



# **Statische Untersuchung**

## **Zur Brandlastbeaufschlagung von Stahlbetontiefgaragen infolge Fahrzeugbrand und damit einhergehender Tragwerksminderung**

### **Inhaltsübersicht**

	Seite
Allgemeines	1
Statische Nachweise: Brandlast Tiefgarage 0,0 - 1.000°C	2
1. Zur Bemessung einer Stahlbetontiefgarage / Nachweisform	2
1.1 Anforderungen des Eurocode 2 / Bemessungskonzept	2
1.2 Anforderungen DIN 1045 / Altes Bemessungskonzept	2
2. Untersuchung Tragwerksteile Stahlbetontiefgarage hinsichtlich Brandlast	4
2.1 Abnahme der charakteristischen Druckfestigkeiten von Beton / Betonstahl bei Brandlast	4
a) Beton / Auswertung Diagramm für Beiwert $k_c$ – Abfall Druckfestigkeit	4
b) Betonstahl / Auswertung Diagramm für Beiwert $k_{s-}$ – Abfall Druckfestigkeit	5
2.2 Bemessung Tiefgaragenstütze Belastung zentrisch, keine Kickgefahr, keine Brandlast	6
2.3 Zulässige Stützenlasten für verschiedene Brandlasten	7
Diagramm    Traglastabnahme / zug. Sicherheiten für versch. Brandlasten	7
Diagramm    Zulässige Stützenlasten für verschiedene Brandlasten	8
Diagramm    Bruchlasten $N_u$ der Stütze für verschiedene Brandlasten	8
2.4 Sicherheitsbetrachtungen / Auswirkungen auf das Tragsystem der Tiefgarage	8
Traglastleistungsdiagramm-Komprimat der Statik	9.1
3. Schlussfolgerungen / Konsequenzen für E-Autos	10

**Verfasser :** Dipl.-Ing. Volker Fuchs  
Neubiberger Str. 76  
85640 Putzbrunn  
Tel. 089 / 4801794 Mail vfuc@arcor.de

Putzbrunn den 14.10.2021

# Abnahme der Tragwerkssicherheit von Stahlbetontiefgaragen infolge Fahrzeugbrand

## Allgemeines

In jeder Tiefgarage kann es einmal brennen das bringt schließlich die Funktionalität mit sich und Benzin und Diesel in den Autotanks sind ja auch leicht brennbare Flüssigkeiten. Aber auch die Zunahme von Elektrofahrzeugen, meist ausgestattet mit Lithium-Ionen-Akkus, spielen hier eine Rolle.

Die Batterien eines E-Golf / 36 kWh, wiegen immerhin 345 kg. Und einmal in Brand geraten in einer Tiefgarage, gibt es derzeit keine Möglichkeit für die Feuerwehr den Brand zu löschen, da sie mit ihrem Großgerät nicht in die Tiefgarage kommt. Noch gravierender werden die Probleme bei dem Brand eines größeren TESLA. So hat das Modell S mit 85-kWh-Akku-Pack eine Batteriemasse, für die reichweitenstärkste Version, von 750 kg an Bord

Problem: der "Thermal Runaway" Elektro- und Hybridautos mit ihren Lithium-Ionen-Batterien brennen zwar nicht häufiger als Benziner oder Diesel, aber sie brennen anders. Nach einer Beschädigung, wenn die Batterie durchgeht (Thermal Runaway), gibt sie das bis zu Zehnfache der elektrischen Ladung als Wärme frei. Tests ergaben: In weniger als einer Minute brennt der gesamte Innenraum, Stichflammen wie im Abgasstrahl eines Düsentriebwerks führen zu einem Inferno. Dabei entstehen Temperaturen von mehr als 1000 Grad Celsius.

Auch Ladesäulen können Ursache für einen Brand sein. Vandalismus, ein technischer Defekt oder ein Kabelbrand können Brandauslöser sein.

Entscheidend für das Ausmaß des Schadens an der Tiefgarage ist die Brandlast des Fahrzeugs, die abgegebene Wärme bei der Verbrennung: Kunststoffverkleidungen im Innenraum, Plastikabdeckungen im Motorraum und breitere Reifen führen zu einer etwa dreimal höheren Brandlast als noch vor 30 Jahren.

Die folgende Untersuchung, die Temperaturen bis zu 1.000°C erfasst, soll aufzeigen, inwieweit und in welcher Größenordnung Schäden an der Stahlbetontiefgarage und an ihrem Tragsystem, zu erwarten sind, bei Fahrzeugabbrand. Deren Höhe ergibt sich in Abhängigkeit der Brandlast.

Schwächstes Tragglied sind hier die StB-Stützen, die üblicherweise mit einem Sicherheitsbeiwert von 2,1 für die Materialien Beton / Betonstahl, bemessen werden. Der Bruch einer StB-Stütze erfolgt bei zentrischer Belastung durch ein gleichzeitiges Versagen von Beton und Betonstahl. Die Sicherheit gegenüber der Bruchlast Nu muß größer 1,0 sein, ansonsten ist mit Bruchversagen zu rechnen

## Statische Nachweise: Brandlast Tiefgarage 0,0 – 1.000°C

### 1. Zur Bemessung einer Stahlbetontiefgarage / Nachweisform

Die Tragwerksteile einer StB-Tiefgarage werden seit über 20 Jahren nach dem Eurocode 2 bemessen. Ältere Tiefgaragen wurden nach der DIN 1045 bemessen. Bei beiden Normen sind die realen (1-fachen) Lastwerte maßgebend für den Nachweis der Brandlast (= Heißbemessung Stahlbetonbau) Im EC 2 werden sie als charakteristische Lasten bezeichnet.

#### 1.1 Anforderungen des Eurocode 2 / Bemessungskonzept

Die Grundzüge des Bemessungskonzeptes in der Vornorm DIN V ENV 1992-1-1, die im folgenden als Eurocode 2 oder nur als EC2 bezeichnet wird, sind in EC2-Abschnitt 2.1 mit der Überschrift „Grundlegende Anforderungen“ beschrieben. Dort heißt es unter anderem:

P(1) Ein Tragwerk muß so bemessen und ausgebildet werden, daß es - unter Berücksichtigung der vorgesehenen Nutzungsdauer und seiner Erstellungskosten mit annehmbarer Wahrscheinlichkeit die geforderten Gebrauchseigenschaften behält ; - mit angemessener Zuverlässigkeit den Einwirkungen und Einflüssen standhält, die während seiner Ausführung und seiner Nutzung auftreten können, und eine angemessene Dauerhaftigkeit im Verhältnis zu seinen Unterhaltungskosten aufweist.

P(2) Ein Tragwerk muß ferner so ausgebildet sein, daß es durch Ereignisse wie Explosionen, Aufprall oder Folgen menschlichen Versagens nicht in einem Ausmaße geschädigt wird, das in keinem Verhältnis zur Schadensursache steht. (da es sich hier um Katastrophenereignisse handelt, müsste singemäß auch der Katastrophelastfall – nicht löscharer E-Autobrand in einer Tiefgarage, mit Abbrandtemperaturen > 700°C, die zum Teileinsturz der Decke führen, erfasst sein)

Für den Nachweis der Brandbeaufschlagung von StB-Tragwerksteilen gibt es das Verfahren der Heißbemessung im Stahlbetonbau, das früher (DIN 1045) unbekannt war. Hier werden die unterschiedlichen Auswirkungen von Temperaturen bis zu 1.200°C, sowohl auf den Beton, als auch auf den Betonstahl untersucht. Die Erkenntnisse dieses Rechenverfahrens fließen in die nachfolgenden Nachweise ein.

#### 1.2 Anforderungen DIN 1045 / Altes Bemessungskonzept

Ein Nachweis der extremen Brandbeaufschlagung von StB-Tragwerksteilen war damals unbekannt

Es gab lediglich die Einteilung in Feuerwiderstandsklassen, incl. deren Nachweise. Sie dienen der Einstufung von Bauteilen nach ihrer Feuerwiderstandsdauer. Im Detail geben die Zahlen also an, wie viele Minuten ein Bauteil – zum Beispiel eine Wand, eine Decke oder ein Dach – einem Feuer standhält. Vor dem Hintergrund gültiger Vorschriften und entsprechender Normen gibt es eine Reihe wichtiger Punkte zu beachten.

Feuerwiderstandsklassen oder auch Brandschutzklassen sind Klassen, in die Bauteile nach ihrer Feuerwiderstandsdauer eingestuft werden. Die Feuerwiderstandsdauer stellt die Mindestdauer in Minuten dar, während der ein Bauteil bei Prüfung nach DIN 4102 die in dieser Norm gestellten Anforderungen erfüllt.

### Einflussfaktoren

Die Feuerwiderstandsdauer und damit auch die Feuerwiderstandsklasse eines Bauteils hängen im Wesentlichen von folgenden Einflüssen ab:

- Brandbeanspruchung (ein- oder mehrseitig)
- verwendeter Baustoff oder Baustoffverbund
- Bauteilabmessungen (Querschnittsabmessungen, Schlankheit, Achsabstände usw.)
- bauliche Ausbildung (Anschlüsse, Auflager, Halterungen, Befestigungen, Fugen, Verbindungsmittel usw.)
- statisches System (statisch bestimmte oder unbestimmte Lagerung, einachsige oder zweiachsige Lastabtragung, Einspannungen usw.)
- Ausnutzungsgrad der Festigkeiten der verwendeten Baustoffe infolge äußerer Lasten
- Anordnung von Bekleidungen (Ummantelungen, Putze, Unterdecken, Vorsatzschalen usw.)

### Ermittlung der Feuerwiderstandsklassen

Die Benennung der Feuerwiderstandsklasse bzw. der Brandschutzklasse erfolgt auf der Grundlage der ermittelten Feuerwiderstandsdauer des Bauteils und der Klasse der für dieses Bauteil verwendeten Baustoffe (Baustoffklasse).

### Nachweis der Feuerwiderstandsklassen

- Mit Brandversuchen  
Die Feuerwiderstandsklasse von Bauteilen muss durch Prüfzeugnis auf der Grundlage der DIN 4102 nachgewiesen werden.
- Ohne Brandversuche  
Die in DIN 4102 Teil 4 genannten Bauteile sind ohne Nachweis in die dort angegebenen Feuerwiderstandsklasse einzureihen.

### Einteilung der Feuerwiderstandsklassen

Tabelle – Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102 Teil 2:

Feuerwiderstandsklasse	Feuerwiderstandsdauer t in Minuten
F30	≥ 30
F60	≥ 60
F90	≥ 90
F120	≥ 120
F180	≥ 180

Tabelle (Auszug) – Feuerwiderstandsklassen für verschiedene Bauteile:

Bauteile	DIN 4102	Feuerwiderstandsklassen				
		F30	F60	F90	F120	F180
Bauteile allgemein	Teil 2	F30	F60	F90	F120	F180
Außenwandbauteile	Teil 3	W30	W60	W90	W120	W180
Brandwände	Teil 3			F90	F120	F180
Brandschutzabschlüsse	Teil 5	T30	T60	T90	T120	

Da es eine Vielzahl von älteren Tiefgaragen gibt, deren Tragwerksteile nach DIN 1045 bemessen wurden, was auch für die Tiefgarage unserer WEG (Verfasser = Miteigentümer) gilt, wird in der folgenden

Betrachtung diese Norm zu Grunde gelegt / Erstellung 1975. Der Allgemeingültigkeit der folgenden Nachweise tut dies keinen Abbruch, da die Materialeigenschaften von Beton / Betonstahl gleich geblieben sind.

## **2. Untersuchung Tragwerksteile Stahlbetontiefgarage hinsichtlich Brandlast**

Bei der Tiefgarage handelt es sich um ein Bauwerk aus dem Jahre 1975. Die Deckenlasten aus Erdüberdeckung + Verkehr werden über Stahlbetonstützen im Innenbereich, sowie über Stahlbetonwände im Außenbereich, die gleichzeitig die Horizontalkräfte aus Erd- und Wasserdruck aufzunehmen haben, abgetragen.

Die statisch empfindlichsten Tragwerksteile sind die Stahlbetonstützen (zentrische Belastung) Sie wurden damals nach DIN 1045 bemessen. Sicherheit 2,1 / Betongüte Bn 250 (B 25) / Betonstahl BSt III (420 S) Querschnitt 35 / 35 cm.

Die nachfolgenden Untersuchungen / Nachweise, haben allgemeingültigen Charakter und gelten auch für jüngere Tiefgaragen, die nach den Richtlinien des Eurocode 2 behandelt wurden. An den Materialeigenschaften von Beton / Betonstahl, hat sich zwischenzeitlich nämlich nichts geändert.

### **2.1 Abnahme der charakteristischen Druckfestigkeiten von Beton / Betonstahl bei Brandlast**

Behandelt wird eine Stahlbetonstütze 35 / 35 cm / B 25  $\beta_r = 1,75 \text{ KN / cm}^2$  / BSt 420 S  
Belastung zentrisch, Sicherheitsbeiwert  $\nu = 2,1$  (Knicken = auf Nachweis ohne Einfluß)

#### **Mechanische Eigenschaften**

Die mechanischen Eigenschaften spiegeln sich in der Spannungs-Dehnungsbeziehung der Baustoffe wieder. Unter hohen Temperaturen verändern sich die Materialfestigkeiten und die E-Module von Beton und Stahl. Die Dehnung unter hohen Temperaturen nimmt schon bei geringem Spannungszuwachs deutlich zu. Daraus ergibt sich wiederum, dass die Festigkeit von Beton und Stahl unter hohen Temperaturen abnimmt.

#### **a) Beton / Auswertung Diagramm für Beiwert $k_c$ – Abfall Druckfestigkeit**

Die Spannungs-Dehnungsbeziehung beim Beton wird durch zwei Parameter bestimmt, die Druckfestigkeit  $f_{c,\theta}$  und die Stauchung  $\epsilon_{c1,0}$  (abzulesen am abfallenden Kurventeil).

Ein weiterer Einflussfaktor ist der verwendete Zuschlagsstoff. Unterschieden werden muss hier zwischen quarzhaltigen und kalksteinhaltigen Zuschlägen. Das Diagramm ist für quarzhaltige Zuschläge aufgestellt, da diese Werte im Gegensatz zu den kalksteinhaltigen Zuschlägen geringer ausfallen. Die Tabelle 3.1 im EC2-1-2 gibt die Hauptparameter für die beiden Zuschlagsstoffe an.

Diese Abnahme der Festigkeiten wird im EC2 mit Reduktionsbeiwerten berücksichtigt. Bei Beton ist der Beiwert  $k_{c,\theta}$  für die Betondruckfestigkeit abhängig von der Bauteiltemperatur und dem Zuschlagsstoff. Der Beiwert kann aus dem unten stehenden Diagramm aus der DIN EN 1992 Abs. 4.2.4.2 entnommen werden.

[Außerdem ist zu beachten, dass die Zugfestigkeit des Betons bei steigender Temperatur sehr stark abnimmt und damit nicht mehr zum Ansatz gebracht werden kann. Dies gilt vor allem für die](#)

## Bereiche zwischen den Rissen in den äußeren Bewehrungslagen.

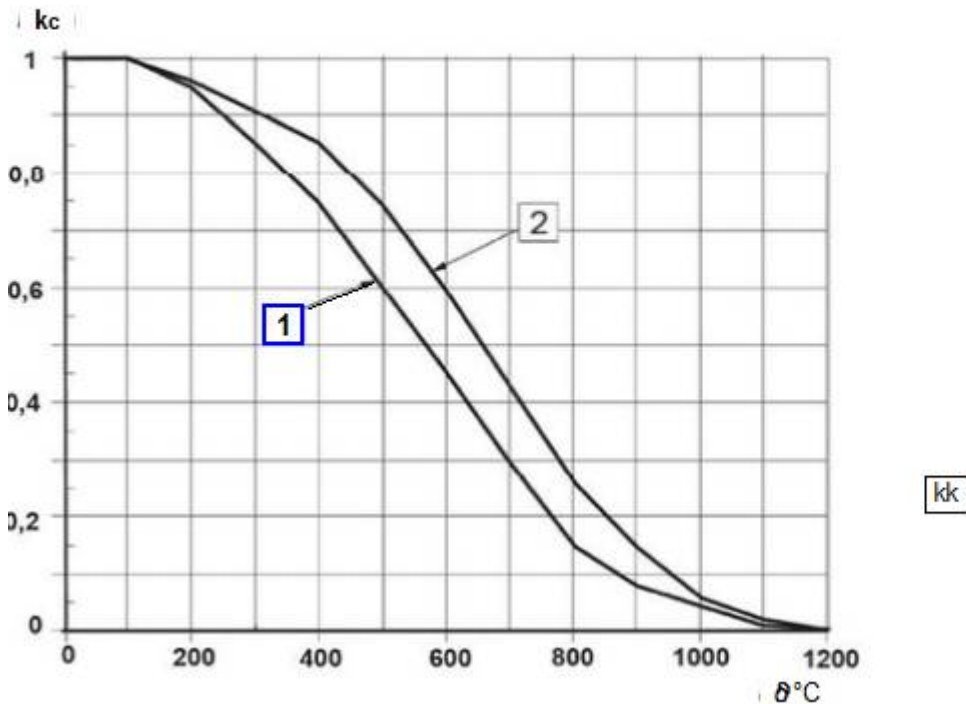
Durch die Abnahme des E-Moduls nimmt die Verformungsfähigkeit von 2,5‰ bei 20°C auf 10-20‰ bei 600°C zu, was zu einer ständigen Umlagerung von Spannungen führt. Daraus resultiert der Abfall der aufnehmbaren Druckfestigkeit.<sup>[6]</sup>

Anmerkung: Wenn der Beiwert  $k_c$  abnimmt, reduziert sich auch das Sicherheitsniveau. Der Basiswert der Urbemessung war 1975  $\nu = 2,1$ . Ab 200°C gilt:  $\nu = 2,1 \times k_c$ .

### Abnahme der charakteristischen Druckfestigkeit von Beton

Kurve 1 : Normalbeton mit quarzhaltigen Zuschlägen

Kurve 2 : Normalbeton mit kalksteinhaltigen Zuschlägen



Sicherheitsbeiwert  
Beton-Druckstab  
für Kurve 1

Temp $\vartheta$ °C	Beiwert $k_c$	Sicherheit $\nu$
0	1,0	2,1
100	1,0	2,1
200	0,95	2,00
300	0,85	1,79
400	0,75	1,58
500	0,6	1,26
600	0,45	0,95
700	0,3	0,63
800	0,15	0,32
900	0,08	0,17
1000	0,05	0,11

### b) Betonstahl / Auswertung Diagramm für Beiwert $k_s$ – Abfall Druckfestigkeit

Die Spannungs-Dehnungsbeziehung beim Betonstahl ist abhängig von der Dehnung und der Temperatur. Bei Stahl spielt die Herstellung eine entscheidende Rolle. Es wird unterschieden zwischen warm- und kaltgewalztem Stahl. Die Tabellen 3.2 im EC2-1-2 geben die Parameter für beide Herstellungsarten an. **Da sich der Betonstahl unter Hitzeeinwirkung ausdehnt und gleichzeitig an Festigkeit verliert, wurde im EC2-1-2 eine kritische Stahltemperatur festgelegt. Diese liegt beim Betonstahl B500 bei 500°C und liegt auf der sicheren Seite.**

Dabei ist die kritische Dehngeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}' = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  nur von der Stahlsorte und dem Belastungsgrad abhängig, jedoch nicht von der Erwärmungsgeschwindigkeit, wodurch die kritische Temperatur generell festgelegt werden kann. Analog zum Beton gibt es für Betonstahl auch einen Reduzierungsfaktor  $k_s$  für die charakteristische Festigkeit  $f_{yk}$  in Abhängigkeit zur Stahltemperatur

### Thermische Eigenschaften

Die thermischen Eigenschaften betreffen die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_c$ , die spezifische Wärmekapazität  $c$  und die Dehnung infolge der Temperaturänderung des Materials.

Die **Wärmekapazität** beschreibt, wie viel Energie notwendig ist, um das Material um 1K zu erwärmen. Das ist bei Beton stark vom Wassergehalt abhängig. Da Wasser mehr Energie zum erwärmen benötigt als Beton, läuft die Erwärmung des Bauteils am Anfang langsamer ab, bis das Wasser verdampft ist. Bei 100°C verlangsamt sich die Erwärmung aufgrund des Verdampfens des Wassers. Danach ist nur noch der Widerstand des Betons vorhanden. Betonstahl nimmt die Wärme wesentlich schneller auf als Beton, da die durchschnittliche Wärmekapazität mit 600J/kg K nur

halb so hoch ist wie bei Beton. **Dadurch erhitzt sich der Stahl schneller als Beton, was zu Spannungen zwischen den Baustoffen im Bauteil führen kann.**<sup>[5]</sup>

Die thermische Leitfähigkeit beschreibt, wie viel Wärmeenergie in einer bestimmten Zeit durch das Material fließt, also wie schnell die Wärme weitergeleitet wird. Die Leitfähigkeit von Beton nimmt bei steigender Temperatur ab und hängt außerdem stark von Temperaturunterschieden und Zuschlägen ab. Das ist wichtig, um zu ermitteln, wie schnell die Wärme ins Innere des Bauteils dringt und wie schnell dieses wieder abkühlt. **Die Wärmeleitfähigkeit von Betonstahl ist deutlich höher als beim Beton.** Somit gibt der Stahl die Wärme schneller ab, hier direkt an den Beton. Das führt zu einer schnelleren Erwärmung des Betons.

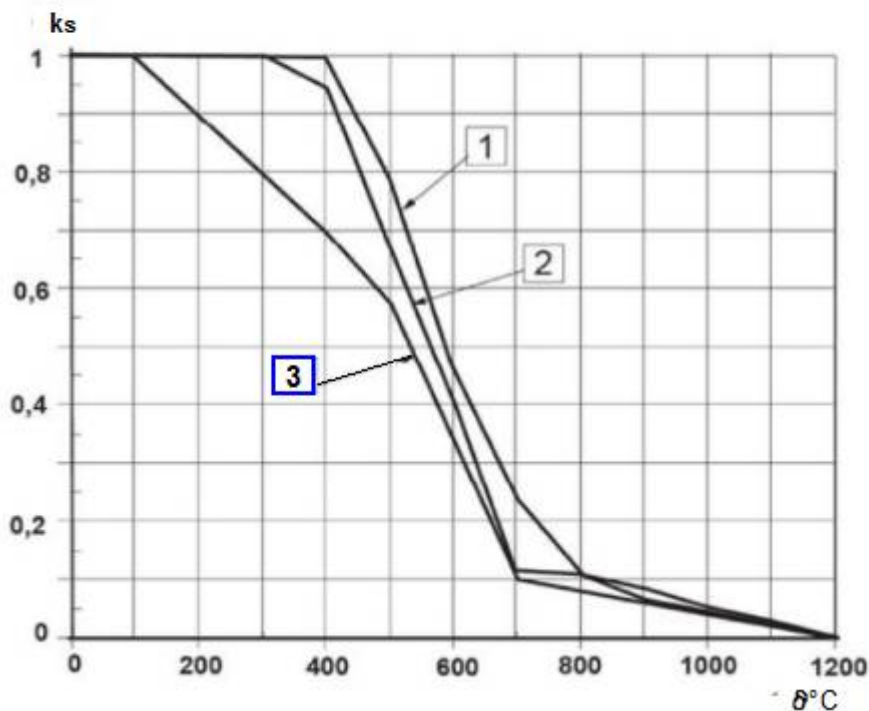
Anmerkung: Wenn der Beiwert  $k_s$  abnimmt, reduziert sich auch das Sicherheitsniveau. Der Basiswert der Urbemessung war 1975  $\nu = 2,1$ . Ab 200°C gilt:  $\nu = 2,1 \times k_s$ .

### Abnahme der charakteristischen Druckfestigkeit von Betonstahl

Kurve 1 : Zugsbewehrung warmgewalzt  $\varepsilon > 2\%$

Kurve 2 : Zugsbewehrung kaltverformt  $\varepsilon > 2\%$

Kurve 3 : Druckbewehrung u. Zugsbewehrung  $\varepsilon < 2\%$



Sicherheitsbeiwert  
Bewehrungs-Druckstab  
für Kurve 3

Temp $\theta$ °C	Beiwert $k_s$	Sicherheit $\nu$
0	1,0	2,1
100	1,0	2,1
200	0,9	1,89
300	0,8	1,68
400	0,70	1,47
500	0,57	1,20
600	0,44	0,92
700	0,10	0,21
800	0,15	0,32
900	0,06	0,13
1000	0,05	0,11

## 2.2 Bemessung Tiefgaragenstütze Belastung zentrisch, keine Kickgefahr, keine Brandlast

Für eine Stahlbetonstütze 35 / 35 cm / B 25  $\beta_r = 1,75 \text{ KN/cm}^2$  / BSt 420 S  $\beta_s = 4,2 \text{ KN/cm}^2$   
Belastung zentrisch, Sicherheitsbeiwert Bemessung war ursprünglich  $\nu = 2,1$

Bauwerk : Tiefgarage 1975 Alter 46 Jahre, Beton Bn 250 = B25 heute und BSt III heute BSt 420 S

B 25  $\sigma_{bd}^* = 0,83 \text{ KN/cm}^2$

BSt III  $\sigma_{sd}^* = 20,0 \text{ KN/cm}^2$

B 15  $\sigma_{bd}^* = 0,50 \text{ KN/cm}^2$

0,60 Faktor für Umrechnung von B 25 auf B 15

Stütze : 35 / 35 cm B 25 / BSt 420 S

$A_b = 35 \times 35 = 1225 \text{ cm}^2$

$A_s = 4 \times \varnothing 20 = 10,12 \text{ cm}^2$

zul N =  $A_b \times \sigma_{bd}^* = 1225 \times 0,83 = 1017$

$A_s \times \sigma_{sd}^* = 10,12 \times 20,0 = 202$

**1219 KN**

$k_c$	$\nu$
$k_s$	$\nu$
1,0	2,1

## 2.3 Zulässige Stützenlasten für verschiedene Brandlasten

Für diese Stahlbetonstütze werden die (realen) Lasten  $N$  ermittelt, die sich aus den Anteilen Beton + Betonstahl ergeben infolge des Abfalls der Druckfestigkeitsbeiwerte  $k_c$  und  $k_s$  ergibt. Da die Tiefgarage schon 46 Jahre alt ist, hat im Zuge der Materialermüdung die Druckfestigkeit Einbußen erfahren. Dieser Faktor wäre zusätzlich zu einer Traglastabnahme zu berücksichtigen. In vorl. Fall wird darauf verzichtet. Um die mögliche Relation aufzuzeigen, werden die Lastanteile für B 15 in der Tabelle unten angegeben.

Anmerkung: Wenn der Beiwert  $k_s$  abnimmt, reduziert sich auch das Sicherheitsniveau. Der Basiswert der Urbemessung war 1975  $\nu = 2,1$ . Ab 200°C gilt:  $\nu = 2,1 \times k_c$ .

Ermittlung auch für B 15 wg. Materialermüdung

Temp $\vartheta$ °C	Beton $k_c$	zul N Beton		Stahl $k_s$	zul N 420 S	N KN
		B 25	B 15			
0	1,0	1017	613	1,0	202	1219
100	1,0	1017	613	1,0	202	1219
200	0,95	965,9	582	0,90	182	1148
300	0,85	864,2	521	0,80	162	1026
400	0,75	763	459	0,70	142	904
500	0,60	610	368	0,57	115	725
600	0,45	458	276	0,44	89	547
700	0,30	305	184	0,10	20	325
800	0,15	153	92	0,15	30	183
900	0,08	81	49	0,06	12	93
1000	0,05	51	31	0,05	10	61

Traglastabnahme

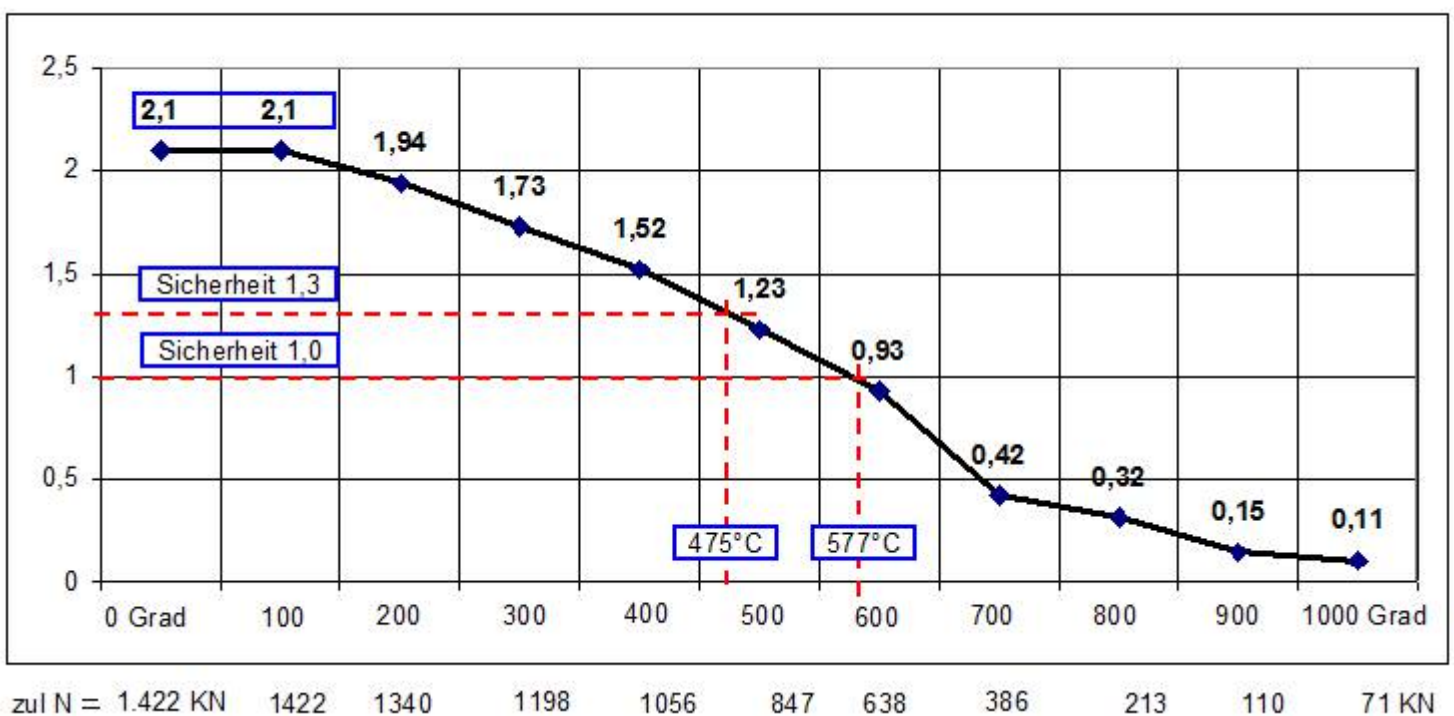
Temp $\vartheta$ °C	für B 25	zug $\nu$
0	100%	2,1
100	100%	2,1
200	94%	1,94
300	84%	1,73
400	74%	1,52
500	60%	1,23
600	45%	0,93
700	27%	0,42
800	15%	0,32
900	8%	0,15
1000	5%	0,11

Bruchlast

Nu KN $\nu \times N$
2.560 KN
2.560 KN
2.230 KN
1.778 KN
1.377 KN
891 KN
511 KN
137 KN
58 KN
14 KN
6 KN

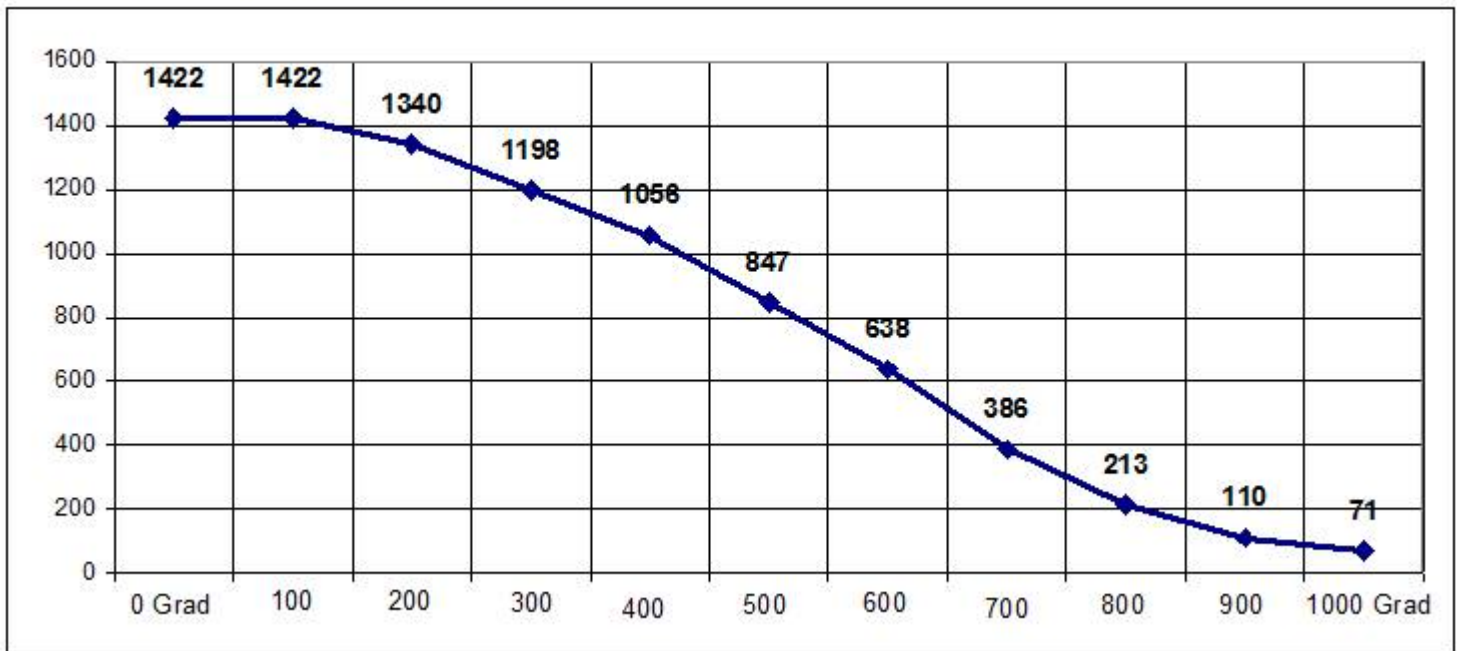
Traglastabnahme / zug. Sicherheiten

Erf. Sicherheit = 1,3 für Katastrophenlastfall Brand / T = 475°C

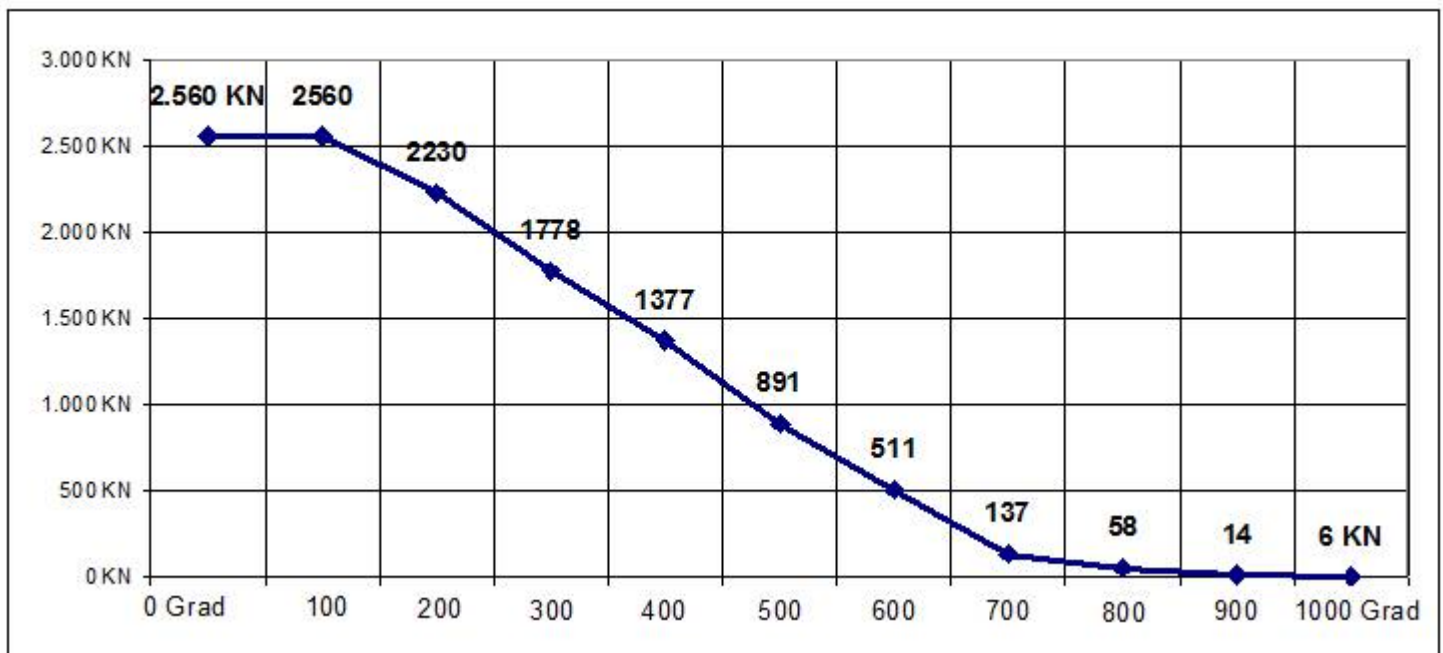




### Zul. Stützenlasten für versch. Brandlasten



### Bruchlasten Nu der Stütze für versch. Brandlasten

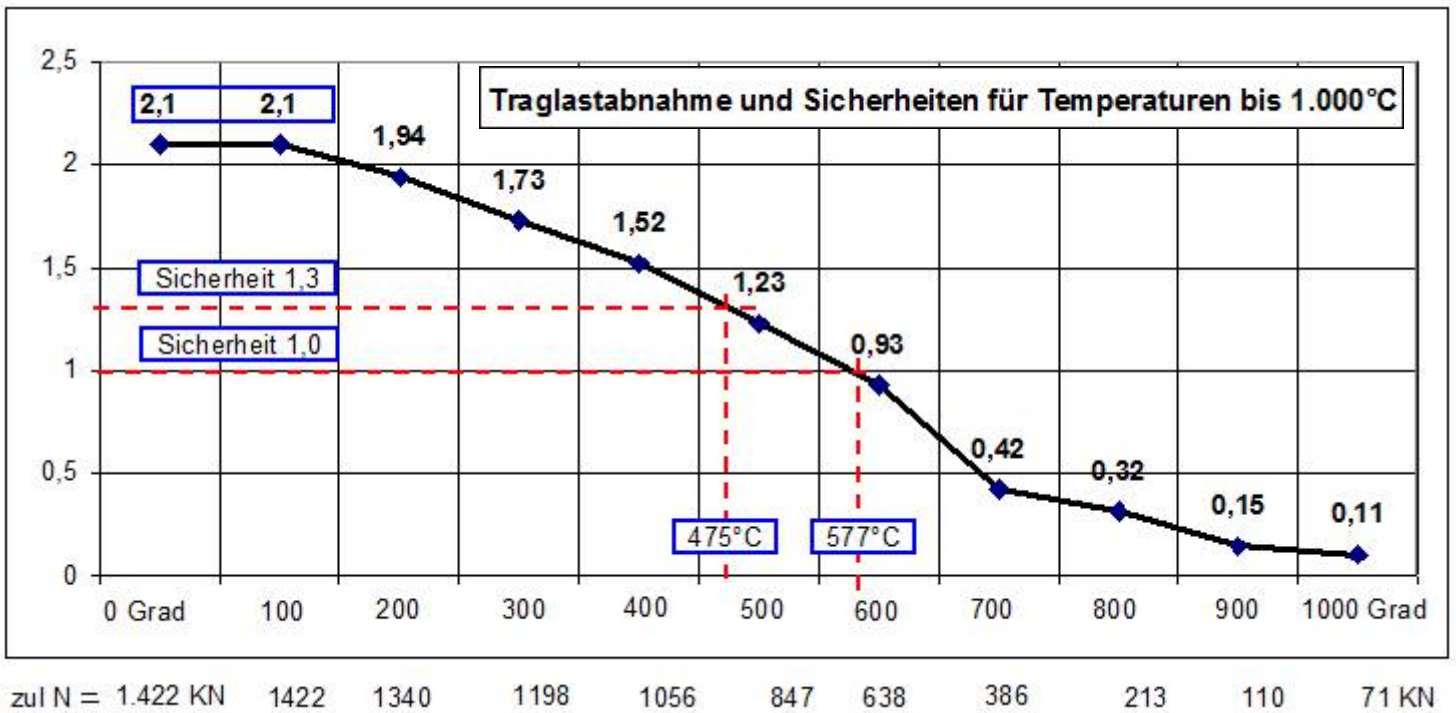


## 2.4 Sicherheitsbetrachtungen / Auswirkungen auf das Tragsystem der Tiefgarage

Die Traglastabnahme, sowie die Abnahme der Sicherheiten, infolge des Abfalls der k-Werte für Beton und Betonstahl ist auf dem Diagramm von S.7 ersichtlich (bzw. nochmalig nä. Seite).

Demnach ergibt sich bei 475°C eine Sicherheit von 1,3. Dieser Wert, kann noch als akzeptabel für den Katastrophenlastfall Brand gelten einem Grenzfall, wo noch nicht mit einem Versagen der Innenstütze zu rechnen ist.

Bei 577°C ist jedoch nurmehr eine Sicherheit von 1,0 vorhanden und ab hier, bei zunehmender Brandlast ist mit einem Bruchversagen der Stütze zu rechnen.



a) Sicherheit 1,94 / Temperaturen bis 200°C : Geringe Traglastdefizite

b) Sicherheit 1,52 / Temperaturen bis 300°C : Hinnehmbar, jedoch schädlich für eine alte Tiefgarage, wg. bereits vorh. Traglastdefizite aus Materialermüdung

c) Sicherheit 1,3 / 475°C :

Betonstahl nimmt die Wärme wesentlich schneller auf, als Beton, da die durchschnittliche Wärmekapazität mit 600J/kg K nur halb so hoch ist, wie bei Beton. Dadurch erhitzt sich der Stahl schneller als Beton, was zu Spannungen zwischen den Baustoffen im Bauteil führt. Der Betonstahl dehnt sich unter der Hitzeeinwirkung aus und verliert gleichzeitig an Festigkeit.

Die starken Dehnungen, sowohl des Betons, als auch des Stahls verursachen große Verformungen und Zwängungen. Sie verstärken die Rissbildungen in Zustand II. Die Stützendehnungen und die daraus resultierenden Verformungen, werden durch die Theorie II. Ordnung zusätzlich verstärkt, was zu großen Verschiebungen am System führt und damit auch zu hohen Schnittkräften.

Für die Tiefgaragendecke ergeben sich dadurch Traglastdefizite und außerdem zusätzliche Risse im Beton, was zu Undichtigkeiten und Wassereintritt in die Tiefgarage führt. Sie ist nun zum Sanierungsfall geworden. Dies gilt auch für die Stützen die ebenfalls an Festigkeit verloren haben und starke Betonabplatzungen aufweisen.

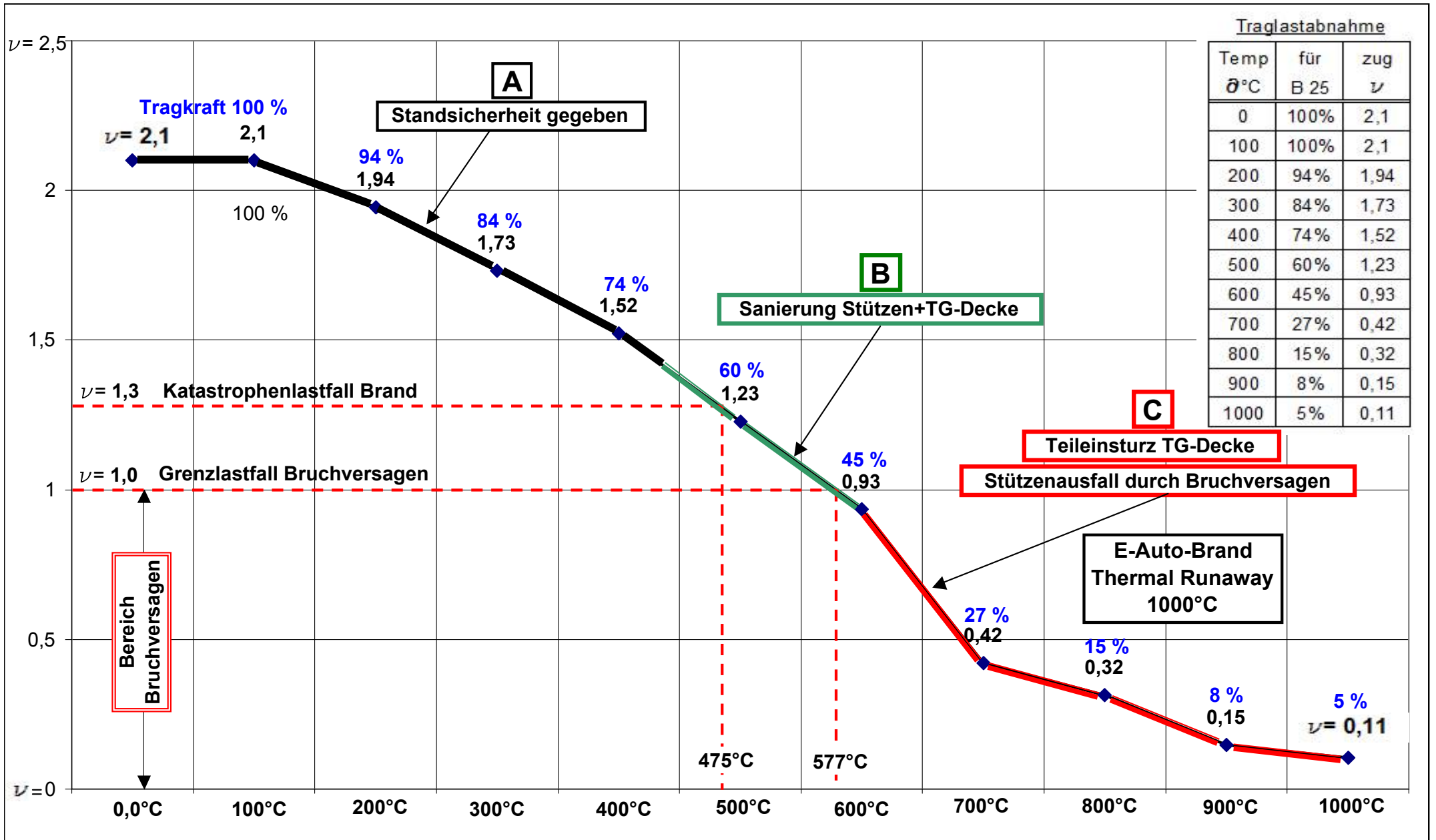
d) Sicherheit 1,0 / 577°C :

Die o. a. Bauwerksschäden haben sich massiv verschärft. Wenn noch kein Bruchversagen einer Stütze eingetreten ist, so hat sich doch der Sanierungsaufwand erheblich erhöht. Auch die Rissbildung in der Tiefgaragendecke hat zugenommen.

e) Sicherheit 0,42 / 700°C :

Eine, oder mehrere Innenstützen gehen zu Bruch. In einem Dominoeffekt versagen auch weitere Stützen, infolge Lastumlagerungen im Zustand II. Es kommt zum Teileinsturz der Tiefgaragendecke. Das Tragwerk ist hier irreparabel geschädigt und nicht mehr sanierungsfähig.

**Traglastleistungsdiagramm:** Stahlbetonstütze mit zentr. Belastung, ohne Knickgefahr : B25 35 / 35 cm Bewehrung 4 x 20 BSt 420 St



### 3. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die vorangegangene statische Untersuchung bzgl. Brandlast einer Tiefgarage hat folgendes ergeben:

- Temperaturen bis 200°C sind relativ unschädlich und somit tolerabel / Sicherheit = 1,94
- Temperaturen bis 300°C sind hinnehmbar, jedoch schädlich für eine alte Tiefgarage, wg. bereits vorh. Traglastdefizite infolge Materialermüdung / Sicherheit = 1,52
- Temperaturen bis 475°C (Katastrophenlastfall Fahrzeugbrand) Betroffene Stützen und Deckenbereiche müssen saniert werden / Sicherheit = 1,3
- Temperaturen bis 577°C (Grenzfall Bruchversagen der StB-Stützen) Falls noch keine Stütze versagt hat, haben sich die vorgenannten Bauwerksschäden massiv verschärft. Die Sanierungsmaßnahmen sind angewachsen / Sicherheit = 1,0.
- Temperaturen bis 700°C (Bruchversagen etlicher StB-Stützen) Es erfolgt ein Teileinsturz der Tiefgaragendecke
- Die statische Untersuchung hat allgemeine Gültigkeit für Stahlbetontiefgaragen deren Deckenlasten über StB-Innenstützen abgetragen werden.
- **E-Autos** mit Lithium-Ionen-Akkus haben Abbrandtemperaturen bis max 1.000°C (Thermal Runaway) und generell > 700°C. **Ein Abstellen in der Tiefgarage ist nicht zulässig**, auch nicht zum Zwecke einer Akku-Aufladung, da keine Löschmöglichkeit bei Fahrzeugbrand besteht. Die Unzulässigkeit ergibt sich überdies auch aus den Bestimmungen des Eurocode 2, siehe unten.

#### Grundlegende Anforderungen an ein Tragwerk nach Eurocode 2

- **P(1)** Ein Tragwerk muß so bemessen und ausgebildet werden, daß es - unter Berücksichtigung der vorgesehenen Nutzungsdauer und seiner Erstellungskosten mit annehmbarer Wahrscheinlichkeit die geforderten Gebrauchseigenschaften behält ; - mit angemessener Zuverlässigkeit den Einwirkungen und Einflüssen standhält, die während seiner Ausführung und seiner Nutzung auftreten können, und eine angemessene Dauerhaftigkeit im Verhältnis zu seinen Unterhaltungskosten aufweist. n
- **P(2)** Ein Tragwerk muß ferner so ausgebildet sein, daß es durch Ereignisse wie Explosionen, Aufprall oder Folgen menschlichen Versagens nicht in einem Ausmaße geschädigt wird, das in keinem Verhältnis zur Schadensursache steht. (da es sich hier um Katastrophenereignisse handelt, müsste singemäß auch der Katastrophelastfall – nicht löschbarer E-Autobrand in einer Tiefgarage, mit Abbrandtemperaturen > 700°C, die zum Teileinsturz der Decke führen, erfasst sein)

#### Quellen:

- Heißbemessung Stahlbetonbau  
[https://baustatik-wiki.fiw.hs-wismar.de/mediawiki/index.php/Hei%C3%9Fbemessung\\_Stahlbetonbau](https://baustatik-wiki.fiw.hs-wismar.de/mediawiki/index.php/Hei%C3%9Fbemessung_Stahlbetonbau)
- Elektrobus löste Großbrand aus – München zieht E-Fahrzeuge aus dem Verkehr  
<https://www.welt.de/vermischtes/article234310454/Elektrobus-loeste-Grossbrand-aus-Muenchen-zieht-E-Fahrzeuge-aus-dem-Verkehr.html>
- Sind unsere Tiefgaragen sicher genug für Elektroautos?  
<https://www.autobild.de/artikel/elektroauto-brandgefahr-tiefgarage-parkhaus-loeschen-20228347.html>

Putzbrunn den 14.10.2021

  
Dipl.-Ing.  
**VOLKER FUCHS**  
089 / 4801794  
vfuc@arcor.de

