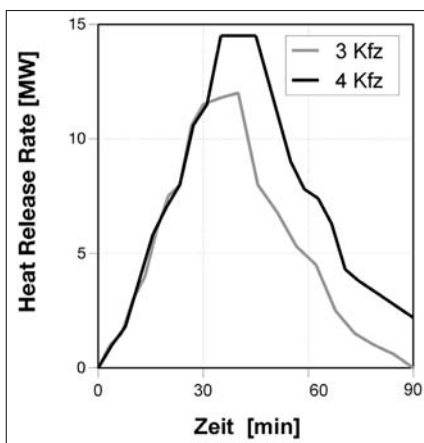


Bild 9. Energiefreisetzung beim Abbrand von 3 bzw. 4 Kfz

6 Fig. 9. Heat release rate of 3 and 4 vehicles in case of fire

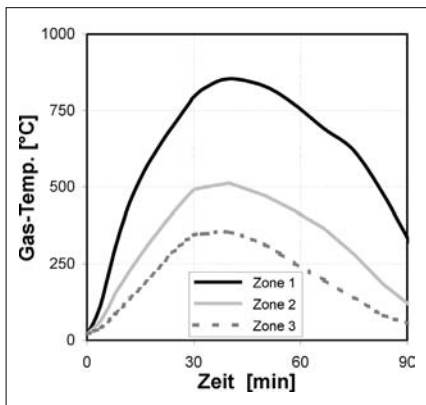


Bild 10. Heißgastemperatur im Deckenbereich in der Thermengarage; 3 Kfz h = 2,60 m
Fig. 10. Air temperature at the ceiling of the Thermal Parking Area

andererseits die thermodynamischen Einflüsse, die bei größeren Garagenhöhen aufgrund des Ansaugens der Heißgasströmung vom Verbrennungsprozeß und Zumischung von frischem Sauerstoff bei der Verbrennung höhere Temperaturen bewirkt. Daher liefert eine größere Garagenhöhe im konkreten Objekt nicht zwingend niedrigere Temperaturen im Deckenbereich.

Aus dieser Erkenntnis heraus wurden alle weiteren Untersuchungen in der Thermengarage einheitlich für den etwas ungünstigeren Fall der Raumhöhe von 2,6 m durchgeführt. Im Bild 10 ist die Temperaturverteilung im Deckenbereich der Thermengarage für die untersuchten Zonen 1 bis 3 dargestellt.

2.4.3 Hotelgarage

Unter Berücksichtigung der behördlich geforderten Brandwiderstandsdauer von 90 Minuten ergibt sich eine rechnerische Temperaturbelastung im unmittelbaren Brandnahbereich an der Deckenunterseite von 918 °C nach 55 Minuten. Im mittelbaren Brandeinwirkungsbereich stellt sich eine Maximaltemperatur von 544 °C ein, und im äußeren Einwirkungsbereich konnten maximal 321 °C rechnerisch bestimmt werden. Bild 11 zeigt die zeitbezogene Temperaturverteilung im Deckenbereich der Hotelgarage für die untersuchten Zonen 1 bis 3. Auch hier er-

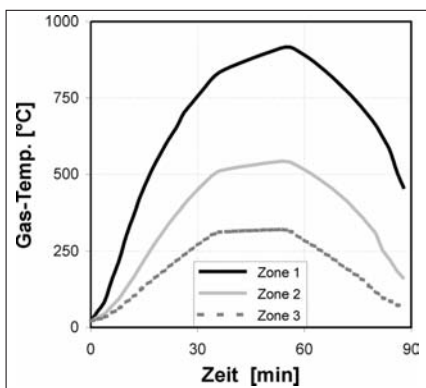


Bild 11. Heißgastemperatur im Deckenbereich in der Hotelgarage; 4 Kfz h = 3,60 m
Fig. 11. Air temperature at the ceiling of the Hotel Parking Area

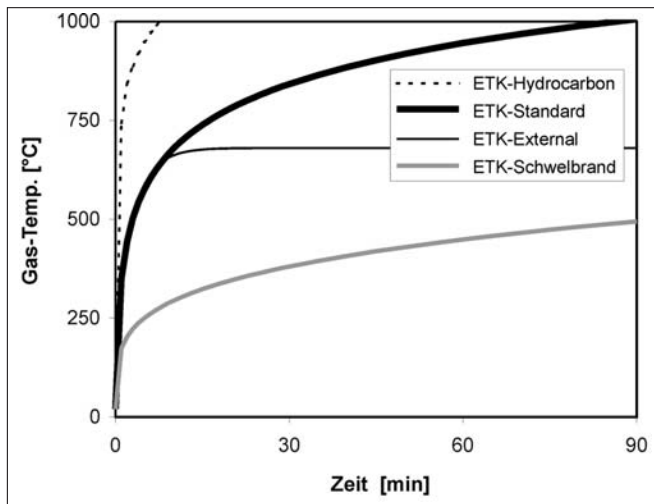


Bild 12. Normbrandkurven
Fig. 12. Standardized temperature curves

gibt sich trotz der deutlich höheren Brandlast gegenüber der Thermengarage noch immer ein wesentliches Einsparungspotential im Vergleich zur Einheitstemperaturkurve (Bild 12).

2.4.4 Kurvendiskussion und Vergleiche

Im Bild 13 sieht man den generellen Einfluß des Abbrandes von drei Kfz für die Thermengarage im Vergleich zu vier Kfz in der Hotelgarage (natürlich gehen auch die unterschiedlichen Lüftungsverhältnisse und Raumhöhen in die Kurven mit ein).

Beim Vergleich der objektbezogenen Realbrandkurven mit der internationalen Standard-Einheitstemperaturkurve fällt auf, daß zwar die beim Realbrand auftretende Maximaltemperatur mit der zu dieser Zeit relevanten Temperatur der ETK ähnlich ist, der Temperaturgradient der Realbrandkurve (Anstieg der Kurve) ist jedoch deutlich zeitverzögert, und auch die beim Realbrand auftretende Abkühlphase aufgrund der aufgebrauchten Brandlast wird bei der ETK nicht mitberücksichtigt (Bild 13). Diese Parameter haben wesentlichen Einfluß auf die Erwärmung der

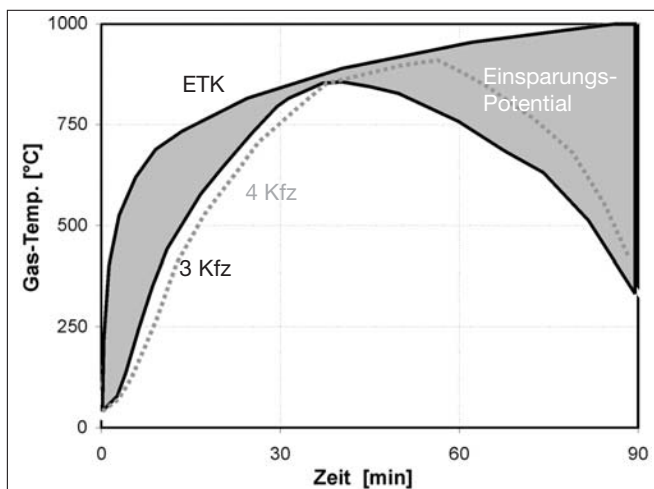


Bild 13. Vergleich zwischen Realbrand (3 Kfz und 4 Kfz) und Standard-Einheitstemperaturkurve
Fig. 13. Comparison between the actual temperature curves (for 3 and 4 vehicles) and the standardized temperature curves

Tragstruktur, weil nicht nur die auftretende Maximal-Gastemperatur (Temperaturpeak) entscheidend für die Konstruktion ist, sondern der gesamte Energieinhalt der Zeit-Temperaturkurve (Integral unter der Zeit-Temperaturkurve) über die Erwärmung der Querschnitte entscheidet und somit die Wirtschaftlichkeit der Bemessung ausmacht.

3 Temperaturverteilung im Querschnitt

3.1 Allgemeines

Anhand der vom IBS ermittelten Gastemperaturen im Brandfall wurden nun die daraus resultierenden Temperaturen in den Trägerquerschnitten in Abhängigkeit von der Zeit ermittelt. Dies erfolgte mit dem Finiten-Element-Programm CEFICOSS [1] [14], welches den Kalorienaustausch zwischen umgebendem Gas und dem Querschnitt ermittelt und so die Temperaturen innerhalb der verschiedenen Querschnittsteile der Verbundträger berechnen kann. Die für diese Berechnung erforderlichen Materialkennwerte wurden entsprechend EC 4-1-2 [12] und EC 1-2-2 [10] angesetzt (Bild 14). CEFICOSS ermittelt die Temperaturverteilung innerhalb des Quer-

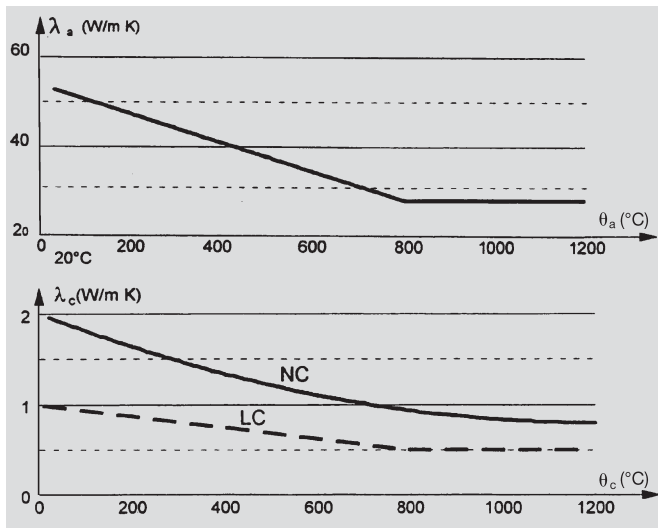


Bild 14. Wärmeleitfähigkeit von Stahl (oben) und Beton (unten)
Fig. 14. Conductivity of heat for steel and concrete

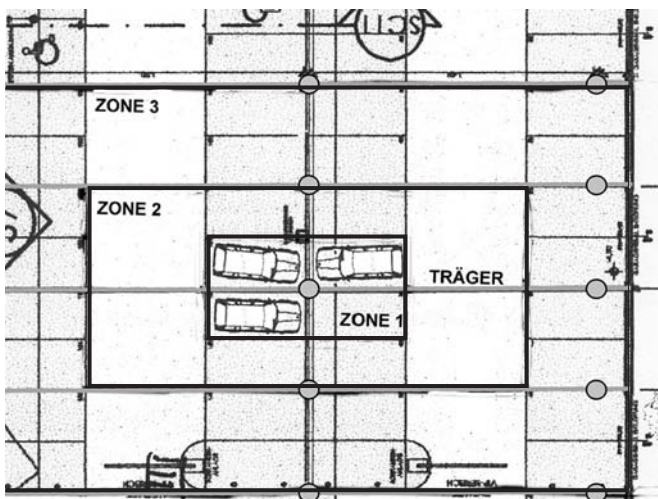


Bild 15a. Brandszenario 1: Kfz um die Stütze
Fig. 15a. Scenario 1: Vehicles near by the column

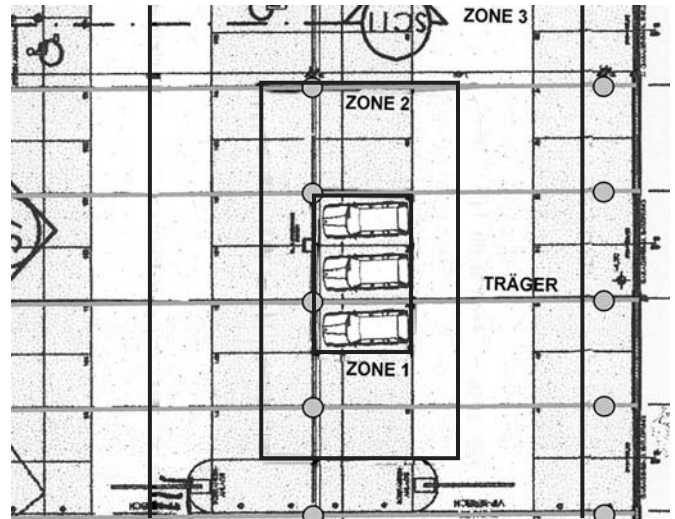


Bild 15b. Brandszenario 2: Kfz nebeneinander
Fig. 15b. Scenario 2: Vehicles in one row

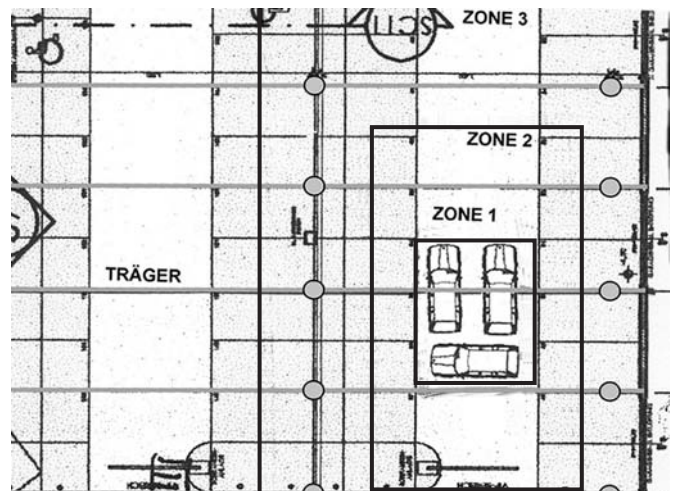


Bild 15c. Brandszenario 3: Kfz in Feldmitte
Fig. 15c. Scenario 3: Vehicles at midspan

schnittes in einem vom Anwender definierbaren Zeitintervall und speichert die Ergebnisse in einer Temperaturdatei ab.

Die vom IBS ermittelten Gastemperaturen wurden in drei unterschiedliche Zonen unterteilt. Anhand dieser Zonen wurden die Verbundträger für drei Brandszenarien (unterschiedliche Pkw-Positionierung) berechnet (Bild 15). Es zeigte sich, daß das Brandszenario 1 für die Warmbemessung der Verbundträger maßgebend war. Auf die Szenarien 2 und 3 wird daher an dieser Stelle nicht mehr näher eingegangen.

Je nach Lage im Feld- oder im Stützbereich der Träger wurden unterschiedliche Querschnitte abgebildet. Somit konnten die unterschiedlichen, auf den Träger einwirkenden Gastemperaturen (in den Zonen 1 bis 3) sowie die unterschiedlichen statisch wirksamen Querschnitte über die gesamte Trägerlänge berücksichtigt werden.

3.2 Querschnittstemperaturen Thermengarage

Bild 16 zeigt die Temperaturen an unterschiedlichen Stellen des Verbundquerschnittes in Abhängigkeit von der Zeit. Man erkennt deutlich die höheren Temperaturen im

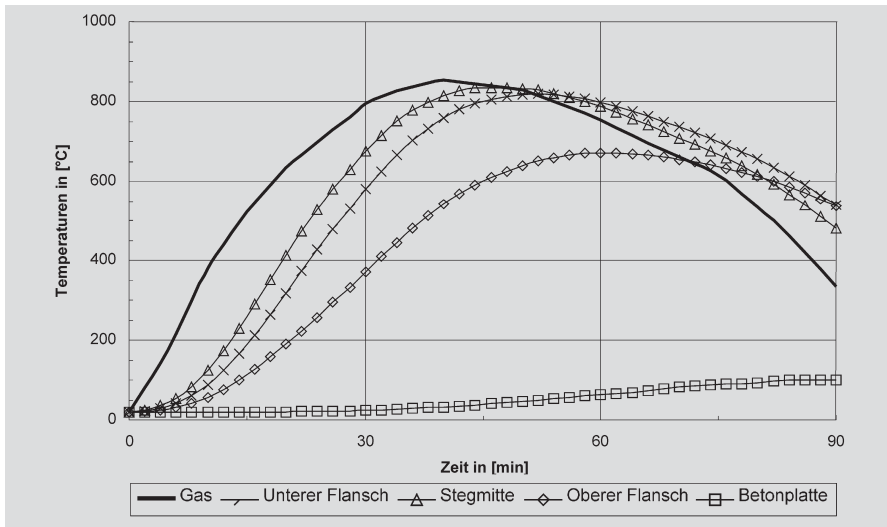


Bild 16. Temperaturen im Thermengaragenträger
Fig. 16. Temperatures within the beam section of the Thermal parking area

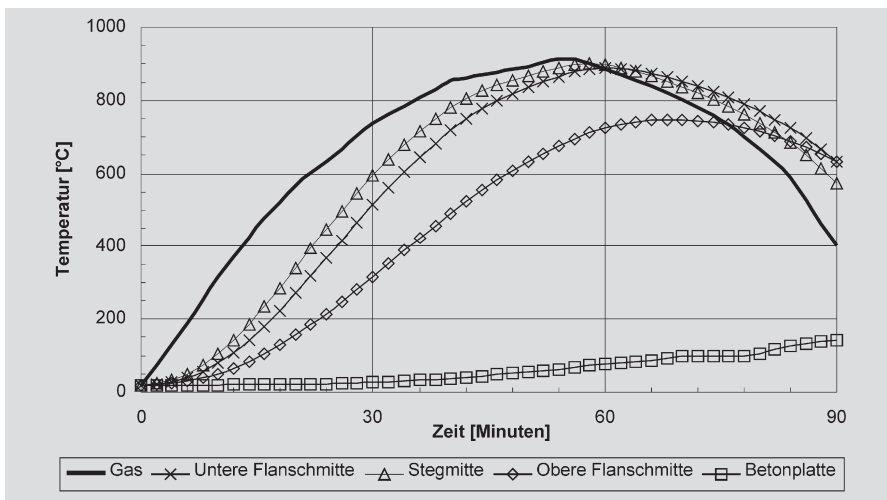


Bild 17. Temperaturen im Hotelträger ohne Kammerbeton
Fig. 17. Temperatures within the beam section of the hotel without web encasement

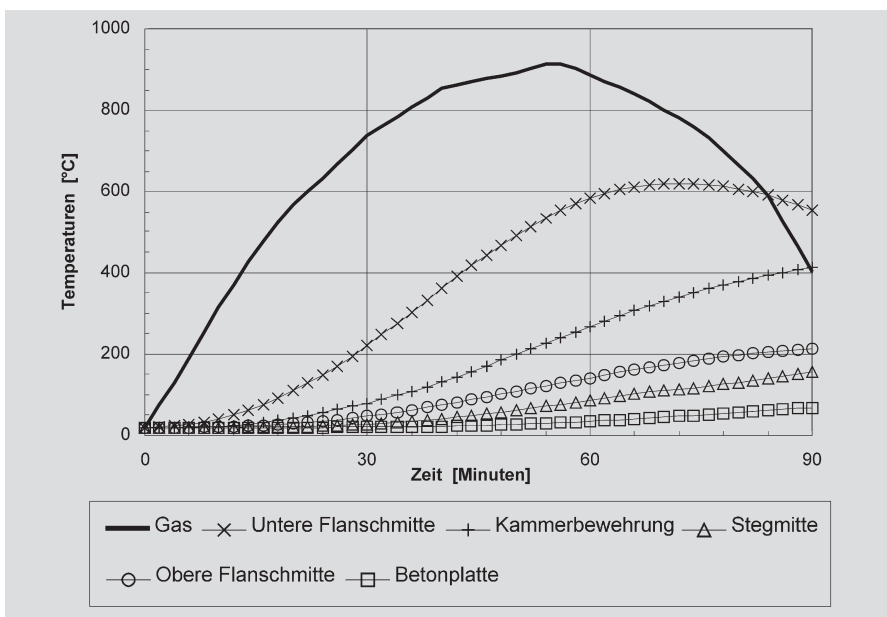


Bild 18. Temperaturen im Hotelträger mit Kammerbeton
Fig. 18. Temperatures within the beam section of the hotel with web encasement

unteren Flansch verglichen mit dem oberen Flansch. Dies ist durch den Wärmeabfluß in der Betonplatte zu erklären. Desweiteren kann man die höheren Temperaturen im dünnen Trägersteg verglichen mit dem unteren Trägerflansch beobachten. Die maximale Stahltemperatur beträgt bei dieser Realbrandberechnung ca. 840 °C nach 45 Minuten. Bei einem ISO-Normbrand würden die Temperaturen im Querschnitt nach dieser Zeit bereits 890 °C betragen und dann noch weiter bis auf ca. 1000 °C ansteigen. Die Temperatur der Bewehrung in der Betonplatte beträgt nach 90 Minuten nur ca. 100 °C und ist somit selbst nach 90 Minuten noch voll tragfähig.

3.3 Querschnittstemperaturen Hotelgarage

Im Bereich der Hotelgarage wurde eine Brandwiderstandsdauer von mindestens 90 Minuten gefordert. Zunächst wurde versucht, auch in diesem Bereich die durchlaufenden Verbundträger ohne zusätzliche Brandschutzmaßnahmen auszuführen. Die ersten Berechnungen zeigten jedoch schnell, daß dies mit dem gewählten Profil nicht möglich war. Daher wurden diese Träger als Zusatzmaßnahme mit Kammerbeton ausgeführt, der aus gestaltgebenden Gründen gegenüber den Trägerflanschen um 1,5 cm zurückspringt.

Bild 17 zeigt die Temperaturen in unterschiedlichen Querschnittsbereichen des Verbundträgers ohne Kammerbeton. Man erkennt, daß die Temperaturen im unteren Flansch sowie im Trägersteg nach 40 Minuten oberhalb 800 °C liegen. Da diese hohen Temperaturen über einen Zeitraum von etwa 30 Minuten auftreten (mit einem Maximum von ca. 900 °C), würde der Querschnitt aufgrund der niedrigen Resttragfähigkeit der Materialien nach ca. 45 Minuten versagen. Die höheren Querschnittstemperaturen im Vergleich zu den Thermengaragenträgern erklären sich durch die höheren Gastemperaturen infolge der höheren Brandlast.

Die Temperaturen im Verbundträger mit Kammerbeton können dem Bild 18 entnommen werden. Der Kammerbeton wirkt sich ganz deutlich positiv aus: Während die Temperaturen im unteren Trägerflansch

nun nur noch auf etwas mehr als 600 °C ansteigen, bleiben die Temperaturen im Trägersteg und in der Kammerbewehrung unterhalb von 400 °C und behalten daher selbst nach 90 Minuten noch ihre volle Tragfähigkeit. Die niedrigeren Temperaturen im unteren Trägerflansch erklären sich durch den Temperaturexaustausch zwischen Trägerflansch und Kammerbeton sowie dadurch, daß der Flansch nun nur noch einseitig dem Feuer ausgesetzt ist.

4 Trägerstatik im Brandfall

4.1 Allgemeines

Nachdem nun sämtliche Temperaturen innerhalb der einzelnen Querschnittsteile berechnet waren, konnten die Träger unter den Einwirkungen im Brandfall mit dem Statikmodul des Programmes CEFICOSS bemessen werden. Die unterschiedlichen statischen Tragsysteme in der Thermen- und in der Hotelgarage sind in der Einleitung dieses Artikels beschrieben.

Die Einwirkung im Bereich der Thermengarage setzt sich aus dem Eigengewicht der Verbundträger und der HOESCH-Decke sowie einer ständigen Ausbaulast infolge der Dachbegrünung (vorerst mit 2,0 kN/m² angesetzt) zusammen. Die Nutzlast im Bereich der Thermengarage ergibt sich alternativ aus einer Schneelast (2,9 kN/m²) bzw. einer Begehungslast (3,0 kN/m²).

Für die Träger in der Hotelgarage wurden die Lasten infolge Eigengewicht sowie eine zusätzliche ständige Ausbaulast von 3,0 kN/m² berücksichtigt. Als veränderliche Nutzlast wurden 5,0 kN/m² berücksichtigt.

Für den Brandfall wurden alle ständigen Lasten entsprechend den Regelungen des Eurocode 1 mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_F = 1,0$ behaftet. Für den Teilsicherheitsbeiwert der veränderlichen Lasten wurden für die Schneelast $\gamma_F = 0,2$ (Thermengarage) und für die Nutzlast $\gamma_F = 0,5$ (Hotelgarage) angesetzt. Somit ergaben sich für den Brandfall folgende Lastkombinationen:

Thermengarage:

$$q_{d(RF)} = 1,0 \cdot \text{Ständige Last} + 0,2 \cdot \text{Schneelast} = 32,4 \text{ kN/m}$$

Hotelgarage:

$$q_{d(RF)} = 1,0 \cdot \text{Ständige Last} + 0,5 \cdot \text{Nutzlast} = 42,2 \text{ kN/m}$$

Anhand der so definierten statischen Systeme, Querschnitte und Einwirkungen konnte mit dem Programm CEFICOSS der Widerstand der Verbundträger im Brandfall ermittelt werden. Dabei greift das Programm auf die zuvor in der entsprechenden Datei gespeicherten Temperaturen zurück. Anhand dieser Temperaturen ermittelt das Programm den Tragwiderstand der einzelnen Querschnitte sowie deren Steifigkeiten in dem vom Anwender zuvor definierten Zeitintervall. Das Programm berücksichtigt die Materialkennwerte (Streckgrenze, Zugfestigkeit, E-Modul) in Abhängigkeit von der jeweiligen im Querschnitt vorherrschenden Temperaturverteilung (Bild 19). Anhand dieser Berechnungen wurde ein Nachweis der Tragreserven sowie eine Berechnung der Durchbiegung des Systems durchgeführt. Dies erfolgte solange, bis eines der folgenden Versagenskriterien eintrat:

- Querschnittsversagen
- Überschreitung der maximalen (vom Anwender vorgegebenen) Verformungen.

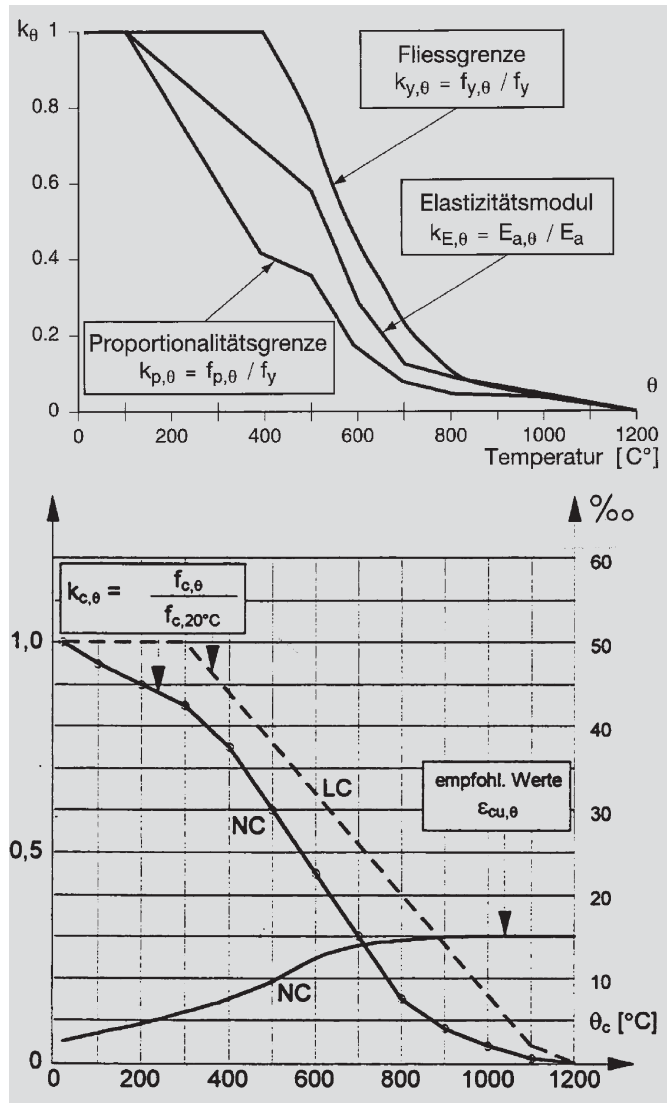


Bild 19. Materialkennwerte von Stahl (oben) und Beton (unten) in Abhängigkeit von der Temperatur

Fig. 19. Material properties depending on the temperature

4.2 Ergebnisse Thermengarage

In Bild 20 sind der minimale Eigenwert der Steifigkeitsmatrix und die maximale Durchbiegung des Verbundträgers in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Man erkennt, daß dieser Steifigkeitskennwert größer als Null und das System somit immer im Gleichgewicht bleibt. Die maximale Durchbiegung beträgt in Feldmitte ca. 49 cm (nach 60 Minuten). Somit ist der gewählte Verbundträger unter den Einwirkungen im Brandfall nicht nur über 30 Minuten, sondern sogar zeitlich unbegrenzt ausreichend tragfähig.

Da der Auftraggeber zusätzlich wissen wollte, wie groß die Erdaulast infolge Dachbegrünung ohne Brandversagen beim vorgegebenen Querschnitt angesetzt werden darf, wurde in einer weiteren Berechnung die Belastung auf das System solange erhöht, bis ein Versagen des Querschnitts bei Realbrandeinwirkung eintrat: 39 kN/m können gerade noch ohne Versagen abgetragen werden, bei 80 kN/m würde sich nach 30 Minuten ein Fließgelenk bilden. Anhand dieser Ergebnisse konnte die maximale Aufschütthöhe (vorerst lediglich für den Brandfall) rückgerechnet und erhöht werden.

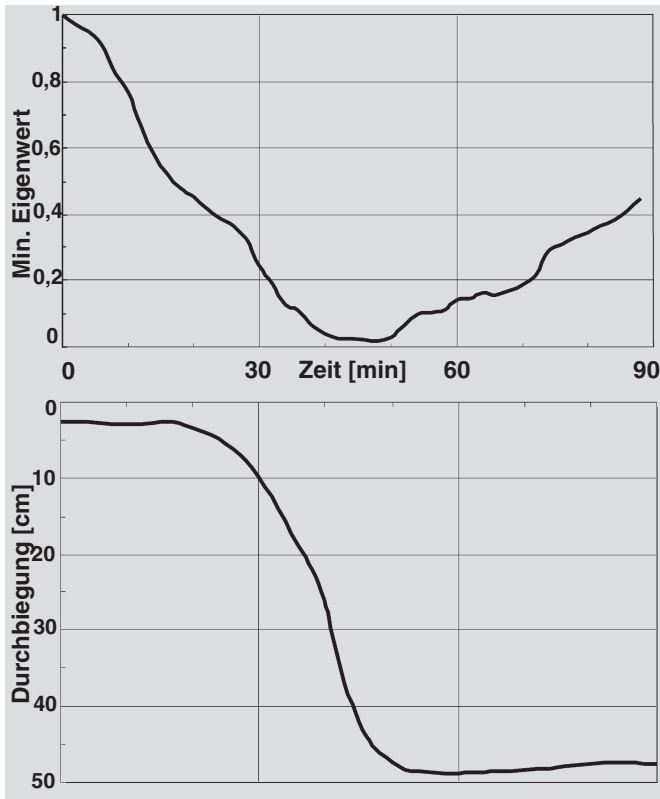


Bild 20. Minimaler Steifigkeitseigenwert und maximale Durchbiegung des Verbundträgers in Feldmitte (Thermengarage)
Fig. 20. Stiffness minimum and maximum beam deflection at midspan (Thermal parking area)

4.3 Ergebnisse Hotelgarage

Die Bilder 21 und 22 zeigen die Durchbiegung in Feldmitte sowie den minimalen Eigenwert der Steifigkeitsmatrix des zweifeldrigen Verbundträgers ohne und mit Kammerbeton in Abhängigkeit von der Zeit. Man erkennt, daß der minimale Eigenwert der Steifigkeitsmatrix für den nicht ausbetonierten Träger bei etwa 38 Minuten kleiner als Null wird und somit ein Versagen des Trägersystems eintreten würde.

Die Verbundträger im Hotelbereich konnten also nicht ohne weitere Brandschutzmaßnahme ausgeführt

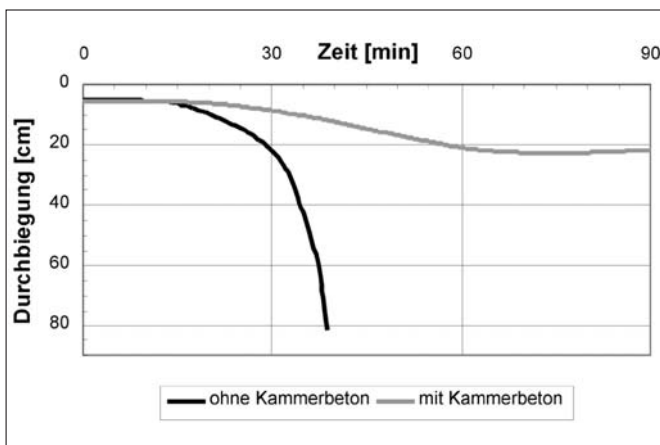


Bild 21. Durchbiegung des Verbundträgers in Feldmitte (Hotelgarage; OHNE und MIT Kammerbeton)
Fig. 21. Beam deflection at midspan (Hotel parking area, without and with web encasement)

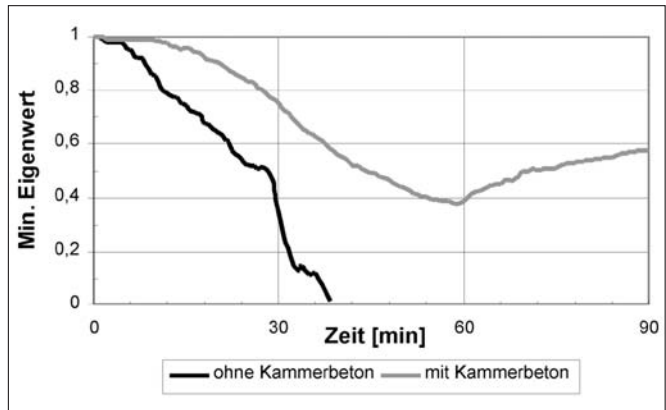


Bild 22. Minimaler Eigenwert der Trägersteifigkeit (Hotelgarage; OHNE und MIT Kammerbeton)
Fig. 22. Stiffness minimum (Hotel parking area, without and with web encasement)

werden. Dazu wurden die Stahlträger zwischen den Kammern ausbetoniert und für den Brandfall mit einer Längsbewehrung von mindestens 4,0 cm² je Kammer ausgeführt. Zusätzlich zu dieser statisch erforderlichen Bewehrung ist eine konstruktive Bewehrung entsprechend Eurocode 2 und 4 zur Verbügelung und zur Rissesicherung erforderlich, welche bei der statischen Analyse jedoch nicht berücksichtigt wurde.

Deutlich ist in den Bildern 21 und 22 die positive Wirkung des Kammerbetons zu erkennen. Die Durchbiegungen wachsen bis zu einem Maximalwert von 23 cm nach 75 Minuten an und nehmen anschließend wieder ab. Auch anhand der Darstellung des minimalen Eigenwertes erkennt man, daß das System sogar über die geforderten 90 Minuten hinaus „standhält“.

5 Vergleich der Realbrandberechnung mit einer ISO-Brandberechnung

Zur Ermittlung der wirtschaftlichen Relevanz der durchgeführten Realbrandberechnungen wurde abschließend ein Vergleich mit einer Bemessung basierend auf der ISO-Normbrandkurve angestellt.

Im Falle der Thermengarage wäre die Bemessung mit einer ISO-Brandbelastung nur durch Verstärken des Trägers (Wahl eines stärkeren Profiles oder Ausführung mit Kammerbeton) möglich gewesen, da der vorhandene Querschnitt nach 21 Minuten ISO-Brand instabil würde.

In Bild 23 sind die vertikalen Verformungen sowie der minimale Steifigkeitseigenwert des Trägers mit Kammerbeton im Hotelbereich infolge einer ISO-Brandbelastung in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Man erkennt, daß das System deutlich größere Verformungen als unter der Realbrandbeanspruchung aufweist, und daß das System bereits nach ca. 45 Minuten instabil würde (Querschnittsversagen). Die vorhandene Kammerbetonbewehrung von 2 · 4 cm² reicht also bei einer Normbrandberechnung nicht mehr aus. Erst ab einer Bewehrung von ca. 2 · 8 cm² wäre das System über 120 Minuten stabil, allerdings liegen die Deformationen in Feldmitte bei ca. 100 cm. Mit Hilfe der Realbrandberechnung ist also nur die Hälfte der Kammerbewehrung gegenüber einer Berechnung mit Normbrand erforderlich.

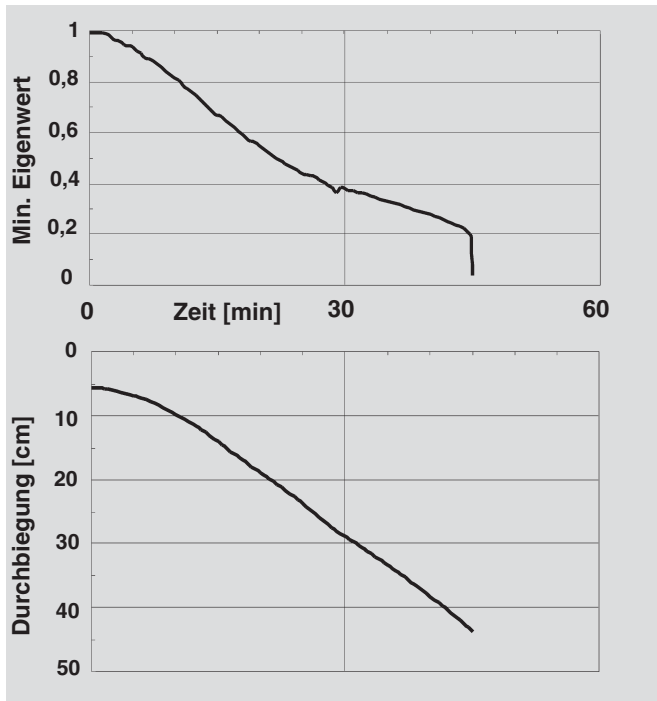


Bild 23. Minimaler Eigenwert und Durchbiegung in Feldmitte (Hotelgarage mit Kammerbetonbewehrung $2 \cdot 4 \text{ cm}^2$, ISO-Brand)
Fig. 23. Stiffness minimum and beam deflection at midspan (Hotel parking area with web encasement with $2 \cdot 4 \text{ cm}^2$ reinforcement at ISO fire)

6 Zusammenfassung

Das Realbrandbemessungskonzept wurde für die Garagen des im Bau befindlichen Projektes Therme Längenfeld im Tiroler Ötztal von den Behörden erstmals akzeptiert. In einer konzertierten Arbeit zwischen dem Tragwerksplaner, Profil ARBED Luxemburg und dem Brandschutzinstitut Linz, wurden folgende Nachweise und Grundlagen dafür erarbeitet:

- Real-Brandlasten in den Tiefgaragen
- Gastemperaturen im Raum inkl. Vergleich mit dem ISO-Normbrand
- Materialtemperaturen im Tragquerschnitt
- Steifigkeits- und Tragfähigkeitsentwicklung infolge Temperaturanstieg
- Versagenszeitpunkt
- Nutzlastoptimierung (Überschüttung/Begrünung)

Für die gegenständliche Garagenüberdachung wurde durch Optimierung des statischen Systems und durch die Realbrandanalyse erreicht, daß zu keinem Zeitpunkt ein Versagen infolge Brand eintreten würde und daß der Abfall der Steifigkeit durch die Warmbelastung keine Gefährdung der Feuerwehrleute bedeutet.

Das gewählte Deckenkonzept mit Verbundbeton auf Stahltrapezblechen bietet darüber hinaus Gewähr gegen sekundäre Abplatzungen, Risse und plötzliche, schlagartige Deformationen. Diese Duktilität gibt zusätzliche Sicherheit während der Brandbekämpfung.

Man erkennt, daß sowohl im Bereich der Thermengarage als auch im Hotelbereich aufgrund der Realbrandberechnung Einsparungen beim Brandschutz gegenüber einer Berechnung mit einer ISO-Normbrandkurve erzielt werden konnten. Aufgrund der für die Kaltbemessung

deutlich höheren Lastfaktoren und der Gebrauchstauglichkeitskriterien (Schwingungen und Durchbiegungen) war für die Trägerdimensionierung im vorliegenden Fall letztendlich sogar die Kaltbemessung maßgebend.

Wir werden die Zusammenarbeit und die Informationsgespräche mit unseren Feuerwehren fortsetzen und danken für die bisherige Bereitschaft zur Kooperation.

Literatur

- [1] ARBED-Research Center, Luxembourg/Department of Bridges and Structural Engineering, University of Liège, Belgium; REFAO-CAFIR, Computer Assisted Analyses of the Fire Resistance of Steel- and Composite Concrete-Steel Structures. C.E.C. Research 7210-SA/502, Final Report, Luxembourg, March 1986.
- [2] CTICM References INC-99/1d-DJ/NB-IM: Statistiques sur les feux de parking en France, von Daniel Joyeux, 12/1999.
- [3] ECCS: Feuerwiderstand von Bauteilen aus Stahl – Euro-Nomogramm, Publikation Nr. 89, 09/1995.
- [4] ECCS: Fire Safety in open car parks, Publication No. 75, 10/1993.
- [5] ECCS: Model Code on Fire Engineering, publication No. 111, ISBN 92-9147-000-65, 05/2001.
- [6] Joyeux, D.: Statistiques sur les feux de parkings en France. CTICM, 12/1999.
- [7] ÖN – Österreichisches Normungsinstitut: ÖNORMEN für den Verbundbau – Einführungsseminare Wien, Graz, Innsbruck, 2001.
- [8] ÖNORM B 3800, Teil 2: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Bauteile: Begriffsbestimmungen, Anforderungen, Prüfungen, 03/1997.
- [9] ÖNORM B 3800, Teil 4: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Bauteile: Einreihung in die Brandwiderstandsklasse, 05/2000.
- [10] ÖNORM ENV 1991-2-2: Grundlagen des Entwurfs, der Berechnung und der Bemessung sowie Einwirkungen auf Tragwerke – Brandeinwirkungen auf Tragwerke, 12/1996.
- [11] ÖNORM ENV 1994-1-1: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Allgemeine Bemessungsregeln – Bemessungsregeln für den Hochbau, 09/1999.
- [12] ÖNORM ENV 1994-1-2: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton- Allgemeine Regeln Tragwerksbemessung für den Brandfall, 09/1999.
- [13] ProfilARBED: Development of Design Rules for Steel Structures Subjected to Natural Fire in Closed Car Parks, ECSC Agreement N°. 7210.SA/211/318/518/620/933, 03/1997.
- [14] Schleich, J. B.: Numerische Simulation – zukunftsorientierte Vorgehensweise zur Feuersicherheitsbeurteilung von Stahlbauten. Der Maschinenschaden 60/H. 4, 1987.
- [15] Steinert, C.: Parameter-Studie zu Pkw-Bränden in Parkdecks mit Hilfe der rechnerischen Brandsimulation. Bautechnik 74 (1997), H. 4, S. 241–249.
- [16] VDS Schadenverhütung Bemessungsbrände, VDS 2827-2000/05/01.
- [17] Zhao, B.: Numerical Modelling of Structural Behaviour of Open Car Parks under Natural Fire. CTICM, 09/2001.

Autoren dieses Beitrages:

Dr. techn. Dipl.-Ing. Gerald Huber und Dipl.-Ing. Christian Aste, Aste Konstruktion, A-6020 Innsbruck, Erlenstrasse 13, Österreich, Dipl.-Ing. Thomas Trauner, Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung Ges.m.b.H., A-4017 Linz, Petzoldstrasse 45, Österreich, Dipl.-Ing. Jules Mathieu und Dipl.-Ing. Claude Klein, Arcelor Long Commercial (vormals Europrofil/ARBED), L-4221 Esch-sur-Alzette, 66, rue de Luxembourg, Luxembourg