

**Baustoffrelevante Eingangsgrößen für die Bemessung von Betonfahrbahnen**

FA 4.189/1

Forschungsstellen: Technische Universität Dresden, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau / Barg Baustoffprüflabor Berlin

Bearbeiter: Wellner, F. / Schubert, S.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: August 2005

höhe und -durchmesser), -lagerung und Lasteinleitung auf die Spaltzugfestigkeit zu untersuchen. Weiterhin wurden Zusammenhänge zur Druck- und Zugfestigkeit ermittelt. Auf Grundlage von Dauerbelastungsversuchen waren offene Fragen zur Ermüdungsfestigkeit zu klären.

Im europäischen Normenwerk werden für unbewehrte Konstruktionen des Betonbaus bei der künftig generell anzuwendenden Berechnung nach Grenzzuständen nicht mehr Biegezugfestigkeiten in das aufnehmbare Biegemoment eingeführt, sondern reine Zugfestigkeiten, ermittelt anhand der Spaltzugfestigkeit.

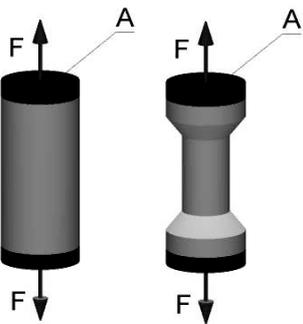
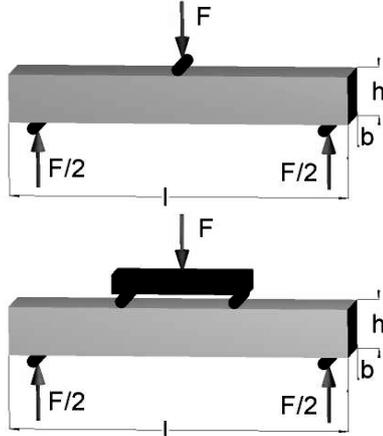
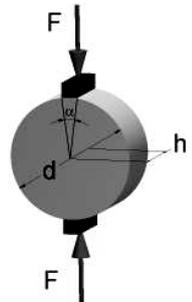
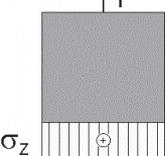
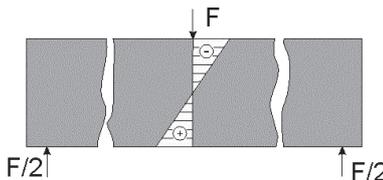
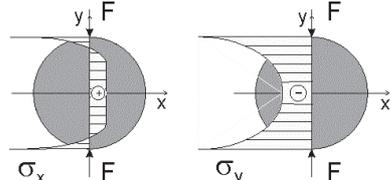
**1. Einführung**

Ziel der Arbeit war es, für die rechnerische Bemessung von Betondecken gesicherte Grundlagen bezüglich der baustoffrelevanten Eingangsgrößen zu erarbeiten, mit denen eine beanspruchungsgerechte Dickenbemessung möglich wird. Am Lehrstuhl Straßenbau der Technischen Universität Dresden wurden dazu Druck-, Zug und Spaltzugversuche an Prüfkörpern (Bohrkerne und Laborprobekörper) aus Straßenbeton mit dem Ziel durchgeführt, anhand von 10 Versuchsreihen an normal- und hochfestem Beton, den Einfluss von Prüfkörperform (Zylinder-

**2. Methoden zur Ermittlung der Zugfestigkeit eines Baustoffes**

Beim einachsigen Zugversuch wird ein zylindrischer Prüfkörper zwischen zwei Lasteinleitungsplatten geklebt und senkrecht zur Klebefuge belastet. In der Mitte des Prüfkörpers bildet sich ein gleichmäßiger Spannungsverlauf aus.

Tabelle 1: Methoden zur Ermittlung der Zugfestigkeit eines Baustoffes

Einachsiger Zugversuch	Biegezugversuch	Spaltzugversuch
		
<p>⊕ Zugspannung</p> 	 <p>⊕ Zugspannung ⊖ Druckspannung</p>	 <p>⊕ Zugspannung ⊖ Druckspannung</p>
	$f_{ct,bz} = \frac{M}{W}$	$f_{ct,sz} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot h}$

Eine Alternative dazu ist der Biegezugversuch unter 3-Punkt- oder 4-Punkt-Belastung. Dabei ist die 4-Punkt-Biegung günstiger, da sich in der Zugzone zwischen den Lasteinleitungspunkten ein Bereich gleicher Spannung einstellt.

Beim Spaltzugversuch wird ein waagrecht liegender zylindrischer Prüfkörper durch zwei sich diametral gegenüber liegende Belastungskomponenten auf der Mantelfläche belastet. In Richtung der Lasteintragung wird im Prüfkörper eine Druckspannung erzeugt, die senkrecht dazu eine Zugspannung und eine Querverformung hervorruft. Bei Betrachtung des Prüfkörpers als Kreisscheibe und unter der Voraussetzung einer homogenen Spannungsverteilung entsteht dabei ein zweiachsiger Spannungszustand (Tabelle 1).

Da eine einwandfreie versuchstechnische Durchführung des reinen Zugversuches problematisch ist und die Ermittlung der Biegezugfestigkeit von Straßenbeton ohne großen Aufwand nur bei der Prüfung von Laborprobekörpern sinnvoll ist, werden Prüfverfahren an Zylindern bevorzugt. Die für den Spaltzugversuch erforderlichen Prüfkörper lassen sich problemlos durch die Herstellung im Labor oder aus Bohrkernen gewinnen.

### 3. Versuchsplanung

Es waren unterschiedliche Betonzusammensetzungen zu untersuchen. In Tabelle 2 sind alle 10 Versuchsreihen sowie eine zusätzliche Mischung aus Sandbeton zusammengestellt. Für jede Versuchsreihe wurden verschiedene Versuchsserien mit unterschiedlichen Prüfbedingungen untersucht. Dabei wurde jeweils ein Parameter variiert. Das waren neben der Prüfung von zwei Prüfkörperdurchmessern (100 mm, 150 mm) und fünf Prüfkörperhöhen (40 mm, 50 mm, 65 mm, 200 mm, 300 mm) auch die Untersuchung des Einflusses von trockener und nasser Lagerung sowie verschiedener Möglichkeiten des Einflusses der Lasteinleitung auf die Spaltzugfestigkeit. Die Belastung erfolgte mit ebenen, 10 mm breiten Schienen nach [2] bei ungeschliffener und geschliffener Prüfkörperoberfläche im Lasteinleitungsbereich sowie konkav, entsprechend dem Nenndurchmesser des Prüfkörpers gekrümmten Lasteinleitungsschienen.

Die Versuche zur Bestimmung der Ermüdungskurve wurden mit den Standardprüfbedingungen ( $d \times h = 100 \times 50$  mm) bei einer Belastungsfrequenz von 10 Hz und einer Unterspannung von 5 % der statischen Bruchlast durchgeführt.

Tabelle 2: Übersicht über Versuchsbedingungen, zeitliche Abfolge

Versuchsreihe	Geplante Betonklasse/Größtkorn	Zentrier-vorrichtung	Bohrkern/Laborprobe-körper	E-Modul-Bestimmung	Gesamter Unter-suchungs-zeitraum
1	C30/37 / 22 mm	mit	Bohrkern	ohne	Aug. 03 – Nov. 03
2	C30/37 / 22 mm	mit	Bohrkern	ohne	Aug. 03 – Nov. 03
3	C30/37 / 32 mm	ohne	Bohrkern	mit	Jan. 03 – Jun. 03
4	C30/37 / 22 mm	mit	Bohrkern	mit	Feb. 04 – Apr. 04
5	C55/67 / 22 mm	mit	Bohrkern	ohne	Feb. 04 – Apr. 04
6	C30/37 / 32 mm	ohne	Laborprobe-körper	mit	Jan. 03 – Jun. 03
7	C30/37 / 22 mm	mit	Laborprobe-körper	mit	Jan. 04 – Apr. 04

Versuchsreihe	Geplante Betonklasse/Größtkorn	Zentrier-vorrichtung	Bohrkern/Laborprobe-körper	E-Modul-Bestimmung	Gesamter Unter-suchungs-zeitraum
8	C30/37 / 22 mm	mit	Laborprobe-körper	ohne	Apr. 04 – Juni 04
9	C55/67 / 22 mm	mit	Laborprobe-körper	ohne	Aug. 04 – Sept. 04
10	C55/67 / 22 mm	mit	Laborprobe-körper	ohne	Aug. 04 – Sept. 04
Sand	C30/37 / 2 mm	mit	Laborprobe-körper	ohne	Sep. 03 – Nov. 03

Für den Druckversuch wurden die Prüfkörperabmessungen entsprechend [2]DIN 1048-5] auf  $d \times 2h$  festgelegt. Es wurden beide Prüfkörperdurchmesser untersucht. Die Zylinder wurden zwischen zwei parallelen Druckplatten bis zum Bruch belastet. Aufgrund der unterschiedlichen Deckendicken der Entnahmestellen konnten nicht für alle Prüfzylinder die vorgegebenen Abmessungen eingehalten werden. Deshalb wurde neben der Zylinderfestigkeit auch die Würfeldruckfestigkeit, errechnet aus der Zylinderdruckfestigkeit, ermittelt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen.

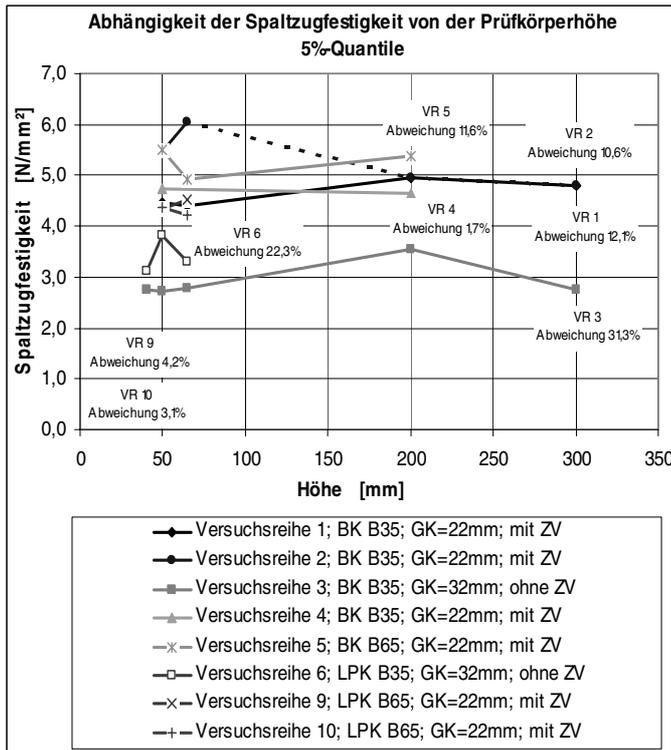
Für die Zugversuche wurden für beide Prüfkörperdurchmesser i. d. R. 30 cm lange Prüfkörper verwendet, jedoch waren einige Bohrkern aufgrund der Randbedingungen (Plattendicke) ebenfalls entsprechend kürzer.

Der Prüfkörper wurde an den Stirnflächen auf Stahlplatten geklebt, welche über einen Gewindestab mit einer Kalotte verbunden waren. Diese sorgt für eine freie Verdrehung, sodass die gleichmäßige Lasteinleitung gewährleistet war. Die Einspannung des Prüfkörpers muss genau erfolgen, um Außermittigkeiten bei der Lasteinleitung zu vermeiden.

### 4. Untersuchung der Prüfbedingungen

Die Streuungen der Versuchsergebnisse, besonders bei den ersten Prüfungen, sind z. T. beträchtlich. Daraus ergaben sich Probleme bei der Auswertung, bei welcher die Auswirkungen der einzelnen Parameter untersucht werden sollte. Um die Streuungen der Ergebnisse der einzelnen Versuchsserien zu verringern, wurde deshalb eine Elimination der Ausreißer auf Basis des Jackknife-Verfahrens durchgeführt [8]. Für die Auswertung wurden die 5 %-Quantile der bereinigten Versuchsreihen verwendet. Nach der Prüfung der Versuchsreihen 3 und 6 wurde der Belastungseinrichtung für den Spaltzugversuch eine Zentriervorrichtung hinzugefügt, welche für alle folgenden Versuchsreihen verwendet wurde. Die Streuungen konnten damit verringert werden.

Bei den Untersuchungen zur Abhängigkeit der Spaltzugfestigkeit von der Prüfkörperhöhe wurde nur ein geringer Einfluss dieser festgestellt. Bei zweilagigen Betonfahrbahnen kann jedoch bei Prüfkörpern, welche länger als die jeweilige Lagendicke sind, ein Problem bei der eindeutigen Bestimmung der Spaltzugfestigkeit auftreten. Im vorliegenden Fall war die obere Lage der Platte, aus welcher die Bohrkern für die Versuchsreihen 1 und 2 gewonnen wurden, schlechter verdichtet als die untere. Die Prüfkörper für die beiden Versuchsreihen wurden deshalb aus jeweils ein und demselben Bohrkern hergestellt, für die Versuchsreihe 1 jedoch aus der oberen, für die Versuchsreihe 2 aus der unteren Lage.

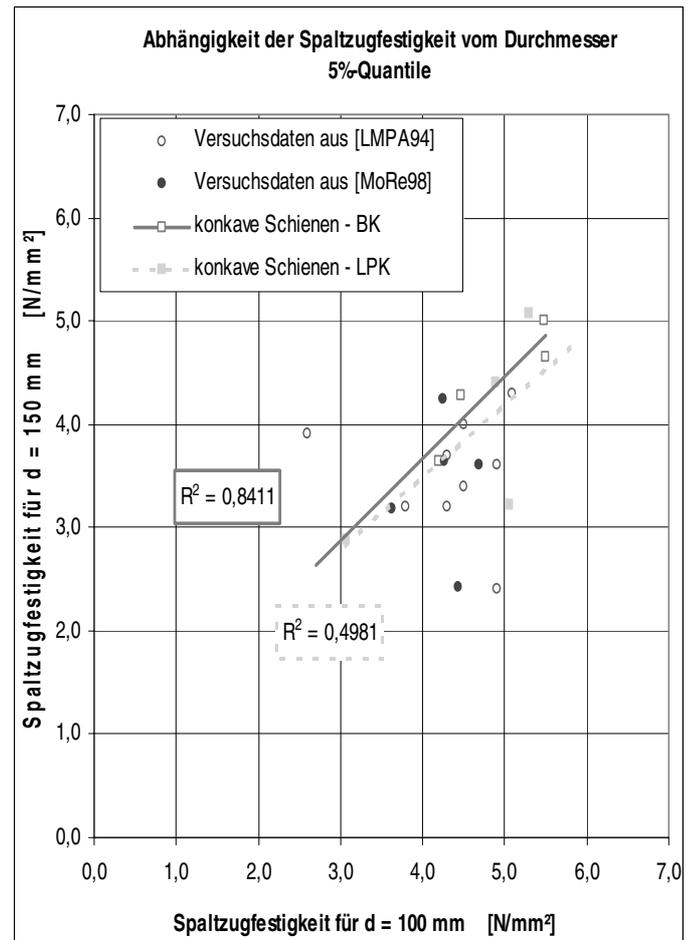


**Bild 1: Abhängigkeit der Spaltzugfestigkeit von der Prüfkörperhöhe (5 %-Quantil)**

Die Ergebnisse der beiden Versuchsreihen unterscheiden sich deutlich (Bild 1). Die weiterhin getesteten Prüfkörper mit einer Länge von 200 mm und 300 mm beinhalten notwendigerweise beide Lagen. Da sich bei den Prüfkörpern der beiden Lagen mit unterschiedlicher Betonqualität deutliche Differenzen in den Festigkeiten zeigten, ist somit die an den langen Prüfkörpern ermittelte Spaltzugfestigkeit kritisch im Zuge der weiteren Auswertung zu betrachten. Da jedoch i. d. R. bei einem Bruch das schwächste Element zuerst versagt, ist anzunehmen, dass die an diesen Prüfkörpern ermittelten Spaltzugfestigkeiten annähernd den Werten der Versuchsreihe 1 entsprechen und deshalb diesen zuzuordnen sind.

Bei der Belastung des Prüfkörpers entstehen an den Lasteinleitungsstellen auf der Mantelfläche des Prüfkörpers sehr große Druckspannungen. Ein Überschreiten der Druckfestigkeit des Betons könnte demnach das maßgebende Versagenskriterium sein (Bild 8). Zur Verringerung der Druckspannungen an den Lasteinleitungsstellen wurde die Last über Lasteinleitungsschienen gleichmäßig in den Prüfkörper eingeleitet. Um Unebenheiten des Prüfkörpers, welche Spannungsspitzen hervorrufen können, auszugleichen, wurde ein Filzstreifen zwischen Lasteinleitungsschienen und Prüfkörper gelegt.

Mit konkaven Lasteinleitungsschienen wurden höhere Spaltzugfestigkeiten und die geringsten Streuungen ermittelt. Bei den Versuchsserien mit  $d = 100$  mm liegen die Variationskoeffizienten, ermittelt für die Spaltzugfestigkeit, für die Lasteinleitung nach [2] DIN 1048-5 mit ungeschliffener Lasteinleitungsfläche am Prüfkörper in der gleichen Größenordnung wie bei den konkaven Schienen. Die geschliffenen Prüfkörper erzielten bezüglich der Streuungen deutlich schlechtere Ergebnisse.



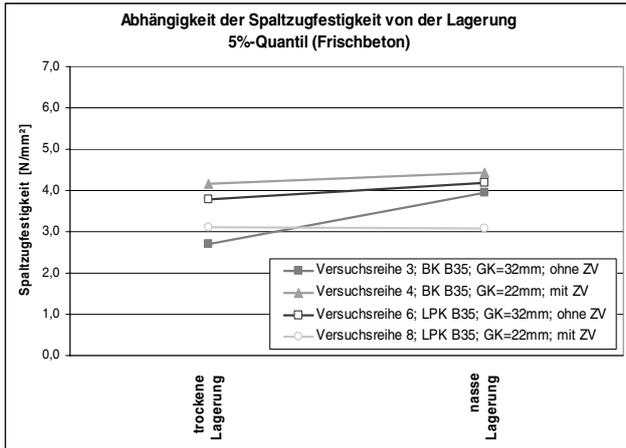
**Bild 2: Lineare Abhängigkeit der Spaltzugfestigkeit von Prüfkörpern mit unterschiedlichem Durchmesser (5 %-Quantil), ohne VR 3 + 6**

Unabhängig vom Größtkorn des Zuschlages nimmt die Spaltzugfestigkeit bei gleichen Versuchsreihen mit zunehmendem Prüfkörperdurchmesser ab. Dies zeigten auch die in [4] und [5] ausgewerteten Versuche (Bild 2).

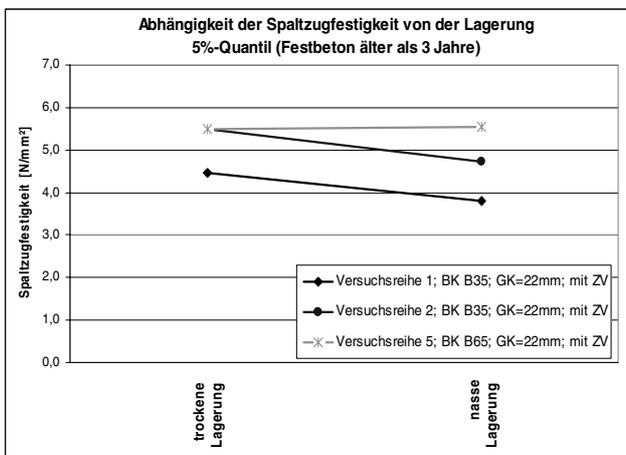
Werden für die Spaltzugfestigkeiten, welche aus Versuchen mit konkaven Schienen resultieren, je nach Herkunft der Prüfkörper (Labor, Bohrkern) getrennt die Regressionsfunktionen aufgestellt (Bild 2), und werden die für diese beiden Funktionen bei jeweils gleicher Variablen (Spaltzugfestigkeit für  $d = 100$  mm) ermittelten Funktionswerte (Spaltzugfestigkeit für  $d = 150$  mm) dividiert, ergibt sich ein mittlerer Quotient von 1,07.

Die Versuchsreihen 1 und 2 an Bohrkernen mit einem Alter von mehr als 3 Jahren zeigen erwartungsgemäß nach nasser Lagerung eine ca. 15 % geringere Festigkeit als bei trockener Lagerung. Dabei verlaufen die ermittelten Geraden parallel (Bild 3b).

Dagegen sind für die Versuchsreihen 3, 4 und 6 die Spaltzugfestigkeiten nach nasser Lagerung größer als bei trockener. Dies ist auf eine Nacherhärtung des Betons zurückzuführen, da die Lagerung im Wasser sofort nach der Herstellung erfolgte (Bild 3a).



a)



b)

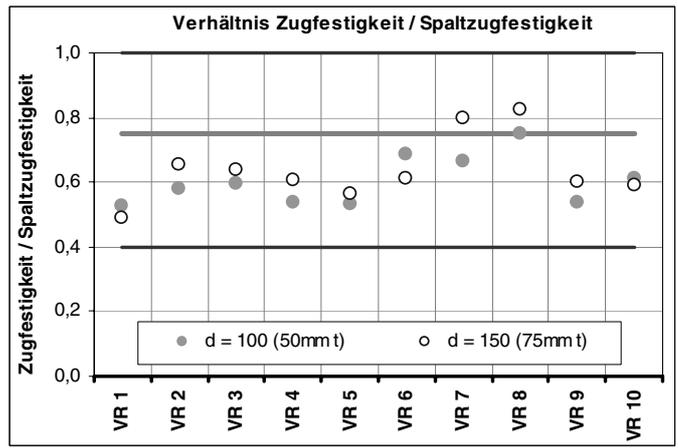
**Bild 3: Abhängigkeit der Spaltzugfestigkeit von der Lagerung (5%-Quantil), a) junger Beton, b) Festbeton älter als 3 Jahre**

**5. Versuchsauswertung**

Für die Bestimmung der reinen Zugfestigkeit bei den Versuchsreihen 1 und 2 mussten Prüfkörper verwendet werden, welche beide Lagen der Betonplatte enthielten, aus welcher die Bohrkern entnommen wurden. Wegen der unterschiedlichen Qualität der Lagen war eine eindeutige Zuordnung der an diesen Prüfkörpern bestimmten Festigkeiten zunächst nicht eindeutig möglich.

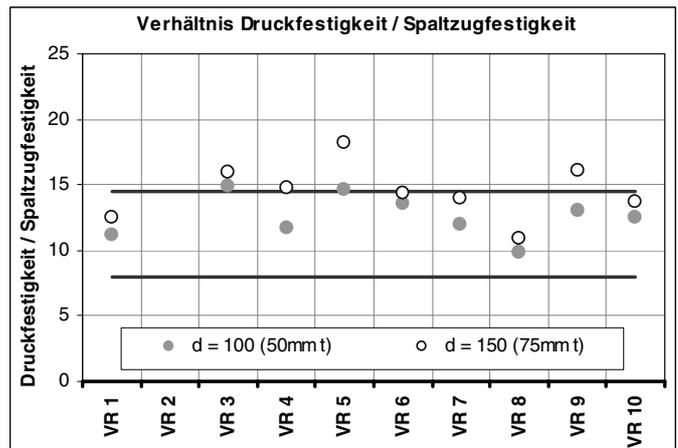
Da der Bruch jedoch im Regelfall im Material der oberen Lage mit der geringeren Festigkeit erfolgte, konnte bei der weiteren Auswertung eine Zuordnung der Festigkeiten zur Versuchsreihe 1 vorgenommen werden. Dieser Nachteil infolge der notwendigen Prüfkörpergröße bei der Bestimmung der reinen Zugfestigkeit ist bei der Ermittlung der Spaltfestigkeit wegen der geringeren Abmessungen der Prüfkörper nicht vorhanden.

In [1] wurde das Verhältnis von Zugfestigkeit zu Spaltzugfestigkeit aus unterschiedlichen Versuchsreihen verglichen. Die Werte lagen zwischen 0,4...1,0, wobei das am häufigsten auftretende Verhältnis um den Mittelwert von etwa 0,75 lag. Wie in Bild 4 deutlich erkennbar ist, liegen die im Rahmen dieses Forschungsthemas ermittelten Ergebnisse zum Teil deutlich unter dem Mittelwert, im Bereich der unteren Grenzwerte.



**Bild 4: Verhältnis Zugfestigkeit / Spaltzugfestigkeit für alle Versuchsreihen mit  $h = 0,5 \times d$**

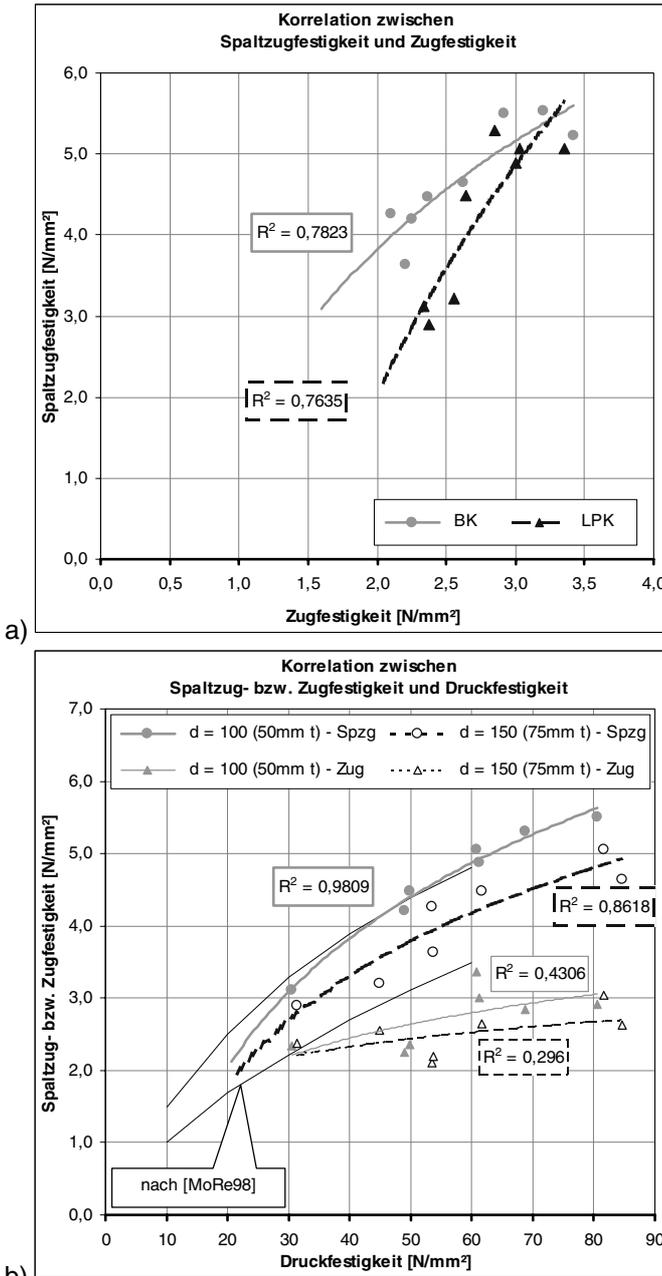
Die Verhältnisse zwischen Zugfestigkeit und Spaltzugfestigkeit ergaben für die Bohrkern (Versuchsreihen 1 bis 5) geringere Werte (im Mittel ~ 0,6) als die Verhältnisse für die vergleichbaren Laborprobekörper (im Mittel ~ 0,7). Da für die Laborprüfkörper z. T. die gleichen Mischungen verwendet wurden wie für die Bohrkern oder der Beton mit entsprechender Rezeptur nachgemischt wurde, kann somit geschlossen werden, dass die Herstellung der Prüfkörper einen größeren Einfluss auf die Zugfestigkeit hat als auf die Spaltzugfestigkeit.



**Bild 5: Verhältnis Druckfestigkeit / Spaltzugfestigkeit für alle Versuchsreihen mit  $h = 0,5 \times d$**

Nach [1] liegt das Verhältnis von Druckfestigkeit zu Spaltzugfestigkeit je nach Betongüte im Mittel zwischen 8,0 und 14,5. Die für die durchgeführten Versuche ermittelten Verhältnisse liegen hauptsächlich im oberen Teil des in Bild 5 eingetragenen Bereiches. Mit feiner werdendem Zuschlag sowie bei geringerem Alter nimmt das Verhältnis von Druckfestigkeit zu Spaltzugfestigkeit ab. Auch steigt das Verhältnis mit größer werdender Druckfestigkeit, das bedeutet, die Druckfestigkeit steigt stärker an als die Spaltzugfestigkeit.

Das Verhältnis von Druckfestigkeit zu Spaltzugfestigkeit ist für die Versuchsreihen aus Bohrkernen und den dazugehörigen Laborprüfkörpern jeweils annähernd gleich groß. Die Spaltzugfestigkeit wird somit in gleichem Maß wie die Druckfestigkeit von der Herstellung der Prüfkörper beeinflusst.

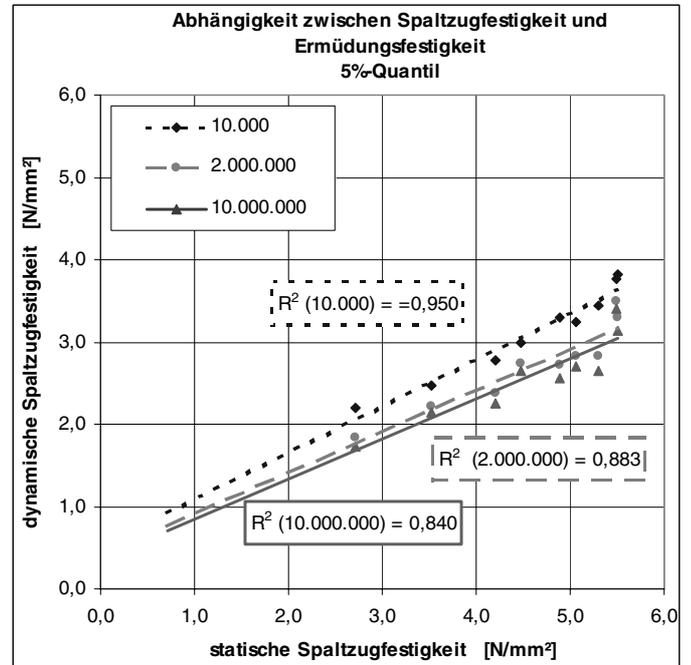


**Bild 6:** Korrelation zwischen  
a) Spaltzug- bzw. Zugfestigkeit und Druckfestigkeit sowie  
b) Spaltzugfestigkeit und Zugfestigkeit, ohne VR 3 + 6

Um einen funktionalen Zusammenhang zwischen Spaltzugfestigkeit und Zug- bzw. Druckfestigkeit aufstellen zu können, wurden die Messwerte in Bild 6 nach Herstellungsart und Prüfkörperdurchmesser zusammengefasst. In Bild 6a ist zu erkennen, dass die Punkte unabhängig vom Durchmesser jeweils für die Bohrkerne und die Laborprobekörper annähernd auf einer Kurve liegen. Dabei steigt die Regressionskurve für die Bohrkerne steiler an. In Bild 6b) zeigen die Kurven unabhängig von der Herstellung jeweils für die beiden Durchmesser ein unterschiedliches Verhalten. Hierbei verläuft die Regressionskurve für den größeren Durchmesser etwas flacher.

Die Streuungen sind jedoch sowohl für die Abhängigkeit der Spaltzugfestigkeit von der Zug- als auch von der Druckfestigkeit sehr groß, sodass die Angabe einer Funktion nicht sinnvoll erscheint.

Die Ergebnisse der dynamischen Spaltzugversuche streuen deutlich stärker als die der statischen. Die Ermüdungskurven sind für die einzelnen Versuchsreihen sowohl bei Darstellung der ertragbaren Lastwechselzahl in Abhängigkeit von der Beanspruchung, ausgedrückt als Prozentsatz von der statischen Bruchlast, als auch bei Darstellung der ertragbaren Lastwechselzahl in Abhängigkeit von der absoluten Spannung sehr unterschiedlich, sodass sich keine einheitliche, eindeutige Ermüdungskurve aufstellen lässt.



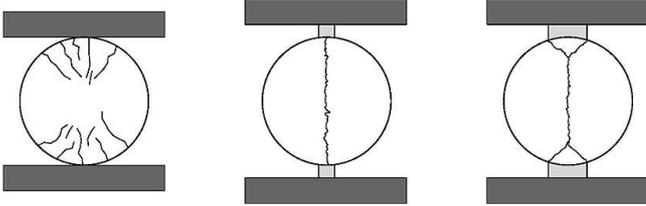
**Bild 7:** Lineare Abhängigkeit zwischen Ermüdungsfestigkeit und statischer Spaltzugfestigkeit

Erfolgt aus den durch Regression ermittelten Ermüdungsfunktionen der einzelnen Versuchsreihen jeweils die Ermittlung der Festigkeit bei 2 000 000 Lastwechseln, und wird diese über der statischen Spaltzugfestigkeit aufgetragen, so kann durch die sich ergebenden Punkte eine Gerade gelegt werden, d. h. es kann eine lineare Abhängigkeit festgestellt werden. Zusätzlich sind in Bild 7 die Geraden für 10 000 und 10 000 000 Lastwechsel eingetragen.

Trotz der kritisch zu bewertenden großen Streuungen und der schlechteren Übereinstimmung im Dauerfestigkeitsbereich kann anhand dieser Geraden für ausgewählte ertragbare Lastwechsel eine Kurvenschar erstellt werden, die der Zuordnung einer lastwechselzahlabhängigen Ermüdungsfestigkeit zu einer statischen Festigkeit (absolute Spannung) dienen könnte.

Im Otto-Mohr-Laboratorium der TU Dresden wurden mit Unterstützung des Institutes für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden während einzelner statischer Spaltzugversuche Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera gemacht. Diese sollten der Bewertung des Rissfortschrittes bzw. -verlaufes dienen.

Bei dem Bruchversagen im Spaltzugversuch wird in drei mögliche Versagensarten der Prüfkörper unterschieden. Es kann ein Druck-, Zug- oder Schubbruch auftreten. In Bild 8 sind diese drei Bruchmöglichkeiten, die bei der Spaltzugprüfung am Prüfkörper aus Beton auftreten können, dargestellt. Meist treten diese drei Brucharten nicht rein auf, es kommt oft zur Überlagerung der einzelnen Bruchbilder.



Druckbruch	Zugbruch	Schubbruch
Ohne Lasteinleitungsschienen: Bruch durch sehr hohe Druckspannung	Breite der Lasteinleitungsschienen ca. $d/10 \dots d/20$ : Abbau der Druckspannungsspitzen; der Bruch wird durch die Zugspannungen bestimmt.	Sehr breite, konkave Lasteinleitungsschienen: An den Rändern des Lasteinleitungsstreifens entstehen sehr hohe Druckspannungsspitzen, die einen Schubbruch verursachen.

**Bild 8: Brucharten beim Spaltzugversuch nach Mitchell [1, 7]**

Für den Spaltzugversuch muss aber die Zugbeanspruchung der Prüfkörper maßgebend werden, der Prüfkörper muss durch Überschreiten seiner Zugfestigkeit, d. h. durch einen Zugbruch versagen. Bei der Anwendung des Spaltzugversuches auf einen zylindrischen Prüfkörper kann es aber nach [3] nur dann zu einem Zugversagen kommen, wenn die Druckfestigkeit des zu prüfenden Stoffes mindestens dreimal so groß ist wie seine Zugfestigkeit. Nach verbesserter Schubspannungshypothese [6] tritt reiner Zugbruch auf beim Verhältnis  $f_c / f_{ct} \geq 8$ . Für die durchgeführten Versuchsreihen liegen die Verhältnisse von Zugfestigkeit zu Druckfestigkeit zwischen 13...32.

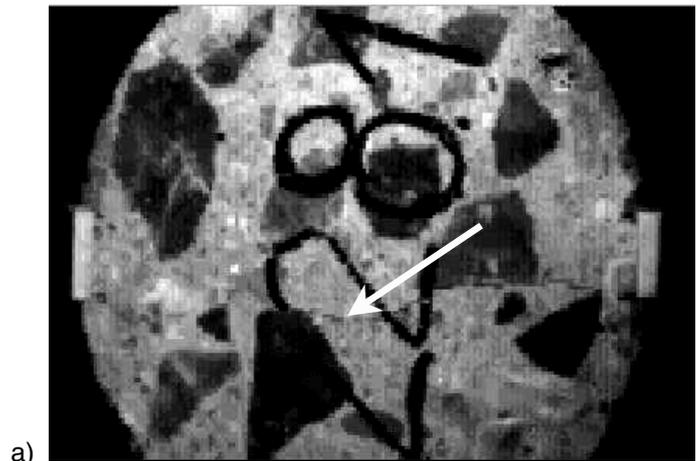
Anhand der Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera konnte festgestellt werden, dass trotz der am Versuchsende erkennbaren Schubspannungsrissen an den Prüfkörpern und den dadurch entstandenen Schubkeilen, zuerst ein Zugversagen auftrat. Somit kann aus dem Bruchbild, welches nach dem Ende des Versuches zu erkennen ist, nicht auf das Versagenkriterium geschlossen werden. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass für die untersuchten Prüfkörper immer das Überschreiten der Zugfestigkeit die Versagensursache war.

In Bild 9a ist an einem Prüfkörper mit großen Zuschlägen der erste Riss entlang eines Zuschlagkornes im Zugbereich der Probe zu erkennen.

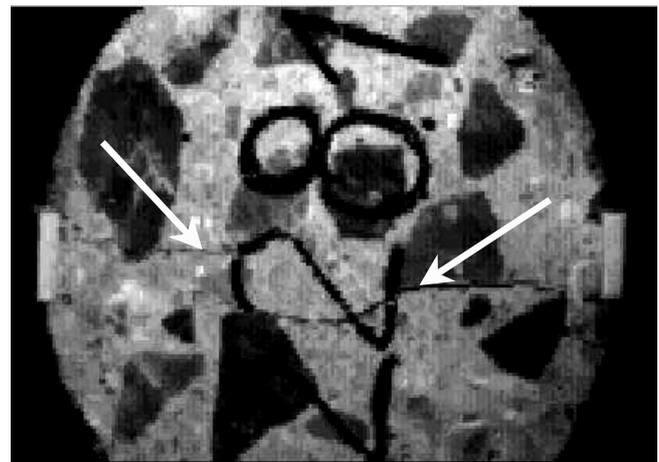
Bild 9b zeigt das weitere Öffnen des Risses. Die daraus resultierenden Spannungsumlagerungen führen zur Entstehung eines zweiten Risses, welcher sich von der gegenüberliegenden Seite zu öffnen beginnt (Pfeil).

Beim weiteren Öffnen beider Risse wird deutlich, dass sie an den Rändern der Zuschlagkörner verlaufen (Bild 9c). Der Verbund zwischen Zuschlagkorn und Zementleim hat demnach eine geringere Festigkeit als der Zuschlag oder der reine Zementleim. Die äußeren Schubrisse treten erst nach dem Entstehen der Zugrisse auf. Dies kann jedoch nur durch Betrachtung des Bruchbildes nicht deutlich werden.

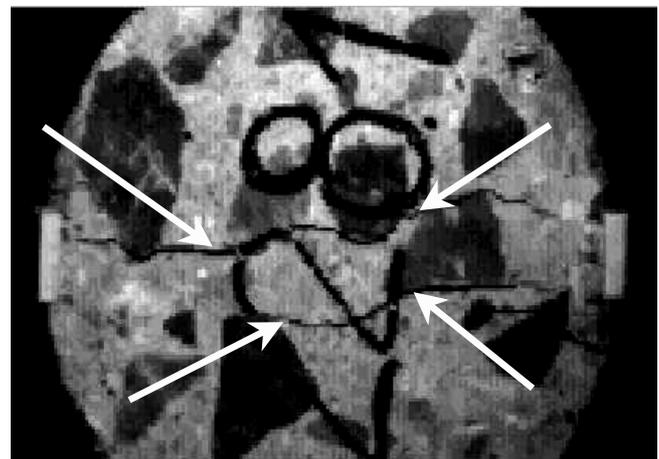
Es wurden auch Bruchversuche an Prüfkörpern aus Sandbeton durchgeführt. Diese wurden hergestellt, um den Einfluss der Größe der Zuschlagkörner auf das Bruchverhalten zu untersuchen. Die Ergebnisse der Versuchsreihen 3 und 6 ließen diesen Einfluss vermuten.



a)



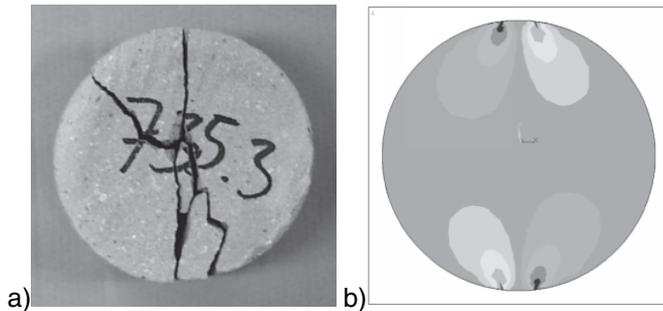
b)



c)

**Bild 9: Bruchphasen beim Spaltzugversuch an einem Prüfkörper der Versuchsreihe 6**

Das Bruchbild (Bild 10a) war in ähnlicher Form an allen Prüfkörpern erkennbar. Der mittig verlaufende Riss resultiert aus der Überschreitung der Zugspannungen. Die herausgebrochenen Keile deuten darauf hin, dass die Schubfestigkeiten ebenfalls überschritten wurden. Bild 10b visualisiert qualitativ den berechneten Schubspannungsverlauf.



**Bild 10:** a) Bruchbild Sandbeton, b) Schubspannungsverlauf, qualitativ

## 6. Zusammenfassung

Die Ermittlung der einaxialen Zugfestigkeit ist für Routineuntersuchungen nicht geeignet. Die Ermittlung der Spaltzugfestigkeit ist aufgrund der einfachen Herstellung der Prüfkörper für die Prüfungen, der relativ einfachen Versuchsdurchführung sowie der geringen Streuung der Versuchsergebnisse sowohl an gesondert hergestellten Prüfkörpern als auch an Bohrkernen zu bevorzugen. Sie ist als Eingangsgröße für die Bemessung gut geeignet.

Zur Verringerung der Streuungen der Prüfergebnisse müssen die Spaltzugprüfvorrichtungen mit an den Prüfkörper angepasst Lasteintragungsschienen sowie einer Zentriervorrichtung ausgerüstet sein. Eine unsymmetrische Lasteinleitung in den Prüfkörper ist durch eine geeignete Führung der Belastungsvorrichtung auszuschließen.

Es sollten kurze Prüfkörper verwendet werden. Die durchgeführten Versuche zeigten, dass eine Höhe der Prüfkörper von 5,0 cm geeignet ist. Bei weiterer Verringerung der Höhe besteht die Gefahr des Kippens der Prüfkörper. Damit ungestört die Spaltzugfestigkeit der für den Widerstand gegen Rissbildung maßgebenden "Randfaser" bestimmt werden kann, muss demnach der Oberbeton der Betonplatten bei freier Bemessung zur Erzielung einer ausreichenden Prüfkörperhöhe planmäßig mindestens 7 cm dick sein.

Bei dicken Betonlagen bzw. -schichten können aus den entnommenen Bohrkernen Prüfkörper zur Spaltzugprüfung und aus dem verbleibenden Teil Prüfkörper zur Druckprüfung hergestellt werden. Bei entsprechender Bohrkernlänge besteht die Möglichkeit, sowohl einen Spaltzugprüfkörper von der Oberseite als auch einen von der Unterseite herzustellen.

Die Nacherhärtung des Betons sollte vorerst bei der freien Bemessung nicht berücksichtigt werden, da sie nicht eindeutig bestimmbar ist.

Die Bestimmung des E-Moduls aus den Messergebnissen des Spaltzugversuches war unbefriedigend (zu geringe Dehnungen). Der E-Modul hat jedoch nur einen geringen Einfluss auf

die Bemessung von Betonbefestigungen, sodass die für die freie Bemessung im Programm AWDSTAKO verwendeten Werte beibehalten werden können.

Es besteht, wie zu erwarten, kein allgemein gültiges Verhältnis zwischen Spaltzug- und Druckfestigkeit, jedoch auch nicht zwischen Spaltzug- und einachsiger Zugfestigkeit.

Daher ist die Umrechnung einer Festigkeit in eine andere auf der Grundlage vorgegebener allgemeingültiger Faktoren nicht vertretbar. Demzufolge sollte für die Bemessung unmittelbar die Spaltzugfestigkeit verwendet werden. Für im Labor und in situ hergestellte Prüfkörper sind gleiche Formen (Zylinder) anwendbar.

Da keine allgemeingültige Ermüdungskurve aus den Versuchsreihen ermittelt werden konnte, wurde eine Kurvenschar erstellt, die der Zuordnung einer lastwechselzahlabhängigen Ermüdungsfestigkeit zu einer statischen Spaltzugbruchfestigkeit (absolute Spannung) dienen könnte. Es wird vorgeschlagen, bei der Bearbeitung des Teilthemas "Bemessungsverfahren AWDSTAKO für kontinuierlich bewehrte Betondecken" zu überprüfen, ob diese Ermüdungskurven in die hierfür zu entwickelnde Version des Bemessungssystems AWDSTAKO eingeführt werden sollten.

### Literaturverzeichnis

- [1] Bonzel, J.: Biegezug- und Spaltzugfestigkeit des Betons, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1965
- [2] DIN 1048-5: Prüfverfahren von Beton, Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper, Deutsche Norm, Beuth Verlag GmbH, 1991
- [3] Durth, W.; Grätz, B.: Überprüfung praktischer Methoden zur Messung der Tragfähigkeit und Einschätzung der Restnutzungsdauer, insbesondere für Straßen auf dem Gebiet der neuen Bundesländer; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 723, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn, 1996
- [4] Entnahme und Prüfung von Bohrkernen aus Betondecken von Autobahnabschnitten im Land Brandenburg; Untersuchungsbericht, Landesmaterialprüfamt Sachsen-Anhalt, Zentrallabor des Straßenwesens Magdeburg, 3. 2. 1994
- [5] Moysich, A.; Renzienhausen, L.: Gesicherte Eingangsgrößen für die Berechnung unbewehrter Betonkonstruktionen nach Grenzzuständen, Studienarbeit, Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, 1998
- [6] Müller, F.: Anmerkungen zum Spaltzugversuch; Ausführungen zur Arbeitstageung der Bearbeitergruppe "Beton" des Arbeitskreises 4.8.4 – Stoffverhalten
- [7] Nkwonkam, J. E.: Untersuchungen zum Festigkeits-, Formänderungs- und Ermüdungsverhalten von zement-bitumengebundenen Kaltrecyclinggemischen unter Verwendung der Spaltzugprüfung; Dissertation, Institut für Stadtbauwesen und Straßenbau, Schriftenreihe der Professur Straßenbau, TU Dresden, Heft 9, 2000
- [8] Shao, J.; Tu, D.: The Jackknife and bootstrap; Springer-Verlag, 1996