

Die Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton

Straßenforschung 3.269 und HL-AG

Aufgabenstellung und Versuchsdurchführung

W. Lindlbauer, M. Zeiml, Wien

Aktualisiert Feb. 2003, A. Heel, W. Kusterle, Innsbruck

Forschungsvorhaben Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton – Aufgabenstellung und Versuchsdurchführung

1. EINLEITUNG

Der Brandschutz und das Brandverhalten von Betonkonstruktionen war seit Einführung der Bauweise Gegenstand zahlreicher Untersuchungen und Versuche. Mit der Anwendung der Vorspannung ohne Verbund nicht nur im Hochbau hat sich auch die Frage nach dem Verhalten des Korrosionsschutzes sogenannter „Fettlitzen“ (Kunststoffmantel und Korrosionsschutzfett) nach einem Brandereignis gestellt.

Von der Sektion Spannbeton der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik (ÖVBB) wurden daher Vorversuche mit Unterstützung ihrer Mitglieder (DYWIDAG – SYSTEMS INTERNATIONAL, STRABAG AG, VOEST ALPINE Austria Draht und VORSPANN – TECHNIK) durchgeführt [1].

Ziel der Sektion Spannbeton war es, nach den Vorversuchen, ein Forschungsvorhaben zu beantragen, um das Tragverhalten vorgespannter Bauteile mit Vorspannung ohne Verbund unter Brandeinwirkung zu untersuchen. Die Auswirkungen eines Druckaufbaus im Hüllrohr und der mögliche Einfluss auf das Abplatzverhalten des Betons sollte ebenfalls untersucht werden [2], [3], [4].

Das Tragverhalten vorgespannter Flachdecken mit Vorspannung ohne Verbund (freie Spanngliedlage) wurde mit Unterstützung der Sektion Spannbeton in Versuchen an der TU Braunschweig untersucht. Für die Untersuchungen der Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton wurde unter der Federführung des nunmehrigen Instituts für Betonbau, Baustoffe und Bauphysik der Universität Innsbruck beim Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie ein Forschungsvorhaben beantragt, das auch von der Eisenbahn – Hochleistungsstrecken AG unterstützt wird.

Neben den Aktivitäten der Sektion Spannbeton sind in diesem Forschungsvorhaben auch jene des Arbeitskreises „Faserbeton“ der Österreichischen Vereinigung für Beton- und Bautechnik eingeschlossen. Über die Grundlagen des Forschungsvorhabens sowie weitergehende Aktivitäten wurde bereits in [5] und [6] berichtet.

Die Endergebnisse des Forschungsvorhabens sollen in der Schriftenreihe Straßenforschung des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie veröffentlicht und in den Richtlinien "Weiße Wanne“, „Innenschalenbeton“ sowie „Faserbeton“ der ÖVBB berücksichtigt werden. Die HL-AG wird die Ergebnisse in die Planung anstehender Projekte einfließen lassen.

2. AUFGABENSTELLUNG

Brandereignisse der letzten Jahre haben zu einer verstärkten Forschungstätigkeit in Hinblick auf die Sicherheit von Verkehrsbauwerken geführt. Bei diesen Brandereignissen wurde festgestellt, dass wesentlich größere Brandlasten als bisher angenommen für die Bemessung der Tragkonstruktionen zu berücksichtigen sind. Die bisher gültige Einheitstemperaturkurve wurde durch Temperaturkurven ersetzt, die in den ersten Minuten einen wesentlich schnelleren Temperaturanstieg und in der Folge ein höheres Temperaturniveau aufweisen [5], [6].

Die Gewährleistung des Personenschutzes, die Sicherstellung des baulichen Brandschutzes, die Minimierung des Schadenumfanges und die Möglichkeit einer raschen und kostengünstigen Instandsetzung von Tragwerken sind das übergeordnete Ziel der Forschungstätigkeiten.

Von Interesse für die Sektion Spannbeton war das Verhalten der Spannglieder für Vorspannung ohne Verbund im Brandfall sowie der Korrosionsschutz nach einem Brandereignis sowie allfällige Einflüsse des Korrosionsschutzmantels auf das Abplatzen des Betons, für die Richtlinie „Faserbeton“ die Auswirkung von Fasern und deren Menge auf das Abplatzverhalten des Betons. Die bisherigen empirischen Festlegungen zur Steigerung des Brandwiderstandes sollten überprüft werden [7]. Für die statische Berechnung des Lastfalles Brand, ist neben dem Temperatureindringverhalten das Abplatzverhalten der Betonrandschichten von großer Bedeutung.

3. VERSUCHSKÖRPER UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

Die Größe und Dicke der Versuchskörper sollte nach Möglichkeit jenen der Ausführung entsprechen, wobei insbesondere auf die vorhandenen Versuchseinrichtungen und den Transport der Versuchskörper Rücksicht zu nehmen war. Die Versuchskörper wurden mit Abmessungen von 1,40 m x 1,80 m und Dicken von 30 cm bzw. 50 cm auf den Baustellen der A8 Innkreis Autobahn in Steinhaus und des Lainzer Tunnels in Wien hergestellt, die Prüfung erfolgte am Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung (IBS) in Linz. Die Dicken entsprechen somit Bauteilabmessungen, wie sie z.B. für Innenschalen üblich sind.

Die Lagerung der Versuchskörper erfolgte gem. Punkt 3.1 auf der Baustelle. Die Vorspannung der Versuchskörper erfolgte unmittelbar vor dem Versuch. Durch die Vorspannung wird zum einen eine Dehnungsbehinderung simuliert, zum anderen ein Lastzustand, wie er Bedingungen in Tragwerken entspricht.

Durch eine möglichst große Variation der Versuchsparameter wurde versucht, möglichst alle in der Praxis auftretenden Einwirkungen und Bedingungen nachzuvollziehen. Auch wurden aktuelle Entwicklungen in der Betontechnologie berücksichtigt und Alternativen zum herkömmlichen Brandschutz untersucht (siehe Tabelle 1)

VK	Brandkurve	Lagerung	Dicke	Beton	Bewehrung	Fasern	Spannung 3) 4) [Mpa]	Zuschlag
01, 02	RWS 120'	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Ø 14/14, e = 10	0	Druck ¹⁾²⁾ 1,16	Kalk
03, 04	RWS 120'	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Ø 14/14, e = 10	1,5 kg PP	Druck ¹⁾²⁾ 1,16	Kalk
05, 06	RWS 120'	Trocken/Heiz-ung	50	B30/WU/FTB/BS1	Ø 14/14, e = 10	0	Druck ¹⁾ 1,16	Kalk
07, 08	RWS 120'	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Ø 14/14, e = 10	1,5 kg PP	Druck ¹⁾²⁾ 9,0	Kalk
09, 10	RWS 120'	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Ø 14/14, e = 10	Cocktail	Druck 9,0	Kalk
11, 12	RWS 120'	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Ø 14/14, e = 10	0	Druck ¹⁾ 9,0	Kalk
13, 14	RWS 120'	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Ø 14/14, e = 10	0	Zug ⁵⁾	Kalk
15, 16	RWS 120'	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Ø 14/14, e = 10	1,5 kg PP	Zug ²⁾⁵⁾	Kalk
17, 18	RWS 120'	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Ø 14/14, e = 10	3,0 kg PP	Druck ¹⁾²⁾ 6,5	Kalk
19, 20	ETK 240'	Trocken/Luft	30	B30/300/SA/WU/FB/TS	Ø 20/14, e = 10	0	Druck ²⁾ 1,16	Kalk
21, 22	RWS 120'	Trocken/Luft	30	B40/HL/FTB	Ø 20/14, e = 10	0	Druck ¹⁾²⁾ 6,5	Kalk
23, 24	RWS 120'	Trocken/Luft	30	B40/HL/FTB		3,0 kg PP	Druck 6,5	Kalk
25, 26	ETK 240'	Trocken/Luft	30	B30/WU/FTB/BS1	Ø 20/14, e = 10	1,5 kg PP	Druck ¹⁾²⁾ 1,16	Kalk
29, 30	Lainz 180'	Trocken/Heizung	50	B30/WDI	3lagig	0	Zug ¹⁾	Quarz
31, 32	Lainz 180'	Trocken/Heiz-ung	50	B30/WDI	Ø 14/14, e = 10	1,5 kg PP	Zug ¹⁾²⁾	Quarz
33, 34	Lainz 180'	Trocken/Heiz-ung	50	B30/WU	ohne	0	Druck 1,16	Quarz
35, 36	Lainz 180'	Trocken/Heizung	50	B30/WU	ohne	1,5 kg PP	Druck 1,16	Quarz
43, 44	RWS 120'	Wasser	50	B30/WU/FTB/BS1	Ø 14/14, e = 10	0	Druck 1,16	Quarz
51	RWS 180'	Trocken/Luft	50	B30/WU/FTB/BS1/SA	Ø 14/14, e = 10	1,0 kg PP	Druck 1,16	Kalk
52						0		
54, 55	Lainz 180'	Trocken/Luft	50	B30/WU/FTB/BS1	3lagig	0	Ohne	Kalk

Legende: 1) Spannkraftbestimmung
2) Litze einbetoniert (Fettdruck)
3) Druck/Zug in Querrichtung (Zug an der Unterseite)
4) Dehnungsbehinderung, für alle Versuche
5) Zustand II
6) Nullproben für Festigkeit + Feuchte
7) Dampfdruckmessung

Tabelle 1: Versuchsprogramm

3.1 Versuchsp Parameter:

- Betonstandard:

Als Betonstandard wurde B30/WU/FTB/BS1 nach der Richtlinie „Weiße Wanne“ gewählt [8]. Weiters wurde Hochleistungsbeton B40/HL/FTB und B30/FB/LPV verwendet, so dass alle in der Praxis derzeit üblichen Betone geprüft wurden. Um den Bedingungen des Wiener Raumes zu entsprechen wurde auch quarzhaltiger Zuschlag verwendet. Der Betoneinbau sollte Baustellenbedingungen entsprechen und erfolgte daher durch die Baustelle, siehe Abb. 1 und Abb. 2.



Abb. 1: Betonieren Versuchskörper VK04



Abb. 2: Versuchskörper VK30 mit Druckmesssonden

- Dicke der Versuchskörper:

Die Dicke der Versuchskörper war ursprünglich mit 30 cm vorgesehen. Um den Bedingungen aktueller Bauvorhaben zu entsprechen, wurde die Dicke der meisten Probekörper auf 50 cm erhöht. Bei einer Dicke von 30 cm entsprechen die Versuchskörper sowohl unbewehrten als auch bereits bewehrten Innenschalen. Mit der Dicke von 50 cm wurde der beim Lainzer Tunnel gewählten „Verbundkonstruktion“ aus Bohrpfehlwand und einer Innenschale aus WDI-Beton Rechnung getragen.

- Bewehrung der Versuchskörper:

Die Versuchskörper wurden in der Regel mit einem Netz $\varnothing 14$ e = 10 cm bewehrt, womit übliche Bewehrungsgehalte abgedeckt sind. In einzelnen Fällen betrug der Bewehrungsdurchmesser auch 20 mm, der Bewehrungsabstand entsprechend den Anforderungen 20 cm.

Die von der HL-AG beauftragten Versuchskörper wurden auch mit einer drei- und vierlagigen Bewehrung ausgeführt (dritte Lage AQ 50) um ein Abplatzen des Betons bis zur Tragbewehrung zu verhindern.

- Lagerung der Versuchskörper:
Ein Teil der Versuchskörper wurde vier Wochen wassergesättigt gelagert, um so die ungünstigen Bedingungen z.B. eines Verkehrstunnels zu simulieren. Ein weiterer Teil der Versuchskörper wurde bei Umgebungsbedingungen gelagert. Um trockenere Versuchskörper prüfen zu können, wurden diese mit Heizmatten ausgestattet.
Die Prüfung erfolgte in der Regel im Alter von 28 Tagen, wobei die Kapazität der Prüfanstalt zu berücksichtigen war.
- Fasern und Fasergehalt:
Die Zugabe geeigneter Fasern und deren Menge ist wesentlich für das Maß der Betonabplatzungen. Es wurden Versuchskörper mit und ohne Zugabe von Polypropylen-Fasern geprüft, die Menge wurde zwischen $1,5 \text{ kg/m}^3$ und $3,0 \text{ kg/m}^3$ variiert. Geprüft wurde auch ein sogenannter „Fasercocktail“ mit $1,5 \text{ kg/m}^3$ PP-Fasern und 30 kg/m^3 Stahlfasern.
- Spannungszustände:
Auch zur Simulation der Dehnungsbehinderung wurden die Versuchskörper in Längsrichtung mit $0,5 \text{ MPa}$ vorgespannt. In Querrichtung wurden Druckspannungen zwischen $1,16 \text{ MPa}$ und 9 MPa aufgebracht, weiters Zugspannungen an der Versuchskörperunterseite, zum Teil mit Vorspannung, zum Teil mit Spannrahmen (siehe Abb. 3 und Abb. 4). Die Spannungszustände sollten Aufschlüsse über das Abplatzverhalten unter Last geben.
- Brandraumabmessungen:
Der Brandraum hatte Abmessungen von $120 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$. Der zweistufige Ölbrenner wurde über die zentrale Regelung, an der die Temperaturen digital aufgenommen wurden, gesteuert.
- Brandkurve:
Grundlage für die Versuche war RWS 120' (Rijkswaterstaatkurve) mit 1200°C nach 10 Minuten, und einem Temperaturmaximum von 1350°C nach 60 Minuten. Anschließend erfolgt eine Abnahme der Temperatur auf 1200°C nach 120 Minuten. Im Rahmen der Versuche wurde die Brandbelastung variiert, so dass auch Versuche nach ETK 240' durchgeführt wurden.
Die von der HL-AG beauftragten Versuche wurden mit der Brandkurve Lainzer Tunnel 180' (mit Berücksichtigung der Abkühlphase) durchgeführt.



Abb. 3: Vorspannung mit Spanngliedern



Abb. 4: Vorspannung mit Spannrahmen

3.2 Messungen:

- Temperaturmessungen:

Die Temperaturenderungen über den Querschnitt wurden mit Temperaturfühlern an ausgewählten Messpunkten, s. Abb. 5, festgehalten. Temperaturfühler wurden an der schlaffen Bewehrung, an der Spannbewehrung und im Beton angeordnet. Die Temperaturmessungen an der Bewehrung erfolgten in Tiefen von 4 cm und 10 cm von der beflaminten Oberfläche.

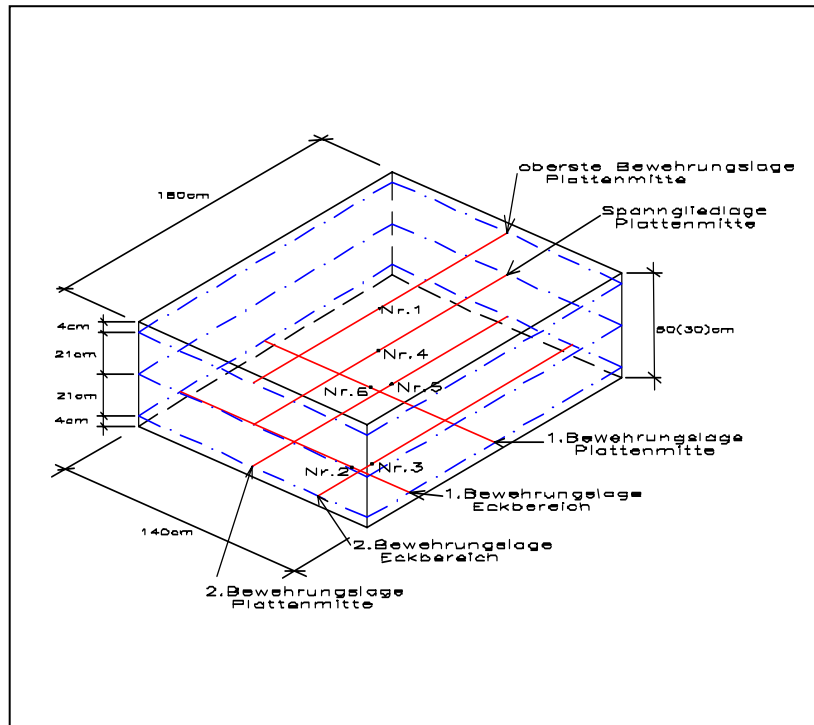


Abb. 5: Anordnung der Temperaturfühler

- Abplatzungen:
Während der Versuche wurden die Abplatzgeräusche aufgezeichnet (mittels Tonbandgerät), nach Versuchsende wurde die beflammete Oberfläche visuell untersucht und die Abplatzungen festgehalten. Der abgeplatzte Beton wurde gewogen, die Tiefe der Abplatzungen gemessen. Einen Tag nach dem Versuch wurde untersucht, ob ein nachträgliches Abplatzen stattfand.
- Feuchtegehalt:
Da der Feuchtegehalt des Betons einen wesentlichen Einfluss auf sein Abplatzverhalten hat, wurde an Nullproben die Restfeuchte bestimmt. Weiters wurden die Versuchskörper vor und nach dem Versuch gewogen, ebenso die abgeplatzte Masse.
- Spannkraftverlauf:
Der zeitliche Verlauf der Spannkraft wurde mittels Spannprelle gemessen (Abb. 6).
- Fettdruck in einbetonierten Spannlitzen:
Zusätzlich zur Vorspannkraft wurde auch das Verhalten von „Fettlitzten“ nahe der beflaminten Oberfläche untersucht. Dazu wurde der Druckanstieg aufgrund der Erwärmung (Ausdehnung des Korrosionsschutzfettes) mittels eines Manometers gemessen, siehe Abb. 7.



Abb. 6: Messung des Spannkraftverlaufs



Abb. 7: Litze mit Fettdruckmessung

- Dampfdruckmessung:
Einen maßgeblichen Einfluss auf das Abplatzen des Betons hat die Entwicklung des Dampfdrucks, der durch das Verdampfen des Porenwassers entsteht [9], [10]. Dieser Druck wurde mittels Druckmessdosen der Fa. Geodata in bestimmten Tiefenstufen gemeinsam mit der Absoluttemperatur gemessen um so einen Zusammenhang zwischen Temperatur und Dampfdruck zu dokumentieren, siehe Abb. 8 und Abb. 9.

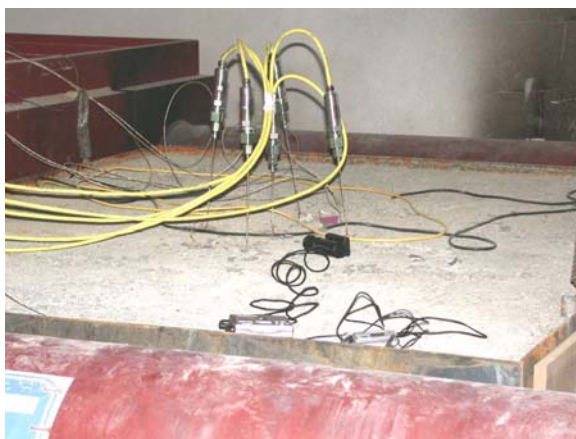


Abb. 8: Druckmessung mittels Drucksonden



Abb. 9: Druckaufnehmer, d = 38 mm

- Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit:
Mit den Versuchskörpern wurden Probekörper hergestellt an welchen die Druckfestigkeit die Biegezugfestigkeit und Wasserundurchlässigkeit bestimmt wurde.
- Bohrkernentnahme:
Nach den Versuchen wurden an ausgewählten Versuchskörpern Bohrkerne entnommen und die Druckfestigkeit in verschiedenen Tiefenstufen sowie die Wassereindringtiefe bestimmt. Weiters wurde die Luftdurchlässigkeit des Betons ermittelt [10]. Da sich die Luftdurchlässigkeit, insbesondere die des Faserbetons, mit der Temperatur verändert, wurden Proben mit unterschiedlichen Temperaturbelastungen (80°C bis 400°C) geprüft.
- Prüfung der Vorspannbewehrung:
Es wurden Spannlitzen ausgebaut und einem Zugversuch unterzogen (Bestimmung der Streckgrenze und der Restzugfestigkeit).
- Prüfung der schlaffen Bewehrung:
Die schlaffe Bewehrung wurde gelöst und deren Arbeitslinie im Zugversuch bestimmt.

4. BEOBACHTUNGEN UND ERGEBNISSE

Die Versuchsdurchführung und die Aufzeichnung der Messdaten oblag dem Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung (IBS) in Linz, die Versuchsserie begann Anfang 2002 und wurde bis Dezember 2002 abgeschlossen.

Festzuhalten ist, dass die Intensität der Abplatzungen und deren Mengen die Erwartungen überstiegen. Die größten Abplatzungen traten bei Versuchskörpern unter Wasserlagerung und ohne Faserzugabe auf, da hier ausreichend Porenwasser vorhanden war, somit genug Wasserdampf entstehen konnte, und keine Fasern das Porensystem beim Brandfortschritt vergrößerten. Abplatzungen wurden mit Tiefen bis zu 30 cm festgestellt.

Die normale Netzbewehrung konnte das Abplatzen des Betons nicht verhindern. Auch bei diesen Versuchskörpern kam es zu Abplatzungen bis zu einer Tiefe von 12 cm bis 15 cm von der beflamten Oberfläche (Abb. 10). Erst sehr engliegende Bewehrungsnetze konnten diesen Abplatzprozess stoppen. Durch Faserzugabe konnte das Abplatzen verhindert werden, wenn die Dosierung entsprechend hoch war (Abb. 11).



Abb. 10: Untersicht Versuchskörper VK30
3-lagige Bewehrung ohne Fasern



Abb. 11: Untersicht Versuchskörper VK23
2-lagige Bewehrung mit Fasern

Die Temperaturmessungen bestätigten die visuellen Beobachtungen während der Versuche. Bei Versuchskörpern ohne Faserzugabe, bei denen es bereits in den ersten Minuten nach Versuchsbeginn zu Abplatzungen kam, stieg die Temperatur mit dem Abplatzen des Betons auf Brandraumtemperatur.

Aus den Messwerten der Versuchskörper mit Faserzugabe kann der Temperaturanstieg in den einzelnen Bewehrungslagen verfolgt werden. Den Messungen zu Folge sind bei 4 cm Betondeckung in der Bewehrung Temperaturen von 400 °C bis 500 °C nach 120 Minuten Temperatureinwirkung (Maximaltemperatur 1200°C) zu erwarten.

In den Diagrammen 1 und 2 sind die Temperaturverteilungen eines Versuchskörpers ohne Faserzugabe (VK29) jenen eines Versuchskörpers mit 1,5 kg/m³ PP-Fasern (VK35) gegenübergestellt. Zusätzlich zu den üblichen Lagen der Temperatursonden wurden beim 3-lagig bewehrten Versuchskörper zwei weitere Sonden an der Netzbewehrung in 4 cm Tiefe angebracht. Die Bezeichnungen lauten dabei ‚M‘ (Mitte) und ‚E‘ (Eck), zusätzlich ist Sondentiefe (vom Brandraum entfernt) angegeben. Die Sonden des Versuchskörpers VK35 wurden mittig in den Tiefen 2, 4, 6, 10, 16 und 20cm eingebaut. Im Diagramm 3 ist das Abplatzverhalten über die Zeit dargestellt. Dieser Verlauf lässt sich nicht immer exakt bestimmen, daher ist in manchen Fällen ein Spielraum der Abplatztiefe angegeben, der zum Beispiel für den Versuchskörper VK30 durch die Linien VK30 und Abweichung VK30 begrenzt ist. Die maximale Abplatztiefe beträgt 24cm und ist durch den Versuchsaufbau begrenzt.

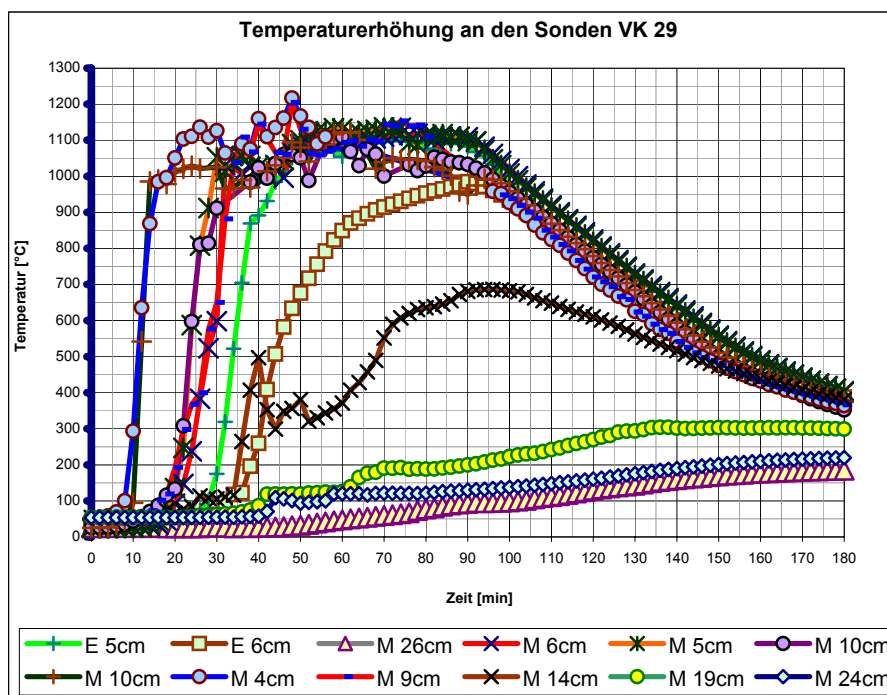


Diagramm 1: Temperaturkurven Versuchskörper VK 29
 3-lagige Bewehrung ohne Fasern, Betondeckung 4 cm bzw. 10 cm
 Temperatur- Zeitkurve des Brandes: Lainz 180'

Die Messung des Spannkraftverlaufs brachte wichtige Erkenntnisse über das Verhalten von Vorspannung ohne Verbund im Brandfall.

Die Fettdruckmessung ergab signifikante Unterschiede bei einzelnen Versuchskörpern. Der maximal gemessene Fettdruck betrug 9,5 bar nach 100 Minuten Branddauer. Bei allen Fettdruckmessungen war gegen Brandende ein Sinken des Fettdruckes feststellbar.

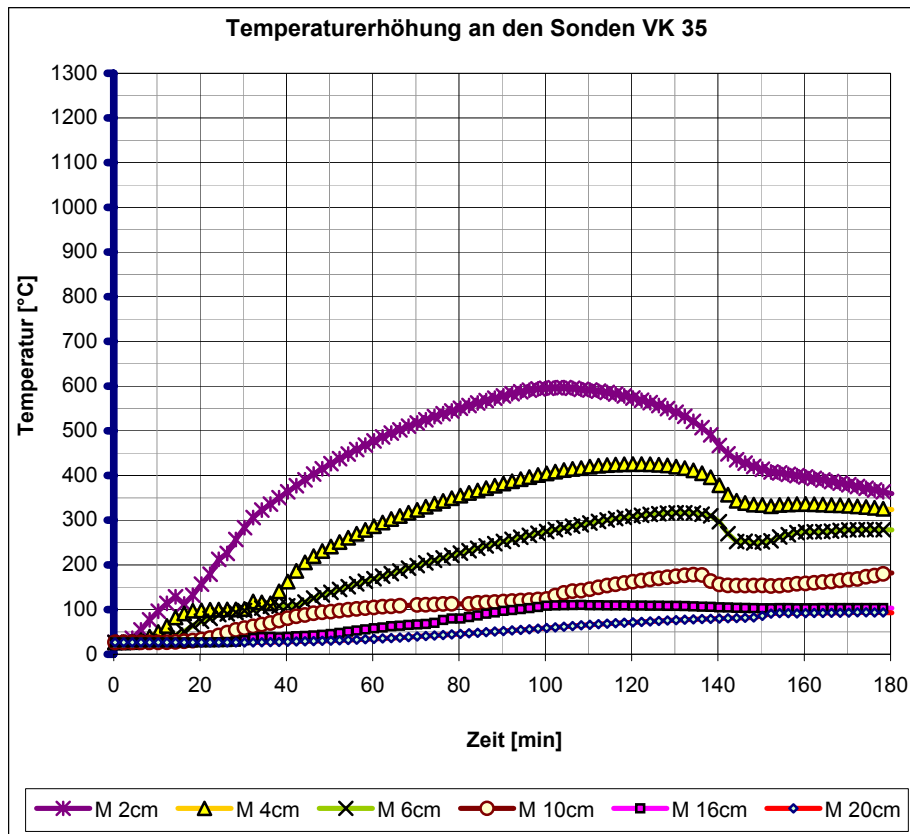


Diagramm 2: Temperaturkurven Versuchskörper VK35
 ohne Bewehrung mit 1,5 kg /m³ PP-Fasern,
 Temperatur- Zeitkurve des Brandes: Lainz 180'

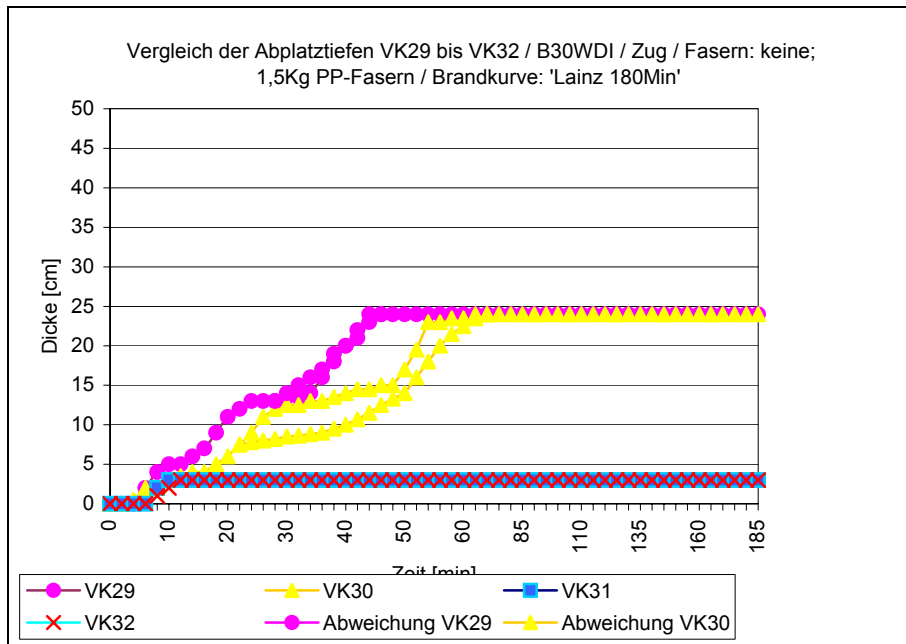


Diagramm 3: Zeitlicher Verlauf der Abplatzungen für VK29 bis VK31

5. AUFTRAGGEBER UND AUSFÜHRENDE

Auftraggeber des Forschungsvorhabens ist das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und die Eisenbahn-Hochleistungsstrecken AG.

Ausführende sind:

- Institut für Betonbau, Baustoffe und Bauphysik der Universität Innsbruck Prof. Dipl.-Ing. Dr. Wolfgang Kusterle
- Bekaert Ges.m.b.H., Maria Enzersdorf
- Dywidag-Systems International, Elsbethen/Salzburg
- Fibrin Austria, Linz
- Dipl.-Ing. Günter Hampejs, Bruck a.d. Mur
- IBS – Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung, Linz
- Dipl.-Ing. Dr. Wolfgang Lindlbauer, Wien
- Strabag AG, Linz
- VA - Austria Draht Ges.m.b.H., Bruck a.d. Mur
- Vorspann-Technik Ges.m.b.H., Oberndorf bei Salzburg

6. LITERATUR

- [1] Nistelberger, M.: Bericht über Brandversuche an Betonplatten mit einbetonierten kunststoffummantelten Spannbetonlitzten, TQ-Nr.: 549, unveröffentlichter Bericht der VOEST - ALPINE Austria Draht GmbH, Februar 2001
- [2] Herberghen, P., Damme, V.: Fire Resistance of Post – Tensioned Continuous Flat Floor Slabs with Unbonded Tendons (U.T.), FIP notes 1983/4
- [3] Kordina, K., Richter, E.: Untersuchungen an Bauteilen mit Vorspannung ohne Verbund unter Brandbeanspruchung gemäß DIN 4102, Technische Universität Braunschweig, 1983
- [4] *fib* - Structural Concrete, Textbook on Behaviour, Design and Performance, Volume 3, December 1999
- [5] Kusterle, W., Waubke, N.V.: Die Brandbeständigkeit von Faser-, Stahl- und Spannbeton, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Schriftenreihe Heft 47/2001
- [6] Lemmerer, J.: Brandschutz im Tunnelbau – Stand österreichischer Aktivitäten, Forschungen und Planungen, Österreichischer Betontag 2002
- [7] Richtlinie „Faserbeton“, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Wien 2001
- [8] Richtlinie „Weisse Wanne“, Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, Gründruck, Wien 2002
- [9] Kalifa, P., Menneteau, F.-D., Quenard, D.: Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, Cement and Concrete Research 30 (2000)
- [10] Kalifa, P., Chéné, G., Gallé, C.: High – temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres - From spalling to microstructure, Cement and Concrete Research 31 (2001)