

Festlegung des Bemessungswerts der Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe

Anforderungen an Sekundärbarrieren aus Beton in Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen; Teil 2

Karl-Uwe Voß, Neuwied

Im ersten Teil der Artikelserie wurde über die rechtlichen Vorgaben der neuen AwsV [1] an die Herstellung und den Betrieb von Anlagen im Bereich des Wasserhaushaltsgesetzes sowie über die Vorgaben an die zu verwendenden Betone (FD-Betone bzw. FDE-Betone) berichtet. Anschließend wurden die Regelwerksvorgaben an die Planung, Bauausführung und Überwachung im Zuge der Erstellung von Sekundärbarrieren aus Beton sowie häufig festgestellte Probleme im Rahmen der Überwachung der Baustellen vorgestellt. Der zweite Teil der Artikelserie beschäftigt sich mit der Ermittlung der mittleren und der charakteristischen Eindringtiefen von FD-Betonen (flüssigkeitsdichte Betone ohne Eindringprüfung). Hierbei wird im Besonderen auf den Unterschied zwischen den Anforderungen an den „ungerissenen Bauteilquerschnitt“ und die „zu schützende Fugenflanke“ und auf die sich hieraus abgeleiteten „Bemessungswerte der Eindringtiefe“ eingegangen. Speziell werden die Anforderungen hergeleitet, die an Dichtflächen von Tankflächen zu stellen sind. Abschließend wird detailliert auf die Probleme bei der Durchführung der Eindringprüfung an Beton zum Nachweis der Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe (FDE-Prüfung) eingegangen.

1.1 FD-Betone

1.1.1 Charakteristische Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe

Zur Bestätigung der Flüssigkeitsundurchlässigkeit müssen für FD-Betone keine weitergehenden Dichtheitsnachweise erbracht werden, wenn sie die in Tafel 1 aus dem ersten Teil der Artikelserie aufgelisteten Anforderungen erfüllen und keine höheren Anforderungen an die Dichtheit der Sekundärbarriere gestellt werden. Die zulässige mittlere Eindringtiefe e_{tm} wassergefährdender Stoffe ist dabei in Abhängigkeit von den vor Ort gelagerten Flüssigkeiten dem Bild 2-1 der BUMwS [2] zu entnehmen (Bild 1).

Die konkrete Vorgehensweise zur Ermittlung der Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe bei Anwendung der Vorgaben aus Bild 2-1 der BUMwS [2] wird nachfolgend exemplarisch am Beispiel einer mit Dieseldieselkraftstoff mit einem Anteil von 5 % Biodiesel beaufschlagten Sekundärbarriere aus Beton erläutert.

Dieseldieselkraftstoff mit einem Anteil von 5 % Biodiesel weist gemäß den vorliegenden Literaturangaben ein $(\sigma/\eta)^{0,5}$ -Verhältnis von 3,22 auf. Unter Verwendung dieses Werts wird die Eindringtiefe des Dieseldieselkraftstoffs für das zu beurteilende Objekt entweder aus der in Bild 1 dargestellten Abbildung entnommen oder über die in der BUMwS [2] benannte Formel berechnet, wobei es sich bei σ um die Oberflächenspannung und bei η um die dynamische Viskosität handelt.

$$e_{72m} = 10 + 3,33 \cdot \left(\frac{\sigma}{\eta}\right)^{0,5}$$

Formel 1: Berechnung der mittleren Eindringtiefe gemäß der Eindringkurve der BUMwS [2]

Im o.g. Beispiel resultiert für die 72-stündige Beaufschlagung eines FD-Betons demnach eine mittlere Eindringtiefe des Dieseldieselkraftstoffs von $e_{72m} = 20,7$ mm.

Anmerkung: Sind die physikalischen Eigenschaften der wassergefährdenden Stoffe nicht bekannt, so darf ohne weitere Prüfung eine mittlere Eindringtiefe von $e_{72m} = 40$ mm angesetzt werden. Bei beheizten, geschlossenen Innenräumen müssen die Werte nach Bild 2-1 der BUMwS [2] um 50 % vergrößert werden (s. Teil 2, Abschnitt 4.2.2, Absatz 9).

Unter Verwendung dieses Mittelwerts ist die charakteristische Eindringtiefe wie nachfolgend beschrieben zu berechnen:

$$e_{72k} = e_{72m} \cdot 1,35 = 20,7 \text{ mm} \times 1,35 = 28 \text{ mm}$$

Formel 2: Berechnung der charakteristischen Eindringtiefe von Dieseldieselkraftstoff mit einem Anteil von 5 % Biodiesel gemäß der Eindringkurve der BUMwS [2]

Anmerkung: Im Allgemeinen liegt für die Bemessung der charakteristischen Eindringtiefe eine Beaufschlagungsdauer von 72 Stunden zugrunde. Sofern die geplante Beaufschlagungsdauer hiervon abweicht, ist

Der Autor:

Dr. rer. nat. Karl-Uwe Voß studierte Chemie an der Westfälischen Wilhelms-Universität, Münster. Nach der Promotion war er beim ZEMLABOR in Beckum als Sachbearbeiter und stellvertretender Prüfstellenleiter tätig. Anschließend war er technischer Geschäftsführer der Duisburger Überwachungsverbände und des Baustoffüberwachungsvereins Nordrhein-Westfalen BÜV NW, bevor er als Prüfstellenleiter zum ZEMLABOR zurückkehrte. Seit 2002 ist er Geschäftsführer und Institutsleiter der Materialprüfungs- und Versuchsanstalt Neuwied Forschungsinstitut für vulkanische Baustoffe GmbH. Dr. Karl-Uwe Voß ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für den Bereich „chemische Analyse zementgebundener Baustoffe“.

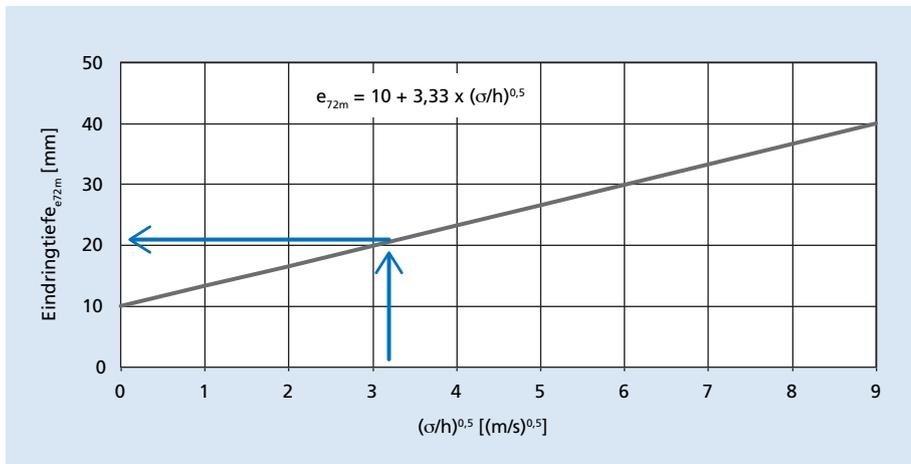


Bild 1: Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe in FD-Betone

die Eindringtiefe gemäß BUMwS [2] über das Wurzel-Zeit-Gesetz zu berechnen.

1.1.2 Bemessungswert der Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe

Bei der Festlegung des Bemessungswerts der Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe sind zwei Fälle zu unterscheiden:

- Fall 1) Festlegung des Bemessungswerts der Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe für den Nachweis des ungerissenen Bauteilquerschnitts;
- Fall 2) Festlegung des Bemessungswerts der Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe für den Nachweis der Dichtigkeit der Fugenkonstruktion (Bild 2).

In den nachfolgenden Abschnitten wird der Weg beschrieben, wie diese Bemessungswerte zu berechnen sind.

1.1.2.1 Bewertung der Eindringtiefe über den ungerissenen Bauteilquerschnitt (Fall 1)

Im Rahmen des Dichtheitsnachweises über den ungerissenen Bauteilquerschnitt ergibt sich der Bemessungswert der Eindringtiefe des Dieselkraftstoffs aus der charakteristischen Eindringtiefe (s. Formel 2), die gemäß Tabelle 1-1 der BUMwS [2] mit einem Sicherheitsbeiwert von 1,5 (normales Überwachungsintervall) multipliziert wird.

Bemessungswert = $e_{72k} \cdot \text{Sicherheitsbeiwert} = 28 \text{ mm} \times 1,5 = 42 \text{ mm}$

Formel 3: Bemessungswert für die Dichtigkeit eines FD-Betons bei Einwirkung von Dieselkraftstoff über den ungerissenen Bauteilquerschnitt

Bei dem oben dargestellten Beispiel (Dieselkraftstoff mit einem Anteil von 5 % Biodiesel) liegt der Bemessungswert der Eindringtiefe hinsichtlich der Dicke des ungerissenen Bauteilquerschnitts somit bei 42 mm. Dieser Wert darf von der Dicke des ungerissenen Bauteilquerschnitts/Druckzonendicke nicht unterschritten werden. Nur dann gilt die zu beurteilende Sekundärbarriere aus Sicht des ungerissenen Bauteilquerschnitts als „dicht“ gegenüber Dieselkraftstoff im Sinne der BUMwS [2]. Ist der

Bemessungswert der Eindringtiefe des wassergefährdenden Stoffes größer als der ungerissene Bauteilquerschnitt, so sind weitergehende Maßnahmen zu ergreifen:

- Fall 1 a) Der Bewehrungsgehalt und/oder die Plattendicke ist soweit zu erhöhen, bis die ungerissene Druckzonendicke größer als der Bemessungswert ist;
- Fall 1 b) Es ist ein Beton mit einem verbesserten Eindringwiderstand (ein so genannter FDE-Beton) zu verwenden. Dieser Nachweis hat über eine Eindringprüfung zu erfolgen. Hierauf wird in Abschnitt 1.2 näher eingegangen.

1.1.2.2 Bewertung der Eindringtiefe über die geschützte Fugenflanke (Fall 2)

Bei dem Dichtheitsnachweis der Fugenkonstruktion entspricht der Bemessungswert der Eindringtiefe des wassergefährdenden Stoffes gemäß [3] der charakteristischen Eindringtiefe. Der Sicherheitsbeiwert gemäß Tabelle 1-1 der BUMwS [2] ist demnach nicht auf die ungeschützte Fugenflanke anzuwenden.

Bemessungswert = $e_{72k} = 28 \text{ mm}$

Formel 4: Bemessungswert für die Dichtigkeit eines FD-Betons bei Einwirkung von Dieselkraftstoff über die geschützte Fugenflanke

Der Bemessungswert der Eindringtiefe für den Nachweis der Dichtigkeit der Fugenkonstruktion liegt im oben beschriebenen Beispiel somit bei 28 mm. Dieser Wert darf von der charakteristischen Eindringtiefe des Dieselkraftstoffs nicht überschritten werden. Nur dann gilt die zu beurteilende Sekundärbarriere aus Sicht der geschützten Fugenflanke (im Sinne der jeweiligen Zulassungen bzw. der bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweise) als „dicht“ gegenüber Dieselkraftstoff. Ist der Bemessungswert der Eindringtiefe des wassergefährdenden Stoffes größer als die geschützte Fugenflanke, so sind weitergehende Maßnahmen zu ergreifen:

- Fall 2a) Es ist ein anderer Fugendichtstoff oder ein Schaumstoff-Fugenprofil mit einer größeren geschützten Fugenflanke zu verwenden;
- Fall 2b) Es ist ein Beton mit einem verbesserten Eindringwiderstand (ein so genannter FDE-Beton) zu verwenden. Dieser Nachweis hat über eine Eindringprüfung zu erfolgen. Hierauf wird in Abschnitt 1.2 näher eingegangen.

1.1.3 Dichtflächen an Tankstellen

Gemäß BUMwS [2] ist bei Dichtflächen an Tankstellen von einer intermittierenden Beaufschlagung (28 Tage à 5 Stunden) auszugehen. Prüftechnisch darf der Dichtheitsnachweis anstelle der intermittierenden Beaufschlagung auch über eine einseitige äquivalente Beaufschlagung über einen Zeitraum von 144 Stunden erfolgen. Bei einer 144 stündigen durchgehenden Beaufschlagung resultiert nach Formel 5 für das Beispiel des Dieselkraftstoffs aus Abschnitt 1.1.1 eine charakteristische Eindringtiefe von 40 mm:

$$e_{144k} = e_{72k} \cdot \left(\frac{144 \text{ h}}{72 \text{ h}}\right)^{0.5} = 28 \text{ mm} \times 1,41 = 40 \text{ mm}$$

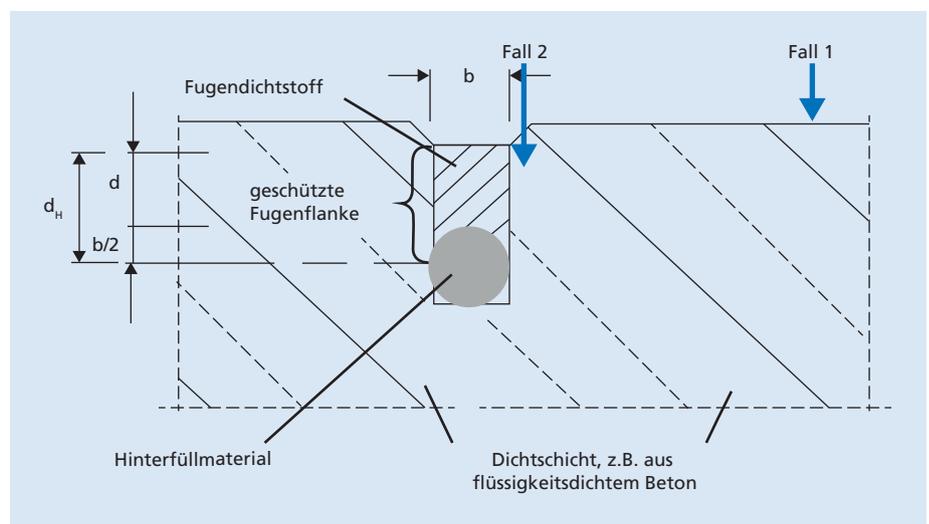


Bild 2: Geschützte Fugenflanke des Fugendichtstoffs

Formel 5: Berechnung der charakteristischen Eindringtiefe von Dieseldieselkraftstoff mit einem Anteil von 5 % Biodiesel für eine 144-stündige Beaufschlagungzeit

Unter Berücksichtigung des Sicherheitsbeiwerts aus Tabelle 1-1 der BUMwS [2] ergibt sich demnach ein Bemessungswert für den ungerissenen Bauteilquerschnitt von 60 mm.

$$\text{Bemessungswert} = e_{144k} \cdot \text{Sicherheitsbeiwert} = 40 \text{ mm} \times 1,5 = 60 \text{ mm}$$

Formel 6: Bemessungswert der Eindringtiefe des Dieseldieselkraftstoffs für Dichtflächen an Tankstellen über den ungerissenen Bauteilquerschnitt

Gleichzeitig ergibt sich ein Bemessungswert für die geschützte Fugenflanke von 40 mm (dies entspricht der charakteristischen Eindringtiefe des Dieseldieselkraftstoffs). Da es sich bei Tankflächen um befahrene Flächen handelt, ist zu beachten, dass übliche befahrene Fugenabdichtungen zulässige Fugenbreiten < 20 mm aufweisen. Wie Jaeger [4] ausführte, resultiert demnach bei „üblichen“ Fugendichtstoffen nur eine geschützte Fugenflanke von 30 mm (1,5-fache Fugenbreite). Ein derartiger Bemessungswert ist unter Verwendung von FD-Betonen nicht zu erreichen (siehe oben).

Um Dichtflächen an Tankstellen aus Sicht der geschützten Fugenflanke regelwerkskonform herstellen zu können, dürfen demnach nicht gleichzeitig „übliche Fugendichtstoffe“ und FD-Betone eingesetzt werden. Regelwerkskonform ist die Ausführung von Dichtflächen an Tankstellen nur möglich, wenn entweder FDE-Betone mit einem erhöhten Eindringwiderstand oder andere Fugenmaterialien/Schaumstoff-Fugenprofile (derzeit maximale Schutztiefe bis 90 mm) mit einer erhöhten Schutztiefe verwendet werden.

Weiterhin stellt sich die Frage, warum der Dichtheitsnachweis i.d.R. unter Verwendung von Dieseldieselkraftstoff und nicht unter Verwendung von Ottokraftstoff erbracht wird.

Anmerkung: Ottokraftstoffe weisen gemäß den Literaturdaten ein $(\sigma/\eta)^{0,5}$ -Verhältnis von 5,61 auf. Somit ist die Eindringtiefe von Ottokraftstoff deutlich größer als die von Dieseldieselkraftstoff ($(\sigma/\eta)^{0,5}$ -Verhältnis von 3,22).

Trotz der deutlich größeren Eindringtiefe des Ottokraftstoffs (Benzin) ist es aus den nachfolgenden Gründen sinnvoll, den Dichtheitsnachweis mit Dieseldieselkraftstoff durchzuführen:

Die Entscheidung für die Verwendung von Dieseldieselkraftstoff beruht darauf, dass Dichtflächen von Tankstellen nicht die Funktion einer Sekundärbarriere im Leckagefall aufweisen müssen. Vielmehr sollen die Dichtflächen verhindern, dass Tropfverluste beim Tanken zu einer Gefährdung des Wassers führen.

Bedeutsam ist in diesem Zusammenhang, dass der Siedebereich von Dieseldieselkraftstoff in Abhängigkeit von der konkreten Zusammensetzung im Einzelfall zwischen

150 °C und 390 °C liegt. Der Siedebereich von Benzin liegt mit 30 °C bis 200 °C deutlich geringer. Wie diese Siedebereiche zeigen, verdunstet das auf die Dichtfläche gelangte Benzin deutlich schneller als der Dieseldieselkraftstoff, sodass die Menge des einwirkenden Ottokraftstoffs aufgrund des deutlich reduzierten Siedepunkts deutlich geringer als beim Dieseldieselkraftstoff ist.

Darüber hinaus ist die Nachweisführung des Ottokraftstoffs ähnlich schwierig wie die von n-Hexan und Dichlormethan. So ist auch die Eindringtiefe des Ottokraftstoffs nur unter Verwendung einer Wärmebildkamera oder einer gasanalytischen Messung nachweisbar (s. Abschnitt 2.4).

1.2 FDE-Betone

Gesonderte Nachweise der charakteristischen Eindringtiefe e_{72k} des Betons sind immer dann erforderlich, wenn zumindest eine der nachfolgenden Bedingungen erfüllt ist:

- Die stoffliche Zusammensetzung des Betons weicht von den Vorgaben an FD-Betone gemäß der BUMwS [2] ab.
- Der Beton wird unter Verwendung von Stahl-, Kunststoff- oder Glasfasern hergestellt.
- Es sollen geringere Eindringtiefen der vor Ort einwirkenden wassergefährdenden Stoffe nachgewiesen werden. Diese Problemstellung liegt häufig dann vor, wenn die verwendeten Fugenmaterialien keine ausreichend tief geschützte Fugenflanke (s. beispielhaft Abschnitt 1.1.2) nachweisen können. In diesem Falle müsste von einer Umläufigkeit des Fugenmaterials im Beaufschlagungsfall ausgegangen werden, so dass kein entsprechender Dichtheitsnachweis möglich wäre.

Liegt einer der genannten Fälle vor, so muss eine geringere charakteristische Eindringtiefe des Betons e_{72k} mittels einer gesonderten Eindringprüfung nachgewiesen werden. Hierfür kommen wiederum zwei Fälle in Frage:

Fall a) Vom Einwirkmedium unabhängiger, allgemeiner Nachweis des Eindringverhaltens in den Beton (Nachweis mit n-Hexan und Dichlormethan) und Berechnung einer neuen Eindringkurve. Erfolgt ein Nachweis nach Fall a, so wird eine völlig neue Grenzlinie der Eindringtiefen ermittelt. Diese ist auf alle Prüflüssigkeiten im Sinne der BUMwS [2] übertragbar.

Fall b) Konkreter Nachweis der charakteristischen Eindringtiefe e_{72k} für den oder die vor Ort vorliegenden, wassergefährdenden Stoffe. Erfolgt ein Nachweis nach Fall b, so gilt diese Prüfung nur für den oder die nachgewiesenen wassergefährdenden Stoffe und ist streng genommen nicht auf andere Einwirkmedien übertragbar.

Die konkrete Vorgehensweise zum prüftechnischen Nachweis der charakteristischen Eindringtiefe e_{72k} ist [5] zu entnehmen.

2 Probleme im Umgang mit der BUMwS [2]

Nachfolgend wird ergänzend über die praktischen Erfahrungen beim Umgang mit den Nachweisverfahren der BUMwS [2] berichtet. Hierbei soll der Schwerpunkt auf der Diskussion von Problemen liegen, die bei der Durchführung der Eindringprüfung auftreten.

2.1 Prüfzeit

Gemäß BUMwS [2] Teil 2 Abschnitt 4.2.2 darf die Bestimmung der Eindringtiefe am Untersuchungsbeleg erst erfolgen, nachdem dieser ausreichend abgetrocknet ist. Die zur Prüfung zu verwendenden Bohrkerne sind nach Abschnitt A.2.2 der BUMwS [2] im Alter von 7 Tagen aus den Laborproben zu entnehmen. Gemäß Ziffer 6 des Abschnitts A.2.2 sind die Bohrkerne anschließend mindestens 56 Tage im Klimaraum bei 20 °C und 65 % relative Feuchte zu lagern. Erst danach darf die Prüfung zum Nachweis der Eindringtiefe e_{tm} beginnen.

Im Ergebnis ist somit festzustellen, dass zum Nachweis einer regelwerkskonformen Eindringtiefe e_{tm} mindestens eine Prüfzeit von neun Wochen erforderlich ist. Schnellere Prüfungen sind nur möglich, wenn die regelwerkskonforme Austrocknungszeit des Betons unterschritten wird. Bei einer geringeren Austrocknungszeit resultieren prüftechnisch bedingt etwas geringere Eindringtiefen, da das Kapillarporensystem in diesem Falle noch mit Wasser gefüllt ist und die Eindringgeschwindigkeit verlangsamt wird.

2.2 Nachweis der Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe

Gemäß Ziffer 3 aus Abschnitt A.2.4 der BUMwS [2] darf der Nachweis der Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe durch eines der nachfolgend genannten Verfahren erfolgen:

- Optischer Nachweis der Eindringtiefe mit bzw. ohne Verwendung eines vorsorglich eingemischten Indikators;
- Gasanalysemessung an den Bruchflächen;
- Besprühen mit Schwefelsäure und anschließendes Abflämmen der frischen Bruchflächen;
- Thermografie. Für den Nachweis der Eindringtiefe von n-Hexan und Dichlormethan wird das thermografische Verfahren von den meisten Prüfstellen favorisiert.

2.2.1 Verfahren 1

Das rein optische Verfahren hat sich nicht bewährt. So haben Untersuchungen selbst unter Verwendung von Mineralölen gezeigt, dass die optisch erkennbare Eindringtiefe nicht immer mit der mit Schwefelsäure nachweisbaren Eindringtiefe (s. Verfahren 3) übereinstimmt. Das rein optische Verfahren liefert wie die Beispiele aus Bild 3 zeigen i.d.R. zu geringe Eindringtiefen.

Auch das „Indikatorverfahren“ liefert normalerweise keine sachgerechten Eindringtiefen. Dies ist darauf zurück zu führen, dass die zugesetzten Indikatoren üb-

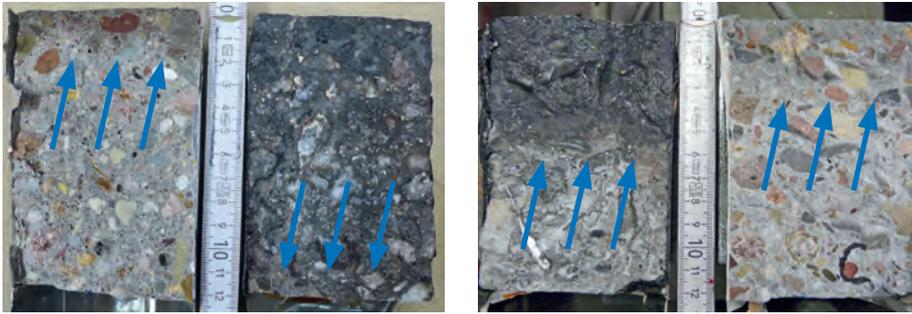


Bild 3: Optisch erkennbare Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe (im Bild ganz links und ganz rechts) im Vergleich zum Besprühen mit Schwefelsäure und dem anschließenden Abflämmen (Bilder in der Mitte)

licherweise nicht die tatsächliche Eindringtiefe des wassergefährdenden Stoffes abbilden. So verteilen sich Indikatoren im Rahmen einer Gleichgewichtsreaktion zwischen dem wassergefährdenden Stoff (Laufmittel) und dem Beton, sodass die Eindringgeschwindigkeit des Indikators erwartungsgemäß geringer als die des wassergefährdenden Stoffes ist.

2.2.2 Verfahren 2

Gasanalytische Messungen stellen grundsätzlich eine gut geeignete Methode dar, allerdings erscheint nur die Messung an der Unterseite (nicht an der Bruchfläche) der Probe sachgerecht durchführbar. Bei dieser Prüfmethode muss die Messung über den gesamten Prüfzeitraum erfolgen, bis der wassergefährdende Stoff an der Unterseite der Probe ankommt. Erst dann kann die Prüfung abgebrochen werden. Alternativ ist es auch denkbar, die Messung bis zum Erreichen des jeweiligen Sollwerts durchzuführen und dann abzubrechen.

Das Problem dieses Verfahrens besteht in den ausgesprochen hohen Prüfkosten. Diese hohen Prüfkosten sind darin begründet, dass der Prüfraum unter jedem Prüfkörper der Prüferie zum Nachweis der Eindringtiefe über die gesamte Messzeit an einen Headspace-Gaschromatographen angeschlossen sein muss. In dieser Zeit können keine anderen Messungen mit diesem Gerät erfolgen. Aufgrund dieser extrem hohen Kosten erscheint dieses Verfahren in der Praxis kaum anwendbar.

2.2.3 Verfahren 3

Das Besprühen der frischen Bruchflächen mit Schwefelsäure und das anschließende Abflämmen stellt ein sehr gutes Verfahren zum Nachweis der Eindringtiefe schwer flüchtiger und oxidierbarer wassergefährdender Stoffe dar. Bei nicht oxidierbaren und leicht flüchtigen wassergefährdenden Stoffen (z.B. n-Hexan und Dichlormethan) ist diese Methode aber nicht anwendbar, da diese Stoffe nicht durch die Schwefelsäure oxidierbar sind.

2.2.4 Verfahren 4

Die Thermografie stellt zumindest theoretisch ein gut anwendbares Verfahren zum Nachweis der Eindringtiefe leicht flüchtiger wassergefährdender Stoffe dar. Bei diesem

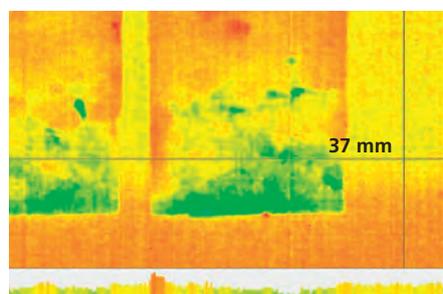
Verfahren wird die Verdunstungskälte der flüchtigen Stoffe zum Nachweis der Eindringtiefe genutzt, die mit der Wärmebildkamera sichtbar gemacht wird.

Das Hauptproblem dieser Methode besteht in der begrenzten Genauigkeit und Reproduzierbarkeit dieses Verfahrens. So zeigt das nachfolgende Beispiel exemplarisch die bei der Prüfung eines wassergefährdenden Stoffes an einem Untersuchungsbeeton ermittelten Eindringtiefen (Bild 4). Die dargestellten Unterschiede in den Eindringtiefen (Farbübergänge in den Bildern) resultieren dabei ausschließlich aus der Einstellung anderer Temperaturgrenzen bei der Auswertung der Wärmebilddaten und sind demnach allein prüftechnisch begründet.

Da der „richtige“ Temperaturübergang in der BUMwS [2] nicht festgelegt ist, bleibt die Aufgabe der „Auswahl“ der Temperaturgrenzen im Rahmen der Bestimmung der Eindringtiefe der Prüfstelle bzw. dem Sachverständigen überlassen. In Abhängigkeit von der Festlegung der Temperaturgrenzen bei der optischen Auswertung der Wärmebilder resultiert für die dargestellte Prüfung einmal eine Eindringtiefe von 37 mm (im Bild links) und einmal eine Eindringtiefe von 13 mm (im Bild rechts). Welches dieser Bilder liefert nun die „korrekte“ Eindringtiefe?

2.3 Prüfung eines FD-Referenzbetons

Nach Teil 2 Abschnitt 3.1.2 Ziffer 4 der BUMwS [2] müssen FDE-Betone im Rahmen der FDE-Prüfung eine Eindringtiefe des wassergefährdenden Stoffes nachweisen, die nicht größer als die des FD-Betons ist.



Gemäß Absatz 4 des Abschnitts 4.2.2 kann die Eindringtiefe des FD-Betons ohne Prüfung näherungsweise dem Bild 2.1 der BUMwS [2] entnommen werden. Abweichend hierzu wird in Absatz 6 des Abschnitts 4.2.2 der BUMwS [2] gefordert, dass bei der Prüfung eines FDE-Betons ein „Parallelversuch“ mit einem FD-Referenzbeton durchzuführen ist.

Was gilt aber nun? Darf die Eindringtiefe des FD-Betons ohne Prüfung dem Bild 2.1 der BUMwS [2] entnommen werden, oder muss ein „Parallelversuch“ mit einem FD-Referenzbeton durchgeführt werden? Wird ein „Parallelversuch“ durchgeführt, dann muss der FD-Referenzbeton die nachfolgend dargestellten Anforderungen an die Betonzusammensetzung erfüllen:

- 320 kg/m³ eines CEM I 32,5 R oder eines CEM III/A 32,5
- Kiessand des Sieblinienbereichs A/B 16 mit einer dichten Kornstruktur und einem ausreichenden Mehlkorngelbalt von 350 kg/m³;
- w/z-Wert = 0,50;
- Betonverflüssiger oder Fließmittel zur Einstellung der Zielkonsistenz F3. Das Ausbreitmaß des Betons sollte im Prüfalter von 10 min bei ca. 450 mm liegen.

Reichen diese Vorgaben an die Betonzusammensetzung eines FD-Betons aus, um einen Beton mit einer definierten und reproduzierbaren charakteristischen Eindringtiefe e_{tk} herzustellen? In der Praxis hat sich gezeigt, dass unterschiedliche Eindringtiefen resultieren, wenn die Zusammensetzung des FD-Betons (unterschiedliche Zemente, Gesteinskörnungsarten und Sieblinien) unter Einhaltung der oben genannten Vorgaben variiert wird. Das bedeutet, dass allein die Variation der Betonzusammensetzung des FD-Betons einen Einfluss auf die Eindringtiefe des Referenzbetons und damit auch auf die Anforderungen an den Untersuchungsbeeton (geringere oder gleiche Eindringtiefe bezogen auf den FD-Referenzbeton) hat.

Aus dieser Feststellung ergeben sich die nachfolgend aufgeführten Folgefragen:

- Wie ist damit umzugehen, wenn die am FD-Referenzbeton im Parallelversuch ermittelte mittlere Eindringtiefe e_{72m} deutlich geringer als die dem Bild 1 zu entnehmende mittlere Eindringtiefe ist? In diesem Fall wäre der FD-Referenzbeton deutlich besser, als es die BUMwS

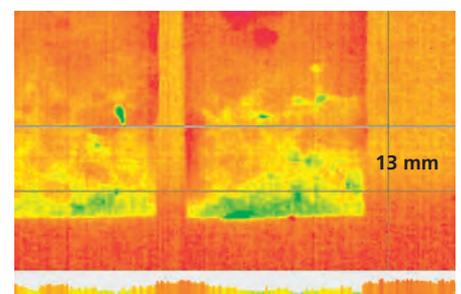


Bild 4: Aufgrund der Veränderung der Temperaturgrenzen bei der Auswertung der Wärmebilddaten ergibt sich eine variierende Eindringtiefe eines wassergefährdenden Stoffes (Farbübergang in den Aufnahmen)

[2] (s. Bild 1) fordert. Die Anforderung an den FDE-Untersuchungsbeton wäre bei Bezugnahme auf die Eindringtiefe des FD-Referenzbetons somit allein aufgrund des hohen Eindringwiderstands des konkret zum Einsatz gekommenen Rezeptbetons deutlich höher.

- Wie ist damit umzugehen, wenn für den FDE-Untersuchungsbeton eine mittlere Eindringtiefe e_{72m} ermittelt wird, die zwar geringer als die aus Bild 1 der BUMwS [2] zu entnehmende, aber gleichzeitig größer als die des FD-Referenzbetons ist? Hätte der FDE-Untersuchungsbeton nun bestanden (besser als die Grenzlinie aus Bild 1 der BUMwS) oder wäre er durchgefallen (schlechter als der FD-Referenzbeton)?
- Ebenso problematisch ist der Fall, wenn die ermittelte mittlere Eindringtiefe e_{cm} des FD-Referenzbetons im Parallelversuch deutlich größer als die aus Bild 1 zu entnehmende mittlere Eindringtiefe ist? In diesem Fall würde der FD-Referenzbeton selbst die Anforderung an die Eindringtiefe der BUMwS [2] (s. Bild 1) nicht erfüllen.

Wie diese Ausführungen zeigen, beeinflusst allein die Qualität des FD-Referenzbetons die Bewertung der Eindringtiefe des FDE-Untersuchungsbetons. Ist es tatsächlich sinnvoll, dass der konkrete Eindringwiderstand des FD-Referenzbetons (unter Einhaltung der Vorgaben an die Betonzusammensetzung von FD-Betonen) einen Einfluss auf die Bewertung des zu untersuchenden FDE-Betons hat?

Anmerkung: In Anhang B, Ziffer zu 4.2.2 der BUMwS [2] wird erläutert, warum diese Vorgehensweise im Rahmen der Erarbeitung der BUMwS [2] gewählt wurde. Allerdings bleibt das Problem bestehen, dass unterschiedliche FD-Betone (auch unter Einhaltung der oben genannten Vorgaben an die Betonzusammensetzung) deutlich unterschiedliche Eindringtiefen aufweisen können. Somit wird die Bewertung der ermittelten Eindringtiefe eines FDE-Betons in Abhängigkeit von der konkreten Betonzusammensetzung des FD-Referenzbetons variieren.

Aus Sicht der Autoren erscheint es deutlich sinnvoller, die für die Prüflüssigkeit am FDE-Beton ermittelte mittlere Eindringtiefe e_{72m} mit den Werten der Eindringtiefe der Prüflüssigkeit aus Bild 2.1 der BUMwS [2] zu vergleichen.

2.4 Nachweis der Eindringtiefe von n-Hexan und Dichlormethan

Der Nachweis der Eindringtiefe von n-Hexan und Dichlormethan ist mit dem Verfahren 1 (optischer Nachweis) und dem Verfahren 3 (Schwefelsäure) aus Abschnitt 2.2 aus den dort genannten Gründen nicht sachgerecht zu erbringen.

Das Verfahren 4 (Thermografie) erscheint zwar sachgerecht, allerdings können die ermittelten Eindringtiefen bei den jeweiligen Versuchen in Abhängigkeit von den im Einzelfall eingestellten Temperaturgrenzen

der Wärmebildaufnahmen deutlich variieren (s. Abschnitt 2.2). Aus diesem Grunde liefert auch die Anwendung des Verfahrens 4 Ergebnisse, die nur eine geringe Reproduzierbarkeit aufweisen.

Einzig bei Verfahren 2 (gasanalytische Messung allerdings an der Probenunterseite) ist aus technischer Sicht bei den in der BUMwS [2] genannten Referenzflüssigkeiten (n-Hexan und Dichlormethan) davon auszugehen, dass sich ausreichend reproduzierbare und realitätsnahe Ergebnisse einstellen. Aus Kostengründen ist dieses Verfahren aber kaum praktikabel.

Bei der Untersuchung der Eindringtiefe von Dichlormethan stellt darüber hinaus auch die Auswahl des Klebers zur Abdichtung der Prüfkörper ein wesentliches Problem dar. So handelt es sich bei Dichlormethan um ein Lösungsmittel, das die meisten Kleber auflöst (Bild 5). Hausinterne Versuche haben gezeigt, dass auch Kleber, die seitens der Materiallieferanten als „beständig“ gegenüber Dichlormethan deklariert werden, über die gewählte Prüfzeit nur eine begrenzte Beständigkeit aufwiesen. So wurden auch diese Kleber bei längeren Einwirkzeiten teilweise angelöst, sodass die Prüfkörper „undicht“ wurden und das Dichlormethan aus den Mantelflächen seitlich austrat.

Um dieses Problem zu lösen, war bei der Verwendung von Dichlormethan als Prüflüssigkeit eine Anpassung des Verfahrens der Prüfkörperherstellung erforderlich. Zur Lösung des Problems der Undichtheit werden die Prüfkörper in der MPVA Neuwied GmbH in ein Rohr gestellt und der Spalt zwischen dem Prüfkörper und dem Rohr vollständig mit dem Kleber vergossen. Der Kleber ist zwar auch bei diesem Aufbau nicht vollständig beständig, doch führt die große Schichtdicke des Klebers in Verbindung mit der „Einspannung im Rohr“ dazu, dass die Prüfkörper im Rahmen der Beaufschlagungszeit üblicherweise dicht bleiben.



Bild 5: Auflösen des Klebers durch längere Einwirkung von Dichlormethan

2.5 Bestimmung der Eindringtiefe von AdBlue

In der jüngeren Vergangenheit häuften sich die Anfragen zum Nachweis der Eindringtiefe von AdBlue in die zu verwendenden Betone. Gemäß den vorliegenden Literaturstellen weist AdBlue, ein Produkt zur Abgasnachbehandlung bei Dieselmotoren, die nachfolgenden Kenndaten auf:

σ = Oberflächenspannung = 65 mN/m und
 η = dynamische Viskosität = 1,4 mPa s.

Hieraus ergibt sich ein $(\sigma/\eta)^{0,5}$ -Verhältnis von 6,8.

Das Problem bei der Bestimmung der charakteristischen Eindringtiefe von AdBlue in Beton besteht darin, dass AdBlue als Hauptwirkstoff Harnstoff enthält. Harnstoff ist aber nur bei mittleren pH-Werten stabil. Sowohl bei geringen als auch bei hohen pH-Werten zersetzt sich Harnstoff unter Bildung von Ammoniak und Kohlendioxid.

Das bedeutet, dass Harnstoff bei den hohen pH-Werten des Betons (pH-Wert über 12) nicht beständig ist und sich zersetzt. Aus diesem Grunde kann Harnstoff in einen nicht carbonatisierten Beton auch nicht eindringen, was zur Folge hat, dass die Eindringtiefe von AdBlue in nicht carbonatisierte Betone prüftechnisch nicht zu bestimmen ist. Ein entsprechender Nachweis wäre nur an carbonatisierten Betonen (diese weisen deutlich geringere pH-Werte auf) denkbar.

2.6 Nachweis der Eindringtiefe bei Stahlfaserbetonen

Das Problem bei der Bestimmung der Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe in Stahlfaserbetone besteht darin, dass sich Bohrkerne aus Stahlfaserbeton nicht schnell spalten lassen. Gemäß der BUMwS [2] sind die Probekörper aus diesem Grunde auf eine Dicke von 50 mm abzulängen und an der

Probekörperunterseite mit einer Glasscheibe zu versehen (s. beispielhaft in Bild 6 für eine Eindringprüfung im Rahmen einer Zulassung).

Bei dieser Prüfung ist die Beaufschlagung so lange fortzusetzen, bis der wassergefährdende Stoff an der Unterseite des Prüfkörpers austritt, jedoch maximal 168 Stunden. Bei dieser Prüfung wird die Eindringtiefe dann aus der Durchdringungszeit des wassergefährdenden Stoffes berechnet:

$$e_{72l} = h_l \times \sqrt{\frac{72}{t_l}}$$

Guter Beton



Bild 6: Penetrationsprüfung an Stahlfaserbetonen

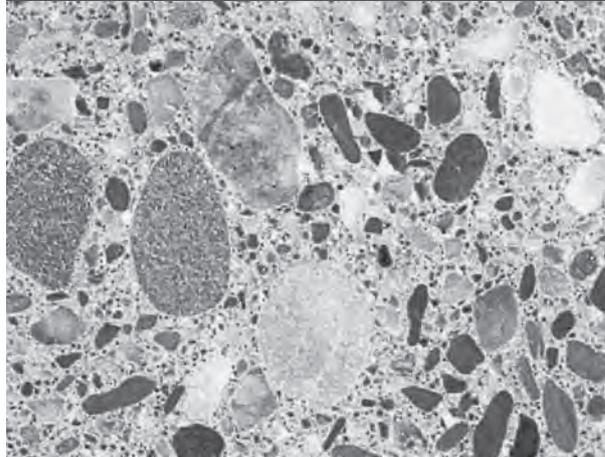
3 Zusammenfassung und Ausblick

Der zweite Teil der Artikelserie beschäftigte sich mit der Ermittlung der mittleren und charakteristischen Eindringtiefe von FD-Betonen (flüssigkeitsdichten Betonen ohne Eindringprüfung). Hierbei wurde detailliert auf die Anforderungen an den „ungerissenen Bauteilquerschnitt“ und die „zusätzliche Fugenflanke“ sowie auf die sich hieraus ableitenden „Bemessungswerte der Eindringtiefe“ eingegangen. Abschließend wurde detailliert auf die Probleme bei der Durchführung der Eindringprüfung an Betonen zum Nachweis der Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe (FDE-Prüfung) eingegangen.

Im dritten Teil der Artikelserie (s. **beton** 3/2021) wird erläutert werden, wie die Eindringtiefe ölartiger Bestandteile im Rahmen der Nutzungszeit ermittelt werden kann. Abschließend wird ausgeführt, was beim Nachweis der Eindringtiefe wassergefährdender Stoffe an Bauwerksproben zu beachten ist.

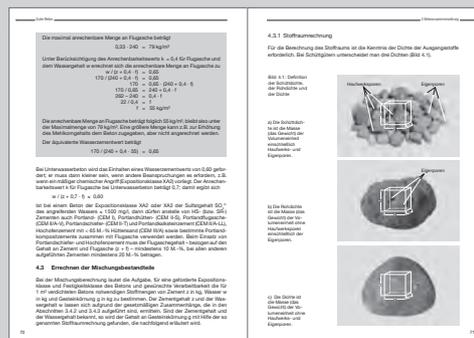
Literatur

- [1] Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV). Bundesgesetzblatt, Fassung vom 18. April 2017
- [2] DAfStb-Richtlinie „Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“ (BumwS), Ausgabe 2011
- [3] Kluge, U.: Zulassungskriterien für Abdichtungssysteme. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin
- [4] Jaeger, E.: FD-Beton – Eine Einführung (noch unveröffentlicht), SGD Nord
- [5] Voß, K-U.; Berresheim, W.: Anforderungen an Dichtflächen als Sekundärbarrieren in Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen. *beton* 58 (2008) H. 1+2, S.24-33



edition beton

25. überarb. Auflage!



Das Kompendium „Guter Beton“ bewährt sich seit Jahrzehnten als besonders wichtige und aktuelle Arbeitshilfe. Die starke Nachfrage machte eine Neuauflage erforderlich, die gleichzeitig zu einer Überarbeitung führte. Berücksichtigung fanden dabei die Änderungen der Betonnormen und die der tangierenden Normen für die Ausgangsstoffe.

Das Buch vermittelt auch in seiner 25. Auflage den aktuellen Erkenntnisstand für die Herstellung, Verarbeitung und Prüfung des Betons und gibt wertvolle Hinweise für die tägliche Betonbaupraxis. Die Ausführungen werden durch 22 Beispiele vertieft. Dargestellt werden die stofflichen Grundlagen für Beton und seine Ausgangsstoffe unter Berücksichtigung der Anforderungen der Regelwerke.

„Guter Beton“ dient einerseits als aktuelles Lehrbuch an Universitäten, Technischen Hochschulen, Fachhochschulen und berufsbildenden Einrichtungen und ist andererseits ein leicht verständliches Nachschlagewerk für den Gebrauch im Ingenieurbüro, im Transportbeton- und Betonfertigteilwerk sowie auf der Baustelle.

Aus dem Inhalt:

Begriffsbestimmungen / Ausgangsstoffe des Betons: Zement, Gesteinskörnungen, Zugabewasser, Betonzusätze / Eigenschaften des Betons: Eigenschaften des Frischbetons, Eigenschaften des Festbetons, Formänderungen von Beton, Einflüsse auf Eigenschaften des Betons / Betonzusammensetzung: Standardbeton, Beton nach Eigenschaften, Errechnen der Mischungsbestandteile / Herstellen des Betons: Bereiten des Betons, Transportieren und Verarbeiten des Betons, Nachbehandeln, Schalung, Betondeckung der Bewehrung / Qualitätssicherung: Produktionskontrolle beim Betonhersteller, Überwachungsprüfungen durch das Bauunternehmen / Prüfungen: Zement, Prüfen der Gesteinskörnungen, Prüfen des Betons / Schrifttum, Normen, Richtlinien, Merkblätter

Weber
Guter Beton
Ratschläge für die richtige Betonherstellung

128 S., 14,8 x 21 cm,
33 Abb., 46 Taf., kart.
€ 29,80

ISBN 978-3-7640-0631-0