

# Zur Beurteilung der Eigenschaften des Betons mit Ausfallkörnungen

Von Kurt Walz, Düsseldorf

## Inhalt

### Übersicht

1. Einleitung
  2. Bestimmungen
  3. Aufbau des Betons AK
    - 3.1. Zusammensetzung
    - 3.2. Verarbeitbarkeit
    - 3.3. Gefüge
  4. Festigkeit
    - 4.1. Kurzzeitfestigkeit
      - 4.1.1. Druckfestigkeit
      - 4.1.2. Biegezugfestigkeit
      - 4.1.3. Spaltzugfestigkeit
      - 4.1.4. Sand- und Mörtelgehalte untersuchter Mischungen
      - 4.1.5. Zerstörungsfreie Prüfung
    - 4.2. Dauerfestigkeit
      - 4.2.1. Druckbeanspruchung
      - 4.2.2. Biegebeanspruchung
  5. Schwinden, E-Modul, Kriechen
  6. Biegezugfestigkeit und Schwindspannungen
  7. Bruchdehnung
  8. Verschleißwiderstand
  9. Temperatur
    - 9.1. Frostwechsel bei durchfeuchtem Beton
    - 9.2. Temperaturwechsel und hohe Temperatur
  10. Wasserundurchlässigkeit
  11. Korrosionsschutz der Bewehrung
  12. Chronologische Wiedergabe zusammenfassender Äußerungen aus dem benutzten Schrifttum über die Eigenschaften von Beton AK
  13. Zusammenfassung
- Schlußbemerkung; Schrifttum

## Übersicht

*Wird Beton mit Ausfallkörnungen (Beton AK) in größerem Umfang hergestellt, so können bestimmte Korngruppen, die bei der Aufbereitung von Kiessand anfallen, von den Zuschlag-Lieferwerken nicht mehr abgesetzt werden. Als Grund für die Anwendung von Beton AK, dessen Zuschlag z. B. nur aus einer Sand- und einer Kieskorngruppe besteht, werden verfahrenstechnische und damit auch wirtschaftliche Vorteile angeführt.*

*Dabei werden dem Beton AK im Vergleich zum Beton mit stetig aufgebaute Kornzusammensetzung (Beton SK) zugleich auch günstigere Eigenschaften zugesprochen. Oft werden diese jedoch nur pauschal herausgestellt oder aus der besonderen Zusammensetzung des Betons AK abgeleitet und weniger durch Vergleichsversuche mit zweckentsprechendem, umsichtig aufgebaute Beton SK begründet.*

*In der vorliegenden Arbeit werden aus bekanntgewordenen Untersuchungen die Eigenschaften von Beton AK zusammengestellt und Hinweise gegeben, was wegen der Besonderheit seines extremen Korngefüges Beachtung verdient.*

*Während für alle Eigenschaften des Betons SK weitreichende Erkenntnisse zur Verfügung stehen, ist über den Einfluß des besonderen Gefüges im Beton AK auf eine Reihe von Eigenschaften wenig oder nichts bekannt. Man soll daher bei Beton AK nicht nur wirtschaftliche Vorteile sehen, sondern auch seine technischen Eigenschaften im Vergleich zu denen eines optimal aufgebauten Betons SK beurteilen.*

## **1. Einleitung**

In manchen Gebieten wird Beton mit Zuschlaggemischen hergestellt, in dem mittlere Korngruppen fehlen. (Im folgenden sind solche Zuschlaggemische, wie üblich, mit „Ausfallkörnungen“ bezeichnet.) Dies hat zur Folge, daß bestimmte Korngruppen, die bei der Aufbereitung eines natürlichen Kiessand-Vorkommens anfallen, vom Herstellwerk nicht abgesetzt werden können.

Es liegt auf der Hand, daß dem Kieswerk durch eine, selbst bei vermindertem Preis, nicht abgenommene Korngruppe erhebliche Verluste entstehen [1]. Aus der Sicht des Betonherstellers wird angeführt, daß Ausfallkörnungen wirtschaftlich günstiger sind, da nur 2 Korngruppen, z. B. 0/2 mm und 8/32 mm, zu bevorraten und abzumessen sind. Die Anwendung wird weiter damit begründet, daß der mit Ausfallkörnung hergestellte Beton (Beton AK) auch stofflich und in der Verarbeitung billiger sowie in seinen Eigenschaften günstiger zu bewerten sei als Beton mit einem stetig aufgebauten, z. B. aus 3 Korngruppen zusammensetzenden Zuschlaggemisch (Beton SK).

Im folgenden wird aus dem Schrifttum und nach Versuchsberichten zusammengestellt, welche besondere Bewandnis es mit den Eigenschaften des Betons AK im Vergleich zu denen des Betons SK hat. Neben der Frage, was in Vorschriften zur Ausfallkörnung festgelegt wurde, ist wesentlich, was an Erkenntnissen zur Verfügung steht über

Aufbau des Betons (Stoffanteile, Korngefüge),  
Verarbeitbarkeit und Überwachung,  
Festigkeit (Kurzzeit- und Dauerfestigkeit),  
Schwinden, E-Modul und Kriechen,  
Beständigkeit (Verschleiß, Temperatureinwirkung, Wasserundurchlässigkeit, Rostschutz).

Über die entsprechenden Eigenschaften von Beton SK liegen langjährige Erfahrungen und umfassende Erkenntnisse vor. Demgegenüber gibt man sich für Beton AK meist damit zufrieden, ihn nach der erzielbaren Druckfestigkeit zu beurteilen oder fallweise noch nach einigen Eigenschaften, die meist überlegungsmäßig von seinem Aufbau abgeleitet werden und über die keine so vielseitig fundierten Untersuchungen vorhanden sind wie für Beton SK (z. B. Schwinden, E-Modul, Kriechen). Noch weniger ist über eine Reihe anderer Eigenschaften bekannt, auf die der besondere Gefügebau des Betons AK Einfluß haben kann und die je nach Beanspruchung eines Bauteils wichtig sein können.

## 2. Bestimmungen

**2.1.** In der alten DIN 1045 (Fassung November 1959) war Beton AK nicht erwähnt. Bei buchstabengetreuer Auslegung der Bedingungen zu den Korngruppen und Zuschlaggemischen war für Betone bis B 225 auch Beton AK möglich. Für den B 300 wurde jedoch ausdrücklich die Zusammensetzung aus den Korngruppen 0/3 mm, 3/7 mm und über 7 mm verlangt. Doch wurde dieser und Beton höherer Festigkeitsklassen mit Ausnahmegenehmigungen gelegentlich als Beton AK hergestellt. Dabei wurde meist nur die mit Rundlochprüfsieben gekennzeichnete Korngruppe 3/7 mm ausgelassen. Abgesehen davon, daß Betone AK im üblichen Betonbau selten verwendet wurden, entstand in den Kieswerken kein Überschuß der Korngruppe 3/7 mm, da ihr Anteil in den Vorkommen meist gering war.

Wenn nach der neuen DIN 1045 [2] jetzt z. B. die auf Quadratlochprüfsiebe bezogene Korngruppe 2/8 mm ausgelassen werden kann, so bedeutet dies, daß damit eine größere Ausfallbreite und -menge verbunden ist. (Auf Rundlochsiebe bezogen entspricht die Korngruppe 2/8 mm  $\square$  etwa der fiktiven Korngruppe 2,8/9,6 mm  $\phi$ ; siehe [3].)

Neben den allgemein geltenden betontechnischen Festlegungen in DIN 1045 sind für Beton AK jene über die Zuschlagzusammensetzung und die Überwachung des Betons zu beachten; eine Übersicht gibt Tafel 1. Demnach können Beton B I und Beton B II mit Ausfallkörnungen hergestellt werden, wenn eine Beton-Eignungsprüfung vorgenommen wird. Das Zuschlaggemisch für Beton AK muß aus mindestens einer Korngruppe im Sandbereich und einer gröberen Korngruppe zusammengesetzt werden. Weiter muß nach den Grenzsieblinien in DIN 1045 der Anteil der verwendeten Sandkorngruppe (Bereich bis max. 4 mm) mindestens 30 Gew.-% (ggf. Stoffraum-%) betragen.

**2.2.** Werden z. B. wichtige Betonvorschriften der USA herangezogen [4 bis 8], so findet man dort keine Ausführungen über Ausfallkörnungen (gap-graded aggregates) oder die Eigenschaften von Beton AK. Für die Kornzusammensetzung des Zuschlaggemisches wird allgemein verlangt, daß die Anteile von „feinem“ Zuschlag (Sand 0 bis 4,8 mm) und „grobem“ Zuschlag (über 4,8 mm) so zu wählen sind, daß ein gut verarbeitbarer Be-

Tafel 1 Übersicht der Bedingungen für die Kornzusammensetzung des Zuschlags zu Beton B I und Beton B II

Festigkeitsklasse	Korngruppen (K.)	Bereich stetig verlaufender Sieblinien	Ausfallkörnung	Werkgem. Zuschlag	Größtkorn
<b>1. Beton B I mit Eignungsprüfung</b>					
Bn 50 Bn 100	keine Forderung	beliebig	zulässig	bis 32 mm	je nach Konstruktion; DIN 1045, Abschn. 6.2.1
Bn 150 Bn 250	0 bis max. 4 mm und eine gröbere K.				
<b>2. Beton B II mit Eignungsprüfung</b>					
Bn 350 und höher	eine K. 0 bis max. 2 mm; dazu für 0/32 mm noch 2 K., für 0/16 mm u. 0/8 mm sowie Ausfallkörnungen noch 1 K.	beliebig	zulässig	nicht zulässig	je nach Konstruktion; DIN 1045, Abschn. 6.2.1
<b>3. Beton B I ohne Eignungsprüfung (Rezeptbeton)</b>					
Bn 50 Bn 100	keine Forderung	A bis B oder A bis C je nach Zementgehalt (siehe DIN 1045, Abschn. 6.5.5.1)	nicht zulässig	bis 32 mm	je nach Konstruktion; DIN 1045, Abschn. 6.2.1
Bn 150 Bn 250	0 bis max. 4 mm und eine gröbere K.				

ton mit den geforderten Eigenschaften entsteht, und es wird empfohlen, bei der Zusammensetzung des Zuschlaggemisches den verfügbaren Zuschlägen möglichst wirtschaftlich Rechnung zu tragen [4]. Im Regelfall [6] sind Bedingungen der Zuschlagnorm [9] einzuhalten. Bezüglich des Kornaufbaues soll nach dieser Norm die Sieblinie des Sandes 0/4,8 mm innerhalb einer festgelegten oberen und unteren Grenzsieblinie und sein Feinheitsmodul (Körnungsziffer) zwischen einem festgelegten unteren und oberen Grenzwert liegen. Auch für die Grobzuschlag-Korngruppen sind Bereiche angegeben, innerhalb derer die Anteile bestimmter Siebfraktionen liegen müssen. Hier interessierende Grobzuschlag-Korngruppen reichen von 4,8 mm bis Größtkorn (38 mm, 25 mm, 19 mm, 12,5 mm). Mit ihnen entsteht daher, zusammen mit dem Sand bis 4,8 mm, ein weitgehend stetig aufgebautes Zuschlaggemisch. Doch sind auch einige enger begrenzte Grobzuschlag-Korngruppen, wie 19/38 mm, genannt. Damit wäre es zusammen mit dem Sand 0/4,8 mm möglich, eine Ausfallkörnung herzustellen.

In Beton-Handbüchern großer, bauender USA-Verwaltungen finden sich entsprechende Ausführungen über den Zuschlag [10]. Auch hier wird empfohlen [11], wenn irgend möglich eine Kornzusammensetzung zu verwenden, die den Aufbau des verfügbaren,

natürlichen Vorkommens berücksichtigt. Nach den angeführten Beispielen für Zuschlaggemische mit stetiger Sieblinie zu schließen, scheinen diese die Regel zu sein. Es wird lediglich angeführt, daß Zuschlag mit unstetiger Sieblinie manchmal ohne augenscheinliche Nachteile verwendet worden ist.

Obwohl also im amerikanischen Schrifttum seit langem Ausfallkörnungen erwähnt werden, siehe z. B. [12], wird auf sie in Betonvorschriften nicht eingegangen.

Die neuesten international vereinbarten Richtlinien der CEB-FIP [13] zur Berechnung und Ausführung von Betonbauwerken enthalten keine Empfehlungen für Zuschlaggemische.

### **3. Aufbau des Betons AK**

Auf den Aufbau von Beton AK soll hier nur so weit eingegangen werden, wie dies für die Beurteilung dessen Eigenschaften von Bedeutung ist.

#### **3.1. Zusammensetzung**

Beim Entwurf wird von geometrischen Ableitungen („Schlupfkugelttheorie“) ausgegangen, siehe z. B. [14], ferner von Erfahrungswerten für den erforderlichen Sand- bzw. Mörtelgehalt, der zur Füllung des Hohlraums im Grobzuschlag angemessen ist, siehe z. B. [15] und [16], oder von Regeln für die Bandbreite der auszulassenden Korngruppen in Abhängigkeit vom Größtkorn des Zuschlaggemisches, siehe z. B. [17] und [18].

Die Besonderheiten im Aufbau des Betons AK sind ein meist geringer Sandanteil im Zuschlaggemisch (etwa 30 bis 35 %) und Mörtelgehalt des Betons (etwa 45 bis 50 Stoffraum-%). Die Gehalte sind abhängig vom Größtkorn, Zement- und Wassergehalt der Betonmischung.

Der Anteil an Grobzuschlag liegt also etwa bei 70 bis 65 %; sein Kleinstkorn ist mehrfach größer als das Größtkorn des im Gemisch vorhandenen Sandes bzw. als das der Mörtelmatrix. Das Gefüge weist damit eine starke Unstetigkeit in der Kornverteilung auf. Diese kann im eingebauten Beton örtlich noch dadurch verstärkt werden, daß durch Entmischen sich Partien bilden, die auch nach praktisch vollständiger Verdichtung des Betons mehr bzw. weniger Grobzuschlag aufweisen als dem Durchschnitt im gesamten Betonvolumen entspricht (siehe auch [19]).

In diesem Zusammenhang ist bei enger Bewehrung oder geringer Betondeckung der Abschnitt 6.2.1 der DIN 1045 zu beachten. Danach soll der überwiegende Teil des Zuschlags kleiner als der Abstand der Bewehrungsstäbe untereinander und von der Schalung sein.

#### **3.2. Verarbeitbarkeit**

In den meisten Veröffentlichungen wird darauf hingewiesen, daß es sorgfältiger Voruntersuchungen über den Aufbau des Betons AK bedarf, um eine günstige Verarbeitbarkeit ohne besondere

Neigung zum Entmischen zu gewährleisten. Daher wird wiederholt empfohlen, Beton AK nur als steifen Rüttelbeton herzustellen.

Übereinstimmend wird festgestellt, daß kleine Änderungen im Wassergehalt sich beim Beton AK stärker auf die Konsistenz auswirken als beim Beton SK und daß deshalb eine besonders sorgfältige Überwachung der Herstellung nötig ist.

### 3.3. Gefüge

Gegenüber der Mörtelmatrix weist der in sie eingebettete Grobzuschlag eine wesentlich höhere Festigkeit, einen größeren E-Modul und geringere bleibende Verformung bei Belastung auf, ferner andere Wärmedehnung und Schwindung. So treten z. B. bei einachsiger, zentrischer Druckbelastung in der Mörtelmatrix seitlich der Zuschlagkörner hohe Zugspannungen auf, die letztlich für den Bruchbeginn bestimmend sind. Dabei können sich um größere Zuschlagkörner in der Mörtelmatrix bereits Mikrorisse bilden, wenn die mittlere Spannung über den Querschnitt aus äußerer Kraft noch weit unterhalb der Bruchspannung des Betons liegt. Auch die Haftfestigkeit zwischen Kornoberfläche und Mörtelmatrix sowie Fehlstellen in der Haftfläche (Poren, Wasserlinsen, Schrumpfflockungen) sind von Einfluß auf die Mikro- und die davon ausgehende eigentliche Bruchrißbildung. Dies gilt allgemein, auch für den Beton SK. Wegen des inhomogeneren Aufbaues des Betons AK ist bei ihm jedoch bei Einwirkung äußerer Kräfte sowie bei Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen in erhöhtem Maße eine ungleichmäßigere Spannungsverteilung im Gefüge mit Spannungsspitzen um das Zuschlagkorn vorzusetzen. Einzelheiten hierüber und zu den folgenden Ausführungen siehe u. a. [20, 21]. Aus diesen Untersuchungen ist im Hinblick auf den Beton AK bei axialer Druckbelastung folgendes zu beachten:

Mit zunehmender Korngröße tritt eine Erhöhung der Spannungskonzentration um das Zuschlagkorn ein. Das bedeutet, daß im Beton AK infolge der größeren Anzahl großer Körner im Vergleich zum Beton SK und gleichem Größtkorn ungleichmäßigere Gefügespannungen und stärkere Spannungskonzentrationen (Spannungsspitzen) auftreten können. Über den Einfluß des Abstandes der Zuschlagkörner in Richtung der Druckkraft (Dicke der Matrixschicht) wurde festgestellt, daß die Spannungskonzentration um die Zuschlagkörner mit abnehmendem Abstand der Zuschläge zunimmt und daß die Dehnung bei der Brucheinleitung mit zunehmendem Volumenanteil der Zuschläge abnimmt.

Es wird gefolgert, daß die Kornzusammensetzung des Zuschlaggemisches von wesentlichem Einfluß auf die Größe der Spannungsspitzen ist und daß gegenüber einem Einkornbeton durch Zwischenkörnungen die Spannungskonzentrationen um die größeren Zuschlagkörner vermindert werden, d. h. der Kräfteverlauf von Zuschlagkorn zu Zuschlagkorn wird stärker aufgefächert.

Und schließlich wird ausgeführt [21]: „Für die Herstellung hochfester Normalbetone lassen daher stetige Kornzusammensetzungen, wie sie durch die Sieblinienbereiche gekennzeichnet sind, günstigere Ergebnisse erwarten als Ausfallkörnungen, weil dabei

nicht nur die Spannungskonzentration auf einzelne Körner mit zunehmender Korngröße zunimmt, sondern weil auch die von Korn zu Korn übertragenen Druckkraftanteile größer werden, so daß auch die Zugbeanspruchung der Haftzone um die Zuschlagkörner, die Spaltzugbeanspruchung der Zuschlagkörner und die Zugkräfte zwischen den Zuschlagkörnern (die die Ausbreitung der Haftrisse bewirken) zunehmen."

Wenn auch die Folgerungen in [20] und [21] zu einem großen Teil aus Modellversuchen mit einer Matrix aus Zementstein abgeleitet sind, so geben sie doch wichtige Hinweise für eine Beurteilung der Auswirkung verschiedener Beanspruchungen der Praxis beim Beton AK.

## **4. Festigkeit**

### **4.1. Kurzzeitfestigkeit**

#### *4.1.1. Druckfestigkeit*

Nach allem, was bekannt wurde, können mit Beton AK generell hohe Druckfestigkeiten erreicht werden. Wenn solche herausgestellt werden, siehe z. B. [15], so fehlt leider bei den Untersuchungen häufig dazu der Vergleich mit einem unter entsprechenden Verhältnissen und mit gleicher Fürsorge hergestellten Beton SK. Vergleiche sollten auf der Basis gleicher Verarbeitbarkeit und gleichen Wasserzementwerts (d. h. gleicher Festigkeit der Mörtelmatrix) sowie bei ebenfalls weitestgehend vermindertem Sandgehalt des Betons SK angestellt werden. (Offenbar verleiten die in unseren Bestimmungen aufgeführten weiten Sieblinienbereiche manchmal dazu, daß dem Sandgehalt im Gemisch sowie einer günstigen Zusammensetzung des Sandes [3] und damit auch der maßgebenden Mörtelmatrix im Beton SK weniger Beachtung geschenkt wird als früher.)

In den Untersuchungen von Albrecht und Schäffler [17] vorkommende Mischungen bieten eine Vergleichsmöglichkeit. Die Untersuchungen führten für Betone 0/30 mm<sup>1)</sup> mit verschiedenen Sandgehalten und einem Wasserzementwert von 0,55 zu dem Ergebnis, daß die Druck- und Biegezugfestigkeiten der zweistufigen Ausfallkörnungen 0/30 mm meist kleiner als bei stetigem Aufbau waren (bei dreistufigen Ausfallkörnungen 0/50 mm größer, gleich groß oder kleiner).

Der Zementgehalt war beim Beton AK aus den Korngruppen 0/3 mm und 15/30 mm mit 45 % Sand 0/3 mm z. T. größer als beim Beton SK 0/30 mm, der 50 % Sand 0/7 mm im Zuschlaggemisch aufwies. Mit den von 37 % auf 28 % herabgesetzten Sandgehalten der Betone AK nahm ihr Zementgehalt naturgemäß ab und die Neigung zum Absondern von Grobkorn zu. Beim Beton AK mit 32 % 0/3 mm und 68 % 15/30 mm, der z. T. „erhebliche“ Neigung zum Absondern des Grobkorns zeigte,

<sup>1)</sup> Die damals benutzten Rundlochprüfsiebe  $\phi$  3 mm, 7 mm, 15 mm und 30 mm würden grob den Quadratlochprüfsieben  $\square$  2 mm, 6 mm, 12 mm und 25 mm entsprechen.

betrug der Zementgehalt  $271 \text{ kg/m}^3$  gegenüber  $285 \text{ kg/m}^3$  im Beton SK 0/30 mm mit 50 % Sand 0/7 mm. Der Sandgehalt des Betons SK hätte vermutlich noch um einige % herabgesetzt werden können, ohne die günstigeren Verarbeitungseigenschaften des Betons SK vergleichsweise zu mindern.

In einem nicht veröffentlichten Versuchsbericht [22] mit Zuschlagemischen 0/32 mm nach der neuen Prüfsiebreihe (DIN 4226) sind Betone SK und ein Beton AK mit gleichem Wassermenge (0,60) und gleicher Verarbeitbarkeit (Ausbreitmaß a rd. 38 cm; Verdichtungsmaß v rd. 1,08) aufgeführt.

Das Korngemisch AK bestand aus 38 % Sand 0/2 mm und 62 % Kies 8/32 mm. Die Sieblinie des Korngemisches SK mit rd. 44 % Sand 0/4 mm verlief im oberen Teil zwischen den Sieblinien  $A_{32}$  und  $B_{32}$  (38 % 0/2 mm, 12 % 2/8 mm). Der Zementgehalt betrug im Beton AK  $276 \text{ kg/m}^3$  und im Beton SK  $287 \text{ kg/m}^3$ . In beiden Fällen wurden  $65 \text{ kg/m}^3$  Flugasche zugegeben.

Bei der Prüfung betrug die Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen für Beton AK  $432 \text{ kp/cm}^2$  und für Beton SK  $442 \text{ kp/cm}^2$ . Bei dieser Untersuchung vergleichbarer Mischungen fielen also die Festigkeiten des Betons AK etwas kleiner aus als beim Beton SK. Der Beton SK benötigte für gleiche Verarbeitbarkeit eine wenig größere Zementleimenge (rd.  $10 \text{ dm}^3/\text{m}^3$  entsprechend rd.  $11 \text{ kg Zement/m}^3$ ).

Weitere Vergleiche wurden bei diesen Versuchen für Beton SK über den Einfluß eines erhöhten Anteils der Korngruppe 2/8 mm angestellt; er wurde von 12 % (siehe oben) auf 28 %, bei entsprechender Verminderung des Anteils 8/32 mm, erhöht.

In der abschließenden Beurteilung wird festgestellt, daß eine Erhöhung des Anteils 2/8 mm in dem durch die Untersuchungen abgesteckten Rahmen in betontechnologischer und verarbeitungstechnischer Hinsicht keine spürbaren Nachteile und daß eine Ausfallkörnung (2/8 mm) keine erkennbaren betontechnologischen Vorteile bringt.

(Im nachfolgenden Abschnitt finden sich, im Zusammenhang mit der Beurteilung der Biegezugfestigkeit, weitere Vergleiche von Druckfestigkeiten.)

#### 4.1.2. Biegezugfestigkeit

Umfangreiche Untersuchungen mit Platten  $120 \text{ cm} \cdot 40 \text{ cm}$  und  $20 \text{ cm}$  Dicke sowie mit Balken  $70 \text{ cm} \cdot 15 \text{ cm} \cdot 10 \text{ cm}$  aus steifem Straßenbeton SK und AK mit rd.  $330 \text{ kg Zement/m}^3$  sowie verschiedenen Grobzuschlägen bis max.  $50 \text{ mm}^2$ ) wurden vom Otto-Graf-Institut in Stuttgart im Jahre 1956 für die Arbeitsgruppe Betonstraßen der Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen durchgeführt. Dem unveröffentlichten Bericht [23] ist folgendes zu entnehmen:

<sup>2)</sup> Dem Rundlochprüfsieb  $\phi 50 \text{ mm}$  würde ein Quadratlochprüfsieb von rd.  $\square 42 \text{ mm}$  entsprechen (siehe auch Fußnote 1).

Der Wassergehalt des Betons SK 0/50 mm und des Betons AK 0/50 mm aus 40 Stoffraum-% Sand 0/3 mm und 60 Stoffraum-% Grobzuschlag 15/50 mm wurde auf etwa gleiche Verarbeitbarkeit abgestimmt. („Rüttelzeit im Verformungsgerät nach Powers“, „Eindringmaß nach Graf“, „Verdichtungsmaß nach Walz“.) Dazu war der Wasseranspruch bei den Mischungen mit vergleichbarem Zuschlaggemisch für den Beton SK kleiner als für den Beton AK. Mit Rheinmaterial und Moränematerial als Grobzuschlag waren für Beton SK rd. 132 kg Wasser/m<sup>3</sup> (w = rd. 0,40) und für Beton AK 148 kg/m<sup>3</sup> (w = 0,45) erforderlich. Wurde gebrochener Kalkstein als Grobzuschlag benutzt, so war der Wasseranspruch der Betone praktisch gleich groß (153 kg/m<sup>3</sup> bei SK und 152 kg/m<sup>3</sup> bei AK; w = rd. 0,46). Balken und zugehörige Würfel lagerten bis zum Alter von 28 Tagen unter feuchten Tüchern oder weiter dann in Raumluft.

Zur Kennzeichnung der Betonfestigkeiten seien hier die von Schwindspannungen nicht beeinflussten Prüfwerte (siehe auch Abschnitt 6) nach der 28tägigen Feuchtlagerung für die Mischungen aus Rheinkiessand genannt:

Druckfestigkeit für Beton		Biegezugfestigkeit für Beton	
AK 0/50 mm	SK 0/50 mm	AK 0/50 mm	SK 0/50 mm
460 kp/cm <sup>2</sup>	616 kp/cm <sup>2</sup>	63 kp/cm <sup>2</sup>	70 kp/cm <sup>2</sup>

Daraus geht hervor, daß die Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit des Betons AK unter der des Betons SK lag, der für gleiche Verarbeitbarkeit mit einem kleineren Wasserzementwert hergestellt werden konnte.

Zusammenfassend wurde für die Gesamtheit der untersuchten Mischungen festgestellt, daß grobkörnigere Zuschlaggemische mit stetigen Sieblinien 0/50 mm wie auch mit Ausfallkörnungen, trotz teilweiser Verminderung des W/Z-Wertes, meist deutlich geringere Festigkeiten ergaben als Betone mit stetig zusammengesetztem Kiessand 0/30 mm. (Siehe dazu auch amerikanische Untersuchungen, z. B. [24, 25, 26], die zeigen, daß optimale Verhältnisse zwischen Druckfestigkeit und Betonzusammensetzung am ehesten mit mäßigem Größtkorn im Bereich von 25 mm bis 10 mm [21, 25] erhalten werden, weil von den größeren Körnern eine nachteilige Wirkung durch deren geringere Haftfläche [25] und durch gesteigerte Spannungskonzentrationen ausgeht.)

Weitere Untersuchungen, die einen Vergleich der Biegezugfestigkeit von Beton AK und SK erlauben, waren nicht zu finden.

Über die achsiale Zugfestigkeit standen keine Feststellungen zur Verfügung. Sie hängt, wie auch die Biegezugfestigkeit, weitgehend von der Zugfestigkeit des Mörtels und seiner Haftung an den groben Zuschlagkörnern ab.

#### 4.1.3. Spaltzugfestigkeit

Bei den Untersuchungen in [22] fanden sich Spaltzugfestigkeiten

für den Beton AK von 29 kp/cm<sup>2</sup> und für den Beton SK von 32 kp/cm<sup>2</sup>.

Insgesamt (siehe 4.1.1 bis 4.1.3) wurden also bei den hier auf durchschaubarer Vergleichsbasis untersuchten Betonen mit Zuschlaggemischen SK etwas größere Kurzzeit-Druckfestigkeiten und -Biegezugfestigkeiten erzielt als mit den entsprechenden Zuschlaggemischen AK.

#### 4.1.4. Sand- und Mörtelgehalte untersuchter Mischungen

Nachfolgend sind zunächst die Sandgehalte des Zuschlaggemisches (Gew.-%) und die berechneten Mörtelvolumen (Zement, Sand, Wasser und Luftporen) für die in den Abschnitten 4.1.1, 4.1.2 und 4.1.3 aufgeführten Betone aus Rheinsand und Rheinkies zusammengestellt; vgl. dazu auch Abschnitt 3.1, 2. Absatz. Zum Mörtel gehören nach der alten DIN 1045 Sande im Bereich bis 7 mm Größtkorn (Betone nach [17] und [23]) und nach der neuen DIN 1045 Sande im Bereich bis 4 mm Größtkorn (Beton nach [22]).

Beton nach	Sand		Kies		Mörtel	
	AK	SK	AK	SK	AK	SK
[17]	32 % 0/3	50 % 0/7	68 % 15/30	50 % 7/30	50 % 0/3	64 % 0/7
[22]	38 % 0/2	44 % 0/4	62 % 8/32	56 % 4/32	56 % 0/2	60 % 0/4
[23]	41 % 0/3	40 % 0/7	59 % 15/50	60 % 7/50	56 % 0/3	55 % 0/7

Die Sand- und Mörtelgehalte dieser Betone sind meist verhältnismäßig groß. Bei den Betonen nach [17] hätte nach den dort wiedergegebenen Verarbeitungskriterien der hohe Mörtelgehalt des Betons SK mit 64 % ohne verarbeitungstechnische Nachteile zweifellos herabgesetzt werden können. Im Falle von [22] wurde auf pumpbaren Transportbeton unter Verwendung eines Flugaschezusatzes abgestimmt und im Falle von [23] auf einen leicht erreichbaren Deckenschluß des grobkörnigen Straßenbetons.

Um nun vergleichsweise festzustellen, welche Eigenschaften Betone AK und SK aufweisen, deren Zuschlaggemische 0/32 mm sich jeweils durch einen kleinen, noch zugänglich erscheinenden Mindestmörtelgehalt auszeichnen, wurde ein demonstrierender Versuch durchgeführt, der von den Festlegungen in DIN 4226 und DIN 1045 ausgeht<sup>3)</sup>.

Dazu wurden Zuschlaggemische aus Rheinkies sand mit folgender Zusammensetzung verwendet:

Anteil bis	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	mm
für Beton AK	6	15	22	30	30	30	62	100	%
			(Körnungsziffer 5,05)						
für Beton SK	5	12	18	24	30	38	62	100	%
			(Körnungsziffer 5,11)						

<sup>3)</sup> Versuch im Betonlaboratorium des Forschungsinstituts der Zementindustrie in Düsseldorf im September und Oktober 1974.

Das Zuschlaggemisch AK bestand also aus 30 % Sand 0/2 mm und 70 % Kies 8/32 mm. Die Zusammensetzung des Sandes 0/2 mm entsprach der im Beton SK.

Das Zuschlaggemisch SK enthielt 30 % Sand 0/4 mm mit günstiger Sieblinie [3] und 70 % Kies 4/32 mm, der bei 8 und 16 mm nach Sieblinie A<sub>32</sub> zusammengesetzt und dementsprechend grobkörnig war. Der Anteil 2/8 mm, d. i. die fehlende Korngruppe bei AK, betrug 14 %. (Siehe hierzu auch eine entsprechende Empfehlung in [27], wonach „ein Zuschlaggemisch, dessen Sieblinie im besonders guten Bereich so verläuft, daß sie bis 2 mm nahe der E-Linie und dann bei 12,5 mm zur D-Linie rückt, sehr leicht zu verarbeiten ist“.)

Die mit diesen Zuschlaggemischen hergestellten Betone AK und SK wurden durch Zementleimzugabe auf einen Wasserzementwert von 0,50 und auf ein Ausbreitmaß von rd. 37 cm eingestellt. Einzelheiten über die Zusammensetzung, die Konsistenzmaße, den Mehlkorn-, Zementleim- und Mörtelgehalt sowie die Druck- und Biegezugfestigkeit sind Tafel 2 zu entnehmen.

Tafel 2 Eigenschaften des Betons AK 0/32 mm und SK 0/32 mm

Beton	AK	SK	
<b>1. Frischbeton</b>			
Zement A (PZ 350F)	320	306	kg/m <sup>3</sup>
Wasser	160	153	kg/m <sup>3</sup>
Zuschlag	1915	1961	kg/m <sup>3</sup>
Luftporen	17	11	dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Rohdichte	2395	2420	kg/m <sup>3</sup>
Ausbreitmaß	37	38	cm
Verdichtungsmaß	1,13	1,14	—
Vebe-Verformung	rd. 3	rd. 3	s
Mehlkorngehalt	435	425	kg/m <sup>3</sup>
Zementleimvolumen <sup>*)</sup>	278	261	dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Mörtelvolumen <sup>**)</sup>	495 (49 %)	483 (48 %)	dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
<b>2. Festbeton im Alter von 28 Tagen</b>			
<b>Druckprüfung</b>			
Rohdichte	(2,37+2,37+2,37) : 3 = 2,37	(2,39+2,39+2,40) : 3 = 2,39	kg/dm <sup>3</sup>
Druckfestigkeit	(387+402+382) : 3 = 390	(415+418+433) : 3 = 422	kp/cm <sup>2</sup>
<b>Biegeprüfung</b>			
Rohdichte	(2,37+2,38+2,36) : 3 = 2,37	(2,39+2,39+2,39) : 3 = 2,39	kg/dm <sup>3</sup>
Biegezugfestigkeit	l = 40 cm (40 + 52 + 48) : 3 = 47	(62 + 51 + 55) : 3 = 56	kp/cm <sup>2</sup>
	l = 20 cm (48 + 54 + 52) : 3 = 51	(71 + 63 + 66) : 3 = 67	kp/cm <sup>2</sup>

<sup>\*)</sup> einschließlich Luftporen; errechnet mit einer Dichte des Zements  $\rho_z$  von 3,16

<sup>\*\*)</sup> Anteile bei Beton AK bis 2 mm, bei Beton SK bis 4 mm; errechnet mit einer Rohdichte des Zuschlaggesteins  $\rho_G$  von 2,65

Demnach betrug der Mörtelgehalt aus Zement, Sand 0/2 mm bzw. 0/4 mm, Wasser und Luftporen (1,7 bzw. 1,1 %) bei Beton AK 49 % und bei Beton SK 48 %.

Die Konsistenzmaße beider Betone unterschieden sich praktisch nicht; sie lagen an der oberen Grenze des Konsistenzbereichs K 2. Beide Betone waren in der Masse beweglich und geschlossen sowie leicht verdichtbar; doch sonderten sie auf der Schüttung und am Rande gleichartig einzelne grobe Körner ab. Im ganzen erschien Beton SK beim Schütten etwas gleichmäßiger und weniger grobkörnig als Beton AK. Nach dem Verdichten zeigte sich bei diesem eine stärkere Mörtelanreicherung in der oberen Zone. Durch einen etwas verminderten Mörtelgehalt (Zementleimgehalt) hätte sich Beton AK wahrscheinlich stärker entmischt und wäre steifer sowie sperriger geworden. (Wegen des Mindestsandgehalts siehe Abschnitt 2.1, letzter Satz.)

Die Mehlkorngelhalte waren mit 435 und 424 kg/m<sup>3</sup> etwas größer als der in DIN 1045 mit 400 kg/m<sup>3</sup> angegebene „Richtwert“. Beton AK benötigte für gleiche Konsistenz mehr Zementleim als Beton SK. Entsprechend betrug der Zementgehalt des Betons AK 320 kg/m<sup>3</sup> und des Betons SK 306 kg/m<sup>3</sup> bzw. der Wassergehalt 160 und 153 kg/m<sup>3</sup>.

Aus den Betonen AK und SK wurden in gleicher Weise je 3 Würfel mit 20 cm Kantenlänge und 3 Balken 10 · 10 · 50 cm hergestellt. Sie lagerten bis zur Prüfung im Alter von 28 Tagen bei 20 °C, die Würfel 7 Tage unter feuchten Tüchern und 21 Tage in Raumluft (65 % rel. F.) und die Balken dauernd unter feuchten Tüchern.

Alle Würfel und Balken waren scharfkantig und wiesen geschlossene Flächen mit einigen wenigen Luftporen auf. Die Würfel wurden nach DIN 1048 Blatt 1 und die Balken mit einer mittigen Last bei 40 cm Auflagerentfernung geprüft. Mit einer der beiden Bruchhälften eines jeden Balkens wurde zusätzlich ein Biegeversuch bei 20 cm Auflagerentfernung ausgeführt. (Die andere Hälfte wird über längere Zeit Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt.) Bei der Prüfung wurde im wesentlichen folgendes festgestellt:

Die Druckfestigkeit des Betons SK fiel mit 422 kp/cm<sup>2</sup> um 8 % größer aus als die des Betons AK mit 390 kp/cm<sup>2</sup>.

Die Biegezugfestigkeit des Betons SK lag bei 40 cm Auflagerentfernung mit 56 kp/cm<sup>2</sup> um 19 % über der des Betons AK mit 47 kp/cm<sup>2</sup>. Bei 20 cm Auflagerentfernung wurde die „Biegezugfestigkeit“ für Beton SK zu 67 kp/cm<sup>2</sup> und damit um 31 % größer als für Beton AK erhalten, der eine „Biegezugfestigkeit“ von 51 kp/cm<sup>2</sup> aufwies. In den Bruchflächen der Biegebalken beider Betone verlief der Bruch um die groben Zuschlagkörner und bei Beton AK meist unregelmäßiger als bei Beton SK. Bei 20 cm Auflagerentfernung wich die Bruchfläche bei beiden Betonen weniger von der Lastebene ab und unterschied sich bei beiden Betonen nicht deutlich.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß beide Betone gleichen Wasserzementwert aufwiesen und sich in ihren Konsistenzmaßen und Verarbeitungseigenschaften praktisch nicht unterschieden. Die

Zusammensetzung war so gewählt worden, daß sie für beide Betone an der Grenze liegen dürfte, die unter günstigen Bedingungen noch eine leidliche Verarbeitbarkeit abgibt. Dafür benötigte der Beton AK bei etwa gleichem Mörtelgehalt etwas mehr Zementleim als Beton SK.

Mit Beton SK entstanden eine etwas größere Druckfestigkeit und deutlich größere Biegefestigkeiten als mit Beton AK.

Diese Feststellungen stehen im Einklang mit den Ausführungen in Abschnitt 3.3, wonach mit Beton SK wegen der gleichmäßigeren Spannungsverteilung, auch wegen der größeren Haftfläche, die das Zuschlaggemisch SK bietet, unter vergleichbaren Verhältnissen günstigere Festigkeiten zu erwarten sind als mit Beton AK. Mit diesem Sachverhalt kann insbesondere die hier deutlich überlegene Biegezugfestigkeit des Betons SK erklärt werden.

#### 4.1.5. Zerstörungsfreie Prüfung

Zur Beurteilung der Bauwerksfestigkeit mit dem Rückprallhammer bzw. Kugelschlaghammer wird in [28] erwähnt, daß man für Beton mit grobem Zuschlag und größerem Zuschlaggehalt im Mittel Werte erhält, die eine zu hohe Festigkeit vortäuschen. Untersuchungen, wie in dieser Hinsicht Beton AK zu beurteilen ist, liegen offenbar nicht vor.

In diesem Zusammenhang wäre auch zu klären, ob die für Beton SK häufig ermittelte Gestaltsabhängigkeit der Druckfestigkeit der Prüfkörper [29] oder das Verhältnis von Bohrkerndruckfestigkeit zur Würfeldruckfestigkeit bei grobkörnigem Beton AK ebenso angenommen werden können wie für Beton SK (Ausführungen in verschiedener Hinsicht zu solchen Fragen werden für Beton SK in [28] gemacht).

## 4.2. Dauerfestigkeit

### 4.2.1. Druckbeanspruchung

Wirkt eine hohe *gleichbleibende Dauerlast*, so kann die Druckfestigkeit abnehmen [30, 31]. Die Druckfestigkeit, die unendlich lange ertragen wird (Dauerstandsfestigkeit), liegt bei etwa 90 % der Kurzzeit-Druckfestigkeit [32]; sie wird z. T. auch noch kleiner angegeben [33].

Unter *oftmals wiederholter Belastung* durch schwingende Last verliert der Beton ebenfalls an Druckfestigkeit (Ermüdungsfestigkeit). Die größte Druckspannung  $\sigma_o$ , die oftmals ertragen wird, nimmt mit wachsender Schwingbreite  $\sigma_o - \sigma_u$  auf etwa das 0,6fache der Kurzezeitfestigkeit ab (Schwellfestigkeit bei  $\sigma_u = 0$ ).

Durchgesehene Untersuchungen enthalten nur Versuche mit Beton SK [z. B. 33, 34, 35, 36]. Dies scheint auch in den ausländischen Arbeiten der Fall zu sein; wenigstens finden sich keine Hinweise auf eine besondere Kornzusammensetzung des untersuchten Be-

tons [z. B. 37, 38, 39, 40, ferner 41, 42]. Von den Veröffentlichungen, die einer Durchsicht unterzogen wurden, ist hier beispielhaft nur ein Teil unter „Schrifttum“ aufgeführt.

#### 4.2.2. *Biegebeanspruchung*

Die Biegezugfestigkeit unter oftmals wiederholter Belastung wurde für Straßenbeton SK untersucht. Demnach liegt die Biegezugfestigkeit, die oftmals ohne Bruch ertragen wird, zwischen dem rd. 0,53- und 0,70fachen der Kurzzeit-Biegezugfestigkeit, je nach Alter und Lagerung der Probeplatten [43, 44]. Ähnliche, meist kleinere Werte finden sich auch in anderen Berichten [41, 42]. Auf die Kornzusammensetzung des Zuschlags wird nicht besonders eingegangen. Daher ist zu vermuten, daß nur Beton SK in die Untersuchungen einbezogen worden war.

Insgesamt drängt sich also die Frage auf, welche Dauerfestigkeiten und welcher Bruchvorgang für Beton AK mit seinem unstetigeren Gefüge und der geringeren Haftfläche zwischen Grobkorn und Mörtel zu erwarten sind (siehe auch Abschnitte 3.3, 6 und 7). Dazu fand sich lediglich eine allgemein gehaltene Aussage, wonach für stark zugbeanspruchten Beton Ausfallkörnungen mit besonders hervortretendem Größtkorn nicht verwendet werden sollen, weil ein unstetiges Gefüge die Dauerfestigkeit nachteilig beeinflusst [27].

### 5. **Schwinden, E-Modul, Kriechen**

Zu diesen Eigenschaften konnten nur spärlich Untersuchungen mit vergleichbaren Betonen AK und SK gefunden werden.

Bei Untersuchungen von Shacklock [45] mit Sand 0/2,4 mm und Zuschlag 9,5/19 mm oder Zuschlag SK 0/19 mm bewegte sich der Sandgehalt der zahlreichen Mischungen beim Beton AK zwischen 20 und 45 % (0/2,4 mm) und beim Beton SK zwischen 25 und 48 % (0/4,8 mm). Das Schwinden von Beton AK und SK gleicher Konsistenz mit 30 bzw. 35 % Sand und einem W/Z-Wert von 0,50 war bei einem Trocknungsbeginn im Alter von 7 Tagen oder von 28 Tagen gleich groß. Nur geringe Unterschiede zwischen Beton AK und SK fanden sich bei diesen Versuchen dann auch in der Druckfestigkeit und der Biegezugfestigkeit; siehe bezüglich der Druckfestigkeit ebenso [46].

Litvin und Pfeifer [47] berichten wohl über Versuche mit Beton AK aus Sand 0/2,4 mm und Kies 9,5/19 mm sowie einem Zementgehalt zwischen rd. 250 und 360 kg/m<sup>3</sup>. Entsprechender Beton SK wurde allerdings nicht mitgeprüft; für Beton AK ermittelte Prüfwerte werden mit denen von Beton SK aus gleichem Kies und mit gleicher Druckfestigkeit verglichen, die anderweitig erhalten wurden. Hierauf bezogen ergab sich, daß der Beton AK die folgenden Unterschiede aufwies:

- einen um 10 bis 30 % höheren E-Modul,
- ein um 28 bis 47 % geringeres Kriechen,
- ein um 27 bis 40 % geringeres Schwinden.

Bei einigen anderen Veröffentlichungen [z. B. 48], in denen von Beton AK die Rede ist, wird von diesen Feststellungen ausgegangen, teils unter Benutzung der Prüfwerte, teils werden sie zu pauschalen Folgerungen benutzt.

Andererseits ist nicht zu bezweifeln, daß jener Beton mit dem geringeren Mörtelgehalt bzw. Zementleimgehalt — also mit einem höheren Zuschlaganteil — unter vergleichbaren Verhältnissen allgemein einen größeren E-Modul sowie geringeres Kriechen [49, 50] und Schwinden liefert. Nach den Untersuchungen kann jedoch nicht befriedigend beantwortet werden, wie groß und bedeutsam Unterschiede zwischen Beton AK und Beton SK bei gleichem W/Z-Wert (Festigkeit), gleicher Verarbeitbarkeit und geringstmöglichem Mörtelgehalt nun wirklich auch sind.

## 6. Biegezugfestigkeit und Schwindspannungen

Vom Gefüge her stellt sich die Frage, ob überlagernde Gefügespannungen zwischen Mörtel und Grobzuschlag, die beim Schwinden auftreten, sich im Beton AK und SK unterschiedlich auf die Festigkeit auswirken. Durch Gefügespannungen können um Zuschlagkörner bei raschem Austrocknen auch kleine Anrisse entstehen und so durch Lockerung des Gefüges z. B. die Biegezugfestigkeit abmindern.

Bei den Versuchen in [23] wurden auch Platten aus Straßenbeton AK und SK (siehe Abschnitt 4.1.2) auf Biegezugfestigkeit geprüft. Die Platten lagerten 14 Tage feucht und dann 3 Monate in Raumluft, wobei sie alle 7 Tage während 3 Tagen einer Befeuchtung mit anschließender scharfer Trocknung ausgesetzt wurden. Die Biegeprüfung erfolgte nach weiteren 14 Tagen Raumluftlagerung im Alter von 3½ Monaten. Diese Behandlung sollte u. a. erkennen lassen, inwieweit sich eine Überlagerung von Schwindspannungen auswirkt. Auch Balken und Würfel wurden nach 3½ Monaten geprüft; sie lagerten jedoch 28 Tage feucht und dann in Raumluft.

Die Biegezugfestigkeit des Betons AK mit Rheinkiessand wurde bei 110 cm Stützweite um rd. 15 % kleiner als beim Beton SK erhalten (ähnlich auch bei den Balken), beim Beton AK mit Kalksteinsplitt als Grobzuschlag z. T. auch etwas größer.

Diese Versuche sollten vor allem klären, welchen Einfluß das Größtkorn bei Beton SK 0/50 mm bzw. Beton AK 0/50 mm verglichen mit Beton SK 0/30 mm hat. Dementsprechend wurde aus den umfangreichen Untersuchungen insgesamt folgert:

Mit grobkörnigeren Zuschlaggemischen mit stetigen Sieblinien wie auch aus Ausfallkörnungen ergaben sich, trotz teilweiser Verminderung des Wasserzementwerts, meist deutlich geringere Festigkeiten von 3½ Monate alten Straßenbetonplatten als mit üblich

zusammengesetztem Kiessand 0/30 mm<sup>4</sup>). Diese Feststellung wurde auch bei der Prüfung von gleichzeitig hergestellten Würfeln und Balken nach DIN 1048 nach 28 Tagen<sup>5</sup>) wie nach 3 1/2 Monaten<sup>4</sup>) bestätigt.

Bei den bereits angezogenen Versuchen [45] mit Zuschlag bis nur 19 mm Größtkorn fand sich der Abfall der Biegezugfestigkeit von 7 Tage unter Wasser und 21 Tage an der Luft gelagerten Prismen gegenüber der Biegezugfestigkeit nach 28tägiger Wasserlagerung beim Beton AK im Mittel nur wenig kleiner als beim Beton SK.

## 7. Bruchdehnung

Über die Dehnung  $\epsilon$  (Gesamtverformung) von Beton AK und SK unter der Bruchspannung  $\sigma_{max}$  beim Kurzzeitversuch waren nur in einer Veröffentlichung [51] einige Feststellungen für Beton 0/30 mm mit 300 kg Zement/m<sup>3</sup> und einem W/Z-Wert von 0,50 zu finden.

Folgende Werte ergaben sich für  $\epsilon_{\sigma_{max}}$  in ‰:

	Druck		Biegung mit		Spaltzug	Zug
	achsial	quer	1 Last	2 Lasten		
Beton AK	1,9	1,7	0,34	0,23	0,30	0,20
Beton SK	2,2	2,2	0,26	0,28	0,31	0,16

(Einzelheiten über die Verarbeitbarkeit, die Kornzusammensetzung und den Mörtelgehalt sowie die vorausgegangene Lagerung der Proben und die Kurzzeitfestigkeiten waren dem Bericht nicht zu entnehmen.) Die Dehnungen bei der Druckprüfung (Längsstauchung bzw. Querdehnung) waren beim Beton AK etwas geringer als beim Beton SK, bei der Biegeprüfung zeigte sich unterschiedliche Tendenz, bei der Zugprüfung war die Dehnung des Betons AK größer und bei der Spaltzugprüfung praktisch gleich groß. Weiter wurde bei der Druckprüfung gefunden, daß eine Volumenzunahme durch Gefügelockerung bei Beginn starker Ribbildung (sog. kritische Beanspruchung) im Beton AK bei etwa 80 ‰ und im Beton SK bei etwa 85 ‰ von  $\sigma_{max}$  auftrat.

Die beschränkte Untersuchung erlaubt allerdings noch keine bestimmten Folgerungen. Weil sie aber als einzige vorliegt, ist festzustellen, daß für Beton AK die Verformungsverhältnisse im Bruchbereich, wohl auch im Bereich der Gebrauchsspannungen, weniger bekannt sind als für Beton SK, für den zahlreiche Untersuchungen durchgeführt wurden.

## 8. Verschleißwiderstand

Der Widerstand von Betonbelägen aus Beton AK gegen Verschleiß kann wegen der in der Fläche vermehrt anstehenden groben Ge-

<sup>4</sup>) Prüfungen nach Luftlagerung; Prüfkörper mit Schwindspannungen

<sup>5</sup>) Prüfungen nach Feuchtlagerung; Prüfkörper ohne Schwindspannungen

steinskörner größer sein als bei vergleichbarem Beton SK [16, 52]. Dies setzt aber voraus, daß nur eine dünne Mörtelabschlußschicht vorhanden ist, deren Abnutzung nicht ins Gewicht fällt. Der Verschleißwiderstand einer dicken Mörtelabschlußschicht ist andererseits beim Beton AK kleiner anzunehmen als bei Beton SK, weil dessen Mörtel mehr Grobsand enthält.

Ist eine dünne Feinmörtelschicht über den groben Körnern des Betons AK jedoch abgenutzt, z. B. auf Autobahnen, so kann bei reinstufiger Ausfallkörnung durch die groben Körner im Extremfall ein verkleinertem Kopfsteinpflaster ähnliches Oberflächengefüge entstehen. Die Griffigkeit einer solchen Fläche kann geringer sein als die einer Fläche mit feinem, gleichmäßigerem Gefüge, wie es mit einem stetig aufgebauten Zuschlaggemisch zu erwarten ist [53], insbesondere wenn die groben Körner unter dem Verkehr glatt werden. Große Gleitbeiwerte, d. h. großen Reibungswiderstand für den Reifen, weisen Flächen mit gleichmäßig *feinprofilierter*, scharfer Rauheit auf [54].

Man sollte also nicht nur den Verschleiß, sondern auch den wichtigen Reibungswiderstand einer Betonfahrbahn bewerten. Dieser ist aber aus den oben kurz aufgeführten Gründen für Beton AK im allgemeinen kleiner anzunehmen als für Beton SK. In [55] wird entsprechend vermerkt: „Hier stellt sich die Aufgabe, Zementbetondecken so auszubilden, daß sehr grobes Korn von der Fahrbahnoberfläche ferngehalten wird.“

## 9. Temperatur

### 9.1. Frostwechsel bei durchfeuchtem Beton

Der Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel wurde in [45] für Beton AK und SK untersucht. Der Beton wurde in wassergefüllten Behältern Frost von rd.  $-22^{\circ}\text{C}$  ausgesetzt, in heißem Wasser aufgetaut und der Frostwiderstand durch Laufzeitmessung beurteilt. Daraus wird gefolgert, daß von den in ihren Festigkeitseigenschaften sonst ähnlichen Betonen AK und SK die Proben aus Beton SK sich „nahezu zweimal so widerstandsfähig wie jene mit Ausfallkörnung“ erwiesen.

An anderer Stelle [27] wird (ohne Unterlagen) mitgeteilt, daß die Frostwiderstandsfähigkeit von Beton AK gegenüber solchem mit stetig aufgebautem Zuschlag meist geringer ist.

Wenn ein geringerer Widerstand des Betons AK gegenüber Frost-Tau-Wechseln allgemein die Regel wäre, so kann dies, bei gleichem W/Z-Wert, vielleicht auf die im Beton AK sich stärker auswirkenden unterschiedlichen Wärmedehnzahlen von Mörtel und Grobzuschlag zurückgeführt werden. (Die Wärmedehnzahl des Mörtels ist in der Regel größer vorzusehen als die des Grobzuschlags.) Es könnten auch Gefügerisse beteiligt sein, die sich in der Mörtelmatrix um die groben Zuschlagkörner durch Schrumpfvorgänge im noch nicht erhärteten Beton bilden und die beim Beton SK wegen der stetigeren Kornverteilung weniger ausgeprägt anzunehmen sind.

## 9.2. Temperaturwechsel und hohe Temperatur

Gefügelockerungen können wegen der unterschiedlichen Wärmedehnzahlen von Mörtel und Grobzuschlag durch häufige und schroffe Temperaturwechsel auch im nicht durchfeuchteten Beton entstehen (wie auch durch häufige Wechsel zwischen schroffem Austrocknen und Durchfeuchten).

Auch die Einwirkung hoher Temperatur, wie z. B. bei Bränden, löst wegen der unterschiedlichen Wärmedehnung von Mörtel und Grobzuschlag Gefügespannungen aus. Sie sind beim Beton AK größer anzunehmen als beim Beton SK und daher vermutlich mit stärkerer Gefügelockerung und Rißflächenbildung verbunden. Über solche Vorgänge wird in anderem Zusammenhang in [56] berichtet. Auf den Einfluß eines unstetigen Gefügebraus wird dabei nicht eingegangen, wie auch in anderen Veröffentlichungen diese Frage nicht berührt wurde.

In diesem Zusammenhang seien kurz Feststellungen [50, 57] an Betonen mit verschiedenartigen Gesteinszuschlägen erwähnt, nach denen bereits durch Erwärmung von 20 °C auf rd. 90 °C ein Rückgang der Druckfestigkeit um 15 % bis zu 25 % festgestellt wurde. Dieser wurde auf Gefügespannungen durch unterschiedliche Wärmedehnung der beiden Komponenten zurückgeführt. Die Größe des Rückgangs hing von einem Verhältniswert aus E-Modul des Grobzuschlags und seiner Wärmedehnzahl ab. Ein Festigkeitsrückgang dieser Größe durch Temperaturerhöhung um 70 °C erscheint ungewöhnlich und würde ggf. die Frage aufwerfen, wie sich dabei ein Beton AK mit seinem hohen Grobkornanteil verhalten würde.

## 10. Wasserundurchlässigkeit

Wenn vorausgesetzt werden kann, daß im Beton AK vor Einwirkung von Druckwasser keine verstärkten Gefügelockerungen um die groben Zuschlagkörnungen stattfanden (z. B. durch Schrumpfen) und eine gute Haftung zwischen Mörtel und Grobzuschlag vorhanden ist, ist nicht zu erwarten, daß der Beton AK dem Eindringen von Druckwasser weniger Widerstand entgegensetzt als Beton SK mit gleichem W/Z-Wert.

Vergleichbare Betone wurden bei den Untersuchungen in [22], siehe Abschnitt 4.1.1, auf Wasserundurchlässigkeit nach DIN 1048 geprüft. Die Eindringtiefe des Wassers war bei beiden Betonen praktisch etwa gleich groß; sie erreichte im Mittel beim Beton AK 2,2 cm, beim Beton SK 2,6 cm und 1,7 cm beim Beton SK mit dem erhöhten Anteil der Korngruppe 2/8 mm.

## 11. Korrosionsschutz der Bewehrung

Bei Einhaltung der Bedingungen in DIN 1045 für den Korrosionsschutz, insbesondere auch der Forderung über einen ausreichenden Gehalt des Zuschlags an kleinen Korngrößen (siehe Abschnitt 3.1, letzter Absatz), dürfte die Bewehrung im Beton AK nicht weniger geschützt sein als im Beton SK. (Vgl. auch die Wassereindringung

tiefe in Abschnitt 10, die allerdings zu einem sehr mörtelreichen Beton AK [22] gehört; siehe Abschnitt 4.1.4.)

Ob bei Biegung, insbesondere unter schwingender Last, weniger, aber breitere, korrosionsfördernde Risse in der Betonüberdeckung aus Beton AK zu erwarten sind als beim Beton SK, ist ohne Versuche nicht zu beurteilen.

## **12. Chronologische Wiedergabe zusammenfassender Äußerungen aus dem benutzten Schrifttum über die Eigenschaften von Beton AK**

Unter 12.1 werden aus dem Schrifttum Äußerungen aufgeführt, zu denen keine Vergleichsversuche zwischen Beton AK und SK mitgeteilt wurden; sie heben allgemein Vorteile des Betons AK hervor. Die Äußerungen unter 12.2 finden sich im wesentlichen in Verbindung mit einzelnen, vergleichenden Untersuchungen; sie lauten einschränkender.

### **12.1. (1962 – 1973)**

- Mit Ausfallkörnungen ist für Spannbeton besser geeigneter Beton zu erzielen als mit den alle Korngrößen enthaltenden Sieblinien. – Mit Ausfallkörnungen erreicht man ohne Schwierigkeit die Güte B 600 [32].
- Zuschläge mit unstetiger Sieblinie bzw. Ausfallkörnung sind manchmal ohne augenscheinliche Nachteile verwendet worden [11].
- Beton mit Ausfallkörnungen ist gut verarbeitbar, ergibt hohe Festigkeit und liefert bei kleinerem Zementgehalt geringeres Schwinden und weniger Wärmeentwicklung [15].
- Unter bestimmten Voraussetzungen werden mit Ausfallkörnungen Betone mit vortrefflichen Festigkeits-, Schwind- und Kriechkennwerten erhalten [47].
- Der gute Zustand der Betonfahrbahndecken mit Ausfallkörnung, die seit 1960 auf norddeutschen Autobahnen hergestellt wurden, beweist, daß sie besonders widerstandsfähig gegen Spikes-Beanspruchungen sind [16].
- Unter der Voraussetzung, daß ein gut verarbeitbarer Beton entsteht, können Ausfallkörnungen vorteilhaft sein. – Für wenig schwindenden Beton soll (u. a.) möglichst Ausfallkörnung verwendet werden. – Ausfallkörnungen werden vor allem im Betonstraßenbau und für die Herstellung hochfester Betonfertigteile verwendet [18].
- Mit Ausfallkörnungen ist geringeres Schwinden und Kriechen erreichbar [30].

### **12.2. (1956 – 1974)**

- Grobkörnigere Zuschlaggemische mit stetigen Sieblinien, wie auch Ausfallkörnungen, ergaben meist deutlich geringere Fe-

stigkeiten als üblich zusammengesetzter Kiessand 0/30 mm [23].

- Mit zunehmender Zahl der Ausfallkörnungen werden die Mischungen sperriger. Solche Betone eignen sich hauptsächlich für maschinell verdichtete Betonwaren und Rüttelgrobbleton [14].
- Keine herausragenden Unterschiede zwischen Beton AK und Beton SK, mit der wahrscheinlichen Ausnahme des geringeren Frostwiderstands des Betons AK [45].
- Bei kleinerem Größtkorn (hier 30 mm) ist in der Regel (mit Beton AK) keine größere Druckfestigkeit zu erwarten, obwohl auch dabei der Zementleimanspruch im allgemeinen etwas kleiner ausfällt als mit einer stetigen Sieblinie [17].
- Von Zeit zu Zeit werden verschiedene Behauptungen über vorzügliche Eigenschaften des Betons mit Ausfallkörnungen aufgestellt, die jedoch nicht ausreichend begründet zu sein scheinen. – Es scheint daher, daß die ziemlich überspannten Behauptungen der Verfechter von Ausfallkörnungen nicht bestätigt sind. – Sowohl stetig zusammengesetzte Korngemische als auch solche mit Ausfallkörnungen können für die Herstellung guten Betons verwendet werden [25].
- Der Aufbau und die Beurteilung des Frischbetons mit Ausfallkörnungen erfordert besondere Umsicht, da der Beton mehr zum Entmischen neigt und Änderungen im Sand und im Wassergehalt sich verhältnismäßig stark auf die Verarbeitbarkeit auswirken. – Schließlich ist nicht von der Hand zu weisen, daß durch den unstetigen Gefügebau das Entstehen von Mikrorissen im Beton gefördert wird, daß die geringere Haftung des Zementsteins an glatten Körnern sich stärker auswirkt, daß im allgemeinen eine kleinere Bruchdehnung zu erwarten ist (auch Biegezugfestigkeit) und daß sich das Schrumpfen und gegebenenfalls ein Wasserabsondern unter dem erhöhten Grobkornanteil ungünstiger bemerkbar machen können [3].
- Für die Herstellung hochfester Normalbetone lassen daher stetige Kornzusammensetzungen, wie sie durch die Sieblinienbereiche gekennzeichnet sind, günstigere Ergebnisse erwarten als Ausfallkörnungen. – Ein stetiger Kornaufbau, der im Vergleich zu Ausfallkörnungen eine günstige Spannungsverteilung liefert, läßt sich durch Wahl entsprechender Korngruppen herstellen [21].
- Die Vergleichsversuche mit einer Ausfallkörnung ergaben keine erkennbaren betontechnologischen Vorteile [22].

### 13. Zusammenfassung

Für Beton mit Ausfallkorngemischen (Beton AK) wird häufig in Anspruch genommen, daß er wirtschaftliche und auch beton-technische Vorteile gegenüber Beton mit einem stetig aufgebauten Korngemisch (Beton SK) bietet. Angesichts der in manchen Gebieten zu beobachtenden stärkeren Verwendung von Beton AK

und dem daraus folgenden Überschuß an mittleren Korngruppen war zu untersuchen, was über die technischen Eigenschaften von Beton AK im Vergleich zu Beton SK bekannt ist. Denn häufig werden betontechnische Vorzüge des Betons AK nur von seiner Zusammensetzung und ohne Vergleich mit einem entsprechenden, sorgfältig aufgebauten Beton SK abgeleitet.

Zur Beurteilung der Verhältnisse wurde das beschaffbare Schrifttum ausgewertet und, soweit wie möglich, daraus auch Einzelheiten für Begründungen wiedergegeben.

Mit der Einschränkung, daß vielleicht einige Untersuchungen nicht bekannt wurden und daß die angezogenen Versuche nicht sehr zahlreich sind, können aufgrund dieser Literaturbearbeitung zusammenfassend folgende Aussagen gemacht werden.

1. Die Erkenntnisse über Beton AK sind allgemein weit geringer als über Beton SK, dabei nicht breit unterbaut, meist ohne Vergleichsbasis mit einem aufgabegerechten Beton SK, oder sie fehlen für bestimmte Eigenschaften überhaupt.
2. Wegen des besonderen Kornaufbaus des Zuschlaggemisches verlangt die Zusammensetzung des Betons AK in der Regel mehr Erfahrung und Umsicht als Beton SK, damit eine angemessene Verarbeitbarkeit ohne Neigung zum Entmischen gewährleistet ist. Beton AK soll daher in der Regel dem steiferen Konsistenzbereich angehören.
3. Der Sand- und Mörtelgehalt des Betons AK wird bei gleichem W/Z-Wert meist etwas kleiner angesetzt als bei *üblichem* Beton SK. Jedoch kann auch Beton SK bei umsichtigem Vorgehen mit gleichem Mörtelgehalt und guten Verarbeitungseigenschaften hergestellt werden (siehe dazu 4).
4. Ein Vergleich der Eigenschaften von Beton AK und Beton SK sollte nur mit Betonen angestellt werden, die auf gleiche Verarbeitbarkeit und gleichen W/Z-Wert (d. h. gleiche Festigkeit der Mörtelmatrix) abgestimmt sind, und wenn auch der Beton SK den geringstmöglichen Sandgehalt aufweist.
5. Man kann nicht voraussetzen, daß ein dem theoretischen Kornaufbau entsprechendes Gefüge des Betons AK auch im Bauteil überall gleichmäßig vorhanden ist. Dies kann für Beton SK weitergehend angenommen werden.
6. Durch Beanspruchungen können im Beton AK eine ungleichmäßigere Spannungsverteilung und größere Spannungsspitzen auftreten als im Beton SK, in dem eine größere Haftfläche zwischen Mörtel und Grobkorn zur Verfügung steht und der Kräfteverlauf durch die stetigere Kornverteilung gleichmäßiger aufgefächert wird.
7. Auf der Basis korrekter Vergleichbarkeit (siehe oben unter 4) fanden sich bei der Kurzzeitprüfung Druck- und Biegezugfestigkeiten, die beim Beton AK im allgemeinen kleiner ausfielen als beim Beton SK.
8. Es ist nicht bekannt, ob für Beton AK unter den gleichen Bedingungen und mit den gleichen Beziehungen Rückschlüsse von der Prüfung mit dem Rückprall- bzw. Kugelschlaghammer auf die

Würfeldruckfestigkeit möglich sind wie für Beton SK. Auch steht nicht fest, ob die Würfeldruckfestigkeit mit den gleichen Erfahrungswerten aus der Bohrkernfestigkeit wie für den Beton SK berechnet werden kann.

9. Über die Dauerfestigkeit (Dauerstandsfestigkeit, Druck- und Biegezugfestigkeit unter oftmals wiederholter Belastung) liegen für Beton SK zahlreiche Untersuchungen vor, die in den Bemessungsvorschriften für Betontragwerke berücksichtigt sind. Für Beton AK ist noch nicht untersucht worden, ob er etwa gleiche oder wegen seines unetigeren Gefüges kleinere Dauerfestigkeiten aufweist als Beton SK.

10. Zur Beurteilung des E-Moduls von Beton AK und SK konnten keine vergleichbaren Versuche (siehe oben unter 4) gefunden werden, auch nicht zur Beurteilung des Kriechens.

E-Modul, Kriechen und Schwinden werden für Beton AK überlegungsmäßig meist als günstiger bewertet als für einen *üblichen* Beton SK mit höherem Mörtelgehalt – der allerdings hierfür meist nicht optimal zusammengesetzt ist.

Unterschiede im Schwinden fanden sich zwischen vergleichsgerichtet angesetzten Betonen AK und SK nicht. Durch das Schwinden ausgelöste Eigenspannungen über den Querschnitt sowie Gefügespannungen im Mörtel um die größeren Zuschlagkörner verminderten die Biegezugfestigkeit des austrocknenden Betons AK z. T. deutlich oder – bei kleinerem Größtkorn – nur wenig mehr als die des Betons SK.

11. Wenn man vom Gefüge ausgeht, ist unter sonst gleichen Verhältnissen mit einiger Sicherheit zu folgern, daß bei Belastung ein Beton AK im Bruchbereich weniger dehnbar ist und schon früher feine Gefügerisse aufweist als Beton SK. Feststellungen hierzu sind lückenhaft. Es wurde lediglich angegeben, daß die Dehnung bei der Brucheinleitung mit zunehmendem Volumenanteil der Zuschläge (grobe Zuschläge) abnimmt und lediglich mit einem Versuch festgestellt, daß z. B. unter der größten Druckspannung die Längs- und Querdehnung des Betons AK deutlich kleiner war und der Beginn starker Ribbildung etwas früher auftrat als beim Beton SK.

12. Der Widerstand durchfeuchteten Betons AK gegen Frost-Tau-Wechsel war bei einer Laboratoriumsuntersuchung deutlich geringer gefunden worden als der des Betons SK. (Aus der Praxis sind hierzu noch keine Unterschiede bekanntgeworden.)

Über die Wirkung von Temperaturwechseln oder starker Temperaturerhöhung, wie im Brandfall, lagen keine Untersuchungen vor. Es ist aber nicht auszuschließen, daß das unetigere Gefüge des Betons AK wegen der unterschiedlichen Wärmedehnzahlen und E-Moduln von Mörtelmatrix und Grobzuschlag die Mikroribbildung und Gefügelockerungen begünstigt.

13. Nach einer Untersuchung, die allerdings mit Betonen AK und SK durchgeführt wurde, die beide einen hohen Mörtelgehalt aufwiesen, ergaben sich keine Unterschiede der Wassereindringtiefe.

Davon und vom bestimmenden Einfluß des Wasserzementwerts kann in etwa auch abgeleitet werden, daß sich im Korrosions-

schutz der Bewehrung beide Betone nicht unterscheiden, sofern man die Breite von Rissen, die in der Betonüberdeckung durch Biegebeanspruchung und Schwind- oder Temperaturspannungen entstehen können, beim Beton AK und SK gleich voraussetzen würde.

14. Der Verschleißwiderstand von Beton AK kann unter bestimmten Voraussetzungen größer angenommen werden als der von entsprechendem Beton SK. Doch wird auch gefolgert, daß bei Straßendecken der Reibungswiderstand (Gleitbeiwert) für den Fahrzeugreifen vermindert wird, wenn grobe Körner vermehrt in der Fahrbahnoberfläche anstehen, wie dies beim Beton AK der Fall ist.

### **Schlußbemerkung**

Zu dieser Abhandlung sah sich der Verfasser als früherer Obmann für die Neubearbeitung der DIN 4226 (Zuschlag) und des beton-technologischen Teils der DIN 1045 (Beton- und Stahlbetonbau) veranlaßt, weil die DIN 1045 jetzt eine Verwendung von Beton AK ausdrücklich erlaubt und DIN 4226 eine erweiterte Korngruppeneinteilung aufweist.

Zur Darlegung der mit der Verwendung von Beton AK zu beachtenden Verhältnisse waren manchmal vielleicht etwas pointiert anmutende Darstellungen, Vergleiche und Fragestellungen angezeigt. Dadurch wurde aber verdeutlicht, daß einige wenige, oft herausgestellte Eigenschaften des Betons AK nicht, wie häufig angenommen wird, denen des Betons SK selbstverständlich überlegen sind und daß sich Beton AK, je nach Beanspruchung, auch ungünstiger verhalten kann.

Es muß daher in jedem Fall überlegt werden, ob aus technischer Sicht die Verwendung eines Betons AK ohne weiteres angebracht ist. Schließlich wird offenkundig, daß die Erkenntnisse über Beton AK lückenhaft sind und durch eingehende Untersuchungen erweitert werden sollten.

### **SCHRIFTTUM**

- [1] Jüngst, W.: Forderungen der DIN 1045 und DIN 4226 an Betonzuschlag. Betonwerk + Fertigteile-Technik 40 (1974) H. 6, S. 385/391, und H. 7, S. 476/480.
- [2] DIN 1045: Beton- und Stahlbetonbau; Bemessung und Ausführung. Ausgabe Januar 1972. Beuth-Vertrieb, Berlin und Köln.
- [3] Walz, K.: Herstellung von Beton nach DIN 1045. 2. Auflage. Beton-Verlag, Düsseldorf 1972.
- [4] ACI Standard 211.1-74: Recommended Practice for Selecting Proportions for Normal Weight Concrete. Amer. Concr. Inst., Detroit 1970.
- [5] ACI Standard 318-71: Building Code Requirements for Reinforced Concrete. Amer. Concr. Inst., Detroit 1971.

- [6] ACI Committee Report: Commentary on Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71). Amer. Concr. Inst., Detroit 1972.
- [7] ACI Standard 301-72: Specification for Structural Concrete for Buildings (Revised 1973). Amer. Concr. Inst., Detroit 1973.
- [8] ACI Standard 304-73: Recommended Practice for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete. Amer. Concr. Inst., Detroit 1973.
- [9] ASTM C 33-71a: Standard Specification for Concrete Aggregates. Part 10, 1973 Annual Book of ASTM Standards, Amer. Soc. for Testing and Materials, Philadelphia 1973, S. 14/22.
- [10] Handbook for Concrete and Cement. Part II: Aggregates. Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.
- [11] Bureau of Reclamation: Concrete Manual. 7. Auflage, Denver 1963.
- [12] Li, S.: Selected bibliography on gap grading and gap-graded concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 67 (1970) S. 553/556.
- [13] Comité Européen du Béton (CEB) – Fédération Internationale de la Précontrainte (FIP): Internationale Richtlinien zur Berechnung und Ausführung von Betonbauwerken. Prinzipien und Richtlinien. 2. Auflage. London 1970.
- [14] Hummel, A.: Das Beton-ABC. 12. Auflage. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1959.
- [15] Ullrich, E.: Vorteile von Ausfallkörnungen. Die Bauwirtschaft 19 (1965) H. 28, S. 886/890, und H. 29, S. 915/919.
- [16] Reimer, B.: Erfahrungen mit Ausfallkörnungen beim Betondeckenbau in der Bundesrepublik Deutschland. Zement und Beton (Wien) Nr. 61/62 (1972) S. 32/36.
- [17] Albrecht, W., und H. Schäffler: Versuche mit Ausfallkörnungen. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 168, S. 1/32. Vertrieb durch Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1965.
- [18] Beton-Handbuch. Deutscher Beton-Verein E. V. Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1972.
- [19] Techn. Forschungs- und Beratungsstelle der Schweiz. Zementindustrie: Ausfallkörnung. Cementbulletin 40 (1972) Nr. 11.
- [20] Wischers, G., und M. Lusche: Einfluß der inneren Spannungsverteilung auf das Tragverhalten von druckbeanspruchtem Normal- und Leichtbeton. beton 22 (1972) H. 8, S. 343/347, und H. 9, S. 397/403; ebenso Betontechnische Berichte 1972, Beton-Verlag, Düsseldorf 1973, S. 135/163.
- [21] Lusche, M.: Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchtem Normal- und Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 39. Beton-Verlag, Düsseldorf 1972.
- [22] Untersuchungsbericht über Durchführung und Ergebnisse der Versuche zur Erhöhung des Kornanteils 2–8 mm bei der Herstellung von Beton. Institut für Transportbeton, Rätlingen, Juli 1974.
- [23] Bericht des Otto-Graf-Instituts vom 20. 12. 1956: Biegezugfestigkeit von Straßenbeton aus Zuschlagstoffen mit hohem Grobanteil bzw. mit Ausfallkörnungen. – Dazu Kurzbericht von W. Albrecht auf der Sitzung des „Arbeitsausschusses Versuche und Forschung“ der Arbeitsgruppe Betonstraßen am 17. 1. 1957 in Köln.
- [24] Walker, S., und D. L. Bloem: Effects of aggregate size on properties of concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 57 (1960/61) S. 283/298.
- [25] Neville, A. M.: Properties of Concrete. Pitman, London 1963; Reprint: Pitman Paperbacks, London 1970.

- [26] Dartsch, B.: Einfluß des Zuschlaggrößtkorns auf die Zusammensetzung und die Druckfestigkeit des Betons. *beton* 21 (1971) H. 10, S. 409/412; ebenso *Beton-technische Berichte* 1971, Beton-Verlag, Düsseldorf 1972, S. 139/149.
- [27] Schulze, W.: *Der Baustoff Beton*. Band 1: Zementgebundene Massen. 6. vollst. überarb. Auflage des Buches „Der Baustoff Beton und seine Technologie“. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1972.
- [28] Weigler, H.: *Bauwerksfestigkeit des Betons – Beurteilung und Bestimmung*. Vortrag anläßlich der Mitgliederversammlung des Güteschutzverbandes Beton B II-Baustellen E. V. am 15. Mai 1974 in Wiesbaden. (Beilage zum DBV-Rundschreiben Nr. 62/74.)
- [29] Bonzel, J.: Zur Gestaltsabhängigkeit der Betondruckfestigkeit. *Beton- und Stahlbetonbau* 54 (1959) H. 9, S. 223/228, und H. 10, S. 247/248.
- [30] Leonhardt, F., und E. Mönnig: *Vorlesungen über Massivbau*. Teil 1: Grundlagen zur Bemessung im Stahlbetonbau. 2. Auflage. Springer-Verlag, Berlin–Heidelberg–New York 1973.
- [31] Rüschi, H.: *Stahlbeton – Spannbeton*. Die Grundlagen des bewehrten Betons unter besonderer Berücksichtigung der neuen DIN 1045. Band 1: Werkstoffeigenschaften und Bemessungsverfahren. Werner-Verlag, Düsseldorf 1972.
- [32] Leonhardt, F.: *Spannbeton für die Praxis*. 2. Auflage. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1962.
- [33] Graf, O.: *Die Eigenschaften des Betons*. 2. neubearbeitete Auflage von W. Albrecht und H. Schäffler. Springer-Verlag, Berlin–Göttingen–Heidelberg 1960.
- [34] Graf, O., und E. Brenner: *Versuche zur Ermittlung der Widerstandsfähigkeit von Beton gegen oftmals wiederholte Druckbelastung*. Deutscher Ausschuß für Eisenbeton, Heft 76, S. 1/13. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1934.
- [35] Graf, O., und E. Brenner: *Versuche zur Ermittlung der Widerstandsfähigkeit von Beton gegen oftmals wiederholte Druckbelastung*. 2. Teil. Deutscher Ausschuß für Eisenbeton, Heft 83, S. 1/12. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1936.
- [36] Gaede, K.: *Über die Festigkeit und die Verformung von Beton bei Druck-Schwellbeanspruchung*, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 144, S. 1/48. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1962.
- [37] Murdock, J. W., und C. E. Kesler: *Effect of range of stress on fatigue strength of plain concrete beams*. *Proc. Amer. Concr. Inst.* 55 (1958/59) S. 221/231.
- [38] McCall, J. T.: *Probability of fatigue failure of plain concrete*. *Proc. Amer. Concr. Inst.* 55 (1958/59) S. 233/244.
- [39] Chang, T. S., und C. E. Kesler: *Fatigue behavior of reinforced concrete beams*. *Proc. Amer. Concr. Inst.* 55 (1958/59) S. 245/254.
- [40] Stelson, T. E., und J. N. Cernica: *Fatigue properties of concrete beams*. *Proc. Amer. Concr. Inst.* 55 (1958/59) S. 255/259.
- [41] Nordby, G. M.: *Fatigue of concrete – A review of research*. *Proc. Amer. Concr. Inst.* 55 (1958/59) S. 191/219. – Abeles Symposium: *Fatigue of concrete*. Publication SP-41, Amer. Concr. Inst., Detroit 1974.
- [42] *Deutscher Beton-Verein: Ermüdungsfestigkeit von bewehrtem und unbewehrtem Beton*. *Betonbau des Auslandes* Nr. 66 (Dezember 1958).
- [43] Graf, O.: *Aus Versuchen mit Betondecken der Reichskraftfahrbahnen, durchgeführt in den Jahren 1934 und 1935*. *Die Betonstraße* 11 (1936) H. 9, S. 193/203, H. 10, S. 235/241, und H. 11, S. 272/281.
- [44] Graf, O.: *Aus neueren Versuchen für den Betonstraßenbau*. *Straßenbau-Tagung 1938*. Volk und Reich Verlag, Berlin 1938, S. 157/178.

- [45] Shacklock, B. W.: Comparison of gap- and continuously-graded concrete mixes. Technical Report TRA/240. Cement and Concrete Association, London 1959.
- [46] McIntosh, J. D.: Concrete Mix Design. 2. Aufl., Cement and Concrete Association, London 1966.
- [47] Litvin, A., und D. W. Pfeifer; Gap-graded mixes for cast-in-place exposed aggregate concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 62 (1965) S. 521/537.
- [48] Li, S.: Proposed synthesis of gap-graded shrinkage-compensating concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 64 (1967) S. 654/661.
- [49] Wagner, O.: Das Kriechen unbewehrten Betons. Deutscher Ausschluß für Stahlbeton, Heft 131. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1958.
- [50] Report of a Working Party of the Materials Technology Divisional Committee: The Creep of Structural Concrete. Concrete Society Technical Paper No. 101 (Januar 1973), Concrete Society, London 1974.
- [51] Bonzel, J.: Ein Beitrag zur Frage der Verformung des Betons. beton 21 (1971) H. 2, S. 57/60, und H. 3, S. 105/109; ebenso Betontechnische Berichte 1971, Beton-Verlag, Düsseldorf 1972, S. 33/54.
- [52] Springenschmid, R., und H. Sommer: Untersuchungen über die Verschleißfestigkeit von Straßenbeton bei Spikereifen-Verkehr. Straße und Autobahn 22 (1971) H. 4, S. 136/141.
- [53] Walz, K.: Einfluß der Zusammensetzung und der Oberflächentextur von Straßenbeton auf die Griffigkeit. beton 17 (1967) H. 10, S. 369/373, und H. 11, S. 403/406; ebenso Betontechnische Berichte 1967, Beton-Verlag, Düsseldorf 1968, S. 121/142.
- [54] Schulze, K.-H.: Typen der Oberflächenfeingestalt und ihre Wirkung auf den Reibungswiderstand bei Nässe. Bericht des Inst. für Straßen- und Verkehrswesen der Techn. Universität Berlin, Heft 2 (1970) S. 185/211. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin 1970.
- [55] Dames, J., und K.-H. Schulze: Griffigkeitsmessungen bei hohen Geschwindigkeiten. Straße und Autobahn 25 (1974) H. 7, S. 269/271.
- [56] Meyer-Oltens, C.: Verhalten von Betonbauteilen im Brandfall. beton 24 (1974) H. 4, S. 133/136, und H. 5, S. 175/178.
- [57] Blundell, R.: Structure solid mechanics and engineering design. The Proceedings of the Southampton 1969 Civil Engineering Conference, Bd. 2. Wiley Interscience, London-New York 1971, S. 1171-1172.