

3 Entwurfskriterien und Zusammensetzung

3.1 Variationsmöglichkeiten des 5-Stoff-Systems

Die Variationsmöglichkeiten des *5-Stoff-Systems* für den verarbeitbaren „frischen“ Mörtel und Beton sowie für den erhärteten Baustoff sind fast unbegrenzt. **Tafel II.3.1-1** vermittelt in Ergänzung zu **Tafel II.1.1-1** einen Eindruck von der Vielfalt der Kombinationsmöglichkeiten der Betonausgangsstoffe für die Matrix und das Korngerüst, um die technischen und wirtschaftlichen Anforderungen der Bauausführung zu erfüllen. Maßgeblich für die Betonzusammensetzung sind i. d. R. nur wenige grundlegende Anforderungen. Die häufig sehr vielfältigen weiteren Anforderungen werden von entsprechend zusammengesetzten Betonen i. d. R. ohne weitere Nachweise erfüllt (s. Abschnitt II.3.4).

Da die oberflächliche Bearbeitung die einzig mögliche Veränderung am erhärteten Beton ist, müssen im Frischbeton alle Eigenschaften angelegt sein, die für die Herstellung, den Transport und die Verarbeitung erforderlich sind und die nach der Erhärtung unter planmäßigen Bedingungen zu den verlangten Gebrauchseigenschaften führen.

Deshalb ist es wichtig, dass der Bauausführende und der Betonhersteller alle notwendigen Planungs-, Bemessungs- und Konstruktionsannahmen sowie die damit verbundenen Anforderungen an die Frisch- und Festbetoneigenschaften zur Kenntnis erhalten, um den Beton gezielt zusammensetzen, herstellen, transportieren und verarbeiten zu können. Umgekehrt ist es

Tafel II.3.1-1: Beton als 5-Stoff-System

Stoff	Beispiele für die Varianten
Zement	<ul style="list-style-type: none">• Zementart, -festigkeitsklasse• Zementgehalt• besondere Eigenschaften
Gesteinskörnung	<ul style="list-style-type: none">• Rohdichte (normal, leicht, schwer)• natürlich, künstlich Sand, Kies Brechsand, Splitt• Kornaufbau, Sieblinie• besondere Eigenschaften
Wasser	<ul style="list-style-type: none">• Begrenzung betonschädlicher Inhaltstoffe
Zusatzstoffe	<ul style="list-style-type: none">• Flugasche, Trass, Silicastaub• Gesteismehl• Pigmente, Kunststoff (-dispersion)• Fasern (Stahl, Glas, Kunststoff)
Zusatzmittel	<ul style="list-style-type: none">• BV, FM, LP, DM, VZ, BE, ST, CR, RH

erforderlich, dass der Ausführende erkennbar unzureichende, falsche oder unerfüllbare Anforderungen reklamiert, um eine plangerechte Ausführung sicherzustellen. In diesen Zusammenhang gehört z. B. auch, dass der Ausführungstakt und die damit verbundene Früh- und Endfestigkeit des Betons bereits während der Planung berücksichtigt werden.

Tafel II.3.1-2 nennt wesentliche *Frischbetoneigenschaften*, die ggf. für den Mischungsentwurf festgelegt und durch die Betonzusammensetzung erreicht werden müssen. Bei besonderen Herstell-, Transport- und Verarbeitungsverfahren können die Anforderungen an den Frischbeton sehr umfangreich sein.

Tafel II.3.1-2: Beispiele für Entwurfseigenschaften (Leistungsmerkmale) von Frischbeton

Verarbeitbarkeit (Konsistenz)^{*)}
Verarbeitbarkeitszeit
Entmischungsneigung
– Wasserrückhaltevermögen (kein „Bluten“)
– Absetzen von Feinmörtel
– Sedimentation der groben Gesteinskörnung
– Aussondern von Grobkorn beim Verformen und beim Aufprall (Zusammenhaltevermögen)
Ansteifverhalten
Grünstandfestigkeit
Kapillarschwinden (Frühschwinden)

^{*)} Klasseneinteilung nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 (s. Tafeln II.1.1-2, II.3.2-1, II.4.2-1 und IV.3-4 bis IV.3-7)

Durch den Einsatz von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen ist es möglich, die erforderlichen Frischbetoneigenschaften fast unabhängig von den geforderten *Festbetoneigenschaften* zu erfüllen. **Tafel II.3.1-3** nennt eine Auswahl von Festbetoneigenschaften, die ggf. als Anforderung vom Planer und Konstrukteur und bei der Bauausführung berücksichtigt werden müssen.

Die maßgebenden *Entwurfseigenschaften* sind in DIN 1045-1 sowie DIN EN 206-1/DIN 1045-2 als *Leistungsklassen* mit vorgegebener Bandbreite definiert (s. Tafel II.1.1-2 und Tafeln IV.3-1 bis IV.3-11). Die Zielgrößen für den Betonentwurf sind so zu wählen, dass die geforderten Mindest- und/oder Höchstwerte der jeweiligen Leistungsmerkmale mit ausreichender Sicherheit eingehalten werden können. Der Nachweis darüber ist durch Erst- und Überwachungsprüfungen und in der Regel eine statistische Auswertung oder durch eine Einzelwertbetrachtung der Prüfergebnisse zu führen (s. Abschnitt II.17).

Tafel II.3.1-3: Beispiele für erforderliche Entwurfseigenschaften von Festbeton

Festigkeit (Einaxiale/mehraxiale Beanspruchung)		
<ul style="list-style-type: none"> ● Druckfestigkeit <ul style="list-style-type: none"> – normalfester Beton^{*)} – hochfester Beton^{*)} – Leichtbeton^{*)} ● Zugfestigkeit (Biegezug, Spaltzug, zentr. Zug) ● Verbundfestigkeit ● Schlagzähigkeit und Bruchenergie 		
Verformungsverhalten^{**)}		
<ul style="list-style-type: none"> ● lastabhängig <ul style="list-style-type: none"> – Elastizitätsmodul – Schubmodul – Bruchdehnung (Zug/Druck) – Kriechen 	<ul style="list-style-type: none"> ● lastunabhängig <ul style="list-style-type: none"> – Temperatur – Schwinden 	
Rohdichte		
● Normalbeton	● Leichtbeton ^{*)}	● Schwerbeton
Dichtheit		
● gegen Wasser, organische Flüssigkeiten, Gase		
Dauerhaftigkeit unter Umwelteinwirkungen		
Widerstand gegen		
<ul style="list-style-type: none"> ● Bewehrungskorrosion <ul style="list-style-type: none"> – Carbonatisierungswiderstand^{*)} – Widerstand gegen Chloriddiffusion^{*)} – Widerstand gegen Chloriddiffusion aus Meerwasser^{*)} 	<ul style="list-style-type: none"> ● Betonkorrosion <ul style="list-style-type: none"> – Frostwiderstand ohne und mit Taumittleinsatz^{*)} – Widerstand gegen chemische Angriffe^{*)} (Säuren, Sulfat) – Hydrolysewiderstand – Verschleißwiderstand^{*)} – Vermeidung von Alkali-zuschlagreaktion^{***)} 	
Feuerwiderstand^{****)}		

Klasseneinteilung nach: ^{*)} DIN EN 206-1/DIN 1045-2; ^{**)} DIN 1045-1; ^{***)} DAfStb-Richtl. [Ri: 13]; ^{****)} DIN 4102

3.2 Entwurfsgrundlagen für Frischbeton

Die maßgebenden Anforderungen an den *Frischbeton* ergeben sich aus dem vorgesehenen Ablauf für das Herstellen, Transportieren und Verarbeiten des Betons sowie aus den erforderlichen Verarbeitbarkeitseigenschaften während der Verarbeitungsdauer. Die dafür in Frage kommenden Beurteilungskriterien sind als Frischbetoneigenschaften in Tafel II.3.1-2 genannt.

Die wichtigsten Frischbetoneigenschaften sind die *Konsistenz* als Maß für die *Verarbeitbarkeit* und die *Verarbeitbarkeitszeit* nach Ankunft auf der Baustelle. Beide müssen dem Hersteller des Betons vom Bauausführenden so vorgegeben werden, dass der Beton in der zur Verfügung stehenden Zeit fehlerfrei gefördert, verteilt und vollständig verdichtet werden kann. Die in Deutschland gebräuchlichen *Konsistenzbereiche* und die diesen in DIN EN 206-1 zugeordneten Ausbreitmaß- bzw. Verdichtungsmaßklassen der DIN 1045-2 sind in **Tafel II.3.2-1** zusammengefasst.

Für die so genannte „*Grünstandfestigkeit*“, eine sehr steife KonsistenzEinstellung und wichtige Eigenschaft bei der Betonwarenerstellung mit sofortiger Entformung, gibt es in DIN EN 206-1/ DIN 1045-2 keine brauchbare Unterteilung im Konsistenzbereich C0 und auch keine durch Prüfverfahren definierte Verdichtungsmaßklasse, weil diese Eigenschaft nur bauteilbezogen definiert werden kann (s. Abschnitt II.11.1). „Steife“ bis „plastische“ Konsistenzen werden z. B. im Straßenbau verwendet. Für bewehrte Bauteile auf Baustellen werden in der Regel alle Konsistenzen von „plastisch“ bis „sehr fließfähig“ angewendet. Selbstverdichtende Betone weisen eine sehr fließfähige Konsistenz auf, die u. a. dadurch gekennzeichnet ist, dass sich der Beton ohne Schlag auf dem Ausbreittisch auf mehr als 65 cm Durchmesser ausbreitet (s. Abschnitt II.4.6).

Tafel II.3.2-1: Konsistenzbereiche und Konsistenzklassen nach DIN 1045-2

Konsistenzbereiche	Konsistenzklassen ^{*)}	
	Verdichtungsmaß	Ausbreitmaß
sehr steif	C0	–
steif	C1	F1
plastisch	C2	F2
weich	C3	F3
sehr weich	–	F4
fließfähig	–	F5
sehr fließfähig	–	F6

^{*)} Die verschiedenen Konsistenzklassen sind nicht direkt aufeinander beziehbar [Bon2]

Tafel II.3.2-2: Einflussgrößen zur Steuerung der Frischbetonkonsistenz

Bestandteil	Einflussgröße
Leim (Mehlkorn- suspension)	rheologische Eigenschaften in Abhängigkeit von der stofflichen Zusammensetzung
	Volumenanteil
Gesteinskörnung	Art (rund, gebrochen, Rohdichte)
	Kornaufbau (Sieblinie)

Steuerbar ist die Konsistenz des Frischbetons im Wesentlichen durch die rheologischen Eigenschaften und den Volumenanteil des Leims (Mehlkornsuspension) sowie durch Art und Kornaufbau der Gesteinskörnung (siehe **Tafel II.3.2-2** und Abschn. II.4).

Vollständig verdichtbare Konstruktionsbetone mit ausreichendem Zusammenhaltevermögen sollen ein Mindestleimvolumen von rd. 260 l/m^3 besitzen. Durch ein höheres Leimvolumen mit gleichen rheologischen Eigenschaften lässt sich die Konsistenz kontinuierlich steigern. Ab einem Leimvolumen von rd. 280 l/m^3 lässt sich die Konsistenz auch erfolgreich mit verflüssigenden Zusatzmitteln steigern. Die **Bilder II.3.2-1** und **II.3.2-2** zeigen diese Zusammenhänge für Konstruktionsbetone mit unterschiedlichen Zementleimgehalten, Wasserzementwerten und Fließmitteldosierungen [Thi2].

Betone mit sehr steifer und mit steifer Konsistenz besitzen die für die Werkfertigung vieler Betonwaren erforderliche Grün-

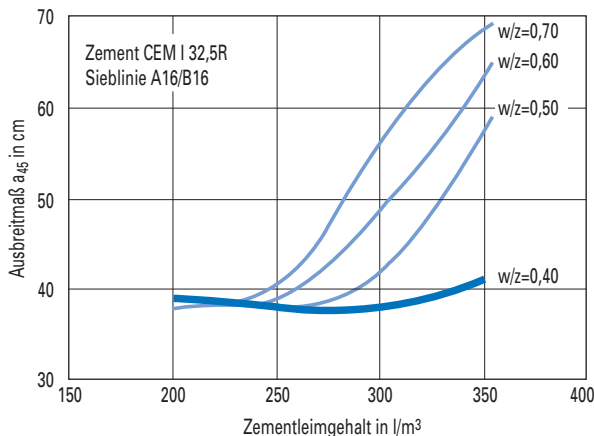


Bild II.3.2-1: Steigerung der Konsistenz von Konstruktionsbeton durch Erhöhung des Zementleimgehalts bzw. durch Änderung der rheologischen Eigenschaften des Zementleims infolge einer Erhöhung des Wasserzementwerts

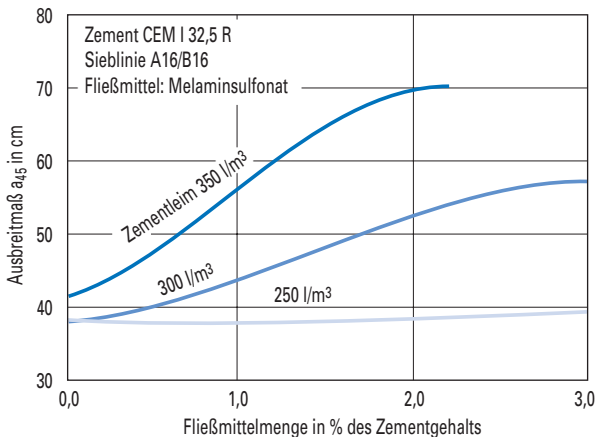


Bild II.3.2-2: Steigerung der Konsistenz von Konstruktionsbeton durch Änderung der rheologischen Eigenschaften des Zementleims infolge Zugabe von Fließmittel bei einem Wasserzementwert von $w/z = 0,40$ und drei unterschiedlichen Zementleimgehalten

standfestigkeit. Voraussetzung dafür sind Leimgehalte $< 250 \text{ l/m}^3$ und niedrige Wasserzementwerte ($w/z < 0,40$), d. h. geringe Leimschichtdicken um die Gesteinskörner und hohe Viskosität des Zementleims (s. Abschnitt II.11.1).

3.3 Entwurfsgrundlagen für Festbeton

3.3.1 Anforderungen

Die maßgebenden Anforderungen an den *Festbeton* ergeben sich aus Beanspruchungen durch Last und Zwang (direkte und indirekte Einwirkungen) sowie durch chemische und physika-

liche Beanspruchungen, die auf das herzustellende Bauwerk bzw. Bauteil einwirken.

Beispiele für häufig erforderliche Festbetoneigenschaften sind in Tafel II.3.1-3 angegeben. Sie setzen sich aus den Eigenschaften des Zementsteins bzw. der Matrix, den Eigenschaften des Korngerüsts und dem Verbund zwischen Matrix und Gesteinskörnung (s. Tafel II.1.1-1) zusammen.

Einflussgrößen sind z. B.

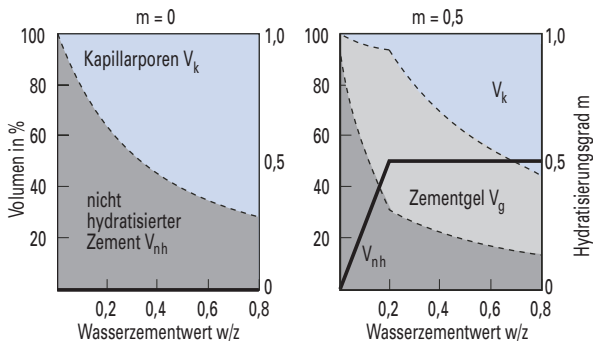
- die physikalischen und chemischen Merkmale aller Ausgangsstoffe,
- die Volumenanteile der Ausgangsstoffe innerhalb der Matrix und des Korngerüsts,
- die Art und der Hydratationsgrad aller hydrationsfähigen Bestandteile,
- das Gefüge der erhärteten Matrix, ihre chemischen und physikalischen Merkmale sowie die Porenwasserzusammensetzung (s. auch Abschn. I.4.2).

Die Tafeln IV.3-8 und -9 enthalten die Festigkeitsklassen für Normal- und Leichtbeton. Tafel IV.3-10 zeigt die Rohdichteklassen für Leichtbeton.

Bauteile müssen gemäß den bauordnungsrechtlichen Vorgaben dauerhaft sein, d. h. sie müssen die erforderlichen Gebrauchseigenschaften über eine planmäßige Nutzungsdauer ohne größere Instandsetzungsarbeiten aufweisen. Für Bauteile, die nach DIN 1045-1 bis 4 und DIN EN 206-1 geplant und ausgeführt werden, wird angenommen, dass die planmäßige Nutzungsdauer rd. 50 Jahre beträgt.

3.3.2 Wasserzementwert

Ein geringes Verhältnis von Wasser zu Zement (*Wasserzementwert* w/z) bzw. von Wasser zu Zement und zu den an der



Hydratation beteiligten Zusatzstoffen (äquivalenter Wasserzementwert $w/z_{(eq)} = w/(z + k_1 \cdot f + k_2 \cdot s)$ (s. Abschnitt II.2.2.2)) sowie ein hoher Hydratationsgrad vermindern das *Porenvolumen* innerhalb der Matrix. Ein geringes Kapillarporenvolumen erhöht die Festigkeit der Matrix und vermindert die *Durchlässigkeit*. Damit werden alle Gebrauchseigenschaften des Betons in Richtung auf eine höhere Leistungsfähigkeit verändert. **Bild II.3.3-1** [Hil1] zeigt die Volumina der *Kapillarporen*, des *Zementgels*, des nicht hydratisierten Zements sowie des Hydratationsgrads in Abhängigkeit vom Wasserzementwert. Eine vollständige Hydratation kann erst ab einem $w/z \geq 0,40$ erreicht werden. Die Bedeutung eines niedrigen Wasserzementwerts und eines dabei unter ausreichender Nachbehandlung erreichbaren hohen Hydratationsgrads für ein geringes Kapillarporenvolumen und damit für die Festigkeit und die Dauerhaftigkeit von Beton wird hieran besonders deutlich (s. Abschnitt II.7, II.9.6 und I.4.2).

Der weit reichende Einfluss des Wasserzementwerts auf die Festigkeit und Dichte des Zementsteins ermöglicht es, die Druckfestigkeit von Mörtel und Beton mit dichter normaler

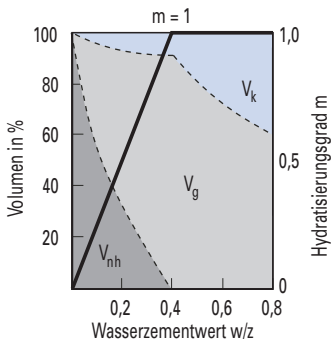


Bild II.3.3-1: Der Einfluss des Wasserzementwerts w/z auf den Hydratisierungsgrad m sowie auf die Volumenanteile des nicht hydratisierten Zements V_{nh} , des Zementgels V_g und der Kapillarporen V_k in Zementstein (konservierte Lagerung), nach [Hil1]

Gesteinskörnung in Abhängigkeit von der *Normdruckfestigkeit* des Zements und vom Wasserzementwert anzugeben. Diese auch als „Walz-Kurve“ bekannte Beziehung zeigt **Bild II.3.3-2** [Wal2, Wes2, Wes1]. Die Kurve wurde auf der Grundlage von Untersuchungsergebnissen des Forschungsinstituts der Zementindustrie ermittelt und aufgrund neuer Prüfergebnisse für niedrige Wasserzementwerte ergänzt. Sie bezieht sich auf die mittlere 28-Tage-Druckfestigkeit ($f_{cm, dry, cube}$) von Betonwürfeln mit 150 mm Kantenlänge, die gemäß DIN 1048 gelagert wurden.

3.3.3 Verformungen unter Last

Die lastabhängigen, elastischen Verformungen des Festbetons lassen sich durch die *Elastizitätsmoduln* von Zementstein und Gesteinskörnung sowie durch ihre jeweiligen Volumenanteile steuern. Die Gesteinskörner natürlicher Herkunft für normalfeste und hochfeste Betone weisen in der Regel eine höhere Festigkeit und einen höheren E-Modul auf als der Zementstein der Matrix (s. **Tafel II.3.3-1**). Daraus folgt, dass die Spannungstrajektorien

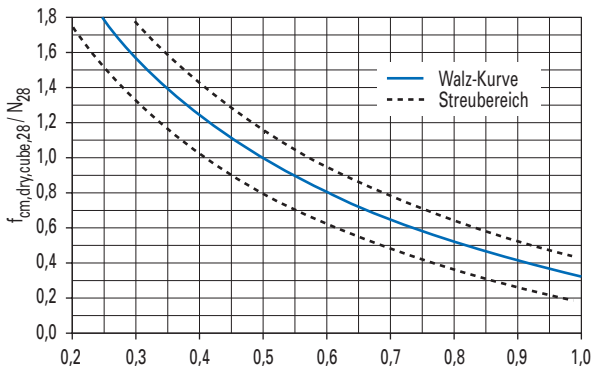


Bild II.3.3-2: Relative Druckfestigkeit von Beton in Bezug auf die Zementnormdruckfestigkeit in Abhängigkeit vom Wasserzementwert (LP-Gehalt 1,5 Vol.-% in Anlehnung an die „Walz-Kurve“ ist enthalten) [Wal2, Wes2, Wes1]

Tafel II.3.3-1: Druckfestigkeiten, Zugfestigkeiten und E-Moduln von Zementstein, Gesteinskörnung, Normalbeton und Leichtbeton sowie hochfestem Beton

Stoff	Druckfestigkeit in N/mm ²	Zugfestigkeit in N/mm ²	E-Modul in kN/mm ²
Zementstein	35 bis 70	4 bis 15	5 bis 20
Gesteins- körnung	50 bis 300	10 bis 20	10 bis 100
Leichtbeton	13 bis 55	1 bis 3,5	14 bis 26
Normalbeton	15 bis 55	1 bis 5	20 bis 40
hochfester Beton	65 bis 115	4 bis 6	40 bis 45

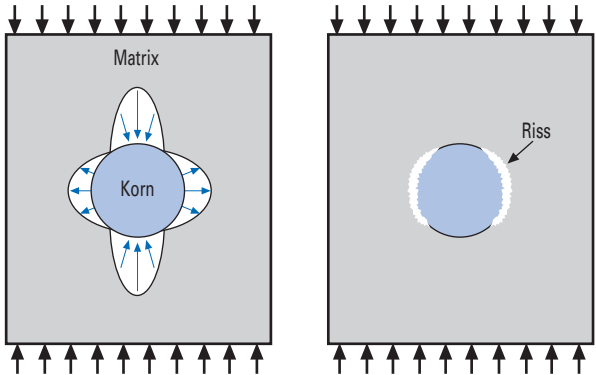


Bild II.3.3-3: Modell zur Spannungsverteilung und Rissbildung von druckbeanspruchtem Normalbeton

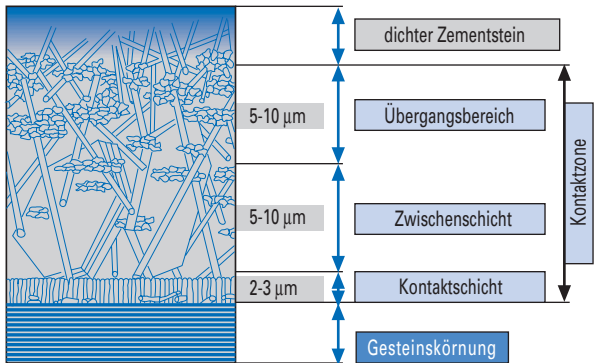


Bild II.3.3-4: Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung

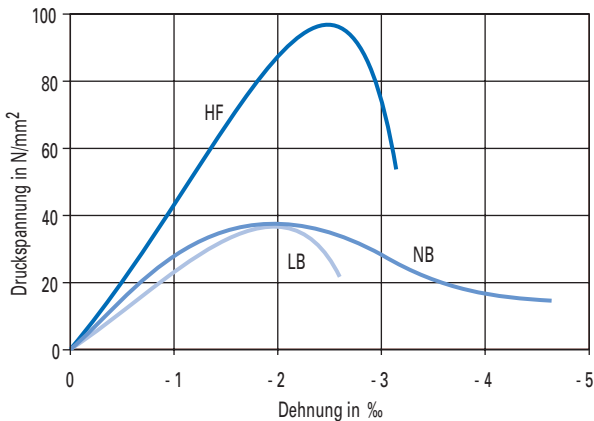


Bild II.3.3-5: Typische Verläufe für Spannungs-Dehnungs-Linien von normalfestem (NB) und hochfestem (HF) Beton sowie Leichtbeton (LB)

unter Last gekrümmt verlaufen und im Verbundbereich zwischen Korn und Matrix Zugbeanspruchungen auftreten (**Bild II.3.3-3**) [Lus1]. Gerade hier ist das Gefüge des Zementsteins in der Regel jedoch über eine Tiefe von 10 bis 20 μm durch eine Anreicherung von Calciumhydroxid und eine erhöhte Porosität geschwächt (s. **Bild II.3.3-4**) [Reh1]. Infolge der Zugspannungen treten bei zunehmender Belastung zuerst in der Verbundzone Mikrorisse auf, die mit einer Spannungsumlagerung verbunden sind. Diese Umlagerung bewirkt das nicht lineare *Verformungsverhalten* des Betons unter Laststeigerung bis zum Bruch, das sich in Form eines abnehmenden „E-Moduls“ darstellt (s. **Bild II.3.3-5**) [Sie1]. Der Elastizitätsmodul für Beton der Festigkeitsklasse C25/30 mit natürlicher Gesteinskörnung (Sand, Kies) beträgt rd. 30 000 N/mm^2 .

Das nicht lineare Verformungsverhalten ist umso geringer ausgeprägt, je höher die Matrixfestigkeit und je besser der Verbund zwischen Matrix und Körnung sind. Dies ist der Fall bei Leichtbeton wegen der geringeren Kornfestigkeit und der rauen, wassersaugenden, reaktionsfähigen Oberfläche sowie bei hochfestem Beton wegen der hohen Festigkeit der Matrix und der ungeschwächten Kontaktzone, wenn reaktive silicatische Feinstoffe, wie z. B. Silicastaub, als Betonzusatzstoff verwendet werden. Alle Maßnahmen, die den Verbund zwischen Matrix und Gesteinskörnung erhöhen, verbessern die Gebrauchseigenschaften des Festbetons, insbesondere Festigkeit und Dichtheit.

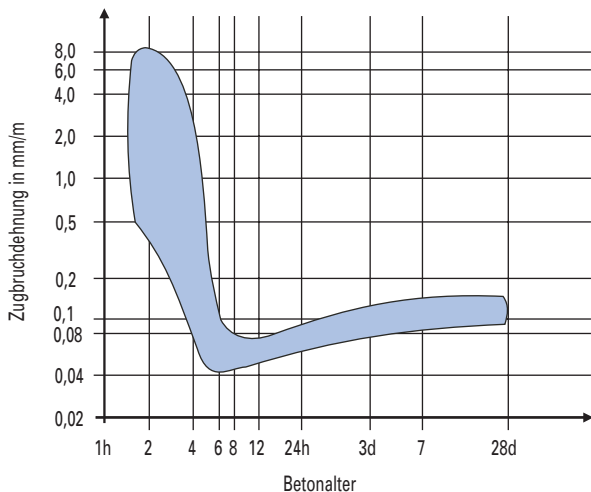


Bild II.3.3-6: Entwicklung der Zugbruchdehnung von Normalbeton vom plastischen bis zum erhärteten Zustand

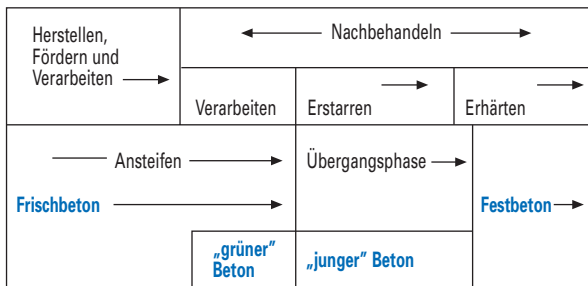


Bild II.3.3-7: Definition für „grünen“ Beton und „jungen“ Beton

Dazu dienen in erster Linie ein niedriger Wasserzementwert, eine raue Kornoberfläche (Splitt) sowie ein besonders dichter und fester Zementstein in der Kontaktzone. Die Entwicklung von *Hochleistungsbetonen* beruht ebenfalls maßgeblich auf einer Gefügeverbesserung dieser Kontaktzone (s. Abschnitt II.5).

Wegen der wesentlich höheren Dichtheit des Gefüges von Hochleistungsbetonen unterscheiden sich diese in ihrem Gebrauchsverhalten von üblichen Betonen. Die praxiserprobten Entwurfsregeln können deshalb auf Beton mit Nennfestigkeiten von über 95 N/mm^2 nur bedingt übertragen werden. Aus diesem Grund fordert DIN 1045-2 eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall für Beton der Druckfestigkeitsklassen C 90/105 und C 100/115 sowie für hochfeste Leichtbetone der Druckfestigkeitsklassen LC 70/77 und LC 80/88.

Die *Zugbruchdehnungen* aller Festbetone liegen durchweg im Bereich von 0,1 ‰ bis 0,15 ‰, bei jungem Beton nach dem Erstarren noch niedriger (**Bild II.3.3-6**) [Wie1, Wei2, Hin1].

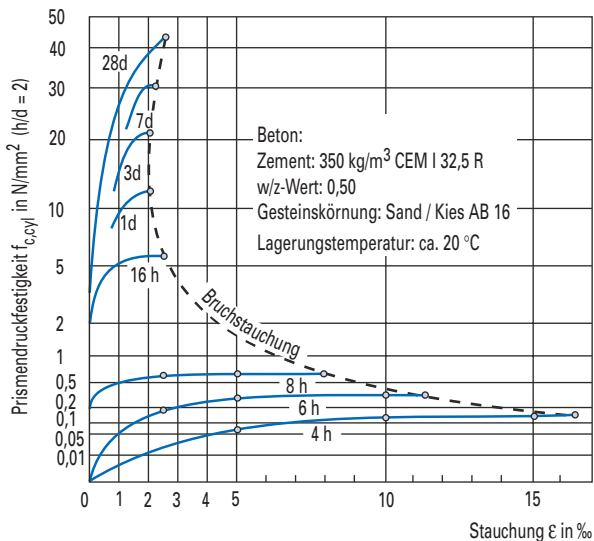


Bild II.3.3-8: Spannungs-Stauchungs-Linien in Abhängigkeit vom Alter des Betons nach Ergebnissen von Wierig [Wie1, Gru1]

Als „jungen“ Beton bezeichnet man Beton [Wei2], der sich im Übergangsstadium zwischen Erstarrungsbeginn und einem frühen Erhärtungszustand befindet (**Bild II.3.3-7**). In diesem Zustand ist der Beton durch ein hohes Verformungsvermögen unter Druckspannungen gekennzeichnet (**Bild II.3.3-8**) [Wie1, Gru1] und durch extrem geringe Zugbruchdehnungen (s. Bild II.3.3-6). Treten in dieser Übergangszeit, z. B. durch Austrocknung, Schalungsverformung oder Abkühlung, Zugbeanspruchungen auf, so weist der Beton einen äußerst geringen Wider-

stand gegen *Oberflächenrisse* und *Spaltrisse* auf. Deshalb muss die Nachbehandlungsdauer die Zeitspanne des jungen Betons voll überdecken (s. Bild II.3.3-7 und Abschnitte II.4.5 und II.9.6).

Die last- und zeitabhängigen Verformungen des Festbetons bezeichnet man als *Kriechverformungen*. Sie müssen beim Betonentwurf zusätzlich zu den elastischen Verformungen berücksichtigt werden, um z. B. die Durchbiegung von Bauteilen oder Spannkraftverluste vorausberechnen zu können (s. Abschnitte II.6.1 und II.6.2).

3.3.4 Lastunabhängige Verformungen

Als lastunabhängige Verformungen müssen beim Entwurf die Verformungen durch Temperaturänderungen (*Temperaturverformungen*) und durch Änderungen des Feuchtehaushalts im Beton (*Schwinden* und *Quellen*) berücksichtigt werden. Sie dürfen insbesondere bei zwangbeanspruchten Bauteilen nicht vernachlässigt werden, weil sie das Risiko einer Rissbildung erhöhen können. Schwindverformungen können bei weit gespannten, gedungenen Querschnitten auch erheblich zur Durchbiegung beitragen (s. Abschnitt II.6.3).

3.3.5 Dauerhaftigkeit

Die bezüglich ihrer *Dauerhaftigkeit* beeinflussbaren Festbetoneigenschaften (s. Tafel II.3.1-3) hängen im Wesentlichen von der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung und dem Gefüge des Zementsteins ab. Veränderungen der Dauerhaftigkeit werden verursacht durch *Transportvorgänge* in den *Kapillarporen* der Zementsteinmatrix und im Gefüge an den Kontaktzonen zwischen Matrix und Gesteinskörnern (s. Abschnitt I.4.2). Infolge der Transportvorgänge kann es zu chemischen Reaktionen (*Carbonatisierung*, *Chlorideinbindung*) und zu mechanischen Beanspruchungen (Eisbildung durch Frosteinwirkung) kommen. Daneben können *lösende Angriffe* (*Säureangriff*)

oder *treibende Angriffe* auftreten (*Sulfat-, Magnesiumtreiben*) (s. Abschnitt II.7).

Die Dauerhaftigkeit des Betons gegenüber bestimmten Beanspruchungen kann durch geeignete Prüfverfahren überprüft werden. Da diese aber nur in einem begrenzten Maße das Langzeitverhalten unter Praxisbedingungen nachbilden, werden in Normen und Regelwerken Grenzen für die zulässige Auswahl der Betonausgangstoffe und für die Betonzusammensetzung in Abhängigkeit von den zu erwartenden Umwelteinwirkungen getroffen. Die Umwelteinwirkungen werden dazu in Expositionsklassen eingeteilt (s. Abschnitt II.1 und Tafeln IV.3-1 bis -3). Die einzuhaltenden Regeln für die Betonzusammensetzung resultieren aus Laboruntersuchungen und den an Bauwerken gewonnenen Erfahrungen.

In dem Maße, wie die für die Beton- und Bewehrungskorrosion maßgeblichen Schädigungsverläufe bekannt sind und in ihrer Abhängigkeit von den relevanten Materialkennwerten dargestellt werden können, kann eine unmittelbare Dauerhaftigkeitsbemessung aufgrund der Betonzusammensetzung durchgeführt werden. Entsprechende Nachweiskonzepte werden derzeit entwickelt und an ausgewählten Sonderbauwerken erprobt. Weit entwickelte Konzepte über die für die Dauerhaftigkeit maßgeblichen Einwirkungen und Widerstände bestehen z. B. im Hinblick auf den *Säurewiderstand* und die *Hydrolyse* (s. Abschnitte II.7.3 und II.7.4), die *Carbonatisierung* (s. Abschnitt II.7.2) und die *Chlorideindringung* (s. Abschnitt II.7.2). Hingegen liegen für den möglichen Ablauf eines *Frost- und Frost-Tausalzangriffs* (s. Abschnitt II.7.1), eines *Sulfatangriffs* (s. Abschnitt II.7.3), eines *Verschleißangriffs* (s. Abschnitt II.7.5) oder einer *Alkali-Reaktion* (s. Abschnitt II.7.6) noch keine ausreichenden Kenntnisse vor, um rechnerische Prognosen der Dauerhaftigkeit mit ausreichendem Bezug zur Praxis vornehmen zu können.

Tafel II.3.4-1: Mindestanforderungen an übliche Konstruktionsbetone nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2

Anwendungsgebiete des Betons	Expositions-klasse	höchstzulässiger w/z-Wert ¹⁾	Mindestzementgehalt in kg/m ³
Innenbauteile	XC1	0,75	240
bewehrte Fundamente ohne Frost	XC2		
Außenbauteile	XC4, XF1	0,60	280

¹⁾ Bei Anrechnung von Zusatzstoffen des Typs II ist der äquivalente Wasserzementwert ($\text{Wasser}/(\text{Zement} + k \cdot \text{Zusatzstoff}) - \text{Wert}$) maßgebend.

3.4 Grundlagen für die Zusammensetzung von Beton (Mischungsentwurf)

3.4.1 Zusammenstellung der Anforderungen

Der erste Schritt zur planmäßigen Herstellung von Beton gemäß DIN EN 206-1/DIN 1045 besteht in der Zusammenstellung aller Anforderungen, die für die aktuelle Baumaßnahme bestehen.

Dazu gehören:

a) die Entwurfseigenschaften gemäß Tafel II.3.1-3, die aus den Planungs- und Konstruktionsunterlagen hervorgehen müssen. Hier können vor allem Anforderungen an die Festigkeitsklasse (Tafeln IV.3-8 und IV.3-9), an die Rohdichteklasse (Tafel IV.3-10), an die Festigkeitsentwicklung (Tafel IV.3-11), an die Dichtheit der Bauteile und an die Dauerhaftigkeit unter Umwelteinwirkungen (Tafeln IV.3-1 bis IV.3-3) gestellt werden. Aus der erforderlichen Betondeckung der Bewehrung können sich Anforderungen an das Größtkorn der Gesteinskörnung ergeben. Auch an das Erscheinungsbild des Betons kann der Pla-

Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m ³	Mindestfestigkeitsklasse	Zement
240	C16/20	siehe Tafeln IV.3-18 bis -20
270	C25/30	

ner Anforderungen stellen, z. B. Sichtbeton und Oberflächengestaltung, die sich auf die erforderliche Betonzusammensetzung auswirken.

b) die Anforderungen, die sich aufgrund der o. g. Entwurfs-eigenschaften aus DIN EN 206-1/DIN 1045-2 ergeben. Diese betreffen z. B. den höchstzulässigen w/z-Wert, die Zementart, den Mindestzementgehalt, den Mindestluftgehalt und Anforderungen an die Gesteinskörnung, wie Frostwiderstand und Alkaliempfindlichkeit (s. Tafeln IV.3-15, IV.3-16 und IV.3-18, sowie an die Begrenzung des Mehlkorngehalts (s. Tafel IV.3-12, IV.3-13).

Tafel II.3.4-1 gibt auszugsweise die Mindestanforderungen an übliche Konstruktionsbetone nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 wieder.

c) die Anforderungen, die sich ggf. aus den mitgeltenden Richtlinien des DAfStb ergeben:

- Restwasser [Ri5]
- verzögerter Beton [Ri3]

- Trockenbeton [Ri8]
- Alkalireaktion [Ri13]
- Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung [Ri1]
- Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen [Ri2]

d) die spezifisch mit der Bauausführung verbundenen technischen Anforderungen, die der Bauausführende in Abhängigkeit z. B. vom Bauteil, vom Bauverfahren und von den Außentemperaturen an den Betonhersteller stellt. Dazu gehören vor allem Anforderungen bezüglich der Konsistenzklasse bei Übergabe des Betons auf der Baustelle (Tafeln IV.3-4 bis IV.3-7) und an die Verarbeitbarkeitszeit des Frischbetons einschließlich Transportzeit (Tafel II.3.1-2) sowie ggf. Anforderungen an die Festigkeitsentwicklung (Tafel IV.3-11). Weitere spezifische Anforderungen der Bauausführung ergeben sich aus besonderen Transport- oder Einbaubedingungen, wie z. B. für Pumpbeton, Unterwasserbeton oder langzeitverzögerten Beton (s. Abschnitte II.9 und 10). Auch wirtschaftliche Gesichtspunkte, wie Preis und Verfügbarkeit der in Frage kommenden Ausgangsstoffe, sind zu berücksichtigen.

3.4.2 Mischungsentwurf für die Erstprüfung

Die systematische Auswertung der Anforderungen führt auf eine vorläufige Stoffauswahl für das 5-Stoff-System gemäß Tafel II.3.1-1, ggf. mit verschiedenen noch offenen Varianten. Auf dieser Basis wird die Betonzusammensetzung für die *Erstprüfungen* – bisher Eignungsprüfung genannt – entworfen.

Dabei kann man für *Normalbeton* folgendermaßen vorgehen [Bon1, Hil2, Web1]:

1) Die Anforderungen bezüglich Betondruckfestigkeit (Tafel II.3.1-3 und Bild II.3.3-2), Dauerhaftigkeit (Tafeln IV.3-15 und -16) und Zementfestigkeitsklasse ergeben einen ersten

Ansatz für den höchsten zulässigen Wasserzementwert w/z . Ein Vorhaltemaß (Anhaltswert) $\Delta w/z$ von mindestens 0,03 hat sich bewährt, um Grenzwerte zuverlässig einhalten zu können.

2) Anforderungen an das Größtkorn, die Sieblinie des Korngemisches sowie an vorgesehene Zusatzstoffe (z. B. Mehlkorngehalt) und Zusatzmittel (z. B. Verflüssiger) sowie Luftporen führen, bezogen auf die gewünschte Konsistenz, zu einem Schätzwert für den erforderlichen wirksamen Wassergehalt w im Beton.

3) Den erforderlichen Zementgehalt erhält man aus $z = w : (w/z)$. Er darf nicht kleiner sein als der Mindestzementgehalt, der sich z. B. aus den Dauerhaftigkeitsanforderungen gemäß Tafel IV.3-15 und IV.3-16 oder aus Vertragsbedingungen ergibt.

4) Die sog. Stoffraumgleichung

$$\frac{z}{\rho_z} + \frac{w}{\rho_w} + \frac{g}{\rho_g} + \frac{f}{\rho_f} + p = 1000 \text{ [dm}^3/\text{m}^3] \quad [\text{Gl II.3.4-1}]$$

die die Volumenanteile von Zement, Gesteinskörnung, Wasser, Zusatzstoffen und Verdichtungs- bzw. Luftporen für einen m^3 Beton aufsummiert, ermöglicht z. B. die Berechnung des Anteils an Gesteinskörnung im Beton

$$g = (1000 - z/\rho_z - w/\rho_w - f/\rho_f - p) \cdot \rho_g \text{ [kg]} \quad [\text{Gl II.3.4-2}]$$

Darin bedeuten: z = Zementgehalt $[\text{kg}/\text{m}^3]$; w = wirksamer Wassergehalt $[\text{kg}/\text{m}^3]$; g = Gehalt an Gesteinskörnung $[\text{kg}/\text{m}^3]$; f = Zusatzstoffgehalt $[\text{kg}/\text{m}^3]$; p = Porenraum $[\text{dm}^3/\text{m}^3]$; ρ_z = Rohdichte des Zements $[\text{kg}/\text{dm}^3]$; ρ_w = Dichte des Wassers $[\text{kg}/\text{dm}^3]$; ρ_g = Rohdichte des Zuschlags $[\text{kg}/\text{dm}^3]$; ρ_f = Rohdichte des Zusatzstoffs $[\text{kg}/\text{dm}^3]$.

Die Angaben zu den Rohdichten sind in den Abschnitten II.2.1 (Zement), II.2.2 (Betonzusatzstoffe), II.2.4 (Betonzusatzmittel*) und II.2.5 (Gesteinskörnung) enthalten.

Korngruppen und Zusatzstoffe mit unterschiedlichen Rohdichten müssen nach Volumenanteilen in Gl. II.3.4-1 berücksichtigt werden. Die Rohdichte ρ_b des Betons in kg/dm^3 erhält man aus Gl. II.3.4-3

$$\rho_b = \frac{1}{1000} (z + w + g + f) [\text{kg}^3/\text{dm}^3] \quad [\text{Gl II.3.4-3}]$$

5) Nachdem überprüft wurde, dass z. B. die Anforderungen an den zulässigen Mehlkorngelhalt eingehalten sind (s. Tafel IV.3-12 und -13) kann die Mischanweisung aufgestellt werden. In der Mischanweisung ist der wirksame Wassergehalt in die Eigenfeuchte, die der Gesteinskörnung oberflächlich anhaftet, und das Zugabewasser aufzuteilen (s. Abschnitt II.2.3). Für alle Vorgänge von der Ermittlung der Sieblinie über die Mischungsberechnung bis zur Mischanweisung werden von den Fachverbänden zweckmäßige Vordrucke erarbeitet.

*) Bei mehr als $3 \text{ l}/\text{m}^3$ ist der Wasseranteil beim w/z-Wert zu berücksichtigen.