

Ralph Hohberg

**Entwicklung des E-Moduls
von Beton aus Recyclingmaterial
im Vergleich zu Beton mit
natürlichem Zuschlag**

257

Forschungsbericht



Die Aufgaben
der Bundesanstalt
stehen unter der Leitlinie:

Sicherheit und Zuverlässigkeit in Chemie- und Materialtechnik

Die Aufgaben

Die BAM ist im Aufgabenverbund „Material – Chemie – Umwelt – Sicherheit“ zuständig für:

- ▶ Hoheitliche Funktionen zur öffentlichen technischen Sicherheit, insbesondere im Gefahrstoff- und Gefahrgutrechtsbereich;
- ▶ Mitarbeit bei der Entwicklung entsprechender gesetzlicher Regelungen, z. B. bei der Festlegung von Sicherheitsstandards und Grenzwerten;
- ▶ Beratung der Bundesregierung, der Wirtschaft sowie der nationalen und internationalen Organisationen im Bereich der Materialtechnik und Chemie;
- ▶ Entwicklung und Bereitstellung von Referenzmaterialien und -verfahren, insbesondere der analytischen Chemie und der Prüftechnik;
- ▶ Unterstützung der Normung und anderer technischer Regeln für die Beurteilung von Stoffen, Materialien, Konstruktionen und Verfahren im Hinblick auf die Schadensfrüherkennung bzw. -vermeidung, den Umweltschutz und den Erhalt volkswirtschaftlicher Werte.

Die Tätigkeitsbereiche

Das Tätigkeitsspektrum der BAM umfasst die sich ergänzenden und aufeinander bezogenen Tätigkeiten:

- ▶ Forschung und Entwicklung
- ▶ Prüfung, Analyse und Zulassung
- ▶ Beratung und Information.

Die nationale und internationale Zusammenarbeit

Die Aufgaben der BAM für Technik, Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft erfordern eine interdisziplinäre Zusammenarbeit. Insofern arbeitet die Bundesanstalt mit Technologieinstitutionen des In- und Auslandes, insbesondere den nationalen Schwesterinstitutionen eng zusammen. Sie berät Bundesministerien, Wirtschaftsverbände, Industrieunternehmen sowie Verbraucherorganisationen und unterstützt mit Fachgutachten Verwaltungsbehörden sowie Gerichte. Daneben ist sie in die internationale technische Zusammenarbeit eingebunden und im Bereich „Messwesen – Normung – Prüftechnik – Qualitätssicherung“ (MNPQ) als nationale Institution für die Prüftechnik zuständig. Die Mitarbeiter der Bundesanstalt wirken in zahlreichen Fachgremien, gesetzlichen Körperschaften und normensetzenden Institutionen an der Aufstellung von technischen Regeln und Sicherheitsbestimmungen mit und vertreten die Bundesrepublik in nationalen und supranationalen Einrichtungen.

Der Status

Die BAM ist als technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit Nachfolgeinstitution des 1871 gegründeten Staatlichen Materialprüfungsamtes sowie der 1920 gebildeten Chemisch-Technischen Reichsanstalt (CTR). Sie hat dementsprechend die Funktion einer materialtechnischen und chemisch-technischen Bundesanstalt. In ihr sind etwa 1600 Mitarbeiter, darunter mehr als 700 Wissenschaftler und Ingenieure, auf dem Stammgelände in Berlin-Lichterfelde sowie auf den Zweiggeländen in Berlin-Steglitz und Berlin-Adlershof tätig.

Dipl.-Ing. Ralph Hohberg

**Entwicklung des E-Moduls
von Beton aus Recyclingmaterial
im Vergleich zu Beton mit
natürlichem Zuschlag**

Danksagung

Die Ergebnisse zahlreicher Beratungen, Gespräche und Unterstützungen bei der Durchführung der Untersuchungen haben bei der Arbeit Eingang gefunden.

Besonderer Dank gilt den Herrn Dr.-Ing. M. Maultzsch, Dipl.-Ing. G. Mellmann, U. Meinhold, Dr.-Ing. H. Winkler, Dipl.-Ing. J. Danßmann, Dipl.-Ing. F. Reusch und deren Mitarbeitern von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Dipl.-Kfm. J. Bourwieg und meiner Frau Annette Bojanowski.

Impressum

Forschungsbericht 257: **Entwicklung des E-Moduls von Beton aus Recyclingmaterial im Vergleich zu Beton mit natürlichem Zuschlag**
2003

Herausgegeben von der Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM)
Unter den Eichen 87
12205 Berlin
Telefon: +49 30 8104-0
Telefax: +49 30 8112029
E-mail: info@bam.de
Internet: www.bam.de

Copyright © 2003 by Bundesanstalt für
Materialforschung und -prüfung (BAM)

Herstellung und Verlag:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Bürgermeister-Smidt-Str. 74 - 76
27568 Bremerhaven
Telefon: +49 471 94544-0
Telefax: +49 471 94544-77/-88

Umschlag: Lutz Mittenzwei
Layout: BAM, Referat G.1

ISSN 0938-5533
ISBN 3-89701-737-7

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit soll weiteren Aufschluss über die Entwicklung des Elastizitätsmoduls im jungen Alter von Beton mit Recyclingzuschlag im Vergleich zu Beton mit Normalzuschlag mittels zerstörungsfreien E-Modul-Prüfmethode geben. Der Inhalt umfasst die zeitliche Betrachtung der elastischen Kenngrößen der verwendeten Betone, einen Vergleich von statischen und dynamischen Prüfverfahren zur E-Modulmessung und den aus der Literatur abgeleiteten Stand der Kenntnisse von Untersuchungen mit Recyclingbeton.

Die wesentliche Grundvoraussetzung und Neuerung dieses Projektes ist der ausschließliche Gebrauch von großtechnisch aufbereitetem Betonabbruchmaterial von unbekannter Herkunft, Qualität und stofflicher Zusammensetzung. Die Korngruppen unter 2 mm wurden durch natürlichen Sand ersetzt.

Summary

In this research project the development of the modulus of elasticity of concrete at early ages with recycled concrete aggregate and with traditional aggregate was investigated by means of non-destructive testing.

The report includes the time dependence of elastic properties of the investigated concrete, the comparison of static and dynamic test procedures for the determination of the modulus of elasticity and the current knowledge on recycling concrete as derived from the literature.

The essential condition and new approach in the project is the exclusive use of recycled concrete of unknown provenance, quality and materials ingredients. The size fractions smaller than 2 mm is replaced by natural sand.

Inhalt

Danksagung
Zusammenfassung
Summary

1	Abkürzungen, Formelzeichen	9
2	Begriffe und Einteilung	10
3	Einleitung	11
4	Elastische Kenngrößen	12
4.1	Elastizitätsmodul	12
4.1.1	Allgemeines	12
4.1.2	Elastizitätsmodul von Beton	13
4.2	Querkontraktion / Poissonsche Zahl	13
4.3	Kompressionsmodul	14
4.4	Schubmodul	14
4.5	Abhängigkeiten zwischen den elastischen Komponenten	15
5	Prüfverfahren	15
5.1	Allgemeines	15
5.2	Dynamischer Elastizitätsmodul	15
5.2.1	Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung (EnI)	15
5.2.1.1	<i>Beschreibung des Verfahrens</i>	15
5.2.1.2	<i>Voraussetzungen und Anwendung</i>	16
5.2.2	Laufzeitmessung eines Ultraschall-Impulses (US)	17
5.2.2.1	<i>Beschreibung des Verfahrens</i>	17
5.2.2.2	<i>Voraussetzungen und Anwendung</i>	17
5.2.2.3	<i>Allgemeine Hinweise</i>	18
5.2.3	Äußere Einflüsse auf die dynamischen Prüfverfahren	18
5.3	Statischer E-Modul	18
5.3.1	Allgemeines	18
5.3.2	Beschreibung des Verfahrens	18
5.4	Unterschiede der Prüfverfahren	19
6	Einflüsse auf den Elastizitätsmodul	20
6.1	Einflüsse aus der Betonzusammensetzung	20
6.2	Einflüsse aus den Lagerungsbedingungen	21
6.3	Temperatureinflüsse	21
6.4	Methoden zur Berechnung des Elastizitätsmoduls	22
7	Stand der Kenntnisse	23
7.1	Allgemeines	23
7.2	Untersuchungen am Recyclingzuschlag	23
7.2.1	Kornrohddichte	23
7.2.2	Kornzusammensetzung	23
7.2.3	Kornform	24
7.2.4	Wasseraufnahme	24
7.3	Eigenschaften des Frischbetons	24
7.4	Festbetoneigenschaften	25
7.4.1	Allgemeines	25
7.4.2	Druckfestigkeit	25
7.4.3	Verformungsverhalten des Betons aus Recyclingmaterial	25
7.4.3.1	<i>Allgemeines</i>	25
7.4.3.2	<i>Elastizitätsmodul von Beton aus Recyclingmaterial</i>	25
7.5	Allgemeine Bewertung des vorhandenen Wissensstandes	26

8	Durchführung der Untersuchungen	27
8.1	Voraussetzungen für die Betonrezepturen	27
8.2	Beschriftung der Prüfkörper	27
8.3	Betonrezepturen	27
8.4	Stoffliche Zusammensetzung und Eigenschaften der Recycling-Zuschläge	28
8.5	Stoffraumanteile der Mischungen	28
9	Herstellung der Probekörper	29
9.1	Ablauf der Betonherstellung	29
9.2	Ablauf der Probekörperherstellung	29
9.3	Lagerung und Nachbehandlung der Probekörper	30
9.4	Tabellarische Zusammenfassung der Herstellung und Lagerung der Probekörper	30
10	Versuchsdurchführung	31
10.1	Allgemeiner Ablauf der Untersuchungen	31
10.2	Durchführung der Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung	31
10.2.1	Verwendete Probekörper	31
10.2.2	Versuchsdurchführung	31
10.3	Durchführung der Laufzeitmessung eines Ultraschall-Impulses	31
10.3.1	Verwendete Probekörper	31
10.3.2	Versuchsdurchführung	32
10.4	Durchführung der statischen E-Modulmessung	32
10.4.1	Verwendete Probekörper	32
10.4.2	Voraussetzungen für das statische E-Modulprüfverfahren nach DIN 1048	32
10.4.3	Probekörpervorbehandlung	32
10.4.4	Versuchsdurchführung	32
10.4.5	Versuchsablauf	33
10.4.6	Messwerterfassung, Registrierung und Speicherung	33
10.5	Druckfestigkeitsprüfung	33
10.6	Prüfplan	33
11	Berechnungsgrundlagen für die Prüfverfahren	34
11.1	Dynamischer Elastizitätsmodul der Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung	34
11.2	Dynamischer Elastizitätsmodul der Laufzeitmessung eines Ultraschall-Impulses	34
11.3	Dynamischer Schubmodul	35
11.4	Statischer Elastizitätsmodul	35
12	Messergebnisse	35
12.1	Festbetoneigenschaften	35
12.1.1	Elastizitätsmodul	35
12.1.1.1	<i>Dynamischer Elastizitätsmodul</i>	35
12.1.1.2	<i>Statischer Elastizitätsmodul</i>	39
12.1.1.3	<i>Zusammenfassung der Messergebnisse (Prüfalter 28d)</i>	39
12.1.2	Druckfestigkeit und Festbetonrohddichte	40
12.2	Frischbetoneigenschaften	40
12.3	Fehlerbetrachtung	41
13	Ergebnisdiskussion	41
13.1	Frischbetoneigenschaften	41
13.2	Druckfestigkeit	41
13.3	Rohddichte	42
13.4	Querdehnungszahl	43
13.5	Zusammenhänge der einzelnen Prüfverfahren	44
13.5.1	Einfluss der Querdehnungszahl auf die dynamische E-Modulmessung	44
13.5.1.1	<i>Ultraschallprüfverfahren (US)</i>	44
13.5.1.2	<i>Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung (EnI)</i>	46
13.5.2	Vergleich Ultraschall- (US mit konstanter Querdehnungszahl) zu Eigenschwingzeitmessung (EnI)	46
13.5.3	Vergleich statische und dynamische E-Modulergebnisse	47
13.6	Statischer E-Modul	47
13.7	Dynamische E-Modulermittlung mit konstanter und berechneter Querdehnungszahl bei den Eigenschwingzeitmessungen	47

13.8	Elastizitätsmodul	48
13.8.1	Allgemein	48
13.8.2	Dynamische E-Modulentwicklung	48
13.8.3	Einfluss der Zuschlagmaterialien	50
13.8.4	Einfluss des Zementgehaltes	51
13.8.5	Einfluss der Festbetonrohddichte auf den dynamischen E-Modul	51
13.8.6	Abschätzung der E-Modulabminderung bei Betonen aus Recyclingmaterial	53
13.8.7	Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und dynamischem E_{Enl} -Modul	54
13.8.8	Beziehung Schubmodul – E-Modul	55
13.9	Ausblick	56
14	Zusammenfassung	57
15	Literaturverzeichnis	58

1 Abkürzungen, Formelzeichen

Hauptzeichen

$A_{l,t,o}$	Koeffizient der Querdehnungszahl,
A	Druckfläche, Querschnitt
Abb	Abbildung
B	Betongruppe, Betonfestigkeitsklasse, mittlere stetige Norm-Sieblinie
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
C	dimensionsloser Korrekturfaktor
E	Elastizitätsmodul
Enl	Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung
F	Kraft, Luftfeuchtigkeit
G	Schubmodul
GS	Grindo-Sonic-Messung bzw. Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung
K	Kompressionsmodul, Konsistenz, Konsistenzbereich, Konstante, Zuschlag aus Recyclingmaterial des Lieferanten K
M.-%	Masse-Prozent
O	natürliches Zuschlagsmaterial
R	Reife
R_r	Änderungskoeffizient zur Bestimmung des abgeminderten E-Moduls.
RILEM	Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et Structures
T	Scherkraft, Schubkraft, Temperatur
US	Ultraschallmessung
V	Volumen, Anteil
V_z	Zuschlagsgehalt mit der gleichen Kornrohddichte vom Gesamtzuschlag.
Vol.-%	Volumen-Prozent
Wa	Wasseraufnahmefähigkeit, Zuschlag aus Recyclingmaterial des Lieferanten W
Wa_{24h}	Wasseraufnahmefähigkeit nach 24 Stunden, in M.-%.
X	Zuschlag aus Recyclingmaterial des Lieferanten X
$a(n)$	Ausbreitmaß nach n – Minuten
a	Jahre
a, b	Querabmessungen
d	Probedicke, Tage
f	Frequenz
l	Länge
m	Masse
p	Druckkraft
r	relative, Recyclingmaterial
t	Laufzeit eines Impulses
v	Ausbreitungsgeschwindigkeit
w/z	Wasser-Zement-Wert (ω)
ε	Dehnung
ρ	Dichte
β	Festigkeit
f	Festigkeit eines Materials
χ	Kompressibilität

ν	Poissonsche Zahl
μ	Querdehnungszahl
τ	Schubspannung
σ	Spannung
$\dot{\sigma}$	Belastungsgeschwindigkeit
λ	Wellenlänge
γ	Scherwinkel
ε_l	elastische Längsdehnung
ε_q	elastische Querdehnung
ρ_R	Rohddichte
$\rho_{R,K}$	Kornrohddichte
ω	Wasser-Zement-Wert (w/z)
E_{dyn}	dynamischer E-Modul aus der Eigenschwingzeitmessung der Biegeschwingung
$E_{dyn,D}$	dynamischer E-Modul aus der Eigenschwingzeitmessung der Dehnschwingung
$G_{dyn,T}$	dynamischer Schubmodul aus der Eigenschwingzeitmessung der Torsionsschwingung
$E_{dyn,L,var}$	dynamischer E-Modul aus der Laufzeitmessung der Schallimpulse mit ermittelter Querdehnungszahl μ_{dyn} .
$E_{dyn,L}$	dynamischer E-Modul aus der Laufzeitmessung der Schallimpulse mit konstanter Querdehnungszahl $\mu_{dyn} = 0,20$.

Nebenzeichen

B	Breite, Biegeschwingung
D	Dehnschwingung
C	Zylinder
H	Höhe
N	Nennwert
R	Roh-
T	Torsionsschwingung
b	Beton
c	Beton (concrete)
el	elastisch
g	Zuschlag
k	charakteristischer Wert
l	Longitudinalwelle
m	Matrix, Zementstein
o	Oberflächenwelle, oben
pl	plastisch, bleibend
t	zum Zeitpunkt t
tr	Transversalwelle
u	unten
24h	Prüfalter 24h
28d	Prüfalter 28d

Nebenzeichen, dem Hauptzeichen vorangestellt

dyn	dynamisch
eff	wirksam, effektiv
ges	gesamt
stat	statisch
zul	zulässig

2 Begriffe und Einteilung

Beton ist ein künstlicher Stein, der aus einem Gemisch von Zement, Betonzuschlag, Wasser und Poren (sowie u.a. auch von Betonzusätzen) durch die Erhärtung des Zement-Wasser-Gemisches (Zementleim) entsteht. Betonzusatzmittel und Betonzusatzstoffe können zur Erzeugung besonderer Eigenschaften dem Frischbeton zugegeben werden.

Sind die Zuschlagkörner nicht größer als 4 mm, spricht man von Mörtel.

Beton wird zudem nach der Trockenrohichte ρ unterteilt in:

- Leichtbeton $\rho \leq 2,0 \text{ t/m}^3$,
- Normalbeton (übliche Bezeichnung „Beton“) $2,0 \text{ t/m}^3 \leq \rho \leq 2,8 \text{ t/m}^3$ und
- Schwerbeton $\rho > 2,8 \text{ t/m}^3$.

Begriffe [51]:

Betonsplitt	Zuschlag aus Altbeton mit einer Korngröße $> 4 \text{ mm}$.
Festbeton	Erhärteter Beton.
Festbetonrohichte	Rohichte des erhärteten Betons.
Frischbeton	Verarbeitbarer Beton.
Frischbetonrohichte	Rohichte des verdichteten Frischbetons.
grüner Beton	Beton, der eben eingebaut und fertig verdichtet wurde.
Güteprüfung	Prüfung an genormten Probekörpern nach Herstellung und Lagerung gemäß DIN 1048. Während der Bauausführung zum Nachweis, dass der für den Einbau hergestellte Beton die geforderten Eigenschaften erreicht.
Hydratation	Chemische Bindung von Wasser.
junger Beton	Beton, der sich in der Anfangsphase seiner Erhärtung befindet, bis etwa 12 Stunden nach dem Verdichten.
Kiessand	Natürliches Zuschlaggemisch aus Sand (0 bis 4 mm) und Kies (4 bis 32 mm).
Konsistenz	Maß für die Verarbeitbarkeit und Verdichtbarkeit des Frischbetons.
Korngruppe	Betonzuschlag wird nach DIN 4226 in Korngruppen eingeteilt, die durch Prüfkorngrößen in mm begrenzt werden.

Leichtzuschlag	Gemenge von porigen Körnern mit einer Kornrohichte $\leq 2,0 \text{ kg/dm}^3$.
Matrix	Geschlossene Phase im Zweiphasenstoff Beton, im allgemeinen Zementleim oder Zementstein.
Nachbehandlung	Maßnahmen, die einen ungestörten Ablauf der Hydratation ermöglichen.
Nennfestigkeit β_{WN}	Mindestwert für die Druckfestigkeit β_{W28} jedes Würfels bei der Güteprüfung.
Sieblinie	Grafische Darstellung der Kornzusammensetzung von Zuschlägen, die im allgemeinen den Rückstand auf den zu gehörigen Prüfsieben angibt. Stetige Sieblinien haben einen lückenlosen Kornaufbau, bei un stetigen Sieblinien fehlen einzelne Korngruppen.
Stoffraum	Volumen der Bestandteile Zement, Zuschlag, Wasser und Poren sowie ggf. Zusatzmittel im Beton, wobei das Zuschlagvolumen die Kornporen einschließt.
Zementleim	Zement und Wasser im verarbeitbaren Zustand, ggf. mit Zusätzen.
Zementstein	Erhärteter Zementleim.
Zugabewasser	Wasser, das dem Beton im Mischer zugegeben wird.

3 Einleitung

Die Verwendung von „Recyclingmaterialien“ fand in großem Umfang nach dem zweiten Weltkrieg statt. Aus Mangel an Baustoffen wurde der Trümmerschutt der zerstörten Städte zum Aufbau neuer Häuser verwendet, indem er z.B. zur Herstellung von Ziegelsplittbeton diente.

Die Notwendigkeit zur Verwendung von Recyclingbeton ergibt sich heute aus der immer größer werdenden Menge, die an Altbeton anfallen wird. Geschätzt wird, dass sich diese Menge in der EU – zusammengesetzt aus dem anfallenden Betonverbrauch und der geschätzten Lebensdauer der errichteten Bauwerke – bis zum Jahr 2020 vervielfachen könnte.

Abb.1 verdeutlicht diesen Trend für das alte Bundesgebiet. Die Betonabbruchmenge wurde durch die jährliche Zementproduktion abgeschätzt, und zwar unter der Annahme, dass ca. 75 % der Zementproduktion – mit einem mittleren Zementgehalt von 330 kg/m³ – in die Betonbauwerke gelangten.

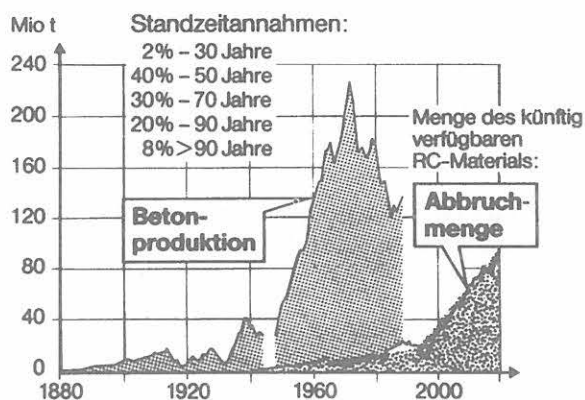


Abb.1: Geschätzte Betonabbruchmengen aus der Zementproduktion der Vergangenheit [39].

In Ballungsgebieten fallen besonders große Mengen von Bauschutt an. Gleichzeitig gibt es jedoch in und um diese Ballungsgebiete immer weniger Platz für Deponien, um diese „Altlasten“ zu lagern und zu entsorgen. Alte Deponien werden aus Sicherheits- und Überlastungsgründen geschlossen und neue Anlagen aus verschärften Umweltschutzaufgaben nur vereinzelt errichtet.

Die Folge dieser Deponieproblematik war ein extremer Anstieg der Entsorgungskosten in den letzten Jahren. Die Kosten für die Deponierung von Bauschutt stiegen zwischen 1988 und 1990 von 7 DM/t bis 40 DM/t auf 80 DM/t bis 200 DM/t (s. Abb.2). Die starken Preisschwankungen entstehen dabei durch die verschiedenen örtlichen Gegebenheiten.

Ein weiteres Argument für die Verwendung von Bauschutt als Zuschlag für Beton sind die auf der ganzen Welt geringer werdenden natürlichen Rohstoffe. Durch

die steigende Zahl von überwiegend ökologisch bedingten Auflagen und Verweigerungen der Erschließung neuer Kiesgruben wird es immer dringender, die Methoden zur Aufbereitung von Altbeton zu Betonsplitt zu intensivieren und zu optimieren.

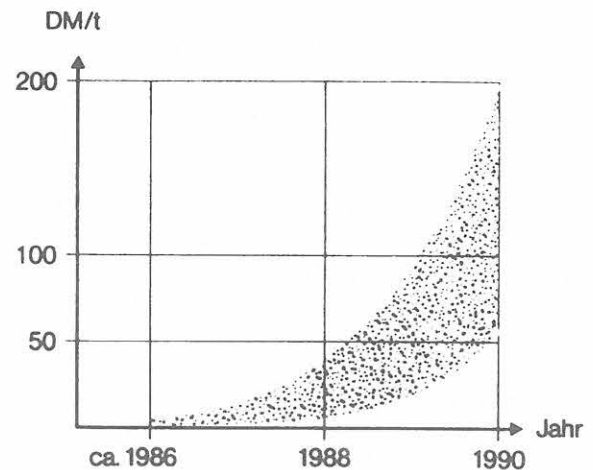


Abb.2: Deponiekostenentwicklung für Bauschutt [39].

Um einen Idealkreislauf des Baustoff-Recyclings zu erhalten, ist es erforderlich, die abgebrochenen Baustoffe wieder in den Materialfluss durch ein recyclinggerechtes Konstruieren zu integrieren. Dies setzt den vorwiegenden Einsatz von Recyclingmaterial sowie einen leichten und sortenreinen späteren Rückbau voraus [53][54][55].

Ein Ansatzpunkt für den Materialkreislauf ist z.B. der Einsatz von Recyclingmaterial als Zuschlag für Beton. Die Anforderungen für Betonzuschläge tragender Bauteile werden in DIN 1045, DIN 4226 und DIN 4219 beschrieben.

Daraus folgt, dass der Einsatz von recyceltem bzw. aufbereitetem Altbeton und Bauschutt als Zuschlag für Beton derzeit nach den geltenden Regeln, mit Ausnahme von Ziegelsplitt, nicht möglich ist. Es fehlen Regelwerke bzw. Regelwerte, die die Besonderheiten von Recyclingzuschlag beachten und dessen Anwendung bei Bauvorhaben im Rahmen der DIN 1045 möglich machen.

Um die Wiederverwendung von Bauschutt als Betonzuschlag zu ermöglichen, soll die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts für Bauschutt-Recycling mit dem Titel „Construction Recycling Technologies for High Quality Cement and Concrete“ vorwiegend beton-technologische und Beständigkeitsfragen klären sowie Prüfrichtlinien und Verarbeitungsempfehlungen erarbeiten. Ein wichtiger Teilaspekt sind dabei die elastischen Kenngrößen.

Die vorliegende Arbeit soll das Forschungsprojekt in betontechnologischen Fragen unterstützen, indem sie

weiteren Aufschluss über die Entwicklung des Elastizitätsmoduls im jungen Alter von Beton mit Recyclingzuschlag im Vergleich zu Beton mit Normalzuschlag mittels zerstörungsfreier Prüfmethode (dynamischen E-Modul) gibt. Die Versuche beinhalten zugleich die Anwendung verschiedener Prüfmethode.

Die wesentliche Grundvoraussetzung und Neuerung dieses Projektes ist der ausschließliche Gebrauch von großtechnisch aufbereitetem Betonabbruchmaterial von unbekannter Herkunft und Qualität.

Die Zusammensetzung der zu untersuchenden Betone war durch das Forschungsprojekt vorgegeben. Materialtechnische Kennwerte und betontechnologische Daten aus dem Projekt konnten zur Auswertung herangezogen werden.

Der Inhalt der vorliegenden Arbeit umfasst die elastischen Kenngrößen des verwendeten Betons, den aus der Literatur abgeleiteten Stand der Kenntnisse von Untersuchungen mit Recyclingbeton sowie eigene Versuchsdurchführungen und -ergebnisse. Die Versuche wurden in der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung durchgeführt.

4 Elastische Kenngrößen

Feste Körper besitzen elastische Kenngrößen wie Elastizitätsmodul, Schubmodul, Querkontraktion und Kompressionsmodul. Diese elastischen Kenngrößen können in statischen und dynamischen Prüfverfahren ermittelt werden.

4.1 Elastizitätsmodul

4.1.1 Allgemeines

Der Elastizitätsmodul oder E-Modul drückt das elastische Verhalten eines Körpers mit der Länge l und dem Querschnitt A aus, an dem eine Kraft F angreift und dadurch eine Längenänderung Δl verursacht. Diese Längenänderung ist bei kleinen Belastungen proportional zur Kraft F und der Länge l sowie umgekehrt proportional zum Querschnitt A des Körpers. Der Elastizitätsmodul ist dabei ein Proportionalitätsfaktor.

$$\frac{F}{A} \sim \frac{\Delta l}{l} \quad \text{mit } E \dots \text{Proportionalitätsfaktor}$$

Umgeformt ergibt sich der statische E-Modul aus dem Verhältnis von Spannung σ zu elastischer Dehnung ε_{el} :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{el}} \quad (\text{Hookesches Gesetz})$$

mit der Spannung $\sigma = F/A$ und der elastischen Dehnung $\varepsilon = \Delta l/l$ bzw. aus dem Tangens des Winkels zwischen Abszisse und Spannungs-Dehnungslinie.

Die elastischen Kenngrößen können zudem durch dynamische Prüfmethode mittels verschiedener Schallwellen bestimmt werden. Schallwellen versetzen die Struktur eines Körpers in Schwingung. So kommt es bei einer Anregung, z. B. durch Longitudinalwellen, zu einer ungleichmäßigen Verschiebung der Materieteilchen. Die daraus folgenden Dichteunterschiede führen zu geringfügigen Verformungen (Dehnungen) und Spannungen in der Struktur.

Vereinfacht kann man für die Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit v einer Longitudinalwelle einen elastischen Körper als eine Feder darstellen (s. Abb.3).

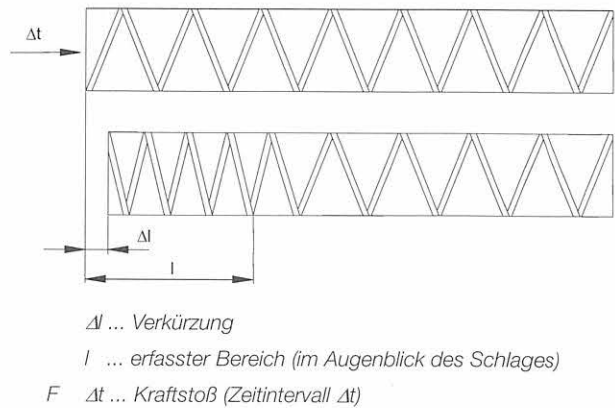


Abb.3: Schematische Darstellung des Verhaltens eines elast. Probekörpers nach Anschlag [38].

Danach gilt bei einem angeregten elastischen Körper mit vernachlässigter Dämpfung [38]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_{el}} \Rightarrow \varepsilon_{el} = \frac{\sigma}{E} \Rightarrow \frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \frac{F}{A} \quad \text{und} \quad v = \frac{l}{\Delta t} \Rightarrow \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{1}{E} \frac{F}{A} \cdot v \quad (\text{Gl.1})$$

Der Kraftstoß $F \Delta t$ ruft die Impulsänderung $v \Delta m$ hervor: $F \Delta t = v \Delta m$ (mit Massenelement $\Delta m = \rho A \Delta l$)

$$\Rightarrow F \Delta t = \rho A \Delta l v \Rightarrow \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{F}{\rho A v} \quad (\text{Gl.2})$$

Aus Gl.1 und Gl.2 ergibt sich:

$$\frac{F}{\rho A v} = \frac{1}{E} \frac{F}{A} \cdot v \Rightarrow v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Mit Hilfe der Geschwindigkeit verschiedenartiger Schallwellen lässt sich der dynamische Elastizitätsmodul eines Körpers durch folgende ermitteln [12]:

Longitudinalwelle: $E_{dyn,l} = \frac{(1+\mu)(1-2\mu)}{1-\mu} \cdot \rho \cdot v_l^2 = A_l \cdot \rho \cdot v_l^2$

Transversalwelle: $E_{dyn,t} = (\mu + 1) \cdot 2\rho \cdot v_t^2 = A_t \cdot 2\rho \cdot v_t^2$

Oberflächenwelle: $E_{dyn,o} = \frac{(1+\mu)^3}{(0,87 + 1,12\mu)^2} \cdot 2\rho \cdot v_o^2 = A_o \cdot 2\rho \cdot v_o^2$

Für die Berechnung des dynamischen Elastizitätsmoduls müssen neben der Ausbreitungsgeschwindigkeit v der Schallwellen auch die Dichte und die Querdehnungszahl des Prüfkörpers bekannt sein.

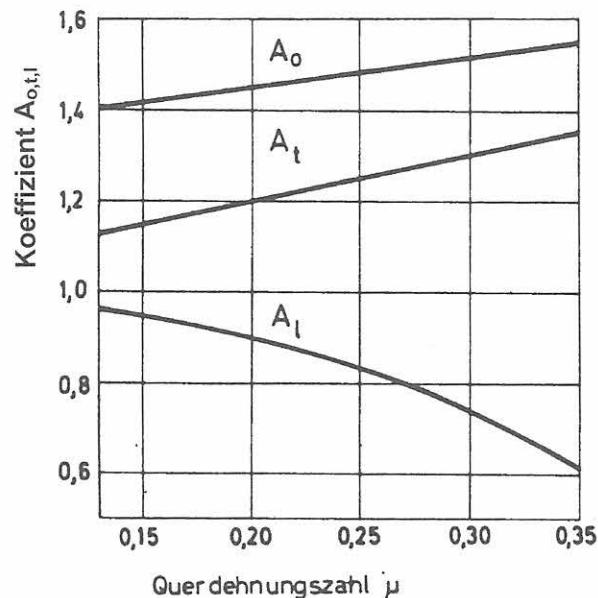


Abb. 4: Änderung der Koeffizienten A_o , A_t und A_l durch die Querdehnungszahl μ [12].

Die Querdehnungszahl μ beeinflusst, wie in Abb. 4 zu erkennen, die Berechnung des E-Moduls sichtlich. Der gravierendste Einfluss der Querdehnungszahl bei Beton ergibt sich bei der gängigen Art der Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls über die Longitudinalwelle. Die Berechnung der Querdehnungszahl wird in Abschnitt 4.2 behandelt.

4.1.2 Elastizitätsmodul von Beton

Der Elastizitätsmodul lässt sich schon erwähnt statisch und dynamisch ermitteln.

Der statische E-Modul von Beton kann nach DIN 1048 bestimmt werden und wird zum einen in DIN 1045 [58] zur Berechnung der Verformungen von Beton- bzw. Stahlbetonbauteilen benötigt und zum anderen im Spannbetonbau nach DIN 4227 [61] zur Berechnung der notwendigen Vorspannung.

Der dynamische Elastizitätsmodul für Beton hingegen tritt zur Zeit nur als Empfehlung und Hinweis als Ergänzung zu DIN 1048 [9] auf und kann als Abschätzung verwendet werden. Aus diesem Grund bezieht sich die gängige Literatur vorwiegend auf den statischen Elastizitätsmodul.

Im Gegensatz zum Stahl, der sich unterhalb der technischen Elastizitätsgrenze ($R_{p,0.01}$) elastisch verhält, also nach einer aufgetragenen Belastung keine bleibenden Verformungen zeigt, ist Beton ein viskoelastischer Stoff mit Überlagerung von elastischem und viskosem bzw. zeitabhängigem Verformungsverhalten (s. auch Kap.

5.4). Infolge innerer Spannungen s treten im belasteten Beton elastische (ϵ_{el}) sowie plastische (ϵ_{pl}) Verformungen auf. Nach der Entlastung bleiben die plastischen Verformungen erhalten, der Prüfkörper weist eine Differenz zur Ursprungslänge auf. Der mit zunehmender Belastung immer stärker ansteigende Anteil der plastischen Verformungen werden vorwiegend den viskosen Eigenschaften des Zementsteines zugeschrieben.

Die Gesamtdehnung ϵ_{ges} eines belasteten Betonkörpers besteht neben der Kriechverformung aus den zwei wesentlichen Komponenten:

$$\epsilon_{ges} = \epsilon_{el} + \epsilon_{pl}.$$

Das Resultat ist eine nichtlineare, von Beginn an gekrümmt verlaufende Spannungs-Dehnungslinie.

Die Voraussetzungen und die Vorgehensweise zur Ermittlung des statischen E-Moduls werden in DIN 1048 Teil 5 [59] beschrieben.

4.2 Querkontraktion / Poissonsche Zahl

Die Belastung eines Körpers verursacht nicht nur die beschriebene Längenänderung in Krafrichtung, sondern auch senkrecht dazu eine entgegengesetzte Längenänderung $\Delta d = d - d'$ (siehe Abb. 5).

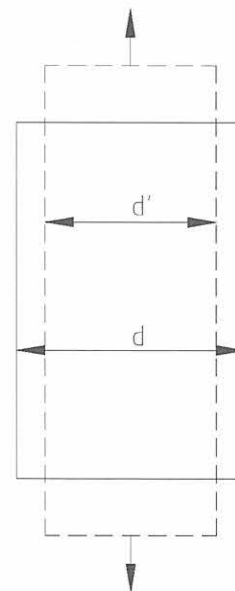


Abb. 5: Querkontraktion bei elastischer Dehnung.

Die Poissonsche Zahl ν bzw. Querdehnungszahl μ ist definiert als der Quotient aus elastischer Querdehnung ϵ_q und elastischer Längsdehnung ϵ_l :

$$\mu = \frac{\Delta d}{d} / \frac{\Delta l}{l} \Rightarrow \mu = \frac{\epsilon_q}{\epsilon_l}$$

Die Querdehnungszahl μ ist nur materialabhängig und liegt bei Normalbeton, je nach Zuschlag, zwischen 0,1

und 0,35. Diese extremen Schwankungen entstehen durch die unterschiedlichen stofflichen Betonzusammensetzungen. Die Querdehnungszahl des künstlichen Steins Beton hängt wiederum von den Querdehnungszahlen seiner Hauptkomponenten Zementstein (μ_m) und Zuschlag (μ_g) sowie deren Volumenanteil ab.

Nach Al-Abibien [51] lässt sich die Querdehnungszahl auch wie folgt berechnen:

$$\text{stat } \mu_b = V_m \cdot \mu_m \left(1 + 0,2 \frac{\mu_g}{\mu_m + \mu_g} \right) + V_g \cdot \mu_g \left(1 - \frac{\mu_m}{\mu_g + \mu_m} \right)$$

Die Werte für μ_m und μ_g sind z. B. in Wesche [51] aufgeführt. Rheinkies kann beispielsweise mit $\mu_g = 0,22$ angenommen werden. Vereinfacht darf nach DIN 1045 mit einem mittleren Wert von $\mu = 0,20$ gerechnet werden. Die dynamische Querdehnungszahl ergibt sich aus dem dynamischen E-Modul und dem dynamischen Schubmodul (s. Kap. 4.5). Ein Vergleich mit der statischen Querdehnungszahl ist jedoch nicht ohne weiteres möglich, da beide unterschiedlich stark vom Feuchtigkeitsgehalt des Probekörpers beeinflusst werden.

Die Längenänderung verursacht auch eine Veränderung des Volumens des Körpers. Die Volumenänderung eines Prismas mit quadratischem Querschnitt ergibt sich aus folgenden Beziehungen [15]:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V}{d^2 \cdot l} = \frac{\Delta l}{l} - 2 \cdot \frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta l}{l} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{\frac{\Delta d}{d}}{\frac{\Delta l}{l}} \right) = \epsilon_l (1 - 2\mu)$$

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{1}{E} \cdot \sigma \cdot (1 - 2\mu)$$

mit $\epsilon_l = \frac{1}{E} \cdot \sigma$ (Hookesches Gesetz)

Da Beton als inkompressibel angesehen wird, kann sein Volumen bei einaxialer Druck- oder Zugbeanspruchung sich nur vergrößern oder gleich bleiben, d.h. $\Delta V \geq 0$. Nach der obigen Beziehung erreicht die Querdehnung m den größten Wert: $\mu = 0,5$ eines Körpers, wenn das Volumen konstant bleibt ($\Delta V = 0$).

Es gilt also: $0 \leq \mu \leq 0,5$.

Die Querdehnungszahl von Beton kann zum einen im statischen Versuch und zum anderen mittels dynamischer Prüfmethode ermittelt werden [43].

4.3 Kompressionsmodul

Die Volumenelastizität eines Körpers wird durch den Begriff des Kompressionsmoduls K bzw. Kompressibilität χ ($1/K$) zahlenmäßig erfasst und stellt eine stoffspezifische Größe dar [20].

Ein Körper mit dem Anfangsvolumen V , der durch Druck Δp allseitig belastet wird, zeigt, dass die Volumenabnahme innerhalb gewisser Grenzen der Druckzunahme und dem Ausgangsvolumen proportional ist. Die Abb.6 zeigt einen Körper, auf den ein hydrostatischer Druck

bzw. Zug wirkt, was wiederum volumenelastische Verformungen verursacht.

Für die Änderung des Volumens entsteht somit folgende Beziehung:

$$\Delta V = -K \cdot V \cdot \Delta p \Rightarrow K = -\frac{\Delta p \cdot V}{\Delta V}$$

Das negative Vorzeichen ergibt sich daraus, dass bei zunehmendem allseitigen Druck das Volumen abnimmt.

Die Volumenänderung solch eines hydrostatisch druckbeanspruchten Körpers ist dreimal größer als die eines einaxial druckbeanspruchten Körpers. Damit lässt sich eine Beziehung zwischen dem E-Modul, dem Kompressionsmodul sowie der Querdehnungszahl angeben ($\sigma = -\Delta p$):

$$\frac{\Delta V}{V} = -\frac{3}{E} \cdot \Delta p \cdot (1 - 2\mu)$$

Nach dem Einsetzen der obigen Gleichung ergibt sich:

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}$$

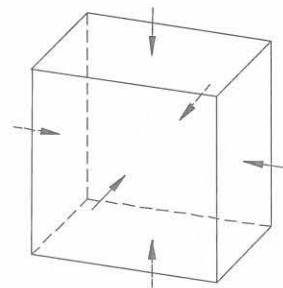


Abb. 6: Volumenelastische Verformungen.

4.4 Schubmodul

Wird ein Würfel mit der Kantenlänge l durch eine Scherkraft T (Schubkraft) belastet, so verursacht diese eine Winkeländerung der senkrechten Kanten des Körpers (s. Abb. 7).

Der Schubmodul G ist für kleine Winkeländerungen γ definiert als das Verhältnis aus Schubspannung $\tau = T/l^2$ zu zugehöriger elastischer Schubverformung (Winkeländerung) γ und stellt ein Maß für die Gestalts- und Formelastizität dar [15].

Schubmodul: $G = \frac{\tau}{\gamma}$

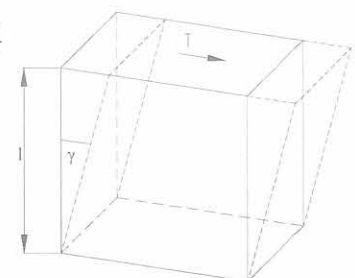


Abb. 7: Würfeldeformation durch Schubkraft.

Eine weitere Möglichkeit, den Schubmodul zu ermitteln, ergibt sich aus der Elastizitätstheorie über den E-Modul und die Querdehnungszahl und lautet:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}.$$

4.5 Abhängigkeiten zwischen den elastischen Komponenten

Im Rahmen der Gültigkeit des Hookeschen Gesetzes existieren zwischen den vier unabhängigen elastischen Kennwerten (Elastizitätsmodul E, Querdehnungszahl μ , Kompressionsmodul K und Schubmodul G) zwei Beziehungen. Die eine ergibt sich aus der Elastizitätstheorie (s. Kap. 4.4) und lautet:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}.$$

Die andere Beziehung leitet sich über den Kompressionsmodul (s. Kap. 4.3) her. Bei einem durch hydrostatischen Druck beanspruchten Prisma mit quadratischem Querschnitt gilt:

$$K = \frac{E}{3(1-2\mu)}.$$

Umgestellt ergeben sich daraus folgende Beziehungen zur Querdehnungszahl:

$$\mu = \frac{E}{2G} - 1 \quad \text{bzw.} \quad \mu = \frac{1}{2} - \frac{E}{6K}.$$

Aus den Grenzen der Querdehnungszahl (s. Kap.4.2) folgt:

$$2 \leq \frac{E}{G} \leq 3.$$

Umgestellt ergeben sich somit auch Grenzen für der Schubmodul G, der vom E-Modul abhängig ist. Somit muss der Schubmodul G im Intervall

$$\frac{E}{2} \geq G \geq \frac{E}{3}$$

liegen.

5 Prüfverfahren

5.1 Allgemeines

Elastische Kenngrößen geben das Verformungsverhalten sowie die Festigkeitseigenschaften eines Materials wieder. Sie können mittels statischer und dynamischer Verfahren ermittelt werden. Die Prüfverfahren unterscheiden sich in der Art der Beanspruchung der Prüfkörper.

Für das Verformungsverhalten von Beton stellt der Elastizitätsmodul die wichtigste elastische Kenngröße dar und wird je nach Prüfverfahren als dynamischer E-Modul (E_{dyn}) oder statischer E-Modul (E_{stat}) bezeichnet.

5.2 Dynamischer Elastizitätsmodul

Die Ermittlung der elastischen Kenngrößen kann mittels verschiedener dynamischer Verfahren ohne erkennbare Beanspruchung des Probekörpers durchgeführt werden.

Der dynamische E-Modul wurde durch zwei verschiedene Messverfahren nach DAfstb, Heft 422 [9] ermittelt: Zum einen durch die Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung (EnI) und zum anderen durch die Laufzeitmessung von Ultraschall-Impulsen (US).

Bereits 1965 veröffentlichten Hennicke und Leers [25], wie sich elastische Kennwerte durch dynamische Messmethoden ermitteln lassen. E. Pohl [38] führte 1965 bis 1969 Untersuchungen zu zerstörungsfreien Prüf- und Meßmethoden an Betonkörpern durch, welche auf der Grundlage der Ultraschall-Laufzeitmessung und auf der Resonanzfrequenzmethode basierten.

Mit dem dynamischen Prüfverfahren ist es möglich, zerstörungsfrei elastische Kennwerte über bestimmte Zeiträume an denselben Proben zu ermitteln, mögliche Veränderung der Festigkeit von Probekörpern über dem dynamischen E-Modul nachzuweisen und sogar auf physikalische Eigenschaften zu schließen.

Die Wiederverwendbarkeit der Prüfkörper spart erhebliche Kosten und vermindert, durch die verringerte Probekörperentnahme, auch die Beschädigung an fertigen Bauwerken.

Die dynamischen Prüfverfahren stellen aber nur eine bedingte Abschätzung des Elastizitätsmoduls dar, weil der dynamische E-Modul höher als der maßgebende statische E-Modul liegt [51].

5.2.1 Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung (EnI)

5.2.1.1 Beschreibung des Verfahrens

Wird der Probekörper an einer geeigneten Stelle (Abb. 8) impulsartig leicht angeschlagen, schwingt er nach einer bestimmten Dauer nur noch in der ersten Eigenfrequenz. Die anfänglich große Amplitude nimmt kontinuierlich ab.

Die Eigenschwingzeitmessung wurde mittels eines Grindo-Sonic-Gerätes durchgeführt. Diese dynamische Meßmethode basiert auf der Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung. Die Impulsanregung erfolgt durch ein leichtes Anschlagen des Probekörpers. Das Ergebnis ist ein Anzeigewert der Grundeigenschwingzeit zweier Schwingungen in ms. Dieser Anzeigewert ist abhängig von der Geometrie des Probekörpers, seiner Rohdichte und der gewählten Schwingungsform (Dehn-, Torsions-, Biegeschwingung).

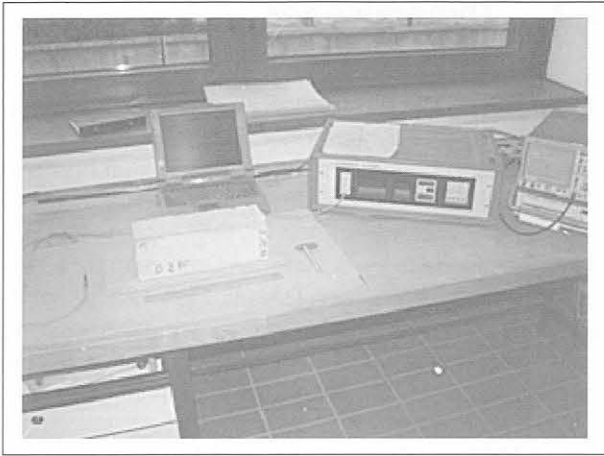


Bild 1: Grindo-Sonic-Arbeitsplatz

Bild 1 zeigt den Messgeräteaufbau bei der Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung. Zu sehen ist ein auf Schaumstoff gelagerter Probekörper. Rechts davon liegt der Anschlaghammer und links der Schwingungsaufnehmer, der mit dem Grindo-Sonic-Gerät verbunden ist und das wiederum mit dem nebenstehenden Oszilloskop.

5.2.1.2 Voraussetzungen und Anwendung

Die Größe und Härte des Anschlaggerätes (Hammer) muss auf die Probekörpergröße abgestimmt werden. Der zu verwendende Anschlaghammer sollte eine möglichst kugelförmige Spitze haben. Die Hammermasse sollte erheblich geringer als die Probenmasse sein.

Das Bild 2 zeigt den bei den Messungen verwendeten Anschlaghammer. Er besteht aus einem federnden Stiel und einem Plastikkopf mit eingelassener Stahlkugel.

Die Probekörper wurden mit der Stahlkugelseite des Anschlaghammerkopfes angeschlagen. Das Anlegen

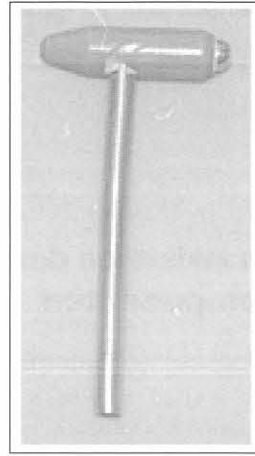


Bild 2: Anschlaghammer

des Schwingungsaufnehmers an den Probekörper erfolgt manuell.

Dadurch, dass das Verhältnis kleinster zu größter Hauptabmessung kleiner als 1:5 war, konnte die Prüfung der Probekörper auf einer nachgiebigen Schaumstoffunterlage erfolgen. Anschlag- und Messpunkte für die Eigenschwingzeitmessung aus Biege-, Torsions- und Dehnschwingung sind in Abb.8 dargestellt.

Die Messwerte müssen unter Berücksichtigung eines Streubereichs < 1% reproduzierbar sein, um zur Berechnung des dynamischen E_{Enl} -Moduls herangezogen werden zu können.

Die Eigenschwingzeit der Biegeschwingung wurde sowohl über die Höhe als auch über die Breite des Probekörpers gemessen, um eine mögliche, durch die Herstellung bedingte, ungleichmäßige Zuschlagverteilung in den Probekörpern zu berücksichtigen.

Zur Berechnung des dynamischen E_{Enl} -Moduls wurden beide Eigenschwingzeiten gemittelt.

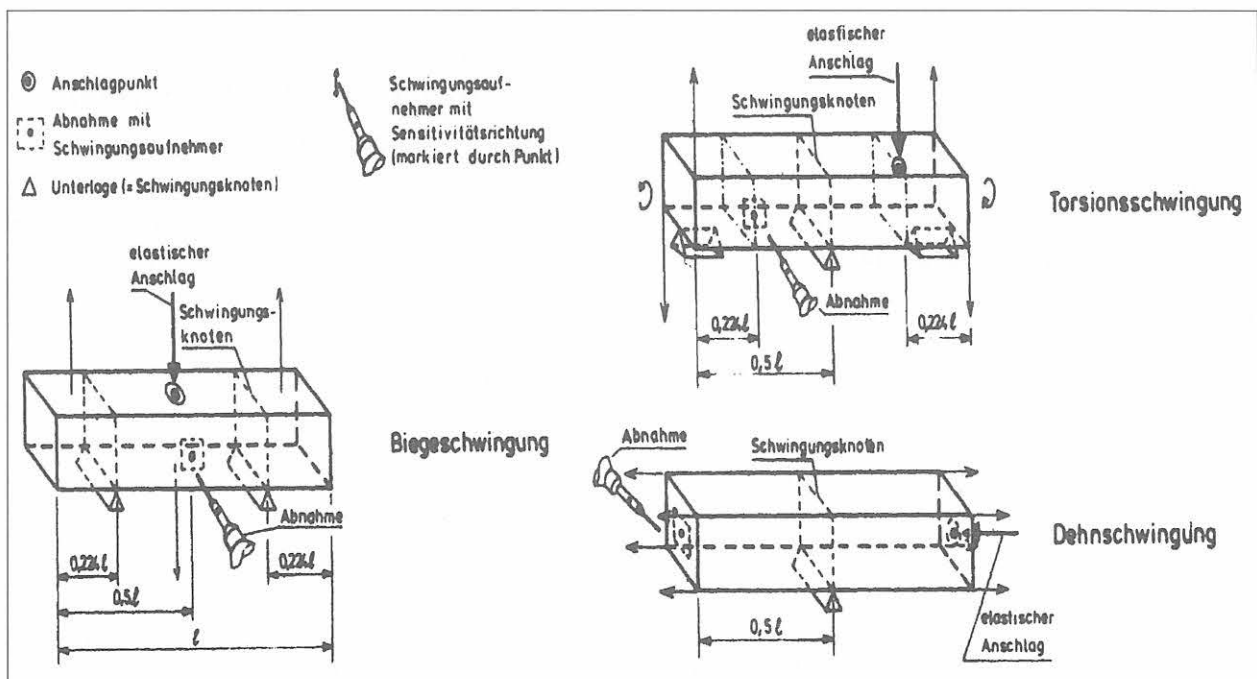


Abb.8: Versuchsanordnung für die Eigenschwingzeitmessung der Grundswingungsformen nach Impulsanregung bei Prismen [9].

5.2.2 Laufzeitmessung eines Ultraschall-Impulses (US)

5.2.2.1 Beschreibung des Verfahrens

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit v einer in Längsrichtung wirkenden mechanischen Welle in einem elastischen Körper mit kleinem Querschnitt und großer Länge steht mit dem dynamischen E-Modul von Beton mit der Dichte ρ in folgender Beziehung:

$$v = K \sqrt{E_{\text{dyn}} / \rho} .$$

Die Konstante K berücksichtigt bei elastischen Körpern mit großen Querabmessungen a, b im Vergleich zur Wellenlänge l ($l \ll a, b$) die Querdehnungsbehinderung. Bei Körpern ohne Querdehnungsbehinderung ist die Konstante K gleich Eins. Ansonsten wird der Wert der Konstanten K über die Querdehnungszahl in Abhängigkeit von der Wellenart bestimmt:

$$\text{Longitudinalwelle: } K_l = \sqrt{\frac{1 - \mu_{\text{dyn}}}{(1 + \mu_{\text{dyn}})(1 - 2\mu_{\text{dyn}})}}$$

$$\text{Transversalwelle: } K_t = \sqrt{\frac{1}{2(1 + \mu_{\text{dyn}})}}$$

Bei Beton kann der Wert der Konstante K_l zwischen 1,01 und 1,27 bzw. der Konstante K_t zwischen 0,61 und 0,67 schwanken.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit v stellt eine Stoffkonstante dar, weil sich mechanische Wellen mit einer für den Baustoff charakteristischen Schallgeschwindigkeit ausbreiten.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit v wird beim Ultraschall-Prüfverfahren durch die Laufzeit t der schnellsten Welle, der Longitudinalwelle (Längs-, Dichte-, Druck- oder Kompressionswelle), und der bekannten zurückgelegten Weglänge zwischen Sende- und Empfangskopf ermittelt.

$$v = l/t \quad (\text{mit } l \dots \text{gemessene Länge der durchschallten Strecke,} \\ t \dots \text{ermittelte Laufzeit } t \text{ des Impulses)}$$

Die Durchdringungstiefe der in bestimmten Zeitintervallen abgegebenen Schallimpulse hängt infolge Dämpfung der Schwingung entscheidend von der Frequenz ab, die allein vom Schallsender vorgegeben wird. Je niedriger die verwendete Frequenz ist, desto größere Betondicken lassen sich durchschallen.

In der Regel beträgt die Schallfrequenz für Betonprüflinge 20 - 150 kHz, in Ausnahmefällen kann der Bereich auf 10 - 200 kHz vergrößert werden.

Bei Vergleichsmessungen sollte die Prüffrequenz konstant gehalten werden.

Nach Neisecke [34] ist nicht zu erkennen, ob bei der Durchschallung eines Probekörpers wirklich eine reine Longitudinalwelle entsteht. Der damit ermittelte Modul ist zwar ein verwendbarer Materialkennwert, aber nicht die Materialkonstante E_{dyn} . Neisecke empfiehlt daher eine Umbenennung in z.B. E_{US} (US – Ultraschall), um den Unterschied hervorzuheben.

5.2.2.2 Voraussetzungen und Anwendung

Das Ultraschall-Prüfverfahren ist ein einfaches, unkompliziertes und zerstörungsfreies Prüfverfahren. Die Messeinheit besteht lediglich aus einem elektrischen Impulsgenerator mit Verstärkerteil, einem Sender- und Empfängerprüfkopf und einem elektronischen Messgerät mit Messwertanzeiger. Das elektronische Messgerät mit Messwertanzeiger dient zur Messung und Wiedergabe der Laufzeit eines Sendeimpulses zwischen der Entstehung im Sendeschwinger und dem Eintreffen am Empfangsschwinger.

Das Bild 3 zeigt den Ultraschall-Prüfstand der Bundesanstalt. Sende- und Empfangskopf werden hier pneumatisch an den Prüfkörper gepresst.

Die Geräteeinheiten sind in der Regel nicht sehr groß und einfach zu handhaben. Daher können diese vorwiegend mobilen Einheiten gut auch auf Baustellen eingesetzt werden.

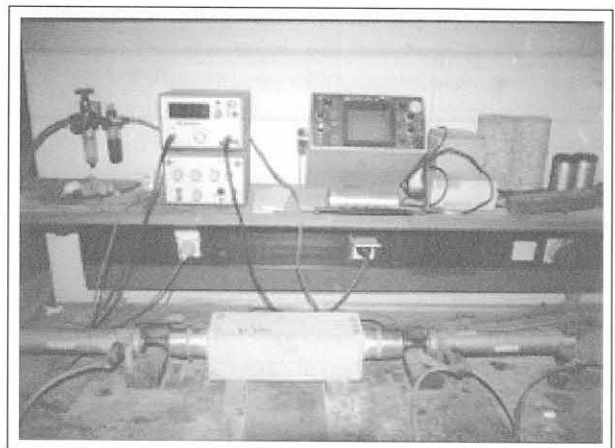


Bild 3: Durchschallungsprüfstand

Der Ultraschallsender wandelt die elektrischen Impulse des Maßeinheitengenerators in mechanische Impulse um und leitet diese, infolge der direkten Ankopplung, in den Probekörper ein. Der erzeugte Longitudinalschwingungsimpuls durchläuft den Probekörper mit der bekannten Weglänge l und wird nach einer Laufzeit t durch den Empfangsschwinger in ein elektrisches Signal zurückgewandelt.

Die Laufzeit der mechanischen Impulse durch den Körper wird vom Anzeigegerät der Messeinheit angezeigt.

Um den Anzeigewert zur Berechnung des dynamischen E_{US} -Moduls heranziehen zu können, muss dieser re-

produzierbar sein. Die dabei zulässige Streuung der Werte beträgt < 1 %.

Die Ultraschall-Messmethode eignet sich für Betonbauteile bis zu einer Dicke von 3 m, deren gegenüberliegende Seiten zugänglich sind.

5.2.2.3 Allgemeine Hinweise

Die Oberfläche an der Prüfstelle muss eben und glatt sein.

Sender und Empfänger befinden sich üblicherweise an den gegenüberliegenden Seiten.

Um eine gute Ankopplung zu gewährleisten, sollten Sende- und Empfangskopf durch eine dünne Schicht eines Koppelmediums, wie z. B. Schmierseife oder Vaseline, mit dem Probekörper verbunden sein.

Die Messeinheit muss vor jeder Laufzeitmessungsreihe mit einem speziellen Durchschallungskörper kalibriert werden.

5.2.3 Äußere Einflüsse auf die dynamischen Prüfverfahren

Die Ergebniswerte der Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung können u.a. durch die Lagerung, dem Feuchtigkeitsgehalt und Temperatur des Probekörpers, die Anschlagkraft und die ungenaue Einhaltung der Mess- bzw. Anschlagpunkte beeinflusst werden [25]. Die Laufzeitmessung eines Ultraschall-Impulses kann nach der ISO 8047 [63] durch folgende Prüfbedingungen beeinflusst werden:

- **Oberflächenzustand:**
Die Messoberfläche der Probekörper muss möglichst glatt sein. Messungen sollten daher an den Schalungsflächen durchgeführt werden. Übermäßig raue Oberflächen sind durch Abschleifen bzw. Abgleichen zu glätten.
- **Feuchtigkeitsgehalt:**
Mit steigendem Feuchtigkeitsgehalt nimmt die Ultraschallgeschwindigkeit in geringem Maße zu.
- **Betontemperatur:**
Temperaturänderungen des Betons im Bereich von 5 °C und 30 °C (s. auch Diem [12]) haben erfahrungsgemäß keinen erheblichen Einfluss auf die Ultraschallgeschwindigkeit.
- **Größtkorn des Zuschlages (Nennmaß):**
Das Verhältnis Größtkorn des Zuschlags zur Mindestlänge sollte 1:5 betragen, um eine möglichst direkte Durchschallung zu gewährleisten.
- **Mikrorisse und Spannungen:**
Mikrorisse verringern grundsätzlich die Schallge-

schwindigkeit. Der Einfluss der Mikrorisse ist am stärksten, wenn diese senkrecht zum Impulsweg verlaufen.

5.3 Statischer E-Modul

5.3.1 Allgemeines

Beim statischen Prüfverfahren wird ein Probekörper eines zu untersuchenden Materials mittels einer Prüfmaschine belastet. Während des Belastungsvorgangs wird die aufgebrachte Kraft sowie die Längenänderung bzw. Dehnung des Probekörpers kontinuierlich erfasst. Der gesuchte statische E-Modul ergibt sich aus der Spannungs-Dehnungslinie, die aus der Kraft der Belastungsfläche des Körpers und der gemessenen Dehnung gebildet wird (s. hierzu auch Kap.4.1).

Der Elastizitätsmodul E ist definiert als das Verhältnis von Spannung zu elastischer Dehnung

$$E = \sigma / \varepsilon_{el}$$

Die Bestimmung des statischen Elastizitätsmoduls geschah nicht nach der in der deutschen Norm beschriebenen Methode [49], sondern unmittelbar an der Spannungs-Verformungskurve.

Frühere Untersuchungen der Bundesanstalt [56] an zylindrischen Probekörpern ergaben, dass sich die auf beide Arten ermittelten E-Moduln kaum voneinander unterscheiden.

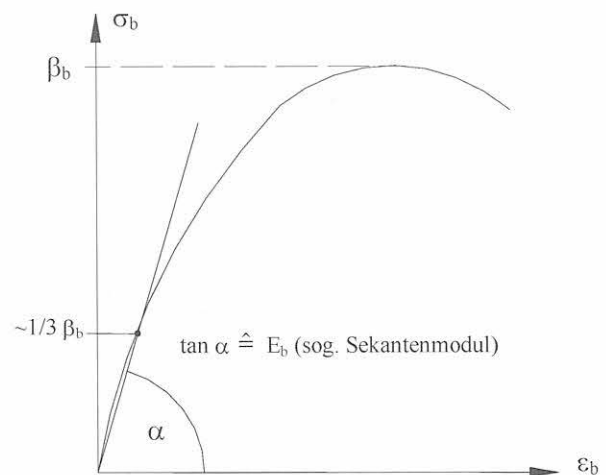


Abb.9: E-Modulermittlung anhand der vorliegenden Spannungs-Dehnungslinie

5.3.2 Beschreibung des Verfahrens

Nach dieser Methode werden der statische E-Modul und die Druckfestigkeit aus demselben Versuch ermittelt. Dies spart Zeit, Material und Kosten.

Der E-Modul ergibt sich, wie die Abb.9 prinzipiell zeigt, aus der Steigung der Verbindungslinie vom Ursprung

bis zu dem Punkt auf der gezeichneten Spannungs-Dehnungslinie bei einem Drittel der Höchstspannung. Die detaillierte Vorgehensweise bzw. Anwendung dieser Methode wird bei der Versuchsdurchführung im Kap. 10.4 beschrieben.

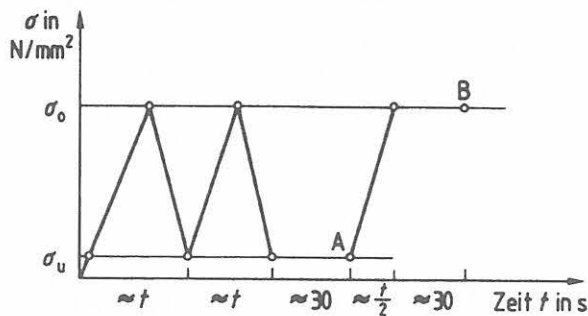


Abb. 10: Belastungs-Zeit-Diagramm für die E-Modulmessung nach DIN 1048 Teil 5, 7.5 [59].

- A Ablesung bzw. Registrierung der unteren Spannung σ_u sowie der zugehörigen Dehnung ε_u bzw. der Messlänge l_u .
- B Ablesung bzw. Registrierung der oberen Spannung σ_o sowie der zugehörigen Dehnung ε_o bzw. der Messlänge l_o .
- t Be- und Entlastungszeit, die sich aus der Be- und Entlastungsgeschwindigkeit ergibt.

Diese Methode unterscheidet sich in einigen Punkten von der Vorgehensweise nach DIN 1048, die in Abb. 10 dargestellt ist.

Um den statischen E-Modul nach DIN 1048 Teil 5 zu ermitteln, muss die mittlere Druckfestigkeit der Probekörper bekannt sein. Die Probekörper werden zweimal mit etwa einem Drittel der Druckfestigkeit beansprucht, um ausschließlich eine elastische Verformung zu erzeugen. Nach der dritten Belastung und 30 Sekunden Wartezeit werden die Messwerte zur E-Modulberechnung bestimmt.

5.4 Unterschiede der Prüfverfahren

Aus der Literatur [28][38][50][51] ist bekannt, dass abhängig vom Prüfverfahren von einander abweichende E-Modulwerte für ein und denselben Probekörper ermittelt werden.

Die Bestimmung des E-Moduls nach den einzelnen dynamischen Prüfverfahren führt, da sie sich auf unterschiedliche Bereiche des Prüfkörpers beziehen, in der Regel nicht zum gleichen Ergebnis und können bis zu $\pm 20\%$ voneinander abweichen [38]. Dabei ergeben sich bei der US-Methode höhere E-Modul-Werte als bei der EnI-Methode [4].

Die Abweichung zwischen statischen und dynamischen E-Moduln ist begründet durch den unterschiedlichen Einfluss der Zuschlagart, des Zementsteinporenraumes [28], des Wassersättigungsgrades sowie der aufgetragenen Last.

Bei geringer Vorspannung unterscheiden sich E_{dyn} und E_{stat} nur unwesentlich; nach folgender empirischen Näherungsformel (siehe Abb. 11) nehmen sie bei 4 MPa gleiche Werte an [38]:

$$E_{\text{stat}} = E_{\text{dyn}} \left(1 - 0,15 \frac{\sigma - 4}{10} \right), \quad \varepsilon, \sigma \text{ in MPa}$$

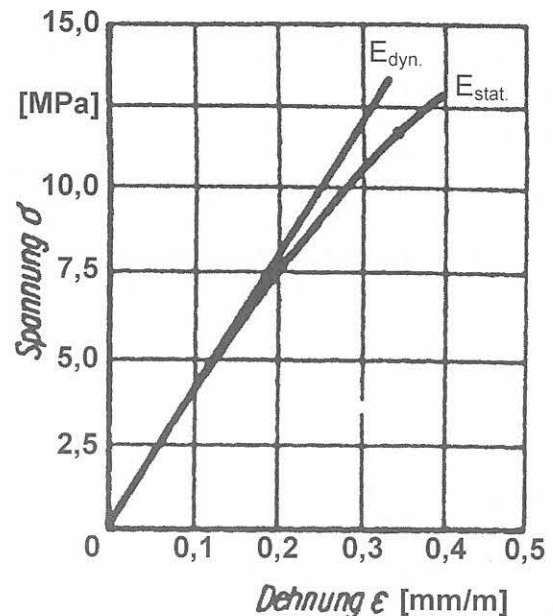


Abb. 11: Spannungs-Dehnungsdiagramm für Beton.

Bei größeren Spannungen hingegen ist ein objektiver Vergleich [50][51] nicht direkt möglich. Es können Unterschiede bis zu 20% oder nach Hirsch [18] ein Verhältnis von $E_{\text{dyn}}/E_{\text{stat}} = 1,10$ auftreten [35][51]. Der statische E-Modul ist stets kleiner als der dynamische [28].

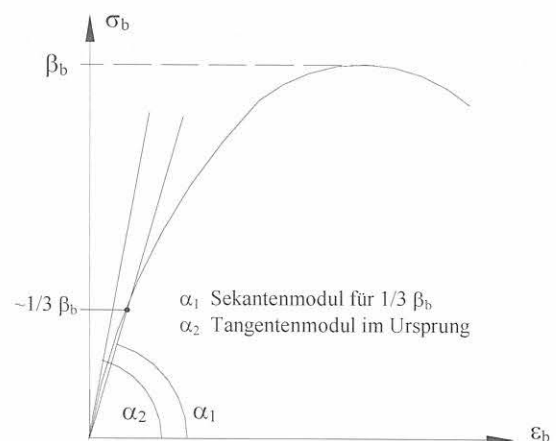


Abb. 12: Definitionen des E-Moduls (schematische Darstellung).

Dies ergibt sich infolge des zeitabhängigen Verhaltens des viskoelastischen Stoffes Beton und der verschiedenen Beanspruchungsarten sowie aus der unterschiedlichen Art der Ermittlung. Der dynamische E-Modul stellt den Tangentenmodul im Ursprung der Spannungs-Dehnungskurve dar. Die Verformungen bei der Schwingung des Prüfkörpers sind praktisch zu ver-

nachlässigen (s. Abb.12). Der statische E-Modul dagegen wird „vereinfacht“ nach dem Hookeschen Gesetz als Sekantenmodul bei einem Drittel der Probestkörperdruckfestigkeit berechnet, da auftretende bleibende Verformungen im Gebrauchszustand vernachlässigbar klein sind und unberücksichtigt bleibt.

Eine vollständige Übereinstimmung der dynamischen und statischen E-Moduln ergibt sich theoretisch nur bei einem linearen Verlauf der σ/ϵ -Linie. Infolge der viskoelastischen Eigenschaften des Betons ergibt sich bei Beanspruchung σ – je nach Belastungszeit bzw. Belastungsgeschwindigkeit – eine mehr oder weniger stark gekrümmte Spannungs-Dehnungslinie. Ein gerader Verlauf würde bei einer plötzlichen, unendlich schnellen Belastung entstehen, denn eine Steigerung der Belastungsgeschwindigkeit $\dot{\sigma}$ hat eine Verringerung der plastischen Verformungen und damit eine Erhöhung der Steigung der Spannungs-Dehnungslinie zur Folge. Die Verformbarkeit sinkt während die Festigkeit ansteigt (s. Abb.13).

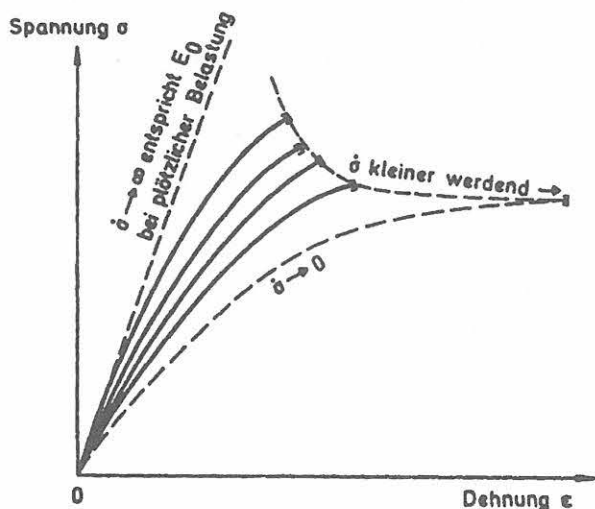


Abb. 13: Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf den Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie [50].

Mit zunehmendem Alter nähern sich die Werte der statischen E-Modulprüfung und der des dynamischen E_{Enl} -Modulprüfverfahrens einander an [16][47]. Laut Stanton [47] ist das Verhältnis zwischen $E_{stat.}$ und $E_{dyn., Enl}$ im Alter von 28 Tagen noch $E_{stat.}/E_{dyn.} = 0,62$, nach sechs Monaten $E_{stat.}/E_{dyn.} = 0,76$ und nach zwei Jahren sogar schon $E_{stat.}/E_{dyn.} = 0,9$.

Roth [40] stellt in diesem Zusammenhang fest, dass sich der statische E-Modul (nach ÖNORM B 3303 [64] und der dynamische E_{Enl} -Modul mit wachsendem E-Modul annähern. Für diese Korrelation gibt er folgende Beziehung an:

$$E_{dyn.} = 166 + 0,674 \cdot E_{stat.} \quad \text{mit } E \text{ in } 10^3 \text{ kp/cm}^2 \text{ [40].}$$

6 Einflüsse auf den Elastizitätsmodul

6.1 Einflüsse aus der Betonzusammensetzung

Der E-Modul ist von der Betonzusammensetzung und deren Volumenanteilen abhängig. Bei gleicher Druckfestigkeit wird der Elastizitätsmodul E vor allem vom Elastizitätsmodul der Zementsteinmatrix E_m und des Zuschlags E_g sowie des Zementsteingehaltes V_m beeinflusst [51].

Der E-Modul E_{m28d} des Zementsteins ist wiederum vom Zementsteinporenraum (w/z-Wert), der Druckfestigkeit und damit auch von der Hydratationsgeschwindigkeit abhängig. Mit steigendem w/z-Wert vergrößert sich der Porenraum und der E-Modul sinkt. Bei schnellerer Anfangserhärtung eines Zementes hingegen steigt der E-Modul leicht an. E_{m28d} liegt zwischen 6.000 und 30.000 N/mm².

Der E-Modul des Zuschlags E_g schwankt erheblich. Er hängt von der Gesteinsart und von der Porosität des Materials ab. Der E-Modul von Hochofenschlacke liegt beispielsweise zwischen 75.000 – 95.000 N/mm², der von Rheinkies bei etwa 40.000 N/mm² und der von Sandstein kann sogar nur um die 10.000 N/mm² betragen. Die Wahl des Zuschlages beeinflusst damit erheblich den E-Modul des Betons. Er kann bei gleicher Druckfestigkeit nach [51] bis zu – 50 % bzw. + 75 % von den Rechenwerten der Normen abweichen. Die Rechenwerte des E-Moduls für Beton (s. Tabelle 1) beziehen sich auf Zuschläge aus quarzitischem Kies (z. B. Rheinkies). Die Ergebnisse von Mayer [32] belegen dies und zeigen, dass der E-Modul von Beton aus Mainkies um ca. 30 % geringer bzw. der aus Moränekies um ca. 15 % größer ist als der aus Rheinkies.

Tabelle 1: Rechenwerte für den Elastischen - und Schubmodul im Alter von 28 Tagen nach DIN 1045 und DIN 4227 Teil 1.

Betonfestigkeitsklasse	B 5	B 10	B 15	B 25	B 35	B 45	B 55
Rechenwert β_R	3,5	7,0	10,5	17,5	23	27	30
E - Modul in N/mm ²	-	22000	26000	30000	34000	37000	39000
Schubmodul G in N/mm ²	-	-	-	13000	14000	15000	16000

Der Zementsteingehalt V_m bzw. Zuschlagsgehalt bewirkt nach Wesche [51] im Bereich der Baustellenbetone, dass sich der E-Modul von Beton mit hohem – im Gegensatz zu niedrigem – Zementsteingehalt bei gleichem w/z-Wert und somit gleicher Druckfestigkeit verdoppeln kann.

Die Einflüsse von Zementsteingehalt und Zuschlagsart auf den E-Modul finden in den Normen keine konkrete Berücksichtigung. Die Angaben der Rechenwerte des E-Moduls beziehen sich in den Regelwerken nur auf die Druckfestigkeit, während u.a. auch Untersuchungen von Manns [28] und Mayer [32] belegen, dass die zuvor erwähnten Abhängigkeiten den E-Modul und

die Druckfestigkeit in unterschiedlichem Maße beeinflussen. Ausnahme ist der in DIN 4227 Teil 1, 7.3 (1) aufgeführte Vermerk, dass die Richtwerte für den E-Modul von Beton bei stark wassersaugenden Zuschlagsmaterialien bis zu 40 % geringer und bei dichten magmatischen Gesteinen bis zu 40 % größer sein können.

Nach den Untersuchungen von Manns [28] hängen E-Modul sowie Druckfestigkeit auch vom Kornaufbau des Zuschlagsgemisches ab. Große Zuschlagkörner beeinflussen den E-Modul mehr als kleinere. Bei wachsendem Zuschlagkorn unter sonst gleichen Bedingungen kann der E-Modul bis zu 10 % steigen bzw. die Festigkeit bis zu 20 % sinken. Der E-Modul von Betonen mit ähnlicher Druckfestigkeit aus verschiedenen Zuschlägen kann sich daher um bis zu 20 % unterscheiden.

Die Untersuchungen von Mayer [32] mit Zuschlägen unterschiedlicher Herkunft und gleicher Betonzusammensetzung ergeben ähnliches. Sie zeigen, dass der Einfluss der Zuschläge auf den E-Modul und die Druckfestigkeit von Beton anders gerichtet und unterschiedlich groß sein können. Das bedeutet, dass sich bei der Verwendung beispielsweise von Mainkies anstelle von Rheinkies als Zuschlag eine Erhöhung der Druckfestigkeit um ca. 15 % und eine Verringerung des E-Moduls um ca. 30 % ergeben kann.

Diese Ergebnisse der Untersuchungen stehen im Widerspruch zur grundlegenden Annahme, dass sich E-Modul und Druckfestigkeit bei allen Einflüssen proportional verhalten.

6.2 Einflüsse aus den Lagerungsbedingungen

Einen anderen wesentlichen Einfluss auf den E-Modul von Probekörpern aus Beton hat die Art der Lagerung: Wasserlagerung, Trockenlagerung, das vorherrschende Klima, Feuchtigkeitsgehalt, Temperatur und die Probekörpergröße.

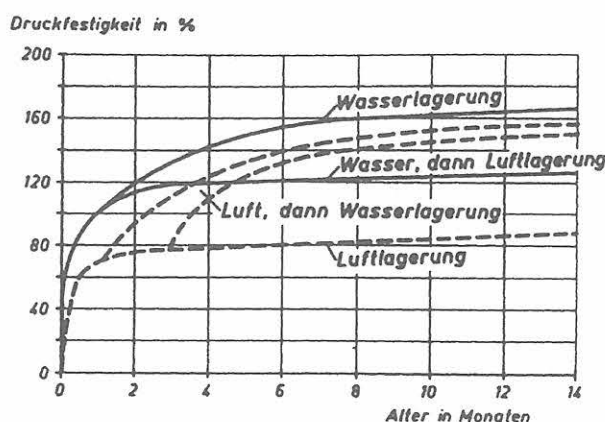


Abb. 14: Einfluss der Feuchtigkeit auf die Festigkeitsentwicklung von Beton [51].

Die Temperatur sowie die Probekörpergröße beeinflussen bei Luftlagerung mit einer relativen Luftfeuchtigkeit unter 65 % die Austrocknungsgeschwindigkeit und somit auch die E-Modulentwicklung. Kleine Probekörper haben im Vergleich zu großen einen niedrigeren E-Modul, da sie schneller austrocknen. Das für die Hydratation wichtige Wasser fehlt und die Erhärtung hört auf.

Wassergefüllte Poren sind nahezu inkompressibel. Deshalb erhält man durch dauernde Feuchtlagerung der Probekörper die maximale Festigkeit, aber auch einen hohen E-Modul (s. Abb. 14). Die anderen Einwirkungen, wie Lagerungsart, Temperatur und Körperdicke, beeinflussen den Feuchtigkeitsgehalt der Probekörper und damit den E-Modul nur indirekt.

6.3 Temperatureinflüsse

Der Einfluss der Temperatur auf den E-Modul von Beton entsteht durch das Austrocknen der Kapillaren sowie die dadurch bedingten Schwindvorgänge und hängt somit wiederum von der Betonzusammensetzung, der Zementart, der Zuschlagsart, des w/z-Werts usw. ab (s. Kap. 6).

Die Abb. 15 zeigt die Abnahme des E-Moduls von Normalbeton auf Portlandzementbasis bei hohen Temperaturen [40]. Der E-Modul beträgt bei +300°C nur noch 50 % seines ursprünglichen Wertes bei Raumtemperatur. Der zu Beginn der Erwärmung nicht so schnelle Abfall der Druckfestigkeit kann z. B. bei Bränden zu großen Verformungen an Betonbauteilen führen.

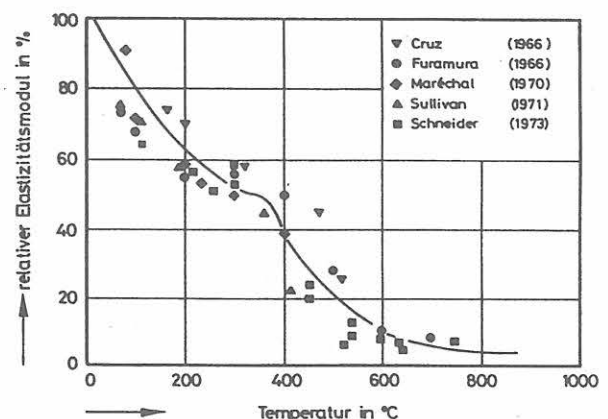


Abb. 15: Zusammenhang zwischen hohen Temperaturen und dem E-Modul von Normalbeton auf Portlandzementbasis [40].

Bei niedrigen Temperaturen (unter -100°C) bleibt der E-Modul von trockenem Beton in etwa konstant. Bei feuchtem Beton kann der E-Modul um bis zu 50 % ansteigen.

Für den Einfluss der Temperatur auf die Eigenschaften von Beton sind in der CEB-FIP Model Code MC 90 [10] analytische Beziehungen im Temperaturbereich von 0 °C bis + 80 °C angegeben. Die folgende Beziehung zeigt den Einfluss der Temperatur auf den E-Modul.

$$E_{28d}(T) = E_{28d} (1,06 - 0,003T/T_0)$$

- mit $E_{28d}(T)$. E-Modul im Alter von 28d bei einer Temperatur T
- E_{28d} ... E-Modul im Alter von 28d bei einer Temperatur von 20 °C.
- T ... Temperatur in °C
- T_0 ... 1°C.

Das bedeutet, dass der E-Modul bei 80 °C auf 82 % fällt, bezogen auf den 20 °C-Wert.

Im Temperaturbereich von 15 °C bis 22 °C (Untersuchungen nach DIN 1048) schwankt der Elastizitätsmodul um etwa 2 %, was zu vernachlässigen ist.

6.4 Methoden zur Berechnung des Elastizitätsmoduls

Aufgrund des viskoelastischen Verhaltens von Beton und der damit verbundenen Schwierigkeit, die elastischen Formänderungen zu bestimmen, finden sich in der Literatur eine Vielzahl von Zusammenhängen zwischen dem E-Modul und anderen einfacher zu bestimmenden Eigenschaften, wie meist Festigkeit β und Dichte ρ . Die damit ermittelten elastischen Kennwerte werden in der Betontechnologie einheitlich als E-Modul bezeichnet. Nebenzeichen geben das verwendete Prüfverfahren an. Infolge der sehr unterschiedlichen Prüfverfahren und Definitionen können die E-Moduln für ein und denselben Betonprüfkörper in ihrer Höhe erheblich voneinander abweichen.

Manns [29],[28] betrachtet in seiner folgenden Formel Beton als Zweistoffsystem aus Zementstein und Zuschlag. Er berechnet den statischen E-Modul von wassergesättigtem Beton im Alter von 28 Tagen unter Berücksichtigung der im Kap. 6 beschriebenen Einflüsse.

$$\text{stat. } E_{b28d} = \alpha_2 \cdot \text{stat. } E_m = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot 12500 \text{ N/mm}^2$$

- mit α_1 ... Faktor der vom Verhältnis des E-Modul-Zuschlags, Zementstein und dem Zementsteingehalt abhängt,
- α_2 ... Faktor aus Zementsteindichtigkeit bzw. -porenraum oder w/z-Wert und Zementart.

Die Faktoren α_1 und α_2 lassen sich mit den nebenstehenden Diagrammen in den Abb.16 und Abb.17 ermitteln.

Bei trockengelagertem Beton muss für den stat. E_m ein geringerer Wert angenommen werden.

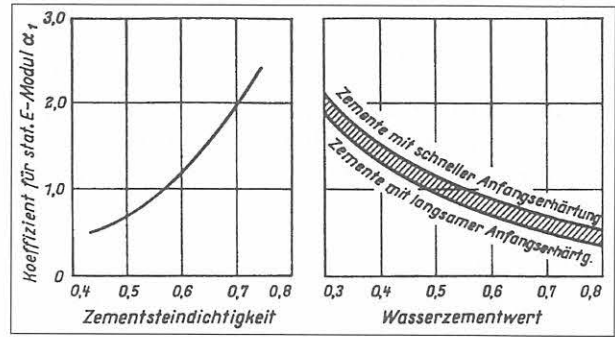


Abb. 16: Diagramm zur Bestimmung des stat. E-Moduls von wassersattem Zementstein im Alter von 28 Tagen [28].

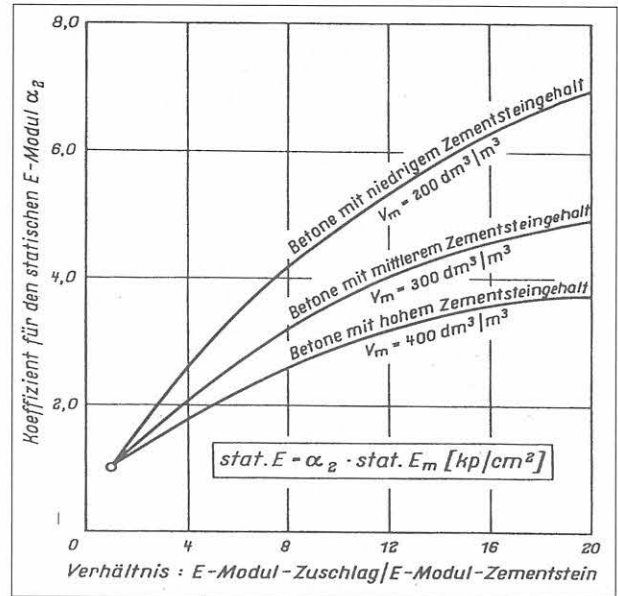


Abb. 17: Diagramm zur Bestimmung des statischen E-Moduls von wassersattem Beton im Alter von 28 Tagen [28].

Die internationalen CEB/FIP-Richtlinien, Ausgabe 1978, geben durch die Formel

$$E_b = 9500 \sqrt[3]{f_{ck} + 8}$$

mit f_{ck} ... charakteristische Zylinderdruckfestigkeit berechnete Werte an, die vom wirklichen E-Modul bis zu $\pm 30\%$ differieren können. Die Schwankungen kommen durch die Außerachtlassung der Einflüsse zustande. Der E-Modul nach EC 2, Teil 1 wird ebenfalls nach der obigen Beziehung ermittelt.

Eine weitere Vorgehensweise der E-Modulermittlung ergibt sich aus der Festigkeitsentwicklung von Beton. Der E-Modul steigt wie die Festigkeit mit der Zeit an. Mit geänderten Parameterwerten ergibt sich die Formel:

$$E_{bt}/E_{b28d} = a \cdot \exp(c \cdot \omega/t_{20}^{0,60})$$

- Mit ω ... Wasser-Zement-Wert,
- a, c ... Parameterwerte siehe folgende Tabelle:

Zement-Festigkeitsklasse	a	- c
Z 25, Z 35 L, Z 45 L	1,13	0,92
Z 35 F, Z 45 F	1,08	0,60
Z 55	1,06	0,45

und t_{20} ... (s. hierzu Wesche [51], S. 198),
R ... „Reifewert“, von dem die Festigkeit
abhängt ([37], S. 159).

Der E-Modul steigt mit zunehmendem Alter immer weiter an, wobei die Werte nach 50 Jahren [48] nur noch bis zu 25 % über den Rechenwerten (Tabelle 1) liegen.

7 Stand der Kenntnisse

7.1 Allgemeines

Um den Einfluss von Zuschlag aus Recyclingmaterial auf die Betoneigenschaften zu werten, müssen Vergleichsbetone mit natürlichem Zuschlag und gleicher volumenmäßiger Zusammensetzung hergestellt werden. Betone aber, deren Zuschlag aus Recyclingmaterial besteht, können in der Regel nicht die gleichen Eigenschaften wie sonst volumenmäßig gleich zusammengesetzte Betone aus Normalzuschlag aufweisen, da Beton aus Recyclingzuschlag sowohl alten als auch neuen Zementstein enthält.

Die Abb. 18 [52] stellt schematisch die volumenanteilige Zusammensetzung dar.

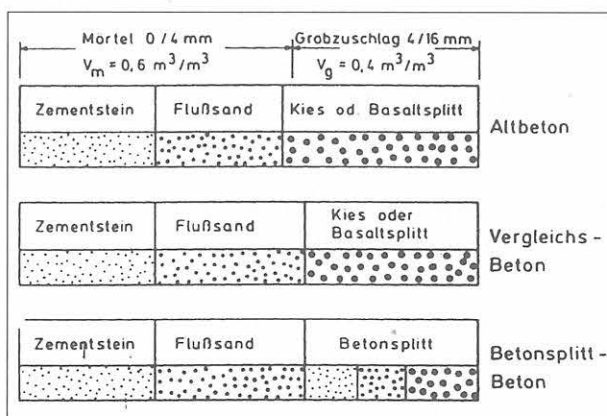


Abb. 18: Prinzipielle Zusammensetzung der Betone.

Mögliche auftretende Anteile des anhaftenden Mörtels beim Recyclingzuschlag sind prozentual in der Tabelle 2 nach Hansen [16] aufgeführt.

Tabelle 2: Volumenanteil des anhaftenden Mörtels beim Recyclingzuschlag nach Hansen [16].

	Körnung in mm	Druckfestigkeit des Recyclingmaterials		
		Hoch	Mittel	Niedrig
Volumen des am natürlichen Zuschlag anhaftenden Mörtels in %	4 - 8	58	64	61
	8 - 16	38	39	39
	16 - 32	35	28	25

Diese können auch erhebliche Veränderungen des Verformungsverhaltens bewirken, was zur Folge hat, dass untersucht werden muss, inwieweit hierbei die Richtwerte bzw. Rechenverfahren nach DIN 1045 bzw. DIN 4227 anwendbar sind.

Die Rechenwerte vom in den Normen verwendeten E-Modul beziehen sich auf Betone mit einem Zuschlag

aus überwiegend quarzitischem Kies (z. B. Rheinkies). Bei der Verwendung von andersartigen Zuschlägen können nach dem Hinweis von DIN 4227 unter gleichen Bedingungen bis zu 40 % höhere oder niedrigere E-Modulwerte entstehen.

7.2 Untersuchungen am Recyclingzuschlag

Das Verformungsverhalten von Betonen wird wesentlich von den Zuschlagseigenschaften wie Kornrohddichte, Kornzusammensetzung, Kornform, Wasseraufnahme beeinflusst. In den aus der Literatur bekannten Untersuchungen (s. w. u.) wurde ermittelt, in welchem Rahmen Zuschlag aus Altbeton und Bauschutt die Anforderungen und Kennwerte der DIN 4226 Teil 1 erfüllt.

7.2.1 Kornrohddichte

Die Angaben von Untersuchungen in der Literatur [2],[3],[16],[57] über die Kornrohddichte von Zuschlägen aus Altbeton bzw. Bauschutt sind nahezu einheitlich.

Die Kornrohddichte des Zuschlages aus Altbeton liegt unter den normalerweise bei etwa 2,60 kg/dm³ liegenden Werten für Zuschlag aus Kiesmaterial, da beim Recyclingmaterial keine reinen Zuschlagkörner vorliegen, sondern ein Gemisch aus Korn und Zementstein. Die Kornrohddichte für Zuschlag aus Bauschutt liegt in der Regel tiefer und schwankt je nach stofflicher Zusammensetzung stärker als bei natürlichem Zuschlag.

Tabelle 3: Unterteilung der Recyclingzuschläge nach der Kornrohddichte in drei Klassen [2].

Klasse	Material	Kornrohddichte in kg/dm ³
1	Zuschlag aus Bauschutt	1,50
2	Zuschlag aus Altbeton	2,00
3	Zuschlagsgemisch aus Bauschutt und Altbeton ($\leq 10\%$) und natürlichen Zuschlag ($\geq 80\%$)	2,40

Nach einer RILEM-Empfehlung [2] dient die Kornrohddichte zur Klassifizierung der Zuschläge (s. Tabelle 3).

7.2.2 Kornzusammensetzung

Bezüglich der Kornzusammensetzung gibt es in der Literatur mehrere Untersuchungsergebnisse, die zwischen allgemeiner Beurteilung und genauer Sieblinienbestimmung schwanken. Um die negativen Einflüsse des Zuschlages aus Recyclingmaterial auf die Betoneigenschaften zu vermindern, wird empfohlen [46], die feinen Korngruppen, wie z.B. Brechsand, durch natürlichen Sand zu ersetzen (s. Kap 7.3).

In der folgenden Tabelle 4 sind die bei Untersuchungsreihen verwendeten Korngruppen, die Art des Recyclingzuschlages sowie der Verwendungszweck aufgeführt.

Tabelle 4: Versuchsreihen mit Zuschlägen aus Recyclingmaterial.

Literatur		Korngruppen in mm	Zuschlag aus	Einsatz
Lukas	[27]	0/4, 4/22; verschiedene Recyclinganteile: 25%, 50%, 100%	Altbeton	Labor
		0/32 ; verschiedene Recyclinganteile: 25%, 50%, 100%	Bauschutt	
Iványi	[22]	4/8, 8/16, 16/32; 0/4 wurde durch natürlichen Zuschlag ersetzt	(Altbetonsplitt aus) Bauschutt	Labor
Wöhnl	[57]	4/16, 16/32; 0/4 wurde durch natürlichen Zuschlag ersetzt	Altbetonsplitt	Praxis
Wesche/Schulz	[52]	4/8 ,8/16; 0/4 wurde durch natürlichen Zuschlag ersetzt	Altbeton	Labor
Hansen	[16]	4/8, 8/16, 16/32	Altbetonsplitt	Labor
Rahlwes	[39]	2/8,8/16,16/32; verschiedenen Recyclingzugabeanteile 0, 20, 40, ..., 100% (Grobzuschlag)	Altbetonsplitt	Labor

7.2.3 Kornform

Grobe Recyclingkorngruppen (größer 4 mm bzw. 8 mm) aus Altbeton erfüllen [11] die Regelanforderungen bzw. erhöhten oder verminderten Anforderungen der DIN 4226 Teil 1, wenn sie bei der Aufbereitung in kubischer Kornform mit rauher Oberfläche anfallen. Zuschlag aus Bauschutt sowie Brechsand (Größtkorn ≤ 4 mm), die in der Regel infolge der Aufbereitungsart eine plattige Kornform aufweisen, können die Anforderungen nicht erfüllen.

Die rauhe, klüftige Oberfläche der groben Recyclingzuschlagskörner kann eine sehr gute Verbindung mit dem neuen Zementleim hervorrufen, was sich positiv auf die mechanischen Eigenschaften auswirken kann [46].

7.2.4 Wasseraufnahme

Hinsichtlich der Wasseraufnahme herrscht in der Literatur die übereinstimmende Ansicht, dass sich der Zuschlag aus Altbeton und Bauschutt durch die saugenden Zementsteinbestandteile durch eine hohe und schwankende Wasseraufnahme vom Normalzuschlag unterscheidet.

In Tabelle 5 und Tabelle 6 sind diesbezüglich einige Ergebniswerte aufgeführt.

Tabelle 5: Wasseraufnahme des anhaftenden Mörtels beim Recyclingzuschlag nach Hansen [16].

	Körnung in mm	Druckfestigkeit des Recyclingmaterials		
		Hoch	Mittel	Niedrig
Wasseraufnahme in %	4 - 8	8,5	8,7	8,7
	8 - 16	5,0	5,4	5,7
	16 - 32	3,8	4,0	3,7

Tabelle 6: Beispiele der in der Literatur genannten Werte der Wasseraufnahme von Recyclingmaterial (in M.-%).

Literatur und Zeit	Korngruppen					
	0/2	2/4	4/8	8/16	16/32	Sonstige
[7] Im Mittel	-		4,3			-
[21] Nach 30 min.	7,0	5,6	4,0	3,4	3,1	5,6 (0/55)
[22] Im Mittel	12,0	6,5	5,0	4,5	4,0	-
[52] Nach 30 min.	4,1 ¹⁾	3,9		2,3	-	-

¹⁾ die Korngruppe 0/0,25 wurde nicht berücksichtigt.

Die Wasseraufnahmefähigkeit von „normalem“ Zuschlag liegt nach Hansen [16] deutlich niedriger: für die Korngruppe 4/8 mm bei ca. 3,7 M.-%, für 8/16 mm bei ca. 1,8 M.-% und für 16/32 mm bei ca. 0,8 M.-%. Zur Begrenzung der Wasseraufnahme für Recyclingzuschlag werden in [2],[16] Empfehlungen gegeben. Die maximale zulässige Wasseraufnahme nach Hansen ist beispielsweise für feines Korn < 5 mm, 13 M.-% und für grobes Korn 5/25 mm, 7 M.-%.

Die Erhöhung des Wasseranspruchs wird zudem durch das Vorhandensein von Kornanteilen unter 150 mm verursacht, die in der Regel hydratisierte Zementpartikel sind [52]. Ein Austausch des Betonbrechsandes durch natürlichen Sand vermindert den Wasseranspruch.

7.3 Eigenschaften des Frischbetons

Die veröffentlichten Untersuchungen ergaben, dass die Verarbeitbarkeit durch Vornässung, wie bei Leichtzuschlägen üblich, und Austausch der stark wassersaugenden feinen Betonsandanteile durch Natursand verbessert werden kann [46]. Nach Forster [13] führt schon der Austausch von 30 % des Brechsandes durch Natursand zu einer guten Verarbeitbarkeit.

Frischbeton mit trockenem Recyclingzuschlag hat zwar unmittelbar nach der Wasserzugabe die gewünschte Konsistenz, er steift aber schneller an. Das Ansteifverhalten ist davon abhängig, wie stark noch die Wasseraufnahmefähigkeit des Zuschlages ist.

Um bei gleichem Zementgehalt die gleiche Verarbeitbarkeit zu erlangen, muss der Wasserzementwert höher als bei Normalbeton liegen, was anfänglich sogar die Verarbeitbarkeit verbessert [7],[21],[57]. Durch den Einsatz von Zusatzmitteln kann der w/z-Wert verringert werden.

Die Untersuchungen von Hansen [2], Frondistou-Yannas [14], Wesche/Schulz [52] und Wöhnl [57] ergaben aufgrund der Versuchsvoraussetzungen keine gravierenden Unterschiede der Frischbetoneigenschaf-

ften und der Ausbreitmaße, zwischen Recycling- und Normalbeton.

7.4 Festbetoneigenschaften

7.4.1 Allgemeines

Aus den Untersuchungen der hier berücksichtigten Autoren kann gefolgert werden, dass ein 100 %-iger Ersatz des Zuschlags durch Recyclingmaterial bzw. ein hoher Anteil einen negativen Einfluss auf die physikalischen Betoneigenschaften hat. Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul sinken, und die Verformungen durch Kriechen und Schwinden nehmen zu.

Hansen [16] stellt in seinen Ausführungen fest, dass sich bis zu 30 % grober natürlicher Zuschlag durch Zuschlag aus Recyclingbeton (ohne Brechsand) ohne wesentliche Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften austauschen lässt. In den USA und Dänemark werden solche Erkenntnisse bereits umgesetzt [39].

Ein süddeutsches Betonsteinwerk entwickelte und produziert serienmäßig ohne Qualitätsverluste Rasengittersteine, die bis zu 30 % Zuschlag aus Altbeton und nicht näher bezeichneten „Abfall“ enthalten [23].

Bauaufsichtliche Regelungen, wie sie in Deutschland erforderlich sind, gibt es bis auf die Niederlande weltweit aber noch nicht. In den Niederlanden werden bereits Zugabeanteile von 20 % Betonsplitt und 10 % Mauerwerksplitt bei der Betonherstellung gestattet [39].

7.4.2 Druckfestigkeit

Grundsätzlich kann Zuschlag aus Altbeton und Bauschutt nicht als Normalzuschlag für Beton nach DIN 4226 Teil 1 angesehen werden. Denn Recyclingzuschlag besteht zum größten Teil aus Körnern mit porigem Gefüge, und ihre Druckfestigkeit liegt in der Regel unter 100 N/mm² (DIN 4226 Teil 1, 7.4).

Die Druckfestigkeit von Beton mit Zuschlag aus Recyclingmaterial liegt im Vergleich zum Referenzbeton bei allen genannten Autoren [44],[16],[39],[51],[22],[27] bei gleichen Zusammensetzungen im allgemeinen um 10 % bis 25 % niedriger.

Nach Hansen [16] ergaben Untersuchungen jedoch nur eine Druckfestigkeitsabminderung des Recyclingbetons von 5 % bis 10 % im Verhältnis zum Vergleichsbeton.

Die Untersuchungen von Lukas [27] hingegen ergeben beispielsweise eine Verringerung um etwa 20 % bei der 100 %-igen Verwendung von Beton-Recyclingmaterial als Zuschlag und sogar um etwa 31 % bei der Verwendung von Zuschlag aus aufbereitetem Bauschutt (Hauptteil Altbeton, 10 % bis 20 % Ziegelsplitt, 2 % bis 3 % Putz und Mörtel).

Diese Verschlechterung der Druckfestigkeit im Vergleich zum Normalzuschlag hängt von der Festigkeit des verwendeten Zuschlags ab. Recyclingzuschlag hat durch vorhandene Mörtelanteile eine geringere Druckfestigkeit als der Normalzuschlag.

Außerdem kann es bei der Aufbereitung des Recyclingzuschlages zu Mikrorissen kommen, die die Festigkeit abmindern.

Die Untersuchungen von Hüninghaus [21] zeigen zudem, dass auch der Einsatz von Brechsand die Betonfestigkeit um rund 29 % abmindern kann. Bei Verwendung von Brechsand (2/4 mm) und natürlichem Sand (0/2 mm) kann ein Festigkeitsverlust von etwa 22 % auftreten.

Demnach kann ein Austausch des Brechsandes durch natürlichen Sand eine Festigkeitserhöhung [46] bewirken.

7.4.3 Verformungsverhalten des Betons aus Recyclingmaterial

7.4.3.1 Allgemeines

Aufgrund des erhöhten Gesamtzementsteinanteils und der geringeren Betondruckfestigkeit muss beim Beton aus Recyclingzuschlag mit einer Veränderung des Verformungsverhaltens gerechnet werden.

Die Untersuchungen von Iványi [22] ergaben, dass Zusatzmittel und -stoffe – wie Verflüssiger und Flugasche – das Verhalten des E-Moduls nicht wesentlich beeinflussen. Der Einfluss des Wasserzementwertes, der sonst unter anderem den E-Modul bei Normalbeton durch Poren- und Kapillarenbildung mitbestimmt, spielt beim Betonsplittbeton keine so wesentliche Rolle. Ebenso verhält sich der Einfluss des Zementgehaltes, der beim Betonsplittbeton den Gesamtzementsteingehalt infolge des Mörtelanteils im Altbetons in viel stärkerem Maße beeinflusst als durch die neue Zementmenge.

Die Untersuchungen aller Autoren ergeben, dass der Elastizitätsmodul einen um ca. 10 % bis 30 %, in einzelnen Fällen sogar bis zu 40 % [45] geringeren Wert im Vergleich zu Beton mit Normalzuschlag besitzt.

Die Verformungen durch Kriechen und Schwinden können bei Recyclingbeton um mehr als 30 % zunehmen.

7.4.3.2 Elastizitätsmodul von Beton aus Recyclingmaterial

Vergleichende Untersuchungen des E-Moduls von Recyclingbeton nach 28 Tagen ergaben folgendes:

Nach Schulz [45] erreichte der statische bzw. dynamische E-Modul des Recyclingbetons rund 91 % des Wertes vom Vergleichsbeton. Der Betonsplitt wurde aus Betonproben einer alten Versuchsreihe hergestellt.

Lukas [27] ermittelte bei seinen Versuchsreihen einen E-Modulabfall des Recyclingbetons auf 67 % bis 96 % des Vergleichsbetons, abhängig von der Art des Recyclingzuschlages. Die erhebliche Streuung entstand dadurch, dass die geprüften Recyclingbetone aus verschiedenen Zusammensetzungen von Recyclingzuschlägen und mit unterschiedlichen Anteilen an Naturmaterial hergestellt wurden. Beim Recyclingbeton mit Zuschlag aus Altbetonsplitt betrug der Abfall gegenüber dem Vergleichsbeton ca. 26 % und bei Zuschlag aus Bauschutt ca. 31 %.

Die Untersuchungen von Wesche/Schulz [52] ergaben einen statischen bzw. dynamischen E-Modul des Recyclingbetons von rund 81 % bis 84 % bzw. 82 % bis 86 % des Vergleichsbetons. Der Betonsplitt wurde auch hier aus alten Betonproben hergestellt.

Die Untersuchungen von Iványi [22] mit Zuschlagsstoffen aus aufbereitetem Bauschutt ergaben einen ähnlichen Abfall des E-Moduls des Betonsplittbetons und zwar auf 79 % bis 88 % vom Vergleichsbeton.

Die Abb.19 zeigt die Ergebnisse von Schulz [45], Frondistou-Yannas [14] und Iványi [22] des E-Moduls von Betonsplittbeton aufgetragen über den E-Modul eines Vergleichsbetons. Der E-Modul von Betonsplittbeton ist demnach geringer. Die Abweichungen betragen ca. 18 % und 30 % [52].

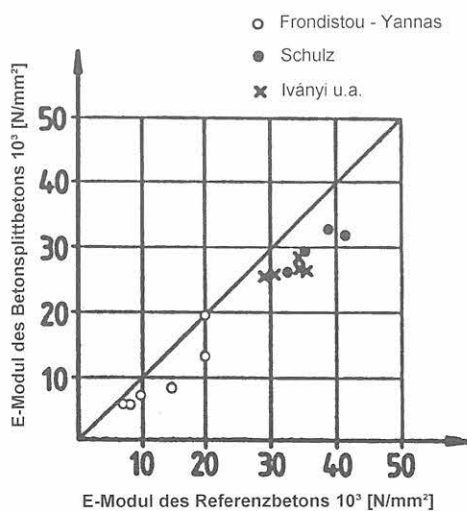


Abb. 19: Vergleich der gemessenen E-Moduln [22].

Die Abb.20 [22] stellt die einzelnen E-Moduln des Betonsplittbetons und des Referenzbetons bei unterschiedlichen Wasserzementwerten nach Frondistou-Yannes [14] dar.

Wesche/Schulz [52] geben basierend auf den Formeln von Manns [28] zudem in ihrer Veröffentlichung eine Möglichkeit an, um eine Voraussage über die Verformungseigenschaften von Betonsplittbeton zu machen: Mit dem E-Modul des Altbetons und dem der Mörtelmatrix, der wiederum aus dem E-Modul eines Vergleichsbetons oder demjenigen nach DIN 4227 abgeschätzt

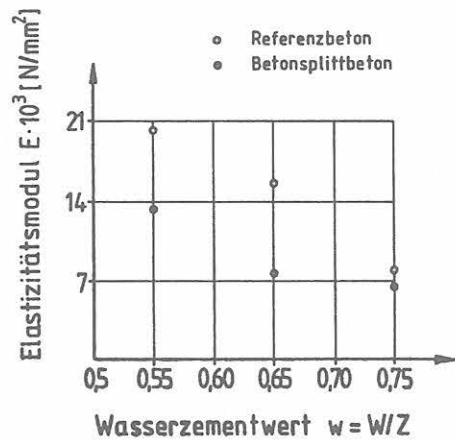


Abb.20: Zusammenhang E-Modul und Wasserzementwert nach [14].

werden kann, kann der E-Modul des Betonsplittbetons unter Berücksichtigung des Betonsplittvolumens mittels eines Diagramms vorausgesagt werden.

7.5 Allgemeine Bewertung des vorhandenen Wissensstandes

Die meisten bisher gewonnenen Erfahrungen über Recyclingbeton wurden überwiegend durch Laborprüfungen mit Zuschlag aus Altbeton (Betonsplitt ... Zuschlag aus Altbeton mit einer Korngröße > 4 mm) gemacht. Erkenntnisse durch praktische Anwendungen von Recyclingbeton liegen vorwiegend nur aus dem Straßenbau und durch einzelne Pilotprojekte im Hochbau [57] vor.

Die bisher gewonnenen Erkenntnisse der europäischen Länder sowie den USA sind nicht fundiert genug, um für Betone mit Zuschlag aus Altbeton eine allgemeine Anwendung im bauaufsichtlichen Bereich zu ermöglichen. Die Erfahrungen in den einzelnen Teilbereichen sind zudem sehr unterschiedlich.

Die Erkenntnisse über die Einflüsse von Zuschlag aus Bauschutt sowie von Brechsand beim Recyclingbeton sind zur Zeit noch sehr unvollständig. Beim Altbetonbrechsand fehlen weitergehende Beurteilungen bzw. Verwendungsgrenzen in Bezug auf die Beeinflussung des Betons.

Zuschlag aus Altbeton (Altbetonsplitt) unterschiedlicher Herkunft benötigt einige charakterisierende Ergänzungen der Anforderungen nach DIN 4226 Teil 1 wie z. B. Kennwerte der Kornrohichte der Korngruppen und der Wasseraufnahme. Ungeklärt ist, in welchem Umfang Störstoffe im Zuschlag aus Altbeton zugelassen werden können, damit die Eigenschaften des Betons sich im Rahmen DIN 1045 bewegen, und durch welche Prüfverfahren sie ermittelt werden können.

Ein einheitlicher Vergleich der in der Literatur angegebenen Eigenschaften von Beton aus Recyclingmaterial, wie z.B. der E-Moduln, ist nur in begrenztem Rahmen

möglich, da sie von zu vielen Faktoren beeinflusst werden und die Material- und Versuchsvoraussetzung sowie die Zielrichtungen der einzelnen Untersuchungen stark voneinander abwichen.

Die Untersuchungen und Bewertungen orientieren sich an „normal“ hergestellten Vergleichsbetonen. Es wird ein Recyclingbeton angestrebt, der bei einer bis zu 100 %-igen Verwendung von Zuschlag aus Altbeton das gleiche Qualitätsniveau wie ein vergleichbarer Normalbeton hat und somit die Anforderungen der DIN 1045 erfüllt.

Abschließend ist zu erwähnen, dass eine Abgrenzung bzw. Definition der verwendeten Begriffe für die Behandlung und Auswertung im Bereich der Betontechnologie hilfreich und erleichternd wäre, weil sich die in der Literatur verwendeten Begriffe voneinander unterscheiden und nicht immer eindeutig sind.

8 Durchführung der Untersuchungen

8.1 Voraussetzungen für die Betonrezepturen

Die Grundvorgaben der Versuche waren:

- Die Einhaltung einer Sieblinie B32 nach DIN 1045 mit der Verwendung von natürlichem Zuschlag in allen Rezepturen im Sandbereich (bis 2 mm).
- Die Herstellung eines Betons nach DIN 1045 mit der Festigkeitsklasse B25 und Zementgehalten von 280, 310 und 340 kg/m³.
- Die wesentliche Zielrichtung war ein einheitlicher Konsistenzbereich KR mit Vorhaltemaß. Das Ausbreitmaß der Frischbetone sollte somit zwischen 50 cm und 60 cm liegen.

Dabei sollte der wirksame Wasserzementwert w/z möglichst nicht höher als 0,60 sein, damit der Beton nach DIN 1045, 6.5.2 (4) auch für Außenbauteile verwendet werden kann.

8.2 Beschriftung der Prüfkörper

Die Beschriftung der Probekörper wurde so gewählt, dass der erste Buchstabe den Lieferanten des Recyclingmaterials „X, K, W“ (bzw. den Normalzuschlag „O“) und die nachfolgende Zahl den Zementgehalt angab. Ebenfalls wurden alle Probekörper von Eins aufwärts durchnummeriert und mit dem Herstellungsdatum versehen.

8.3 Betonrezepturen

Für die Herstellung der Probekörper wurden zwölf verschiedene Betonrezepturen verwendet.

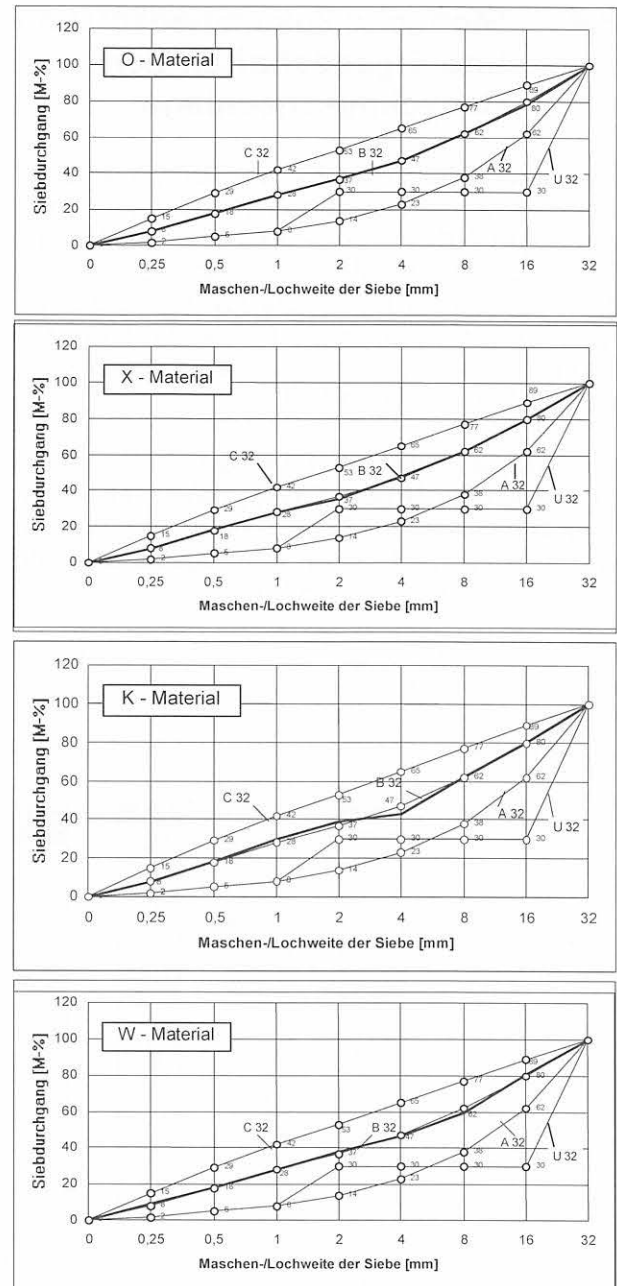


Abb.21: Sieblinien der einzelnen Zuschlagsarten [31].

Diese umfassten vier unterschiedliche Zuschlagsmaterialien mit jeweils drei Zementgehalten (280 kg/m³, 310 kg/m³ oder 340 kg/m³). Die Zuschläge bestanden aus einem Normalzuschlag (O-Beton) und drei unterschiedlichen Recycling-Materialien.

Die verwendete Sieblinie B32 (s. Abb.21) und der Wasserzementwert wurden aufbauend auf Ergebnissen von Vorversuchen der Bundesanstalt gewählt, um eine optimale und vergleichbare Verarbeitbarkeit des Materials zu gewährleisten. Die Korngruppen < 2 mm bestanden bei allen Rezepturen aus natürlichem Sand, denn erfahrungsgemäß [11] befinden sich in diesen feinen Korngruppen des Recyclingzuschlages hohe Anteile von Schad- und Störstoffen mit hohem Wasserungsverhalten, die u.a. die Verarbeitbarkeit beeinträchtigen.

8.4 Stoffliche Zusammensetzung und Eigenschaften der Recycling-Zuschläge

Die verwendeten Zuschläge aus Recyclingmaterial stammen von drei verschiedenen, im Großraum Berlin ansässigen Aufbereitungsbetrieben für Altbeton und Bauschutt. Die Herkunft und die Qualität des Abbruchmaterials, aus dem die Recyclingzuschläge gewonnen wurden, waren unbekannt. Die Recyclingzuschläge bestanden aus für die Betonherstellung üblichen Korngruppen 2/8, 8/16 und 16/32.

Durch die Beschaffenheit des Ausgangsmaterials unterscheiden sich die Recyclingmaterialien nicht nur hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzungen, sondern auch im Hinblick auf ihre sonstigen Eigenschaften von denen des natürlichen Zuschlages.

Die Abb.22 zeigt die stofflichen Zusammensetzungen der Korngruppen der untersuchten Recyclingzuschläge X, K und W.

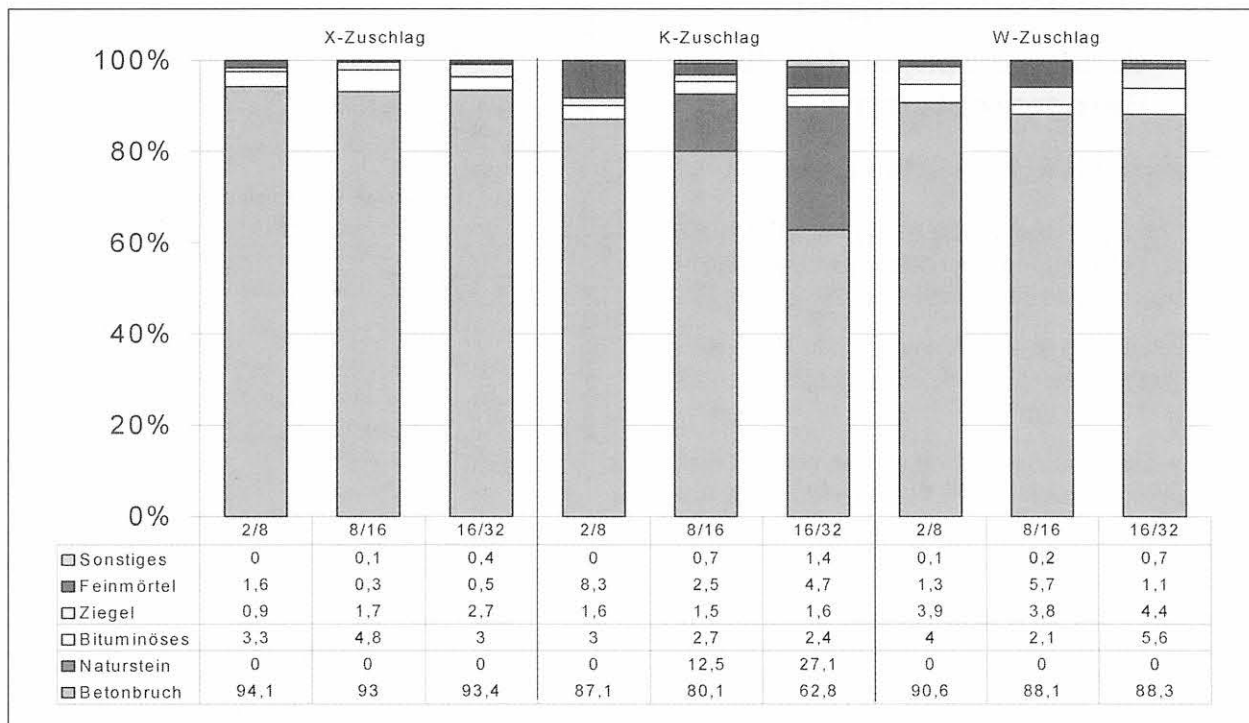


Abb.22: Zusammensetzung der einzelnen Korngruppen des verwendeten Recyclingzuschlages [31].

Die Kornrohddichte der drei Zuschläge aus Recyclingmaterial wurden von der BAM nach DIN 4226 Teil 3 [60] ermittelt und lagen zwischen 1,97 kg/dm³ und 2,40 kg/dm³ je nach Herkunft und Korngruppe (s. Tabelle 7).

Tabelle 7: Zusammenstellung der Rohdichte der verwendeten Recyclingmaterialien (in kg/dm³) [31].

Materialbezeichnung	Korngruppe		
	2/8	8/16	16/32
X	2,141	2,184	2,162
K	2,246	2,252	2,401
W	2,093	1,974	2,139

Das Wasseraufnahmeverhalten Wa der drei untersuchten Recyclingmaterialien X, K und W ist in der Tabelle 8 aufgeführt, ermittelt nach DIN 52103 [62].

Tabelle 8: Zusammenstellung der Wasseraufnahmefähigkeit der verwendeten Recyclingmaterialien in 10 min. und 24 h (in M.-%) [31].

Materialbezeichnung	Korngruppe					
	2/8		8/16		16/32	
	10 min	24h	10 min	24h	10 min	24h
X	3,1	5,7	3,9	4,9	3,7	4,8
K	4,3	5,2	3,4	4,3	2,1	2,7
W	6,2	7,2	8,7	9,5	5,2	6,3

Diese Angaben bestätigen die Untersuchungen über die Kornrohddichte sowie Wasseraufnahme von Zuschlägen aus Altbeton bzw. Bauschutt, die in der Literatur (s. Kap.7.2.1/7.2.4) zu finden sind.

8.5 Stoffraumanteile der Mischungen

Um eine volumenanteilmäßige Vergleichbarkeit der Rezepturen zu gewährleisten, wurden die Stoffraumanteile der einzelnen Mischungen so konzipiert, dass diese annähernd gleich ausfallen. In Tabelle 9 sind die Stoff-

raumanteile der Betonmischungen und der wirksamen Wasserzementwerte zusammengestellt.

Die Volumenanteile des Gesamtzuschlages der Betonmischung differierten in den einzelnen Zementgehalten um etwa 1,9 Vol.-%, bei den groben Korngruppen (2 mm bis 32 mm) aus natürlichen bzw. recycelten Zuschlag um etwa 3,5 Vol.-% und bei den feinen Korngruppen (0 mm bis 2 mm) aus ausschließlich natürlichen Zuschlag um etwa 2,6 Vol.-%.

Tabelle 9: Zusammenstellung der Stoffraumentelle der Betonmischungen und der wirksamen Wasserzementwerte (nach Rückrechnung über die Einwaage, die wirksame Wassermenge und den ermittelten Luftgehalt) [31].

Stoffart	Beton mit 280 kg Zement				Beton mit 310 kg Zement				Beton mit 340 kg Zement			
	0	X	K	W	0	X	K	W	0	X	K	W
	Vol.-% 1)				Vol.-% 1)				Vol.-% 1)			
Zement	9,14	9,35	9,23	9,34	10,11	10,35	10,23	10,37	11,10	11,39	11,27	11,39
Wasser (Zugabe)												
Wasser (wirksam)	18,52	16,18	17,13	15,11	18,81	16,24	17,21	15,28	19,23	16,38	17,34	15,41
Luftgehalt 2)	0,30	0,50	0,60	1,60	0,40	0,70	0,70	1,60	0,30	0,70	0,50	1,60
Zusatzmittel		0,29	0,29	0,29		0,32	0,32	0,32		0,35	0,35	0,35
Summe	27,96	26,32	27,25	26,34	29,32	27,61	28,46	27,57	30,63	28,82	29,46	28,75
Zuschlag (gesamt)	72,02	73,69	72,76	73,67	70,70	72,39	71,54	72,45	69,37	71,17	70,53	71,25
0 / 0,30 mm	2,90	2,97	2,89	2,97	2,82	2,89	2,86	2,89	2,79	2,86	2,83	2,86
0 / 0,50 mm	8,64	8,12	8,02	7,36	8,48	7,96	7,87	7,26	8,33	7,83	7,75	7,11
0,50 / 1,0 mm	5,02	6,65	5,82	4,41	4,94	6,53	5,71	4,35	4,87	6,39	5,65	4,27
1,0 / 2,0 mm	10,08	7,36	10,93	10,30	9,92	7,24	10,75	10,13	9,69	7,11	10,59	9,98
Summe	26,64	25,10	27,66	25,04	26,16	24,62	27,19	24,63	25,68	24,19	26,82	24,22
2,0 / 4,0 mm	5,76				5,64				5,53			
2,0 / 8,0 mm		19,88	14,55	15,46		19,54	14,30	15,20		19,22	14,08	14,97
4,0 / 8,0 mm	11,52				11,32				11,10			
8,0 / 16,0 mm	10,82	11,77	17,47	15,48	10,62	11,58	17,18	15,21	10,40	11,38	16,93	14,96
16,0 / 32,0 mm	17,28	16,94	13,08	17,69	16,96	16,65	12,87	17,41	16,66	16,38	12,70	17,10
Summe	45,38	48,59	45,10	48,63	44,54	47,77	44,35	47,82	43,69	46,98	43,71	47,03
Frischbeton	99,98	100,01	100,01	100,01	100,02	100,00	100,00	100,02	100,00	99,99	99,99	100,00
W/Z -Wert (ist)	0,654	0,696	0,727	0,760	0,600	0,630	0,657	0,687	0,559	0,575	0,600	0,628
W/Z -Wert (eff.)	0,654	0,568	0,609	0,532	0,600	0,516	0,553	0,485	0,559	0,474	0,506	0,447

W/Z-Wert (ist) = Gesamtwasserzugabe + Zusatzmittel bezogen auf den Zementgehalt

1) bezogen auf Gesamtstoffraum

W/Z-Wert (eff.) = (Gesamtwasser - Wasseraufnahme Wa 10) + Zusatzmittel bezogen auf den Zementgehalt

2) ermittelter Wert bei der Prüfung

9 Herstellung der Probekörper

Die Herstellung des Betons erfolgte nach einer in der BAM durch Vorversuche festgelegten Verfahrensweise. Als Mischgerät wurde ein „Eirich“ – Gegenstrommischer mit 60 Liter Fassungsvermögen verwendet.

Die Zusammensetzung der Betonmischung mit Normalzuschlag und mit Recyclingzuschlag unterschied sich in einem Punkt: Dem Recyclingzuschlag wurde zur Reduzierung des Wasseranspruchs unter gleichzeitiger Einhaltung einer vergleichbaren Verarbeitbarkeit, die über das Ausbreitmaß beurteilt wurde, ein handelsübliches Betonzusatzmittel (Fließmittel „FM“) in einer Größenordnung von 1,0 M.-% Zementgehalt zugegeben. Diese Menge entsprach 50 % der zulässigen Zugabemenge des verwendeten Betonzusatzmittels.

9.1 Ablauf der Betonherstellung

Nach dem Einfüllen des gesamten Zuschlagsmaterials in den Mischer wurde bei laufendem Rührwerk allen Betonmischungen zunächst 7,5 Liter Wasser zugegeben. Anschließend erfolgte die Zugabe von Zement und Restwasser. Dieser Vorgang war 2,5 Minuten nach Beginn der Zementzugabe abgeschlossen.

Die Vorgabe des Wassers hatte sich in den Vorversuchen bewährt, da der Recyclingzuschlag seit der Anlieferung in die Bundesanstalt bei Raumtemperatur gelagert wurde und somit in seiner zum Teil sehr klüftig strukturierten Oberfläche stark ausgetrocknet war. Dem Zuschlag wurde damit die Möglichkeit gegeben, zu-

nächst oberflächlich Wasser aufzunehmen, bevor dieses vom Zement gebunden und durch den Zementleim offene Poren verschlossen wurden.

Anschließend ruhte der Frischbeton im abgedeckten Zustand bis zur 7. Minute.

Nach Ablauf dieser Zeit erfolgte eine Minute lang ein Durchmischen des Frischbetons. Bei Verwendung von Recyclingzuschlag wurde dabei das Betonzusatzmittel zugegeben.

10 Minuten nach Zementzugabe wurden das Ausbreitmaß $a(10)$, der Luftporengehalt sowie die Frischbetonrohichte im 8 l – Gefäß bestimmt.

27 Minuten nach Zementzugabe wurde der Beton 15 Sekunden lang aufgerührt und danach das Ausbreitmaß $a(30)$ ermittelt.

Die ermittelten Werte der Frischbetoneigenschaften sind dem Kap. 12.2 zu entnehmen.

9.2 Ablauf der Probekörperherstellung

Die Herstellung der Probekörper begann 30 Minuten nach Zementzugabe und war nach weiteren 15 Minuten abgeschlossen.

Es wurden pro Rezeptur zehn Prismen mit den Abmessungen 10 cm x 10 cm x 30 cm in Stahlformen und drei Würfel mit 15 cm Kantenlänge in Kunststoffformen gefertigt.

Zum Verdichten des eingefüllten Frischbetons wurde ein Hochfrequenzrütteltisch „RTLÜ“, Fabrikat Wacker, verwendet. Die Verdichtungszeit betrug jeweils 15 Sekunden.

An allen hergestellten Würfeln wurde ebenfalls die Frischbetonrohddichte bestimmt. Die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen sind in Tabelle 25 aufgeführt. Alle Prüfungen wurden nach DIN 1048 Teil 1 durchgeführt.

Die Probekörper wurden die ersten 24 Stunden nach Herstellung unter einer Plastikfolie gelagert, anschließend ausgeschalt und erhielten dann eine eindeutige Beschriftung.

9.3 Lagerung und Nachbehandlung der Probekörper

Die Lagerung der einzelnen Probekörper nach dem Ausschalen verlief unterschiedlich.

- Die drei Würfel (Nr. 1 bis Nr. 3) wurden nach DIN 1048 Teil 5, 6.2 bis zum 7. Tag unter Wasser und anschließend bis zum 28.Tag in der Prüfhalle bei Raumklima (15°C bis 22°C) trocken gelagert.
- Sieben Prismen (Nr. 1 bis Nr. 6 und Nr. 10) wurden bei einem Klima von 20°C und 65 % relativer Luft feuchtigkeit gelagert.
- Die restlichen drei Prismen (Nr. 7 bis Nr. 9) wurden unter Wasser gelagert.

9.4 Tabellarische Zusammenfassung der Herstellung und Lagerung der Probekörper

Tabelle 10: Herstellungs- und Lagerungsplan

Rezeptur	Herstellung	Anzahl	Probekörper	Lagerung	
				Nr.	
X 280	1. Wo.-Mo.	10	Prismen 30x10x10 (cm)	1 - 6, 10	bei 20°C / 65% r. F. unter Wasser DIN 1048, Teil 5
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	7 - 9	
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	1 - 3	
X 310	1. Wo.-Mo.	10	Prismen 30x10x10 (cm)	1 - 6, 10	bei 20°C / 65% r. F. unter Wasser DIN 1048, Teil 5
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	7 - 9	
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	1 - 3	
X 340	1. Wo.-Di.	10	Prismen 30x10x10 (cm)	1 - 6, 10	bei 20°C / 65% r. F. unter Wasser DIN 1048, Teil 5
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	7 - 9	
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	1 - 3	
K 280	1. Wo.-Di.	10	Prismen 30x10x10 (cm)	1 - 6, 10	bei 20°C / 65% r. F. unter Wasser DIN 1048, Teil 5
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	7 - 9	
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	1 - 3	
K 310	2. Wo.-Mo.	10	Prismen 30x10x10 (cm)	1 - 6, 10	bei 20°C / 65% r. F. unter Wasser DIN 1048, Teil 5
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	7 - 9	
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	1 - 3	
K 340	2. Wo.-Mo.	10	Prismen 30x10x10 (cm)	1 - 6, 10	bei 20°C / 65% r. F. unter Wasser DIN 1048, Teil 5
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	7 - 9	
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	1 - 3	
W 280	2. Wo.-Di.	10	Prismen 30x10x10 (cm)	1 - 6, 10	bei 20°C / 65% r. F. unter Wasser DIN 1048, Teil 5
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	7 - 9	
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	1 - 3	
W 310	2. Wo.-Di.	10	Prismen 30x10x10 (cm)	1 - 6, 10	bei 20°C / 65% r. F. unter Wasser DIN 1048, Teil 5
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	7 - 9	
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	1 - 3	
W 340	3. Wo.-Mo.	10	Prismen 30x10x10 (cm)	1 - 6, 10	bei 20°C / 65% r. F. unter Wasser DIN 1048, Teil 5
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	7 - 9	
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	1 - 3	
O 280	3. Wo.-Mo.	10	Prismen 30x10x10 (cm)	1 - 6, 10	bei 20°C / 65% r. F. unter Wasser DIN 1048, Teil 5
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	7 - 9	
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	1 - 3	
O 310	3. Wo.-Di.	10	Prismen 30x10x10 (cm)	1 - 6, 10	bei 20°C / 65% r. F. unter Wasser DIN 1048, Teil 5
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	7 - 9	
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	1 - 3	
O 340	3. Wo.-Di.	10	Prismen 30x10x10 (cm)	1 - 6, 10	bei 20°C / 65% r. F. unter Wasser DIN 1048, Teil 5
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	7 - 9	
		3	Würfel 15x15x15 (cm)	1 - 3	

10 Versuchsdurchführung

10.1 Allgemeiner Ablauf der Untersuchungen

Die Prüfung der Prismen hergestellt aus den einzelnen Betonrezepturen wurde an sieben unterschiedlichen Tagen, wie im Prüfplan (s. Kap. 10.6) ersichtlich, durchgeführt. Um eine erhöhte Aussagekraft der E-Modul-Entwicklung der ersten Tage zu erhalten, wurden die Proben in den ersten 3 Tagen nach Herstellung täglich geprüft. Die weiteren Prüfungen fanden wöchentlich nach Herstellung statt.

Am ersten Tag nach der Herstellung wurden die Probekörper nach dem Ausschalen und Beschriften gewogen, vermessen und anschließend mit dem Grindo-Sonic-Gerät und dem Ultraschallgerät untersucht.

Bei den nachfolgenden Messterminen wurden die wassergelagerten Probekörper gründlich mit einem Tuch abgetupft, bevor die Probekörper gewogen und auf ihre Maßhaltigkeit überprüft wurden. Anschließend wurden sie wieder mit dem Grindo-Sonic-Gerät und dem Ultraschallgerät untersucht.

Am 28. Tag nach der Herstellung wurde gleich nach der dynamischen E-Modul-Ermittlung mit Hilfe des Grindo-Sonic- und des Ultraschallgerätes, der statische E-Modul der Probekörper (Prisma Nr.1-3, Nr.7-9, gegebenenfalls Nr.10) bestimmt sowie die Druckfestigkeitsprüfung an drei hergestellten Würfeln durchgeführt.

10.2 Durchführung der Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung

10.2.1 Verwendete Probekörper

Für die Eigenschwingzeitmessung waren alle Prismen – Nr.1 bis 6 und Reservekörper Nr.10 (Trockenlagerung), sowie Nr. 7 bis 9 (Wasserlagerung) – vorgesehen (vgl. Tabelle 10, Seite 30).

10.2.2 Versuchsdurchführung

Die Eigenschwingzeitmessung wurde mittels eines Grindo-Sonic-Gerätes durchgeführt (s. Kap. 5.2.1). Die Probekörper wurden in verschiedenen Schwingungsformen angeregt. Gemessen wurden die Eigenschwingzeit der Biegeschwingung über die Höhe und die Breite des Probekörpers, die Torsionsschwingung und die Dehnschwingung.

Die Probekörper wurden auf eine Schaumstoffunterlage gelegt.

Die Dicke der Schaumstoffunterlage betrug nach Voruntersuchungen und nach Angaben von Pohl [38] 5 cm (unbelastet).

Der Schwingungsaufnehmer wurde an die empfohlenen Punkte gehalten und der Probekörper mit einem Hämmerchen (s. Bild 2) an der vorgegebenen Stelle angeschlagen.

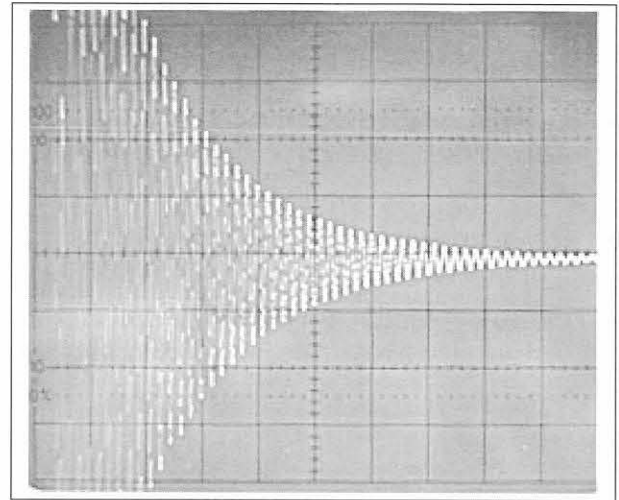


Bild 4: Gedämpfte Schwingung auf dem Oszilloskop.

Die Messung der jeweiligen Eigenschwingzeit wurde mindestens fünfmal wiederholt, um zu überprüfen, ob sich der Anzeigewert reproduzieren lässt. Streuungen von bis zu 1% wurden als zulässig betrachtet.

Jede Messung wurde außerdem auf einem Oszilloskop, das mit dem Grindo-Sonic-Gerät verbunden war, kontrolliert. Bei einem korrekten Anschlag des Probekörpers erhält man eine optimale Grundschwingung oder Eigenschwingung des Körpers. Die Amplitude läuft mit zunehmender Zeit durch die Dämpfung des Materials gegen Null (s. Bild 4).

Die korrekten und reproduzierbaren Anzeigewerte sowie das ermittelte Gewicht und die Abmessungen der Probekörper wurden in das Prüfprotokoll aufgenommen.

Die Berechnung des dynamischen Elastizitäts- bzw. des dynamischen Schubmoduls erfolgte nach Kap. 11.1 und 11.3.

Die Dehnschwingung stellt nur eine Überprüfung der Biegeschwingung dar und wurde in die Auswertung nicht einbezogen.

10.3 Durchführung der Laufzeitmessung eines Ultraschallimpulses

10.3.1 Verwendete Probekörper

Die für die Ultraschall-Messungen vorgesehenen Probekörper waren die Prismen Nr.1 bis 3 (Trockenlagerung), sowie Nr. 7 bis 9 (Wasserlagerung) (vgl. Tabelle 10, Seite 30).

10.3.2 Versuchsdurchführung

Die Messung der Laufzeit eines Ultraschall-Impulses wurde wie in Kap.5.2.2 beschrieben durchgeführt. Das Bild 5 zeigt die angekoppelten Prüfköpfe an einen Probekörper. Die Probekörper wurden jedes Mal in gleicher Lage, mittig der Länge nach durchschallt.

- Vor jeder Messreihe wurde die Ultraschall-Mess-einheit mittels eines Durchschallungskörpers kalibriert.
- Die Auflageflächen der Prüfköpfe wurden vor jeder Messung gereinigt und mit Schmierseife versehen.
- Die Probekörper wurden mittig zwischen die Prüfköpfe gelegt.
- Die Sende- und Empfangsköpfe wurden pneumatisch mit etwa 2 bar an den Probekörper gekoppelt.

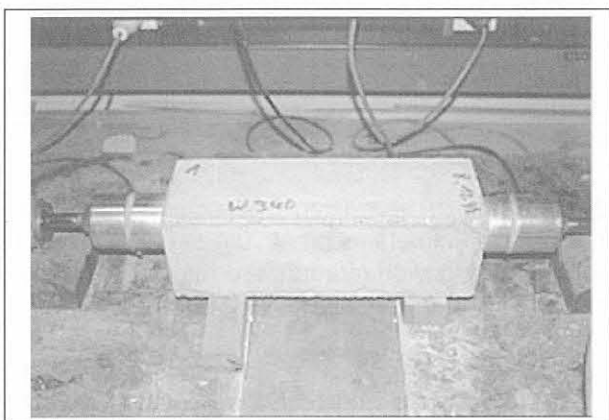


Bild 5: Ultraschall-Messung an einem Probekörper

Um eine optimale Ankopplung bzw. Auflage der Prüfköpfe an den Probekörper zu erreichen, wurden die Prüfköpfe während des Messvorganges solange behutsam gedreht, bis der niedrigste Anzeigewert der Laufzeit erreicht wurde.

Die Anzeigewerte der Laufzeit in μs sowie das zuvor ermittelte Gewicht der einzelnen Probekörper wurde anschließend in eine Excel-Tabelle (Prüfprotokoll) eingegeben.

Streuende bzw. abweichende Messergebnisse einer Prüfreihe wurden noch einmal überprüft.

Die Berechnung des dynamischen E-Moduls geschah nach Kap.11.2.

10.4 Durchführung der statischen E-Modulmessung

10.4.1 Verwendete Probekörper

Die für die statischen E-Modulmessungen vorgesehenen Probekörper waren die Prismen Nr.1 bis 3 (Trockenlagerung) sowie Nr. 7 bis 9 (Wasserlagerung). Bei er-

heblicher Streuung der Messergebnisse der trocken-gelagerten Prismen wurde ein vierter Probekörper, Prisma Nr.10, zur Messung herangezogen.

10.4.2 Voraussetzungen für das statische E-Modulprüfen nach DIN 1048

Die untersuchten Prismen haben die kleinste Abmessung von 100 mm und das Verhältnis h/d beträgt 3. Damit erfüllen sie die Voraussetzungen für Probekörper zum Messen des statischen E-Moduls nach DIN 1048 Teil 5, 3.5 (1).

In DIN 1048 Teil 5 wird zudem gefordert, dass das kleinste Maß der Probekörper, die in Formen hergestellt werden, im allgemeinen mindestens das 4-fache des Größtkornes des verwendeten Zuschlages aufweist.

Dies bedeutet bei einem Größtkorn von 32 mm, dass das kleinste Maß der zu verwendenden Probekörper mindestens 128 mm betragen müsste.

Aufgrund bisheriger Erfahrungswerte der BAM und im Hinblick auf die Anforderungen der DIN 1048 Teil 2, 5.1.1 wird bei der Entnahme von Probekörpern aus einem Bauwerk auch nur ein Mindestmaß von dem mindestens 3-fachen des Größtkornes gefordert.

Die oben genannte Vernachlässigung hat bei Vergleichsmessungen keine entscheidenden Auswirkungen, es kann höchstens zu größeren Streuungen der einzelnen Messwerte kommen.

Zudem bezieht sich DIN 1048 Teil 5, 3.1 [59] auf Normalzuschlag und nicht auf Recyclingzuschlag aus Altbeton und Bauschutt, der schon zum gewissen Teil aus Betonsplitt mit kleineren Zuschlägen besteht.

10.4.3 Probekörpervorbehandlung

Aus Gründen des Zustandes der Prismendruckflächen und der erheblichen Streuung der Ergebnisse wurde nach dem ersten Messtag (Probekörper X 280 und X 310) beschlossen, alle folgenden wassergelagerten Prismen vor Prüfung des statischen E-Moduls planparallel auf eine Höhe von 298 mm zu schleifen. Die trocken-gelagerten Prismen wurden nicht geschliffen, weil eine nicht einschätzbare Veränderung der E-Modul-Entwicklung durch Wasseraufnahme zu befürchten war.

10.4.4 Versuchsdurchführung

Der statische E-Modul der Prüfkörper wurde mit einer rechnergesteuerten Prüfmaschine mit hydraulischem Antrieb und elektronischer Regeleinrichtung (Genauigkeitsklasse 1) ermittelt. Die Prüfmaschine ist in Bild 6 abgebildet.

Die maximale Kraft der Prüfmaschine in Zug- und Druckrichtung beträgt 1000 kN.

Während der Versuchsdurchführung wurde die Prüfmaschine nur mit dem Messbereich 1/2 (Maximalkraft von 500 kN) gefahren.

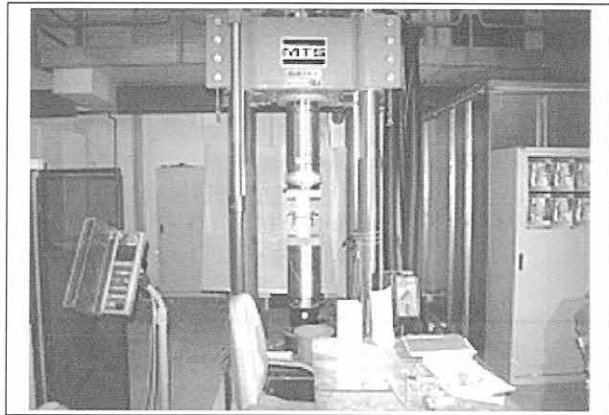


Bild 6: Prüfmaschine für die statistische E-Modul-Ermittlung

10.4.5 Versuchsablauf

Die Prüfkörper wurden in die Prüfmaschine eingesetzt und zentrisch zur Druckplattenmitte ausgerichtet. Alle Druckversuche begannen mit einer Vorbelastung der Probekörper von etwa 5 kN bzw. 0,5 N/mm².

Diese Grundkraftstufe war der Ausgangspunkt für den Start. Die erste Kraftstufe lag bei etwa 2 kN bis 3 kN und stellte den Aufzeichnungsbeginn der Messwerte dar. Die Steigerung der Druckbeanspruchung betrug bei Kraftregelung 0,25 MPa pro Sekunde.

Der Ablauf der s-e-Versuche wurde so gestaltet, dass der Funktionsgenerator die Regeleinrichtung von Kraft auf Kolbenwegregelung (Vorgabe des Kolbenweges: 0,005 mm/s) umschaltet, sobald eine Kraft von 100 kN erreicht wurde. Dadurch wurde die Prüfung bis zum Bruch der Probe möglich, ohne dass durch den Bruch des Probekörpers die an ihm angebrachten Wegaufnehmer gefährdet wurden.

Die Probekörper wiesen nach den Druckversuchen nur kleine Risse auf. Es kam zu keinem Zerschlagen der Probekörper nach Erreichen der Bruchkraft.

10.4.6 Messwerterfassung, Registrierung und Speicherung

Alle benötigten Messdaten, wie Prüfkraft und Verformung, wurden während des Versuchsablaufes mit dem der Prüfmaschine zugeordneten PC aufgezeichnet.

Die Dehnung der Probekörper in Druckrichtung wurde von zwei Extensometern der Firma MTS Model 632.11F-30 mit einem Messhub von ± 2,0 mm aufgenommen.

Bei der Versuchsdurchführung war der Messbereich auf 0,4 mm reduziert.

Die Aufnehmer wurden in mittlerer Höhe federnd an die zwei gegenüberliegenden Schalungsseiten des Betonprismas geklemmt.

Die Messlänge für die Verformung betrug 100 mm. Das Bild 7 zeigt beide an dem Probekörper befestigten Wegaufnehmer.

Die Prüfkraft wurde von einer im Kraftfluss der Maschine angeordneten Messzelle registriert. Die anfallenden Messdaten wurden im Verlauf der Versuchsdurchführung von dem Rechner, der den Versuchsablauf steuerte, im Sekundentakt registriert und anschließend in einer Excel-Datei abgelegt.

Messgrößen:

- Zeit
- Prüfkraft
- Messsignale der 2 Wegaufnehmer
- Mittelwert aus den Messsignalen der Wegaufnehmer.

Der Versuchsablauf wurde zusätzlich mit einem Plotter, der den Kraftanstieg und die Verformung (rechnerischer Mittelwert) aufzeichnete, überwacht.

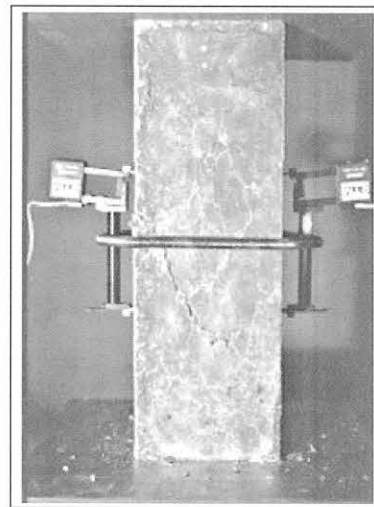


Bild 7: Probekörper mit Wegaufnehmern.

10.5 Druckfestigkeitsprüfung

Die Druckfestigkeitsprüfung der Betonwürfel (Kantenlänge 150 mm) erfolgte nach DIN 1048 Teil 5 und wurde im Betonalter von 28 Tagen durchgeführt. Die Prüfungsergebnisse sind in der Tabelle 25 zusammengefasst.

10.6 Prüfplan

Tabelle 11: Prüfplan

Probekörper Nr.	Lagerung ²⁾	Tag der Prüfungen x-Tage nach Herstellung	Prüfungsart		
			Entl	Ultraschall	Estat-Modul
1-3	T	1, 2, 3, 7, 14, 21, 28	X	X	
		28			X
4-6	T	1, 2, 3, 7, 14, 21, 28	X		
		über den 28 hinaus ³⁾	X		
7-9	N	1, 2, 3, 7, 14, 21, 28	X	X	
		28			X
10	T	1, 2, 3, 7, 14, 21, 28	X		
		28			(X) ¹⁾

¹⁾ Probekörper Nr.10 war als Ersatz gedacht und wurde bei erheblichen Streuungen zur 4. Messung beim statischen E-Modul genutzt.

²⁾ T = Trockenlagerung, N = Nasslagerung.

³⁾ Die verbleibenden Proben (Nr. 4 - Nr.6) werden im Rahmen des FE-Projektes der BAM weitergehend geprüft.

11 Berechnungsgrundlagen für die Prüfverfahren

11.1 Dynamischer Elastizitätsmodul der Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung

Die Berechnung der dynamischen E-Moduln der Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung wurde nach Heft 422 [9] und mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Excel sowie der Programmiersprache Visual Basic durchgeführt.

Der dynamische Elastizitätsmodul wurde mit der Biegeschwingungsfrequenz über die Höhe und die Breite des Probekörpers ermittelt. Der dynamische E-Modul aus der Dehnschwingung wurde als Kontrolle herangezogen.

Die Gleichung für die Berechnung der E-Moduln bei stabförmigen Probekörpern (Prisma, Zylinder) lautet je nach Schwingungsform:

$$\text{Dehnschwingung: } E_{\text{dyn,D}} = f_D^2 \cdot l^2 \cdot \rho_R \cdot C_D$$

$$\text{Biegeschwingung: } E_{\text{dyn,B}} = f_B^2 \cdot l^2 \cdot \rho_R \cdot C_B$$

D, B	...Fußzeiger für Dehn- bzw. Biegeschwingung
E_{dyn}	...dynamischer Elastizitätsmodul in N/mm ²
f	...Eigenfrequenz abhängig von Schwingungsform und Schwingungsordnung in MHz
l	...Länge des Probekörpers in mm
ρ_R	...Rohdichte in kg/m ³
C_D, C_B	...ist ein dimensionsloser Faktor, der von der Schwingungsform, Schwingungsordnung, Probengeometrie sowie von der Querdehnungszahl μ_{dyn} abhängt.

Beim ersten Schritt zur Ermittlung der C – Faktoren oder zur groben Bestimmung des dynamischen E-Moduls kann für Beton die dynamische Querdehnungszahl $\mu_{\text{dyn}} \approx 0,20$ gesetzt werden.

Für diese dynamische E-Modul-Ermittlungen wurde die Querdehnungszahl nicht konstant ($\mu_{\text{dyn}} = 0, 20$) angenommen, sondern iterativ nach den beiden in Heft 422 [9] dargestellten Verfahren berechnet.

Die Werte der beiden Iterationsverfahren lagen so dicht beieinander, dass nur die Ergebnisse des Verfahrens mittels „regula falsi“ ausgewertet wurden.

Die Querdehnungszahl μ_{dyn} ändert sich nach Wesche [51] vor allem bei fortschreitendem Reifegrad des Zementsteins und wesentlicher Änderung des Feuchtigkeitsgehalts des Probekörpers.

Durch die unterschiedliche Lagerung der Probekörper war eine ungleiche Entwicklung der Querdehnungszahl zu erwarten.

Dieses hätte eine Veränderung der Ergebnisse zur Folge gehabt, da die Querdehnungszahl in die Berechnung der dynamischen E-Moduln eingeht.

Aufgrund der in der Regel ungleichen Verteilung des Zuschlages wurde aus dem Mittelwert der dynamischen Elastizitätsmoduln zweier Prüflagen – $E_{\text{dyn,Höhe}}$ und $E_{\text{dyn,Breite}}$ – der $E_{\text{dyn,B}}$ -Modul eines Prüfkörpers ermittelt.

Die dazugehörigen ermittelten Querdehnungszahlen wurden mit $\mu_{\text{dyn,Höhe}}$ und $\mu_{\text{dyn,Breite}}$ benannt.

Die einzelnen dynamischen E-Moduln pro Prüfkörper sind in den Tabellen in Anhang 1 dargestellt.

Die Mittelwerte der wassergelagerten Probekörper in den Tabellen im Kap.12.1.1.1 berechnen sich aus 6 dynamischen Modul- Ergebnissen.

Die Mittelwerte der trockengelagerten Probekörper in den Tabellen im Kap.12.1.1.1 berechnen sich aus 14 dynamischen Modul-Ergebnissen.

11.2 Dynamischer Elastizitätsmodul der Laufzeitmessung eines Ultraschall-Impulses

Der dynamische Elastizitätsmodul wurde aus der Laufzeit der Schallimpulse über die Länge des Probekörpers ermittelt. Die Berechnung des dynamischen E-Moduls wurde nach Heft 422 [9] und mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Excel sowie der Programmiersprache Visual Basic durchgeführt.

Nach folgender Beziehung berechnet sich der dynamische Elastizitätsmodul:

$$E_{\text{dyn,L}} = \frac{1}{t^2} \cdot l^2 \cdot \rho_R \cdot C_L$$

$E_{\text{dyn,L}}$... dynamischer E - Modul in N/mm², berechnet aus der Ausbreitungsgeschwindigkeit $v = l/t$ der Längswellen

T ... Laufzeit des Schallimpulses in μs

L ... Durchschallungslänge des Probekörpers in mm

ρ_R ... Rohdichte in kg/m³

C_L ... ist ein dimensionsloser Korrekturfaktor, der die Querdehnungsbehinderung in elastischen Körpern mit großen Querabmessungen a und b im Vergleich zur Wellenlänge λ berücksichtigt ($\lambda \ll a, b$) [38].

Der Korrekturfaktor C_L für Beton kann vereinfacht als Konstante $C_L \approx 0,90$ ($\mu_{\text{dyn}} \approx 0,20$) angenommen oder über die Formel:

$$C_L = \frac{(1 + \mu_{\text{dyn}})(1 - 2 \cdot \mu_{\text{dyn}})}{1 - \mu_{\text{dyn}}}$$

berechnet werden.

Die Querdehnungszahl μ_{dyn} der einzelnen Probekörper war aus den EnI-Methode bekannt. Sie ergab sich aus dem Mittelwert der beiden Querdehnungszahlen $\mu_{\text{dyn,Höhe}}$ und $\mu_{\text{dyn,Breite}}$ der E_{EnI} -Modul-Ermittlungen.

Die aus der Laufzeitmessung berechneten dynamischen E-Moduln sind in den Tabellen im Anhang 1 dargestellt.

Die in den Tabellen im Kap. 12.1.1.1 protokollierten Mittelwerte der wassergelagerten sowie der trockengelagerten Probekörper berechneten sich aus jeweils drei dynamische E-Modul-Ergebnissen.

11.3 Dynamischer Schubmodul

Der dynamische Schubmodul wurde mit der Torsionsschwingungsfrequenz ermittelt. Die Berechnung des dynamischen Schubmoduls wurde nach Heft 422 [9] und mit Hilfe des Tabellenkalkulationsprogramms Excel sowie der Programmiersprache Visual Basic durchgeführt.

Der dynamische Schubmodul wurde nach folgender Beziehung berechnet:

$$G_{\text{dyn,T}} = f_T^2 \cdot I^2 \cdot \rho_R \cdot C_T$$

T	...Fußzeiger für Torsionsschwingung
G_{dyn}	...dynamischer Schubmodul in N/mm ²
f	...Eigenfrequenz abhängig von Schwingungsform und Schwingungsordnung in MHz
I	...Länge des Probekörpers in mm
ρ_R	...Rohdichte in kg/m ³
C_T	...ist ein dimensionsloser Faktor, der von der Probengeometrie sowie von der Schwingungsform und Schwingungsordnung abhängt.

Die dynamischen Schubmoduln sind wie die dynamischen E-Moduln in den Tabellen im Anhang 1 dargestellt.

11.4 Statischer Elastizitätsmodul

Die statischen E-Moduln wurden mit Hilfe von Excel und Visual Basic ermittelt. Die tabellierten Ergebnisse (s. Tabelle 24, Seite 39) stellen den Mittelwert der einzelnen statischen Elastizitätsmoduln der Probekörper pro Prüfgang dar. Die Berechnung der einzelnen statischen E-Moduln erfolgte unter Berücksichtigung der DIN 1048 nach dem Hookeschen Gesetz $E = \sigma/\varepsilon$ nach folgender Beziehung:

$$E_{\text{stat}} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_o - \varepsilon_u}$$

Der statische Elastizitätsmodul ergibt sich aus dem Verhältnis der oberen und unteren Prüfspannung σ_o , σ_u und den dazugehörigen Dehnungen ε_o , ε_u . Die obere Prüfspannung σ_o entspricht einem Drittel der maximal auftretenden Druckspannung. Die untere Prüfspannung

σ_u ermittelt sich aus dem Wert der ersten Kraftstufe. Die Druckspannung $\sigma = F/A$ errechnet sich aus der jeweiligen gemessenen Kraft F (aufgezeichnet in der Excel-Tabelle) dividiert durch die anfängliche Probekörperdruckfläche ($A = \text{Breite} \times \text{Höhe}$ des jeweiligen Probekörpers).

Die Dehnung ε lässt sich aus dem Mittelwert der Längenänderung (aufgezeichnet in der Excel-Tabelle), bezogen auf die Messlänge 100 mm, ermitteln.

Statischer E-Modul, maximale Spannung und zugehörige Dehnung der einzelnen Probekörper sind im Anhang 2 in Tabellen ausgeführt und die Spannungs-Dehnungslinien in Diagrammen dargestellt.

12 Messergebnisse

12.1 Festbetoneigenschaften

12.1.1 Elastizitätsmodul

12.1.1.1 Dynamischer Elastizitätsmodul

Die dynamischen E-Moduln der beiden dynamischen Prüfverfahren werden in den nachfolgenden Tabellen pro Betonrezeptur, unterteilt nach Trocken- und Wasserlagerung, aufgeführt. Die Ergebnisse stellen Mittelwerte der einzelnen Messreihen pro Prüftag dar.

Die Messergebnisse der einzelnen Probekörper und die weiteren Diagramme der dynamischen E-Modul-Entwicklung befinden sich im Anhang 1.

Erläuterung der verwandten Abkürzungen:

E_{dyn}	...dynamischer E-Modul der Eigenschwingzeitmessung der Biegeschwingung
$E_{\text{dyn,D}}$...dynamischer E-Modul der Eigenschwingzeitmessung der Dehnschwingung
$G_{\text{dyn,T}}$...dynamischer Schubmodul der Eigenschwingzeitmessung der Torsionsschwingung
$E_{\text{dyn,L,var}}$...dynamischer E-Modul der Laufzeitmessung der Schallimpulse mit ermittelter Querdehnungszahl
$E_{\text{dyn,L}}$... dynamischer E-Modul der Laufzeitmessung der Schallimpulse mit konstanter Querdehnungszahl $\mu_{\text{dyn}} = 0,20$

Tabelle 12: E-Modulentwicklung der Probekörper X 280 in [N/mm²]

Tag n-Tage nach Herstellung	E-Modulentwicklung bei Trockenlagerung					E-Modulentwicklung bei Wasserlagerung				
	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}
1	19.121	21.713	24.603	18.373	7.499	18.399	21.909	25.284	17.622	7.185
2	25.541	26.472	27.429	25.139	10.353	26.801	26.602	30.379	26.110	10.498
3	27.085	28.629	29.627	26.961	11.034	29.533	28.030	32.661	28.945	11.495
7	28.186	30.872	31.276	28.723	11.594	32.698	31.380	35.385	31.880	12.876
14	28.493	32.065	32.365	29.253	11.749	34.405	31.917	36.464	33.220	13.475
21	28.415	31.678	32.272	29.171	11.731	35.201	32.063	37.060	34.015	13.732
28	28.473	31.781	32.147	29.388	11.728	35.377	32.702	36.800	34.473	13.947

Tabelle 13: E-Modulentwicklung der Probekörper X 310 in [N/mm²]

Tag n-Tage nach Herstellung	E-Modulentwicklung bei Trockenlagerung					E-Modulentwicklung bei Wasserlagerung				
	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}
1	20.383	22.860	26.353	20.061	7.930	19.285	24.246	26.931	18.977	7.630
2	26.595	27.923	28.581	26.617	10.850	27.809	28.009	31.593	27.372	10.937
3	27.953	29.639	30.363	28.259	11.471	30.240	30.722	34.074	29.878	11.974
7	28.834	31.747	32.051	29.891	11.951	33.685	32.899	36.644	33.108	13.317
14	28.984	33.148	33.097	30.355	12.069	35.082	33.977	37.924	34.372	13.857
21	28.923	32.917	32.858	30.409	12.047	35.531	34.661	37.977	34.987	14.128
28	28.902	33.251	33.328	30.477	12.046	36.213	34.499	38.696	35.012	14.281

Tabelle 14: E-Modulentwicklung der Probekörper X 340 in [N/mm²]

Tag n-Tage nach Herstellung	E-Modulentwicklung bei Trockenlagerung					E-Modulentwicklung bei Wasserlagerung				
	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}
1	21.616	21.346	25.509	20.968	8.356	21.672	21.540	24.923	20.911	8.470
2	27.249	27.100	29.669	26.780	10.896	28.931	27.534	31.853	28.102	11.300
3	28.604	29.739	31.473	28.257	11.544	31.164	29.929	34.133	30.349	12.229
7	29.348	31.237	33.113	29.500	11.878	34.275	31.945	36.535	33.160	13.431
14	29.523	31.499	33.664	30.107	11.990	35.384	33.698	37.834	33.896	13.956
21	29.380	32.316	33.696	30.193	12.037	36.145	33.195	37.832	34.414	14.170
28	29.328	33.662	34.181	30.320	12.121	36.469	34.291	38.708	34.870	14.364

Tabelle 15: E-Modulentwicklung der Probekörper K 280 in [N/mm²]

Tag n-Tage nach Herstellung	E-Modulentwicklung bei Trockenlagerung					E-Modulentwicklung bei Wasserlagerung				
	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}
1	18.324	18.810	22.692	17.693	7.029	18.025	17.925	22.007	18.008	6.909
2	25.531	26.231	27.857	25.352	10.268	27.557	24.195	30.888	26.507	10.464
3	27.624	27.946	29.818	27.772	11.133	30.565	26.565	33.513	29.481	11.645
7	28.789	31.025	31.981	29.391	11.723	34.344	30.392	37.001	32.893	13.198
14	28.985	31.568	32.719	29.823	11.822	36.091	31.855	38.317	34.401	13.914
21	28.947	32.063	32.849	30.066	11.882	36.920	32.154	38.717	35.375	14.232
28	28.926	32.206	33.192	29.915	11.846	37.130	34.015	40.372	35.951	14.380

Tabelle 16: E-Modulentwicklung der Probekörper K 310 in $[N/mm^2]$.

Tag n-Tage nach Herstellung	E-Modulentwicklung bei Trockenlagerung					E-Modulentwicklung bei Wasserlagerung				
	E_{dyn}	$E_{dyn,L,var}$	$E_{dyn,L}$	$E_{dyn,D}$	$G_{dyn,T}$	E_{dyn}	$E_{dyn,L,var}$	$E_{dyn,L}$	$E_{dyn,D}$	$G_{dyn,T}$
1	21.557	22.009	25.161	21.357	8.392	21.759	22.770	26.364	20.666	8.487
2	27.458	29.520	30.163	27.408	11.215	29.797	30.686	34.506	29.252	11.733
3	28.822	31.806	31.856	28.915	11.853	32.194	32.769	37.009	31.513	12.662
7	29.983	33.705	33.813	30.540	12.391	35.770	34.516	39.415	34.888	14.013
14	30.284	34.172	34.421	31.312	12.507	37.054	36.741	41.004	36.460	14.642
21	30.091	35.014	34.617	31.432	12.588	38.012	35.805	40.352	37.473	14.956
28	30.109	35.514	35.236	31.451	12.563	38.476	37.157	41.956	38.219	15.129

Tabelle 17: E-Modulentwicklung der Probekörper K 340 in $[N/mm^2]$.

Tag n-Tage nach Herstellung	E-Modulentwicklung bei Trockenlagerung					E-Modulentwicklung bei Wasserlagerung				
	E_{dyn}	$E_{dyn,L,var}$	$E_{dyn,L}$	$E_{dyn,D}$	$G_{dyn,T}$	E_{dyn}	$E_{dyn,L,var}$	$E_{dyn,L}$	$E_{dyn,D}$	$G_{dyn,T}$
1	21.665	23.665	27.468	21.049	8.355	21.510	22.093	26.060	21.076	8.346
2	27.894	30.360	31.971	27.681	11.269	29.771	29.081	33.937	29.081	11.584
3	29.277	32.165	33.277	29.321	11.923	32.057	31.683	36.027	31.079	12.576
7	30.391	35.055	35.708	31.177	12.453	35.180	34.229	38.502	34.626	13.853
14	30.618	35.416	36.103	31.649	12.617	36.418	35.526	39.498	35.787	14.415
21	30.720	34.450	35.576	31.851	12.537	37.439	34.795	39.501	36.060	14.709
28	30.679	35.480	36.169	31.810	12.555	38.219	34.747	40.623	37.094	14.856

Tabelle 18: E-Modulentwicklung der Probekörper W 280 in $[N/mm^2]$.

Tag n-Tage nach Herstellung	E-Modulentwicklung bei Trockenlagerung					E-Modulentwicklung bei Wasserlagerung				
	E_{dyn}	$E_{dyn,L,var}$	$E_{dyn,L}$	$E_{dyn,D}$	$G_{dyn,T}$	E_{dyn}	$E_{dyn,L,var}$	$E_{dyn,L}$	$E_{dyn,D}$	$G_{dyn,T}$
1	15.682	16.962	19.492	15.217	6.152	15.310	15.632	18.949	15.204	5.891
2	21.351	22.236	23.198	21.034	8.658	22.596	20.873	25.793	21.664	8.649
3	22.785	24.131	24.810	22.274	9.285	24.710	22.907	27.660	23.770	9.519
7	24.212	26.229	26.673	24.192	9.961	27.733	24.962	30.325	26.604	10.660
14	24.350	27.075	27.197	24.568	10.058	28.993	26.425	31.265	27.892	11.238
21	24.274	26.999	27.165	24.753	9.995	29.530	27.265	31.759	27.777	11.490
28	24.212	26.953	26.904	24.968	9.989	30.100	26.571	32.394	28.724	11.565

Tabelle 19: E-Modulentwicklung der Probekörper W 310 in $[N/mm^2]$.

Tag n-Tage nach Herstellung	E-Modulentwicklung bei Trockenlagerung					E-Modulentwicklung bei Wasserlagerung				
	E_{dyn}	$E_{dyn,L,var}$	$E_{dyn,L}$	$E_{dyn,D}$	$G_{dyn,T}$	E_{dyn}	$E_{dyn,L,var}$	$E_{dyn,L}$	$E_{dyn,D}$	$G_{dyn,T}$
1	16.967	18.180	21.191	16.045	6.578	16.881	17.746	20.430	16.278	6.595
2	22.652	23.139	24.741	22.132	9.089	24.091	23.325	27.126	23.505	9.380
3	23.976	25.389	26.341	23.506	9.738	26.289	25.345	28.984	24.985	10.292
7	25.275	27.992	28.094	25.512	10.372	29.346	27.423	31.517	27.694	11.475
14	25.360	28.501	28.590	25.809	10.447	30.640	28.255	32.471	29.343	11.976
21	25.277	28.410	28.860	25.633	10.438	31.138	29.558	33.116	29.796	12.276
28	25.119	28.777	28.852	25.858	10.444	31.627	28.877	33.722	29.527	12.301

Tabelle 20: E-Modulentwicklung der Probekörper W 340 in [N/mm²].

Tag n-Tage nach Herstellung	E-Modulentwicklung bei Trockenlagerung					E-Modulentwicklung bei Wasserlagerung				
	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}
1	20.773	21.548	24.612	20.050	8.066	20.082	21.483	24.100	19.817	7.913
2	24.931	25.868	27.669	24.386	9.983	25.243	26.757	29.207	25.297	10.058
3	26.034	27.801	28.822	25.743	10.562	27.241	28.491	30.994	26.643	10.865
7	26.947	29.730	30.691	27.348	10.975	29.444	30.764	32.933	28.993	11.829
14	26.914	30.513	30.999	27.264	11.066	30.510	31.422	33.836	30.282	12.240
21	26.965	30.722	31.063	27.405	11.124	31.263	31.599	34.377	31.188	12.469
28	26.877	31.068	31.246	27.634	11.114	31.431	31.868	34.415	30.517	12.582

Tabelle 21: E-Modulentwicklung der Probekörper O 280 in [N/mm²].

Tag n-Tage nach Herstellung	E-Modulentwicklung bei Trockenlagerung					E-Modulentwicklung bei Wasserlagerung				
	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}
1	21.085	22.770	26.268	20.994	8.345	21.898	20.692	25.602	21.208	8.380
2	28.048	30.246	30.860	27.489	11.524	29.923	30.969	34.294	29.322	11.853
3	30.275	31.997	32.248	29.905	12.462	33.138	32.218	36.593	32.823	13.021
7	31.992	35.704	34.726	32.841	13.482	37.077	34.434	39.499	36.231	14.513
14	32.597	36.177	35.746	33.029	13.583	38.732	37.387	41.662	37.385	15.311
21	32.628	35.990	35.623	33.818	13.810	39.611	39.128	42.115	38.848	15.869
28	32.819	36.595	36.212	34.114	13.726	40.698	38.015	42.417	39.658	16.088

Tabelle 22: E-Modulentwicklung der Probekörper O 310 in [N/mm²].

Tag n-Tage nach Herstellung	E-Modulentwicklung bei Trockenlagerung					E-Modulentwicklung bei Wasserlagerung				
	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}
1	22.005	26.414	28.352	21.613	8.763	21.438	23.789	25.555	21.315	8.610
2	29.067	32.182	32.899	28.881	11.951	30.653	32.381	34.871	30.359	12.278
3	31.182	34.160	34.658	31.204	12.821	33.231	34.360	37.086	33.208	13.299
7	33.269	35.725	37.040	33.510	13.849	37.655	36.038	39.379	36.755	14.991
14	33.649	38.384	37.557	34.766	13.985	39.075	40.259	41.870	38.663	15.919
21	33.724	37.573	37.833	34.891	14.046	40.016	41.638	42.858	39.487	16.388
28	33.965	36.937	37.343	35.157	14.101	40.979	41.031	43.166	40.132	16.590

Tabelle 23: E-Modulentwicklung der Probekörper O 340 in [N/mm²].

Tag n-Tage nach Herstellung	E-Modulentwicklung bei Trockenlagerung					E-Modulentwicklung bei Wasserlagerung				
	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{dyn,D}	G _{dyn,T}
1	23.984	26.109	27.953	23.318	9.687	24.819	26.436	28.940	23.875	9.872
2	30.107	31.757	31.745	30.375	12.543	33.231	32.611	36.606	31.552	13.104
3	31.978	34.263	33.900	32.497	13.400	35.217	35.793	38.738	34.647	14.076
7	33.824	35.999	35.894	34.675	14.172	39.184	38.137	41.396	37.996	15.645
14	34.052	36.271	35.855	35.011	14.348	40.857	40.018	43.119	40.524	16.363
21	34.254	37.512	37.344	35.463	14.427	42.048	40.640	44.024	41.126	16.803
28	34.462	37.535	37.103	35.540	14.489	42.661	40.858	44.344	40.185	17.038

12.1.1.2 Statischer Elastizitätsmodul

Der statische Elastizitätsmodul E_{stat} wurde aus den zuvor beschriebenen σ - ε -Versuchen als Sehnenmodul im Betonalter von 28 Tagen bestimmt. Die Mittelwerte der Ergebnisse sind in den Tabellen in Kap. 12.1.1.3 wiedergegeben. Im Anhang 2 sind zusätzlich die einzelnen Ergebnisse der geprüften Probekörper tabelliert.

Die bei der E-Modul-Ermittlung entstandenen Daten sind als Spannungs-Dehnungslinien im Anhang 2 dargestellt. Die Abb.23 zeigt die Spannungs-Dehnungslinien der wassergelagerten Proben W 310.

Die Diagramme enthalten jeweils die zu einem Prüftermin erzeugten Spannungs-Dehnungslinien von drei bzw. vier geprüften Probekörpern sowie die Lage des berechneten Punktes bei einem Drittel der Spannung (Druckfestigkeit) auf der Linie. Alle Bezeichnungen sind in der Legende angegeben.

13.1.1.3 Zusammenfassung der Messergebnisse (Prüfalter 28d)

Die Mittelwerte der Messergebnisse der verschiedenen Prüfverfahren im Prüfalter 28 Tage sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst nach Zementgehalt und sortiert. Die Werte sind auf 100 N/mm² gerundet.

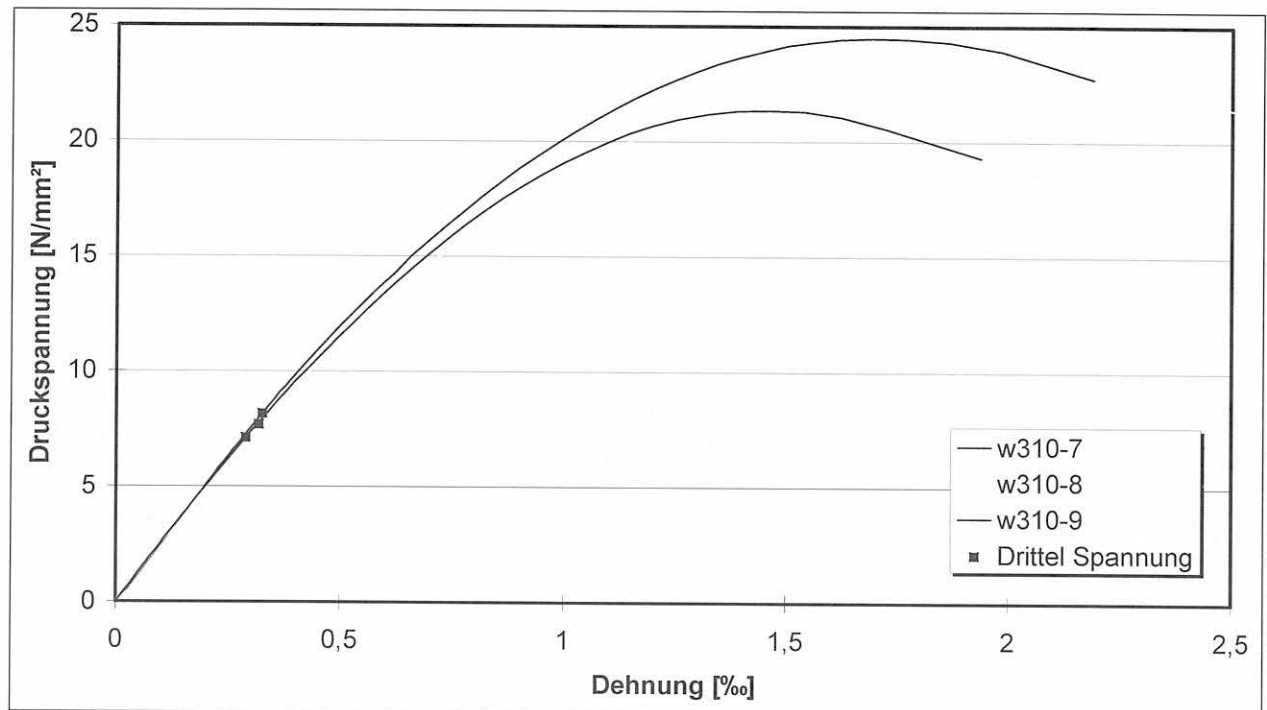


Abb.23: Spannungs-Dehnungslinien der wassergelagerten Probekörper : Recyclingmaterial W, Zementgehalt 310 kg/m³ (Nr.7 - 9)

Tabelle 24: E-Modul-Mittelwerte der jeweiligen Prüfverfahren am 28. Tag nach Herstellung, sortiert nach den Zementgehalten in [N/mm²] (Gerundet auf 100 N/mm²).

Proben	E-Modulentwicklung bei Trockenlagerung				E-Modulentwicklung bei Wasserlagerung			
	E _{stat}	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}	E _{stat}	E _{dyn}	E _{dyn,L,var}	E _{dyn,L}
X 280	25.400	28.500	31.800	32.100	29.100	35.400	32.700	36.800
K 280	23.300	28.900	32.200	33.200	27.600 ¹⁾	37.100	34.000	40.400
W 280	20.100	24.200	27.000	26.900	23.300 ¹⁾	30.100	26.600	32.400
O 280	29.300	32.800	36.600	36.200	30.600 ¹⁾	40.700	38.000	42.400
X 310	24.700	28.900	33.300	33.300	28.400	36.200	34.500	38.700
K 310	25.300	30.100	35.500	35.200	29.900 ¹⁾	38.500	37.200	42.000
W 310	22.600	25.100	28.800	28.900	24.600 ¹⁾	31.600	28.900	33.700
O 310	27.600	34.000	36.900	37.300	32.500 ¹⁾	41.000	41.600	43.200
X 340	26.100	29.300	33.700	34.200	28.400 ¹⁾	36.500	34.300	38.700
K 340	26.800	30.700	35.500	36.200	28.600 ¹⁾	38.200	34.700	40.600
W 340	22.900	26.900	31.100	31.200	26.400 ¹⁾	31.400	31.900	34.400
O 340	30.600	34.500	37.500	37.100	33.400 ¹⁾	42.700	40.600	44.300

¹⁾ Planparallel geschliffene Druckflächen des Probekörpers.

12.1.2 Druckfestigkeit und Festbetonrohddichte

Die nachfolgende Tabelle führt die Druckfestigkeit und Festbetonrohddichte der Probekörper nach Zementgehalt unterteilt aus. Die Prüfungen wurden an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm durchgeführt.

Tabelle 25 : Druckfestigkeit und Festbetonrohddichte [31].

Materialbezeichnung		0	X	K	W	0	X	K	W	0	X	K	W	
Mischung Nr.		0/280	X/280	K/280	W/280	0/310	X/310	K/310	W/310	0/340	X/340	K/340	W/340	
Druckfestigkeit Würfel mit 15 cm Kantenlänge	1	N/mm ²	32,0	41,0	35,8	36,3	37,8	43,6	37,8	44,0	45,0	50,7	45,3	41,3
	2		32,0	39,6	36,9	34,2	38,8	44,6	44,0	36,7	45,3	50,9	44,7	44,0
	3		32,8	40,8	37,1	36,0	36,9	45,6	40,8	38,4	45,7	50,6	45,4	41,8
	Mittel		32,3	40,5	36,6	35,5	37,8	44,6	40,9	39,7	45,3	50,7	45,1	42,4
Festbetonrohddichte Würfel mit 15 cm Kantenlänge	1	kg/dm ³	2,34	2,23	2,24	2,16	2,34	2,26	2,17	2,29	2,36	2,25	2,28	2,19
	2		2,32	2,23	2,24	2,14	2,34	2,25	2,27	2,17	2,36	2,26	2,26	2,18
	3		2,33	2,21	2,25	2,15	2,33	2,25	2,26	2,15	2,36	2,25	2,28	2,18
	Mittel		2,33	2,22	2,24	2,15	2,34	2,25	2,23	2,20	2,36	2,25	2,27	2,18

Zusätzlich wurde die Druckfestigkeit der Prismen (Nr.1 bis Nr.3, Nr.7 bis Nr.9 und ggf. Nr.10) aus der Spannungs-Dehnungslinie ermittelt. Die Mittelwerte der Ergebnisse sind Tabelle 23a aufgeführt.

Tabelle 23a: Druckfestigkeit der Prismen (Mittelwerte).

Materialbezeichnung	O	X	K	W	O	X	K	W	O	X	K	W
Mischung Nr.	O/280	X/280	K/280	W/280	O/310	X/310	K/310	W/310	O/340	X/340	K/340	W/340
Druckfestigkeit [N/mm ²] (Trockenlagerung)	25,8	22,1	18,8	16,8	26,1	26,4	20,6	18,2	26,9	26,9	27,0	22,2
Druckfestigkeit [N/mm ²] (Wasserlagerung)	23,2	22,5	19,8	21,9	24,9	28,3	23,0	23,2	31,4	28,6	27,9	28,6

12.2 Frischbetoneigenschaften

Die folgende Tabelle zeigt die Frischbetoneigenschaften der Betonmischungen.

Tabelle 26: Ergebnisse der Frischbetonprüfungen [31].

Materialbezeichnung		0	X	K	W	0	X	K	W	0	X	K	W	
Mischung Nr.		0/280	X/280	K/280	W/280	0/310	X/310	K/310	W/310	0/340	X/340	K/340	W/340	
Frischbetonprüfungsergebnisse														
Ausbreitmaß a (10 min)	cm	58,0	49,5	50,0	53,5	59,5	57,0	57,5	57,0	60,0	61,0	62,0	58,0	
Ausbreitmaß a(30 min)	cm	53,5	42,0	48,0	44,0	55,5	53,5	53,5	47,0	57,5	56,0	53,5	47,5	
Luftgehalt (im LP-Topf)	Vol.-%	0,3	0,5	0,6	1,6	0,4	0,7	0,7	1,6	0,3	0,7	0,5	1,6	
Frischbetonrohddichte (im LP-Topf)	kg/dm ³	2,371	2,276	2,297	2,216	2,379	2,276	2,302	2,218	2,368	2,271	2,317	2,234	
Frischbetonrohddichte (im Würfel mit 15 cm Kantenlänge)	1	kg/dm ³	2,390	2,288	2,302	2,222	2,391	2,311	2,339	2,233	2,403	2,299	2,340	2,239
	2		2,367	2,289	2,305	2,201	2,386	2,297	2,326	2,227	2,398	2,283	2,310	2,231
	3		2,376	2,267	2,323	2,213	2,377	2,304	2,320	2,218	2,399	2,294	2,328	2,229
	Mittel		2,378	2,281	2,310	2,212	2,385	2,304	2,328	2,223	2,400	2,292	2,326	2,233

Mischmodalität C-6: Gesamtzuschlag einfüllen, 7,5 l Wasser zugeben, Zement einfüllen, Restwasser zugeben und bis 2,5 min mischen (nach Zementzugabe)

7 min nach Zementzugabe Zusatzmittel zugeben und 1 min einmischen. Danach Ausbreitmaß a(10 min) bestimmen. Luftgehalt und Frischbetonrohddichte ermitteln

Verwendeter Mischer: Eirich Gegenstrommischer, 60 l

12.3 Fehlerbetrachtung

Die Genauigkeit der Messergebnisse des E-Moduls der dynamischen Prüfverfahren hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, wie

- unterschiedliche Prüfbedingungen (s. Kap. 5.2.3)
- Genauigkeit der Messgeräte
- die für Berechnung gewählten Beziehungen
- die in die Beziehung eingehenden Messwerte.

Als Werte gehen in die Berechnungsformeln neben der Laufzeit des Schallimpulses bzw. der Eigenfrequenz der Schwingung auch die Rohdichte ρ_R bzw. die Masse und die Abmessungen des Probekörpers ein. Denn die Rohdichte wird aus dem Volumen V und der Masse m eines Probekörpers ermittelt. Das Volumen V ergibt sich wiederum durch die Abmessungen (Höhe H , Breite B , Länge L) des Probekörpers.

Der Anzeigewert der Laufzeit des Schallimpulses hängt unter anderem von der Handhabung und der optimalen Ankopplung der Prüfköpfe an den Probekörpern ab. Der Anzeigewert bei der Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung hängt von der Genauigkeit des Anschlag- und Messpunktes des Hammers bzw. Schwingungsaufnehmers sowie der Stärke des Anschlags ab (s. auch Kap. 5.2.3). Allein durch den zulässigen Reproduzierbarkeitsbereich der Messwerte ($<1\%$) beider Prüfverfahren ist eine Sicherheit von bis zu $0,8 \mu\text{s}$ bei Laufzeitmessungen und bis zu $7 \mu\text{s}$ bei Eigenschwingzeitmessungen möglich. Diese Sicherheit verursachen eine Änderung des E-Moduls um rund 2% bis 4% und des Schubmoduls um rund 2% bis 3% .

Die Genauigkeit bzw. Vergleichbarkeit des Gewichts der Probekörper hängt zum einen von der verwendeten Waage sowie der Oberflächenfeuchtigkeit bei wassergelagerten Proben ab. Ein Unterschied von $0,5$ bis 2 Gramm ist durchaus möglich.

Die Abweichungen der Abmessungen eines „normal“ gefertigten Probekörpers aus Beton können, aufgrund der Ungenauigkeit der Herstellungformen und der Einfüllhöhe, ein bis zwei Millimeter betragen.

Bei einer unglücklichen Verkettung von geringfügigen Unstimmigkeiten, wie z. B. einer Längenänderung der Abmessungen um 1 mm sowie einer Gewichtsänderung von $0,5$ g der einzelnen Rechenwerte, können beim dynamischen E_{Enl} -Modul Fehler von um $\pm 4\%$ auftreten. Den größten Einfluss haben dabei die Abmessungen: Höhe und Breite. Den geringsten Einfluss hat die Masse des Probekörpers. Dies bedeutet bei den hier ermittelten dynamischen E-Moduln einen Fehler von etwa 1000 N/mm^2 . Ein Runden der Ergebniswerte auf 100 N/mm^2 oder sogar 500 N/mm^2 bietet sich aufgrund der Fehlermöglichkeit der Ergebnisse an.

13 Ergebnisdiskussion

13.1 Frischbetoneigenschaften

Die Ergebnisse der Frischbetonprüfung sind in Tabelle 26 auf Seite 40 zusammengefasst.

Der geforderte Konsistenzbereich KR mit Vorhaltemaß wurde grundsätzlich, bis auf leichte Abweichungen bei einigen Frischbetonen, eingehalten. Die Abb.24 stellt die ermittelten Ausbreitmaße sowie die Ausbreitmaßgrenzen für $a(10)$, die bei 50 und 60 cm liegen sollten, graphisch dar.

Die unterschiedliche zeitliche Änderung der Konsistenz ist in dem Diagramm gut zu erkennen. Die Recyclingbetone steifen wesentlich schneller an.

Diese Entwicklung war, nach den Erkenntnissen von Sommer [46], zu erwarten und zeigt die Abhängigkeit der Verarbeitbarkeit von der Wahl des verwendeten Zuschlags und dessen Wasseraugverhaltens (s. Kap.7.3).

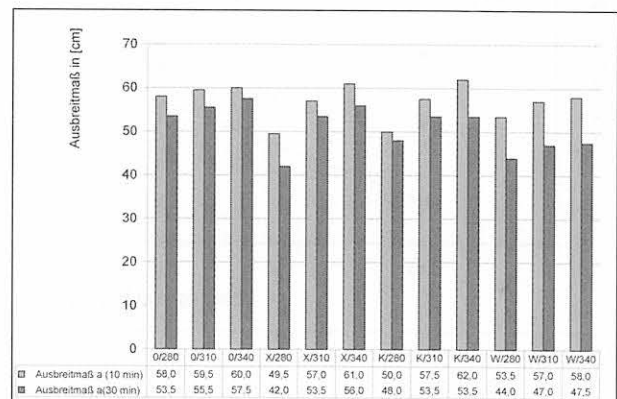


Abb.24: Ausbreitmaß des Frischbetons nach 10 min. bzw. 30 min [31].

Das stärkste Ansteifen nach zwanzigminütiger Ruhephase der Mischung zeigte sich beim W-Beton mit dem wasseraugfähigsten Recyclingzuschlagsmaterial (s. Tabelle 8).

Der Luftgehalt der Frischbetone (s. Tabelle 26) lag zwischen $0,3$ und $1,6$ Vol.-%. Die niedrigsten Werte hatten die Vergleichsbetone und die höchsten Werte der Frischbeton mit W-Zuschlag. Der Luftgehalt der anderen Recyclingfrischbetone aus X- und K-Zuschlag lag um $0,6$ Vol.-%.

Die Mittelwerte der Frischbetonrohdsichten (s. Tabelle 26) lagen je nach Zementgehalt des Vergleichsbetons zwischen $2,38 \text{ kg/dm}^3$ und $2,40 \text{ kg/dm}^3$ und des Recyclingbetons zwischen $2,21 \text{ kg/dm}^3$ und $2,33 \text{ kg/dm}^3$.

13.2 Druckfestigkeit

Die Untersuchungen der Druckfestigkeit wurden an Würfeln mit der Kantenlänge 150 mm durchgeführt (s. Kap.10.5). Abb.25 zeigt die Ergebnisse der Würfel-

druckfestigkeitsprüfungen in Abhängigkeit vom Zementgehalt.

Durch die Verwendung eines Zusatzmittels (Fließmittel) beim Beton mit Recyclingzuschlag und dem unterschiedlichen Wasserausverhalten der Zuschläge, lag die Druckfestigkeit infolge des somit niedrigeren eff. Wasserzementwertes bei den Zementgehalten 280 kg/m³ und 310 kg/m³ deutlich höher als beim Normalbeton ohne Fließmittel. Die Druckfestigkeit des Normalbetons mit einem Zementgehalt von 340 kg/m³ steigt stärker an, als die der Recyclingbetone (s. Abb.25).

Ein Vergleich der Druckfestigkeiten ist nur begrenzt möglich, da die effektiven Wasserzementwerte und die Druckfestigkeit der Zuschläge unterschiedlich waren. Die Druckfestigkeiten der Recyclingbetone lagen bis zu 25 % über denen des Vergleichsbetons.

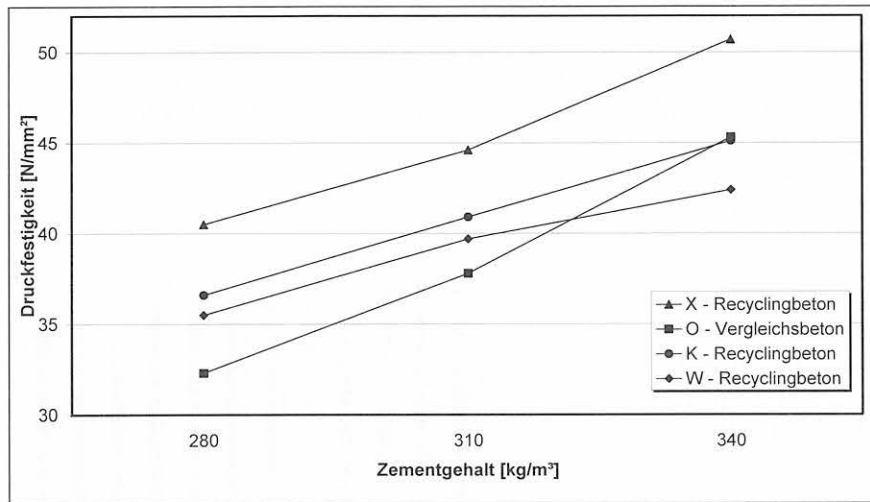


Abb.25: Würfeldruckfestigkeiten.

13.3 Rohdichte

Die Rohdichten der einzelnen Festbetone aus Recyclingzuschlag lagen, bei annähernd gleichen Stoffanteilen, infolge der geringeren Kornrohdsichten (s. Tabelle 7) des Recyclingzuschlags sichtbar unterhalb denen des Vergleichsbetons. Die Reihenfolge sowie die Abstufungen stellten sich im Verhältnis der Kornrohdsichten dar.

Die Rohdichteentwicklung ist bei den unterschiedlichen Lagerungen gegenläufig.

Die Rohdichte der wassergelagerten Probekörper vergrößerte sich durch Feuchtigkeitsaufnahme in den ersten 14 Prüftagen. Danach ist diese Entwicklung weitgehend abgeschlossen. Abb.26 und Abb.27 lassen erkennen, dass der Betrag der Rohdichtenzunahme

offensichtlich nicht vom Zementgehalt und Wasserzementwert, sondern vorwiegend von der Art des Zuschlagsmaterials abhängt, da poröses Zuschlagsmaterial noch zusätzlich Wasser aufnehmen kann. Der Anstieg der Rohdichte ist bei allen Probekörpern ähnlich.

Bei den trockengelagerten Probekörpern verringerte sich die Rohdichte durch Austrocknung. Die Entwicklung geht über den 28. Prüftag hinaus. Der Betrag der Rohdichteverringering wird

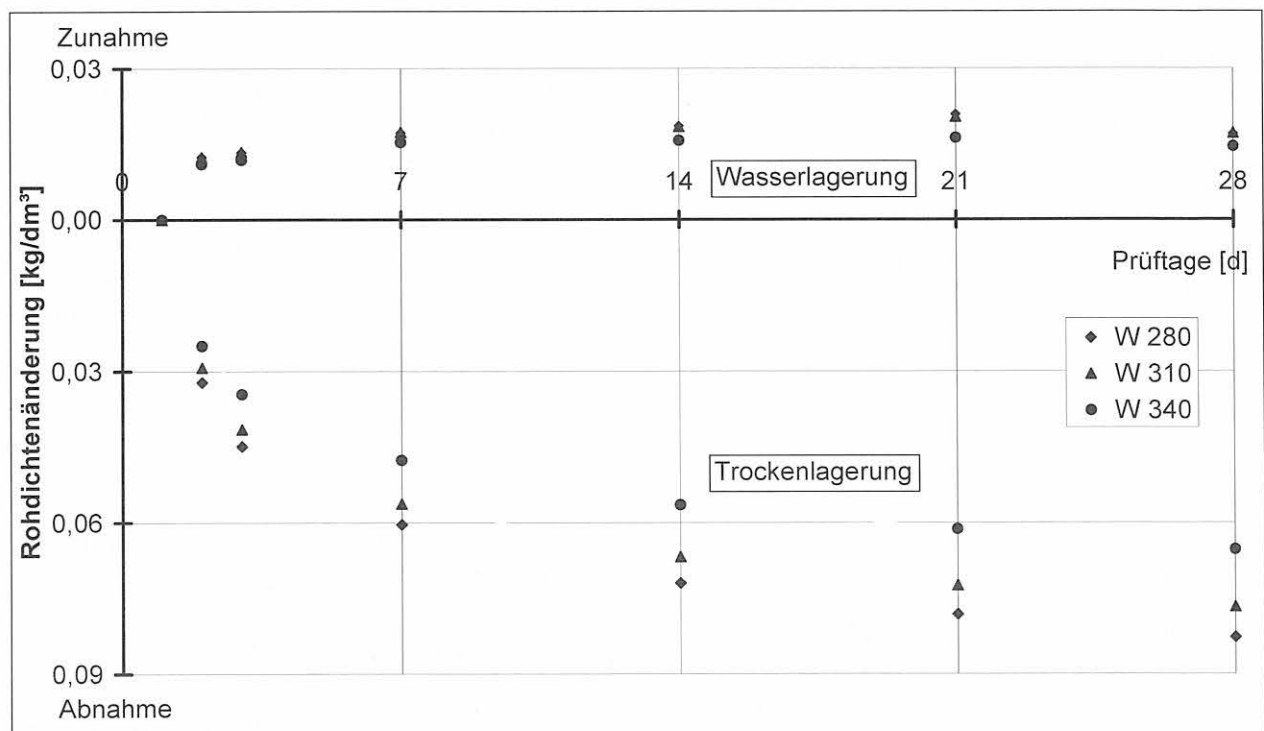


Abb.26: Rohdichtenänderung (Mittelwerte) der Proben des Recyclingbetons mit W-Zuschlag und verschiedenen Zementgehalten.

grundsätzlich von der Wasseraufnahmefähigkeit und dem Zementgehalt bzw. Wassercementwert, also vom Porengehalt der Betone und der Zuschläge, beeinflusst. Abb.27 zeigt die Rohdichtenänderung in den 28 Tagen nach Herstellung der Festbetone mit einem Zementgehalt von 310 kg/m^3 . Die Abnahme der Rohdichte bei Trockenlagerung der Probekörper nimmt tendenziell mit steigender Wassersaugfähigkeit des Zuschlagsmaterials zu, wobei für zwei Recyclingmaterialien die Werte praktisch gleich waren.

13.4 Querdehnungszahl

Bei der Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung wurde mittels des dynamischen E_{En1} -Moduls und des dynamischen Schubmoduls die Querdehnungszahl μ_{dyn} ermittelt (s. Kap.4.5).

Die Mittelwerte der Querdehnungszahlen der einzelnen Messreihen sind in Abb.28 (Wasserlagerung) und Abb.29 (Trockenlagerung) dargestellt.

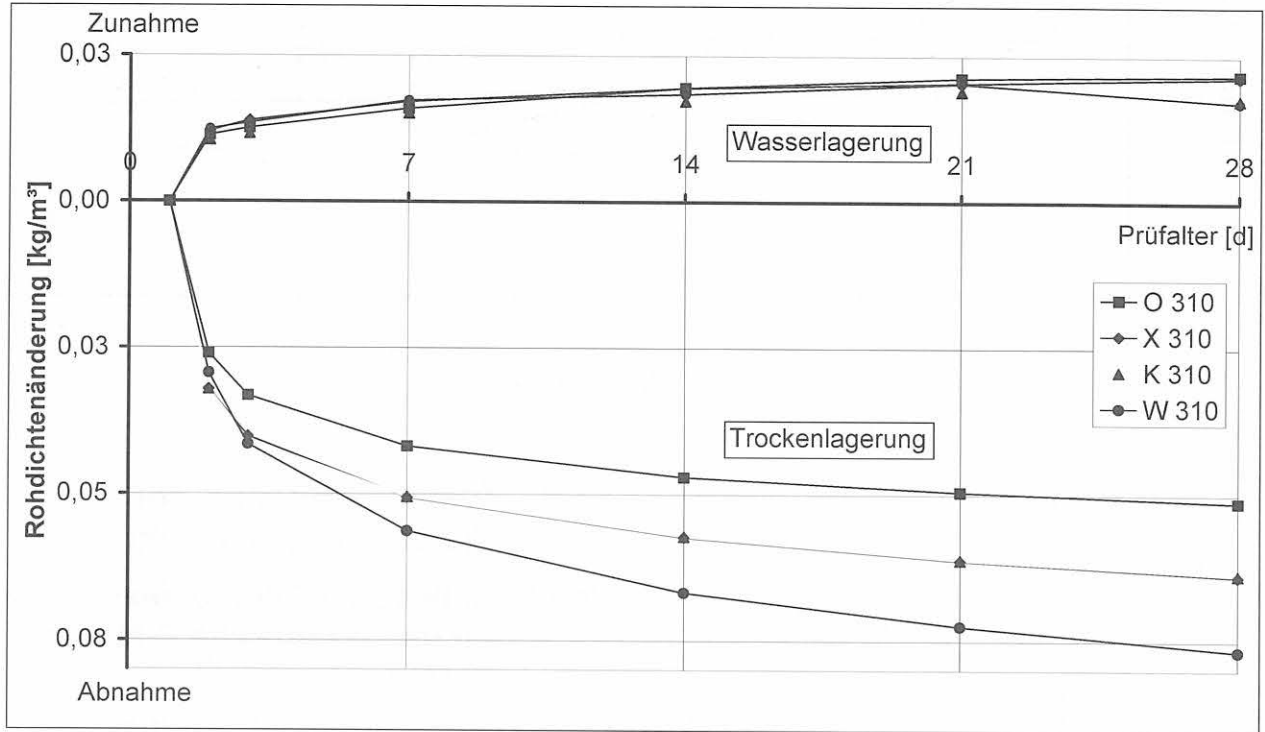


Abb.27: Rohdichtenänderung (Mittelwerte) der Proben mit einem Zementgehalt von 310 kg/m^3 .

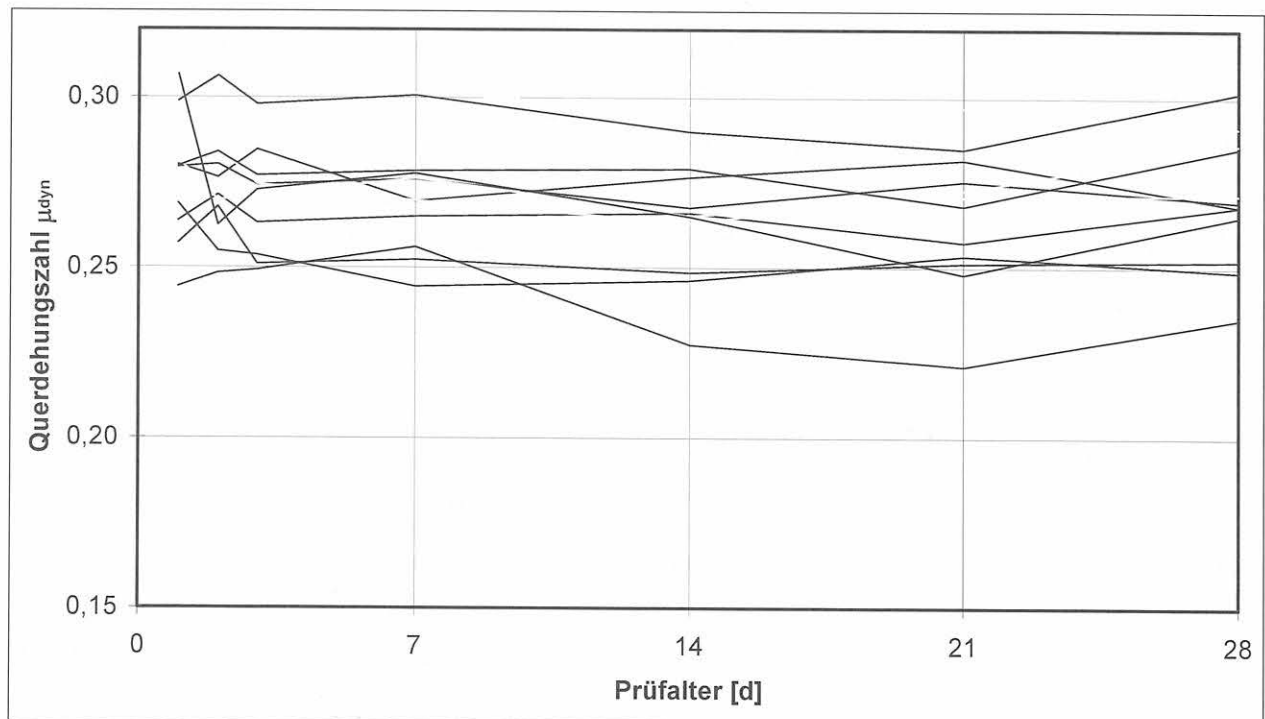


Abb.28: Mittelwerte der zeitlichen Querdehnungszahlentwicklung bei Wasserlagerung.

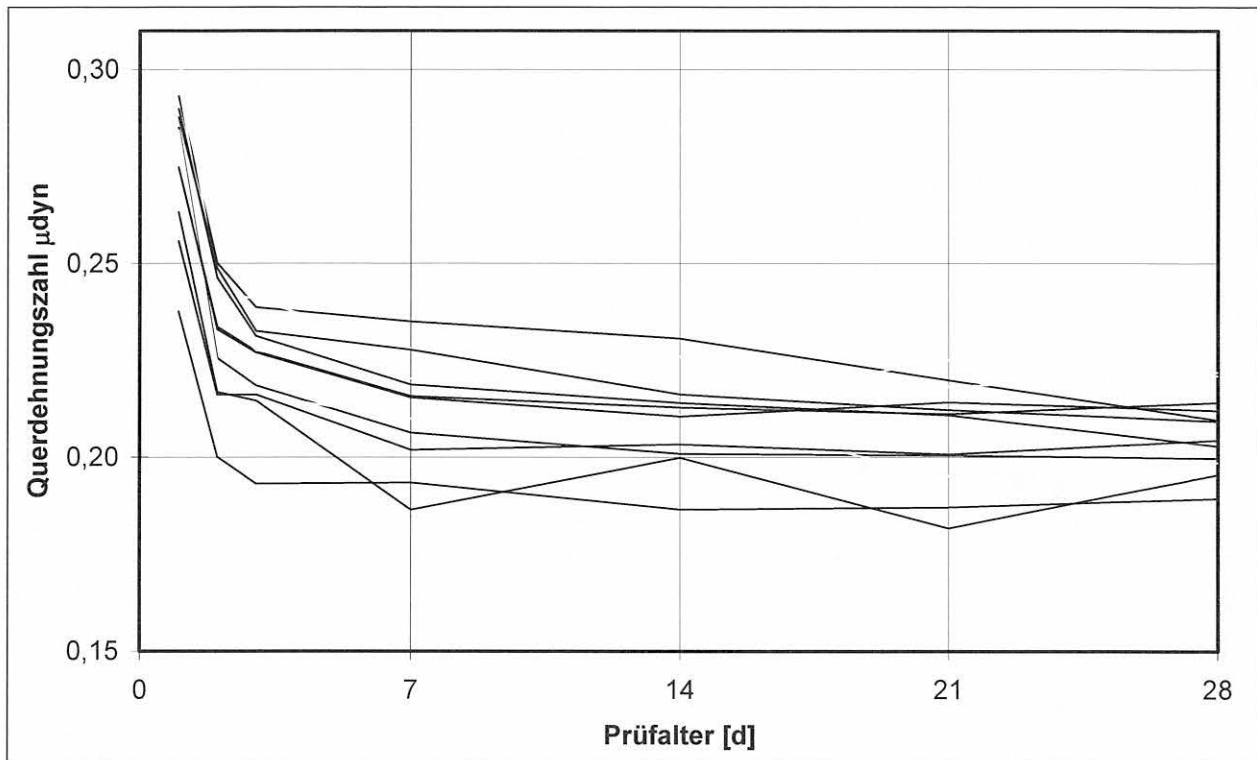


Abb.29: Mittelwerte der zeitlichen Querdehnungszahlentwicklung bei Trockenlagerung.

Es zeigt sich, soweit aufgrund der Streuungen überhaupt eine objektive Betrachtung der einzelnen Mittelwerte der Querdehnungszahlen möglich ist, dass die Querdehnungszahlen der wassergelagerten Proben ab dem ersten Prüftag in etwa auf einem Niveau verharren. Ein Zusammenhang zwischen diesem Niveau und den Eigenschaften des Recyclingmaterials war nicht erkennbar. Die Querdehnungszahlen der trockengelagerten Probekörper sinken zunächst rapide in den ersten drei Prüftagen ab und stagnieren dann weitestgehend ab dem siebenten Prüftag.

Diese Entwicklung der Querdehnungszahl war aufgrund der unterschiedlichen Lagerung und Feuchtigkeitsgehaltentwicklung abzusehen. Denn mit sinkendem Feuchtigkeitsgehalt nimmt auch die Querdehnungszahl eines Probekörpers [43] ab.

Die Mittelwerte der Querdehnungszahlen nehmen zwar etwa 10 % des gesamten Querdehnungsbereichs (0 bis 0,5) ein, liegen aber immer noch gut in dem Bereich, der für Normalbeton mit 0,1 und 0,35 angegeben wird [51].

Die Querdehnungszahl der Normalbeton-Probekörper liegt bei etwa 0,19 (Trockenlagerung) und 0,26 (Wassergelagerung). Die Werte beim Recyclingbeton liegen höher und schwanken zwischen 0,2 und 0,23 (Trockenlagerung) bzw. zwischen 0,25 und 0,30 (Wassergelagerung).

13.5 Zusammenhänge der einzelnen Prüfverfahren

13.5.1 Einfluss der Querdehnungszahl auf die dynamische E-Modulmessung

13.5.1.1 Ultraschallprüfverfahren (US)

Das Diagramm in Abb.30 zeigt die Entwicklung des mit variabler und konstanter ($\mu_{\text{dyn}} = 0,20$) Querdehnungszahl berechneten dynamischen Elastizitätsmoduls für den untersuchten Recyclingbeton. Die variablen (var.) Querdehnungszahlen μ_{dyn} wurden dabei mit Hilfe der Enl-Methode ermittelt.

Festigkeitstheoretisch betrachtet hängt die Querdehnungszahl nur vom Material ab und liegt bei Normalbeton, je nach Zuschlag, zwischen 0,1 und 0,35.

Die E_{US} -Modulentwicklungen mit gleicher konstanter Querdehnungszahl in Abb.30 beschreiben die Auswirkungen unterschiedlicher Feuchtigkeiten von Betonprobekörpern auf den berechneten dynamischen E_{US} -Modul, infolge Rohdichte- und Laufzeitänderung. Die Verläufe der E_{US} -Modulentwicklung von trocken- und wassergelagerten Probekörpern mit konstanter Querdehnungszahl (bzw. konstantem Korrekturfaktor C_f) divergieren in den ersten Tagen. Wassergelagerte Probekörper haben dabei im Vergleich zu den trockengelagerten einen größeren dynamischen E_{US} -Modul. Die Art der Berechnung ist aber im Grundsatz unkorrekt, weil wasser- und trockengelagerte Probekörper unterschiedliche Querdehnungszahlentwicklungen aufweisen (s. Abb.31). Es müssten daher, über den betrach-

teten Entwicklungszeitraum, verschiedene dem Feuchtigkeitsgehalt angepasste Querdehnungszahlen zur Berechnung des E_{US} -Moduls gewählt werden.

dehnungszahlen trockener- oder wassergelagerter Probekörper, kann der eigentliche Abfall des E_{US} -Modulwertes durch Austrocknung kompensiert werden oder

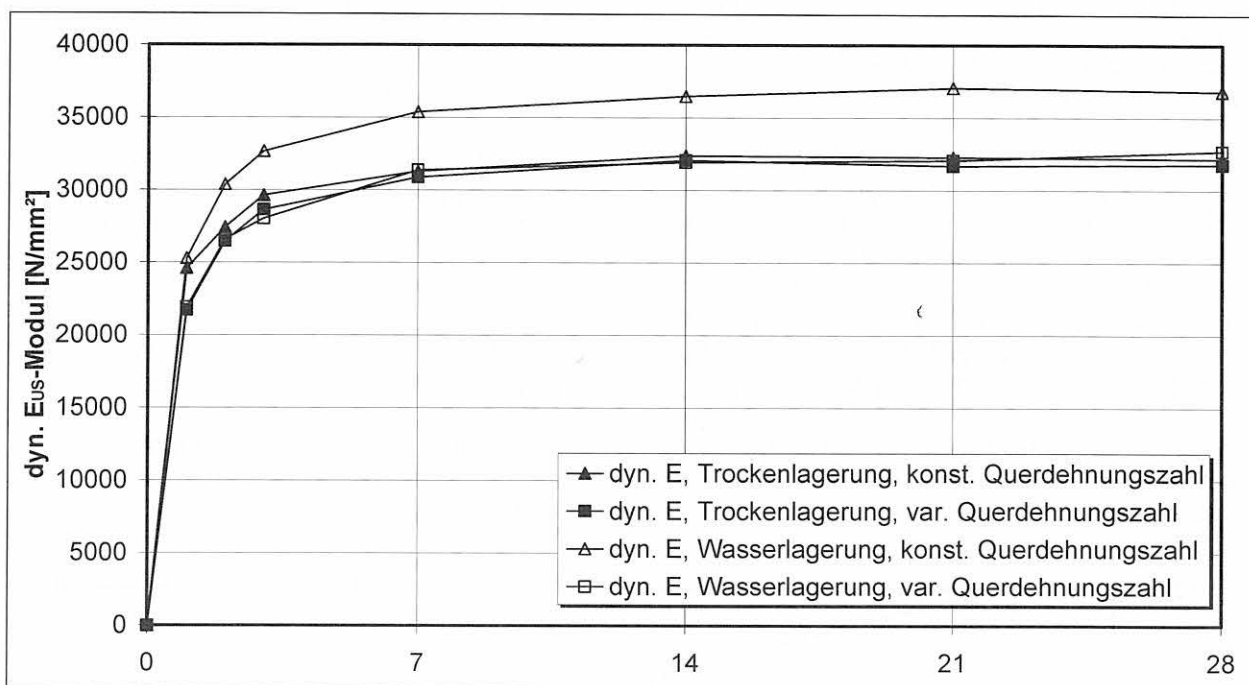


Abb.30: Ultraschallprüfverfahren: Dynamische E-Modulentwicklung von Recyclingbeton mit konstantem bzw. variablem Korrekturfaktor.

Die Querdehnungszahl der wassergelagerten Probekörper liegt bei $\mu_{dyn} \approx 0,25$. Die Querdehnungszahl der trockengelagerten Probekörper fällt aufgrund der Austrocknung auf $\mu_{dyn} \approx 0,17$ ab (s. Abb.31), was aber wiederum eine gleichzeitige Erhöhung und Abminderung einzelner Faktoren in der Berechnungsformel [9] zur Folge hat. Der berechnete dynamische E_{US} -Modulwert wächst einerseits durch den steigenden Korrekturfaktor C_L an und verringert sich andererseits durch eine höhere Laufzeit eines Impuls durch den Probekörper sowie durch die abnehmende Rohdichte. Das bedeutet, abhängig von der Differenz der verwendeten Quer-

sogar überwiegen. Der dadurch resultierende Verlauf der dynamischen E_{US} -Moduln entspricht aber nicht den Vorstellungen, d.h. bei Verwendung einer variablen bzw. einer dem Feuchtigkeitszustand angepassten Querdehnungszahl ergibt sich eine nahezu deckungsgleiche dynamische E_{US} -Modul-Entwicklung der wasser- und trockengelagerten Probekörper.

Die vorstehenden Ausführungen zeigen, dass die Querdehnungszahl einen maßgeblichen Einfluss auf die Höhe und den Verlauf des zu berechnenden dynamischen E_{US} -Moduls hat, der E_{US} -Modul verringert sich

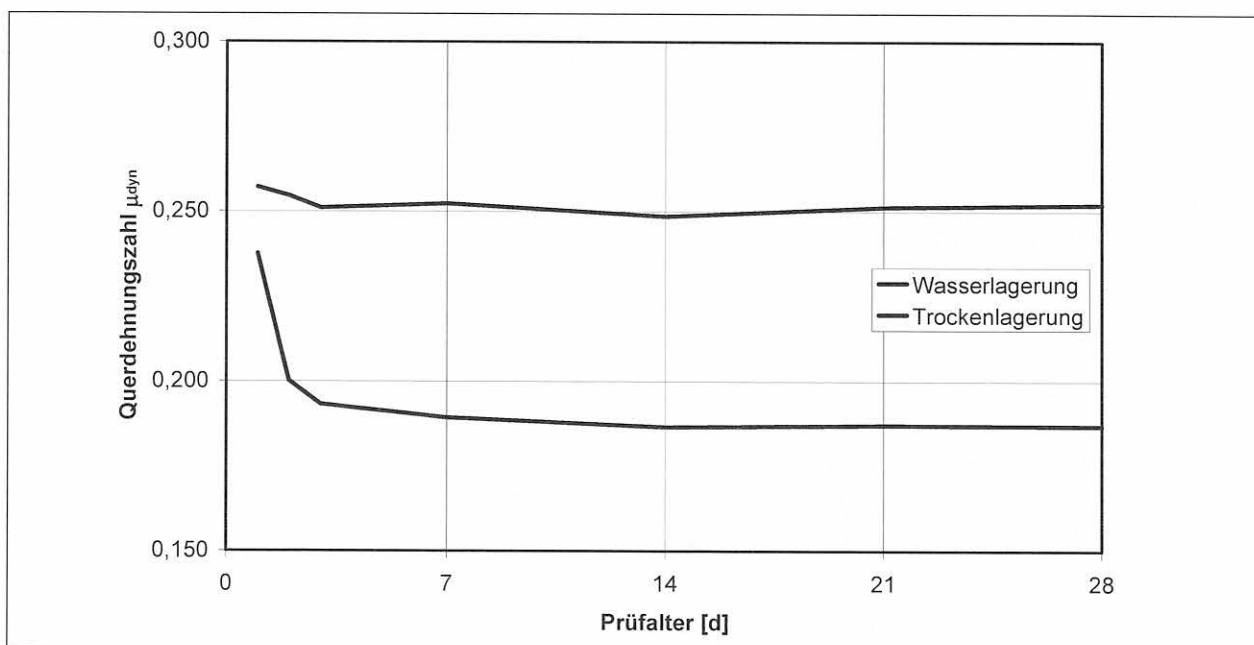


Abb.31: Zeitliche Entwicklung der Querdehnungszahl bei trocken- und wassergelagerten Normalbeton-Probekörpern.

mit steigender Querdehnungszahl. Diese Abhängigkeit veranschaulicht die Kurve in Abb.32 eindrucksvoll. Dem Referenz- E_{US} -Modul wurde eine Querdehnungszahl von $\mu_{dyn} = 0,17$ (normgelagerter Normalbeton nach 28d) zugrunde gelegt. Bei einer Erhöhung der Querdehnungszahl auf $\mu_{dyn} = 0,35$ sinkt der berechnete E_{US} -Modul auf beachtliche 67 % des Referenzwertes.

Fazit: Um mit den bestehenden Ultraschall-Berechnungsmethoden eine korrekte Elastizitätsmodul-Entwicklung aufzuzeigen, sollte die Querdehnungszahl der zu vergleichenden Probekörper konstant (z. B. $\mu_{dyn} = 0,20$) vorgewählt werden, da die Höhe der errechneten dynamischen E_{US} -Moduln von der eingesetzten Querdehnungszahl abhängig ist und unterschiedlich gelagerte Probekörper ungleich bewertet würden.

Die Berechnung mittels aufwendig ermittelter, d.h. dem Feuchtigkeitsgehalt angepasster Querdehnungszahl ist nicht zu empfehlen.

messung eines Schallimpulses bei den trockengelagerten Probekörpern zwischen 2 % und 9 %, im Mittel um ca. 7 % höher liegen. Bei den wassergelagerten Probekörpern sind sie zwischen 8 % und 18 %, im Mittel um etwa 14 % größer.

Die Abb.33, in der die E-Moduln der beiden Prüfverfahren gegeneinander aufgetragen sind, verdeutlicht die zuvor beschriebene Differenz der Messwerte. Weiter wird gezeigt, dass die Ausgleichsgeraden nahezu parallel verlaufen. Der Einfluss der Feuchtigkeit ist bei beiden dynamischen Prüfmethoden weitestgehend gleich. Qualitativ können äquivalente

Ergebnisse erzielt werden, die sich mit Hilfe eines konstanten Wertes ineinander überführen lassen.

Die Messwerte der beiden Prüfverfahren unterscheiden sich von der aus der Literatur [38] zu erwartenden Größe um $\pm 20 \%$.

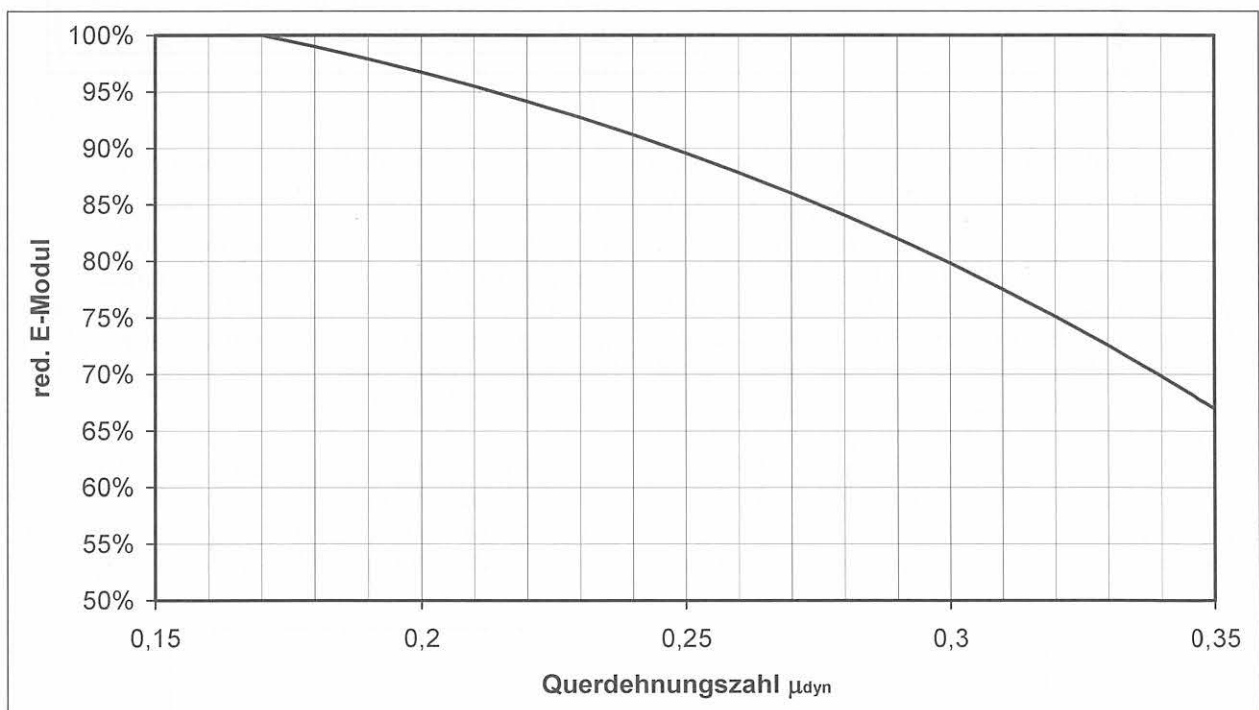


Abb.32: Einfluss der Querdehnungszahl bei der Ermittlung des dynamischen E-Moduls.

13.5.1.2 Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung (EnI)

Bei der EnI-Methode zeigten die Untersuchungen, dass die Abweichungen der Querdehnungszahlen von bis zu $\pm 15 \%$ vernachlässigbar sind. Die Änderung der dynamischen E_{EnI} -Moduln beträgt dabei höchstens 1 %.

13.5.2 Vergleich Ultraschall- (US mit konstanter Querdehnungszahl) zu Eigenschwingzeitmessung (EnI)

Ein Vergleich der beiden hier verwendeten dynamischen Prüfverfahren zeigt, dass die ermittelten E-Moduln der Eigenschwingzeitmessung im Vergleich zur Laufzeit-

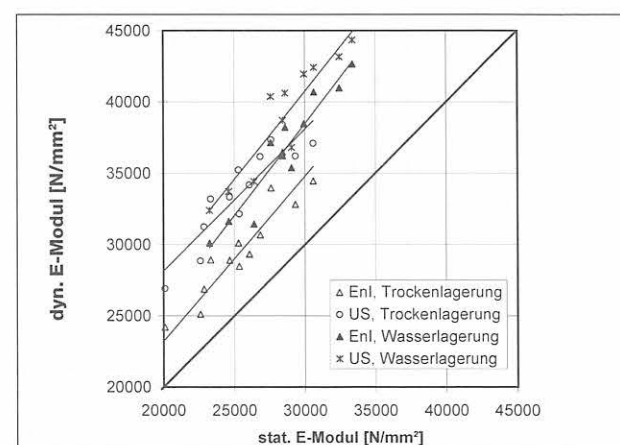


Abb.33: Vergleich der dynamischer E-Moduln der beiden Prüfverfahren (Prüfalter 28d).

13.5.3 Vergleich statische und dynamische E-Modulerggebnisse

Ein Vergleich der E-Modul-Messergebnisse der statischen und dynamischen Prüfverfahren ergibt, dass der dynamische bei Trockenlagerung zwischen 11 % und 24 % (Enl) bzw. 21 % bis 42 % (US) sowie bei Wasserlagerung zwischen 19 % und 35 % (Enl) bzw. 27 % bis 46 % (US) höher liegen, als die statischen E-Moduln. Im Mittel unterscheiden sich die dynamischen (Enl bzw. US) von den statischen E-Moduln um rund 17 % bzw. 33 % bei Trockenlagerung und um rund 28 % bzw. 37 % bei Wasserlagerung. Die von Wesche [51] beschriebene Abweichung der Ergebnisse von nur bis zu 20 % zwischen statischen und dynamischen Prüfverfahren kann nicht bestätigt werden.

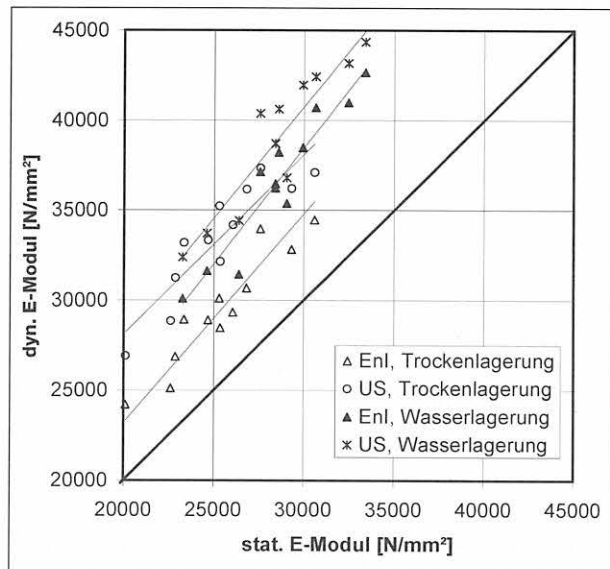


Abb.34: Vergleich statischer und dynamischer Prüfverfahren.

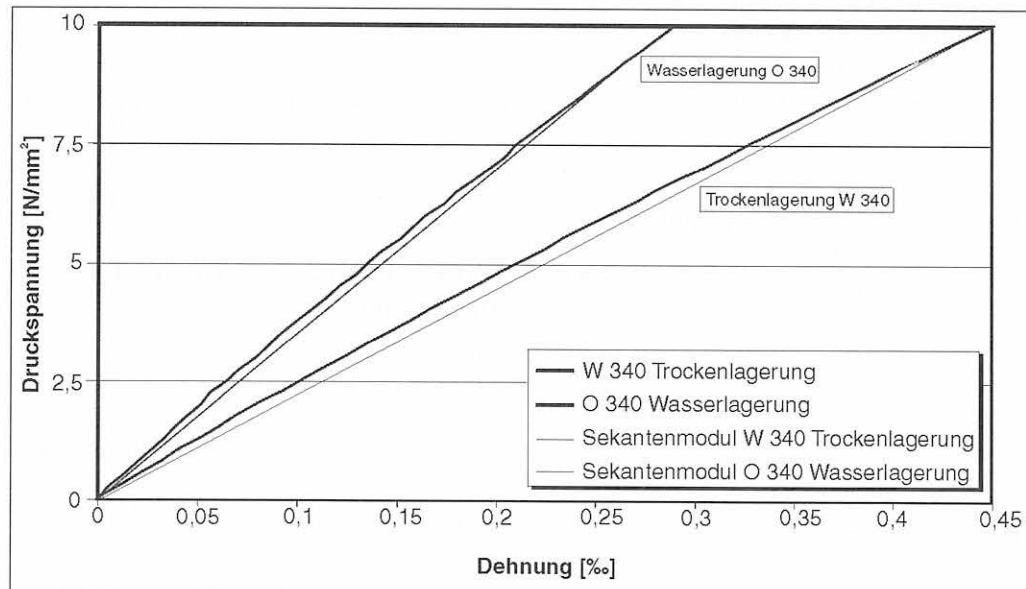


Abb.35: Spannungs-Dehnungslinie und Sekante.

In Abb.34 und statische E-Modul-Messergebnisse einander gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die E-Moduln unterschiedlich stark vom Feuchtigkeitsgehalt der Probekörper beeinflusst werden. Eine Veränderung der Feuchtigkeit geht direkt bei den dynamischen Verfah-

ren in die E-Modul-Berechnung über die Rohdichte mit ein. Beim statischen E-Modul ist dies nicht der Fall. In der Regel unterscheiden sich die E-Moduln untereinander durch einen, mit dem E-Modul ansteigenden Betrag, der von dem Feuchtigkeitsgehalt der Probekörper und dem verwendeten dynamischen Prüfverfahren abhängt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Vergleich der dynamischen und statischen E-Modul-Werte nicht ohne Einschränkungen möglich ist, wobei die Verfahren jedoch einen groben qualitativen Vergleich der Verläufe untereinander zulassen.

13.6 Statischer E-Modul

Die hier verwendete Prüfmethode zur Ermittlung des statischen E-Moduls der Probekörper wich von dem in der Norm beschriebenen Verfahren ab (s. Kap. 5.3). Abb.35 zeigt, dass der Verlauf der Spannungs-Dehnungslinie des Probekörpers bei der verwendeten Prüfmethode bis zu einer Druckspannung von etwa 1/3 der Druckfestigkeit nahezu linear ist. Aus diesem Grund kann man also ohne weiteres auf eine mehrmalige Vorbelastung der Prüfkörper verzichten.

13.7 Dynamische E-Modulermittlung mit konstanter und berechneter Querdehnungszahl bei den Eigenschwingzeitmessungen

Das folgende Diagramm in Abb.36 zeigt die zeitliche Entwicklung der dynamischen Elastizitätsmoduln eines

trockengelagerten, sowie eines wassergelagerten Probekörpers (O340) mit konstantem bzw. interaktiv ermittelten μ_{dyn} .

Bei der dynamischen E-Modulentwicklung der trocken- gelagerten Probekörper ist kein wesentlicher Einfluss

durch die unterschiedlichen Querdehnungszahlen μ_{dyn} zu erkennen, dadurch dass die Querdehnungszahl in den ersten Tagen in etwa auf die konstant abgeschätzte Querdehnungszahl abfällt (s. Kap.13.4).

wickelt sich ähnlich wie der dynamische E-Modul; er ist deshalb als Ergänzung auch erläutert und unterstützt die Aussagen der dynamischen Elastizitätsmoduln.

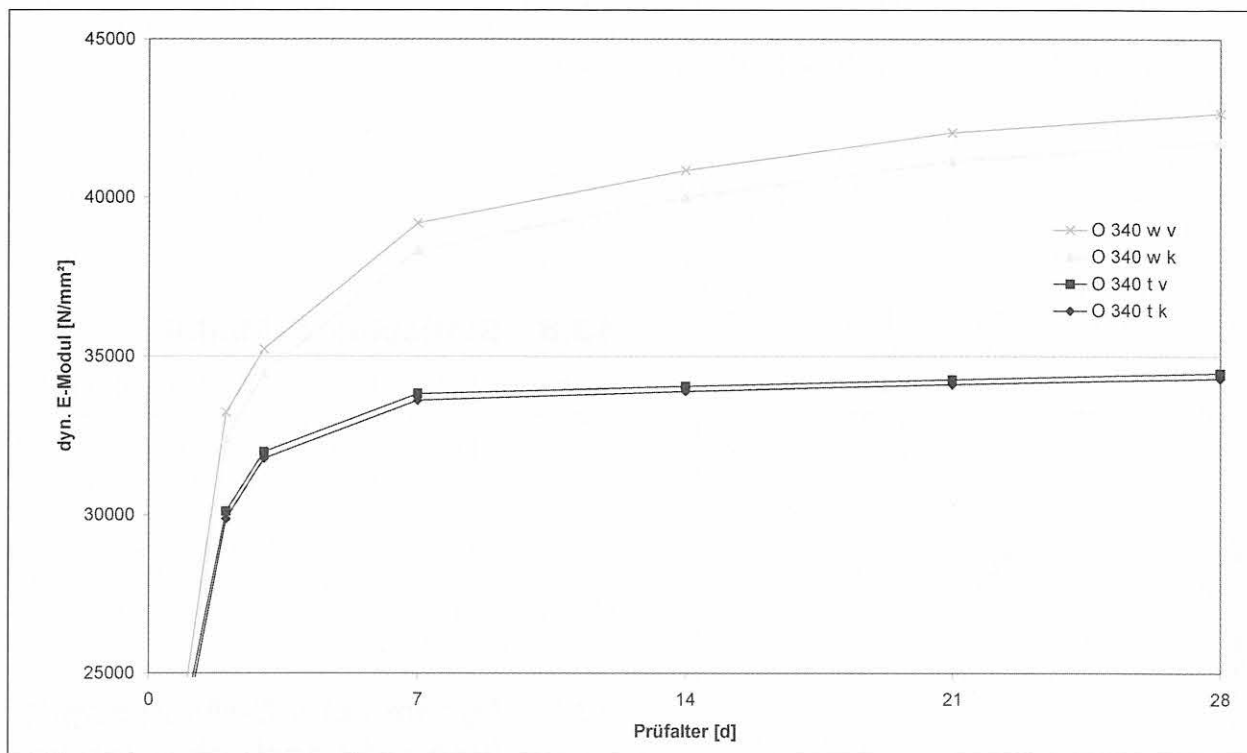


Abb.36: Dynamische E-Modulentwicklung berechnet mit konstanten und ermittelten Querdehnungszahlen μ_{dyn} .¹⁾

1) w ... Wasserlagerung k ... konstante Querdehnungszahl
 t ... Trockenlagerung v ... variable Querdehnungszahl

Die dynamischen E-Moduln der wassergelagerten Probekörper mit ermittelter Querdehnungszahl sind um einen gewissen Faktor größer als die mit konstantem μ_{dyn} . Denn die ermittelten Querdehnungszahlen der wassergelagerten Probekörper (s. Kap.13.4) sind erheblich größer als die konstante Querdehnungszahl mit $\mu_{dyn} = 0,17$.

Dies verdeutlicht, dass eine zusätzliche Ermittlung der Querdehnungszahl für einen korrekten Elastizitätsmodulverlauf nicht zwingend nötig ist, wenn eine lagerungsbedingte Abschätzung der konstanten Querdehnungszahl erfolgt.

Abweichungen der Querdehnungszahlen von bis zu 15 % sind vernachlässigbar. Die Änderung der dynamischen E-Moduln liegt dabei unter 1 %.

13.8 Elastizitätsmodul

13.8.1 Allgemein

Der Elastizitätsmodul ist für die Beurteilung des Verformungsverhaltens und der Festigkeitsentwicklung der Probekörper die wichtigste elastische Kenngröße [50]. Die Ergebnisdiskussion widmet sich vorwiegend der Entwicklung des dynamischen E-Moduls im jungen Alter bis 28 Tage. Der dynamische Schubmodul ent-

Zur Erläuterung der Ergebnisse der dynamischen Prüfverfahren ist zu sagen, dass der dynamische E-Modul mit Hilfe der Schwingungstheorie das elastische Verhalten der Probekörper zum Ausdruck bringt.

Die dynamischen Elastizitätsmodul-Prüfverfahren ermöglichen es, zu verschiedenen Zeitpunkten den Reifezustand verschieden gelagerter bzw. unterschiedlich stofflich zusammengesetzter Probekörper darzustellen.

13.8.2 Dynamische E-Modulentwicklung

Die dynamischen Elastizitätsmoduln (E_{dyn}) wurden an den vorgegebenen Prüftagen mit den zuvor beschriebenen Beziehungen berechnet (s. Kap. 11). Die Mittelwerte der E-Moduln der dynamischen Prüfverfahren pro Prüftag sind in Tabelle 12 bis Tabelle 23 (s. Seite 36ff) abhängig von der Rezeptur aufgeführt.

Die Entwicklung des dynamischen E-Moduls sowie die Streuung der Einzelmesswerte bei der Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung wird exemplarisch durch die Proben W 310 in Abb.37 dargestellt.

Die Streuung der Einzelmesswerte war gering. Die Standardabweichung der Messwerte lag zwischen 200 N/mm² und 1500 N/mm².

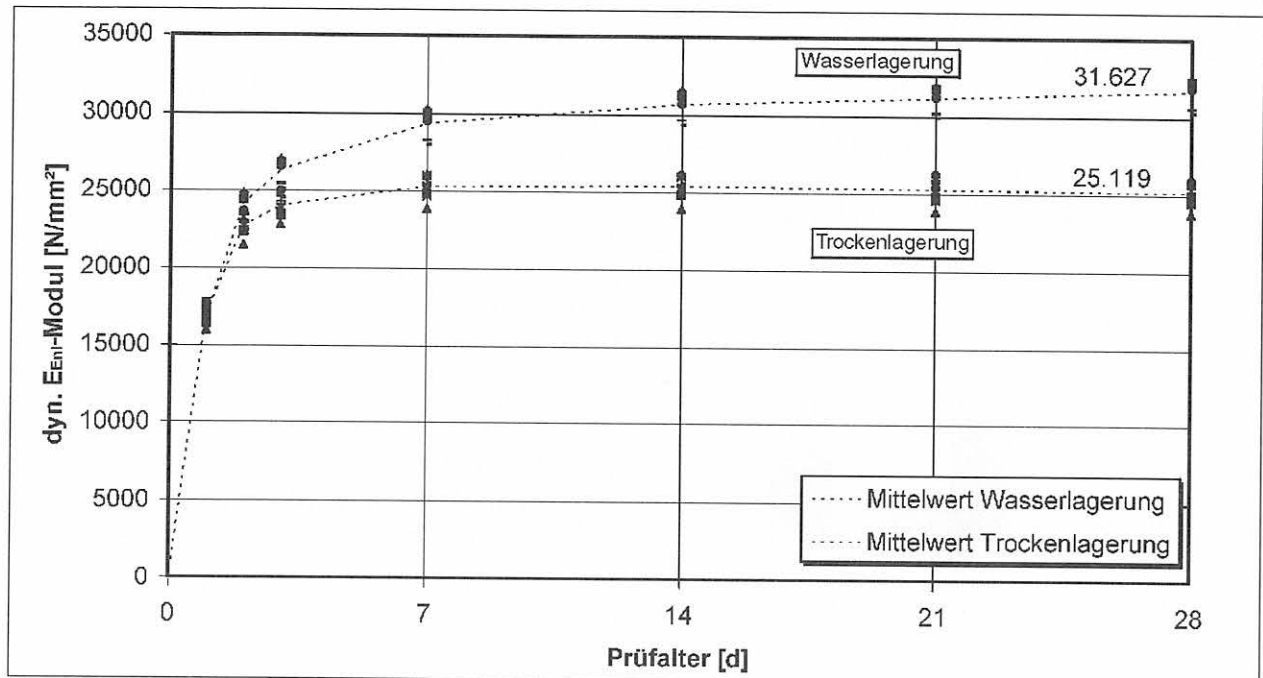


Abb.37: Entwicklung des dynamischen E-Moduls der Probekörper W 310 bei der Eigenschwingzeitmessung.

Der Anstieg des dynamischen E-Moduls der trocken-gelagerten Probekörper ist weitestgehend zwischen dem dritten und siebenten Prüftag abgeschlossen. Im Vergleich dazu verläuft die Entwicklung der wassergelagerten Probekörper steiler und steigt zum Teil noch nach dem 21. Prüftag an.

Der starke Anstieg des dynamischen E-Moduls der unter Wasser gelagerten Probekörper begründet sich durch die mit Wasser gefüllten Poren. Diese Poren sind nahezu inkompressibel, also gesättigt. Der Probekörper gewinnt dadurch an Steifigkeit. Die Frequenz der jeweiligen Schwingungen steigt und als Folge auch der berechnete dynamische Elastizitätsmodul bei der Eigenschwingzeitmessung.

Bei der Ultraschallmessung können die Schallwellen besser und schneller durch den wassergesättigten Probekörper gelangen. Der dynamische E-Modul steigt ebenfalls an (s. Kap.6.2).

In Kap.12.1.1.3 sind die gerundeten Ergebnisse (auf 100 N/mm²) des 28. Prüftages zusammengefasst. Eine genauere Angabe der Werte ist aufgrund der Störeinflüsse und der damit verbundenen Schwankungen bei den Messergebnissen nicht sinnvoll.

Die in der Tabelle 24 (Seite 39) aufgeführten und nach dem Zementgehalt sortierten Elastizitätsmodul zeigen, dass die Werte mit zunehmendem Zementgehalt infolge des sinkenden Wasserzementwertes eine leicht steigende Tendenz aufweisen. Die davon abweichenden Werte können durch die oben erwähnten Messungenauigkeiten und die geringen Unterschiede der E-Moduln erklärt werden.

Vergleicht man die ermittelten statischen E-Moduln mit den Rechenwerten in DIN 1045, so ist zu erkennen,

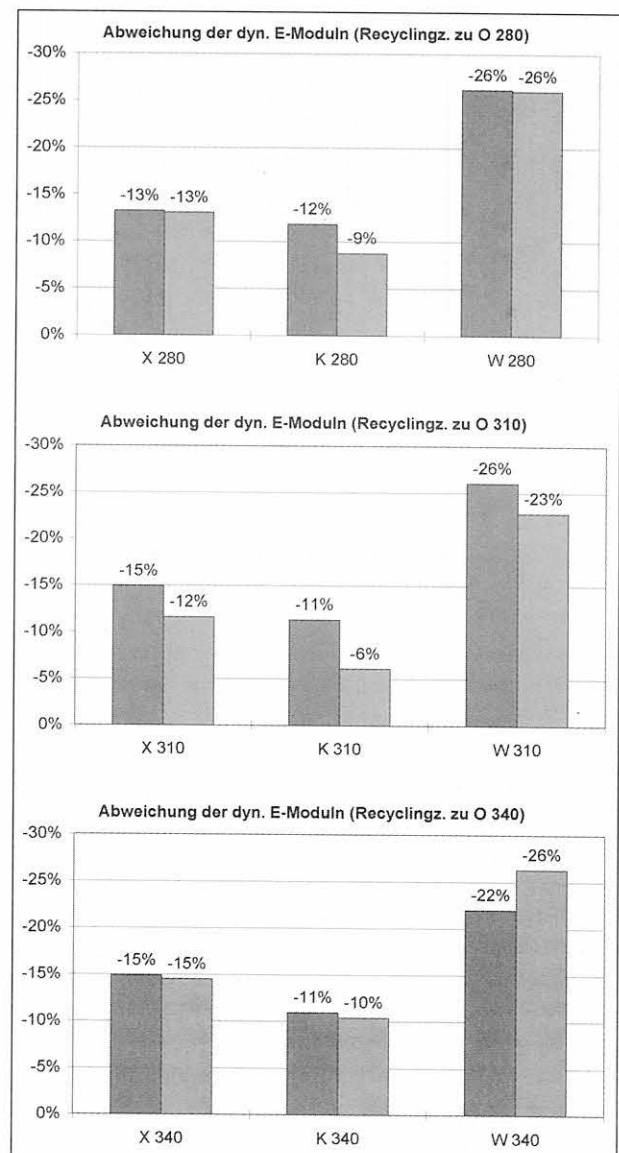


Abb.38: Abweichung der dynamischen E-Modul des Recyclingbetons zum Referenzbeton.

das die statischen E-Moduln der wassergelagerten Vergleichsbetone O280 und O310 einer Festigkeitsklasse B25 und der Probekörper O340 sogar einer Festigkeitsklasse B35 entsprechen. Die Recyclingbetone hingegen sind nach den statischen E-Moduln, bei zwar höherer gemessener Druckfestigkeit, vergleichbar mit Betonen der Festigkeitsklasse B15 oder B10.

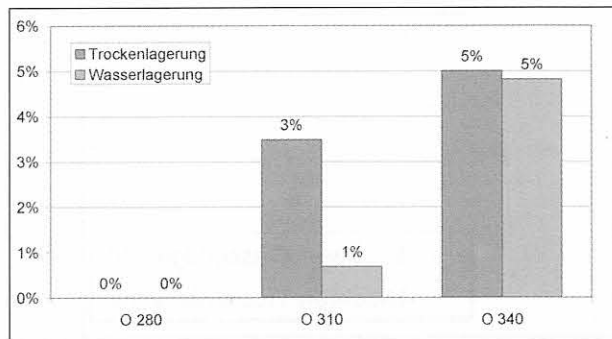


Abb.39: Unterschiedliches Verhalten der dynamischen Elastizitätsmoduln der Referenzbetone untereinander.

Die trocken- und wassergelagerten Probekörper weisen in den Abweichungen keine großen Unterschiede zum Vergleichsbeton auf. Die bei einem Zementgehalt von 310 kg/m³ dennoch auftretenden Differenzen entstehen in erster Linie durch das abweichende Verhalten des Referenzbetons O 310 (s. Abb.39).

Abb.40 verdeutlicht noch einmal auf andere Weise die zuvor erwähnten Abweichungen des dynamischen Elastizitätsmoduls von Recyclingbeton zum Referenzbeton. In dieser Abbildung sind die dynamischen E-Moduln des Normal- und Recyclingbetons mit gleichem Zementgehalt gegeneinander aufgetragen. Das Diagramm zeigt zudem, dass die Wahl der Nachbehandlung (Wasserlagerung (W)) scheinbar keinen Einfluss auf das Verhältnis der Elastizitätsmodul-Differenzen innerhalb der Recyclingbetone zum Vergleichsbeton hat. Die Wasserlagerung verursacht lediglich eine qualitativ gleichmäßige Elastizitätsmodul-Erhöhung aller Probekörper.

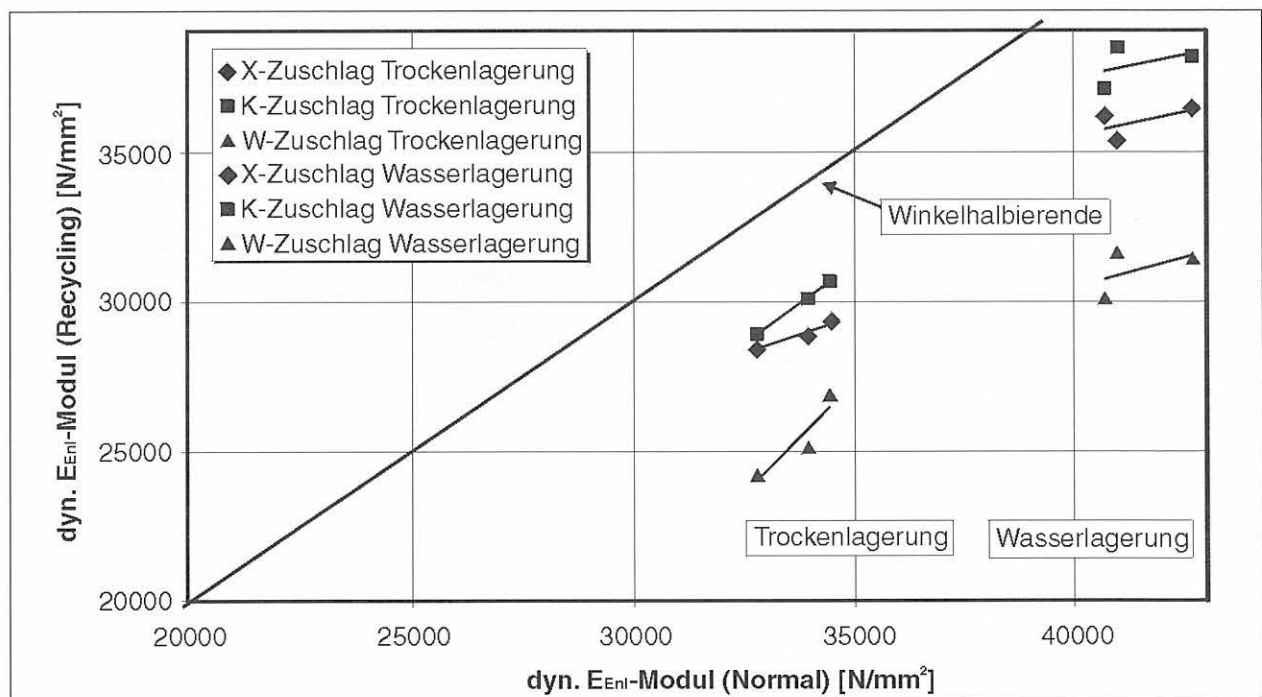


Abb.40: Vergleich der dynamischen E-Moduln (Prüfalter 28d).

Die Untersuchungen ergaben einen Abfall des Elastizitätsmoduls von Recyclingbeton bezogen auf den des Vergleichsbetons infolge höherer Gesamtmatrixanteile der Recyclingbetone. Dieses stimmt mit den Angaben der hier berücksichtigten Verfasser (s. Kap. 7.4.3) überein. Abb.38 zeigt die Abweichungen der dynamischen E-Moduln vom Recyclingbeton zum Vergleichsbeton der eigenen Versuche, die abhängig von den Zementgehalten dargestellt sind. Der dynamische E-Modul vom Recyclingbeton liegt je nach Zuschlagsmaterial ca. 6 % bis 26 % unter dem des Vergleichsbetons. Die Reihenfolge der Abweichungen entspricht den Erwartungen. Der Recyclingbeton mit dem porösesten Material und mit den geringsten Kornrohdichten weist die größte Abweichung auf.

13.8.3 Einfluss der Zuschlagsmaterialien

Abb.41 zeigt die dynamischen Elastizitätsmodulentwicklungen der Probekörper mit unterschiedlichem Zuschlag, aber gleichem Zementgehalt als Funktion des Prüfalters.

Die Stoffraumanteile der verwendenden Zuschläge waren ähnlich.

Die E-Moduln verhalten sich im Verhältnis so wie die Kornrohdichte und die Porosität der verwandten Zuschläge, d.h. bei zunehmender Kornrohdichte und sinkender Wasseraufnahmefähigkeit erhöht sich der dynamische E-Modul.

Dieses Verhalten des Elastizitätsmoduls war nach den Ausführungen des Kap. 5 aufgrund des wesentlichen Einflusses des Zuschlags zu erwarten.

zuschlag (W-Material) erzielt werden kann. Die Abbildungen (Abb.42ff.) bestätigen die Erkenntnisse von Iványi [22].

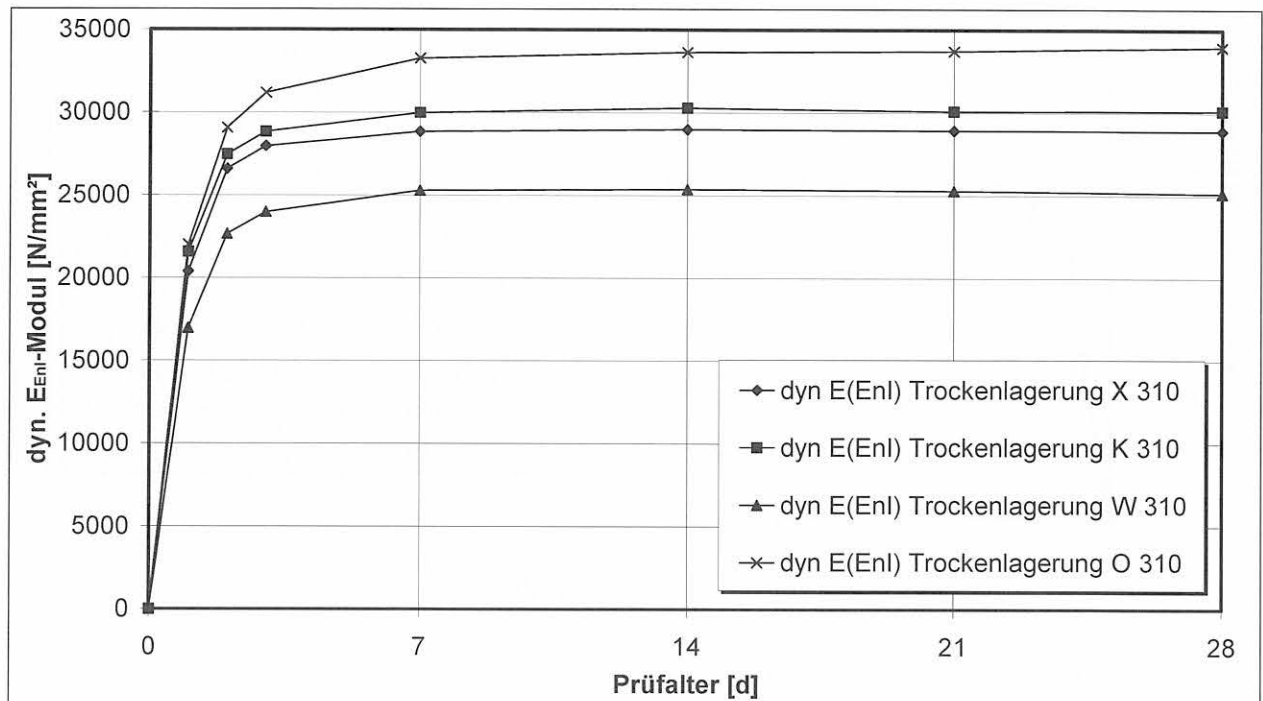


Abb.41: Dynamische E-Modulentwicklung aller Mittelwerte der Proben mit einem Zementgehalt 310 kg/m³ (Trockenlagerung).

13.8.4 Einfluss des Zementgehaltes

Abb.42ff. stellen den zeitlichen Verlauf der dynamischen E-Moduln von Beton aus einer Zuschlagsart und unterschiedlichen Zementgehalten dar. Der Zementgehalt beeinflusst das Verhalten des E-Moduls nur unwesentlich, wobei die Steigerung des E-Moduls noch am ehesten durch eine Zementgehalterhöhung beim Beton mit dem porösesten bzw. wassersaugendsten Recycling-

13.8.5 Einfluss der Festbetonrohichte auf den dynamischen E-Modul

Die Rohdichte des Recyclingbetons liegt infolge der niedrigeren Kornrohichte des Zuschlagsmaterials und der größeren Porosität in der Regel unter der des Normalbetons.

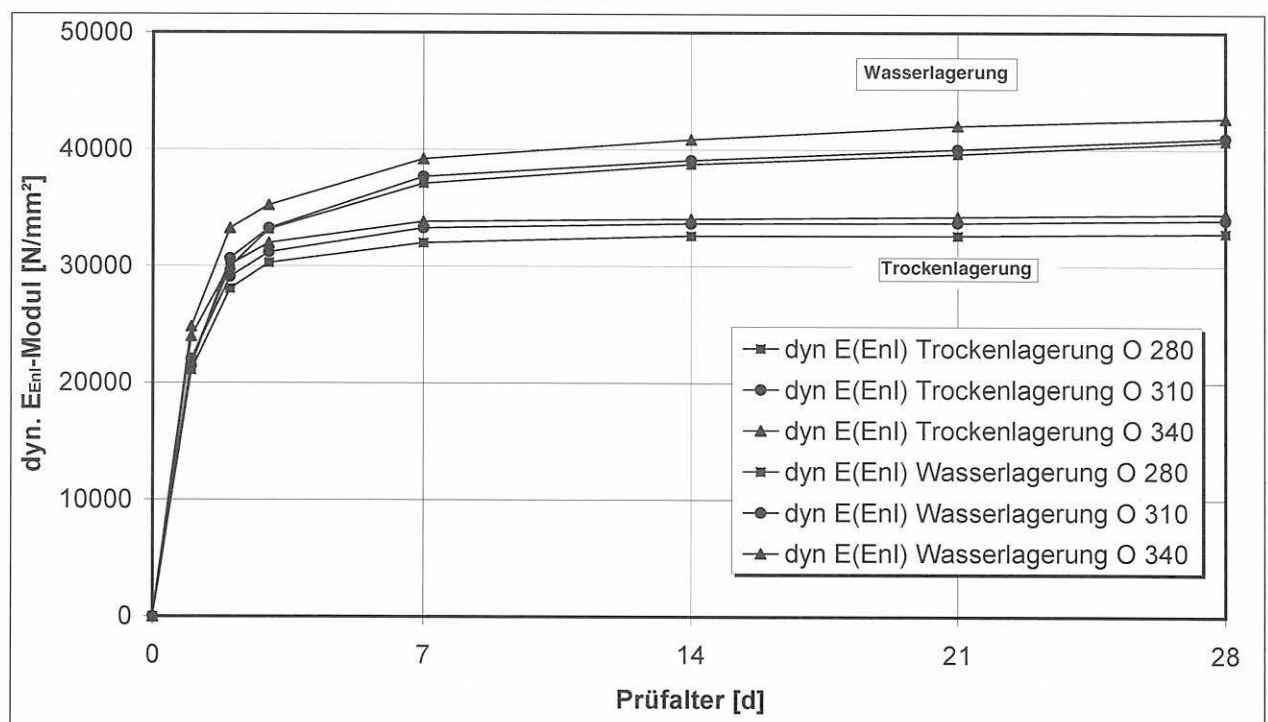


Abb.42: Dynamische E-Modulentwicklung der O-Probekörper mit unterschiedlichen Zementgehalten.

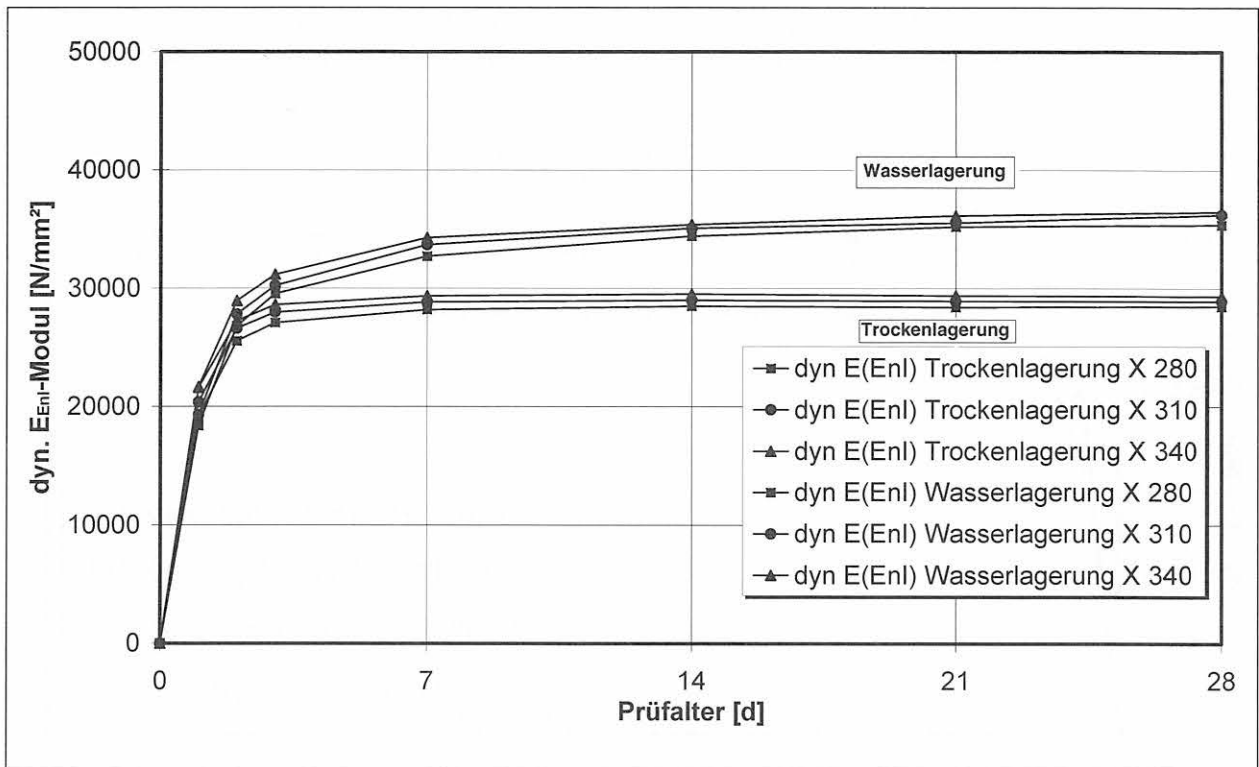


Abb.43: Dynamische E-Modulentwicklung der X-Probekörper mit unterschiedlichen Zementgehalten.

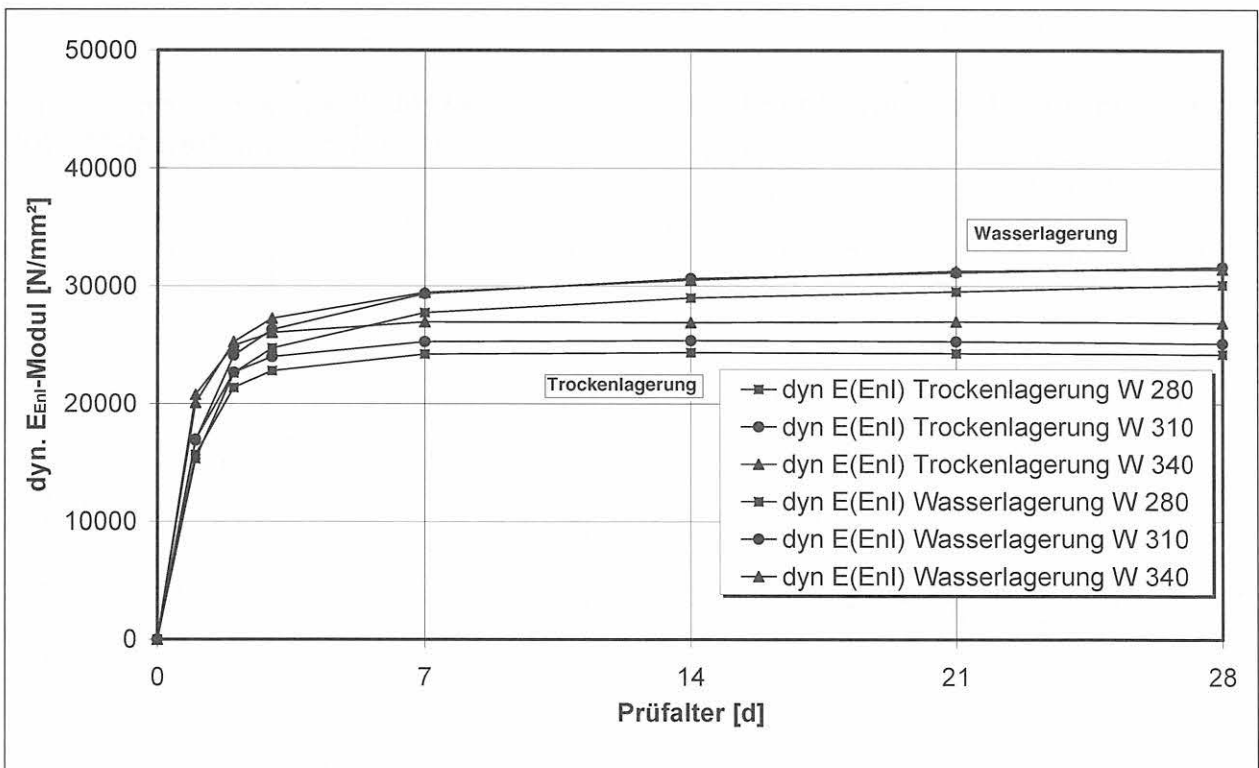


Abb.44: Dynamische E-Modulentwicklung der W-Probekörper mit unterschiedlichen Zementgehalten.

Die Rohdichte des Festbetons hängt bei gleichem Zementgehalt und gleichen Stoffraumanteilen von der Kornrohddichte und der Porosität bzw. Wasseraufnahmefähigkeit des Zuschlagsmaterials sowie der Betonachbehandlung ab. Bei der Betrachtung von dynamischen E-Moduln und Betonrohddichten im Rahmen dieser Untersuchungen wird deutlich, dass der dynamische E-Modul bei sinkender Rohdichte ebenfalls kleiner wird.

Wie aus Abb.46 deutlich wird, zeigt sich für den abgebildeten Bereich für die über der Festbetonrohddichte aufgetragenen dynamischen E-Moduln ein linearer Zusammenhang. Dieses gibt einem die Möglichkeit, durch die Festbetonrohddichte den E-Modul abzuschätzen. Zusätzliche Ergebniswerte trockengelagerter Probekörper früherer Untersuchungen der Bundesanstalt [56] fügen sich optimal ein und bestätigen den Trend.

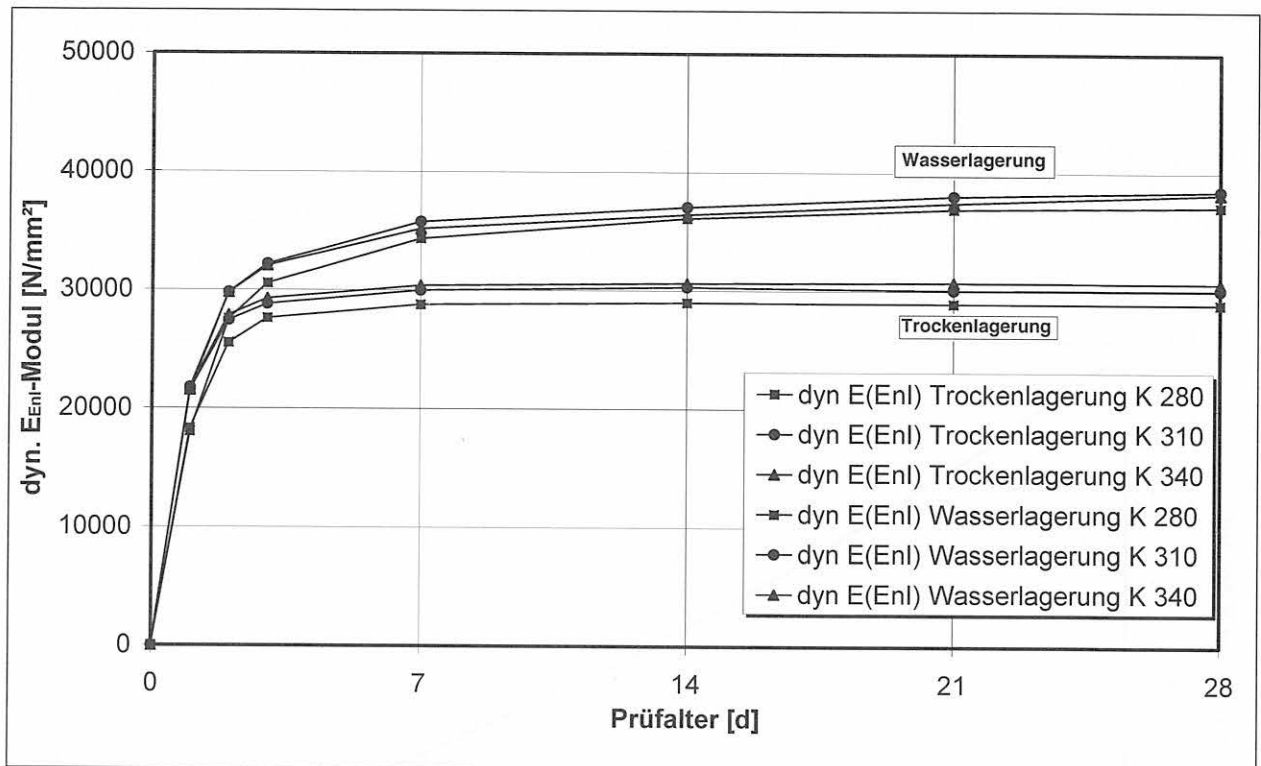


Abb.45: Dynamische E-Modulentwicklung der K-Probekörper mit unterschiedlichen Zementgehalten.

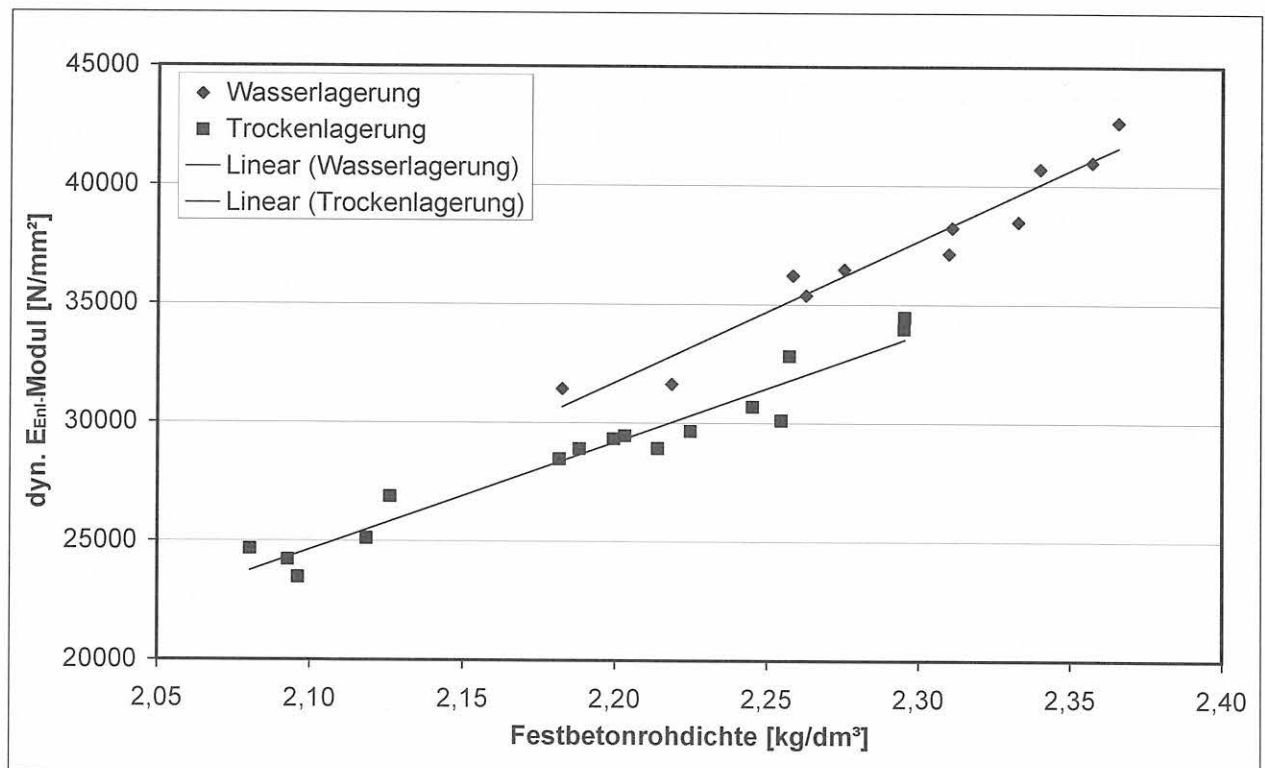


Abb.46: Der dynamische E-Modul bei unterschiedlicher Rohdichte und Nachbehandlung.

Die Untersuchungen ergaben, dass sich bei einer Abminderung der Betonrohichte um $0,10 \text{ kg/dm}^3$, in einem Rohdichtenbereich von $2,0 \text{ kg/dm}^3$ bis $2,4 \text{ kg/dm}^3$, der dynamische Elastizitätsmodul bei Trocken- und Wasserlagerung um rund 16 % und 19 % verringert.

Aufgrund der Tatsache, dass die Stoffraumanteile der einzelnen Betonmischungen ähnlich waren, hängt die Änderung der Betonrohichte hier von der Kornrohdi-

chte und der Wasseraufnahme- bzw. Wasserabgabefähigkeit der Zuschlagsmaterialien ab.

13.8.6 Abschätzung der E-Modulabminderung bei Betonen aus Recyclingmaterial

Aufgrund der durch die Untersuchung gewonnenen Erkenntnisse ergibt sich die Möglichkeit, für die hier ver-

wendeten Zuschläge aus Recyclingmaterial unterschiedlicher Herkunft und Qualität die Änderung des E-Moduls der Betone abzuschätzen.

Maßgeblich waren hierbei die charakteristischen Größen: Kornrohichte und das Wasseraugverhalten des Recyclingzuschlages. Die auf eine Referenzkornrohichte von $\rho_{R,K} = 2,60 \text{ kg/dm}^3$ des Vergleichsbetons bezogen wurden.

gramm basieren auf den stark den E-Modul beeinflussenden Unterschiede der charakteristischen Größen des Zuschlages aus Recyclingmaterial und den dadurch resultierenden Rohdichtenunterschieden des Recyclingfestbetons zum Normalbeton.

Der Einfluss unterschiedlicher Recyclingzuschlaggehalte bezogen auf den Gesamtzuschlag war nicht Inhalt dieser Untersuchungen. Für eine umfassende

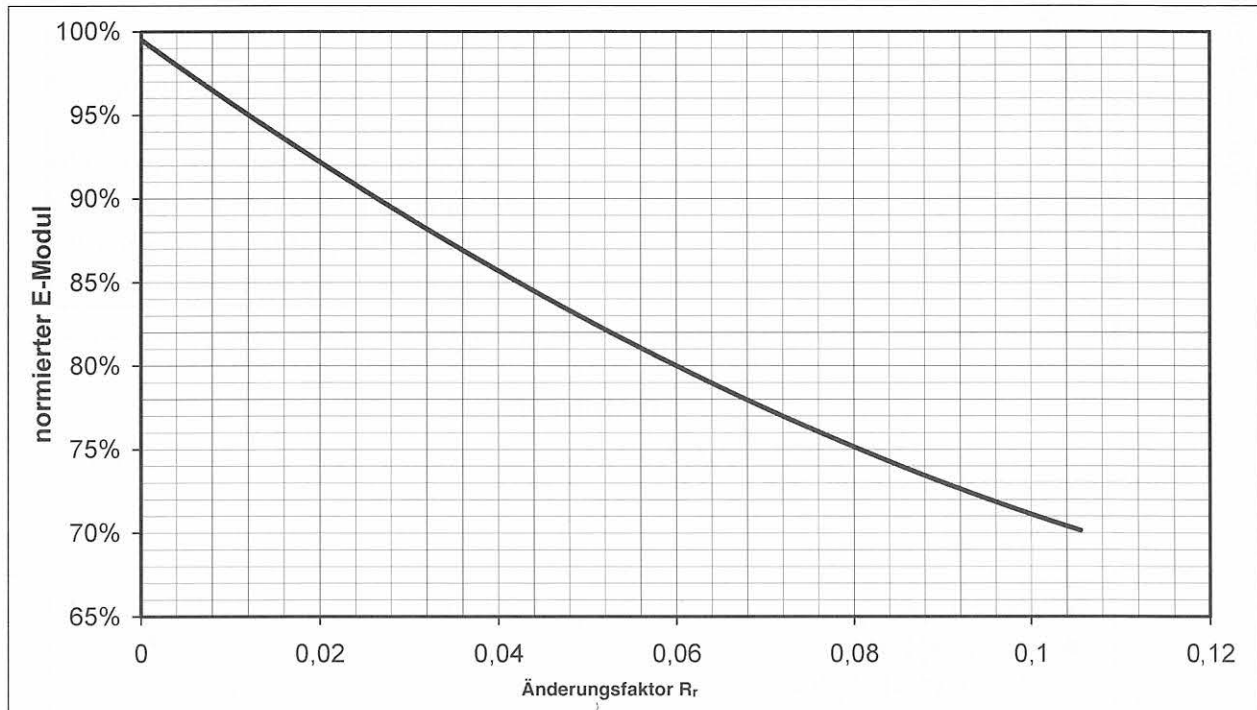


Abb.47: Hilfsdiagramm zur Bestimmung der E-Modulabminderung durch die Zugabe von Recyclingmaterial.

Die Unterschiede der charakteristischen Größen und die Rohdichtenunterschiede der geprüften Recycling-Probekörper wiesen, bezogen auf den Vergleichsbeton, verhältnismäßig ähnliche Werte auf. Dieser Zusammenhang kann durch den folgenden Änderungsfaktor dargestellt werden:

$$R_r = \frac{W_{a_{24h}}}{16} \left(\left(\frac{2,6 \text{ kg/dm}^3}{\sum V_g \cdot \rho_{R,K}} \right) - 1 \right)$$

- mit: R_r ... Änderungsfaktor mit dem im Diagramm der prozentuale Anteil des E-Moduls vom Vergleichsbeton abgeschätzt werden kann,
- $W_{a_{24h}}$... Wasseraufnahme des Recyclingmaterials nach 24h in M.-%,
- V_g ... Prozentuale Volumenanteile der verschiedenen Zuschläge aus Recyclingmaterial mit unterschiedlicher Kornrohichte vom Gesamtzuschlag und
- $\rho_{R,K}$... Kornrohichte des Zuschlags aus Recyclingmaterial in kg/dm^3 .

Anhand dieser Gleichung bzw. der Abb.47 kann der E-Modul des Recyclingbetons für das Prüfalter 28 Tage abgeschätzt werden. Diese Beziehung und das Dia-

klärung dieser Frage müssten noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Abb.47 zeigt mittels des Änderungsfaktors R_r die auf einen Referenz- E-Modul normierten Werte.

Die Abweichungen der so abgeschätzten E-Moduln von den ermittelten E-Moduln der untersuchten Probekörper betragen im Einzelfall bis zu 5%, wobei die Abweichungen der trockengelagerten Probekörper nach oben und die der wassergelagerten Probekörper nach unten tendieren.

Um eine allgemeingültige Aussage zu erhalten, sind die in Einzelversuchen beobachteten Ergebnisse und Beziehungen in eingehenden Untersuchungen noch zu bestätigen.

13.8.7 Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und dynamischem E_{Enl} -Modul

Werden der dynamische E_{Enl} -Modul (schmale Linien) sowie die Würfel-Druckfestigkeit der Probekörper (breite Linien) zusammen in ein Diagramm (s. Abb.48) gegen den effektiven Wasserzementwert aufgetragen, so wird deutlich, dass der effektive Wasserzementwert und der

Zementgehalt die Druckfestigkeit erheblich und den E_{Enl} -Modul nur unwesentlich beeinflussen. Die Druckfestigkeit nimmt mit zunehmendem Zementgehalt sowie abnehmendem Wasserzementwert, in Abhängigkeit vom Zuschlagsmaterial, zu. Ein Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und E-Modul ergibt sich anhand dieser Untersuchungsreihe nicht.

13.8.8 Beziehung Schubmodul - E-Modul

Abb.50 zeigt exemplarisch die Entwicklung des Schub- und des E-Moduls der wasser- sowie trockengelagerten Probekörper X 280. Die Verläufe der elastischen Kennwerte sind qualitativ gleich (s. Abb.51). Dort sind

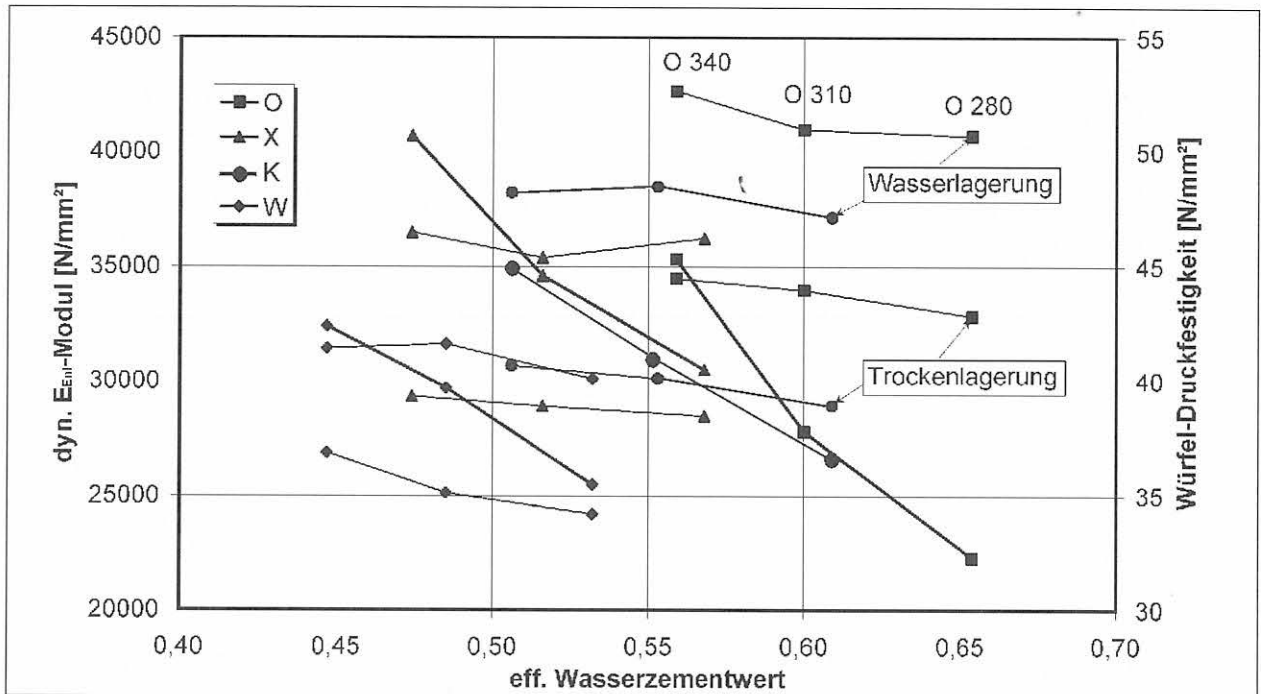


Abb.48: E-Modul und Druckfestigkeit der Probekörper in Abhängigkeit des eff. Wasserzementwertes.

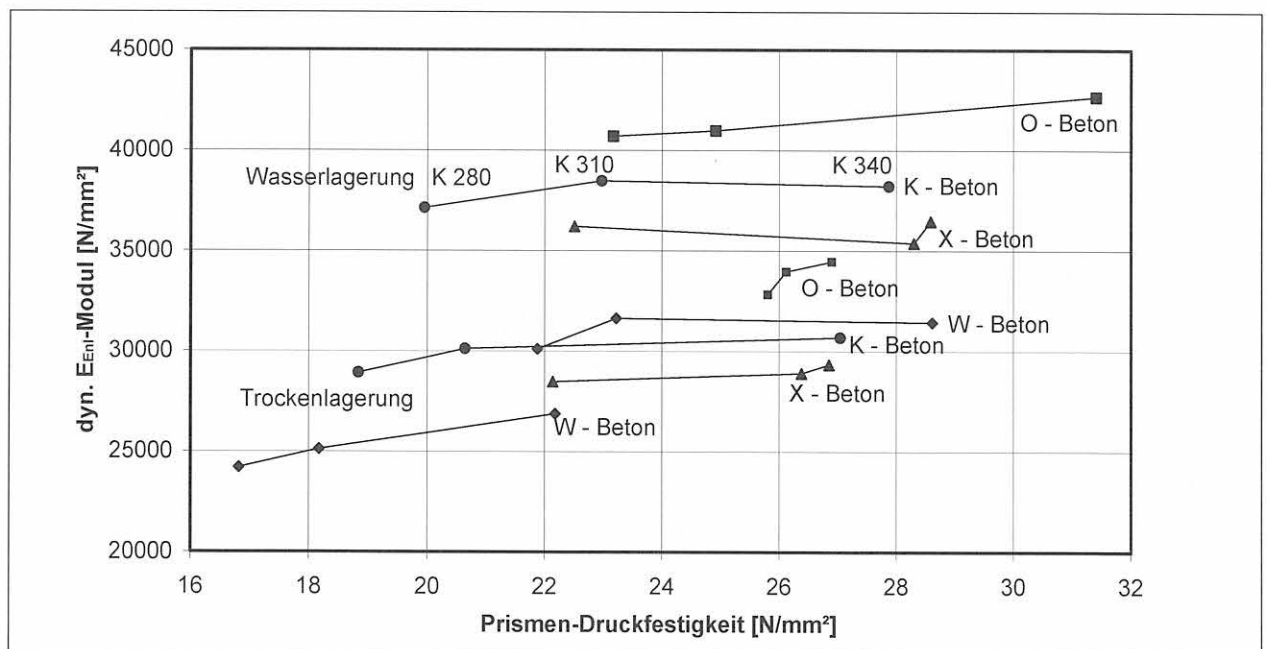


Abb.49: Vergleich dynamischer E_{Enl} -Modul und Druckfestigkeit der Prismen.

Aus Abb.49, in der die Druckfestigkeit der Prismen und der dynamische E_{Enl} -Modul gegeneinander aufgetragen sind, lässt sich auch auf keine direkte Beziehung zwischen der Druckfestigkeit und dem E-Modul schließen. Es bestätigt sich, dass der Zementgehalt bei der Druckfestigkeit einen großen und beim E-Modul kaum einen Einfluss hat.

Schub- und E-Modul gegeneinander aufgetragen. Das Resultat ist annähernd eine Gerade, die die Proportionalität der beiden elastischen Kenngrößen unterstreicht. Die Steigung der Geraden wird leicht von den Lagerungsbedingungen beeinflusst. Mit zunehmenden Alter wird sie für wassergelagerten gegenüber trocken- gelagerten Probekörpern steiler (größer).

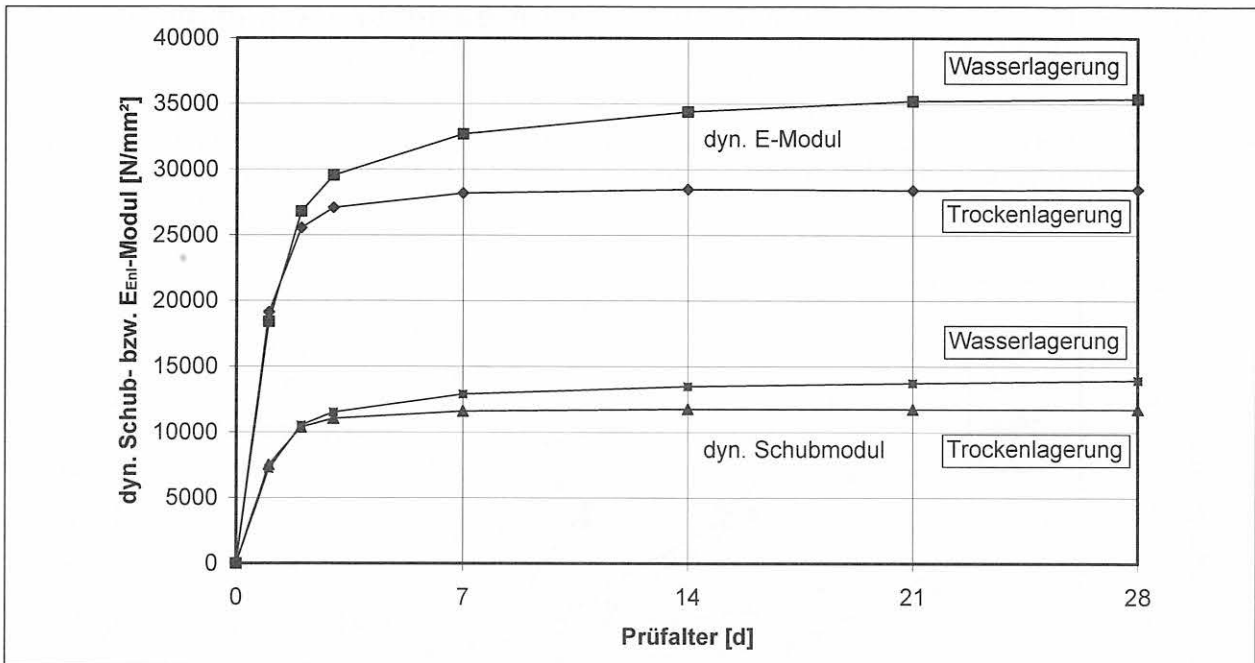


Abb.50: E- und Schubmodulentwicklung am Beispiel der Probekörper X 280.

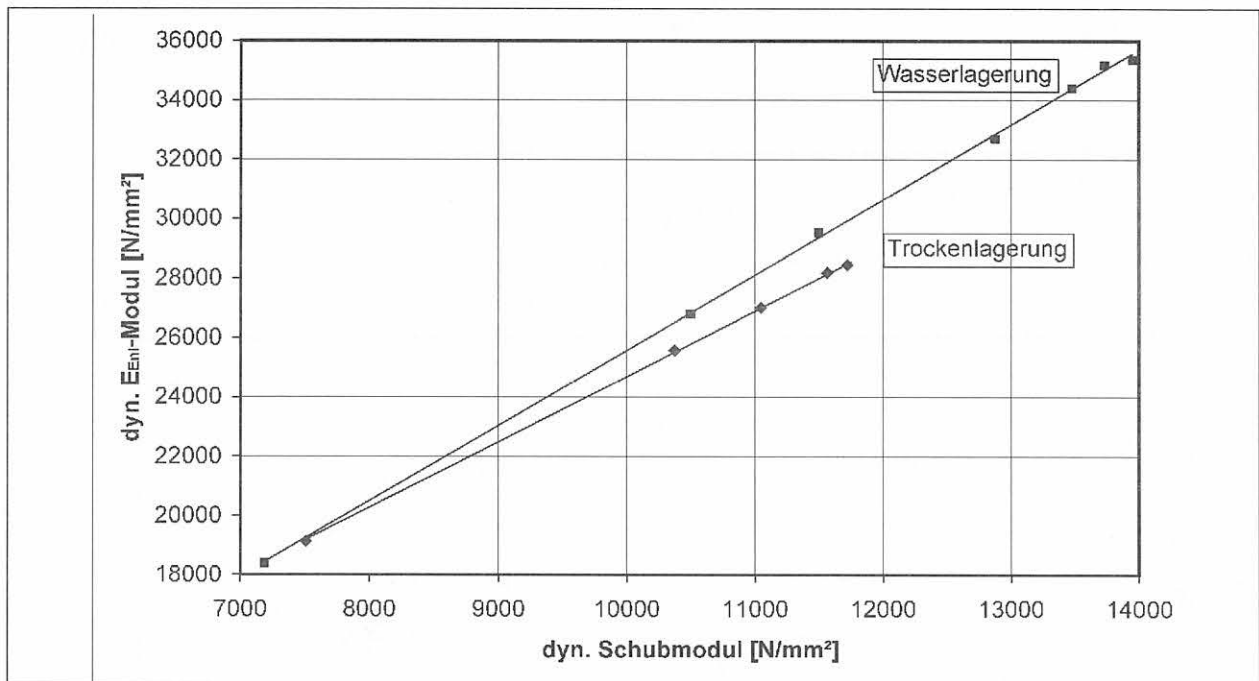


Abb.51: Vergleich E- und Schubmodul.

13.9 Ausblick

Im Laufe dieser Untersuchungen zeigte sich, dass für einen besseren Vergleich der Elastizitätsmodul-Entwicklungen bzw. Wertung der Einflüsse der verschiedenen Zuschläge aus Recyclingmaterial, Betonmischungen mit annähernd gleichen eff. Wasserzementwerten und Stoffraumanteilen verwendet werden sollten. Dabei ist der effektive Wasserzementwert wiederum nur ein rechnerischer Wert. Wirklicher und rechnerischer effektiver Wasserzementwert können sich unterscheiden, da z. B. dem Zuschlag bei der Betonherstellung kein reines Wasser, wie beim Wasseraufnahmeversuch, sondern Zementleim zur Verfügung steht und sich das Wasseraugverhalten der einzelnen Recyclingzuschläge dadurch verändern könnte.

Ein unterschiedlicher Einfluss des Zementsteins ist daher auch bei gleichem rechnerischen effektiven Wasserzementwert nie ohne weiteres auszuschließen.

Unter der Annahme, dass gleiche effektive Wasserzementwerte einen annähernd gleichen Zementstein zur Folge hat und gleiche Stoffraumanteile vorliegen, kann davon ausgegangen werden, dass die E-Modul-Änderungen fast ausschließlich durch das unterschiedliche Zuschlagmaterial hervorgerufen werden.

14 Zusammenfassung

Altbeton und Bauschutt sind weitgehend ungenutzte Rohstoffe, die zur Zeit zum größten Teil wie Abfall deponiert werden. Eine Aufbereitung und Nutzung dieser Rohstoffe, wie es z. B. teilweise im Straßenbau praktiziert wird, stellt somit eine Entlastung der Deponien und der Umwelt dar.

Die Untersuchungen hinsichtlich der bauaufsichtlich zulässigen Wiederverwertung von Beton und besonders Bauschutt stehen in vielen Teilbereichen noch am Anfang. Derzeit zielen zahlreiche Anstrengungen und Aktivitäten verschiedener Institutionen, Hochschulen und Forschungsanstalten auf die Ermittlung fundierter Erkenntnisse über die Eigenschaften und das Verhalten von Beton aus Recyclingmaterial. Diese Untersuchungen haben das Ziel, daß aufbereiteter Altbeton und Bauschutt als zugelassener oder genormter Zuschlag für die Betonherstellung verwendet werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wurde aufbereiteter Altbeton und Bauschutt unbekannter Herkunft, Qualität und stofflicher Zusammensetzung von den Halden dreier Aufbereitungsbetriebe als Zuschlag für die Herstellung von Beton verwendet. Die Korngruppen unter 2 mm erschienen aufgrund der Erfahrungen anderer Untersuchungen für die Betonherstellung ungeeignet und wurden durch natürlichen Sand ersetzt.

Die Untersuchungen konzentrierten sich hauptsächlich auf die Ermittlung der Entwicklung des E-Moduls von Recyclingbeton im Vergleich zu Normalbeton im jungen Betonalter.

Der Elastizitätsmodul, der im allgemeinen hauptsächlich von der Betonzusammensetzung und dem Volumen der Einzelbestandteile abhängig ist, kann mittels unterschiedlicher Beziehungen und verschiedener dynamischer sowie statischer Prüfverfahren ermittelt werden.

Ein Vergleich der hier verwendeten statischen und dynamischen Prüfverfahren zur E-Modulmessung ergab, dass die Ergebniswerte der einzelnen Prüfverfahren zwar stark voneinander abwichen, aber eine qualitative Beurteilung untereinander zulassen.

Die Recyclingbetone hatten bei gleicher Verarbeitbarkeit durch Einsatz von Zusatzmitteln und dem Wasser-saugverhalten des Recyclingzuschlags niedrigere effektive Wasserzementwerte. Die Druckfestigkeit der Recyclingbetone lag um bis zu 25 % höher als die der Normalbetone mit gleichem Zementgehalt.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen war die Entwicklung des E-Moduls von Beton aus Recyclingmaterial im Vergleich zu Beton mit Normalzuschlag.

Das elastische Verformungsverhalten der Recyclingbetone ergab, dass die gemessenen statischen sowie

dynamischen E-Moduln zwischen 6 % und 26 % unter denen der Vergleichsbetone lagen. Diese Ergebnisse stimmen mit denen aus der Literatur überein (s. Kap. 7.4.3).

Es zeigte sich zudem, dass der Zementgehalt sowie der effektive Wasserzementwert keinen nennenswerten Einfluss auf den E-Modul haben.

Ein eindeutiger Zusammenhang von Druckfestigkeit und Elastizitätsmodul konnte nicht festgestellt werden, wohl aber ein linearer Zusammenhang zwischen Festbetonrohichte und Elastizitätsmodul. Dieser Zusammenhang ermöglichte hierbei eine Abschätzung der E-Modulabminderung mittels der Eigenschaften des Recyclingzuschlags. Die wesentlichen Faktoren der Abminderung des Elastizitätsmoduls der Recyclingbetone zum Referenzbeton waren die Porosität und die geringere Kornrohichte des Recyclingzuschlags. Die gewonnenen Erkenntnisse der Untersuchung zeigen, dass bei gleicher Verarbeitbarkeit mit Recyclingbeton annähernd gleiche oder sogar höhere Druckfestigkeiten erzielt werden können. Die Elastizitätsmodulabminderung erweist sich in vielen Fällen als nicht bedeutsam. So ist z. B. ein Einsatz in solchen Bereichen des Hoch- und Ingenieurbaus denkbar, in denen das Verformungsverhalten keine wesentliche Rolle spielt.

15 Literaturverzeichnis

- [1] - Merkblatt für das Ultraschall-Impuls-Verfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile, DGZfP, Merkblatt B4, Berlin, Mai 1993.
- [2] - Specification for concrete with recycled aggregates, Proposal for a RILEM recommendation, prepared by the RILEM TC 121-DRG, Februar 1994
- [3] - Wiederverwertung alter Baustoffe, Recycling-Congress '86 gab wichtige Anregungen, Beton 37 (1987), Nr. 2, S. 66.
- [4] Almudaiheem, J.A. Al-Sugair, F.H. Concrete dynamic modulus: influence of drying and rewetting, Magazine of Concrete Research, Vol. 44, No. 158, S. 15-20, Januar 1992.
- [5] Bonzel, J. Ein Beitrag zur Frage der Verformung des Betons, Beton 21 (1971), Nr. 3, S. 105-109.
- [6] Bonzel, J. Dahms, J. Über den Wasseranspruch des Frischbetons, Beton 78, H. 10, S. 362-367, H. 11, S. 413-416.
- [7] Breitenbücher, R. Recycling von Frisch- und Festbeton, Beton 44 (1994), Nr. 9, S. 510-514.
- [8] Buck, A.D. Recycled Concrete as a Source of Aggregate, Proc. Amer. Concr. Inst. 74 (1977) Nr.5, S. 212-219
- [9] Bunke, N. Prüfung von Beton: Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048, DAfStb., Heft 422, Beuth - Verlag, Berlin 1991.
- [10] CEB CEB-FIP Model Code 1990, Comité Euro-International du Beton, Thomas Telford.
- [11] DAfStb., Heft 462 Umweltgerechter Rückbau und Wiederverwertung mineralischer Baustoffe, Beuth - Verlag, Berlin 1996.
- [12] Diem, P. Zerstörungsfreie Prüf- und Meßmethoden für das Bauwesen, Bauverlag Wiesbaden - Berlin 1982.
- [13] Forster, S.W. Recycled concrete as aggregate, Concrete International Design and Construction 8 (1986), H. 10, S.34-40.
- [14] Frondistou-Yannas,S. Waste Concrete as Aggregate for New Concrete, ACI - Journal, August 1977, S. 373-376.
- [15] Gerthsen, Ch. Physik, Springer Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 7.Auflage (1963)
- [16] Hansen, T.C. Recycling of Demolished Concrete and Masonry, Report of TC 37-DRC , first edition, RILEM 1992.
- [17] Härig, S. Über den Einfluß der elastischen Eigenschaften von Zementstein und Zuschlag auf die elastischen Eigenschaften von Mörtel und Beton, Dissertation RWTH Aachen, 1964.
- [18] Hermann, K. Betonrecycling – Ein Gebot der Stunde, Cement-Bulletin 60 (1992), H. 6, S. 1-10.
- [19] Hirsch,T.J. Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Moduli of Cement Paste Matrix and Aggregate, Journal of the ACI, Proceedings 59, March 1962, S. 427-451 / Diskussion von Dougill, J.W. / Ishai, O. / Pauw, A./Meyers, B.L., Journal of the ACI, Proceedings 59, September 1962, S. 1363-1374.
- [20] Höfling, O. Lehrbuch der Physik, Oberstufe Ausgabe A, Dümmers Verlag, Bonn, 4.Auflage, 1959.
- [21] Hüninghaus, U. Gebrochener Beton als Betonzuschlag, Baust. Recycl. und Deponiertechnik 6 (1990), Nr.6, S. 29-30.

- [22] Iványi, G.
Lardi, R.
Eßer, A. Recycling Beton,
Forschungsbericht,
GH Essen, Sep. 1985.
- [23] Kästel, D. Baustoff und Beton-Recycling,
Beton 42 (1992), Nr. 3,
S. 142-143.
- [24] Kottas, H. Zur Bestimmung des Quer-
dehnungskoeffizienten mit
Hilfe der E- und G-Modul-
Meßtechnik, Tonind.-Ztg.
89 (1965), S. 538-539.
- [25] Leers, K.-J.
Hennicke, H.W. Die Bestimmung elasti-
scher Konstanten mit dyna-
mischen Methoden,
Tonind.-Ztg. 89 (1965),
S. 539-543.
- [26] Lemmens, J.W. Impuls- Excitation-
Technique, Auszug und
Übersetzung der Veröffent-
lichung des Symposiums
der ASTM in Kansas - City,
USA 1989.
- [27] Lukas, W. Konzept für die Herstellung
von Recycling-Beton aus
Baurestmassen-Zuschlä-
gen, Betonwerk + Fertigteil
- Technik (1994), Nr.10,
S. 68-75.
- [28] Manns, W. Elastizitätsmodul von Ze-
mentstein und Beton,
Beton 70, H. 9, S. 401-405,
H. 10, S. 455-460.
- [29] Manns, W. Über den Einfluß der
elastischen Eigenschaften
von Zementstein und Zu-
schlag auf die elast. Eigen-
schaften von Mörtel und
Beton, Westdeutscher Ver-
lag, Köln – Opladen 1970
- [30] Martincek, G. Die Bestimmung der Elasti-
zitätsmoduln aus Eigen-
schwingungen von Würfeln
und kurzen Prismen,
Acustica, Bd. 13 (1963),
Nr.3, S. 123-130.
- [31] Maultzsch, M.
Mellmann, G.
Meinhold, U. Vorläufige Berichte zum
BRITE/EURAM Projekt
2145
Construction Recycling
Technologies for High
Quality Cement
and Concrete, BAM Berlin
1997 (unveröff.).
- [32] Mayer, F. Einfluß unterschiedlicher
Zuschläge auf die Druckfe-
stigkeit und den E-Modul
von Beton, Beton 1972,
H. 2, S.61-62.
- [33] Müller, C.
Schießl, P. Recyclingzuschlag für
Beton,
Beton 46 (1996), Nr. 8,
S. 473-478.
- [34] Neisecke Ultraschallprüfung im Bau-
wesen – eine kritische Wer-
tung, DGZfP-Tagung,
1991, S. 185-186.
- [35] Odler, I.
Rößler, M.
Köster, H. Zusammenhang zwischen
E-Modul und Festigkeit von
Zementpasten, Mitteilung
aus dem Institut für Steine
u. Erden der TU-Clausthal.
- [36] Philleo, R.E. Comparison of Results of
Tree Methods for Deter-
mining Young's Modulus of
Elasticity of Concrete,
Journal of the ACI, Pro-
ceedings 51, January 1955,
S. 461-469.
- [37] Piltz, H.
Härig, S.
Schulz, W. Technologie der Baustoffe,
Dr.Lüdeck-Verlags-GmbH,
6.Auflage, Haslach 1979.
- [38] Pohl, E. Zerstörungsfreie Prüf- und
Meßmethoden für Beton,
VED Bauwesen, Berlin,
2.Auflage (1969).
- [39] Rahlwes, K. Recycling von Stahlbeton-
und Stahlverbundkonstruk-
tionen, Vortrag auf dem
Deutschen Betontag 1991
am 26.April 1991 in Berlin,
Deutscher Beton-Verein
e.V., Vorträge 1991, Wies-
baden 1992, S. 215-247.
- [40] Roth, H. Verwendbarkeit des dyna-
mischen Elastizitätsmoduls,
insbesondere für die Frost-
beständigkeitsprüfung des
Betons, Zement und Beton
22, 1977, Heft 1, S. 32-35.
- [41] Schneider, U. Festigkeits- und Verfor-
mungsverhalten von Beton
unter stationärer und insta-
tionärer Temperaturbean-
spruchung, Die Bautechnik
1977, H. 4, S. 123-132.

- [42] Scholz, W. Baustoffkenntnis, Werner-Verlag, 10. Auflage, Düsseldorf 1984.
- [43] Schubert, P. Friede, H. Erarbeitung eines vereinfachten Verfahrens zur Bestimmung der Querdehnung von Maurermörteln, Abschlußbericht, Institut für Bauforschung, RWTH Aachen, F117.
- [44] Schulz, R. - R. Betonzuschlag aus Baurestmassen, Baustoff Recycling 3 (1987), Nr.4, S. 10-14.
- [45] Schulz, R. - R. Recycling von Beton, Betonwerk + Fertigteile - Technik 44 (1978), H. 9, S. 492-497.
- [46] Sommer, H. Beton aus Altbeton, Zement & Beton 1990, H. 4, S. 10-14.
- [47] Stanton, T.E. Tests Comparing the Modulus of Elasticity of Portland Cement Concrete as Determined by the Dynamic (Sonic) and Compression (Secant at 100 psi) Methods, ASTM Bulletin, No 131, December 1944, S. 17-20/Diskussion von Witte, L.P./Price, W.H., ASTM Bulletin, No. 131, Dezember 1944, S. 20-22.
- [48] Walz, K. Festigkeitsentwicklung von Beton bis zum Alter von 30 und 50 Jahren, Beton 76, H. 3, S. 95-98, H. 4, S. 135-138.
- [49] Walz, K. Wischers, G. Konstruktions-Leichtbeton hoher Festigkeit, Beton-Verlag, Düsseldorf 1964.
- [50] Wesche, K. Baustoffe für tragende Bauteile, Bd. 1, Baustoffkenngrößen, Meßtechnik, Statistik, 2. Auflage, Bauverlag, Wiesbaden/Berlin 1977.
- [51] Wesche, K. Baustoffe für tragende Bauteile, Bd. 2, Beton, Bauverlag, Wiesbaden/Berlin 1981.
- [52] Wesche, K. Schulz, R. - R. Beton aus aufbereitetem Altbeton Technologie und Eigenschaften, Beton 2/82, S. 64-68 und Beton 3/82, S. 108-112.
- [53] Willkomm, W. Abbruch und Recycling, RKW-Verlag, Köln 1990.
- [54] Willkomm, W. Baustoff - Recycling, 2. Auflage, RKW-Verlag, Eschborn 1991.
- [55] Willkomm, W. Recyclinggerechtes Konstruieren im Hochbau, RKW-Verlag, Köln 1990.
- [56] Winkler, H. Danßmann, J. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Abteilung VII, Jahresbericht 1997.
- [57] Wöhnl, U. Recyclingbeton für Bauteile im Hochbau, Beton 44 (1994), Nr. 9, S. 499-503.
- [58] DIN 1045 Beton und Stahlbeton - Bemessung und Ausführung, Beuth - Verlag, Berlin, Ausgabe 1989.
- [59] DIN 1048 Prüfverfahren für Beton, Beuth - Verlag, Berlin, Ausgabe Juni 1991.
- [60] DIN 4226 Zuschlag für Beton, Beuth-Verlag, Berlin, Ausgabe April 1983.
- [61] DIN 4227 Spannbeton, Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung, Teil 1, Beuth - Verlag, Berlin, Ausgabe 1989.
- [62] DIN 52103 Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert, Beuth - Verlag, Berlin, Ausgabe Okt. 1988.
- [63] DIN ISO 8047 Festbeton, Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit, Beuth - Verlag, Berlin, Entwurf Mai 1989.
- [64] ÖNORM B 3303 Betonprüfung, Dezember 1970.

Die Entwicklung der BAM in Daten und Stichworten

- 1870** Das Preußische Ministerium für Handel, Gewerbe und öffentliche Arbeiten veranlasst die Errichtung einer Mechanisch-technischen Versuchsanstalt mit der Aufgabe, Versuche im allgemeinen wissenschaftlichen und öffentlichen Interesse sowie Festigkeitsprüfungen durchzuführen.
- 1904** Das Königliche Materialprüfungsamt wird durch Vereinigung der Königlichen mechanisch-technischen Versuchsanstalt mit der Königlichen Prüfungsstation für Baumaterialien (gegr. 1875) und der Königlichen chemisch-technischen Versuchsanstalt (gegr. 1877) in Berlin-Dahlem errichtet.
- 1919** Das neu benannte Staatliche Materialprüfungsamt (MPA) ressortiert beim Preußischen Ministerium für Wissenschaft, Kunst und Volksbildung; ab 1936 wird die ReichsRöntgenstelle in das MPA einbezogen.
- 1920** Die Chemisch-Technische Reichsanstalt (CTR) wird beim Reichsministerium des Innern errichtet; sie ging hervor aus dem 1889 als Zentralversuchsstelle für Explosivstoffe geschaffenen Militärversuchsanstalt.
- 1945** MPA und CTR werden unter Betreuung durch den Magistrat von Berlin zusammengefasst.
- 1954** MPA/CTR werden als Bundesanstalt für mechanische und chemische Materialprüfung (BAM) – ab 1956 Bundesanstalt für Materialprüfung – von der Bundesrepublik Deutschland übernommen. Die BAM wird zusätzlich mit der Wahrnehmung amtlicher Materialprüfungsaufgaben für das Land Berlin beauftragt.
- 1969** Die BAM wird durch das Gesetz über explosionsgefährliche Stoffe (Sprengstoffgesetz) Bundesoberbehörde; bei der Gesetzesnovellierung 1986 wird der Begriff Forschung in den Namen der BAM aufgenommen.
- 1975** Durch das Gesetz über die Beförderung gefährlicher Güter werden der BAM weitere Aufgaben im Bereich der öffentlichen technischen Sicherheit übertragen.
- 1990** Mit der deutschen Vereinigung wird entsprechend einer Empfehlung des Wissenschaftsrates die Funktion der BAM als chemisch-technische Bundesanstalt verstärkt. Dazu wird Personal des aufgelösten Amtes für Standardisierung, Messwesen und Warenprüfung (ASMW) und der aufgelösten Akademie der Wissenschaften der DDR eingestellt. Die amtlichen Materialprüfungsaufgaben für das Land Berlin werden schrittweise aufgegeben.
- 1995** Die BAM erhält nach externer Evaluierung und umfassender Reorganisation durch Erlass des Bundesministeriums für Wirtschaft ein neues Statut, neue Managementinstrumente und ein zukunftsorientiertes Profil als Bestandteil der technisch-wissenschaftlichen Infrastruktur der Bundesrepublik Deutschland.

