

Ermittlung und Beurteilung von möglichen Gefährdungen durch Stäube bei der mechanischen Bearbeitung von Carbonbeton

J. Otto, V. Klopfer, R. Wiel, J. Kortmann

ZUSAMMENFASSUNG Die Freisetzung von Kohlenstofffasern beim Umgang mit carbonbewehrten Betonbauteilen ist ein wiederkehrendes Thema in der sicherheitstechnischen Bewertung dieser Bauweise. Um die tatsächliche Expositionssituation zu erfassen, wurden umfassende Untersuchungen unter kontrollierten Versuchsbedingungen durchgeführt. Dadurch sollten bereits vorliegende Messungen validiert und neue Erkenntnisse gewonnen werden. Zum Einsatz kamen typische Bearbeitungsverfahren an Bauteilen aus Beton nach DIN 18007. Dazu wurden Probekörper aus Carbonbeton unterschiedlicher Rezepturen mit vier Bewehrungstypen beprobt. Ziel der Untersuchung war es, zu bewerten, inwiefern Betonfestigkeit, Bewehrungstyp und die Art der mechanischen Bearbeitung die Faserexposition beeinflussen. Dabei wurde ausschließlich auf die Konzentration und die Fasergeometrie der Staubpartikel eingegangen. Die Messungen der E-, A- und Quarzstäube sowie der anorganischen und organischen Fasern erfolgten in definierten Abständen zu 1,00 m und 5,00 m zum Ort der Bearbeitung. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Einhaltung der geltenden Arbeitsschutzvorschriften keine unmittelbare Gesundheitsgefährdung durch Faserstäube aus Carbonbewehrung besteht und die Grenzwerte beziehungsweise Kurzzeitwerte eingehalten werden. Die Betonfestigkeit zeigte keinen Einfluss auf die Exposition, während die Bearbeitungsmethode einen entscheidenden Faktor für die Faserfreisetzung darstellt.

STICHWÖRTER

Carbonbeton, Faserstäube, Abbruch, Gesundheitsschutz

Identification and assessment of potential dust hazards posed by carbon fibres during the mechanical processing of carbon concrete

ABSTRACT The release of carbon fibres when handling carbon-reinforced concrete components is a recurring topic in the safety assessment of this construction method. In order to record the actual exposure situation, comprehensive investigations were carried out under controlled test conditions. The aim was to validate existing measurements and gain new insights. Typical processing methods for concrete components in accordance with DIN 18007 were used. Test specimens made of carbon concrete with different compositions and four types of reinforcement were sampled. The aim of the investigation was to evaluate the extent to which concrete strength, reinforcement type and the type of mechanical processing influence fibre exposure. Only the concentration and fibre geometry of the dust particles were considered. The measurements of E, A and quartz dusts as well as inorganic and organic fibres were taken at defined intervals of 1.00 m and 5.00 m from the place of processing. The results show that, provided the applicable occupational health and safety regulations are observed, there is no immediate health risk from fibre dust from carbon reinforcement and that the short- and long-term limit values are complied with. The concrete strength had no influence on exposure, while the processing method is a decisive factor for fibre release.

1 Veranlassung der Untersuchungen

Beim Atmen werden von der Lunge kontinuierlich Staubpartikel aufgenommen. In der Regel stellt dies keine unmittelbare Gesundheitsgefahr dar, solange die Konzentration, die stofflichen Eigenschaften und die geometrischen Merkmale der Partikel kritische Grenzwerte einhalten. Zu den relevanten kritischen Eigenschaften zählen insbesondere bestimmte Materialarten sowie Partikel mit spezifischen Abmessungen, die sogenannten „WHO-Fasern“. Diese gelten mit einer Länge von $> 5 \mu\text{m}$, einem Durchmesser von $< 3 \mu\text{m}$ und einem Längen-Breiten-Verhältnis von $> 3:1$ [1] nachweislich als lungengängig und können schwerwiegende Schädigungen des Lungengewebes verursachen. Dieser Sachver-

halt ist beispielsweise aus dem Umgang mit Asbest bekannt [2]. Carbonbewehrung und Carbonbeton sind neue Baustoffe, deren Verhalten im Hinblick auf Staubbefreiung und Partikeleigenschaften bislang nur unzureichend untersucht ist. Insbesondere das Verhalten der Carbonbewehrung bei mechanischer Bearbeitung (z. B. beim Trennen) oder beim Rückbau von Bauwerken ist hinsichtlich der dabei entstehenden Stäube und deren potenzieller Gesundheitsgefahren für den Menschen weitgehend ungeklärt. Diese Forschungslücke soll durch die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen gefüllt werden. Der Fokus liegt dabei ausschließlich auf der Analyse der Fasergeometrie. Stoffliche Eigenschaften im Hinblick auf eine mögliche Biopersistenz sind nicht Gegenstand dieses Artikels.

2. Grundlagen und Stand der Wissenschaft

2.1 Bewehrung aus Carbon: Eigenschaften, Herstellung und Anwendung

Nichtmetallische Bewehrungsstrukturen, insbesondere aus Kohlenstofffasern, gewinnen bereits seit einigen Jahren an Bedeutung. Sie ersetzen in Teilen die herkömmliche Stahlbewehrung und bieten signifikante Vorteile vor allem bei komplex kleinteiligen Bauteilgeometrien. Carbonbewehrung zeichnet sich darüber hinaus durch eine sehr hohe Zugfestigkeit von etwa 3 000 N/mm² aus, was deutlich über der von Bewehrungsstahl liegt (ca. 550 N/mm²) [3]. Da Carbon keine Korrosionsreaktionen aufweist, kann die Betondeckung auf ein konstruktiv notwendiges Minimum reduziert werden [4]. Dies führt zu schlankeren Bauteilen, reduziertem Eigengewicht, geringer dimensionierten Gründungen, niedrigeren Herstellungskosten und einer verbesserten Nachhaltigkeit (Reduktion Ressourcen- und Energieverbrauch sowie CO₂-Ausstoß) [5].

Gleichzeitig bestehen technische Herausforderungen hinsichtlich des Verbundverhaltens zwischen Beton und Bewehrung. Die Reduktion des Querschnitts verringert die Oberfläche der Bewehrung, wodurch höhere Verbundspannungen übertragen werden müssen, um ein Herausziehen der Fasern oder ein Aufreißen des Betons zu vermeiden. Eine gezielte Oberflächenprofilierung, beispielsweise durch Umwickeln, Prägen, Besanden oder Verdrillen, verbessert den Verbund und verhindert ein Versagen an der Grenzfläche [6].

Die Kohlenstofffasern selbst werden während der Herstellung mit verschiedenen Polymeren getränkt und beschichtet, um Formstabilität und eine optimale Lastübertragung zwischen Faser und Beton zu gewährleisten. Zunächst wird eine dünne Schlichte auf Basis von Epoxidharz auf die Fasern aufgebracht, welche die Weiterverarbeitung erleichtert und die Faseroberfläche schützt. Anschließend erfolgt die Tränkung, ebenfalls auf Basis von Epoxidharz, welche die einzelnen Fasern zu einem tragfähigen Verbund zusammenführt und die innere Lastaufnahme aktiviert [7]. Diese Polymerschichten beeinflussen das mechanische Verhalten der Bewehrung maßgeblich, da sie insbesondere bei erhöhter Temperatur viskoelastische Eigenschaften aufweisen und thermische Spannungen abgebaut werden können [8]. Die Kombination aus hoher Festigkeit, chemischer Beständigkeit und guter Umformbarkeit macht Carbonbewehrung zu einem Schlüsselmateriale für nachhaltiges und ressourcenschonendes Bauen. Die Materialien der Schlichte und der Tränkung wurden im Rahmen dieser Betrachtung nicht separat untersucht. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist nicht davon auszugehen, dass aus diesen Materialien im Kontext der vorliegenden Untersuchung relevante oder kritische Faserstäube freigesetzt werden.

2.2 Morphologische Eigenschaften von Kohlenstofffasern

Die Morphologie der Kohlenstofffasern bestimmt wesentlich deren mechanische und thermische Leistungsfähigkeit. Kohlenstofffasern bestehen zu mindestens 92 % aus Kohlenstoff und werden überwiegend aus Polyacrylnitril (PAN) hergestellt [7]. Der Herstellungsprozess umfasst zwei Hauptphasen: die Stabilisierung und die Carbonisierung. Während der Stabilisierung bei 200 °C bis 300 °C in oxidativer Atmosphäre werden lineare Polymerketten in eine thermisch stabile, zyklische Struktur überführt.

Anschließend erfolgt die Carbonisierung unter Schutzgasatmosphäre bei 1 000 °C bis 1 500 °C. Dabei werden nichtkohlenstoffhaltige Atome entfernt, was wiederum zu einer turbostratischen Graphitstruktur führt. Diese Struktur besteht aus gestapelten, unregelmäßig ausgerichteten Graphitschichten, die der Faser ihre hohe Festigkeit und Steifigkeit verleihen [9].

Je nach Prozessparametern werden verschiedene Faserklassen unterschieden wie beispielsweise hochfeste (HT), zwischenmodulige (IM), hochmodulige (HM) und ultrahochmodulige (UHM) Fasern, die bei Temperaturen bis 3 000 °C entstehen. Mit zunehmender Carbonisierungstemperatur steigt der Graphitisierungsgrad, was die elektrische Leitfähigkeit erhöht, gleichzeitig aber die Sprödigkeit verstärkt [10]. Die Oberfläche der Fasern spielt eine zentrale Rolle für den Verbund mit der Betonmatrix. Während der thermischen Behandlung entstehen funktionelle Gruppen, Hydroxyl-, Carboxyl- und Carbonylgruppen, welche die chemische Anbindung an Polymere verbessern. Nach der Carbonisierung erfolgt häufig eine zusätzliche oxidative Oberflächenbehandlung, um die Haftfestigkeit weiter zu erhöhen [11].

Als neuwertiger Baustoff weisen Kohlenstofffasern glatte, dichte und intakte Oberflächen mit vorgenannten Eigenschaften auf. Dies gewährleistet eine hohe mechanische Integrität, chemische Beständigkeit und Langlebigkeit [12].

Bei thermischer Belastung (z.B. Brandereignissen) oder mechanischer Bearbeitung der Carbonbewehrung verändert sich die Morphologie der Fasern jedoch erheblich. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen zeigen, dass nach einem Brand Mikrorisse, Querschnittsreduktionen sowie Strukturveränderungen und -verluste auftreten. Dadurch sinken Zugfestigkeit und Steifigkeit. Es entstehen faserförmige Splitter, die in ihren Dimensionen auch den WHO-Kriterien für lungengängige Fasern entsprechen können [2]. Diese morphologischen Veränderungen beeinflussen sowohl die Tragfähigkeit als auch die Arbeitssicherheit im Umgang mit Carbonbeton. Besonders kritisch ist die Bearbeitung thermisch geschädigter Bauteile, da hierbei besonders feine Faserfragmente freigesetzt werden können. Das Verständnis der Mikrostruktur nach mechanischer Schädigung bildet daher die Grundlage für den sicheren Umgang mit carbonfaserverstärkten Baustoffen. Auf die Veränderung der Fasergeometrie infolge von Brandbelastung wird jedoch in diesem Aufsatz nicht weiterführend eingegangen.

2.3 Gesundheitsrelevante Aspekte, normative Grenzwerte

2.3.1 Wirkung von Kohlenstofffasern

Die konkreten toxikologischen Wirkungen von Kohlenstofffasern auf den Menschen sind bislang nur unvollständig untersucht. Da sie geometrisch Asbestfasern ähneln, wird teilweise eine vergleichbare biologische Reaktion vermutet. Die Biobeständigkeit und mögliche karzinogene Wirkung hängen jedoch nicht nur von Länge, Durchmesser und Oberflächenbeschaffenheit ab, sondern insbesondere von der chemischen Stabilität der Staubpartikel. Gesundheitskritische Stäube werden daher vor allem durch ihre Geometrie und ihr Stoffeigenschaften verursacht, wenn diese in der Lunge bis in die Alveolen gelangen, sich dort dauerhaft festsetzen und Entzündungsreaktionen verursachen. Gesundheitsgefährdungen durch faserförmige Partikel entstehen insbesondere dann, wenn diese eine für die Lunge relevante Geometrie sowie eine ausreichende Biobeständigkeit aufweisen [2].

Tabelle 1. Normative Grenzwerte für Staubbelastrung in Abhängigkeit der Einwirkzeit
Table 1. Regulatory limit values for dust exposure depending on the duration of exposure

Bezeichnung	Norm	Grenzwert ¹	Kurzzeitwert ²	Einheit
Allgemeiner Staubgrenzwert A-Staub	TRGS 900 [16]	1,25	10	mg/m ³
Allgemeiner Staubgrenzwert E-Staub	TRGS 900 [16]	10	20	mg/m ³
Quarzstaub	TRGS 559 [18]	0,05	0,40	mg/m ³
CFK – Staub, repräsentativ für Bewehrungen aus Carbon	TRGS 900 [16]	0,78	6,24	mg/m ³
CFK – Fasern, repräsentativ für Bewehrungen aus Carbon	DGUV [19], TRGS 521 [17]	50 000, 250 000, > 250 000 ³	250 000	Faser/m ³
Anorganische Fasern – KMF (künstliche Mineralfasern), repräsentativ für sonstige anorganische Fasern (z. B. Siliziumfasern) und organische Fasern (z. B. Kunststoff-fasern)	Einstufung empfohlen nach TRGS 521 [17] kein Grenzwert / Beurteilungsmaßstab vorhanden	50 000, 250 000, > 250 000 ³	250 000	Faser/m ³

¹ Der Grenzwert ist definiert als Schichtmittelwert nach TRGS 900. [16]

² Der Kurzzeitwert definiert die kurzfristige Überschreitung des Arbeitsplatzgrenzwertes, bei der Höhe, Dauer und Häufigkeit der Expositionsspitzen durch einen festgelegten Überschreitungsfaktor begrenzt sind. [16]

³ Grenzwerte der Expositions-kategorie 1 bis 3 nach TRGS 521. [17]

Als kritisch gelten Fasern mit einer Länge von mehr als 5 µm, einem Durchmesser von weniger als 3 µm und einem Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis von größer als 3 : 1, da sie bis in die tiefen Lungenbereiche vordringen und dort nur unzureichend abgebaut werden können. Entscheidend für das gesundheitliche Risiko sind neben der geometrischen Form auch die stofflichen Eigenschaften wie chemische Stabilität, Oberflächenbeschaffenheit und biologische Persistenz, wobei biobeständige, nicht abbaubare Materialien ein erhöhtes Gefährdungspotenzial besitzen [2].

Theoretisch ist Asbest bereits ab einer Konzentration von 1 Faser gefährlich, da diese Krebs auslösen könnte. In der Praxis wird jedoch davon ausgegangen, dass eine tatsächliche Gefahr erst besteht, wenn die Akzeptanzkonzentration von 10 000 Fasern/m³ Luft überschritten wird [13]. Dabei steigt das Risiko einer Erkrankung in Abhängigkeit der Faserkonzentration in der Luft und der Dauer der Exposition. Intakte Fasern von Carbonbewehrung haben einen Durchmesser von über 3 µm und sind dadurch nicht alveolengängig. Eine Gesundheitsgefahr durch Kohlenstofffasern kann entstehen, wenn bei Herstellprozessen oder bei Brand- und mechanischen Bearbeitungsvorgängen durch mechanische Zersetzung oder thermische Schädigung alveolengängige Faserfragmente kleiner 3 µm freigesetzt werden. Bei durchgeführten Brandversuchen zeigte sich, dass Fasern mit problematischen Abmessungen entstehen können. Aufgrund der aufsteigenden warmen Luft werden sie jedoch vom Entstehungsort weggeführt. Durch Wind verteilen sie sich anschließend großräumig und werden somit stark vereinzelt [14]. Das größere Risiko entsteht demnach während der mechanischen Bearbeitung unverbrannter und verbrannter Bauteile, bei der Faserstaubkonzentrationen von bis zu 100 000 Fasern/m³ Luft gemessen wurden.

2.3.2 Normative Grundlagen

Rechtlich liegt der Umgang mit Kohlenstofffasern im Geltungsbereich der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV [15]), da aufgrund der wenigen Erfahrungen mit diesem Baustoff ein grundsätzlicher Verdacht auf Gesundheitsgefährdung besteht. Da

derzeit keine spezifischen staubbezogenen Grenzwerte für Carbonfasern an Arbeitsplätzen bestehen, greift zur allgemeinen Beurteilung einer möglichen Gefahrsituation die TRGS 900 (Technische Regel für Gefahrstoffe „Arbeitsplatzgrenzwerte“) [16]. Diese geben den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeits-hygiene sowie sonstige gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen, einschließlich deren Einstufung und Kennzeichnung, wieder. Hinsichtlich der Bewertung einzu-haltender Grenzwerte werden Carbonfasern aufgrund ihrer Faserstruktur in die gleiche Kategorie wie lungengängige Künstliche Mineralfasern (KMF) eingeordnet. Ergänzend gilt die TRGS 519 (Asbest: Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten) [1], die TRGS 521 (Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit alter Mineralwolle) [17], die TRGS 559 (Quarzhaltiger Staub) [18] und die DGUV-Information FBHM-074 (Bearbeitung von CFK-Materialien) [19]. Letztgenannte Vorschrift definiert unter anderem die Expositions-kategorien und Schutzmaßnahmen für Arbeiten mit CFK-Materialien.

Tabelle 1 fasst die in den vorgenannten Regelwerken vorgegebenen Grenzwerte für Staubbelastrung in Abhängigkeit der Einwirkzeit zusammen. Demnach gelten für Kohlenstofffaserstäube gemäß TRGS 900 [16] die allgemeinen Arbeitsplatzgrenzwerte in Höhe von 10 mg/m³ für einatembare Stäube (E-Stäube) und 1,25 mg/m³ für alveolengängige Stäube (A-Stäube). Weiterhin teilen die TRGS 519 [1], TRGS 559 [18] sowie die DGUV-Information FBHM-074 [19] den Arbeitsschutz von Tätigkeiten mit Faserfreisetzung in 3 Expositions-kategorien und damit einhergehenden 3 Schutz-kategorien ein.

2.3.3 Bisherige Untersuchungen und notwendiger Forschungsbedarf

Erkenntnisse zur Gesundheitsgefährdung durch Carbonbeton und mögliche Arbeitsschutzmaßnahmen wurden bereits im Rahmen des Forschungsprojektes „C³ – V1.3: Gesundheit; TP 4“ (2018) gesammelt [20]. Bis dahin lagen keine Kenntnisse über Faserbelastrung bei der Bearbeitung von Carbonbeton vor. Es han-



Bild 1. Versuchsaufbau mit Bearbeitungsplatz und Messparturen

Foto: IBB (TUD)

Fig. 1. Test setup with machining station and measuring equipment

Source: IBB (TUD)

delte sich um Messungen, die während der Bearbeitung von Carbonbeton unter Anwendung der in der DIN 18007 [21] beschriebenen Nachbearbeitungsverfahren durchgeführt wurden. Die Ergebnisse dieser Messungen zeigten, dass bei der nachträglichen Bearbeitung von Carbonbeton keine Faserfreisetzung nachgewiesen werden konnte.

Die hier im Beitrag beschriebenen Versuche dienten einerseits der Validierung der in vorgenanntem Projekt erhobenen Messwerte. Andererseits wurden die Versuche mit neu verfügbaren Typen von Carbonbewehrungen mit jeweils unterschiedlichen Tränkungen durchgeführt. Die sonstige Zusammensetzung der Bewehrung blieb unverändert, insbesondere basierte die Bewehrung in beiden Versuchen auf Fasern aus Polyacrylnitril (PAN-Fasern).

3 Ziel der Versuche und Methodik

3.1 Ziel der Versuche

Durch die Versuche sollte der Einfluss unterschiedlicher mechanischer Bearbeitungsverfahren von Carbonbeton in Abhängigkeit der Materialkonfigurationen von Beton und Bewehrung auf die Freisetzung potenziell alveolengängiger Faserstäube ermittelt werden. Dazu wurden verschiedene Prüfkörper aus Carbonbeton hergestellt und mit unterschiedlichen praxistypischen Geräten je nach Bauverfahren bearbeitet. Der dabei entstehende Staub wurde aufgenommen und nachfolgend hinsichtlich seiner Art und Größe bestimmt. Die Versuche gliederten sich einerseits in die Erfassung der Stäube, die bei den unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren freigesetzt werden, andererseits in die quantitative Auswertung der erfassten Stäube.

3.2 Versuchsaufbau

Die Messungen fanden in einem speziell dafür vorbereiteten Versuchsraum innerhalb eines gewöhnlichen Gebäudes statt. Der Raum war gefliest und frei von Einrichtungsgegenständen. Er verfügte über Fenster, um nach jeder Messung eine möglichst große Durchlüftung zu gewährleisten. Zusätzlich wurde vor Beginn und nach jeder Messreihe der Raum nass gereinigt. Dadurch konnten Reststäube aus der Raumluft und von den Wandoberflächen gebunden und entfernt werden. Darüber hinaus sorgte ein

elektrisches Entstaubungsgerät für weiteren Luftwechsel. Die Anordnung der Messgeräte und Probekörper (Expositionsquelle) erfolgte so, dass die Messgeräte bei jedem Versuch in gleichbleibenden Abständen von 1 m und 5 m zur Expositionsquelle angeordnet wurden (vgl. **Bild 1**). Sie befanden sich jeweils in einer Höhe von 1,65 Meter über dem Boden. Die Positionierung der Ansaugstelle des Messgerätes der Stäube ist der durchschnittlichen Atemhöhe eines Menschen während typischer manueller Bearbeitungsprozesse nachempfunden. Dadurch entsprechen die Ergebnisse näherungsweise der Konzentration der Einatemluft der Arbeiter, welche den Bearbeitungsprozess ausführen (Entfernung 1 m) und welche sich passiv im Umgebungsbereich befinden (Entfernung 5 m). Die Lage der Carbonbewehrung innerhalb der Prüfkörper war bekannt, sodass die Bearbeitung gezielt in den bewehrten Bereichen erfolgte und praxisnahen Bearbeitungsszenarien entsprach. Dadurch konnte eine für die Praxis repräsentative Staubexposition in Art und Umfang sichergestellt werden.

3.3 Eigenschaften der Prüfkörper

Zunächst wurde für die Probenahme ein plattenartiger Prüfkörper entwickelt. Ziel war es, hinsichtlich der Betonrezeptur, der Carbonbewehrung und des Bewehrungsgrades möglichst Konfigurationen zu wählen, die üblichen Praxisanwendungen entsprechen. So wurden Maße festgelegt, welche sowohl für zwei Personen während der Versuchsdurchführung handhabbar sind, als auch die größtmögliche Untersuchungsfläche für die Beprobung bieten. Daraus ergaben sich Abmessungen der Probekörper von (Länge $\times$ Breite $\times$ Höhe =) 0,90 m $\times$ 0,90 m $\times$ 0,06 m, welche bei einer Betondichte von $\rho = 2,4 \text{ t/m}^3$ ein mittleres Gewicht von circa 116 kg aufwiesen. Weitere relevante Parameter der Versuchskörper waren die Art der Carbonbewehrung, die Betongüte und die Art der Betonage, wobei zwischen stehender und liegender Herstellung unterschieden wurde. Es kam Beton der Festigkeitsklasse C30/37 sowie C50/60 zum Einsatz. Für die Bewehrung wurden folgende vier Bewehrungstypen verwendet:

- Solidian Rebar CCE Stab, Durchmesser 8 mm,
- Solidian R31 / 71 Gelege,
- HTC 21 / 21-80 Gelege sowie
- Tudatex / J&G Stab, Durchmesser 4 mm.

Die Prüfkörper mit Carbonegelege waren zweilagig, jene mit stabförmiger Carbonbewehrung einlagig bewehrt. Insgesamt wurden 24 Prüfkörper mit Carbonbewehrung hergestellt (4 Bewehrungstypen, 6 Bearbeitungsverfahren (vgl. Abschnitt 3.4)), vgl. dazu **Bild 2**. Hinzu kamen sechs Platten mit Stahlbewehrung zu Referenzzwecken und acht unbewehrte Platten für Vergleichsmessungen und weitere Untersuchungen. In Summe ergaben sich 38 Versuchskörper.

3.4 Mechanische Bearbeitung der Prüfkörper nach DIN 18007

Auch die in den Versuchen angewendeten mechanischen Bearbeitungsverfahren sollten möglichst den in der Baupraxis üblichen Verfahren entsprechen. Dazu wurde sich an den Bearbeitungsverfahren gemäß DIN 18007 Abbrucharbeiten [21] orientiert. Die Verfahren wurden von einer Person mit manuell bedienbaren handelsüblichen Kleingeräten ausgeführt. Es wurden ausschließlich trocken arbeitende Verfahren gewählt. Folgende sechs Bearbeitungsverfahren nach DIN 18007 [21] wurden als



Bild 2. Darstellung der angefertigten Probekörper mit Bearbeitungsverfahren Grafik: IBB (TUD)
 Fig. 2. Illustration of the test specimens produced, showing the machining processes Source: IBB (TUD)

Trockenverfahren mit nachfolgend genannten Geräten durchgeführt:

- Vollbohren trocken (Gerät: Akku-Bohrhammer, Fa. Makita, 18 V DHR243),
- Kernbohren trocken (Gerät: Akku-Bohrhammer, Fa. Makita, 18 V DHR243),
- Schlitzen trocken (Gerät: Mauernutfräse, Fa. Eibenstock, EMF 150.1),
- Schleifen trocken (Gerät: Betonschleifer, Fa. Eibenstock, EBS 120.1),
- Stemmen trocken (Gerät: Akku-Bohrhammer, Fa. Makita, 18 V DHR243) und
- Sägen trocken (Gerät: Winkelschleifer, Fa. Makita, GA9040 RF01, 230 mm).

Die sechs Bearbeitungsverfahren wurden an je einer Platte mit unterschiedlichem Bewehrungstyp durchgeführt. Zur Dokumentation der Versuche wurde ein umfängliches Protokoll entwickelt, welches alle notwendigen Informationen zur Versuchsdurchführung dokumentiert. Die Versuche wurden von den Autoren dieser Veröffentlichung konzipiert und im Zeitraum zwischen Mai und September 2023 durchgeführt.

3.5 Staubaufnahme während der Bearbeitung

Durch ein extern beauftragtes Unternehmen für Emissionsmessungen wurden im Rahmen der mechanischen Bearbeitung der Prüfkörper Messungen durchgeführt, um die inhalative Exposition zu ermitteln und zu beurteilen.

Dabei wurde auf folgende Gefahrstoffe abgestellt: Alveolengängige Staubanteile (A-Staub), einatembare Staubanteile (E-Staub), Quarzstaub sowie WHO-Fasern (organische und anorganische Faserstäube). Den Bewertungsmaßstab bilden dabei die in Tabelle 1 aufgeführten Grenzwerte. Die Faserstäube wurden durch das Probenahmegerät abgesaugt, auf einen Goldfilter

abgeschieden und anschließend mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) und energiedispersiver Röntgenmikroanalyse (EDXA) ausgewertet (vgl. Abschnitt 3.6). Der Probenahmekopf bestand aus einem zylindrischen Ansaugtubus, einem Filterhalter mit Messfilter und einem Absaugstutzen für eine pulsationsfreie Förderung des Luftstroms. Als Filtermaterial diente ein goldbeschichteter Polycarbonat-Kernporenfilter mit Porenweiten zwischen 0,4 µm und 0,8 µm, der eine aufladungsfreie REM-Abbildung gewährleistet. Um Kontaminationen auszuschließen wurden vor und nach der Messung die Filter luftdicht gelagert. Während der Messung wurde ein konstanter Volumenstrom von 0,24 l/min bis 0,30 l/min pro cm² Filterfläche gewählt, was einer Strömungsgeschwindigkeit von etwa 5 cm/s entspricht. Die Probenahmezeit variierte in Abhängigkeit von der Staubkonzentration, um eine Überbelegung des Filters zu vermeiden. Als maximale Probenahmezeit wurden 15 Minuten festgelegt. Für darüber hinausgehende Randbedingungen der Versuche, wie zum Beispiel Anforderungen an die Mess- und Auswertungsgeräte, wird auf die VDI-Richtlinie 3492 [22] verwiesen.

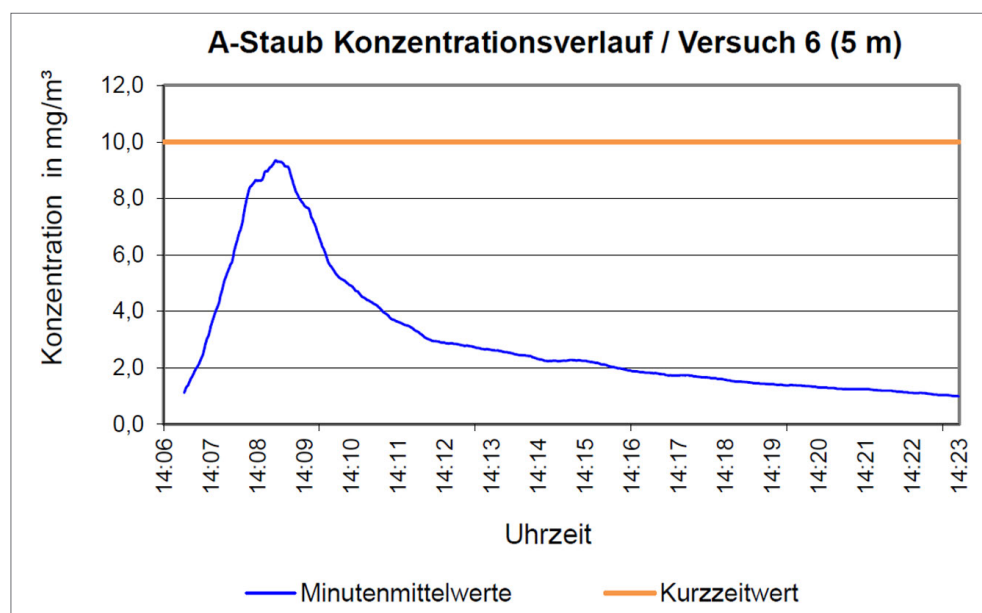
3.6 Messtechnische Auswertung der aufgenommenen Stäube

Zur quantitativen Erfassung der freigesetzten Fasern kam das rasterelektronenmikroskopische Messverfahren (REM) nach VDI-Richtlinie 3492 „Bestimmung anorganischer faserförmiger Partikel“ zum Einsatz, [22] das von der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) als anerkanntes Analyseverfahren bestätigt ist. Dieses Verfahren erlaubt die getrennte Bestimmung der Konzentration lungengängiger anorganischer Fasern mit den WHO-Kriterien ($L > 5 \mu\text{m}$, $D < 3 \mu\text{m}$, $L/D > 3$) und Fasern anderer Abmessungen. Darüber hinaus wurde mit der mikroskopischen und energiedispersiven Röntgenanalyse (EDXA) die morphologische und die stoffliche Identifikation der Fasern bestimmt

Bild 3. Darstellung des Verlaufes der Konzentration an Staub im Vergleich zum Kurzzeitwert (Verfahren: Schlitzen trocken)

Grafik: Müller-BBM Group

Fig. 3. Graph showing the trend in dust concentration compared with the short-term value (method: dry slitting) Source: Müller-BBM Group



[23]. Die energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDXA) ist eine Methode der Materialanalyse, bei der die Atome einer Probe durch einen Elektronenstrahl angeregt werden und dabei charakteristische Röntgenstrahlung aussenden. Anhand der Energie dieser Strahlung kann bestimmt werden, welche Elemente in der Probe enthalten sind und in welcher relativen Menge sie vorkommen. Zur Vorbereitung der Messung werden die Filter visuell unter einem Stereomikroskop auf Defekte oder ungleichmäßige Partikelverteilungen hin untersucht. Als Referenz dient ein Testpräparat mit definierten Asbestfasern, welches die Kontrolle der Bildqualität und der Elementanalyse ermöglicht.

Bei dem REM-Verfahren wurde zunächst die gesamte Filterfläche in standardisierte einzelne Zählfelder mit einer Einzelfläche von mindestens 0,15 mm² unterteilt. Danach wurde die Faserkonzentration einzelner Zählfelder ermittelt (z. B. 3 Stück Fasern pro Zählfeld) und mit dem Verhältnis „Anzahl Zählfelder pro gesamte Filterfläche“ auf die Gesamtanzahl an Fasern pro Filterfläche hochgerechnet. Dabei wurden ausschließlich Fasern gezählt, welche die gesundheitskritischen Abmessungen gemäß WHO-Definition aufweisen. Aus diesem Wert kann unter Beachtung des Volumenstromes beim Ansaugen der staubbelasteten Luft die ursprüngliche Faserkonzentration in der Luft ermittelt werden.

Fasern, deren beide Enden im Zählfeld lagen, werden vollständig gezählt, während nur teilweise sichtbare Fasern anteilig berücksichtigt wurden. Faserbündel oder überlappende Strukturen wurden je nach Erkennbarkeit einzeln erfasst, überlagerte Partikel hingegen ausgeschlossen. Zur Gewährleistung statistischer Relevanz mussten mindestens 50 Fasern erkannt werden, bei überbelagten Filtern oder starkem Partikelüberschuss wurde die Probe verworfen.

Zur Bestimmung der Faserkonzentration wurde die Anzahl der gezählten Fasern je Zählfeld, die Anzahl der Zählfelder, die Fläche eines Zählfeldes und der Probeluftvolumenstrom berücksichtigt. Diese Berechnung lieferte die Faseranzahl pro Kubikmeter Luft. Das Verfahren erlaubte auch die Angabe eines 95 %-Vertrauensbereichs, der die statistische Unsicherheit beschreibt, da insbesondere bei niedrigen Zählwerten die Streuung hoch ist. Fehlerquellen ergaben sich aus der Handhabung der Filter, unpräziser Geräteeinstellung oder subjektiver Auswertung der REM-

Bilder. Auch eine ungleichmäßige Filterbelegung, Feuchtigkeit oder Verschmutzung konnten die Ergebnisse beeinflussen. Eine zu dichte Partikelbelegung erschwerte zudem die Erkennbarkeit einzelner Fasern, während ähnliche Elementzusammensetzungen im untersuchten Material Fehlinterpretationen bei der EDXA-Analyse verursachen konnten.

4 Ergebnisse der Untersuchungen

Die Darstellung der Messergebnisse erfolgte in Diagrammen. Sie zeigen jeweils den zeitlichen Verlauf der Partikelkonzentration in mg/m³ als Minutenmittelwert in der Luft vor der Ansaugstelle während des Bearbeitungsvorgangs.

Bild 3 zeigt beispielhaft die A-Staubkonzentration in der angesaugten Luft in 5 m Entfernung vom Versuchsstand während des Bearbeitungsversuches 6 (Verfahren: Schlitzen trocken) von circa 2 Minuten Dauer. Die Messdauer betrug insgesamt ca. 16 Minuten. Beginn des Versuches war 14:06:30 Uhr. Deutlich erkennbar ist ein kurzzeitiger starker Konzentrationsanstieg der A-Staub-Konzentration innerhalb von etwa 2 Minuten (14:06:30 Uhr bis 14:08:30 Uhr) von 1,0 mg/m³ bis auf etwa 9,0 mg/m³, gefolgt von einem kontinuierlichen Abfall nach Beendigung des Bearbeitungsvorgangs. Nach 14 Minuten ist die ursprünglich Partikelkonzentration von 1,0 mg/m³ wieder erreicht. Ein ähnlicher Verlauf konnte bei allen Versuchen nachgewiesen werden. Der Verlauf verdeutlicht die hohe Staubemission während der aktiven Bearbeitungsphase sowie die Wirksamkeit der Absetzung des Materials aus der Luft. Trotz temporär hoher Spitzenwerte liegt die mittlere Exposition über den gesamten Messzeitraum unter dem des festgelegten Kurzzeitwertes für A-Staub von 10 mg/m³. Nachfolgend werden die konkreten Ergebnisse der einzelnen Versuche zu sieben unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren in gleicher Weise zusammengefasst.

4.1 Vollbohren von Carbonbeton

Vollbohren mit einem Spiralbohrer kommt typischerweise bei der Herstellung von Dübelverankerungen zum Einsatz. Bei den Versuchen zeigten sich A-Staubkonzentrationen von

0,2-0,3 mg/m³ (1 m Abstand) und 0,2-0,4 mg/m³ (5 m Abstand). Die E-Staubwerte lagen im Bereich von 1,6-4,7 mg/m³ (1 m) und 1,3-2,8 mg/m³ (5 m). Die Quarzstaubkonzentrationen erreichten 0,1-0,2 mg/m³ (1 m) sowie 0,1-0,3 mg/m³ (5 m). Der höchste Einzelwert beim Vollbohren trat bei der Mattenbewehrung Solidian R31/71 mit einer E-Staubbelastung von 4,7 mg/m³ auf. Dieser Wert war doppelt so hoch wie bei der Stabbewehrung Solidian Rebar CCE. Für Kohlenstofffasern nach WHO-Definition lag nur ein Messwert über der Nachweisgrenze (9 563 Fasern/m³, 1 m Abstand, Solidian Rebar CCE Stab). Sonstige anorganische Fasern lagen bei 38 251-45 654 Fasern/m³ (1 m) und 28 688-58 970 Fasern/m³ (5 m). Organische Fasern wurden mit 0-28 688 Fasern/m³ (1 m) und 0-23 588 Fasern/m³ (5 m) gemessen.

4.2 Kernbohren von Carbonbeton

Kernbohren mit einer hohlen Bohrkronen kommt bei der Herstellung größerer runden Öffnungen, zum Beispiel für Rohrdurchführungen in Wänden, zum Einsatz. Die A-Staubkonzentrationen bei den Versuchen erreichten 2,4-8,5 mg/m³ (1 m) und 1,4-8,8 mg/m³ (5 m). Für E-Staub wurden Werte von 14-55 mg/m³ (1 m) und 3,5-33 mg/m³ (5 m) gemessen, wobei der Maximalwert bei der Stabbewehrung Tudatex/J&G mit 55 mg/m³ auftrat.

Die anteiligen Quarzstaubkonzentrationen für A-Staub lagen bei 0,7-5,4 mg/m³ und überschritten in allen Fällen den Grenzwert von 0,05 mg/m³ nach TRGS 559 [18]. Kohlenstofffasern konnten überwiegend nicht nachgewiesen werden. Nur beim Tudatex/J&G Stab wurde in 5 m Abstand ein Wert oberhalb der Nachweisgrenze festgestellt. Sonstige anorganische Fasern erreichten einen Wert von 80 413-273 405 Fasern/m³ (1 m) und 32 165-159 218 Fasern/m³ (5 m); der höchste Wert von 273 405 Fasern/m³ trat ebenfalls beim Tudatex/J&G Stab auf.

4.3 Schlitzen von Carbonbeton

Schlitten ist für die Herstellung von Kabelkanälen oder die nachträgliche Herstellung von scharfkantigen Abbruchkanten erforderlich. Es führte zu deutlich höheren Staubkonzentrationen als das Vollbohren. A-Staubwerte lagen bei 5,2-33 mg/m³ (1 m) und 5,3-17 mg/m³ (5 m). Der Maximalwert von 33 mg/m³ wurde bei der Mattenbewehrung Solidian R31/71 gemessen. E-Staubwerte betrugen 55-109 mg/m³ (1 m) und 33-73 mg/m³ (5 m); alle überstiegen den Kurzzeitwert deutlich. Quarzstaub wurde mit 3,1-20 mg/m³ gemessen, wobei der Höchstwert (20 mg/m³) ebenfalls bei der Mattenbewehrung Solidian R31/71 auftrat. Für sonstige anorganische Fasern ergaben sich 331 705-746 950 Fasern/m³ (1 m) und 45 865-707 637 Fasern/m³ (5 m). Der Spitzenwert von 746 950 Fasern/m³ resultierte aus der Bearbeitung der Mattenbewehrung Solidian R31/71. Kohlenstofffasern wurden nur in Ausnahmefällen, übrige organische Fasern kaum oberhalb der Nachweisgrenze festgestellt.

4.4 Schleifen von Carbonbeton

Durch die schleifenden Bearbeitungsverfahren, beispielsweise mit einem Schwingschleifer werden Oberflächeneigenschaften verändert oder Bauteilabmessungen flächig reduziert.

Im Rahmen der Versuche wurde eine A-Staubkonzentration von 10-30 mg/m³ (1 m) und 11-28 mg/m³ (5 m) festgestellt. Für E-Staub ergaben sich Werte von 99-314 mg/m³ (1 m) und 39-155 mg/m³ (5 m). Die höchsten E-Staubbelastungen erreichten 314 mg/m³ (1 m, Solidian Rebar CCE Stab). Quarzstaub lag bei 5,9-18 mg/m³ (1 m) und 6,2-18 mg/m³ (5 m). Die höchste nachweisbare Faserkonzentration wurde beim Tudatex/J&G Stab mit 29 485 Fasern/m³ (1 m) gemessen. Sonstige anorganische Fasern erreichten 250 621-1 132 219 Fasern/m³ (1 m) und 265 364-589 697 Fasern/m³ (5 m), wobei der Spitzenwert 1 132 219 Fasern/m³ betrug. Organische Fasern lagen in allen Fällen unter der analytischen Nachweisgrenze.

4.5 Stemmen von Carbonbeton

Stemmen kommt häufig bei der nachträglichen Anpassung der Bauteil- und Oberflächengeometrie und bei der nachträglichen Herstellung von Öffnungen zum Einsatz. Dabei wurde im Rahmen der Versuche eine A-Staubkonzentration zwischen 1,7-3,9 mg/m³ (1 m) und 1,1-15 mg/m³ (5 m) gemessen. Der Maximalwert von 15 mg/m³ wurde beim Probekörper mit Mattenbewehrung Solidian R31/71 gemessen. E-Staubwerte betrugen 14-26 mg/m³ (1 m) und 10-23 mg/m³ (5 m). Quarzstaub lag bei 1,1-2,3 mg/m³ (1 m) und 0,6-8,5 mg/m³ (5 m).

Kohlenstofffasern wurden nur beim Probekörper mit der Bewehrung Solidian Rebar CCE Stab nachgewiesen. Sonstige anorganische Fasern lagen bei 110 569-210 080 Fasern/m³ (1 m) und 55 284-199 023 Fasern/m³ (5 m). Organische Fasern wurden ebenfalls nur bei der Bewehrung Solidian Rebar CCE Stab nachgewiesen (78 048 Fasern/m³ (1 m), 21 444 Fasern/m³ (5 m)).

4.6 Sägen von Carbonbeton

Das Sägen zeigte die höchsten Expositionen aller Verfahren und kommt in der Praxis häufig beim großvolumigen Trennen von Bauteilen zum Einsatz. Die A-Staubwerte der Versuche erreichten 53-98 mg/m³ (1 m) und 16-40 mg/m³ (5 m). E-Staub lag zwischen 344-638 mg/m³ (1 m) und 162-285 mg/m³ (5 m). Quarzstaubkonzentrationen betrugen 31-61 mg/m³ (1 m) und 9,5-25 mg/m³ (5 m). Der Maximalwert von 638 mg/m³ E-Staub wurde beim Probekörper mit Mattenbewehrung Solidian R31/71 festgestellt. Sonstige anorganische Fasern lagen bei 552 841-1 120 425 Fasern/m³ (1 m) und 678 152-1 238 365 Fasern/m³ (5 m). Der Spitzenwert von 1 238 365 Fasern/m³ wurde ebenfalls bei der Mattenbewehrung Solidian R31/71 gemessen. Organische Fasern konnten nur in einem Fall, bei 5 m Abstand und gleicher Bewehrung, sicher identifiziert werden.

4.7 Sägen der Carbonbewehrung (ohne Beton)

In einer letzten Versuchsreihe wurde die Staubentwicklung beim Sägen von Carbonbewehrung (ohne Beton) mit einem Trennschleifer untersucht. Dies kommt typischerweise bei der Konfektionierung der Bewehrungsgeometrie auf der Baustelle zur Anwendung. Beim Sägen der Carbonbewehrung wurden in Versuch 1 Kohlenstofffasern in Konzentrationen von 23 588 Fasern/m³ (1 m) beim Tudatex/J&G Stab und verglichen dazu 129 733 Fasern/m³ (1 m) bei dem Solidian Rebar CCE Stab

Tabelle 2. Konzentrationen an WHO-Fasern in Abhängigkeit der Bearbeitungsverfahren und Bewehrungsart
 Table 2. Concentrations of WHO fibres as a function of processing methods and reinforcement type

Bearbeitungsverfahren	Bewehrungsart	Platten-Nr.	Faserkonzentration [in Stück Fasern / m³]					
			Kohlenstofffasern			sonstige anorganische Fasern		
			1 m Abstand	5 m Abstand	KZW	1 m Abstand	5 m Abstand	KZW
Vollbohren (Carbonbeton)	Solidian Rebar CCE Stab	1	9563	<9563	250 000	38 251	28 688	250 000
	Tudatex / J&G Stab	7	<11 794	<11 794		35 382	53 073	
	HTC 21 / 21-80 Gelege	13	<11 794	<11 794		29 485	47 176	
	HTC 21 / 21-80 Gelege	16	<11 057	<10 722		33 170	32 165	
	Solidian R31 / 71 Gelege	19	<11 413	<11 057		22 827	33 170	
	Solidian R31 / 71 Gelege	22	<11 413	<11 794		45 654	58 970	
Kernbohren (Carbonbeton)	Solidian Rebar CCE Stab	2	<16 083	<16 083	250 000	80 413	32 165	250 000
	Tudatex / J&G Stab	8	<16 083	16 083		273 405	136 703	
	HTC 21 / 21-80 Gelege	14	<15 383	<16 083		153 834	128 661	
	Solidian R31 / 71 Gelege	20	<17 691	<17 691		176 909	159 218	
Schlitzen (Carbonbeton)	Solidian Rebar CCE Stab	1	<14 742	13 104	250 000	331 705	45 865	250 000
	Tudatex / J&G Stab	7	<19 657	<19 657		422 616	255 536	
	HTC 21 / 21-80 Gelege	13	<19 657	<22 114		707 637	287 477	
	HTC 21 / 21-80 Gelege	16	<35 382	<35 382		636 873	707 637	
	Solidian R31 / 71 Gelege	19	<19 657	<19 657		746 950	687 980	
	Solidian R31 / 71 Gelege	22	<25 273	<23 588		707 637	424 582	
Schleifen (Carbonbeton)	Solidian Rebar CCE Stab	3	<35 382	<35 382	250 000	1 132 219	265 364	250 000
	Tudatex / J&G Stab	9	29 485	<29 485		250 621	589 697	
	HTC 21 / 21-80 Gelege	14	<29 485	<29 485		973 001	501 243	
	Solidian R31 / 71 Gelege	21	<29 485	<29 485		678 152	471 758	
Stemmen (Carbonbeton)	Solidian Rebar CCE Stab	2	20 813	<10 722	250 000	166 503	176 909	250 000
	Tudatex / J&G Stab	8	<11 057	11 057		210 080	199 023	
	HTC 21 / 21-80 Gelege	14	<11 057	<11 057		154 796	55 284	
	Solidian R31 / 71 Gelege	20	<11 057	<10 722		110 569	182 270	
Sägen (Carbonbeton)	Solidian Rebar CCE Stab	3	<39 313	<35 382	250 000	1 120 425	707 637	250 000
	Tudatex / J&G Stab	9	<44 227	<44 227		928 773	818 205	
	HTC 21 / 21-80 Gelege	14	<44 227	<44 227		552 841	1 238 365	
	Solidian R31 / 71 Gelege	21	<58 970	<58 970		943 516	678 152	
Sägen (nur Carbonbewehrung)	Solidian Rebar CCE Stab	-	129 733	keine Messung	250 000	29 485	keine Messung	250 000
	Tudatex / J&G Stab	-	23 588			<11 794		
	HTC 21 / 21-80 Gelege	-	23 588			82 558		
	Solidian R31 / 71 Gelege	-	<11 794			11 794		

nachgewiesen. Für die Mattenbewehrung Solidian R31/71 lag das Ergebnis bei weniger als 11 794 Fasern/m³, vgl. dazu **Tabelle 2**.

5 Auswertung der Messergebnisse

Eine Zusammenfassung relevanter Messergebnisse im Probeabstand von 1,0 m und 5,0 m zeigt Tabelle 2. Die Tabelle weist dabei die während der Versuche gemessenen Konzentration an WHO-Fasern in Stück Fasern / m³ Luft (vgl. Spalten 4, 5, 7 und 8) in Abhängigkeit der unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren (vgl. Spalte 1) und der Bewehrungsart (vgl. Spalte 2) aus. In den Spalten 6 und 9 sind die Grenzwerte der zulässigen Konzentration für kurzzeitige Staubexpositionen (KZW) gemäß TRGS 521 [17] angegeben. Messwerte, welche den Kurzzeitwert überschreiten, sind rot hinterlegt. Spalte 3 gibt die Nummer des Versuchskörpers an.

Es lässt sich ablesen, dass die Konzentrationen von Kohlenstofffasern mit WHO-Abmessungen aus der Carbonbewehrung im Vergleich zu den sonstigen anorganischen Fasern mit WHO-Abmessungen aus der Betonmatrix insgesamt geringer ausfallen. In nahezu allen Verfahren lagen die ermittelten Werte für Kohlenstofffaserstäube unterhalb der analytischen Nachweisgrenze oder erreichten maximal Konzentrationen im unteren Zehntausenderbereich (Fasern/m³). Nur beim Sägen der Carbonbewehrung (ohne Beton) wurden nennenswerte Faserfreisetzungen beobachtet. Es wurden Werte von 129 733 Fasern/m³ bei der Bewehrung Solidian Rebar CCE Stab und 23 588 Fasern/m³ beim Tudatex/J&G Stab ermittelt. In beiden Fällen bleiben die gemessenen Werte unter dem Kurzzeitwert von 250 000 Fasern/m³ für Faserstäube (vgl. Tabelle 2). Bei allen übrigen Bearbeitungsverfahren (Vollbohren, Kernbohren, Schlitten, Schleifen, Stemmen und Sägen) traten Kohlenstofffasern lediglich in geringen Konzentrationen auf. Im Gegensatz dazu erreichten die sonstigen anorganischen WHO-Fasern aus der Betonmatrix, insbesondere beim Schleifen, Schlitten und Sägen, deutlich höhere Expositionswerte. Diese überschreiten teilweise den Kurzzeitwert und sind daher in Tabelle 2 rot unterlegt. Auch die Werte für A- und E-Staub (in Tabelle 2 nicht dargestellt) überschritten regelmäßig die geltenden Grenzwerte, wobei der Maximalwert beim Sägen mit 98 mg/m³ A-Staub und 638 mg/m³ E-Staub ermittelt wurde.

Es zeigte sich, dass die maßgebliche Faserexposition beim Bearbeiten von Carbonbeton nicht durch die Carbonbewehrung entsteht, sondern durch den abrasiven Abtrag der mineralischen anorganischen Matrix aus Beton. Die Freisetzung von anorganischen Fasern stellt daher im Vergleich zu Carbonfasern den entscheidenden Expositionsfaktor dar. Die gemessenen Kohlenstofffaserkonzentrationen liegen weit unterhalb des Kurzzeitwertes und tragen nur marginal zur Gesamtfaserbelastung bei. Entscheidend für den Gesundheitsschutz ist somit primär die Minimierung mineralischer Stäube, zum Beispiel durch Absaug- und Nassbearbeitungsverfahren.

6 Fazit und Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen zur Faser- und Staubbefreiung bei der Bearbeitung von carbonbewehrtem Beton zeigen, dass die Hauptbelastung durch Fasern mit WHO-Abmessung nicht durch die Kohlenstofffasern selbst sondern durch die mineralische Betonmatrix entsteht. Während die Konzentrationen der Kohlenstofffasern in allen Bearbeitungsverfahren unterhalb des Kurzzeitwertes

von 250 000 Fasern/m³ lagen, überschritten insbesondere die sonstigen anorganischen Fasern häufig die geltenden Arbeitsplatzgrenzwerte. Die höchsten Gesamtbelastungen traten bei den mechanisch stark abrasiven Verfahren Schleifen, Schlitten und Sägen auf. Hier erreichten die anorganischen Faserstäube teilweise Werte im Millionenbereich (Fasern/m³) und stellen somit das dominanteste Expositionsrisiko dar. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die Gefährdungsabschätzung beim Umgang mit Carbonbeton nicht auf die Kohlenstofffasern beschränkt werden darf. Stattdessen ist der Fokus auf die Staubemissionen aus der Betonmatrix zu richten, deren Zusammensetzung und Partikelgrößen eine potenziell höhere gesundheitliche Relevanz besitzen. Dieser Sachverhalt ist allerdings hinreichend bekannt und konnte mit den hier gegenständlichen Versuchen, an auch derzeit am Markt verfügbaren Bewehrungen aus Carbon, validiert werden. Für die Praxis bedeutet dies, dass effektive Schutzmaßnahmen, insbesondere das Tragen einer entsprechenden Atemschutzmaske, konsequent angewendet werden müssen, um die Staub- und Faserkonzentration in der Atemluft zu minimieren.

Zukünftige Forschungsarbeiten sollten sich auf die langfristige Bewertung der Faser- und Staubexposition im realen Baustellenumfeld konzentrieren. Hierbei sind neben der Ermittlung von Konzentrationsspitzen auch die Dauerexposition sowie Wechselwirkungen unterschiedlicher Staub- und Faserarten zu untersuchen. Auf dieser Grundlage können praxisgerechte Schutzkonzepte für die sichere Anwendung der Carbonbetonbauweise weiterentwickelt werden. Weiterhin ist die Biopersistenz von Kohlenstofffasern dringend zu untersuchen und weiterführend eindeutig zu klassifizieren.

LITERATUR

- [1] TRGS 519 – Technische Regeln für Gefahrstoffe, Asbest: Abbruch-, Sanierungs- oder Instandhaltungsarbeiten, Berlin: Gemeinsames Ministerialblatt (GMBI), 2025.
- [2] *Mattenklotz, M.; Van Gelder, R.*: Carbonfasern und carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) Teil 1: Charakterisierung, Exposition, Bewertung und Schutzmaßnahmen. In: *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 79 (2009), Heft 9, S. 317-322. doi.org/10.37544/0949-8036-2019-09-23.
- [3] *Otto, J.; Jahn, A.; Wiel, R.*: Lebenszyklusbezogene Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Bauteilen aus Carbonbeton. In: *Bauingenieur* 98 (2023), Heft 11, S. 361-367. doi.org/10.37544/0005-6650-2023-11-49.
- [4] *Rudloff, T.; Schütze, E.; Wiel, R. et al.*: Toleranzen der Bewehrungslage von dünnen Carbonbetonbauteilen – Anforderungen, Herausforderungen und Messverfahren. In: *Bauingenieur* 100 (2025), Heft 4, S. 90-99. doi.org/10.37544/0005-6650-2025-04-56.
- [5] *Curbach, M.; Hegger, J.; Schladitz, F. et al.*: Handbuch Carbonbeton – Einsatz nichtmetallischer Bewehrung. Berlin: Ernst & Sohn, 2023, doi.org/10.1002/9783-4336-0866-1.
- [6] *Holz, K.*: Carbonbeton unter Hochtemperaturbeanspruchung. Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, 2021.
- [7] *Wilhelm, K.*: Verbundverhalten von mineralisch und polymer gebundenen Carbonbewehrungen und Beton bei Raumtemperatur und erhöhten Temperaturen bis 500 °C. Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, 2021. doi.org/10.1002/2018-0007-2.
- [8] *Niederwald, M.*: Einfluss des Beschichtungsmaterials auf das Zugtragverhalten von Carbonbeton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 112 (2017), Heft 10, S. 635-702.
- [9] *Donnet, J.-B.; Wang, T.; Peng, J. et al.*: Carbon Fibers. New York: Taylor & Francis Inc, 1998.
- [10] *Keßeler, H.*: Untersuchung der inflammatorischen Wirkung von Stäuben aus der Herstellung und Bearbeitung carbonfaser-verstärkter Kunststoffe (CFK). Bochum: Hohe Medizinischen Fakultät Ruhruniversität Bochum, 2018. doi.org/10.13154/2947-430.

- [11] *Morgen, P.*: Carbon Fibers and their Composites. USA 2005: Taylor & Francis Group, 2005.
- [12] *Kortmann, J.*: Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton. Wiesbaden: Springer Verlag, 2020. doi.org/10.1007/978-3-658-30125-5.
- [13] TRGS 910 – Technische Regel für Gefahrstoffe, Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen, Berlin: Gemeinsame Ministerialblatt (GMBI), 2025.
- [14] *Eibl, S.*: Gesundheitsgefährdung durch lungengängige Kohlenstoffasern beim Abbrand von Carbonkunststoffen. Workshop „Lunge – Umwelt – Arbeitsmedizin“, Linz (Österreich), 2017.
- [15] GefStoffV, Gefahrstoffverordnung – GefStoffV, Berlin: Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS), 2025.
- [16] TRGS 900 – Technische Regel für Gefahrstoffe, Arbeitsplatzgrenzwerte, Berlin: Gemeinsames Ministerialblatt (GMBI), 2025.
- [17] TRGS 521 – Technische Regeln für Gefahrstoffe, Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten mit alter Mineralwolle, Berlin: Gemeinsames Ministerialblatt (GMBI), 2008.
- [18] TRGS 559 – Technische Regeln für Gefahrstoffe, Quarzhaltiger Staub, Berlin: Gemeinsames Ministerialblatt (GMBI), 2020.
- [19] e. DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, FBHM-074 Fachbereich Aktuell – Bearbeitung von CFK-Materialien – Orientierungshilfe für Schutzmaßnahmen, Berlin: DGUV – Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2024.
- [20] *Bienkowski, N.; Hillemann, L.; Streibel, T. et al.*: Bearbeitung von Carbonbeton – eine bauverfahrenstechnische und medizinische Betrachtung. In: Bauingenieur, Jahresausgabe 2017/2018, pp. 110-118.
- [21] DIN 18007, Abbrucharbeiten – Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche, Berlin: Deutsches Institut für Normung, 2022.
- [22] 3. VDI, Innenraumluft, Außenluft – Messen anorganischer faserförmiger Partikel – Rasterelektronenmikroskopisches Verfahren, Berlin: VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KrdL), 2026.
- [23] D. I. 213-546, Verfahren zur getrennten Bestimmung der Konzentration von lungengängigen anorganischen Fasern in Arbeitsbereichen – REM-Verfahren, Berlin: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), 2013.

Prof. Dr.-Ing. Jens Otto

jens.otto@tu-dresden.de, Tel. 0351 463 34242
TU Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baubetriebswesen
George-Bähr-Str. 1, 01069 Dresden

Veit Klopfer

veit.klopfer@tu-dresden.de, Tel. 0351 463 32818

Romy Wiel

romy.wiel@tu-dresden.de, Tel. 0351 463 35732

Dr. Jan Kortmann

jan.kortmann@tu-dresden.de, Tel. 0351 463 36315

TU Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baubetriebswesen
George-Bähr-Str. 1, 01069 Dresden

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

VdS-Brandschutztage 2026

Die VdS-BrandSchutzTage finden am 2. und 3. Dezember 2026 in Köln statt. Die Veranstaltung verbindet eine Fachmesse zum vorbeugenden Brandschutz mit einem begleitenden Fachprogramm und neun separat buchbaren Fachtagungen.

Auf der Messe stehen Lösungen und Anwendungen aus dem baulichen, anlagentechnischen und organisatorischen Brandschutz im Mittelpunkt. Ergänzend gibt es Vorführungen und Live-Demonstrationen. Auf der Messebühne sind unter anderem Vorträge des „Zukunftsforums Brandschutz“, ein Ausstellerforum sowie der VdS-BrandSchutzTalk geplant.

Eine Sonderfläche zum baulichen Brandschutz wird 2026 zum zweiten Mal eingerichtet. Dort sollen Exponate und Anwendungen anhand von Demonstrationen gezeigt werden. Hinzu kommen eine Sprinkler-Fläche mit Vorführungen sowie geführte Messerundgänge, die unter anderem von Studierenden der Hochschule Furtwangen konzipiert werden.

Das Tagungsprogramm umfasst neun Fachtagungen zu unterschiedlichen Themen. Dazu zählen unter anderem Feuerlöschanlagen, baulicher Brandschutz, Brandmeldeanlagen, Hydrantenanlagen sowie Rauch- und Wärmeabzugsanlagen.

Neu im Programm sind die Fachtagung „Brandschutz in elektrischen Anlagen“ und das englischsprachige „European Fire Detection Forum 2026“.

Zudem richtet der europäische Branchenverband Euralarm ein Symposium im Rahmen der Veranstaltung aus.

Für die zweitägige Veranstaltung werden rund 5.500 Fachbesucherinnen und -besucher erwartet. Die Fachtagungen können separat gebucht werden; ihre Teilnehmer erhalten zugleich Zugang zur Fachmesse und zum dortigen Bühnenprogramm.

www.vds-brandschutztage.de

41. Christian Veder Kolloquium

Für das 41. Christian Veder Kolloquium an der Technischen Universität Graz können ab sofort Beiträge eingereicht werden. Die Veranstaltung findet am 1. und 2. April 2027 in Graz statt. Im Mittelpunkt stehen herausfordernde geotechnische Projekte und der Umgang mit Zielkonflikten zwischen Sicherheit und Wirtschaftlichkeit. Das Thema des Kolloquiums lautet „Beobachten, Verstehen, Entscheiden, Handeln – Herausfordern der geotechnische Projekte im Spannungsfeld von Sicherheit und Wirtschaftlichkeit“.

Gesucht werden Beiträge aus dem Bereich der Geotechnik, die sich mit entsprechenden Projekten und Fragestellungen auseinandersetzen. Interessierte können ihre Beitragsanmeldung bis zum 19. Oktober 2026 per E-Mail an Univ.-Prof. Franz Tschuchnigg vom Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik der TU Graz senden.

Das Kolloquium wird von einer Fachaussstellung begleitet. Veranstalter ist das Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik der TU Graz. Das Christian Veder Kolloquium findet 2027 zum 41. Mal statt; die diesjährige Ausgabe im April 2026 widmete sich Großprojekten und deren Bedeutung für die Weiterentwicklung der Geotechnik.

www.cvk.tugraz.at