Beton mit erhöhter Brandbeständigkeit

Autor(en): **Wetzig, Volker**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **118 (2000)**

Heft 43

PDF erstellt am: **19.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-79995

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Volker Wetzig, Sargans

Beton mit erhöhter Brandbeständigkeit

Ausgehend von den Schadensbildern, die im Brandfall bei einem Betonbauteil festzustellen sind, wird hier ein Konzept vorgestellt, das den Schädigungsmechanismen weitgehend widersteht. Prüfungen, mit den höchsten in Europa genormten Brandlasten, bestätigen die Richtigkeit des Konzepts. Die Überlegungen, die an dieser Stelle für den Tunnelbau aufgezeigt werden, gelten analog auch für Anwendungen und Brandschutzbemessungen bei sonstigen Betonkonstruktionen.



1
Zerstörter Beton und freigelegte Armierung nach Brandbelastung



2
Zerstörte Betonstruktur und Zuschlagstoffkomponenten

Die Häufung von schweren und schwersten Brandunglücken bei Tunnelbauwerken in Europa im letzten Jahr hat zu einer starken Sensibilisierung im Hinblick auf Aspekte der Betriebssicherheit der Verkehrstunnel geführt. Die Betriebssicherheit als umfassender Begriff wird dabei von verschiedensten Parametern wie:

- Infrastruktur (Bauwerkskonstruktion)
- Betriebsmitteln (Fahrzeuge, Ladung)
- Nutzer (Fahrzeuglenker)
- Betrieb und Organisation

beeinflusst. Die Optimierung eines Parameters liefert einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Sicherheit im Tunnel, kann diese jedoch nicht alleine gewährleisten.

Schädigungsmechanismen

Das Ausmass der Betonzerstörung im Brandfall, wie in Bild 1 gezeigt, ist bei konventionellem Beton auf mehrere Schadensmechanismen zurückzuführen. Die einzelnen Schadensbilder überlagern sich in der Regel und können in die folgenden Kategorien eingeteilt werden:

- Wasserdampfbildung
- chemische Umsetzungen
- Armierungsversagen
- thermische Längenänderungen.

Wasserdampfbildung

Die Wirkungsweise des Wassers im Beton erfolgt in vielfältiger Weise, wobei die schädigenden Einflüsse überwiegen. Der Phasenübergang von flüssig zu gasförmig beim Wasser, der bekanntermassen bei 100 °C erfolgt, ist mit einer Energieaufnahme von 2257 kJ/kg verbunden. In Anbetracht der Energiemengen, die bei einem Brand freigesetzt werden, ist diese Energieaufnahme unbedeutend und bewirkt nur während weniger Augenblicke eine Kühlwirkung.

Neben der Energieaufnahme beim Phasenübergang von flüssig zu gasförmig kommt es zu einer massiven Volumenzunahme, die für das Abplatzen von Betonteilen verantwortlich ist. Das Dampfvolumen beträgt bei gleichen Druckbedingungen das rund 1100-fache der gleichen Masse flüssigen Wassers. Da dieses Volumen im Beton nicht zur Verfügung steht, kommt es zum Druckaufbau im Beton, der sich bis zum Erreichen der Zugfestigkeit des Betons aufbaut und sich beim Abplatzen schlagartig entspannt. Es handelt sich dabei um ein dynamisches System, da die Wasserdampfbildung als Funktion der Zeit erfolgt und ein Teil des Wasserdampfs über die bestehende Porenstruktur entweichen kann. Erst wenn im Bauteil mehr Wasserdampf entsteht als über die Porenstruktur entweichen kann, kommt es zur Schädigung. Dies bedeutet, dass die Brandintensität sowie die Porosität des Betons den Schädigungsvorgang beeinflussen. Bei einem kleinen Brand mit einem geringen Energieeintrag und einer entsprechend hohen Porosität sind weniger Schäden zu erwarten, als bei einem Grossbrand im Bereich eines dichten Betons. Die aus konstruktiven Überlegungen gerechtfertigte Forderung eines Betons mit hoher Festigkeit und Dichtigkeit zur Erzielung einer ausreichenden Beständigkeit erweist sich im Hinblick auf die Brandbeständigkeit als kontraproduktiv.

Chemische Umwandlungen

In Abhängigkeit von der Betontemperatur kommt es zu chemischen Umsetzungen von Mineralien aus dem Zementstein und den Zuschlagstoffen (Bild 2).

Dehydrierung

Temperaturen höher 400 °C führen im Beton zur Dehydrierung des Calciumhydroxydes des Zementsteins nach folgendem Reaktionsmechanismus:

$$Ca(OH)_2 \rightarrow CaO + H_2O$$

Durch die Zersetzung nimmt die Festigkeit des Zementsteins ab, bis hin zum vollständigen Zerfall des Betons. Das in Form von Dampf frei werdende Wasser beschleunigt den Zerstörungsprozess, wie bereits dargestellt, zusätzlich.

Quarzumbildung

Temperaturen von 575 °C bilden beim Quarz das Mineraliengefüge um, was mit einer Volumenzunahme verbunden ist. In der Folge kommt es zum Aufsprengen der quarzhaltigen Zuschlagstoffe und des Betongefüges.

Dekarbonatisierung

Im Temperaturbereich von über 800 °C erfolgt die Dekarbonatisierung von Kalkgesteinen gemäss dieser Reaktionsgleichung:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

Die kalkhaltige Gesteine zerfallen. Das abgespaltene CO_2 entweicht als Gas dem Be-

tongefüge. Bei unzureichender Porosität wird es zu Gefügestörungen kommen.

Armierungsversagen

Im Temperaturbereich bis 200 °C weist das Spannungs-Dehnungsverhalten von Stahl keine Temperaturabhängigkeit auf. Ab der Grenze von 200 °C kommt es zu einem Abfall der Tragfähigkeit, die bei 700 °C nur noch rund 20% des Wertes bei Normaltemperatur beträgt. Die Tragfähigkeit eines Bauteiles wird dadurch massiv beeinträchtigt, weshalb die Temperaturen, denen die Armierung ausgesetzt ist, begrenzt sind. In der Praxis werden geringfügige Tragvermögensverluste toleriert, so dass Temperaturgrenzwerte im Bereich von 250 °C bis 300 °C festgelegt werden.

Thermische Längenänderung

Wie alle Werkstoffe weist auch Stahlbeton eine temperaturabhängige Längenänderung auf. Bereits unter hiesigen Klimabedingungen muss diesen Längenänderungen durch entsprechende Ausgleichsstrecken oder Dehnfugen Rechnung getragen werden. Berichte über durch Sommerhitze verbogene Schienen sind auf eben dieses Phänomen zurückzuführen.

Im Brandfall treten deutlich höhere Temperaturen auf, entsprechend höher sind auch die Längenänderungen. Ist hier nicht genügend Raum vorgesehen, der in Abhängigkeit von Temperatur und absoluter Länge des Bauteils mehrere Zentimeter betragen kann, kommt es zu Zwängungen und damit zum Kollaps der Struktur. Dies ist eine Gefahr, der beispielsweise eine Zwischendecke im Tunnel ausgesetzt ist und die nicht unterschätzt werden darf.

Daneben entstehen durch die von aussen nach innen fortschreitende Erwärmung der Bauteile Eigenspannungen und Zwängungen. Die Eigenspannungen können zu einem schalenförmigen Abplatzen der Betonüberdeckung führen, wodurch die Bewehrung ihren Schutz teilweise verliert und der Verbund beeinträchtigt wird. Darüber hinaus ist das temperaturbedingte Dehnungsverhalten von Stahl und Beton nur im Bereich bis etwa 500 °C vergleichbar. Bei höheren Temperaturen werden auch hier schädigende Spannungen induziert.

Bewertung Schadensmechanismen

Die beschriebenen Schadensmechanismen greifen bereits bei niedrigen Temperaturen ab 100 °C die Betonstruktur an. Untersuchungen an konventionellem Beton haben gezeigt, dass der Zerstörungsprozess mit einer hohen Geschwindigkeit abläuft. Die Abtragsrate erreichte bei diesen Prozessen Werte von 0,33 mm/min bzw. 20 cm/h. Durch das Abplatzen und Aufbrechen des Betongefüges frisst sich die Schadensfront in das Bauteil hinein. Armierungen, die nur wenige Zentimeter unter der Oberfläche verlegt sind, werden freigelegt und verlieren durch die extrem hohen Temperaturen im Brandbereich ihre Funktionsfähigkeit vollständig.

Brandlasten

Zur Dimensionierung von Schutzmassnahmen gegen Brandlasten werden Zeit- bzw. Temperaturverläufe angenommen, die sich zum Teil massiv voneinander unterscheiden. Brände von Kohlenwasserstoffen, wie sie bei einem Fahrzeugbrand vielfach vorzufinden sind, werden durch den Kurvenverlauf der Einheitstemperaturkurve ETK nach ISO 834 nur unzureichend repräsentiert. Die Erwärmungsphase schrumpft auf wenige Minuten zusammen, nach der die Maximaltemperatur erreicht wird. Die übrigen in Europa gebräuchlichen und in Bild 3 dargestellten Kurven berücksichtigen diesen schnellen Anstieg.

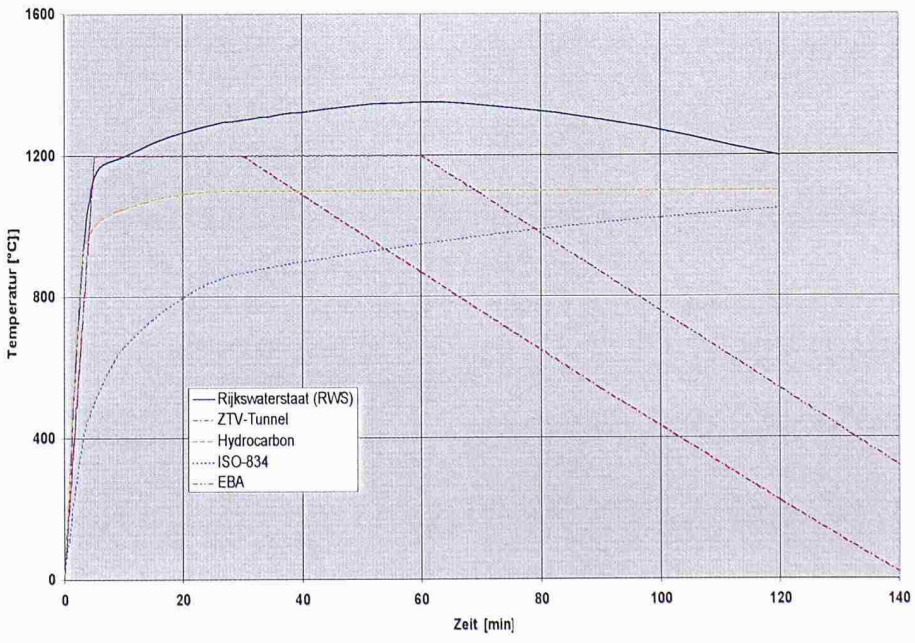
Wie oben dargelegt, beeinflusst die Geschwindigkeit der Wärmeeinleitung in den Beton die Wasserdampfbildung und damit den Abplatzungsprozess in Ausmass und Geschwindigkeit. Die höchsten Anforderungen werden in den Niederlanden von Rijkswaterstaat (RWS) gestellt. Dieser Anforderungskurve liegt der Brand eines Treibstofftankwagens in einem Tunnel zu Grunde. Die exponierte Lage der Niederlande mit Tunnels im Grundwasser und einem grossen Teil der Landesfläche unter dem Meeresspiegelniveau führt zu höchsten Sicherheitsanforderungen gegen allfällige Zerstörungen von Bauwerken, deren Beschädigung für das gesamte Land katastrophale Folgen haben könnte.

In Deutschland kommen die Brandlasten gemäss ZTV-Tunnel bzw. RABT und EBA zur Anwendung. Sie unterscheiden sich einzig in der Branddauer, die bei 30 bzw. 60 Minuten liegt. Im Unterschied zu allen anderen Brandlastkurven berücksichtigen diese Anforderungen auch das Verhalten nach dem Brand während der Abkühlphase.

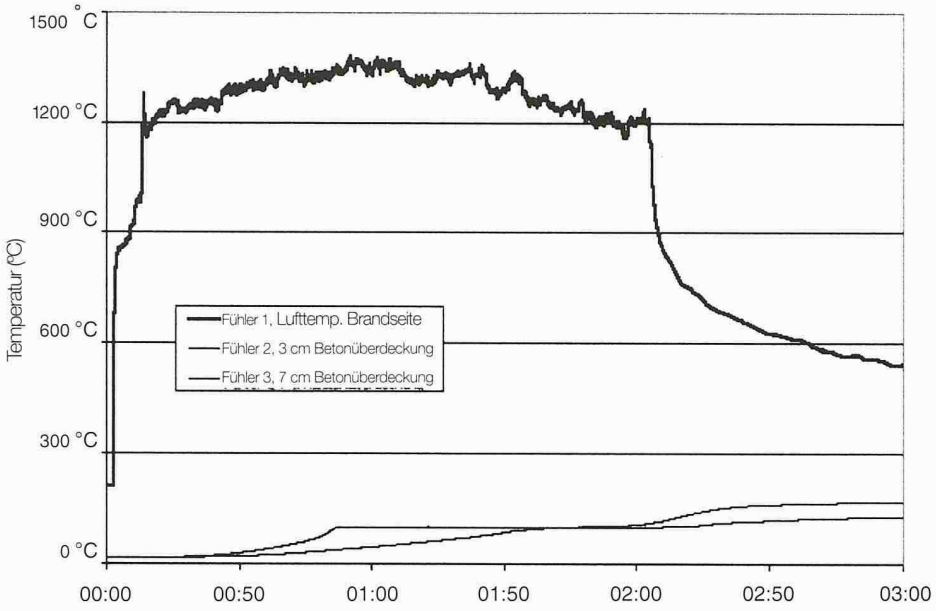
Beurteilung von Brandlasten

Bei der Festlegung und Dimensionierung von Bauteilen, und damit auch bei der Beurteilung von Prüfanforderungen, ist das Gefahrenpotential und das daraus resultierende Risiko abzuschätzen.

In der ersten Phase eines Brandunfalls muss gewährleistet sein, dass Personen, die sich im Brandbereich aufhalten, diesen ohne Gefährdung verlassen können. Aber bereits nach wenigen Minuten der Brandentwicklung bei Temperaturen von mehreren 1000 °C besteht für jegliche Lebewesen keine Überlebenschance mehr. In geschlossenen Räumlichkeiten kann die Wärme nicht entweichen. Sie kumuliert sich auf und führt zu einem rasanten Temperaturanstieg. Zur Gewährleistung der Standsicherheit der Bauteile während der Fluchtphase von Personen sind die Brandlasten



3
Brandlastverläufe



4
Temperaturverläufe bei Brandprüfung

5
Beton mit erhöhter Brandbeständigkeit nach Brandbelastung



gemäss RWS, ZTV oder EBA als gleichwertig zu beurteilen.

Für die anschliessende Brandphase, in der einzig noch der Schutz von Sachwerten zu beurteilen ist, sollte eine Risikoabwägung erfolgen, gemäss welcher der Umfang der Schutzmassnahmen gegen einen grössten anzunehmenden Brandunfall festgelegt wird. Kommt es nur zur Beschädigung der Betonstruktur, ist auch mittels Wirtschaftlichkeitsrechnungen zu beurteilen, welcher Aufwand zur Erzielung eines höheren Brandwiderstandes zu rechtfertigen ist.

Im Bereich von Tunnelabschnitten in standfestem Untergrund ist eine Auslegung der Auskleidung gemäss EBA Brandlast ausreichend. Während der Fluchtphase ist eine ausreichende Festigkeit der Struktur nachgewiesen. Völlig anders sind die Verhältnisse zu beurteilen, wenn

- das Bauwerk einen Flusslauf unterquert oder im Grundwasser liegt,
- das Bauwerk in wenig standfestem Gebirge mit geringem Abstand unter bestehenden Bebauungen verläuft,
- Fluchtnischen oder -kammern durch eine zerstörte Tunnelkonstruktion unerreichbar sind.

In den genannten Fällen könnte es durch die Folgeschäden aus dem Brandfall zu unermesslichen Folgeschäden kommen, die durch einen Mehraufwand bei der Wahl geeigneter Schutzsysteme hätten vermieden werden können.

Prüfverfahren

Prüfungen von Tunnelauskleidungen erfolgen nur an wenigen Stellen in ganz Europa. Es wird jeweils eine der oben genannten Temperaturkurven nachgefahren. Für Routineuntersuchungen wird vielfach eine Platte von 1,5 m x 1,5 m mit der Stärke 0,15 m verwendet. Diese Platte wird auf einen Schachtofen aufgelegt und von unten mit einem Ölbrenner beflammt. Die Temperaturen werden mit speziellen Thermoelementen in und auf der Plattenunterseite gemessen. Mit einer solchen Prüfanordnung wurden auch die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen ausgeführt.

Die Beurteilung der Beständigkeit bzw. der Schutzwirkung eines Systems erfolgt aufgrund der gemessenen Temperaturen der Armierung auf Seite des Brandes und allfälligen Abplatzungen an der Oberfläche. Bild 4 zeigt die Temperaturverläufe im Brandraum und in zwei unterschiedlichen Tiefen unter der Oberfläche der brandzugewandten Bauteilseite, wie sie typischerweise mit dem im Folgenden vorgestellten Beton mit erhöhter Brandbeständigkeit erreicht werden.

Schutzmassnahmen

Ist ein Bauteil einer Brandgefährdung ausgesetzt und soll im Unglücksfall ein Versagen des Bauteils vermieden werden, bestehen folgende Schutzmöglichkeiten: Feuerfestbeton, Beton mit erhöhtem Brandwiderstand oder Applikation eines Isolationssystems.

Teilweise wird ein vierter Weg beschritten, in dem die Bauteile überdimensioniert werden. Der Brandschutz wird in diesem Fall dadurch erreicht, dass im Brandfall eine ausreichende Ummantelung des tragenden Kerns besteht, damit dieser während einer vorher definierten Branddauer nicht angegriffen wird. Da wie oben gezeigt der Brandwiderstand von Beton von vielfältigen Faktoren wie Feuchtegehalt, Porenstruktur und mineralischer Zusammensetzung abhängt, ist diese Schutzmassnahme mit grossen Unsicherheiten behaftet, die nur schwer zu quantifizieren sind.

Beton mit erhöhter Brandbeständigkeit

Im Folgenden wird auf Feuerfestauskleidungen und Isolationssysteme nicht näher eingegangen. Diese sind in der Literatur ausführlich beschrieben. Näher vorgestellt wird ein gemeinsam mit Partnern entwickelter und geprüfter Beton mit erhöhter Brandbeständigkeit. Es wurde die Forderung gestellt, dass das Betonsystem den Anforderungen der RWS-Kurve genügen soll.

Nachdem man in einem ersten Brandversuch an konventionellen Betonplatten deren vollständige Zerstörung festgestellt hatte (Bild 1), wurden in einem ersten Schritt die Zuschlagstoffe durch einen feuerfesten Stoff ersetzt, in diesem Fall bestehend aus bei 1350 °C gesinterter Flugasche. Das Produkt sieht äusserlich dem Leichtzuschlagstoff Lecca ähnlich, weist aber weitgehend andere Eigenschaften auf. Als Bindemittel wurde ein CEM III eingesetzt, der ebenfalls einen hohen Anteil thermisch beständiger Stoffe wie Hüttensand enthält.

Mit dieser Modifikation zeigte sich im Brandversuch ein gänzlich anderes Ver-

halten als im ersten Versuch mit dem Nullbeton. Allerdings musste wiederum eine Zerstörung des Betons attestiert werden. Diesmal kam es aber zu grossflächigen Abplatzungen, die auf die Bildung von Wasserdampf im Beton zurückzuführen waren.

Im nächsten Schritt wurden zur Schaffung von Expansionskanälen für den Wasserdampf fibrillierte Polypropylenfasern zugesetzt. Der Brandversuch an diesen Mustern zeigte oberflächlich keinerlei erkennbare Schädigungen. Bestimmungen der Zugfestigkeiten an den gebrannten Proben ergaben, dass im Bereich der obersten 3 bis 4 cm die Werte auf 0,5N/mm^2 gesunken waren. In tieferen Bereichen waren keinerlei Beeinträchtigungen feststellbar. Während der Brandversuche wurden die Temperaturen an der Bauteiloberfläche und in 3 bzw. 7 cm Tiefe aufgezeichnet. Die Temperaturwerte zeigten eine schnelle Abnahme mit zunehmender Tiefe. Bereits in 3 cm Abstand vom Brandraum wurden Temperaturen unter 200 °C erreicht. Die in dieser Tiefe liegende Armierung wurde in keiner Weise beeinträchtigt (Bild 5).

Zurzeit erfolgen Untersuchungen, die den Brandbeständigkeitsnachweis für eine spritzbare Variante des beschriebenen Betonsystems liefern sollen. Solche Systeme lassen sich für Sanierungen, Reprofilierung oder auch bei Neukonstruktionen einsetzen.

Ausblick

Trotz aller Erfolge auf dem Gebiet des Brandschutzes von Bauteilen bleiben auch für die Zukunft noch viele Fragen offen, die es zu beantworten gilt. Schutzsysteme für alle Anwendungsbereiche sollen dauerhaft, zweckgerichtet und auch sicher erstellt werden können. Fragestellungen, die heute nicht oder nur teilweise beantwortet sind, betreffen:

- das Alterungsverhalten von mineralischen Schutzsystemen
- Einfluss von Beschleunigern bei Spritzbeton
- Einfluss der Eigenfeuchte des Betons auf den Brandwiderstand
- Verhalten von vollständigen Auskleidungen im Brandfall

Neben den technischen Fragestellungen gilt es auch die Prüf- und Beurteilungsvorschriften bzw. die Normen so zu gestalten, dass sie die effektiven Verhältnisse erfassen.

Adresse des Verfassers:
Volker Wetzig, Dipl. Ing., Versuchs-Stollen Hagerbach AG, Rheinstrasse 4, 7320 Sargans

Literatur

[1] *A. Haak*: Fire Protection in Traffic Tunnels: General Aspects and Results of the Eureka Project, 1999

[2] *Kordina/Meyer-Ottens*: Beton Brandschutzhandbuch. Düsseldorf 1999

[3] Lytag: Produktdokumentation. Nijmegen 1999

[4] Fortatech Fibre: Produktdokumentation. St. Gallen 1999

Hanspeter Eicher, Markus Erb, Ralf Materna

Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) im Baubereich

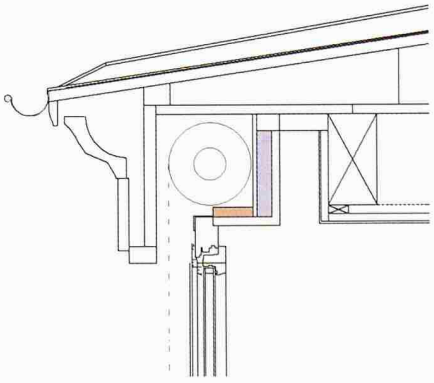
Aufgrund steigender Anforderungen an die Gebäudedämmung und der damit verbundenen Zunahme der benötigten Dämmstoffdicken wurde in den letzten Jahren seitens Planer und Bauherrschaft vermehrt der Wunsch nach effizienteren Dämmmaterialien laut. Insbesondere bei Niedrigenergiehäusern oder bei Bausanierungen mit begrenzten Platzverhältnissen besteht ein Bedürfnis nach wirkungsvollen und platzsparenden Dämmstoffen.

In den letzten Jahren sind vermehrt Niedrigenergiehäuser mit sehr geringem Energiebedarf realisiert worden. Dabei sind Dämmstärken zwischen 20 und 40 cm notwendig. Im Sanierungsbereich gibt es häufig Situationen, in denen der Platz entweder teuer oder schlichtweg nicht vorhanden ist, um eine den geltenden Dämmstandards entsprechende Wärmedämmung zu erzielen.

Mit sogenannten Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) erreicht man Wärmeleitfähigkeiten, die um einen Faktor 5 bis 10 geringer sind als bei konventionellen Dämmstoffen. Somit können die gewünschten Wärmeleitfähigkeiten bereits mit dünnen Dämmstoffen erreicht werden. Die vor etwa 15 Jahren entwickelte Technologie wurde bisher vor allem im Kühl- und Gefriergerätebau verwendet. Mittels modernen Produktionsverfahren und neuester Folientechnologie ist man heute in der Lage, Vakuumdämmplatten herzustellen, die über Jahrzehnte ihre Funktionstüchtigkeit behalten. Damit wird diese Vakuumtechnik auch für den Baubereich interessant.

Material

Ein VIP besteht im wesentlichen aus einem sogenannten Kernmaterial, welches in einer Vakuumkammer in eine hoch gasdichte Hüllfolie eingeschweisst wird. Das



1
Einbau von Vakuum-Dämmplatten in einen Rolladenkasten