

Lehrstuhl für Massivbau  
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen  
Technische Universität München

**Zugbeanspruchte Übergreifungsstöße  
in Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung:  
Rissbildung, Tragfähigkeit und  
umweltökonomischer Nutzen**

Michael Klaus Cyllok

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ. Prof. Dr.-Ing. H. Kreuzinger  
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Zilch  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. M. Curbach,  
Technische Universität Dresden  
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Faulstich

Die Dissertation wurde am 14.07.2004 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 13.06.2006 angenommen.



---

## Vorwort

Forschung und Wissenschaft ist kein Selbstzweck, sondern soll den Menschen zugute kommen. Das ist für den Bauingenieur im Grunde einfach, da seine technische und wissenschaftliche Arbeit immer daraufhin ausgerichtet ist, die Lebensqualität der Menschen zu steigern. Häuser werden gebaut, damit Menschen darin wohnen und arbeiten können und vor dem Wetter geschützt sind. Brücken, Straßen und Wege verbinden Menschen untereinander und Wasserversorgung und Abfallentsorgung bilden die Grundlage für ein gesundes, angenehmes Leben.

Aber es ist für den Bauingenieur auch leicht, die Menschen aus dem Blick zu verlieren und in die Technik verliebt nur dieser zu dienen. Mein Ziel für diese wissenschaftliche Arbeit ist es daher, einen ideologiefreien Beitrag für eine technisch entwickelte, ökologisch und ökonomisch funktionierende und für den Menschen lebenswerte Welt zu leisten.

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner dreieinhalbjährigen Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch, Ordinarius für Massivbau an der Technischen Universität für die Förderung dieser Arbeit und die Übernahme des Hauptreferats. Er hat mir großes Vertrauen geschenkt und die wissenschaftliche Freiheit gegeben, zu untersuchen, was mich wirklich interessiert. Auch bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Curbach, der das Zweitreferat übernommen hat, sowie bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich, für die Übernahme des Drittreferats, möchte ich mich an dieser Stelle bedanken.

Weiterer Dank geht an Herrn Dr.-Ing. Frank Roos, der mir als Gruppenleiter der AG Betonkennwerte freundschaftlich und fair die guten Rahmenbedingungen geschaffen hat, unter denen diese Arbeit entstanden ist. Ich hatte großes Glück, in dieser Arbeitsgruppe sein zu können, in der mich auch meine Kollegen durch kritische Diskussionen und großes Entgegenkommen in so hohem Maße unterstützt haben. Stellvertretend möchte ich Herrn Peter Krauß und Herrn Dipl.-Ing. Andreas Müller danken.

Ganz herzlich möchte ich auch meinen übrigen wissenschaftlichen und nichtwissenschaftlichen Kollegen aus dem Lehrstuhl für Massivbau und dem Materialprüfungsamt der TU München danken, die sich insbesondere in das der Dissertation zugrunde liegende Forschungsvorhaben mit ihren Ideen, ihren Erfahrungen, ihrem Wissen und ihrer Kollegialität eingebracht haben.

Ein wichtiger Bestandteil der Forschung waren die wissenschaftliche Zusammenarbeit und der Austausch auch über die Lehrstuhlsgrenzen hinaus. Für die Möglichkeit dazu möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Schießl und Herrn Dr.-Ing. Ludwig Friedl bedanken, mit denen das gemeinsame Demobauwerk aus Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung entstanden ist. In diesem Zusammenhang möchte ich mich ebenfalls bei Herrn Dipl.-Geol. Marcel Weil und Frau PD Dr. rer. silv. Gabriele Weber-Blaschke bedanken, mit denen wichtige und aufschlussreiche Diskussionen zum Thema Ökologie und Stoffstrommanagement stattfanden.

Nicht unerwähnt bleiben soll das Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz (Dr. Werner Schnappauf). Durch die engagierte Förderung der Forschung zum Thema Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung konnte meine Stelle an der TU München mitfinanziert werden. Bedanken möchte ich mich daher bei Herrn Dr. Peter Schlechte, Herrn Dipl.-Ing. Martin Meier-Ciosto, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dr. h.c. Peter Wilderer und Fr. Dr. Wimmer für die freundliche, kritische und kompetente Zusammenarbeit.

Zu guter Letzt möchte ich meinen ganz herzlichen Dank meiner Familie und im Besonderen meiner Frau Julia Cyllok aussprechen, die immer zu mir gestanden haben und für mich da waren. Diese Arbeit ist meinen Eltern Renate und Gerhard Cyllok gewidmet.

München, im August 2006

Michael Cyllok

# Inhaltsverzeichnis

1	Einführung .....	1
1.1	Situation: Recyclingbeton, ein technisch umsetzbarer, wirtschaftlicher und ökologischer Baustoff?.....	1
1.2	Ziel: Ausarbeitung der technischen, ökologischen und ökonomischen Kennwerte des Baustoffs Recyclingbeton .....	3
1.3	Methodik und Aufbau der Arbeit: Anpassung der regulären Rissbreitenbegrenzung an den Recyclingbeton und umweltökonomischer Exkurs .....	3
2	Wirtschaftlichkeit und Ökologie des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung .....	7
2.1	Ziel der umweltökonomischen Studie.....	8
2.1.1	Ökologische Ziele (Volkswirtschaftliche Sichtweise).....	8
2.1.2	Ökonomische Ziele (Betriebswirtschaftliche Sichtweise) .....	11
2.2	Untersuchungsrahmen der Studie .....	11
2.2.1	Funktionen der Produktsysteme – Funktionelle Einheit.....	12
2.2.2	Systemgrenzen und Module .....	13
2.2.3	Baustoff- und Transportszenarien der Produktsysteme .....	18
2.2.4	Datensammlungs-, Berechnungs- und Allokationsverfahren.....	21
2.2.5	Wirkungskategorien und Wirkungsabschätzungen .....	23
2.2.6	Einbeziehung und Ausschluss von Stoff- und Energieflüssen.....	24
2.2.7	Qualität der Daten.....	25
2.2.8	Äquivalenz der verglichenen Produktsysteme .....	25
2.2.9	Kritische Prüfung.....	26
2.3	Sachbilanz.....	26
2.3.1	Materialentnahme .....	27
2.3.2	Abfallaufkommen .....	28
2.3.3	Siedlungs- und Verkehrsfläche inkl. Abbauand.....	30
2.3.4	Betonstahl.....	31
2.3.5	Natürliche Gesteinskörnung.....	33
2.3.6	Rezyklierte Gesteinskörnung .....	35
2.3.7	Bindemittel: Zement und Betonzusatzstoffe .....	38
2.3.8	Betone: Herstellung, Ein- und Rückbau .....	42
2.3.9	Berechnung der Baustoff und Transportszenarien .....	46
2.4	Wirkungsabschätzung als Interpretation der Stoffflüsse.....	54
2.4.1	Ökologische Perspektive.....	55

---

2.4.2	Ökonomische Perspektive .....	58
2.5	Auswertung und Ausblick .....	59
2.5.1	Signifikanter Parameter.....	59
2.5.2	Einhaltung des Untersuchungsrahmens .....	59
2.5.3	Schlussfolgerungen und Empfehlungen .....	60
2.5.4	Ausblick und Forschungsbedarf .....	62
3	Der Baustoff Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung .....	65
3.1	Klasseneinteilung und Eigenschaften .....	66
3.2	Gesteinskörnungen.....	67
3.2.1	Herkunft und Liefertypen des Ausgangsmaterials .....	68
3.2.2	Eigenschaften des Ausgangsmaterials .....	69
3.2.3	Mischungen .....	69
3.3	Zement, Zusatzstoffe und Zusatzmittel.....	72
3.4	Betonmischungen – Rezepte und Verfahrenstechnik .....	73
3.4.1	Entwurf der Betonrezepte .....	73
3.4.2	Verfahrenstechnik.....	74
3.4.3	Optimierung der Mischung .....	75
3.5	Frischbetonprüfungen .....	75
3.6	Festbetonprüfung .....	77
3.6.1	Äußere Erscheinung.....	78
3.6.2	Druckfestigkeit .....	78
3.6.3	Zugfestigkeit.....	79
3.6.4	E-Modul .....	80
4	Geometrie, Bewehrung und Messeinrichtung der Probekörper.....	83
4.1	Vorüberlegungen zu Art und Anzahl der Versuche.....	83
4.1.1	Berücksichtigung des Stabdurchmessers .....	84
4.1.2	Ausbildung der Übergreifungsstöße und Versuchsaufbau.....	85
4.1.3	Schlussfolgerungen aus den Vorüberlegungen .....	85
4.2	Allgemeine Betrachtung der Bewehrung .....	86
4.2.1	Anforderungen an die Längsbewehrung.....	86
4.2.2	Anforderungen an die Querbewehrung bzw. Querkraftbewehrung .....	90
4.3	Überlegungen zur Geometrie.....	90
4.3.1	Probenhöhe.....	90
4.3.2	Probenbreite.....	91

---

4.3.3	Betondeckung .....	91
4.4	Entwurf der Grundformen „A“ bis „D“ .....	91
4.4.1	Bewehrung der Grundform A.....	92
4.4.2	Bewehrung der Grundform B.....	92
4.4.3	Bewehrung der Grundform C.....	93
4.4.4	Bewehrung der Grundform D.....	93
4.5	Messungen.....	93
4.5.1	Rissaufnahme .....	94
4.5.2	Durchbiegung .....	95
4.5.3	Betonstauchung .....	95
4.5.4	Überblick über die Messungen im Probekörper.....	96
4.5.5	Messung der Stahlspannungen mit Dehnmessstreifen (DMS).....	97
4.5.6	Messung der Abspaltung der Betondeckung.....	98
4.5.7	Schlupfmessung.....	99
5	Prüfprogramm .....	101
5.1	Herstellung der Probekörper.....	102
5.2	Versuchsaufbau.....	103
5.3	Versuchsdurchführung .....	104
5.3.1	Versuchssteuerung (ruhende vs. dynamische Lasten) .....	105
5.3.2	Laststufen und Definition von $M_{zul}$ .....	105
6	Wiedergabe und Auslegung der Ergebnisse .....	109
6.1	Auswertung der Ergebnisse auf Gebrauchslastniveau .....	109
6.1.1	Spannungen und Dehnungen im einfach bewehrten Bereich.....	109
6.1.2	Rissbild im einfach bewehrten Bereich .....	112
6.1.3	Statistische Betrachtung der Rissbreiten im einfach bewehrten Bereich.....	113
6.1.4	Berechnung und Vergleich der Rissbreiten im einfach bewehrten Bereich ...	114
6.1.5	Spannungen und Schlupf im Stoßbereich .....	123
6.1.6	Rissbild und Rissbreiten im Stoßbereich .....	125
6.1.7	Berechnung und Schlussfolgerungen für die Rissbreiten im Stoßbereich.....	126
6.2	Auswertung der Ergebnisse unter Tragfähigkeitsniveau und Bruch .....	127
6.2.1	Bruchart.....	127
6.2.2	Tragfähigkeitsniveau und Bruchlast des Köpers.....	129
6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	130
7	Bemessung und Konstruktion .....	133

7.1	Berücksichtigung der Liefertypen der Gesteinskörnung.....	134
7.2	Bemessungsvorschlag zur Rissbreitenbegrenzung .....	134
7.2.1	Bemessungsvorschlag .....	134
7.2.2	Anmerkung zum Bemessungsvorschlag .....	135
7.3	Vorschlag für Bewehrungsregeln für Übergreifungsstöße.....	136
7.3.1	Betrachtung des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit.....	136
7.3.2	Betrachtung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit .....	137
7.3.3	Resultierender Vorschlag .....	138
8	Beispiel und wirtschaftliche Betrachtung .....	139
8.1	Beispielhafte Bemessung der Decken eines Bürogebäudes aus Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung.....	139
8.1.1	Anmerkungen zur Vorbemessung von Bauteilen aus Stahlbeton mit rezyklierter Gesteinskörnung .....	139
8.1.2	System, Lasten und Schnittgrößen .....	140
8.1.3	Bemessung .....	142
8.1.4	Gegenüberstellung der Stahl und Betonmengen .....	147
8.2	Bewertung der Wirtschaftlichkeit .....	147
9	Zusammenfassung und Empfehlungen.....	149
9.1	Technische Betrachtung – Bemessungsansatz .....	149
9.2	Umweltökonomische Betrachtung.....	150
9.3	Ausblick und abschließende Bewertung .....	151
10	Literatur .....	153
Anhang A	Matrizen für die umweltökonomische Betrachtung .....	159
Anhang A.1	Qualitative Zuordnung der Module zu den Produktionsbereichen .....	159
Anhang A.2	Aufschlüsselung der Produktionsbereichsnummern (CPA) .....	161
Anhang A.3	Zuordnung der entnommenen Feststoffe zu Produktionsbereichen (2001).....	162
Anhang A.4	Zuordnung des Abbaulands auf Produktionsbereiche .....	163
Anhang A.5	Zuordnungsmatrix $Q_{PB}$ für die BR Deutschland (2001).....	164
Anhang A.6	Produktsystem Recyclingbeton B2T1 .....	165
Anhang A.7	Produktsystem Recyclingbeton B2T2 .....	166
Anhang A.8	Produktsystem Recyclingbeton B3T1 .....	167
Anhang A.9	Produktsystem Recyclingbeton B3T2 .....	168
Anhang A.10	Matrix Wirkungsabschätzung .....	169
Anhang B	Betonrezepte und Gesteinskörnungen .....	170

---

Anhang B.1	Prüfung der Gesteinskörnungen .....	170
Anhang B.2	Betonrezepte.....	173
Anhang C	Ergebnisse der Nebenversuche.....	174
Anhang C.1	Nebenversuche Bewehrungsstahl.....	174
Anhang C.2	Nebenversuche Frischbeton .....	175
Anhang C.3	Nebenversuche Festbeton .....	178
Anhang D	Schal- und Bewehrungspläne .....	180
Anhang D.1	Schal- und Bewehrungsplan Grundform A.....	180
Anhang D.2	Schal- und Bewehrungsplan Grundform B.....	181
Anhang D.3	Schal- und Bewehrungsplan Grundform C.....	182
Anhang D.4	Schal- und Bewehrungsplan Grundform D.....	183
Anhang E	Messeinrichtungen.....	184
Anhang E.1	Versuchsaufbau Grundform A und B.....	184
Anhang E.2	Messeinrichtung Grundform A .....	185
Anhang E.3	Messeinrichtung Grundform B.....	186
Anhang E.4	Versuchsaufbau Grundform C und D.....	187
Anhang E.5	Messeinrichtung Grundform C.....	188
Anhang E.6	Messeinrichtung Grundform D .....	190
Anhang F	Messergebnisse.....	191
Anhang F.1	Mess- und Rechenwerte für $\sigma_s$ und $\varepsilon_c$ auf Gebrauchslastniveau .....	191
Anhang F.2	Darstellung von $\sigma_s$ und $\varepsilon_c$ im einfach bewehrten Bereich auf Gebrauchslastniveau .....	193
Anhang F.3	Gemessene Stahlspannungen auf Gebrauchslastniveau .....	194
Anhang F.4	Gemessene Betonstauchungen auf Gebrauchslastniveau .....	196
Anhang F.5	Gemessener Schlupf auf Gebrauchslastniveau .....	198
Anhang F.6	Rissbilder .....	200
Anhang F.7	Statistische Rissauswertung .....	212
Anhang F.8	Verhalten beim Versagen.....	213

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Betonmischung B0 – Ressourcenbeton.....	18
Tabelle 2 Betonmischung B1 – Recyclingbeton „Demobauwerk“ .....	19
Tabelle 3 Betonmischung B2 – 100% Recyclingbeton.....	19
Tabelle 4 Betonmischung B3 – Recyclingbeton mit Natursand .....	20
Tabelle 5 Menge der verwerteten Feststoffentnahmen ausgewählter Produktionsbereiche (2001).....	27
Tabelle 6 Abfallaufkommen in 2001.....	28
Tabelle 7 Zuordnung der nicht verwerteten Entnahmen zu den Produktionsbereichen.....	29
Tabelle 8 Zuordnung des Abfallaufkommens zu den Produktionsbereichen .....	30
Tabelle 9 Allokation von Produktionsbereichen auf den Betonstahlpfad .....	32
Tabelle 10 Menge der abgebauten Ressourcen zur Herstellung von Gesteinskörnungen für die Betonproduktion (Daten für 1997 nach Weil [53] und UGR [48], [49]).....	33
Tabelle 11 Durchschnittliche Entfernungen und Transportmittel für Transporte zwischen Kieswerk und Betonwerk (nach Eyerer [25]) .....	34
Tabelle 12 Allokation nach Transportleistungen für Transport zwischen Aufbereitung der Gesteinskörnungen und Herstellung des Betons .....	34
Tabelle 13 Allokation von Produktionsbereichen auf den Pfad der natürlichen Gesteinskörnungen .....	35
Tabelle 14 Allokation von Produktionsbereichen auf den Pfad der rezyklierten Gesteinskörnungen .....	38
Tabelle 15 Allokation von Produktionsbereichen auf den Bindemittelpfad.....	42
Tabelle 16 Bauwerke als Stofflager , Bundesrepublik Deutschland (Auszug).....	44
Tabelle 17 Allokation von Produktionsbereichen auf den Pfad des Ressourcenbetons.....	46
Tabelle 18 Allokation von Produktionsbereichen auf den Pfad des Recyclingbetons.....	46
Tabelle 19 Allokationsmatrix für Stahlressourcenbeton (B0T0).....	47
Tabelle 20 Sachbilanzdaten des Produktsystems Stahlressourcenbeton (B0T0) und dessen Modulpfade .....	47
Tabelle 21 Allokationsmatrix für das Recyclingbetonszenario B1T1 .....	50
Tabelle 22 Sachbilanzdaten des Produktsystems Stahlrecyclingbeton (B1T1) und dessen Modulpfade .....	50
Tabelle 23 Allokationsmatrix für das Recyclingbetonszenario B1T2 .....	51
Tabelle 24 Sachbilanzdaten des Produktsystems Stahlrecyclingbeton (B1T2) und dessen Modulpfade .....	51

---

Tabelle 25 Anforderungen an Betonmischungen.....	66
Tabelle 26 Ausgangsmaterialien nach Rohmaterial und Korngruppe.....	68
Tabelle 27 Mischungsverhältnisse der verwendeten rezyklierten Gesteinskörnungen.....	72
Tabelle 28 Definition der Grundformen .....	85
Tabelle 29 Übersicht über eingebaute Übergreifungslängen.....	89
Tabelle 30 Grundformen der Balken .....	91
Tabelle 31 Laststufen der Prüfreihe A-D.....	106
Tabelle 32 Verhältniszahlen zwischen mittlerer Verbundspannung $\tau_{sm}$ und Zugfestigkeit $f_{ct,eff}$ (kurzzeitige Belastung) .....	116
Tabelle 33 Rissbreiten der Probekörper am Stoßende .....	125
Tabelle 34 Parameter zur Anpassung der Rissberechnung nach DIN 1045-1 Verhältniszahlen zwischen mittlerer Verbundspannung $\tau_{sm}$ und Zugfestigkeit $f_{ct,eff}$ .....	135
Tabelle 35 Stahlbedarf einer Decke mit Unterzügen (Beispiel) .....	147
Tabelle 36 Kosten einer Decke mit Unterzügen (Beispiel) .....	148

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1 Produktsystem Stahlbeton mit den Pfaden der Bestandteile .....	13
Bild 2 Betonstahlpfad des Produktsystems Stahlbeton .....	14
Bild 3 Gesteinskörnungspfad (natürliche Gesteinskörnung) des Produktsystems Stahlbeton .	15
Bild 4 Gesteinskörnungspfad (rezyklierte Gesteinskörnung) des Produktsystems Stahlbeton	15
Bild 5 Bindemittelpfad des Produktsystems Stahlbeton.....	16
Bild 6 Betonpfad des Produktsystems Stahlbeton.....	17
Bild 7 Transportszenarien T1 und T2.....	20
Bild 8 Wirkung des Austauschs von Stahlressourcenbeton durch Recyclingbeton auf die Gesamt-I/O-Flüsse und Gesamt-Siedlungs- und Verkehrsfläche aller Produktionsbereiche nach UGR .....	55
Bild 9 Reduzierung des Gesamt-I/O-Flusses bzw. Fläche in Abhängigkeit des Anteils rezyklierten Materials an der Gesamtgesteinskörnung (ausgedrückt über die Baustoffszszenarien B1, B2 und B3) .....	61
Bild 10 Beispiele für die gelieferten rezyklierten Körnungen (links: Ziegelsplitt 8/16; rechts: Betonsplitt 8/16) .....	68
Bild 11 Geschliffene Betonzylinder mit Ziegel-Anteilen.....	78
Bild 12 Einfluss der Übergreifungslänge $\ell_0$ auf die Stoßbruchlast nach Elgehausen und Last bei Erreichen der der Fließgrenze außerhalb des Stoßes .....	88
Bild 13 Bewehrungs- und Schalplan Grundform A (Auszug).....	92
Bild 14 Mikroskop Aufnahmen der Entwicklung eines Risses (geringe Last – erstes Bild um 90° verdreht).....	94
Bild 15 Mikroskop Aufnahmen der Entwicklung eines Risses (höhere Last).....	95
Bild 16 Darstellung der Durchbiegungsmesspunkte am Beispiel der Grundform C und D.....	95
Bild 17 Setzdehnungsmesser (SDM).....	96
Bild 18 Positionen der SDM-Marken am Beispiel der Grundformen C und D.....	96
Bild 19 Kennzeichnung der Längsbewehrung in Grundform D .....	97
Bild 20 Position der Dehnmessstreifen am Beispiel der Grundform D .....	97
Bild 21 Schemazeichnung der Messenrichtung für den Abspaltungsweg.....	98
Bild 22 Position der Abspaltungsweg-Messung am Beispiel der Grundform D .....	99
Bild 23 Positionen der Schlupfmessung am Beispiel der Grundform D .....	99
Bild 24 Schemazeichnung der Schlupfmesseinrichtung an einem Bewehrungsstab .....	100
Bild 25 Prinzipskizze des Versuchsaufbaus .....	101
Bild 26 Betonage im Labor mit dem Betonkübel .....	103

---

Bild 27 Statisches Modell am Beispiel der Grundformen C und D .....	104
Bild 28 Dehnungen, Spannungen und Kräftegleichgewicht.....	110
Bild 29 Vergleich der Dehnungen und Spannungen im einfach bewehrten Bereich.....	112
Bild 30 Vergleich zwischen beobachteten und mit den Formeln (6.7) – (6.9) nach DIN 1045-1 berechneten Rissbreiten .....	113
Bild 31 Vergleich zwischen beobachteten und nach den Formeln mit angepassten Parametern berechneten Rissbreiten .....	123
Bild 32 Brucharten A, B und C (aus Eligehausen [24]).....	128
Bild 33 Ansicht des 4-geschossigen Bürogebäudes .....	140
Bild 34 Draufsicht auf das Deckensystem mit statischem System (ohne aussteifenden Kern) .....	141
Bild 35 Abmessungen Plattenbalken.....	145

# Begriffe

## **Abbauland**

Unbebaute Flächen, die vorherrschend durch Abbau der Bodensubstanz genutzt werden.

## **Aggregation, aggregieren**

Bei der Aggregation von Daten werden detaillierte Daten zu größeren Einheiten zusammengefasst. Sie ist eine der häufigsten Verarbeitungsschritte, die aus primären Daten Sekundärdaten erzeugt, siehe [55]. Lateinisch: aggregare = anhäufen, aggregatio = Anhäufung.

## **Allokation, allozieren**

Zuordnung der Input- und Outputflüsse eines Produktionsbereichs auf ein untergeordnetes Modul, bzw. der Input- und Outputflüsse eines Moduls auf das untersuchte Produktsystem, siehe [22].

## **Angepasste Bemessung**

Durch die Verwendung eines hohen Anteils rezyklierten Materials in der Gesteinskörnung eines Betons ändern sich seine Materialeigenschaften signifikant gegenüber denen eines Ressourcenbetons, siehe dort; vgl. auch *angepasster Beton*. Die Bemessungsregeln müssen auf diese veränderten Materialkennwerte angepasst werden. Dies bezeichnet man als angepasste Bemessung.

## **Angepasster Beton**

Wird ein Grenzverhältnis von rezyklierten zu normalen Gesteinskörnungen, bis zu dem sich das Verhalten des daraus hergestellten Recyclingbetons kaum ändert, nicht überschritten, können weitgehend die Bemessungsregeln für Ressourcenbeton angewendet werden. Dies ist der Weg der bisherigen Richtlinie des DAfStb [8]. Man bezeichnet dieses Vorgehen als *Methode des angepassten Betons*.

## **Ausbreitmaß**

Maß für die Konsistenz eines Betons nach DIN 1048-1, DIN EN 12350-5. Das Ausbreitmaß ist der Durchmesser einer sich unter einer definierten Einwirkung ausbreitenden definierten Menge Frischbetons. Steife Betone haben ein geringeres Ausbreitmaß als weiche Betone.

## **Balken**

Ein Balken ist ein stabförmiges, vorwiegend auf Biegung beanspruchtes Bauteil mit einer Stützweite von mindestens der zweifachen Querschnittshöhe und mit einer Querschnitts- bzw. Stegbreite von höchstens der vierfachen Querschnittshöhe.

**Beton**

Baustoff, erzeugt durch Mischen von Zement, grober und feiner Gesteinskörnung und Wasser, mit oder ohne Zugabe von Zusatzmitteln und Zusatzstoffen. Er erhält seine Eigenschaften durch Hydratation des Zements, siehe DIN EN 206-1 [21].

**Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung**

Beton, der in der Gesteinskörnung maximal 100% an rezykliertem Material der Typen 1, 2, oder 3 nach DIN 4226-100 [19] enthält. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff *Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung* bzw. *Recyclingbeton* um die Beschränkung auf Druckfestigkeitsklassen bis einschließlich C30/37 erweitert.

**Bottom-up-Ansatz**

Auch induktiver Ansatz. Gegensatz zum Top-down-Ansatz. Die Einzelphasen oder -teile (z.B. Arbeitsschritte) eines Systems werden detailliert beschrieben und ggf. werden Daten dafür erhoben. Diese Teile werden weiter zu Subsystemen und schließlich zum endgültigen System zusammengesetzt, siehe [57].

**Dehnung**

Die Dehnung ist die Ableitung der Länge. Für eine Verkürzung nimmt die Dehnung negative Werte an.

**Druckfestigkeitsklasse**

Druckfestigkeitsklassen gruppieren Betone nach ihrer am Prüfkörper (z.B. Würfel) gemessenen Druckfestigkeit.

**Einfach bewehrter Bereich**

Im Rahmen dieser Arbeit ist der *einfach bewehrte Bereich* für den Probekörper des 4-Punkt-Biegeversuchs der Bereich zwischen den Auflagern, außerhalb des Stoßbereichs.

**Einwirkungskombination**

Festlegung der Bemessungswerte der gleichzeitig auftretenden Einwirkungen, die für den betrachteten Nachweis entsprechend der Häufigkeit ihres Auftretens zu berücksichtigen sind, siehe DIN 1055-100 [17].

**Elementarfluss**

- 1) Stoff oder Energie, der bzw. die dem untersuchten System zugeführt wird und der Umwelt ohne vorherige Behandlung durch den Menschen entnommen wurde.
- 2) Stoff oder Energie, der bzw. die das untersuchte System verlässt und ohne anschließende Behandlung durch den Menschen an die Umwelt abgegeben wird, siehe [22].

**Energieproduktivität**

Indikator, der angibt, welche Wirtschaftsleistung mit dem Einsatz einer bestimmten Energiemenge erbracht wird.

**Erholungsflächen**

Unbebaute Flächen, die dem Sport, der Erholung und der Freizeitgestaltung dienen, auch Kleingärten, Wochenend- und Campingplätze, Grünanlagen usw.

**Expositionsklasse**

Expositionsklassen gruppieren die Einwirkungen der Umgebungsbedingungen nach ihrer Art den Beton zu schädigen und nach ihrer Aggressivität.

**Funktionelle Einheit (FE)**

Quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit in einer Ökobilanzstudie, siehe [22].

**Gebrauchslastniveau**

Im Rahmen dieser Arbeit ist das *Gebrauchslastniveau* der Laborversuche ein frei definiertes Einwirkungslevel bei ca. 50% der rechnerischen Bruchlast. Es ist ungleich dem *Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit*.

**Gesteinskörnung**

Eine Gesteinskörnung ist nach DIN 4226-1 [18] ein körniges Material für die Verwendung im Bauwesen. Gesteinskörnungen können natürlich, industriell hergestellt oder recycelt sein. Der früher geläufige Begriff *Zuschlag* ist durch den Begriff *Gesteinskörnung* abgelöst worden.

**Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)**

Zustand des Tragwerks, bei dessen Überschreitung die für die Nutzung festgelegten Bedingungen nicht mehr erfüllt sind. Es wird dabei unterschieden zwischen

- einem umkehrbaren Grenzzustand (keine bleibende Überschreitung des Grenzzustandes nach dem Entfernen der maßgebenden Einwirkung) und
- einem nicht umkehrbaren Grenzzustand (bleibende Überschreitung des Grenzzustandes nach dem Entfernen der maßgebenden Einwirkung), siehe DIN 1055-100 [17].

**Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)**

Zustand des Tragwerks, dessen Überschreitung unmittelbar zu einem rechnerischen Einsturz oder anderen Formen des Versagens führt; der Grenzzustand ergibt sich im Allgemeinen aus dem größten rechnerischen Tragwiderstand, siehe DIN 1055-100 [17].

**Konsistenzklasse**

Konsistenzklassen gruppieren Betone nach ihrem Ausbreitmaß, ihrem Setzmaß, ihrem Setzzeitmaß oder ihrem Verdichtungsmaß. Im Rahmen dieser Untersuchung wird die Konsistenzklasse mit Hilfe des Ausbreitmaßes bestimmt.

**Krümmung**

Die Krümmung ist die Ableitung der Verdrehung.

**Liefertyp der Gesteinskörnung**

Liefertypen der Gesteinskörnung gruppieren Gesteinskörnungen nach ihrer Zusammensetzung.

**Modul**

Kleinster Anteil eines Produktsystems, für den zur Erstellung einer Ökobilanz Daten gesammelt werden, siehe [22]. Für den üblichen Bottom-up-Ansatz kann ein Modul z.B. ein definierter Arbeitsschritt sein, wie das Sieben einer Gesteinskörnung oder das Brennen von Kalkstein. Für einen Top-down-Ansatz kann ein Modul z.B. der Produktionsbereich „Gewinnung von Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse“ sein.

**Natürliche Gesteinskörnung**

Gesteinskörnung aus natürlichen mineralischen Vorkommen, die ausschließlich einer mechanischen Aufbereitung unterzogen worden ist, siehe DIN 4226-1 [18].

**Normale Gesteinskörnung**

Gesteinskörnung mineralischen Ursprungs mit einer Kornrohichte von 2,000 Mg/m<sup>3</sup> (2 000 kg/m<sup>3</sup>) bis unter 3,000 Mg/m<sup>3</sup> (3 000 kg/m<sup>3</sup>), siehe DIN 4226-1 [18].

**NVOC**

Flüchtige Kohlenwasserstoffe ohne Methan werden als NVOC (non-methan volatile organic compounds) bezeichnet. Sie können Peroxyde bilden, die wiederum in der Lage sind, Stickstoffmonoxid zu Stickstoffdioxid zu oxidieren. Letzteres kann unter Einwirkung von Sonnenlicht durch Photolyse zur Bildung von Ozon in der Troposphäre führen, was auch als Sommersmog bezeichnet wird.

**Platte**

Eine Platte ist ein ebenes, durch Kräfte rechtwinklig zur Mittelfläche vorwiegend auf Biegung beanspruchtes, flächenförmiges Bauteil, dessen kleinste Stützweite mindestens das Zweifache seiner Bauteildicke beträgt und mit einer Bauteilbreite von mindestens der vierfachen Bauteildicke.

**Produktsystem**

Zusammenfassung der durch Material- und Energieflüsse verbundenen Module, die eine oder mehrere festgelegte Funktionen erfüllen, siehe [22].

**Querbewehrung**

Querbewehrung dient der Aufnahme von Querkzugspannungen wie sie beispielsweise bei Platten durch die Querverteilung der Lasten oder in Krafteinleitungsbereichen auftreten. Querbewehrung ist quer zur Längsbewehrung eingebaut und befindet sich in der gleichen Ebene wie die Längsbewehrung.

**Querkraftbewehrung**

Querkraftbewehrung ist eine Bewehrung zur Aufnahme der Querkraft (Balkentheorie). Sie wird normalerweise als Bügel ausgeführt.

**Recyclingbeton**

Siehe *Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung*.

**Ressourcenbeton**

Beton, der ausschließlich natürliche Gesteinskörnungen enthält. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff *Ressourcenbeton* um die Beschränkung auf Druckfestigkeitsklassen bis einschließlich C30/37 erweitert.

**Ressourcenproduktivität**

Indikator, der angibt, welche Wirtschaftsleistung mit dem Einsatz einer bestimmten Menge einer bestimmten Ressource erbracht wird.

**Stahlressourcenbeton**

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Stahlressourcenbeton für unbewehrten, für mit Betonstahl oder für mit Spannstahl bewehrten Beton mit ausschließlich natürlicher Gesteinskörnung verwendet.

**Stahlrecyclingbeton**

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Stahlrecyclingbeton für unbewehrten, für mit Betonstahl oder für mit Spannstahl bewehrten Beton mit rezyklierter und ggf. natürlicher Gesteinskörnung verwendet.

**Top-down-Ansatz**

Auch deduktiver Ansatz. Gegensatz zum Bottom-up-Ansatz. Im Top-down-Ansatz werden ausgehend von allgemeinen Ansätzen auf spezielle Lösungen geschlossen. Hierbei wird ein

System solange in seine Bestandteile und Unterbestandteile zerlegt, bis das System vollständig beschrieben ist und z.B. rechnerisch ausgewertet werden kann, siehe [57].

### **Tragfähigkeitsniveau**

Im Rahmen dieser Arbeit entspricht das *Tragfähigkeitsniveau* der Laborversuche der rechnerischen Bruchlast. Es ist ungleich dem *Grenzzustand der Tragfähigkeit*.

### **Umweltökonomie**

Die Umweltökonomie ist ein Teilgebiet der Makroökonomie (auch Makroökonomik), die wiederum ein Teilgebiet der Volkswirtschaftslehre ist. Im Gegensatz zur Mikroökonomie arbeitet die Makroökonomie mit aggregierten Größen, d. h. sie untersucht Fragen nach dem Verhalten der Wirtschaft insgesamt, so z. B. Änderungen des Gesamteinkommens oder des Beschäftigungsgrades, der Inflationsrate, Konjunkturschwankungen oder im Fall der Umweltökonomie der Gesamtemissionen. Sie versucht Erklärungen für diese Schwankungen zu finden und die relevanten Steuergrößen und ihre Abhängigkeiten zu ermitteln, vgl. Wikipedia-Definition [56].

### **Vergleichende Aussage**

(Umwelt)aussage zur Überlegenheit oder Gleichwertigkeit eines Produktsystems gegenüber eines Konkurrenzproduktsystems mit dem gleichen Verwendungszweck.

### **Verzerrung**

Verzerrung ist der Oberbegriff für Dehnungen und Krümmungen.

### **w/b-Wert**

Der Wasser-Bindemittel-Wert (w/b-Wert) ist das Verhältnis zwischen Wassermenge und Bindemittelmenge im Frischbeton. Er lässt Aussagen über die zu erwartende Druckfestigkeit des erhärteten Betons zu.

### **Zuschlag**

Siehe *Gesteinskörnung*.

### **Zustand I**

Ungerissener Zustand des Querschnitts.

### **Zustand II**

Gerissener Zustand des Querschnitts.

---

# Formelzeichen

## Lateinische Buchstaben

$A_{c,eff}$	wirksame Betonzugzone im Zustand II [mm <sup>2</sup> ]
$A_s$	Querschnittsfläche der Betonstahlbewehrung [mm <sup>2</sup> ]
<b>A</b>	Koeffizientenmatrix
$b$	Breite [mm]
$C$	Parameter zur Beschreibung einer Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung
$c_v, c_y$	vertikale Betondeckung [mm]
$d$	statische Nutzhöhe [m]; Höhe zwischen Schwerpunkt der Bewehrung und dem gegenüberliegenden Querschnittsrand
$d_s$	Durchmesser eines Betonstahlstabs [mm]
$E_{cm}$	mittlerer Elastizitätsmodul von Beton [N/mm <sup>2</sup> ]
$E_s$	mittlerer Elastizitätsmodul von Stahl [N/mm <sup>2</sup> ]
$e_s$	lichter Strangabstand [mm]
$F_c$	Resultierende der Betonspannungen in der Druckzone [kN]
$F_{cr}$	Risszugkraft [kN]
$F_s$	Kraft im Stab, Resultierende der Stahlspannungen [kN]
$f_{bd}$	Bemessungswerts der Verbundspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{bk}$	charakteristische Verbundspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{cd}$	Bemessungswert der einaxialen Festigkeit des Betons [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{cm}$	Mittelwert der Betondruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{c,cube}$	Betondruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ], geprüft am Würfel
$f_{c,cyl}$	Betondruckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ], geprüft am Zylinder

---

$f_{ct,eff}$	wirksame Betonzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ctk;0,05}$	5%-Quantilwert der Zugfestigkeit
$f_{ctm}$	Mittelwert der Betonzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ctm,erw}$	Mittelwert der mittels Näherungsformel aus der Betondruckfestigkeit geschätzten Betonzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ctm,erwM}$	Mittelwert der mittels Näherungsformel aus der Betondruckfestigkeit (Messwert) geschätzten Betonzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{ctm,erwN}$	Mittelwert der mittels Näherungsformel aus der Betondruckfestigkeit (Normwert nach DIN 1045-1) geschätzten Betonzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
$f_{yd}$	Bemessungswert der Fließgrenze des Stahls [N/mm <sup>2</sup> ]
$g_k$	charakteristische, ständige Einwirkung [kN/m]
$h$	Höhe eines Bauteils [mm]
$\ell_0$	vorhandene Übergreifungslänge [mm]
$\ell_{b,GZG}$	Grundmaß der Verankerungslänge für den GZG
$\ell_{b,GZT}$	Grundmaß der Verankerungslänge für den GZT
$\ell_{krit}$	kritische Übergreifungslänge [mm]
$\ell_t$	Eintragungslänge [mm]
$M$	Modul eines Produktsystems
$M_E$	Einwirkendes Moment [kNm]
$M_{Ed}$	Einwirkendes Moment im Grenzzustand der Tragfähigkeit [kNm]
$M_{Ed,qs}$	Einwirkendes Moment im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (quasi-ständige Einwirkungskombination) [kNm]
$M_{R,cal}$	Rechnerisch aufnehmbares Moment für einfach bewehrten Querschnitt [kNm]

---

$M_{Rd}$	Aufnehmbares Moment im Grenzzustand der Tragfähigkeit [kNm]
$M_{zul}$	Einwirkendes Moment auf Gebrauchslastniveau [kNm]
$MP$	Modulpfad
$m$	Masse
$P$	Transportleistung [Mio. tkm]
$PB$	Produktionsbereich nach UGR [48] (Umweltökonomische Gesamtrechnung für die Bundesrepublik Deutschland)
$Q$	Bestandsgröße
$Q_{PB}$	Zuordnungsmatrix
$q$	Input/Output-Fluss
$q_k$	charakteristische, veränderliche Einwirkung [kN/m]
$s$	Schlupf [mm]
$s_{r,max}$	fiktiver, maximaler Rissabstand [mm]
$s_w$	Abstand der zur Bauteilachse rechtwinkligen Bewehrung; in Richtung der Bauteilachse gemessen
$U_s$	Umfang eines Bewehrungsstabes [mm]
$V_{Ed}$	Bemessungswert der einwirkenden Querkraft
$V_{Rd,ct}$	Bemessungswert der ohne Querkraftbewehrung aufnehmbaren Querkraft
$w_E$	Rissbreite am Stoßende [mm]
$w_k$	charakteristische Rissbreite [mm]
$w_{k,cal,adj}$	charakteristische Rissbreite nach DIN 1045-1, angepasst auf besondere Baustoffeigenschaften [mm]

---

$w_{k,cal,orig}$	charakteristische Rissbreite nach DIN 1045-1 [mm]
$w_{k,ms95}$	95%-Quantil der im Versuch gemessenen Rissbreiten [mm]
$XC$	Expositionsklassen für Korrosionsgefahr, ausgelöst durch Karbonatisierung
$x$	Druckzonenhöhe [m]
$z$	Hebelarm [m]; Abstand zwischen der Resultierenden der Stahlspannungen und der Resultierenden der Betonspannungen

### Griechische Buchstaben

$\alpha$	Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung von Langzeitwirkungen auf die Betonfestigkeit und zur Umrechnung zwischen Zylinderdruckfestigkeit und einaxialer Druckfestigkeit des Betons [-]
$\alpha$	Parameter zur Beschreibung einer Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung [-]
$\alpha_e$	Verhältnis des E-Moduls des Stahls zum E-Modul des Betons [-]
$\alpha_{M/PB}$	Allokationskoeffizient
$\beta_t$	Völligkeitsbeiwert (Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen Rissen) [-]
$\gamma_c$	Teilsicherheitsbeiwert für Beton [-]
$\gamma_g$	Teilsicherheitsbeiwert für eine ständige Einwirkung [-]
$\gamma_q$	Teilsicherheitsbeiwert für eine veränderliche Einwirkung [-]
$\gamma_s$	Teilsicherheitsbeiwert für Stahl [-]
$\varepsilon_c$	Dehnung des Betons (negativ für Stauchung) [-]
$\varepsilon_{cm}$	mittlere Dehnung des Betons zwischen den Rissen (negativ für Stauchung) [-]
$\varepsilon_s$	Dehnung des Stahls (negativ für Stauchung) [-]
$\varepsilon_{sm}$	mittlere Dehnung des Stahls unter Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen (negativ für Stauchung) [-]

---

$\eta_1$	Abminderungsbeiwert zur Berücksichtigung besonderer Baustoffeigenschaften bei der Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung nach DIN 1045-1 [-]
$\varphi_v$	Verbundkriechzahl [-]
$\kappa$	geometrischer Beiwert zur Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung nach DIN 1045-1 [-]
$\mu$	Mittelwert einer Verteilung
$\mu_{Eds}$	in Höhe der Bewehrung einwirkendes Biegemoment, bezogen auf die Geometrie; Hilfwert zur Berechnung der erforderlichen Biegebewehrung im GZT [-]
$\psi$	Kombinationsbeiwert [-]
$\rho$	Dichte des Betons [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_1$	Längsbewehrungsgrad zur Bestimmung der Querkrafttragfähigkeit eines Bauteils ohne Querkraftbewehrung nach DIN 1045-1 [-]
$eff\rho$	effektiver Bewehrungsgrad, bezogen auf die wirksame Betonzugzone im Zustand II [-]
$\rho_{1, \text{grenz}}$	Grenzbewehrungsgrad der Längsbewehrung [-]
$\sigma$	Standardabweichung einer Verteilung
$\sigma_s$	Betonstahlspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau$	Verbundspannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{sm}$	zulässige Verbundspannung im einfach bewehrten Bereich [N/mm <sup>2</sup> ]
$\tau_{sml}$	zulässige Verbundspannung im Stoßbereich [N/mm <sup>2</sup> ]
$\omega$	Hilfwert zur Berechnung der erforderlichen Biegebewehrung im GZT [-]

# 1 Einführung

Zugbeanspruchte Übergreifungsstöße in Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung (Recyclingbeton) und in Beton aus natürlicher Gesteinskörnung (Ressourcenbeton) werden verglichen. Schlussfolgerungen für den Recyclingbeton bei der Konstruktion von Übergreifungsstößen und der Rissbreitenbegrenzung werden in ein Bemessungskonzept überführt. In einem Exkurs werden umweltökonomischer und wirtschaftlicher Nutzen des Recyclingbetons untersucht und können positiv bewertet werden.

## 1.1 Situation: Recyclingbeton, ein technisch umsetzbarer, wirtschaftlicher und ökologischer Baustoff?

Bei der Erstellung eines Bauwerks liegt neben den kritischen Faktoren wie Tragsicherheit, Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit in Zeiten knapper Kassen ein besonderes Gewicht auf der Wirtschaftlichkeit. Anforderungen an die Ökologie werden dem weit nachgeordnet. Das liegt daran, dass das Individuum bzw. der Betrieb, der die Investitionsentscheidung trifft, auch dafür haftet. Dies gilt jedoch nicht für die ökologischen Folgekosten der Entscheidung. Da die Investitionsentscheidung nach betriebswirtschaftlichen Maßstäben getroffen wird, bestimmt daher in der Regel die Höhe der Erstellungskosten des Bauwerks, ob und wie es gebaut wird. Als Konsequenz wird einer Bauweise, die ökologischer als die konventionelle Bauweise ist, normalerweise nur dann der Vorzug gegeben, wenn sie in der Erstellung wirtschaftlicher als die konventionelle ist. Die Frage, welche Bauweise bei der Bauwerkserstellung subjektiv wirtschaftlicher ist, ist damit relativ leicht zu beantworten. Schwieriger dagegen ist die Frage, welche Bauweise ökologischer ist. Im Rahmen der Arbeit, wird eine Bauweise als ökologisch definiert, wenn sie nur geringe Stoff- und Energieflüsse auslöst und sie darüber hinaus Freiräume erhält. Eine Auffassung, die sich in verschiedenen Gesetzen, Richtlinien und politischen Positionspapieren [2], [3] wieder findet.

Wird ein neuer Baustoff wie der Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung (Recyclingbeton) eingeführt, muss zuallererst jedoch nachgewiesen werden, dass mit ihm die oben genannten Anforderungen erfüllbar sind. Untersuchungen unter anderen von Meißner [37], Lü [35] und Roos [42], die bereits in Entwürfe zur Bemessung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung [65] eingeflossen sind, haben gezeigt, dass die Tragsicherheit für Bauteile aus Recyclingbeton gewährleistet werden kann. Auch die Einflüsse der rezyklierten Gesteinskörnungen auf die Dauerhaftigkeit sind z.B. durch Kerkhoff et al. [31] untersucht worden. Ergebnis der

Studien ist, dass unter bestimmten Einschränkungen die Dauerhaftigkeit für den Recyclingbeton sichergestellt werden kann.

Für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ist es nach Norm DIN 1045-1 [13] nötig, die Verformungen zu begrenzen, was als Teilaspekt in einem Bericht von Zilch et al. [65] untersucht wurde. Ein weiterer, wenn nicht sogar wichtigerer Aspekt der Gebrauchstauglichkeit ist die Begrenzung der Rissbreiten durch Einhaltung konstruktiver und bemessungstechnischer Regeln. Diese ist ein wesentliches Element der Dauerhaftigkeit, welches beiträgt, die Tragfähigkeit über die Lebensdauer sicherzustellen.

Bei der Begrenzung der Rissbreiten setzt nun der wesentliche Teil dieser Arbeit an. Es muss gezeigt werden, inwieweit Rissbreiten in Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung mit der Formel zur Rissbreitenberechnung in DIN 1045-1 bestimmt werden können, da einige Vereinfachungen, die König/Tue [34] in der der Formel zugrunde liegenden Arbeit getroffen haben, für den neuen Werkstoff nicht mehr gültig sind. Die Dissertation sollte daher in Bemessungsvorschlägen darstellen, wie man die Formel verändern muss, damit die Berechnung und damit die Beschränkung von Rissbreiten in Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung möglich werden. Da keine Versuche zu Rissbreiten in Recyclingbeton vorliegen, muss die Grundlage für den auszuarbeitenden Bemessungsvorschlag Ergebnisse aus eigenen, ausführlich dokumentierten Versuchen und Ableitungen aus Wissen über den Ressourcenbeton sein.

Auch das Thema der Bewehrungsregeln in Recyclingbeton mit Fragen zu Verbundlängen, wie sie Roos [42] aufwirft oder Rissbreiten und Tragsicherheit bei Übergreifungsstößen in Recyclingbeton, war zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit noch nicht behandelt. Daher sollten in der Arbeit unter Verwendung der Erkenntnisse von Eligehausen [24] sowie Betzle/Stöckl/Kupfer [1] eigene, angepasste Bewehrungsregeln für den Recyclingbeton erarbeitet und Versuche verifiziert werden.

Neben diesem technischen Schwerpunkt war das Thema der Wirtschaftlichkeit des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung zum Zeitpunkt der Erstellung der Dissertation noch nicht zufrieden stellend erarbeitet. Da rezyklierte Gesteinskörnungen aus Abbruchmassen wiederaufbereitet und je nach Verfügbarkeit normaler Gesteinskörnungen kostengünstiger als diese sind, wird erwartet, dass ein Beton aus rezykliertem Material auch günstiger angeboten werden kann als Ressourcenbeton. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch ein zu erwartender höherer Stahl und Zementbedarf pro m<sup>3</sup> Beton sowie ggf. weitere Zusatzkosten aus einer intensiveren Baustoffüberwachung. Die Arbeit sollte daher zeigen, inwieweit es sich bei Recyclingbeton unter den in der Arbeit getroffenen Annahmen um einen wirtschaftlichen Baustoff handelt.

Für den Bereich der Ökologie lagen zwar zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit Produktökobilanzen unter anderen von Eyerer [25] und Weil [53] vor, jedoch noch keine umweltökonomische Betrachtung der Energie- und Stoffflüsse und des Flächenbedarfs, insbesondere unter Einbeziehung eines möglichen Mehrbedarfs an Stahl und Zement. Dennoch vermutet der Autor, dass wenn rezyklierte anstelle von natürlichen Gesteinskörnungen für die Betonherstellung verwendet werden, die entsprechenden Abbruchmassen nicht deponiert und die natürlichen Gesteinskörnungen nicht gewonnen werden müssen und dass der Mehrbedarf an Stahl und Zement umweltökonomisch nicht ins Gewicht fällt. Ökologisch würde dies eine Reduzierung des Abfallaufkommens, der Materialentnahme und des Flächenbedarfs des Abbaulands ohne eine Beeinträchtigung der übrigen relevanten Energie- und Stoffflüssen bedeuten. Die Aufarbeitung bzw. die Belegung der angestellten Vermutung sollte ebenfalls in der Arbeit erfolgen.

## **1.2 Ziel: Ausarbeitung der technischen, ökologischen und ökonomischen Kennwerte des Baustoffs Recyclingbeton**

Das Ziel der Arbeit ist, Grundlagen zu schaffen, um im Recyclingbeton in der baupraktischen Anwendung Rissbreiten begrenzen und in Bezug auf den Verbund (Übergreifungs- und Verbundlängen) sicher konstruieren zu können. Die hierzu geleistete Forschungsarbeit soll in Form einer für die wissenschaftliche Öffentlichkeit leicht zugänglichen Dissertation dokumentiert werden. Damit werden die technischen Kennwerte des Baustoffs vervollständigt und eine Vergleichbarkeit zum Ressourcenbeton hergestellt. Weiterhin soll diese Arbeit einen Beitrag zu vergleichenden Untersuchungen zur Ökologie und Wirtschaftlichkeit der Baustoffe Recyclingbeton und Ressourcenbeton leisten und Kennwerte daraus ableiten.

In dieser Arbeit soll somit insgesamt untersucht werden, ob Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung ein technisch und wirtschaftlich realisierbarer Baustoff ist, der zusätzlich ökologische Vorteile gegenüber dem Ressourcenbeton aufweist.

## **1.3 Methodik und Aufbau der Arbeit: Anpassung der regulären Rissbreitenbegrenzung an den Recyclingbeton und umweltökonomischer Exkurs**

Die Forschung, die dem technischen Teil dieser Dissertation zugrunde liegt, wurde durch Gelder des bayerischen Umweltministeriums finanziert. Da es sich somit um öffentliche Forschungsgelder handelt, besteht eine besondere Verpflichtung gegenüber der Öffentlichkeit,

dass nicht nur um der Wissenschaft willen geforscht wird, sondern dass die Gesellschaft einen Mehrwert in Form eines ökologischen und wirtschaftlichen Baustoffs erhält. Dass es sich bei Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung wirklich um einen ökologischen und wirtschaftlichen Baustoff handelt, musste zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit jedoch noch bewiesen werden. Daher wird dem technischen Teil der Arbeit ein Exkurs vorangestellt, der die Fragen nach Ökologie und Wirtschaftlichkeit des Baustoffs im Vergleich zu Ressourcenbeton beantwortet, siehe Kapitel 2.

Der technische Teil dieser Arbeit umfasst die Kapitel 3 bis 7. In diesem Teil der Dissertation wird untersucht, wie Rissbreiten im Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung für die baupraktische Anwendung begrenzt werden können.

Hierzu dienen theoretische Überlegungen zu den Auswirkungen der Materialeigenschaften des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung auf die Rissbreiten. Geeignete Laborversuche sollen die gefundenen theoretischen Ansätze verifizieren. Grundlage und Beginn für die theoretischen Überlegungen und die Versuche sind jedoch die möglichen Anforderungen und die Materialkennwerte des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung, die in Kapitel 3 beschrieben werden.

In Kapitel 4 wird die Wahl der Geometrie, der Bewehrung und der Messeinrichtungen der Probekörper der Versuche dargestellt und erklärt. Es handelt sich bei den verwendeten Probekörpern um Biegebalken im Maßstab 1:1, für die Vergleichsdaten mit Ressourcenbetonprobekörpern aus früheren Forschungsarbeiten vorliegen. Die Art und Weise, wie die Versuchskörper untersucht worden sind, findet sich in Kapitel 5. In dem darauf folgenden Kapitel 6 werden die Ergebnisse der Versuche wiedergegeben, mit denen theoretische Überlegungen und bekannte mechanische Modelle abgeglichen werden. Sie führen zu Aussagen über den Einfluss der rezyklierten Gesteinskörnung auf das Trag- und Verformungsverhalten einschließlich der Rissbildung. Aus den Schlussfolgerungen des Kapitels 6 lassen sich Anwendungsregeln für Bemessung und Konstruktion von Stahlbetonbauteilen aus Recyclingbeton entwickeln, siehe Kapitel 7. Dieses Kapitel schließt den technischen Teil der Arbeit ab.

Die technischen Grundlagen, die in den Kapiteln 3 bis 7 gelegt sind, werden in Kapitel 8 exemplarisch angewendet. Dieser Abschnitt bildet gleichzeitig eine Schnittstelle zwischen den technischen Ausführungen und den wirtschaftlichen und ökologischen Untersuchungen, da sie eine Wirkungsabschätzung der technischen Änderungen auf das Produktsystem Beton bzw. Stahlbeton darstellt, auf die in Kapitel 2 zurückgegriffen wird.

---

Inhaltlich abgeschlossen wird die Arbeit durch das Kapitel 9, das die Zusammenfassung der Dissertation und die sich daraus ableitenden Empfehlungen umfasst.

Zusätzlich wird die Dissertation durch Inhalts-, Tabellen-, Abbildungs- und Literaturverzeichnisse sowie einer Erklärung von Begriffen und Formelzeichen abgerundet. Ebenfalls enthalten ist ein umfangreicher Anhang mit Matrizen und Tabellen für die umweltökonomische Untersuchung, mit Betonrezepten und einem Überblick über die Gesteinskörnungen. Darüber hinaus finden sich im Anhang der Arbeit die Ergebnisse der Nebenversuche, detaillierte Schal-, Bewehrungs- und Messungspläne, sowie eine Zusammenstellung der Messergebnisse, die beispielsweise Rissbilder und eine statistische Rissauswertung enthalten. Diese Anhänge ermöglichen ein Nachvollziehen der Arbeit.



---

## 2 Wirtschaftlichkeit und Ökologie des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung

In diesem Kapitel wird dargestellt, inwieweit der Baustoff bewehrter Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung (Stahlrecyclingbeton) das Potential hat, wirtschaftlicher und umweltschonender als Stahlressourcenbeton zu sein.

Stahlressourcenbeton wird mit einer Gesteinskörnung aus natürlichem Material hergestellt und ist ein zuverlässiger Baustoff. Beim Stahlrecyclingbeton wird das natürliche Material vollständig oder teilweise durch rezykliertes ersetzt. Dadurch entstehen gegenüber dem Stahlressourcenbeton andere Materialeigenschaften. Die Abweichung der beiden Baustoffe voneinander steigt hierbei mit dem Anteil des rezyklierten Materials an der Gesamtgesteinskörnung. Das bedeutet, dass veränderte Regeln im Umgang mit Stahlrecyclingbeton gelten müssen, siehe [8], [9].

Ab einem bestimmten Anteil rezyklierten Materials an der Gesamtgesteinskörnung ist darüber hinaus eine an die veränderten Materialeigenschaften des Stahlrecyclingbetons angepasste Bemessung<sup>1</sup> notwendig, um für Bauteile aus diesem Baustoff die in 1.1 vorgestellten Anforderungen noch erfüllen zu können. Die reguläre Stahlbetonbemessung nach Norm [13] ist hierbei nicht mehr gültig.

Veränderte Regeln oder sogar eine eigene Bemessung bringen zusätzlichen Aufwand mit sich. Aus diesem Grund muss der Stahlrecyclingbeton einen Mehrwert gegenüber Stahlressourcenbeton besitzen. Dieser Mehrwert ist die mögliche Umweltschonung. Wie in 1.1 bereits festgestellt, ist diese jedoch nicht Mehrwert genug. Zusätzlich sollte die Verwendung von Stahlrecyclingbeton wirtschaftlicher als die von Stahlressourcenbeton sein.

Ziel dieses Kapitels ist es also, zu zeigen, inwieweit die Verwendung von Stahlrecyclingbeton die Umwelt schonen kann und auch wirtschaftlich ist, um damit eine Legitimation für die technische Forschung am Baustoff Stahlrecyclingbeton herstellen zu können. Hierzu wird eine umweltökonomische Studie durchgeführt.

---

<sup>1</sup> Der technische Teil dieser Dissertation beschäftigt sich mit Grundlagen zur Erarbeitung einer angepassten Bemessung.

## 2.1 Ziel der umweltökonomischen Studie

Diese umweltökonomische Studie soll über die konkurrierenden Produktsysteme „Bewehrter Beton mit natürlicher Gesteinskörnung (Stahlressourcenbeton)“ und „Bewehrter Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung (Stahlrecyclingbeton)“ eine vergleichende Aussage bezüglich Ökologie und Wirtschaftlichkeit von der Rohstoffgewinnung bis zur Beseitigung systematisch und angemessen treffen. Hierzu soll in der Studie untersucht werden, welche Wirkung die Verwendung von Stahlrecyclingbeton anstelle von Stahlressourcenbeton auf die Energie- und Stoffflüsse und andere umweltökonomische Größen in der Bundesrepublik Deutschland hätte. Dazu sollen verschiedene, in der Praxis mögliche Szenarien für den Stahlrecyclingbeton in Bezug auf Zusammensetzung des Betons und notwendige Transporte der Gesteinskörnungen berücksichtigt werden.

Die Studie wird durchgeführt, um interessierten Personen und Gruppen und insbesondere Entscheidungsträgern in Politik und Wirtschaft in der Bundesrepublik Deutschland darzustellen, inwieweit Stahlrecyclingbeton eine umweltfreundliche und wirtschaftliche Alternative zu Stahlressourcenbeton ist. Hierbei sollen der Untersuchungsrahmen, die Annahmen, die Darstellung der Datenqualität, die Methodik und die Ergebnisse der Studie transparent und unvoreingenommen sein, siehe [22].

Zur Umsetzung des Teils der Studie, der sich mit den umweltrelevanten Aspekten der vergleichenden Aussage über die bewehrten Betone beschäftigt, ist eine Ökobilanz auf umweltökonomischer Ebene nahe liegend, siehe 2.1.1.

Die wirtschaftliche Betrachtung kann sehr detailliert erfolgen. Im Rahmen dieser Studie ist jedoch nur eine Abschätzung erforderlich, ob der Einsatz von Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung wirtschaftlich machbar erscheint, siehe 2.1.2.

### 2.1.1 Ökologische Ziele (Volkswirtschaftliche Sichtweise)

In diesem Abschnitt werden die ökologischen Ziele der Zielgruppe der Studie behandelt. Hierzu wird dargestellt, warum Entscheidungsträger aus der Politik diese Gruppe bilden und woran ihre ökologischen Ziele festgemacht werden können.

#### **Zielgruppe: Entscheidungsträger aus der Politik**

Entscheidungsträger aus der Politik bilden im Besonderen für die ökologischen Ziele die Zielgruppe der Studie. Um den Hintergrund für diese Festlegung zu erklären, wird versucht, die Zusammenhänge zwischen den beteiligten Akteuren darzustellen.

Die Ökologie ist als ein Teilgebiet der Biologie die Wissenschaft der Wechselbeziehungen zwischen Organismen untereinander und ihrer Umwelt mit ihren belebten und unbelebten Faktoren. Diese Wechselbeziehungen lassen sich mittels Stoff-, Energie- und Informationsflüssen in technischen Systemen darstellen, die sich in Wirtschaftssysteme mit monetären Strömen überführen lassen. Vereinfacht lässt sich dies wie folgt darstellen. Ein Individuum oder ein Betrieb trifft eine Investitionsentscheidung, die als Konsequenz nach sich zieht, dass knappe, ökologische Ressourcen dem Individuum oder dem Betrieb alloziert werden. Die ökologischen Ressourcen sind sowohl als Quelle (z.B. abbaubarer Kalkstein) wie auch als Senke (z.B. von der Atmosphäre aufnehmbares CO<sub>2</sub>) zu verstehen, wie Faulstich et al. [26] darstellen. Durch die Allokation stehen die ökologischen Ressourcen anderen Individuen und Betrieben nicht mehr zur Verfügung. Diese Zusammenhänge beschreibt das Fachgebiet der Umweltökonomie, welches ein Teilgebiet der Volkswirtschaftslehre ist.

Der Staat bzw. die Entscheidungsträger in der Politik greifen u. a. durch Gesetze, Verordnungen aber auch freiwillige Verträge mit der Wirtschaft in die Umweltökonomie ein oder bestimmen zumindest ihre Rahmenbedingungen. Damit sind die Akteure der Umweltökonomie Individuen, Betriebe und der Staat bzw. die politischen Entscheidungsträger.

In 1.1 wurde bereits erwähnt, dass die Entscheidungen der Individuen und Betriebe in der Regel betriebswirtschaftlich bestimmt werden. Es wird daher angenommen, dass für diese Gruppe eine umweltökonomische Studie nur mittelbar über politische Entscheidungen (Gesetze, Verordnungen, Steuern) wesentlich wird.

Anders stellt sich die Situation für den Staat und politische Entscheidungsträger dar. Deren Ziele umfassen u. a. eine ökologisch nachhaltige Wirtschaftsentwicklung. Somit kann eine vergleichende, umweltökonomische Studie über die zwei betrachteten Produktsysteme Optionen zur Erreichung dieser Ziele darstellen und bewerten. Dadurch wird diese Studie besonders für politische Entscheidungsträger interessant.

Hinzu kommt, dass eine besondere Verpflichtung gegenüber der öffentlichen Hand vorliegt, die ökologischen Vor- und Nachteile der Produktsysteme Stahlressourcenbeton und Stahlrecyclingbeton gegenüberzustellen und zu bewerten, siehe 1.3.

### **Grundlage der ökologischen Ziele: Gesetze, Leitlinien und Verträge**

Die Studie ist insbesondere auf die Belange von Entscheidungsträgern aus der Politik hin ausgerichtet. Die ökologischen Ziele dieser Studie werden daher entwickelt aus dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [33], der Nachhaltigkeitsstrategie der deutschen Bundesregie-

rung „Perspektiven für Deutschland“ [3] und der Vereinbarung „Umweltpakt Bayern“ zwischen der bayerischen Staatsregierung und der bayerischen Wirtschaft [2]. Hintergrund dieser drei Papiere ist die Idee der nachhaltigen Entwicklung<sup>2</sup>.

Für die Studie werden nur solche ökologischen Ziele der genannten Papiere berücksichtigt, die einen direkten Bezug zum Stahlbeton haben. Dies ist z.B. die Reduzierung der Luftschadstoffe, der Treibhausgase und des Energieverbrauchs infolge des Stahl- und des Zementanteils des bewehrten Betons. Die Gewinnung von Steinen und Erden für Zementproduktion und die für den Beton ebenfalls notwendigen Gesteinskörnungen erfordert darüber hinaus die Betrachtung von Flächeninanspruchnahme, Ressourcennutzung und Abfallaufkommen.

Ein weiteres, einzubeziehendes Papier ist das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz. Es schafft einen unmittelbaren Bezug zum Stahlbeton, da das Hauptziel des Gesetzes die Schonung unter anderen der natürlichen Ressourcen ist, die zur Herstellung des Stahlbetons nötig sind. Dem Hauptziel nachgeordnet sind die Vermeidung von Abfällen und zuletzt die stoffliche oder energetische Verwertung von Abfällen.

Auch in der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung [3] steht die Ressourcenschonung an erster Stelle. Die Reduzierung des Verbrauchs knapper und endlicher Energierohstoffe sowie sonstiger Ressourcen und die Erhöhung der Energieproduktivität und Ressourcenproduktivität werden angestrebt. Weiterhin wird im Rahmen des Klimaschutzes gefordert, Treibhausgase zu reduzieren, und im Rahmen der Flächeninanspruchnahme sollen Freiräume erhalten werden. Zusätzlich sollen Luftschadstoffe reduziert werden.

Im Umweltpakt Bayern [2] finden sich nahezu die gleichen für den Stahlbeton relevanten Ziele wie in der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung. Für die Ressourcenschonung wird im Umweltpakt in erster Linie die Steigerung von Energie- und Wasserproduktivität gefordert.

Folgende ökologischen Ziele werden unter Berücksichtigung des politischen Willens und des direkten Bezugs zum Stahlbeton für diese Studie aufgestellt. Durch die Verwendung von Stahlrecyclingbeton anstelle von Stahlressourcenbeton sollen in der Bundesrepublik Deutschland

- natürliche Ressourcen durch Reduzierung des Verbrauchs geschont,

---

<sup>2</sup> Nach Definition der World Commission on Environment and Development (WCED) [58] entspricht die nachhaltige Entwicklung „den Bedürfnissen der heutigen Generationen [...], ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen.“

- Treibhausgase und Luftschadstoffe reduziert,
- Abfälle vermieden und
- Freiräume erhalten bzw. die Flächeninanspruchnahme verringern werden.

Diese Ziele können umweltökonomisch als die Reduzierung von Energie- und Stoffflüssen, bzw. Bestandsgrößen (Flächeninanspruchnahme) in der Bundesrepublik Deutschland definiert werden. In Bezug auf das oben erwähnte Quelle-Senke-Konzept [26] werden im Weiteren die Energie- und Stoffflüsse auch als Input-Output-Flüsse (I/O-Flüsse) bezeichnet.

### **2.1.2 Ökonomische Ziele (Betriebswirtschaftliche Sichtweise)**

In 2.1.1 wurden die für die Studie wichtigsten Akteure vorgestellt. Es sind dies zum einen die Individuen bzw. Betriebe in der Rolle des Bauherren (Nachfrage) oder der Bauwirtschaft (Angebot) und zum anderen der Staat bzw. politische Entscheidungsträger.

Für erstere Gruppe ist die wirtschaftliche oder vielmehr die betriebswirtschaftliche Bewertung der vergleichenden Studie maßgebend. Für die zweite Gruppe gilt dies weniger, da sie eher Rahmenbedingungen (z.B. Umweltpakt) schafft als aktiv in die Wirtschaft einzugreifen. Der wirtschaftliche Aspekt der Studie ist daher in hohem Maße auf die Bedürfnisse von Bauherren und Bauwirtschaft ausgerichtet. Damit ist das Ziel des wirtschaftlichen Teils der Studie, zu zeigen, inwieweit sich die Hauptkosten für den Rohbau eines Bauwerks aus Stahlrecyclingbeton von denen eines Rohbaus aus Stahlressourcenbeton unterscheiden.

Die Abschätzung der Kosten soll über eine Modellrechnung erfolgen, siehe 8.2 und in die Wirkungsabschätzung, siehe 2.4, einfließen.

## **2.2 Untersuchungsrahmen der Studie**

Der hier beschriebene Untersuchungsrahmen der Studie bezieht sich auf die umweltökonomischen Aspekte der Zieldefinition. Im Rahmen dieser wird die auf die Bundesrepublik Deutschland bezogene, volkswirtschaftliche Betrachtung der Produktsysteme Stahlressourcenbeton und Stahlrecyclingbeton gefordert. Die Studie bewegt sich somit auf zwei Ebenen, der volkswirtschaftlichen (auch umweltökonomischen) Ebene und der Produktebene.

Die Berücksichtigung der Produktebene orientiert sich an einer regulären Ökobilanz. Die Anforderungen an den Untersuchungsrahmen folgen somit DIN EN ISO 14040 [22].

Die volkswirtschaftliche Ebene ist mit der umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR) für die Bundesrepublik Deutschland [48], [49] verknüpft und fließt in die Ökobilanz ein.

### **2.2.1 Funktionen der Produktsysteme – Funktionelle Einheit**

Die Funktionen der Produktsysteme gliedern sich in eine Produktebene und eine umweltökonomische Ebene und werden im Folgenden für diese Studie festgelegt.

#### **Produktebene**

Die Hauptfunktion des Stahlbetons auf Produktebene liegt darin, Baustoff für tragende Bauteile in einem Bauwerk zu sein.

Für die funktionelle Einheit (FE) auf Produktebene ist der Stahlbeton aus Beton und Betonstahl (Bewehrung) aufgebaut. Der Beton selbst besteht aus Gesteinskörnungen, Zement, Betonzusatzstoffen (Typ II nach Norm [21]) und Wasser. Er soll unter Verwendung des Zements CEM I 32,5 die Druckfestigkeitsklasse C20/25 nach DIN 1045-1 [13] oder die Druckfestigkeitsklasse B25 nach DIN 1045 [12] erreichen. Dabei soll der Wasserbindemittelwert auf 0,65 eingestellt sein. Als Betonstahl darf Stab- oder Mattenstahl der Güte BSt 500 verwendet werden.

Um den gesamten Rohbaubereich abzudecken, siehe 2.1, wird gefordert, dass aus dem Beton sowohl ein Innen- als auch ein Außenbauteil hergestellt werden kann. Dabei soll der bewehrte Beton (Stahlbeton) so bemessen sein, dass er seine Funktionen bzgl. Tragfähigkeit, Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit erfüllen kann.

#### **Umweltökonomische Ebene**

Die FE dient auf umweltökonomischer Ebene in erster Linie dazu, die Input- und Outputflüsse (I/O-Flüsse) und die Bestandsgrößen quantitativ auf das Produktsystem zu beziehen. Grundlage hierfür ist der Stahlressourcenbeton.

Da die Studie die UGR [49] verarbeiten soll und von dort die I/O-Flüsse und Bestandsgrößen übernommen werden, wird die FE für den Beton als die Gesamtheit der Ressourcenbetonmenge für bauliche Zwecke für das Referenzjahr in der Bundesrepublik Deutschland gewählt. Die Bewehrung wird im Rahmen der FE als Gesamtmenge des Betonstahls im Referenzjahr in der Bundesrepublik Deutschland definiert. Unbewehrter Ressourcenbeton geht in die volkswirtschaftliche Gesamtmenge des Ressourcenbetons ein. Für den vorgespannten Ressourcenbeton werden die Mengen an Beton und Betonstahl in den jeweiligen Gesamtmenen berücksichtigt. Die Menge an Spannstahl ist volkswirtschaftlich vernachlässigbar. Es entsteht somit ein umweltökonomischer Durchschnittsbeton, von dem angenommen wird, dass er dem auf Produktebene definierten Beton näherungsweise entspricht.

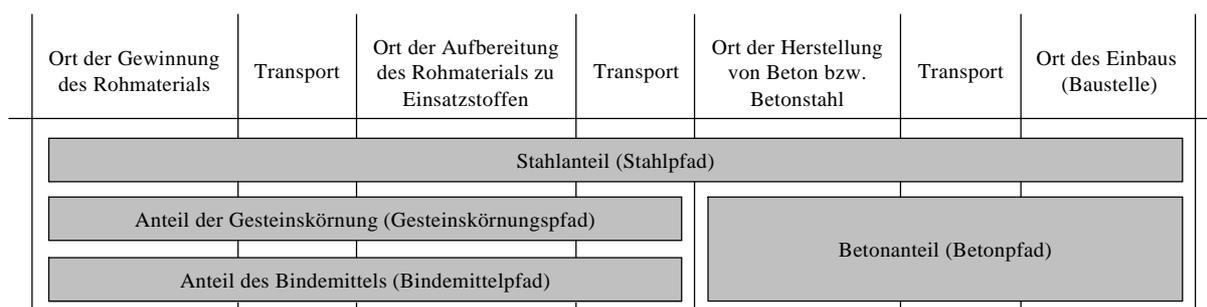
Recyclingbeton wird in der Bundesrepublik Deutschland bisher nur für Demonstrationsprojekte und in Ausnahmefällen verwendet, siehe Zilch et al. [66]. Volkswirtschaftlich ist die Menge vernachlässigbar. Eine vergleichende umweltökonomische Aussage über den Ist-Zustand ist somit nicht sinnvoll. Daher wird untersucht, welche umweltökonomischen Änderungen sich ergeben würden, wenn der in der Bundesrepublik Deutschland verwendete Stahlressourcenbeton durch Stahlrecyclingbeton ersetzt würde. Das bedeutet, dass sich die FE des Stahlrecyclingbetons ebenfalls auf die Gesamtmenge des Ressourcenbetons und des Betonstahls im Referenzjahr für die Bundesrepublik Deutschland bezieht.

### 2.2.2 Systemgrenzen und Module

Nach Norm [22] legen die Systemgrenzen fest, welche Module in der Sachbilanz enthalten sind. Darüber hinaus muss für die Module festgelegt werden, auf welches System oder welchen Einzugsbereich sie sich beziehen. Es ist darauf zu achten, dass die Inputs und Outputs an den Systemgrenzen Elementarflüsse sind. Dies ergibt sich aus der Forderung nach der Betrachtung des Produktsystems Stahlbeton über seinen gesamten Lebensweg.

Stahlbeton besteht aus Betonstahl und Beton, siehe 2.2.1. Der Beton wiederum wird hauptsächlich aus den Einsatzmitteln Gesteinskörnung, Bindemittel und Wasser hergestellt. Betonzusatzmittel werden aufgrund ihres geringen Anteils in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Die Module in den Grenzen des Produktsystems Stahlbeton lassen sich den Bestandteilen nach zuordnen. Es entstehen dabei Ketten von Modulen, den so genannten Modulpfaden oder Einsatzmittelpfaden, siehe Bild 1.



**Bild 1 Produktsystem Stahlbeton mit den Pfaden der Bestandteile**

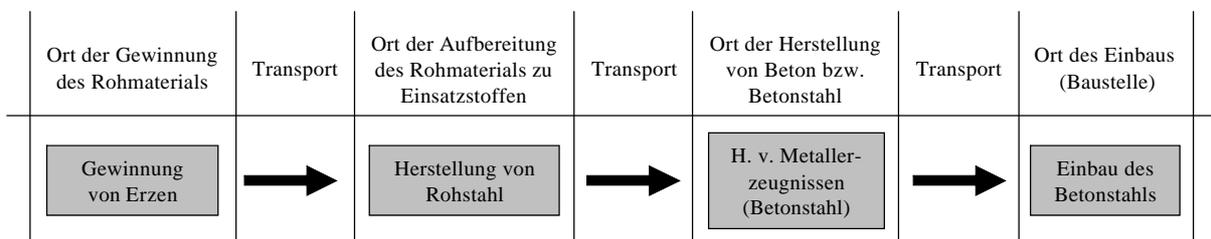
Für das Produktsystem Stahlbeton werden im Rahmen dieser Studie der Stahlpfad, der Gesteinskörnungspfad, der Bindemittelpfad und der Betonpfad gebildet. Wasser hat deshalb keinen eigenen Pfad, da der Wassereinsatz bereits in den I/O-Flüssen der anderen Bestandteile berücksichtigt ist.

## Betonstahlpfad

Der Elementarinputfluss des Betonstahlpfades beginnt mit dem Abbau am Ort der Gewinnung der Eisenerze. Die Gewinnung des Eisenerzes selbst ist das erste Modul des Pfads. Es folgt das Modul „Transport vom Ort der Gewinnung zum Ort der Aufbereitung“.

Das dritte Modul beschreibt die Herstellung des Rohstahls aus Eisenerz. Es folgt ein weiteres Transportmodul, welches die Beförderung des Rohstahls vom Ort seiner Herstellung zum Ort der Herstellung des Betonstahls beschreibt. Die Herstellung des Betonstahls aus dem Rohstahl ist das fünfte Modul des Pfads. Daran schließt sich ein Transportmodul an, das den Transport des Betonstahls zum Ort des Einbaus (Neubaustelle oder Fertigteilwerk) abbildet. Das letzte Modul des Stahlpfades ist der Einbau des Betonstahls.

Näherungsweise wird von einer Recyclingquote von 100% für den Stahl ausgegangen. Sämtliche Stoffflüsse nach dem Modul „Einbau des Betonstahl“ werden den Produkten zugeschlagen, die den Stahl aus dem bestehenden Gebäude z.B. im Rahmen eines Recyclings verwenden. Für den betrachteten Betonstahlpfad werden diese Aufwendungen näherungsweise mit den Modulen „Gewinnung von Erzen“ und „Herstellung von Rohstahl“ abgegolten. Damit gibt es rechnerisch keinen Elementaroutputfluss und der Pfad endet am Ort des Einbaus des Betonstahls (Neubaustelle). Der gesamte Stahlpfad ist in Bild 2 dargestellt.



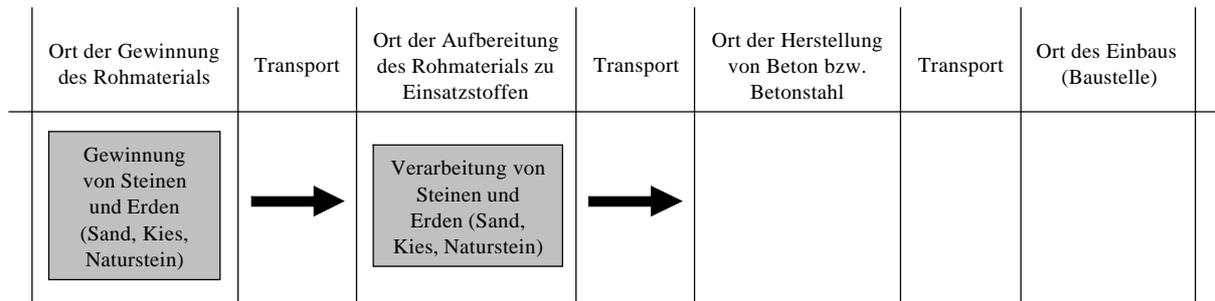
**Bild 2 Betonstahlpfad des Produktsystems Stahlbeton**

## Gesteinskörnungspfad (natürliche Gesteinskörnung)

Der Elementarinputfluss des Gesteinskörnungspfades (natürliche Gesteinskörnung) beginnt mit dem Abbau am Ort der Gewinnung von Steinen und Erden. Die geförderten Steine und Erden sind hier insbesondere Sand, Kies und Naturstein.

Die Gewinnung von Steinen und Erden ist das erste Modul des Pfads. Es folgt das Modul „Transport vom Ort der Gewinnung zum Ort der Aufbereitung“. Das dritte Modul beschreibt die Verarbeitung (ggf. Brechen, Sieben) der Steine und Erden zu Gesteinskörnungen für die Betonproduktion. Der Pfad endet mit dem Transportmodul, welches die Beförderung der Gesteinskörnungen vom Ort seiner Aufbereitung zum Ort der Herstellung des Betons beschreibt.

Ein Elementaroutputfluss existiert für die Gesteinskörnung nicht, da die Gesteinskörnung vollständig im Produkt Beton aufgeht und dort im Elementaroutputfluss berücksichtigt wird. Der vollständige Gesteinskörnungspfad (natürliche Gesteinskörnung) ist in Bild 3 dargestellt.



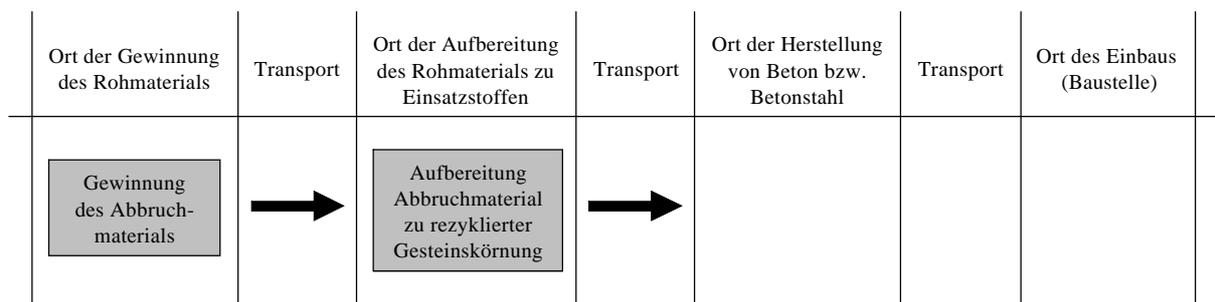
**Bild 3 Gesteinskörnungspfad (natürliche Gesteinskörnung) des Produktsystems Stahlbeton**

**Gesteinskörnungspfad (rezyklierte Gesteinskörnung)**

Für den Gesteinskörnungspfad (rezyklierte Gesteinskörnung) existiert kein Elementarinputfluss. Der Pfad beginnt mit dem Modul der Gewinnung des Abbruchmaterials durch Rückbau eines bestehenden Betonbauwerks. Es folgt das Modul „Transport vom Ort der Gewinnung zum Ort der Aufbereitung“. Das dritte Modul beschreibt die Aufbereitung (Brechen, Sieben) des Betonbruchs zu rezyklierten Gesteinskörnungen für die Betonproduktion. Der Pfad endet mit dem Transportmodul, welches die Beförderung der Gesteinskörnungen vom Ort seiner Aufbereitung zum Ort der Herstellung des Betons beschreibt.

Ein Elementaroutputfluss existiert für die Gesteinskörnung nicht, da die Gesteinskörnung vollständig im Produkt Beton aufgeht und dort im Elementaroutputfluss berücksichtigt wird.

Der Gesteinskörnungspfad ist in Bild 4 dargestellt.



**Bild 4 Gesteinskörnungspfad (rezyklierte Gesteinskörnung) des Produktsystems Stahlbeton**

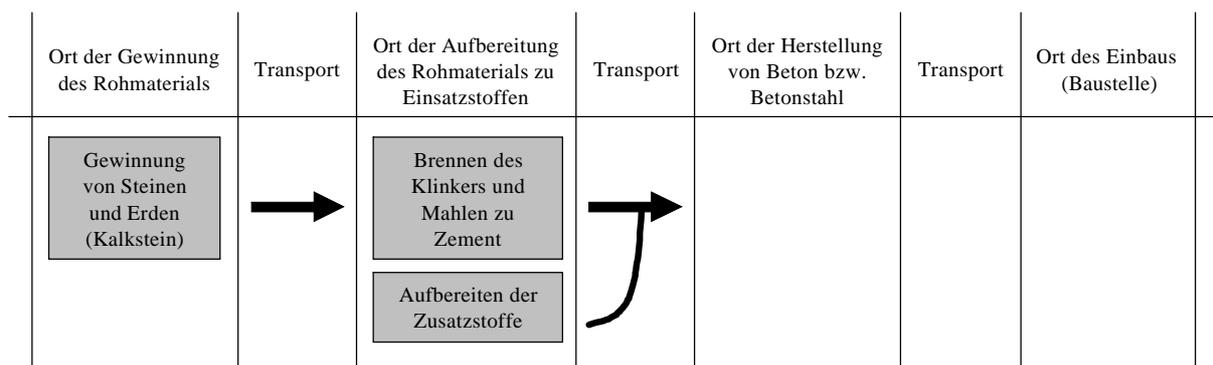
**Bindemittelpfad**

Der Elementarinputfluss des Bindemittelpfads beginnt mit dem Abbau am Ort der Gewinnung von Steinen und Erden. Gefördert wird hier insbesondere Kalkstein.

Die Gewinnung von Steinen und Erden ist das erste Modul des Pfads. Es folgt das Modul „Transport vom Ort der Gewinnung zum Ort der Aufbereitung“. Das dritte Modul beschreibt die Verarbeitung der Steine und Erden zu Zement für die Betonproduktion. Die Verarbeitung umfasst das Brennen des Kalksteins zu Klinker, das Mahlen des Klinkers und die Mischung zu Zement. Parallel zu diesem Modul befindet sich das Aufbereiten der Zusatzstoffe für die Betonproduktion. Berücksichtigt werden nur Zusatzstoffe des Typs II nach DIN EN 206 [21] (z.B. Flugasche), da nur diese als Bindemittel angerechnet werden können. Auf dieses Modulpaar folgt ein Transportmodul, mit welchem der Transport des Bindemittels, bestehend aus Zement und Zusatzstoffen, vom Ort seiner Herstellung zum Ort der Herstellung des Betons modelliert wird. Der Bindemittelpfad endet mit diesem Transportmodul.

Ein Elementaroutputfluss existiert für das Bindemittel nicht, da es vollständig im Produkt Beton aufgeht und dort im Elementaroutputfluss berücksichtigt wird.

Der Bindemittelpfad ist in Bild 5 dargestellt.



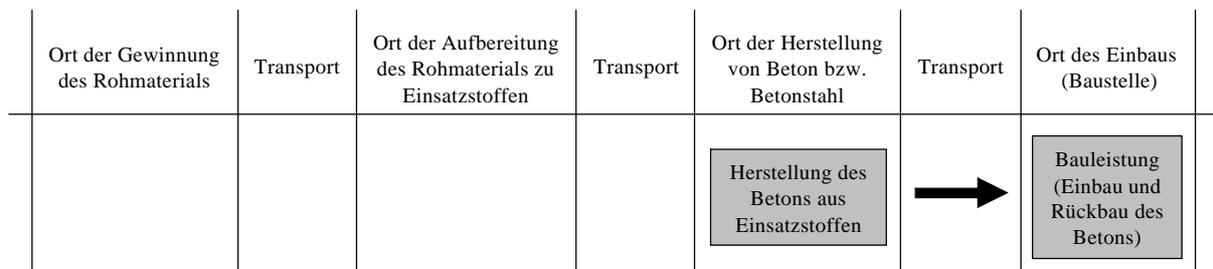
**Bild 5 Bindemittelpfad des Produktsystems Stahlbeton**

### Betonpfad

Für den Betonpfad existiert kein Elementarinputfluss, siehe Bild 1. Er wird aus dem Gesteinskörnungs- und dem Bindemittelpfad gespeist.

Die Herstellung des Betons aus den Einsatzstoffen ist das erste Modul des Pfads. Dieses Modul kann den Ort der Betonherstellung sowohl als Transportbetonwerk (Ortbeton) als auch als Betonfertigteilwerk beschreiben. Hierbei macht es für den Transport des Betons bezüglich der Transportleistung keinen Unterschied, ob der Beton in flüssigem oder festem Zustand transportiert wird. Es wird weiterhin genähert, dass es bilanztechnisch gleichwertig ist, ob der Stahl getrennt vom Beton (Ortbeton) oder zusammen mit dem Beton (Fertigteil) transportiert wird. Somit kann das zweite Modul den Transport vom Ort der Betonproduktion zum Ort des Einbaus beschreiben.

Das dritte und letzte Modul beschreibt die Bauleistung des Einbaus des Betons. Dies kann als Montage eines Fertigteils oder als Betonage (z.B. über eine Betonpumpe oder mittels einer an einen Kran gehängten Betonbombe) eines Bauteils vor Ort geschehen. Zusätzlich wird diesem Modul der Rückbau (Abbruch) des Bauteils zugeordnet. Es wird weiterhin genähert, dass bilanztechnisch über die eigentliche Standdauer des Bauteils keine I/O-Flüsse berücksichtigt werden müssen. Während der Standdauer ist die Bestandsgröße Freiraum zwar durch den Platzverbrauch des Bauteils betroffen, diese Bestandsgröße wird hier jedoch nicht dem Bauteil zugeordnet sondern der Funktion Wohnen, da sie weniger vom Baustoff als von der Art des Bauwerks (Ein- oder Mehrfamilienhaus) abhängt. Der Betonpfad endet mit dem dritten Modul. Ihm wird insbesondere der Elementaroutputfluss „Abfallaufkommen“ zugeordnet. Die Berücksichtigung einer Recyclingquote ist hier möglich. In Bild 6 ist der Pfad vollständig dargestellt.



**Bild 6 Betonpfad des Produktsystems Stahlbeton**

### Bezugssystem der Module

Die ökobilanzielle Betrachtung bezieht sich auf die UGR, die somit das Bezugssystem der Module bestimmen. Das geographische Bezugssystem ist folglich die Bundesrepublik Deutschland. Als zeitliches Bezugssystem dient das Kalenderjahr.

Die zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit aktuelle und umfassendste Aufstellung von Energie- und Stoffflüssen der verwendeten UGR [49] lagen für das Jahr 2001 vor. Dieses Jahr wird als Referenzjahr gewählt, auf das sich die Module beziehen.

Die Module liegen in den UGR bei weitem nicht so differenziert vor, wie sie in dieser Studie definiert worden sind. Es existieren nur die wesentlich größeren, kommerziellen Produktionsbereiche und ein Modul, welches den Konsum der privaten Haushalte im Inland beschreibt. Letzteres wird für die Sachbilanz ausgeklammert und später nur noch zur Information in der Bewertung berücksichtigt. Es ist jedoch möglich, die Module anteilmäßig den Produktionsbereichen zuzuordnen. Somit können die Energie- und Stoffflüsse der Produktionsbereiche den Modulen zugeordnet werden, siehe 2.2.4. Hierbei bilden die Module des Pfades der re-

zyklierten Gesteinskörnungen eine Ausnahme. Sie werden über Szenarien direkt alloziert, siehe ebenfalls 2.2.4.

Die Zuordnung sämtlicher Module auf die Produktionsbereiche ist nach den Pfaden geordnet in den Tabellen in Anhang A.1 dargestellt. In diesen Tabellen ist zu den Produktionsbereichen ihre CPA-Bereichsabgrenzung nach UGR angegeben. Diese ist vergleichbar mit der Statistischen Güterklassifikation in Verbindung mit den Wirtschaftszweigen in der Europäischen Gemeinschaft (Ausgabe 1993).

### 2.2.3 Baustoff- und Transportszenarien der Produktsysteme

In den Zielen dieser Stahlressourcen- und Stahlrecyclingbeton vergleichenden Studie, siehe 2.1.1, wird gefordert, in der Praxis mögliche Szenarien für den Stahlrecyclingbeton in Bezug auf die Zusammensetzung des Betons und der notwendigen Transporte der Gesteinskörnungen zu berücksichtigen. Der Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung wird daher in drei repräsentativen, unterschiedlichen Zusammensetzungen untersucht. Für den Ressourcenbeton wird eine „Durchschnittsmischung“ berücksichtigt.

#### BaustoffszENARIO B0 - Ressourcenbeton

Für den Ressourcenbeton wird die Durchschnittsmischung B0 berücksichtigt, die Eyerer [25] zur Ökobilanzierung verwendet. Mit dieser Mischung wird die Druckfestigkeitsklasse B25 nach DIN 1045 [12] angestrebt, die näherungsweise der Druckfestigkeitsklasse C20/25 nach DIN 1045-1 [13] entspricht. Der Wasser-Bindemittel-Wert der Mischung ist 0,65. Das Betonrezept ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Ausgangsstoffe	Masse [kg]	Dichte [kg/l]	Volumen [l]
Zuschlag natürlich	1840	2,6	708
Zuschlag rezykliert	0	2,6	0
Zement	260	3,1	84
Wasser	185	1,0	185
Flugasche	80	3,1	26
Summe	2365		1000

**Tabelle 1 Betonmischung B0 – Ressourcenbeton**

#### BaustoffszENARIO B1 – Recyclingbeton „Demobauwerk“

Der erste Recyclingbeton der Baustoffszenarios basiert auf einem pumpbaren Beton der Druckfestigkeitsklasse B25 mit Natursand und rezyklierter Grobkörnung, wie er im Rahmen eines Demobauwerks in München eingesetzt wurde, siehe Zilch et al. [66]. Der Wasser-Bindemittelwert betrug 0,54.

Der auf der Baustelle verwendete Beton erreichte wesentlich höhere Festigkeiten als für die Druckfestigkeitsklasse B25 erforderlich ist und ist damit nicht mit dem Ressourcenbeton B0 funktional vergleichbar. Da allgemein die Druckfestigkeit mit dem Wasser-Bindemittelwert (w/b-Wert) korreliert, wird zur Sachbilanzierung eine Zusammensetzung B1 ermittelt, die mittels baupraktischer Stoffraumrechnung auf den w/b-Wert des Vergleichsbetons B0 normiert ist. Bei dieser Stoffraumrechnung ist der von der Gesteinskörnung abhängige Wasseranspruch zu berücksichtigen. Für den Recyclingbeton „Demobauwerk“ B1 ergibt sich somit die in Tabelle 2 dargestellte Zusammensetzung. Die Dichte der rezyklierten Gesteinskörnung kann im Rahmen der Sachbilanz entsprechend der Tabelle 2 genähert werden.

Ausgangsstoffe	Masse [kg]	Dichte [kg/l]	Volumen [l]
Zuschlag natürlich	1350	2,6	519
Zuschlag rezykliert	490	2,6	188
Zement	260	3,1	84
Wasser	185	1,0	185
Flugasche	80	3,1	26
Summe	2365		1000

**Tabelle 2 Betonmischung B1 – Recyclingbeton „Demobauwerk“**

### BaustoffszENARIO B2 – 100% Recyclingbeton

Der zweite Recyclingbeton basiert auf der Labormischung „1“, siehe Kapitel 3.4. Er besteht im Gesteinskörnungsanteil komplett aus rezykliertem Betonbruch. Die im Labor untersuchten Mischungen hatten einen w/b-Wert von 0,74 und erwartungsgemäß eine für einen B25 zu geringe Druckfestigkeit. Entsprechend des Vorgehens für Mischung B1 wird daher die Mischung B2 ebenfalls auf den w/b-Wert der Mischung B0 normiert. Für den Recyclingbeton B2 ergibt sich damit die in Tabelle 3 dargestellte Zusammensetzung.

Ausgangsstoffe	Masse [kg]	Dichte [kg/l]	Volumen [l]
Zuschlag natürlich	0	2,6	0
Zuschlag rezykliert	1745	2,6	671
Zement	280	3,1	90
Wasser	205	1,0	205
Flugasche	110	3,1	35
Summe	2340		1000

**Tabelle 3 Betonmischung B2 – 100% Recyclingbeton**

### BaustoffszENARIO B3 – Recyclingbeton mit Natursand

Der dritte Recyclingbeton basiert auf der Labormischung „2“, siehe Kapitel 3.4. Er besteht im Grobkörnungsanteil komplett aus rezykliertem Betonbruch. Der Sandanteil besteht aus natürlichem Material. Die im Labor untersuchten Mischungen hatten einen w/b-Wert von 0,78 und erwartungsgemäß eine für einen B25 zu geringe Druckfestigkeit. Entsprechend des Vorge-

hens für Mischung B1 und B2 wird die Mischung B3 ebenfalls auf den w/b-Wert der Mischung B0 normiert. Für den Recyclingbeton B3 ergibt sich damit die in Tabelle 4 dargestellte Zusammensetzung.

Ausgangsstoffe	Masse [kg]	Dichte [kg/l]	Volumen [l]
Zuschlag natürlich	660	2,6	254
Zuschlag rezykliert	1180	2,6	454
Zement	260	3,1	84
Wasser	185	1	185
Flugasche	80	3,1	26
Summe	2365		1000

**Tabelle 4 Betonmischung B3 – Recyclingbeton mit Natursand**

### Transportszenarien

Die im Rahmen der Pfade des Stahlressourcenbetons, siehe Bild 2, Bild 3, Bild 5 und Bild 6, verwendeten Transportmodule sind bezüglich der durchschnittlich zurückgelegten Entfernungen und der durchschnittlich verwendeten Transportmittel bekannt, siehe 2.2.4. Diese Module stellen das Transportszenario T0 dar.

Für den Recyclingbeton und insbesondere den Pfad der rezyklierten Gesteinskörnungen, siehe Bild 4, sind die Transportmodule bezüglich Entfernung und Transportmittel nicht bekannt. Es werden zwei Szenarien modelliert, die mögliche Konstellationen berücksichtigen.

Transportszenario T1 geht davon aus, dass die in der Mischung verwendeten rezyklierten Gesteinskörnungen an dem Ort gewonnen, aufbereitet und zu Beton verarbeitet werden können, an dem auch der Einbau des damit hergestellten Betons erfolgt. Damit ist der Ort des Abbruchs gleich dem Ort des Neubaus.

Ort der Gewinnung des Rohmaterials	Transport	Ort der Aufbereitung des Rohmaterials zu Einsatzstoffen	Transport	Ort der Herstellung von Beton bzw. Betonstahl	Transport	Ort des Einbaus (Baustelle)
Gewinnung des Abbruchmaterials	T1: kein Transport T2: Transport nötig	Aufbereitung Abbruchmaterial zu rezykliertem Gesteinskörnung	T1: kein Transport T2: Transport nötig	Herstellung des Betons aus Einsatzstoffen	T1: kein Transport T2: Transport nötig	Bauleistung (Einbau und Rückbau des Betons)

**Bild 7 Transportszenarien T1 und T2**

Transportszenario T2 geht davon aus, dass die in der Mischung verwendeten rezyklierten Gesteinskörnungen an einem bestimmten Ort A gewonnen werden, dann zur Sammlung und Aufbereitung zu einer Sammelstelle an Ort B kommen, weiter an Ort C zu Beton verarbeitet

werden und schließlich an Ort D als Beton eingebaut werden. Damit sind in der Regel der Ort des Abbruchs und der Ort des Neubaus verschieden.

Die Szenarien T1 und T2 werden zur Übersicht in Bild 7 dargestellt.

#### **2.2.4 Datensammlungs-, Berechnungs- und Allokationsverfahren**

Die in dieser Studie verwendeten Daten werden für die Sachbilanz mittels eines Top-down-Ansatzes verarbeitet. Datengrundlage sind die nach Produktionsbereichen differenzierten I/O-Flüsse und Bestandsgrößen nach UGR [49]. Diese werden durch geeignete Zusatzinformationen und Annahmen den Modulen des Produktsystems Stahlbeton zugeordnet. Die dem Produktsystem zugeordneten I/O-Flüsse und Bestandsgrößen werden auch als Sachbilanzdaten bezeichnet.

##### **Datensammlung mit Top-down-Ansatz**

Zur Datensammlung wird ein Top-down-Ansatz gewählt, wie ihn auch Kohler et al. [32] für die Beschreibung von Stoffflüssen und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen benutzt.

Die Ausgangsinformationen sind Daten aus allgemein zugänglichen Statistiken wie den UGR oder den Umweltinformationen der deutschen Zementindustrie [52]. In diesen Statistiken werden I/O-Flüsse und Bestandsgrößen von Produkten und Produktionsbereichen für die Bundesrepublik Deutschland jeweils bezogen auf ein Jahr als Zeitreihen dargestellt.

Für die Produktionsbereiche in Zusammenhang mit rezyklierten Gesteinskörnungen sind die I/O-Flüsse und Bestandsgrößen nicht bekannt. Für die Erfassung der rezyklierten Gesteinskörnungen werden daher Produktionsbereiche mit prognostizierten I/O-Flüssen und Bestandsgrößen gebildet. Grundlage der Prognose ist der Austausch des Stahlressourcenbetons durch Stahlrecyclingbeton in der Bundesrepublik Deutschland.

Unter Verwendung geeigneter Aufschlüsselungen und Umrechnungen lassen sich Anteile der I/O-Flüsse und Bestandsgrößen der Produktionsbereiche den Modulen des Produktsystems Stahlbeton zuordnen. Für diesen Vorgang sind zusätzliche Informationen nötig. Teilweise können diese aus Publikationen (z.B. Eyerer [25] oder Weil [54]) gewonnen werden. Teilweise müssen auch begründete Annahmen und Näherungen getroffen werden.

Addiert man die den einzelnen Modulen allozierten I/O-Flüsse und Bestandsgrößen, erhält man die aggregierten I/O-Flüsse und Bestandsgrößen des Produktsystems.

### Allokation mittels Koeffizienten

In der Regel erfolgt die Aufteilung der I/O-Flüsse und Bestandsgrößen entsprechend des Anteils des Moduls an der Gesamtmasse des Produktionsbereichs.

Beispielsweise wurden im Jahr 2000 im Produktionsbereich „Herstellung von Metallerezeugnissen“ 77,2 Mio. t Metallerezeugnisse hergestellt. In diesen Produktionsbereich fällt das Modul „Herstellung von Betonstahl“ mit 1,91 Mio. t Betonstahl für das Jahr 2000. Daraus ergibt sich ein Anteil des Moduls von 2,5% an der Gesamtmasse des Produktionsbereichs. Sämtliche I/O-Flüsse wie z.B. „Direkte Treibhausgas-Emissionen im Inland“ und Bestandsgrößen werden zu 2,5% dem Modul zugerechnet. Dieser Anteil wird im Weiteren als Allokationskoeffizient  $\alpha_{M/PB}$  bezeichnet, siehe Gleichung (2.1). Hierbei steht  $M$  für ein Modul und  $PB$  für einen Produktionsbereich nach UGR [49].

$$\alpha_{M/PB} = \frac{m_M}{m_{PB}} \quad (2.1)$$

Dabei ist

$m_M$  Masse eines im Rahmen eines Moduls  $M$  behandelten Teilprodukts des Produktsystems.

$m_{PB}$  Gesamtmasse der in einem Produktionsbereich  $PB$  erfassten Produkte

Bei den Transportproduktionsbereichen erfolgt die Allokation der I/O-Flüsse und Bestandsgrößen auf die Module entsprechend des oben vorgestellten Verfahrens, jedoch wird als Bezugsgröße die Transportleistung  $P$  in Mio. tkm (Tonnen-Kilometer) verwendet, siehe Gleichung (2.2).

$$\alpha_{M/PB} = \frac{P_M}{P_{PB}} = \frac{s_M \cdot m_M}{P_{PB}} \quad (2.2)$$

Dabei ist

$P_M$  Transportleistung eines Moduls  $M$

$P_{PB}$  Transportleistung eines Produktionsbereichs  $PB$

$s_M$  Wegstrecke, die im Rahmen einem Moduls  $M$  vom betrachteten Teilprodukt zurückgelegt werden muss

## Berechnung mit Multiplikation der Allokationskoeffizienten

Zur Allokation werden die I/O-Flüsse und Bestandsgrößen der beteiligten Produktionsbereiche mit den Allokationskoeffizienten  $\alpha_{M/PB}$  multipliziert.

Um die Übersicht zu behalten, können die auf die Produktionsbereiche  $PB$  bezogenen I/O-Flüsse  $q$  und Bestandsgrößen  $Q$  als Zuordnungsmatrix  $\mathbf{Q}_{PB}$  dargestellt werden. Den Zeilen sind hierbei die Produktionsbereiche und den Spalten die jeweilige Art des I/O-Flusses bzw. der Bestandsgröße zugeordnet. Die Zuordnungsmatrix  $\mathbf{Q}_{PB}$  kann Anhang A.5 entnommen werden.

Die Allokationskoeffizienten  $\alpha_{M/PB}$  können als Koeffizientenmatrix  $\mathbf{A}$  dargestellt werden. Hierbei stehen die Zeilen wiederum für die Produktionsbereiche. Den Spalten sind jedoch die Modulpfade zugeordnet. Den Spalten könnten zwar auch die einzelnen Module zugeordnet werden, jedoch werden diese aus Gründen der Übersichtlichkeit in dieser Studie zu Modulpfaden aggregiert.

Für die verschiedenen Baustoff- und Transportszenarien, die miteinander verglichen werden, ist jeweils eine spezifische Koeffizientenmatrix nötig. Die Matrix  $\mathbf{A}_{B1T1}$  würde beispielsweise die Allokationskoeffizienten für den Beton B1 (Recyclingbeton Demobauwerk) mit dem Transportszenario T1 (Ort der Gewinnung ist gleich Ort des Einbaus) enthalten.

Durch die Multiplikation von Zuordnungs- und Koeffizientenmatrix, siehe Gleichung (2.3), entsteht eine neue Zuordnungsmatrix  $\mathbf{Q}_{MP}$ , die die I/O-Flüsse und Bestandsgrößen den Modulpfaden  $MP$  zuordnet.

$$\mathbf{Q}_{PB} \cdot \mathbf{A}^T = \mathbf{Q}_{MP} \quad (2.3)$$

Es ist möglich diese Matrix zu einer einzigen Einzeilenmatrix  $\mathbf{Q}_{\text{Stahlbeton}}$  zu aggregieren, die die I/O-Flüsse und Bestandsgrößen für das Produktsystem Stahlbeton beinhaltet.

### 2.2.5 Wirkungskategorien und Wirkungsabschätzungen

Zur vergleichenden Abschätzung der umweltrelevanten Wirkung von Stahlressourcenbeton und Stahlrecyclingbeton müssten nach Ökobilanz-Norm [22] die Sachbilanzdaten (z.B. die Menge der Treibhausgase) über ein Charakterisierungsmodell (z.B. das Modell des Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) Wirkungskategorien (z.B. der Klimaänderung) zugeordnet werden. Nach Ökobilanz-Norm befindet sich jedoch der methodische und wissenschaftliche Rahmen für die Wirkungsabschätzung noch unterschiedlich weit in der Entwick-

lung. Um sich zu behelfen, beschreibt das angestrebte ökologische Ziel keine Wirkungskategorien sondern nur I/O-Flüsse und Bestandsgrößen in der Bundesrepublik Deutschland, siehe 2.1.1. Die Wirkungsabschätzung wird daher benutzt, um zu zeigen, welchen Einfluss der Ersatz von Stahlressourcenbeton durch Stahlrecyclingbeton in seinen verschiedenen Szenarien auf die I/O-Flüsse und Bestandsgrößen nach UGR und daher auf die Sachbilanz der Bundesrepublik Deutschland hat.

## 2.2.6 Einbeziehung und Ausschluss von Stoff- und Energieflüssen

Die zu betrachtenden I/O-Flüsse und Bestandsgrößen ergeben sich aus den Zielen der Studie, siehe 2.1.1, und dem verfügbaren Datenmaterial der UGR.

Infolge des Ziels, natürliche Ressourcen zu schonen, sind folgende Inputflüsse zu betrachten:

- Direkter Energieverbrauch im Inland in TJ (Terrajoule)
- Wassereinsatz im Inland in Mio. m<sup>3</sup>
- Materialeinsatz im Inland in Mio. t

Aus dem Ziel Treibhausgase und Luftschadstoffe zu reduzieren, leitet sich der Bedarf ab, folgende Outputflüsse zu untersuchen. In Klammer ist zur Information die nach Eyerer [25] zuzuordnende Wirkkategorie gegeben.

- Direkte Treibhausgas-Emissionen (Treibhauspotential) im Inland in Mio. t CO<sub>2</sub>-Äquivalent
- Direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen (Treibhauspotential) im Inland in Mio. t
- Direkte NH<sub>3</sub>-Emissionen (Versauerungspotential) im Inland in t
- Direkte SO<sub>2</sub>-Emissionen (Versauerungspotential) im Inland in t
- Direkte NO<sub>x</sub>-Emissionen (Versauerungspotential) im Inland in t
- Direkte NMVOC-Emissionen (Photooxidantienpotential – Ozonbildner in Bodennähe) im Inland in t

Das Ziel Abfälle (und erweitert auch Abwässer) zu vermeiden, macht die Betrachtung folgender Outputflüsse notwendig:

- Abwasser im Inland in Mio. m<sup>3</sup>
- Abfallaufkommen im Inland in Mio. t

Für das Ziel Freiräume zu erhalten, wird die Beobachtung folgender Bestandsgröße notwendig:

- Siedlungs- und Verkehrsfläche inkl. Abbauland im Inland in km<sup>2</sup>

### **2.2.7 Qualität der Daten**

Durch die Verwendung der UGR [49] des Statistischen Bundesamts als Datenbasis darf eine hohe Genauigkeit der Ausgangsdaten für den Bezugsraum Bundesrepublik Deutschland und das Bezugsjahr 2001 angenommen werden. Gleiches gilt für die Vollständigkeit und Repräsentativität dieser Daten. Bilanztechnisch ist auch die korrekte Modellierung der Module des Produktsystems Stahlbeton durch umfassende Recherche (z.B. Eyerer [25], Weil [54], Zementindustrie [52]) gesichert.

In der Sachbilanz, siehe 2.3, in der Ausgangsdaten und Module miteinander verknüpft werden, wird zur Verbesserung der Nachvollziehbarkeit der Studie jeder Rechenschritt weitgehend dokumentiert. Für die Allokationen im Rahmen dieses Schrittes werden Aufschlüsselungen und Umrechnungen benötigt. Soweit Informationen hierzu vorliegen, werden die Quellen belegt. Annahmen und Näherungen werden begründet. Die Konsistenz der Allokation wird geprüft. Unsicherheiten hierbei können durch die getroffenen Annahmen auftreten. Es wird versucht, die daraus resultierenden Schwankungen im Ergebnis bestmöglich darzustellen.

### **2.2.8 Äquivalenz der verglichenen Produktsysteme**

Um eine vergleichende Aussage über die zwei Produktsysteme Stahlrecyclingbeton und Stahlressourcenbeton treffen zu können, muss nach Norm [22] die Vergleichbarkeit der Systeme nachgewiesen werden.

Es wird für beide Produktsysteme die gleiche funktionelle Einheit (FE) gewählt, siehe 2.2.1. Problematisch ist hierbei die Größe der FE, die sich für den Beton als das Gesamtvolumen der Betonproduktion in der Bundesrepublik Deutschland definiert. Da der bisherige Recyclingbeton noch Schwächen in der Dauerhaftigkeit hat, ist eine Verwendung für Außenbauteile nur möglich unter Einhaltung von Grenzwerten für den Anteil des rezyklierten Materials an der Gesamtgesteinskörnung, siehe Richtlinie [9]. Weiterhin ist es geplant, die maximale Druckfestigkeit für Recyclingbeton zu begrenzen und bestimmte Anwendungen (z.B. Spannbeton) auszuschließen, siehe Zilch et al [66]. Deshalb kann der Stahlrecyclingbeton den Stahlressourcenbeton nicht generell ersetzen. Diese Einschränkungen müssen bei der Auswertung, siehe 2.5, berücksichtigt werden.

Für den Stahlrecyclingbeton gelten gegenüber dem Stahlressourcenbeton weitere technische Besonderheiten. Es wird von einem Mehraufwand bezüglich der Betonstahlmenge, siehe 8.1.4, von einer Abweichung im Zement- und Wasserverbrauch und von einer Änderung in der benötigten Transportleistung ausgegangen. Diese Besonderheiten werden in die Sachbilanz miteinbezogen.

Die Systemgrenzen sind durch die Modulpfade und den Bezug auf die Bundesrepublik Deutschland und das Referenzjahr 2001 gegeben, siehe 2.2.2, und für beide Produktsysteme gleich. Die Datenqualität kann ebenfalls positiv bewertet werden. Sie ist in 2.2.7 beschrieben und soweit Daten vorliegen sehr gut. Da für beide Produktsysteme die gleichen Ausgangsdaten verwendet werden, ist die Vergleichbarkeit gegeben. Gleiches gilt für das Allokationsverfahren, siehe 2.2.4, das ebenfalls für beide Produktsysteme gleich verwendet wird. Inputs und Outputs werden für beide Produktsysteme gleich beurteilt.

Zusammenfassend kann geschlossen werden, dass die Vergleichbarkeit für die beiden untersuchten Produktsysteme unter den genannten Einschränkungen gewährleistet ist.

### **2.2.9 Kritische Prüfung**

Im Rahmen dieser Dissertation erfolgt die kritische Prüfung der Studie durch die Prüfer Hr. Prof. Zilch, Hr. Prof. Curbach und Hr. Prof. Faulstich in Form von Gutachten sowie durch Fr. Dr. Weber-Blaschke durch kritischen Dialog. Zur kritischen Prüfung trug ebenfalls die Diskussion auf einer Konferenz bei, siehe Cyllok [6].

## **2.3 Sachbilanz**

Die Sachbilanz ordnet die nach Produktionsbereichen differenzierten I/O-Flüsse und Bestandsgrößen nach UGR [49] anteilig den Modulen des Produktsystems Stahlbeton zu und verifiziert die Zuordnung durch Statistiken und Untersuchungen (vgl. Weil [53] und Eyerer [25]) für die Fälle, in denen dem Autor zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit entsprechendes Datenmaterial vorlag.

- Für den Inputfluss „Materialentnahme“, den Outputfluss „Abfallaufkommen“ und die Bestandsgröße „Siedlungs- und Verkehrsfläche inkl. Abbauland“ differenzieren die UGR nicht nach Produktionsbereichen. Eine Aufbereitung des Datenmaterials findet sich in 2.3.1 bis 2.3.3.
- Die Allokation für die Module der Einsatzstoffe und des Betonstahls wird in 2.3.4 bis 2.3.7 behandelt.

- In 2.3.8 ist die Zuordnung der I/O-Flüsse und Bestandsgrößen für das Modul Beton dargestellt.
- Die eigentliche Berechnung der Sachbilanzdaten aus den I/O-Flüssen und Bestandsgrößen der Module für die verschiedenen Baustoff- und Transportvarianten werden ab 2.3.9 beschrieben und durchgeführt.

### 2.3.1 Materialentnahme

In den UGR werden die Energie- und Materialflüsse in Feststoffe, Gase und Wasser differenziert. Eine Zuordnung der Feststoffe zu Produktionsbereichen oder zum privaten Konsum findet in den UGR nicht statt. Demgegenüber existiert die Aufteilung der Gase und des Wassers auf die Produktionsbereiche bereits an anderer Stelle der UGR und wird daher hier nicht behandelt.

Unter der Annahme, dass sämtliche verwertete Feststoffentnahmen einen kommerziellen Hintergrund haben, werden diese Entnahmen nach Plausibilität den Produktionsbereichen zugeordnet. Die Menge an entnommener Braunkohle wird beispielsweise dem Produktionsbereich „10 – Gewinnung von Kohle und Torf“ zugeordnet. Die Zuordnung der verwerteten Feststoffentnahmen ist Anhang A.3 zu entnehmen.

Die nicht verwerteten Feststoffentnahmen werden nicht auf die Produktionsbereiche und damit auf Produkte oder Produktmodule verteilt, wie Kohler et al. [32] vorschlagen. Ihren Vorschlag begründen Kohler et al. damit, dass diese Entnahmen keine echten Flussgrößen darstellen, da sie nicht als Inputs für andere Tätigkeiten dienen und daher auch nicht als Ressource anzusehen sind.

Für die in Zusammenhang mit dem Produktsystem Stahlbeton stehenden Produktionsbereiche ergibt sich die in Tabelle 5 dargestellte Feststoffentnahme.

Produktionsbereich	Entnahme in Mio. t	Anteil an der verwerteten Gesamtentnahme
14	734,9	62,70%
10	203,0	17,32%
11	19,6	1,67%
13	0,4	0,03%
Aufschlüsselung der Produktionsbereiche		
10	Gewinnung von Kohle und Torf	
11	Gewinnung von Erdöl, Erdgas; Erbringung diesbezüglicher Dienstleistungen	
13	Gewinnung von Erzen	
14	Gewinnung von Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	

**Tabelle 5 Menge der verwerteten Feststoffentnahmen ausgewählter Produktionsbereiche (2001)**

### 2.3.2 Abfallaufkommen

Das Abfallaufkommen wird in den UGR nicht nach Produktionsbereichen und privatem Konsum differenziert. Stattdessen erfolgt die Unterteilung dieses Outputflusses in fünf Bereiche. Es wird unterschieden in Siedlungsabfälle, in Bergematerial aus dem Bergbau, in Abfälle aus Produktion und Gewerbe, in Bau- und Abbruchabfälle und schließlich in besonders überwachungsbedürftige Abfälle, siehe Tabelle 6.

Für die Sachbilanz sollen die kommerziellen Abfallmengen den Produktionsbereichen der UGR quantitativ zugeordnet werden.

Die Siedlungsabfälle sind hauptsächlich Hausmüll oder hausmüllähnliche Gewerbeabfälle und werden daher näherungsweise vollständig dem Privatkonsum zugerechnet. Somit fallen sie nicht unter die kommerziellen Abfallmengen.

Gegenstand der Nachweisung	Abfallaufkommen in Mio. t	Anteil an Gesamtmenge
Siedlungsabfälle	48,836	12,38%
Bergematerial aus dem Bergbau	49,149	12,46%
Abfälle aus Produktion und Gewerbe	37,452	9,49%
Bau- und Abbruchabfälle	243,53	61,73%
Besonders überwachungsbedürftige Abfälle	15,532	3,94%
Gesamt	394,499	100,00%

**Tabelle 6 Abfallaufkommen in 2001**

Ein großer Teil (ca. 45%) der besonders überwachungsbedürftigen Abfälle stammt aus dem Bereich Bau- und Abbruchabfälle. Es wird jedoch angenommen, dass diese gesundheits- oder umweltgefährdenden Abfälle nicht in einen Recyclingprozess eingegliedert werden können. Eine gesonderte Betrachtung dieser Problemstoffe wäre somit notwendig, wurde jedoch im Rahmen dieser Studie nicht durchgeführt. Die besonders überwachungsbedürftigen Abfälle sind somit für diese Studie aus der kommerziellen Abfallmenge ausgeklammert.

Für die Zuordnung der kommerziellen Abfallmengen auf die Produktionsbereiche der UGR sind weiterführende Betrachtungen der Bereiche Bergematerial aus dem Bergbau, Abfälle aus Produktion und Gewerbe und Bau- und Abbruchabfälle nötig.

#### **Bergematerial aus dem Bergbau**

Es wird angenommen, dass das vollständige Bergematerial aus dem Bergbau, siehe UGR [49], anteilig aus den nicht verwerteten Feststoffentnahmen, siehe 2.3.1, besteht. Näherungsweise wird außerdem die Annahme getroffen, dass der Anteilsfaktor für alle Arten des Bergematerials bzw. der Entnahmen konstant sei. Über die Art und die Menge der nicht verwerte-

ten Entnahmen wird deren jeweiliger Anteil an der Gesamtmenge der nicht verwerteten Entnahmen bestimmt. Diese Verteilung kann aufgrund des oben postulierten, konstanten Anteilsfaktors für das Bergematerial übernommen werden.

Die bereits für die verwerteten Feststoffentnahmen verwendeten qualitativen Zuordnungen zu Produktionsbereichen sind auf die nicht verwerteten Feststoffentnahmen bzw. das Bergematerial übertragbar. Problematisch ist hierbei nur der Bodenaushub, der sich nicht eindeutig der Gewinnung energetischen Torfs bzw. der Gewinnung von Steinen und Erden zuordnen lässt. Näherungsweise rechnet man ihn jedoch gänzlich der Gewinnung von Steinen und Erden zu.

Daher lässt sich der Bergeabfall aus dem Bergbau über die nicht verwerteten Entnahmen den Produktionsbereichen der UGR zuordnen, siehe Tabelle 7. Hierbei erhält der Produktionsbereich „10 – Gewinnung von Kohle und Torf“ 90,69% Anteil am Bergeabfall. Für den Bereich „14 – Gewinnung von Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse“ bleibt ein Anteil von 9,32%.

Nicht verwertete Entnahme	Menge in Mio. t	Anteil	Zuordnung zu Produktionsbereich
Braunkohle (Abraum)	1771,2	89,15%	10
Steinkohle	29,5	1,48%	10
sonstige Energieträger	1,0	0,05%	10
Erze	0,0	0,00%	13
Mineralien, Steine und Erden	35,5	1,79%	14
Bodenaushub	149,6	7,53%	14
Nicht verwertete Entnahmen gesamt	1986,7	100,00%	
Aufschlüsselung der Produktionsbereiche			
10	Gewinnung von Kohle und Torf		
13	Gewinnung von Erzen		
14	Gewinnung von Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse		

**Tabelle 7 Zuordnung der nicht verwerteten Entnahmen zu den Produktionsbereichen**

### Abfälle aus Produktion und Gewerbe

Näherungsweise wird angenommen, dass der Hauptteil der Abfälle aus Produktion und Gewerbe von den dreiundzwanzig herstellenden Produktionsbereichen nach UGR stammt. Die Bereiche, die den Primärsektor (Land-, Forst- und Fischwirtschaft und Gewinnung von Bodenschätzen) bilden sowie die Bereiche des Tertiärsektors (Dienstleistungen) werden hierbei vernachlässigt. Da keine genaueren Informationen vorliegen, wird davon ausgegangen, dass die Abfälle aus Produktion und Gewerbe gleichmäßig auf die dreiundzwanzig herstellenden Produktionsbereiche nach UGR verteilt sind.

Insgesamt ergeben sich für die drei relevanten Produktionsbereiche aus dem Sekundärsektor „26 – Herstellung von Glas, Keramik; Verarbeitung von Steinen und Erden“, „27 – Herstel-

lung von Roheisen, Stahl, Rohren und Halbzeug daraus, NE-Metallen und Halbzeug daraus, Gießereierzeugnisse“ und „28 – Herstellung von Metallerzeugnissen“ jeweils 4,3% oder 1,6 Mio. t der Abfälle aus Produktion und Gewerbe.

### **Bau- und Abbruchabfälle**

Die vollständigen Bau- und Abbruchabfälle werden im Rahmen dieser Studie vereinfachend dem Produktionsbereich „45 – Vorbereitende Baustellenarbeiten, Hoch- und Tiefbauarbeiten, Bauinstallations- und sonstige Bauarbeiten“ zugeordnet.

### **Zusammenfassung: Zuordnung der kommerziellen Abfallmengen**

Die kommerziellen Abfallmengen bestehen aus dem Bergematerial aus dem Bergbau, den Abfällen aus Produktion und Gewerbe und den Bau- und Abbruchabfällen. Die Zuordnung dieser kommerziellen Abfälle auf die Produktionsbereiche ist Tabelle 8 zu entnehmen.

<b>Produktionsbereich</b>	<b>Abfallaufkommen in Mio. t</b>	<b>Anteil am Gesamt- abfallaufkommen</b>
45 – Vorbereitende Baustellenarbeiten, Hoch- und Tiefbauarbeiten, Bauinstallations- und sonstige Bauarbeiten	243,530	61,73%
10 – Gewinnung von Kohle u. Torf	44,572	11,30%
14 – Gewinnung von Steine u. Erden, sonst. Bergbauerzeugnisse	4,577	1,16%
26 – H.v. Glas, Keramik; Verarbeitung v. Steinen und Erden	1,628	0,41%
27 – H.v. Roheisen ..., NE-Metallen, Gießereierzeugnisse	1,628	0,41%
28 – H.v. Metallerzeugnissen	1,628	0,41%
andere Produktionsbereiche	32,567	8,26%
Summe der kommerziellen Abfälle (ohne besonders überwachtungsbedürftige Abfälle)	330,131	83,68%
Siedlungsabfälle	48,836	12,38%
überwachungsbedürftig	15,532	3,94%
Gesamt	330,131	100,00%

**Tabelle 8 Zuordnung des Abfallaufkommens zu den Produktionsbereichen**

### **2.3.3 Siedlungs- und Verkehrsfläche inkl. Abbauland**

Siedlungs- und Verkehrsflächen werden in den UGR den Produktionsbereichen und dem privaten Konsum zugeordnet. In den Siedlungsflächen werden Gebäude- und Freiflächen, Betriebsflächen ohne Abbauland, Erholungsflächen und Friedhöfe zusammengefasst.

Durch den Ersatz natürlicher Gesteinskörnungen durch rezyklierte Gesteinskörnungen fällt ein bestimmter Anteil der Gewinnung von Steinen und Erden weg. Dem entsprechend reduziert sich auch der Flächenbedarf an Abbauland. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, ist eine Integration des Abbaulandes in den Siedlungs- und Verkehrsflächenbedarf in der Bundesrepublik im Rahmen dieser Studie erforderlich. Die Berücksichtigung des Effekts ist notwendig, weil das Abbauland knapp 4% der Siedlungs- und Verkehrsflächen (inkl. Abbauland) aus-

macht. Eine Umwidmung der Abbauflächen in z.B. Naturschutz-, Forst- und Wald- oder Wasserflächen wäre ein großer Schritt zur Erfüllung des ökologischen Ziels des Erhalts und der Schaffung von Freiräumen.

Die tatsächliche und aktuelle Verteilung des Abbaulandes liegt dem Autor nicht vor. Gwosdz und Lorenz [29] berechnen jedoch für das Jahr 1997 anhand der Fördermengen an Steinen, Erden, Mineralen, Kohle und Torf, sowie deren jeweiliger Schüttdichte und Abbaumächtigkeit ein Flächenäquivalent. Dieses ist eine Flussgröße, da es beschreibt, wie viel km<sup>2</sup> der Fläche der Bundesrepublik im Jahr 1997 abgebaut wurde.

Da die Siedlungs- und Verkehrsfläche nach UGR jedoch eine Bestandsgröße darstellt, muss die Flussgröße nach Gwosdz und Lorenz aus Gründen der Vergleichbarkeit in eine Bestandsgröße umgewandelt werden. Näherungsweise wird daher das Flächenäquivalent auf das 2001 vorhandene Abbauland (Bestandsgröße) [46] normiert. Dies geschieht unter der Annahme, dass die Verteilung der Abbauflächen zwischen 1997 und 2001 konstant geblieben ist. Die Abbauflächen werden nach Art der abgebauten Ressourcen den Produktionsbereichen zugeordnet und in einer Tabelle zusammengestellt, siehe Anhang A.4. Aus dieser Tabelle ergibt sich für Produktionsbereich 10 (Kohle und Torf) eine Fläche des Abbaulands von 638,5 km<sup>2</sup>. Für den Produktionsbereich 14 (Steine und Erden, etc) errechen sich hierfür 1157,5 km<sup>2</sup>.

#### **2.3.4 Betonstahl**

Die Allokation der Produktionsbereiche auf die Module des Betonstahlpfads basiert auf den Festlegungen in 2.2.2. Sie erfolgt in der Regel nach dem Massenanteil des Betonstahls oder seiner Vorstufen an der jeweiligen Gesamtproduktion.

Die I/O-Flüsse und die Bestandsgrößen für das erste Modul (Gewinnung von Erzen) werden analog zum dritten Modul (Herstellung von Metallerzeugnissen) alloziert, siehe weiter unten. Die Transportmodule (2., 4. und 6. Modul) werden vernachlässigt, da die bewegten Massen gering und die zurückgelegten Strecken nicht groß sind. Bezogen auf die Gesamttransportleistung ist eine Vernachlässigung somit gerechtfertigt. Gleiches gilt für das Modul „Einbau des Betonstahls“, das ebenfalls vernachlässigt wird, weil keine großen Massenbewegungen vorgenommen werden.

Für den Anteil der Rohstahlerzeugung für die Betonstahlproduktion am Produktionsbereich „27 – Herstellung von Metallen und Halbzeug daraus“ werden folgende Daten verwendet bzw. Näherungen getroffen:

- Die UGR bieten für bestimmte I/O-Flüsse den Unterbereich „27.1 – 27.3 – Herstellung von Roheisen, Stahl, Rohren und Halbzeug daraus“. Wo keine genauere Differenzierung vorliegt (z.B. Wassereinsatz im Inland), dürfen aufgrund der hergestellten Massen, Produktionsbereich 27 und sein Unterbereich 27.1 – 27.3 gleichgesetzt werden. Daraus folgt eine Vernachlässigung der anderen Unterbereiche des Produktionsbereichs 27.
- Nach Angaben des Wirtschaftsministeriums [4] wurden 2001 2,17 Mio. t Betonstahl hergestellt. Für diese Produktion musste also näherungsweise die gleiche Menge Rohstahl erzeugt werden.
- Das Statistische Bundesamt [47] gibt die Produktion für den Unterbereich 27.1 – 27.3 für 2001 mit 77,48 Mio. t Stahl an.

Aus diesen Randbedingungen ergibt sich für das Modul „Herstellung von Rohstahl (Betonstahl)“ ein Allokationskoeffizient von 2,8%.

Die Berechnung des Allokationskoeffizienten des Moduls „Herstellung von Metallerzeugnissen (Betonstahl)“ unterliegt folgenden Randbedingungen:

- Der Produktionsbereich „28 – Herstellung von Metallerzeugnissen“ wird dem Modul alloziert.
- Es wird angenommen, dass Erzeugnisse aus Metallen außer Stahl oder Eisen umweltökonomisch vernachlässigt werden dürfen.
- Weiterhin soll gelten, dass das gesamte produzierte Roheisen in Eisenerzeugnisse und der gesamte produzierte Rohstahl in Stahlerzeugnisse umgewandelt werden. Dies ergibt nach Daten des Statistischen Bundesamts [47] eine Produktion für den Bereich 28 von 73,98 Mio. t Metallerzeugnissen.

Aus der Menge von 2,17 Mio. t Betonstahl errechnet sich somit ein Allokationskoeffizient von 2,9%. In Tabelle 9 sind alle Allokationskoeffizienten größer null für den Betonstahlpfad aufgeführt.

Produktionsbereich	Allokationskoeffizient
13 – Gewinnung von Erzen	2,8%
27.1 - 27.3 – H. v. Roheisen, Stahl, Rohren und Halbzeug daraus	2,8%
28 – Herstellung von Metallerzeugnissen	2,9%

**Tabelle 9 Allokation von Produktionsbereichen auf den Betonstahlpfad**

### 2.3.5 Natürliche Gesteinskörnung

Die Allokation der Produktionsbereiche auf die vier Module des Gesteinskörnungspfads (natürliche Gesteinskörnung) basiert auf den Festlegungen in 2.2.2. Sie erfolgt in der Regel nach dem Massenanteil der Gesteinskörnung für die Herstellung von Beton an der jeweiligen Gesamtproduktion bzw. -leistung.

#### Gewinnung von Steinen und Erden (Sand, Kies, Naturstein)

Die I/O-Flüsse und die Bestandsgrößen für das erste Modul (Gewinnung von Steinen und Erden – Sand, Kies, Naturstein) berechnen sich allein über die Allokation des Produktionsbereichs „14 – Gewinnung von Steinen und Erden, sonstigen Bergbauerzeugnissen“. Die zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit aktuellen Daten zur Aufteilung dieses Produktionsbereichs stammen von Weil [54] und beziehen sich auf das Jahr 1997. Weil gibt Zahlen für die Gewinnung von Kies und Sand sowie von Splitt aus Naturstein für Beton im Hoch und Tiefbau an. Zusammen mit den Daten aus den UGR für das Jahr 1997 lässt sich der Massenanteil der zum Zweck der Betonherstellung gewonnenen Gesteinskörnungen an der Gesamtmenge gewonnener Steine und Erden und sonstiger Bergbauerzeugnisse mit 26,4% beziffern, siehe Tabelle 10.

Gewinnung von Ressourcen	Menge in Mio. t	Anteil am Produktionsbereich
Steine und Erden, sonstigen Bergbauerzeugnissen	793	100,0%
Kies und Sand für Betonproduktion	173	21,9%
Andere Steine für Splitt für Betonproduktion	35	4,5%
Gesamtmenge der zum Zweck der Betonherstellung gewonnenen Gesteinskörnungen	209	26,4%

**Tabelle 10 Menge der abgebauten Ressourcen zur Herstellung von Gesteinskörnungen für die Betonproduktion (Daten für 1997 nach Weil [53] und UGR [48], [49])**

Es wird angenommen, dass näherungsweise die Aufteilung zwischen 1997 und dem Referenzjahr 2001 konstant geblieben ist. Damit ergibt sich ein Allokationskoeffizient für dieses Modul von 26,4% für den Produktionsbereich 14.

Bezieht man den oben berechneten Massenanteil der natürlichen Gesteinskörnungen für die Betonherstellung auf die verwerteten Entnahmen von Mineralien, Steinen und Erden nach UGR für das Jahr 2001 von 734,9 Mio. t, so errechnet sich die Menge der natürlichen Gesteinskörnungen für die Betonherstellung zu 194,0 Mio. t. Diese Menge entspricht sehr gut der über Betonrezept und Zementbedarf berechneten Gesteinskörnungsmenge von 190,3 Mio. t.

## Transporte

Das erste Transportmodul beschreibt den Transport vom Ort der Rohstoffgewinnung zum Ort der Aufbereitung. Nach Eyerer [25] erfolgt für natürliche Gesteinskörnungen Gewinnung und Aufbereitung in der Regel am gleichen Ort. Damit nimmt der Allokationskoeffizient für dieses Modul den Wert null an.

Das zweite Transportmodul modelliert den Transport vom Ort der Aufbereitung (z.B. Kieswerk) zum Ort der Betonherstellung (z.B. Transportbetonwerk). Zur Berechnung des Allokationskoeffizienten dieses Moduls für die Produktionsbereiche „60.1 – Eisenbahnleistungen“, „60.2 - 60.3 – Sonstige Landverkehrs- und Transportleistungen in Rohrfernleitungen“ und „61 – Schifffahrtsleistungen“ werden die Transportleistungen in Mio. tkm auf die Gesamttransportleistung in der Bundesrepublik [45] bezogen. Hierbei erfolgt eine Differenzierung nach Transportmitteln. Näherungsweise wird der Transport in Rohrfernleitungen vernachlässigt. Für den Weg zwischen Kieswerk und Transportbetonwerk bietet Eyerer [25] mittlere Entfernungen aufgeteilt nach Transportmitteln an, siehe Tabelle 11. Näherungsweise wird angenommen, dass die Werte nach Tabelle 11 im Durchschnitt allgemein für den Weg zwischen Aufbereitung und Betonherstellung gültig sind.

Transporte zwischen Kieswerk und Betonwerk	Einfache Entfernung in km	Anteil an allen Transporten
LKW-Transporte	17,5	87,5%
Bahn-Transporte	0,4	1,8%
Schiffs-Transporte	2,1	10,7%
Alle Transporte	20,0	100,0%

**Tabelle 11 Durchschnittliche Entfernungen und Transportmittel für Transporte zwischen Kieswerk und Betonwerk (nach Eyerer [25])**

Aus den mittleren Entfernungen und der Masse der Gesteinskörnungen lassen sich die jeweiligen Transportleistungen berechnen. Hierbei wird im Sinne der statistischen Daten für die Produktionsleistung [45] nur das transportierte Gut berücksichtigt. Es wird damit implizit genähert, dass für alle transportierten Güter gleiche Beladungen und Leerfahrten gelten.

Transportleistung nach Art	Leistung in Mio. tkm	Allokationskoeffizient
LKW insgesamt (Produktionsbereich 60.2 - 60.3)	289000	100,0%
LKW Anteil für Gesteinskörnungen zur Betonherstellung	3395	1,2%
Bahn insgesamt (Produktionsbereich 60.1)	74300	100,0%
Bahn Anteil für Gesteinskörnungen zur Betonherstellung	70	0,1%
Schifffahrt insgesamt (Produktionsbereich 61)	64800	100,0%
Schifffahrts Anteil für Gesteinskörnungen zur Betonherstellung	415	0,6%

**Tabelle 12 Allokation nach Transportleistungen für Transport zwischen Aufbereitung der Gesteinskörnungen und Herstellung des Betons**

Die Allokationskoeffizienten entsprechen den jeweiligen Transportleistungen, siehe Tabelle 12. Für die Modellierung der rezyklierten Gesteinskörnungen werden die Transportszenarien T1 und T2 entwickelt, siehe 2.3.6. Zur Unterscheidung werden die Transportallokationskoeffizienten der natürlichen Gesteinskörnung zum Referenztransportszenario T0 zusammengefasst.

### **Verarbeitung von Steinen und Erden (Sand, Kies, Naturstein)**

Für das Modul „Verarbeitung von Steinen und Erden (Sand, Kies, Naturstein)“ wird näherungsweise angenommen, dass es keinen Anteil am Produktionsbereich „26.2-26.8 – Herstellung von Keramik; Verarbeitung von Steinen und Erden“ hat, da die I/O-Flüsse für diesen Produktionsbereich in erster Linie durch die Keramik- und Zementherstellung verursacht werden, siehe auch Eyerer [25]. Damit ergibt der Allokationskoeffizient für dieses Modul für alle Produktionsbereiche null.

### **Zusammenfassung: Allokationskoeffizienten für den Pfad der natürlichen Gesteinskörnungen**

In Tabelle 13 sind zusammenfassend alle Allokationskoeffizienten größer null für den Pfad der natürlichen Gesteinskörnungen aufgeführt.

<b>Produktionsbereich</b>	<b>Allokationskoeffizient</b>
14 – Gewinnung von Steinen und Erden, sonstigen Bergbauerzeugnissen	26,4%
60.1 – Eisenbahnleistungen	0,1%
60.2 - 60.3 – Sonst. Landverkehrs- und Transportleistungen in Rohrfernleitungen	1,2%
61 – Schifffahrtsleistungen	0,6%

**Tabelle 13 Allokation von Produktionsbereichen auf den Pfad der natürlichen Gesteinskörnungen**

### **2.3.6 Rezyklierte Gesteinskörnung**

Die Allokation für die vier Module des Gesteinskörnungspfads (rezyklierte Gesteinskörnung) basiert auf den Festlegungen in 2.2.2. Sie erfolgt in der Regel nach dem Massenanteil der Gesteinskörnung für die Betonherstellung an der jeweiligen Gesamtproduktion bzw. -leistung.

Durch die in 2.1 formulierten Ziele der Studie wird eine vergleichende Aussage gefordert, die beschreibt, inwiefern sich der Ersatz von Stahlressourcenbeton durch Stahlrecyclingbeton auf die I/O-Flüsse und Bestandsgrößen nach UGR auswirkt. Bei der Diskussion der funktionellen Einheit, siehe 2.2.1, wird dargestellt, dass aufgrund der Zielfestlegung nicht der Ist-Zustand des Stahlressourcenbetons mit dem Ist-Zustand des Stahlrecyclingbetons verglichen werden

kann. Vielmehr wird der Ist-Zustand des Stahlressourcenbetons mit einem virtuellen Zustand oder Szenario verglichen. Da jedoch nur der Ist-Zustand mit I/O-Flüssen und Bestandsgrößen der UGR auszudrücken ist, müssen für das Vergleichsszenario virtuelle I/O-Flüsse und Bestandsgrößen entwickelt werden, die virtuellen Produktionsbereichen zugeordnet werden.

Die virtuellen Flüsse und Bestandsgrößen sind nicht eindeutig bestimmbar. Um die Bandbreite der möglichen virtuellen I/O-Flüsse und Bestandsgrößen abzudecken, werden mehrere Unterszenarien berücksichtigt, siehe 2.1. Diese Szenarien unterscheiden sich einerseits durch unterschiedliche Transportwege und werden im Zusammenhang mit dem dazugehörigen Modul des hier behandelten Gesteinskörnungspfades vorgestellt. Andererseits differenzieren sich die Szenarien über die Zusammensetzungen der Recyclingbetone und damit über die Massenverteilung der Einsatzmittel im Beton und des benötigten Betonstahls. Damit haben diese Baustoffsznarien keinen direkten Einfluss auf den Gesteinskörnungspfad, sondern allgemein auf die Größe der Berücksichtigung der Einsatzmittelpfade und des Betonstahlpfades und kommen deshalb erst bei der Berechnung der Sachbilanz zum Tragen, siehe 2.3.9.

#### **Gewinnung des Abbruchmaterials – Virtueller Produktionsbereich 14\***

Die auf das Modul „Gewinnung des Abbruchmaterials“ zu allozierenden I/O-Flüsse und Bestandsgrößen beziehen sich auf den neu zu schaffenden, virtuellen Produktionsbereich „14\* – Gewinnung von rezyklierten Steinen und Erden, sonstigen rezyklierten Bergbauerzeugnissen“. Hierbei kennzeichnet der Stern hinter der Nummer des Produktionsbereichs seinen virtuellen Charakter.

Es wird davon ausgegangen, dass der Aufwand Steine aus einem Berg zu brechen, oder Kies und Sand aus einer Grube oder einem Fluss zu fördern, in etwa dem Aufwand entspricht, ein Bauwerk abzubrechen, da hier ebenfalls große Stücke aus einem festen Zusammenhang herausgearbeitet und Massen bewegt werden müssen. Daher kann als Grundlage für den Produktionsbereich 14\* der Bereich 14, siehe 2.3.5, herangezogen werden. Im Unterschied zu diesem Produktionsbereich wird näherungsweise angenommen, dass für 14\* keine Materialentnahme erfolgt und keine Abbaufäche benötigt wird, da diese bereits als Baustellenfläche für Abbrucharbeiten bei den regulären Bauleistungen (Produktionsbereich 45.1 und 45.2) berücksichtigt ist. Es folgt für den Flächenbedarf des Produktionsbereichs 14\* somit ein Wert von 69 km<sup>2</sup> nach UGR (Siedlungs- und Verkehrsfläche ohne Abbauland).

Da die angepassten Daten aus dem Produktionsbereich 14 übernommen werden, ist auch die Verwendung des Allokationskoeffizienten des entsprechenden Moduls des Pfades der natürlichen Gesteinskörnungen möglich und sinnvoll.

### **Transporte – Transportszenario T1**

Für das Transportszenario T1 wird folgendes angenommen: ein Bauwerk wird an einem bestimmten Ort abgebrochen. Am gleichen Ort findet sowohl die Aufbereitung des Abbruchmaterials zu rezyklierten Gesteinskörnungen statt, als auch die Betonherstellung aus dem gewonnenen Material sowie der Neubau eines Bauwerks, siehe 2.2.3. Dies ist ökologisch und ökonomisch ein sehr günstiges Szenario, da sämtliche I/O-Flüsse in Zusammenhang mit Transporten von rezyklierten Gesteinskörnungen wegfallen. Es ist auch ein technisch und logistisch vorstellbares Szenario, da bei großen Baustellen oft ein Transportbetonwerk direkt auf der Baustelle zur Verfügung steht und auch mobile Anlagen zur Aufbereitung des Abbruchmaterials vorhanden sind. Die Allokationskoeffizienten aller Transportmodule nehmen, wie beschrieben, den Wert null an, siehe auch 2.3.8.

### **Transporte – Transportszenario T2**

Für das Transportszenario T2 wird angenommen, dass sich die Orte der einzelnen Module unterscheiden, siehe 2.2.3. Das Abbruchmaterial wird somit an einem bestimmten Ort A gewonnen und an einem Ort B (z.B. ein Recyclinghof) zu Gesteinskörnungen aufbereitet. Dies setzt sich für den Betonpfad fort und wird in der Ermittlung der Sachbilanzdaten berücksichtigt, siehe 2.3.9.

Es ist nicht notwendig, einen eigenen Produktionsbereich für den Transport von rezyklierten Gesteinskörnungen zu entwickeln, da es keinen Unterschied macht, ob natürliche oder rezyklierte Gesteinskörnungen transportiert werden.

Die Allokationskoeffizienten der Transportmodule müssen jedoch in Bezug auf den Transport von natürlichen Gesteinskörnungen angepasst werden, wenn sich die Entfernungsdaten der einzelnen Module von denen der Transportmodule des Pfads der natürlichen Gesteinskörnungen unterscheiden.

Das erste Transportmodul beschreibt den Transport des Rohmaterials zum Ort der Aufbereitung. Anders als bei natürlichen Gesteinskörnungen wird in der Regel zwischen diesen zwei Orten eine bestimmte Entfernung größer null liegen. Näherungsweise wird vorausgesetzt, dass ausschließlich mit LKWs transportiert wird und die durchschnittliche Transportentfernung mit der Entfernung zwischen Betonwerk und Einbauort (Baustelle) gleichzusetzen ist. Diese Strecke beträgt 15 km. Eine bessere Näherung ist dem Autor nicht bekannt. Unter der Annahme, dass insgesamt 194 Mio. t Gesteinskörnung für die Herstellung von Beton benötigt werden, siehe 2.3.5, ergibt sich eine Transportleistung von 210 Mio. tkm, was 1,0% der gesamten LKW-Transportleistung in der Bundesrepublik Deutschland [45] entspräche.

Für das zweite Transportmodul wird angenommen, dass es sich nicht von dem des Pfads der natürlichen Gesteinskörnung unterscheidet. Somit kann auch der Allokationskoeffizient von 1,2% übernommen werden.

Der Allokationskoeffizient für den LKW-Transport T2 errechnet sich aus den Anteilen der beiden Module zu insgesamt 2,2%. Die anderen Allokationskoeffizienten (60.1 und 61) werden aus dem Pfad der natürlichen Gesteinskörnungen übernommen.

### **Aufbereitung des Abbruchmaterials zu rezyklierten Gesteinskörnungen**

Für das Modul „Aufbereitung des Abbruchmaterials zu rezyklierten Gesteinskörnungen“ wird in Anlehnung an das entsprechende Modul des Pfads der natürlichen Gesteinskörnungen näherungsweise angenommen, dass es keinen Anteil am Produktionsbereich „26.2-26.8 – Herstellung von Keramik; Verarbeitung von Steinen und Erden“ oder einem entsprechenden virtuellen Produktionsbereich hat. Damit ergibt sich der Allokationskoeffizient für dieses Modul für alle Produktionsbereiche zu null.

### **Zusammenfassung: Allokationskoeffizienten für den Pfad der rezyklierten Gesteinskörnungen**

In Tabelle 14 sind zusammenfassend alle Allokationskoeffizienten größer null für den Pfad der rezyklierten Gesteinskörnungen aufgeführt, vgl. Tabelle 13 für die natürliche Gesteinskörnung.

<b>Produktionsbereich</b>	<b>Allokationskoeffizient</b>	
14* – Gewinnung von rezyklierten Steinen und Erden, sonstigen rezyklierten Bergbauerzeugnissen	26,4%	
	T1	T2
60.1 – Eisenbahnleistungen	0%	0,1%
60.2 - 60.3 – Sonst. Landverkehrs- und Transportleistungen in Rohrfernleitungen	0%	2,2%
61 – Schifffahrtsleistungen	0%	0,6%

**Tabelle 14 Allokation von Produktionsbereichen auf den Pfad der rezyklierten Gesteinskörnungen**

### **2.3.7 Bindemittel: Zement und Betonzusatzstoffe**

Der Bindemittelpfad berücksichtigt die Betoneinsatzstoffe Zement und Betonzusatzstoffe und deren Vorstufen mit insgesamt fünf Modulen. Die Allokation dieser Module basiert auf den Festlegungen in 2.2.2 und erfolgt in der Regel nach Massenanteilen.

### **Gewinnung von Steinen und Erden (Kalkstein)**

Die I/O-Flüsse sowie die Bestandsgrößen für das erste Modul (Gewinnung von Steinen und Erden – Kalkstein) berechnen sich allein über die Allokation des Produktionsbereichs „14 – Gewinnung von Steinen und Erden, sonstigen Bergbauerzeugnissen“.

In den Umweltdaten der deutschen Zementindustrie [52] wird die Menge an Kalkstein, Mergel und Kreide zur Zementherstellung mit ca. 39,87 Mio. t angegeben. Das Zusammenfassen dieser drei Gruppen ist sinnvoll, da es sich bei Mergel um ein Schichtgestein vorwiegend aus Ton und Kalk und bei Kreide um ein Kalksediment handelt. Im Weiteren wird allgemein nur noch von Kalkstein gesprochen.

Zement wird in erster Linie zur Betonherstellung verwendet. Nach Angaben der Zementindustrie [52] wurden im Jahr 2001 für Transportbeton ca. 53% der Gesamtmenge des Zements von 31,781 Mio. t eingesetzt. Es folgt Zement für Betonfertigteile mit ca. 25%. Der Rest wird als Sack- und Siloware geliefert.

Nach eigenen Schätzungen werden ca. 30% der Sack- und Siloware für Ortbeton (z.B. im Straßenbau) und ca. 70% für Putze, Estriche usw. verwendet. Das bedeutet, dass sich der Anteil des Zements für die Betonproduktion auf ca. 84,6% der Gesamtzementmenge oder 26,887 Mio. t beläuft. Daher darf auch nur dieser Anteil der 39,87 Mio. t Kalkstein berücksichtigt werden. Bezogen auf die 734,9 Mio. t Gesamtmenge nach UGR [49] errechnet sich für den Produktionsbereich 14 ein Allokationskoeffizient von 3,7%.

Neben Kalkstein werden laut der Umweltdaten der deutschen Zementindustrie [52] weitere Einsatzstoffe für die Zementproduktion benötigt. Die größte Fraktion dieser Stoffe bildet der Hüttensand mit ca. 4,65 Mio. t für das Jahr 2001. Hüttensand ist granuliert Hochofenschlacke und somit ein Abfallprodukt. Es wird genähert, dass der Granulationsprozess selbst für die betrachteten I/O-Flüsse nicht relevant sei.

Weitere Einsatzstoffe wie z.B. Ton oder Sand werden aufgrund der zu geringen Mengen (< 5% der Gesamtmenge der Einsatzstoffe für die Zementherstellung von ca. 50,3 Mio. t für das Jahr 2001) vernachlässigt. Für das hier beschriebene Modul der Gewinnung des Rohmaterials entstehen somit außer den I/O-Flüssen infolge des Kalksteins keine weiteren Einflüsse.

### **Transporte**

Das erste Transportmodul beschreibt den Transport vom Ort der Rohstoffgewinnung zum Ort der Aufbereitung. Nach Angaben der deutschen Zementindustrie [52] erfolgt die Zementproduktion in unmittelbarer Nähe zu den Kalksteinvorkommen. Für den Allokationskoeffizient

dieses Moduls entsteht ein Beitrag daher nur aus dem LKW-Transport von Hüttensand, Sand und Ton und Sulfatträgern. Durchschnittliche Transportentfernungen für diese Entfernungen gibt Eyerer an. Es errechnet sich eine LKW-Transportleistung für Hüttensand, Sand und Ton sowie Sulfatträger von ca. 383,4 Mio. tkm, was einen Anteil an der gesamten LKW-Transportleistung von ca. 0,13% ausmacht.

Das zweite Transportmodul setzt sich aus dem Transport des Zements und dem Transport der Betonzusatzstoffe vom Ort der Aufbereitung der Einsatzstoffe zum Ort der Betonproduktion zusammen. Es liegen keine Daten für mittlere Entfernungen zwischen Zementwerk und Betonfertigteilwerk vor. Daher wird näherungsweise für den Weg  $s_{\text{CEM}}$  des gesamten Zementtransports vom Ort der Zementherstellung zum Ort der Betonproduktion ein Wert von 180 km nach Eyerer [25] verwendet. Dieser Wert gilt streng genommen jedoch nur für den Transport des Zements vom Zementwerk zum Transportbetonwerk. Die zu transportierende Zementmenge ist mit 26,887 Mio. t bereits bestimmt worden.

Die Betonzusatzstoffe, die als Bindemittel mitwirken, werden im Rahmen dieser Studie durch die Flugasche repräsentiert. Analog zu obiger Näherung, wird für den Weg  $s_{\text{FA}}$  vom Ort der Flugaschenherstellung zum Ort der Betonherstellung der von Eyerer [25] angegebene Weg zwischen dem Ort der Flugaschenproduktion und dem Transportbetonwerk von 120 km zu Grunde gelegt. Die Menge der zu transportierenden Flugasche ergibt sich für die untersuchten Baustoffsznarien (B0 – B3) aus der jeweiligen Betonzusammensetzung und der Stoffraumrechnung. So lässt sich für das Referenzszenario B0 (Stahlressourcenbeton) eine Menge von 8,273 Mio. t Flugasche ermitteln.

Für das zweite Modul ergibt sich aus den Anteilen Zement und Flugasche eine Transportleistung von 5832,3 Mio. tkm, was einem Anteil an der gesamten LKW Transportleistung von 2,02% entspricht.

Das Verhältnis  $\alpha_{\text{FA}}$  von Flugaschenmenge zu Zementmenge beläuft sich für die Szenarien B0, B1 und B3 auf 0,3077. Da das Verhältnis  $\alpha_{\text{FA}}$  für das Szenario B2 0,3929 beträgt, muss bei der Berechnung der Sachbilanzdaten, siehe 2.3.9, für den Allokationskoeffizienten der Transporte des Szenarios B2 ein Korrekturfaktor  $\kappa_{\text{Rezept}}$  von 1,047 berücksichtigt werden, siehe Gleichung (2.4). Hierin ist noch kein Ausgleich für eine erhöhte Zementmenge enthalten.

$$\kappa_{\text{Rezept}} = \frac{s_{\text{CEM}} + \alpha_{\text{FA,B2}} \cdot s_{\text{FA}}}{s_{\text{CEM}} + \alpha_{\text{FA,B0}} \cdot s_{\text{FA}}} = 0,1047 \quad (2.4)$$

Dabei ist

$\alpha_{\text{FA,B0}}$  Verhältnis  $\alpha_{\text{FA}}$  von Flugaschenmenge zu Zementmenge für die Baustoffszenerien B0, B1 und B3

$\alpha_{\text{FA,B2}}$  Verhältnis  $\alpha_{\text{FA}}$  von Flugaschenmenge zu Zementmenge für das Baustoffszenerio B2

Der Koeffizient zur Allokation des Produktionsbereichs „60.2 – 60.3“ (LKW Verkehr) auf die Transportmodule errechnet sich aus den Anteilen der beiden Einzelmodule zu insgesamt 2,15%.

### **Brennen des Klinkers und Mahlen zu Zement**

Für das Modul „Brennen des Klinkers und Mahlen zu Zement“ wird der Produktionsbereich „26.2 - 26.8 – Herstellung von Keramik; Verarbeitung von Steinen und Erden“ alloziert.

Eine Allokation über Massenverhältnisse, siehe 2.2.4, erscheint aufgrund der Heterogenität des zu verteilenden Produktionsbereichs als ungeeignet. Der Energieaufwand einer Tonne verarbeiteten, also zu einer Gesteinskörnung gesiebten Sandes, ist mit dem Energieaufwand einer Tonne verarbeiteten, also zu Klinker gebrannten Rohmehls nicht zu vergleichen. Gleiches gilt auch für den CO<sub>2</sub>-Ausstoß.

Da der Energieverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Zementherstellung in Deutschland [52] bekannt sind, lässt sich ein Allokationskoeffizient mittels dieser Größen berechnen. Der Gesamtenergieverbrauch zur Zementherstellung von 101.400 TJ für das Jahr 2001 setzt sich aus dem Verbrauch an thermischer Energie von 89.800 TJ und dem Verbrauch an elektrischer Energie von 11.556 TJ zusammen. Da wie oben erläutert, nur 84,6% des Zements für die Betonproduktion eingesetzt werden, wird nur dieser Anteil berücksichtigt. Es ergibt sich somit für die Produktion von Zement zur Betonherstellung ein Energieverbrauch von 85.784 TJ, was ca. 33,0% des Energieverbrauchs des Produktionsbereichs 26.2 - 26.8 ausmacht.

Zum Vergleich wird der Anteil des Moduls an den CO<sub>2</sub>-Emissionen berechnet. Es ergibt sich für die Menge des Zements, die für die Betonproduktion eingesetzt wird, eine thermisch bedingte Emission von 4,813 Mio. t CO<sub>2</sub>. Der rohstoffbedingte CO<sub>2</sub>-Ausstoß beläuft sich auf 11,158 Mio. t CO<sub>2</sub>. Summiert man diese Anteile, erhält man eine Emission von 15,971 Mio. t CO<sub>2</sub>. Der indirekte, durch elektrische Energie bedingte Anteil an den CO<sub>2</sub>-Emissionen wird

im Sinne der UGR der Stromerzeugung und Verteilung (Produktionsbereich 40.1 - 40.2) zugeschrieben und fließt daher in diese Betrachtung nicht ein.

Vergleicht man die CO<sub>2</sub>-Emission des Moduls mit denen des betrachteten Produktionsbereichs 26.2 - 26.8, so errechnet sich ein Allokationskoeffizient von 52,1%. Dieser Wert scheint im Widerspruch zu dem Anteil am Energieverbrauch von nur 33,0% zu stehen. Die Differenz der beiden Werte bedeutet jedoch nur, dass durch die Heterogenität des Produktionsbereiches kein einheitlicher Allokationskoeffizient gefunden werden kann. Dennoch wird der Wert aus dem Vergleich der CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Allokation übernommen. Das geschieht, da die anderen I/O-Flüsse größtenteils ebenfalls Emissionen sind und die Werte der Materialentnahme, des Abfallaufkommens und des Flächenbedarfs des Bindemittelpfades bezogen auf das Produktsystem gering sind und daher eine ggf. ungeeignete Allokation für die Sachbilanz nicht ins Gewicht fällt. Der genaue Wert für die Energieallokation wird bei der Berechnung der Sachbilanzdaten, siehe 2.3.9, berücksichtigt.

### **Aufbereiten der Zusatzstoffe**

Die Betonzusatzstoffe werden durch die Flugasche repräsentiert. Diese ist ein Abfallprodukt aus Steinkohlekraftwerken. Ihre Aufbereitung beschränkt sich näherungsweise auf das Abfüllen in Säcke oder Silos. Die Aufbereitung der Zusatzstoffe wird daher in der Sachbilanz nicht berücksichtigt.

### **Zusammenfassung: Allokationskoeffizienten für den Bindemittelpfad**

In Tabelle 15 sind zusammenfassend alle Allokationskoeffizienten größer null für den Bindemittelpfad aufgeführt.

<b>Produktionsbereich</b>	<b>Allokationskoeffizient</b>
14 – Gewinnung von Steinen und Erden, sonstigen Bergbauerzeugnissen	3,7%
26.2 - 26.8 – H. v. Keramik; Verarbeitung von Steinen und Erden	52,1%*
60.2 - 60.3 – Sonst. Landverkehrs- und Transportleistungen in Rohrfernleitungen	2,15%
*: Allokationskoeffizient für Energieinput 33,0%	

**Tabelle 15 Allokation von Produktionsbereichen auf den Bindemittelpfad**

### **2.3.8 Betone: Herstellung, Ein- und Rückbau**

Der Betonpfad besteht aus insgesamt drei Modulen. Die Allokation dieser Module basiert auf den Festlegungen in 2.2.2 und erfolgt in der Regel nach Massenanteilen.

### **Herstellung des Betons aus Einsatzstoffen**

Aus der Betrachtung einer Ökobilanz für Beton [25] ergibt sich, dass die Betonherstellung, also das Mischen der Betoneinsatzstoffe gegenüber den Vorstufen nicht ins Gewicht fällt. Daher wird dieses Modul für die Sachbilanz nicht berücksichtigt.

Auch wenn dieses Modul nicht weiter betrachtet wird, ist als Grundlage für die Berechnung der Transportleistung die Angabe der Menge des in Deutschland im Jahr 2001 hergestellten Betons notwendig. Eyerer [25] gibt für das Jahr 1994 das Volumen des in Deutschland produzierten Transportbetons ohne Quellenangabe mit 74,3 Mio. m<sup>3</sup> an. Es wird angenommen, dass dieser Wert aufgrund einer Stoffraumberechnung ermittelt wurde. Als Basis diene wahrscheinlich das Betonrezept B0, siehe 2.2.3, mit einem mittleren Zementgehalt von 260 kg/m<sup>3</sup> und der für Transportbeton verwendete Zement des Jahres 1994. Berechnet man analog die Transportbetonmenge für 2001, so erhält man einen Wert von 64,6 Mio. m<sup>3</sup>. Dies erscheint plausibel, da seit 1994 die Bauaktivität deutlich gesunken ist. Unter Verwendung der Gesamtmenge an Zement für die Betonherstellung von 26,887 Mio. t, siehe 2.3.7, erhält man ein Gesamtbetonvolumen von 103,4 Mio. m<sup>3</sup> oder 244,6 Mio. t.

### **Transporte**

Das Transportmodul beschreibt den Transport vom Ort der Herstellung des Betons zum Ort des Einbaus.

Anders als für die mittlere Entfernung zwischen Transportbetonwerk und Baustelle  $s_{c,TB}$  liegen für die mittlere Entfernung zwischen Betonfertigteilwerk und Baustelle  $s_{c,FTW}$  keine Daten vor. Allerdings lässt sich aus der Verteilung des Zements auf Transportbeton- und Betonfertigteilwerke annehmen, dass es aufgrund des geringen Anteils, siehe 2.3.7, weniger Betonfertigteilwerke als Transportbetonwerke gibt. Daher liegt die Vermutung nahe, dass die mittlere Entfernung zwischen Betonfertigteilwerk und Baustelle größer als im Fall der Transportbetonwerke ist. Weil aber dieser Effekt kaum zu quantifizieren ist, wird als Näherung der Wert 15 km nach Eyerer [25], der streng nur für  $s_{c,TB}$  gilt, auch für  $s_{c,FTW}$  verwendet. Weiterhin geht der Autor davon aus, dass zum Transport des Betons nur Mischerfahrzeuge und somit LKWs benutzt werden.

Zur Abschätzung der Genauigkeit der obigen Annahmen sei erwähnt, dass sich beim Vergleich der Sachbilanzdaten für verschiedene Szenarien zeigt, dass der Einfluss der Transporte sowohl auf die Szenarien als auch auf die gesamtwirtschaftliche Bilanz sehr gering ist, siehe

2.4. Daher wird auf eine genauere Recherche und Berechnung der mittleren Entfernung zwischen dem Ort der Herstellung des Betons und dem Ort des Einbaus verzichtet.

Für die produzierte Betonmenge des Jahres 2001 von 244,6 Mio. t ergibt sich aus den oben genannten Daten und Näherungen eine Transportleistung von 3668,5 Mio. tkm, was 1,3% der gesamten LKW-Transportleistung entspricht. Daraus lässt sich der Allokationskoeffizient für dieses Modul zu 1,3% bestimmen.

Ein weiteres Transportmodul ist vorstellbar, welches den Abtransport von Abbruchmassen von der Abbruchbaustelle zu einer Deponie oder einem Recyclinghof beschreibt. Es konnten jedoch keine Daten zu mittleren Entfernungen zu diesem Modul gefunden werden. Für eine mittlere Entfernung von z.B. 25 km würde sich ein Anteil an der gesamten LKW-Transportleistung von 1,1%, für 50 km bereits 2,2% ergeben. Bezogen auf die Summe der anderen Transportmodule entsprechen diese Schätzungen ca. 20% bzw. ca. 40%. Wie oben bereits besprochen, ist der Einfluss der Transportmodule jedoch gering. Diese Tendenz wird dabei auch durch eine 40%-ige Abweichung nicht geändert. Auf Kosten der Vollständigkeit, nicht jedoch auf Kosten des umweltökonomischen Ergebnisses, wird auf die Berücksichtigung des Abtransports verzichtet.

### **Bauleistung: Ein- und Rückbau des Betons**

Für das Modul „Bauleistung: Ein- und Rückbau des Betons“ wird der Produktionsbereich „45.1 – 45.2 – Vorbereitende Baustellenarbeiten, Hoch- und Tiefbauarbeiten“ alloziert.

<b>Fraktion</b>	<b>Mio. t</b>	<b>%</b>
Beton	5083	50,5%
Kalksandsteine	327	3,2%
Ziegeleierzeugnisse	2248	22,3%
Metall insg.	234	2,3%
Gesamtstofflager	10059	100,0%

**Tabelle 16 Bauwerke als Stofflager , Bundesrepublik Deutschland (Auszug)**

Grundlage der Allokation ist die Betrachtung des durch Bauwerke dargestellten Stofflagers nach Kohler et al. [32] für das Jahr 1991. Unter der Annahme, dass sich die Verteilung des Stofflagers zwischen 1991 und dem Referenzjahr 2001 nur unwesentlich verändert hat, wird als Allokationskoeffizient der Anteil des Betons am Gesamtstofflager übernommen. Dieser beträgt 50,5%, siehe Tabelle 16.

## **Berücksichtigung des Recyclings von Abbruchmaterial –**

### **Virtueller Produktionsbereich 45.1\* - 45.2\***

Die Reduzierung der Menge an Bau- und Abbruchabfällen durch die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen in der Betonproduktion soll modelliert werden.

Die Abbruchabfallmenge infolge der Verwendung einer natürlichen Gesteinskörnung ist mit dem Produktionsbereich 45.1 - 45.2 assoziiert. Zu der angestrebten Modellierung des Einflusses der Verwendung einer rezyklierten Gesteinskörnung bei der Betonherstellung auf die Bau- und Abbruchabfälle wird daher ein neuer Produktionsbereich eingerichtet, der sich an 45.1 - 45.2 orientiert und im Rahmen dieser Studie als 45.1\* - 45.2\* bezeichnet wird, siehe 2.3.6. Hierbei kennzeichnet der Stern hinter der Nummer des Produktionsbereichs seinen virtuellen Charakter.

Im Gegensatz zu 45.1 - 45.2 ist die durch 45.1\* - 45.2\* verursachte Abfallmenge null, da alle Restmassen näherungsweise wieder zu neuem Recyclingbeton verwertet werden. Das setzt voraus, dass nicht nur Beton aus natürlichen sondern auch aus rezyklierten Gesteinskörnungen wieder rezykliert werden kann. Untersuchungen von Müller et al. [38] zeigen, dass diese Voraussetzung erfüllt werden kann.

Der neue Produktionsbereich 45.1\* - 45.2\* sollte so eingesetzt werden, dass gesamtumweltökonomisch für jede durch rezykliertes Material ersetzte Tonne natürlicher Gesteinskörnung die Abfallmenge um eine Tonne sinkt. Dadurch wird langfristig ein Gleichgewicht zwischen eingesetzten Gesteinskörnungen und rezyklierbaren Abbruchabfällen erreicht.

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei der vorgestellten Modellierung um eine von mehreren möglichen handelt, da in die Verteilung und Aufbereitung der Abbruchmassen eine Vielzahl technischer und ökonomischer Einflüsse hineinwirkt. Als Beispiel für eine Alternative sei ein Modell auf Basis von Angebot und Nachfrage genannt. Alternative Modellierungen liegen jedoch außerhalb des Rahmens dieser Studie und bilden weiteren Forschungsbedarf.

### **Allokationskoeffizienten für den Betonpfad**

Die Berechnung der Sachbilanzdaten wird erleichtert, wenn der Betonpfad in einen Recyclingbetonpfad und einen Ressourcenbetonpfad zerlegt wird. In Tabelle 17 sind alle Allokationskoeffizienten größer null für den Ressourcenbetonpfad aufgeführt. Tabelle 18 zeigt diese für den Pfad des Recyclingbetons.

Produktionsbereich	Allokationskoeffizient
45.1 - 45.2 – Vorbereitende Baustellenarbeiten, Hoch- und Tiefbauarbeiten	50,5%
60.2 - 60.3 – Sonst. Landverkehrs- und Transportleistungen in Rohrfernleitungen	1,3%

**Tabelle 17 Allokation von Produktionsbereichen auf den Pfad des Ressourcenbetons**

Produktionsbereich	Allokationskoeffizient	
45.1* - 45.2* – Vorbereitende Baustellenarbeiten, Hoch- und Tiefbauarbeiten, Abbruchmaterial wird zu Beton rezykliert	50,5%	
60.2 - 60.3 – Sonst. Landverkehrs- und Transportleistungen in Rohrfernleitungen	T1	T2
	0,0%	1,3%

**Tabelle 18 Allokation von Produktionsbereichen auf den Pfad des Recyclingbetons**

### 2.3.9 Berechnung der Baustoff und Transportszenarien

In diesem Abschnitt erfolgt die eigentliche Ermittlung der umweltökonomischen Sachbilanzdaten für den Stahlressourcenbeton und für die verschiedenen Stahlrecyclingbetonszenarien.

Wie in 2.1 gefordert, geben die berechneten realen Sachbilanzdaten Auskunft darüber, welche I/O-Flüsse und welcher Flächenbedarf durch die Verwendung von Stahlressourcenbeton zur Erstellung von Bauwerken verursacht werden. Darüber hinaus werden für insgesamt sechs Stahlrecyclingbetonszenarien virtuelle Sachbilanzdaten berechnet.

Die virtuellen Sachbilanzdaten der einzelnen Szenarien beschreiben den Zustand der sich einstellen würde, wenn in der Bundesrepublik Deutschland anstelle des Stahlressourcenbetons ausschließlich der Stahlrecyclingbeton des entsprechenden Szenarios verwendet werden würde.

Die für die Ermittlung der Sachbilanzdaten allgemein benötigte Ausgangszuordnungsmatrix  $Q_{PB}$  ist konstant und in Anhang A.5 beschrieben. Für die untersuchten Fälle wird die Koeffizientenmatrix  $A$  nach (2.3) jeweils aus den bereits bekannten Allokationskoeffizienten gebildet und dargestellt. Die eigentlichen Sachbilanzdaten finden sich differenziert nach Pfaden in der Zuordnungsmatrix  $Q_{MP}$ . In dieser Matrix ist die besondere Energieallokation für den Bindepfaden bereits berücksichtigt.

Die hier durchgeführten Berechnungen der Sachbilanzdaten machen keine Aussage über die technische Machbarkeit der Stahlrecyclingbetonszenarien, sondern zeigen die umweltökonomischen Potentiale des Baustoffs Recyclingbeton auf. Die Aktivierbarkeit der Potentiale wird in 2.5 diskutiert.

## Ressourcenbeton B0

Als Referenz für die Wirkungsabschätzung, siehe 2.4, dient die Berechnung des Produktsystems Stahlressourcenbeton (B0). Damit wird der umweltökonomische Ist-Zustand des Produktsystems Stahlbeton in der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2001 ermittelt.

Produktionsbereich	Betonstahlpfad	Gesteinskörnungspfad	Bindemittelpfad	Betonpfad
13	2,8%	0,0%	0,0%	0,0%
14	0,0%	26,4%	3,7%	0,0%
14*	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
26.2 - 26.8	0,0%	0,0%	52,1%	0,0%
27.1 - 27.3	2,8%	0,0%	0,0%	0,0%
28	2,9%	0,0%	0,0%	0,0%
45.1 - 45.2	0,0%	0,0%	0,0%	50,5%
45.1* - 45.2*	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
60.1	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
60.2 - 60.3	0,0%	1,2%	2,2%	1,3%
61	0,0%	0,6%	0,0%	0,0%

**Tabelle 19 Allokationsmatrix für Stahlressourcenbeton (B0T0)**

I/O-Fluss bzw. Bestandsgröße	Pfad				Produkt-system
	Betonstahl	Gesteinskörnung	Bindemittel	Beton	
Energieinput in TJ	19.869	17.082	93.434	109.325	239.709
Wassereinsatz in Mio. m <sup>3</sup>	15	127	108	25	275
Abwasser in Mio. m <sup>3</sup>	13	119	85	24	241
Treibhaus-Emissionen in Mio. t CO <sub>2</sub> -Äquiv.	1,492	2,515	16,723	2,245	22,975
CO <sub>2</sub> -Emissionen in Mio. t	1,479	2,497	16,639	2,198	22,813
NH <sub>3</sub> -Emissionen in t	11	49	132	122	315
SO <sub>2</sub> -Emissionen in t	2.140	502	8.909	431	11.981
NO <sub>x</sub> -Emissionen in t	2.236	5.517	22.056	11.081	40.889
NMVOC Emissionen in t	152	1.284	2.198	2.767	6.400
Materialeinsatz in Mio. t	0,1	193,7	27,7	0,0	221,6
Abfallaufkommen in Mio. t	0,0	1,2	1,0	123,1	125,3
Flächenbedarf in km <sup>2</sup>	11	330	99	361	801

**Tabelle 20 Sachbilanzdaten des Produktsystems Stahlressourcenbeton (B0T0) und dessen Modulpfade**

Stahlressourcenbeton wird ohne Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen hergestellt. Daher werden nur die Pfade für Betonstahl, siehe 2.3.4, für natürliche Gesteinskörnungen, siehe 2.3.5, für Bindemittel, siehe 2.3.7 und für Beton, siehe 2.3.8, berücksichtigt. Die Allokationskoeffizienten der genannten Pfade werden zur Koeffizientenmatrix  $\mathbf{A}_{B0T0}$  zusammenge-

fasst, siehe Tabelle 19. Die Aufschlüsselung der Produktionsbereiche ist Anhang A.2 zu entnehmen.

Die Zuordnungsmatrix  $\mathbf{Q}_{MP,B0T0}^T$  ist der Tabelle 20 zu entnehmen. In dieser Tabelle ist ebenfalls der aus den Sachbilanzdaten der einzelnen Pfade aggregierte Vektor dargestellt, der die I/O-Flüsse und den Flächenbedarf des Produktsystems Stahlressourcenbeton enthält.

### **Szenario: Recyclingbeton B1 mit Transportvariante T1**

Das erste Szenario basiert auf dem Beton B1, der sich an einem für ein Demobauwerk in München [66] eingesetzten Beton orientiert, und dem Transportszenario T1, das vorsieht, dass der vollständige Prozess vom Abbau des Abbruchmaterials bis zum Einbau des Betons mit rezykliertem Gesteinskörnung an ein und demselben Ort geschieht, siehe 2.2.3. Dieser Stahlrecyclingbeton ist ein angepasster Beton und benötigt daher die gleiche Menge Betonstahl wie Stahlressourcenbeton. Die Koeffizienten des Betonstahlpfads können ohne Änderung übernommen werden, siehe 2.3.4.

Die Koeffizienten des Pfads der Gesteinskörnung, siehe 2.3.5 und 2.3.6, bilden die zweite Spalte der Koeffizientenmatrix  $\mathbf{A}$ . Diese Spalte wird im Weiteren als Vektor  $\mathbf{a}_{GK}$  bezeichnet. Der Pfad der rezyklierten Gesteinskörnung sei durch den Vektor  $\mathbf{a}_{GK,rez}$ , der der natürlichen Gesteinskörnung durch den Vektor  $\mathbf{a}_{GK,nat}$  gebildet. Für Betone, deren Gesteinskörnungen aus natürlichem und rezykliertem Material bestehen, kann  $\mathbf{a}_{GK}$  unter Berücksichtigung der Massenverhältnisse aus  $\mathbf{a}_{GK,rez}$  und  $\mathbf{a}_{GK,nat}$  gebildet werden, siehe Gleichung (2.5). Hierbei ist zu beachten, dass sich die Koeffizienten der Pfade auf Stahlressourcenbetonmengen (B0) beziehen. Zusätzlich ist eine ggf. geringere Dichte des rezyklierten Materials zu berücksichtigen. Diese Bezüge sind in die Verteilungskoeffizienten  $\alpha$  eingearbeitet, siehe Gleichungen (2.6) und (2.7). Für das hier betrachtete Szenario berechnet sich  $\alpha_{GZ,rez}$  zu 26,6% und  $\alpha_{GZ,nat}$  zu 73,4%.

$$\mathbf{a}_{GK} = \alpha_{GK,rez} \cdot \mathbf{a}_{GK,rez} + \alpha_{GK,nat} \cdot \mathbf{a}_{GK,nat} \quad (2.5)$$

$$\alpha_{GZ,rez} = \frac{m_{GK,rez}}{m_{GK,B0}} \quad (2.6)$$

$$\alpha_{GZ,nat} = \frac{m_{GK,nat}}{m_{GK,B0}} \quad (2.7)$$

Dabei ist

$m_{\text{GK,B0}}$  Masse der Gesamtgesteinskörnung des Referenzbetons B0 bezogen auf 1 m<sup>3</sup>

$m_{\text{GK,rez}}$  Masse der rezyklierten Gesteinskörnung des betrachteten Betons bezogen auf 1 m<sup>3</sup>

$m_{\text{GK,nat}}$  Masse der natürlichen Gesteinskörnung des betrachteten Betons bezogen auf 1 m<sup>3</sup>

Der Zement- und der Flugaschenanteil des Betons B1 gleichen dem Referenzbeton B0. Es können die Allokationskoeffizienten des Bindemittelpfads ohne Änderung übernommen werden, siehe 2.3.7.

Die Koeffizienten des Betonpfads, siehe 2.3.8, erzeugen die vierte Spalte der Koeffizientenmatrix  $\mathbf{A}$ . Diese Spalte wird im Weiteren als Vektor  $\mathbf{a}_c$  bezeichnet. Der Pfad des Recyclingbetons sei durch den Vektor  $\mathbf{a}_{c,\text{rez}}$ , der des Ressourcenbetons durch den Vektor  $\mathbf{a}_{c,\text{nat}}$  gebildet. Für Betone, deren Gesteinskörnungen aus natürlichem und rezykliertem Material bestehen, erfolgt die Berechnung von  $\mathbf{a}_c$  analog zur Berechnung von  $\mathbf{a}_{\text{GK}}$ , siehe Gleichung (2.8) bis (2.10). Hierbei ist zu beachten, dass für  $\mathbf{a}_{c,\text{rez}}$  nur der Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung am Betongesamtgewicht berücksichtigt wird, da die restlichen Massen (z.B. Zement) dem Ressourcenbeton entsprechen. Für das betrachtete Szenario berechnet sich  $\alpha_{c,\text{rez}}$  zu 20,7% und  $\alpha_{c,\text{nat}}$  zu 79,3%.

$$\mathbf{a}_c = \alpha_{c,\text{rez}} \cdot \mathbf{a}_{c,\text{rez}} + \alpha_{c,\text{nat}} \cdot \mathbf{a}_{c,\text{nat}} \quad (2.8)$$

$$\alpha_{c,\text{rez}} = \frac{m_{\text{GK,rez}}}{m_{c,\text{B0}}} \quad (2.9)$$

$$\alpha_{c,\text{nat}} = \frac{m_c - m_{\text{GK,rez}}}{m_{c,\text{B0}}} \quad (2.10)$$

Dabei ist

$m_{c,\text{B0}}$  Masse des Referenzbetons B0 bezogen auf 1 m<sup>3</sup>

$m_c$  Masse des betrachteten Betons bezogen auf 1 m<sup>3</sup>

Die Allokationskoeffizienten der genannten Pfade werden zur Koeffizientenmatrix  $A_{B1T1}$  zusammengefasst, siehe Tabelle 21 und Anhang A.2.

Produktionsbereich	Betonstahlpfad	Gesteinskörnungspfad	Bindemittelpfad	Betonpfad
13	2,8%	0,0%	0,0%	0,0%
14	0,0%	19,3%	3,7%	0,0%
14*	0,0%	7,0%	0,0%	0,0%
26.2 - 26.8	0,0%	0,0%	52,1%	0,0%
27.1 - 27.3	2,8%	0,0%	0,0%	0,0%
28	2,9%	0,0%	0,0%	0,0%
45.1 - 45.2	0,0%	0,0%	0,0%	40,1%
45.1* - 45.2*	0,0%	0,0%	0,0%	10,5%
60.1	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
60.2 - 60.3	0,0%	0,9%	2,2%	1,0%
61	0,0%	0,5%	0,0%	0,0%

**Tabelle 21 Allokationsmatrix für das Recyclingbetonszenario B1T1**

Die Zuordnungsmatrix  $Q_{MP,B1T1}^T$  findet sich in Tabelle 22. In dieser Tabelle ist ebenfalls der aus den Sachbilanzdaten der einzelnen Pfade aggregierte Vektor dargestellt, der die I/O-Flüsse und den Flächenbedarf des Produktsystems Stahlrecyclingbeton (B1T1) enthält.

I/O-Fluss bzw. Bestandsgröße	Pfad				Produktsystem
	Betonstahl	Gesteinskörnung	Bindemittel	Beton	
Energieinput in TJ	19.869	16.185	93.434	108.622	238.110
Wassereinsatz in Mio. m <sup>3</sup>	15	127	108	25	275
Abwasser in Mio. m <sup>3</sup>	13	119	85	24	241
Treibhaus-Emissionen in Mio. t CO <sub>2</sub> -Äquiv.	1,492	2,461	16,723	2,201	22,877
CO <sub>2</sub> -Emissionen in Mio. t	1,479	2,444	16,639	2,155	22,717
NH <sub>3</sub> -Emissionen in t	11	46	132	120	309
SO <sub>2</sub> -Emissionen in t	2.140	489	8.909	421	11.959
NO <sub>x</sub> -Emissionen in t	2.236	5.157	22.056	10.793	40.242
NMVOC Emissionen in t	152	1.194	2.198	2.696	6.240
Materialeinsatz in Mio. t	0,1	142,1	27,7	0,0	170,0
Abfallaufkommen in Mio. t	0,0	1,2	1,0	97,6	99,8
Flächenbedarf in km <sup>2</sup>	11	247	99	360	716

**Tabelle 22 Sachbilanzdaten des Produktsystems Stahlrecyclingbeton (B1T1) und dessen Modulpfade**

### Szenario: Recyclingbeton B1 mit Transportvariante T2

Das zweite Szenario basiert auf dem Beton B1, der sich an einem für ein Demobauwerk in München eingesetzten Beton [66] orientiert und dem Transportszenario T2, das vorsieht, dass der vollständige Prozess vom Abbau des Abbruchmaterials bis zum Einbau des Betons mit rezykliertem Gesteinskörnung an verschiedenen Orten geschieht, siehe 2.2.3.

Produktionsbereich	Betonstahlpfad	Gesteinskörnungspfad	Bindemittelpfad	Betonpfad
13	2,8%	0,0%	0,0%	0,0%
14	0,0%	19,3%	3,7%	0,0%
14*	0,0%	7,0%	0,0%	0,0%
26.2 - 26.8	0,0%	0,0%	52,1%	0,0%
27.1 - 27.3	2,8%	0,0%	0,0%	0,0%
28	2,9%	0,0%	0,0%	0,0%
45.1 - 45.2	0,0%	0,0%	0,0%	40,1%
45.1* - 45.2*	0,0%	0,0%	0,0%	10,5%
60.1	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
60.2 - 60.3	0,0%	2,2%	2,2%	1,3%
61	0,0%	0,6%	0,0%	0,0%

**Tabelle 23 Allokationsmatrix für das Recyclingbetonszenario B1T2**

Die Koeffizienten des Betonstahlpfads entsprechen dem Szenario B1 mit Transportvariante T1. Für den Pfad der Gesteinskörnung und den Bindemittelpfad können die Koeffizienten aus B1T1 bis auf die Transportkoeffizienten übernommen werden. Letztere errechnen sich mit Hilfe der Gleichung (2.5) unter Berücksichtigung der Besonderheiten des Pfads der rezyklierten Gesteinskörnungen für das Transportszenario T2, siehe 2.3.6. Gleiches gilt für den Betonpfad. Gegenüber dem Szenario B1T1 müssen nur die Transportkoeffizienten angepasst werden. Grundlage hierfür sind Gleichung (2.8) und die Besonderheiten des Recyclingbetonpfads für das Transportszenario T2, siehe 2.3.8.

Die Allokationskoeffizienten der genannten Pfade werden zur Koeffizientenmatrix  $A_{B1T2}$  zusammengefasst, siehe Tabelle 23. Die Aufschlüsselung der Produktionsbereiche ist Anhang A.2 zu entnehmen.

I/O-Fluss bzw. Bestandsgröße	Pfad				Produktsystem
	Betonstahl	Gesteinskörnung	Bindemittel	Beton	
Energieinput in TJ	19.869	19.772	93.434	109.325	242.400
Wassereinsatz in Mio. m <sup>3</sup>	15	128	108	25	276
Abwasser in Mio. m <sup>3</sup>	13	119	85	24	241
Treibhaus-Emissionen in Mio. t CO <sub>2</sub> -Äquiv.	1,492	2,682	16,723	2,245	23,142
CO <sub>2</sub> -Emissionen in Mio. t	1,479	2,660	16,639	2,198	22,976
NH <sub>3</sub> -Emissionen in t	11	59	132	122	324
SO <sub>2</sub> -Emissionen in t	2.140	540	8.909	431	12.020
NO <sub>x</sub> -Emissionen in t	2.236	6.618	22.056	11.081	41.991
NMVOC Emissionen in t	152	1.558	2.198	2.767	6.674
Materialeinsatz in Mio. t	0,1	142,1	27,7	0,0	170,0
Abfallaufkommen in Mio. t	0,0	1,2	1,0	97,6	99,8
Flächenbedarf in km <sup>2</sup>	11	253	99	361	724

**Tabelle 24 Sachbilanzdaten des Produktsystems Stahlrecyclingbeton (B1T2) und dessen Modulepfade**

Die Zuordnungsmatrix  $\mathbf{Q}_{MP,B1T2}^T$  findet sich in Tabelle 24. In dieser Tabelle ist ebenfalls der aus den Sachbilanzdaten der einzelnen Pfade aggregierte Vektor dargestellt, der die I/O-Flüsse und den Flächenbedarf des Produktsystems Stahlrecyclingbeton (B1T2) enthält.

### **Szenario: Recyclingbeton B2 mit Transportvariante T1**

Das dritte Szenario basiert auf dem Beton B2, der sich an einem Laborbeton mit einer Gesteinskörnung aus 100% rezykliertem Material orientiert und dem Transportszenario T1, siehe Abschnitt 2.2.3.

Der Stahlrecyclingbeton B2 benötigt eine angepasste Bemessung. Diese führt im Vergleich zu Stahlressourcenbeton zu einer höheren Menge Betonstahl. Bei der vorgeschlagenen angepassten Bemessung [65] ist jedoch ein Beton mit rezykliertem Sand nicht vorgesehen. Als Näherung werden die Modellrechnungen aus 8.1 und die Überlegungen zum Stahlrecyclingbeton B3 herangezogen und der daraus resultierende, zusätzliche Stahlbedarf pauschal verdoppelt. Dies führt für den Stahlrecyclingbeton des Szenarios im Vergleich zum Stahlressourcenbeton zu einem 3% höheren Stahlbedarf. Die Allokationskoeffizienten des Betonstahlpfads werden daher um 3% erhöht und in dieser Form für die Koeffizientenmatrix verwendet, siehe 2.3.4. Bei der Berechnung der Koeffizienten des Gesteinskörnungspfads mit Gleichung (2.5) ergeben sich  $\alpha_{GZ,rez}$  zu 94,8% und  $\alpha_{GZ,nat}$  zu 0%.

Der Zement- und der Flugaschenanteil des Betons B2 sind größer als die des Referenzbetons B0. Da modellgemäß für die Flugasche nur der Transport I/O-Flüsse erzeugt, wird zur Anpassung des Bindemittelpfads näherungsweise der Mehrbedarf an Zement des Betons B2 gegenüber dem Beton B0 zur Korrektur der Allokationskoeffizienten herangezogen. Dieser Mehrbedarf für B2 beträgt 7,7%. Die Allokationskoeffizienten des Bindemittelpfads werden entsprechend erhöht, siehe 2.3.7.

Für die Ermittlung der Allokationskoeffizienten des Betonpfads gilt Gleichung (2.8) unter Berücksichtigung des Transportszenarios T1. Die  $\alpha$ -Werte zur Gewichtung des Recyclingbeton- und des Ressourcenbetonpfads ergeben sich zu  $\alpha_{c,rez} = 73,8\%$  und  $\alpha_{c,nat} = 25,2\%$ .

Die Allokationskoeffizienten der genannten Pfade werden zur Koeffizientenmatrix  $\mathbf{A}_{B2T1}$  zusammengefasst, siehe Anhang A.6. Dort findet sich auch die Zuordnungsmatrix  $\mathbf{Q}_{MP,B2T1}^T$ . In dieser Zuordnungsmatrix ist der aus den Sachbilanzdaten der einzelnen Pfade aggregierte Vektor dargestellt, der die I/O-Flüsse und den Flächenbedarf des Produktsystems Stahlrecyclingbeton (B2T1) enthält.

**Szenario: Recyclingbeton B2 mit Transportvariante T2**

Das vierte Szenario basiert auf dem Beton B2, der sich an einem Laborbeton mit einer Gesteinskörnung aus 100% rezykliertem Material orientiert und dem Transportszenario T2, siehe Abschnitt 2.2.3.

Die Koeffizienten des Betonstahlpfads entsprechen dem Szenario B2 mit der Transportvariante T1. Für den Pfad der Gesteinskörnung und den Bindemittelpfad können die Koeffizienten aus B2T1 bis auf die Transportkoeffizienten übernommen werden. Letztere können mit Hilfe der Gleichung (2.5) unter Berücksichtigung der Besonderheiten des Pfads der rezyklierten Gesteinskörnungen für das Transportszenario T2, siehe 2.3.6, errechnet werden. Gleiches gilt für den Betonpfad. Gegenüber dem Szenario B2T1 müssen nur die Transportkoeffizienten angepasst werden. Grundlage hierfür sind Gleichung (2.8) und die Besonderheiten des Recyclingbetonpfads für das Transportszenario T2, siehe 2.3.8.

Die Allokationskoeffizienten der genannten Pfade werden zur Koeffizientenmatrix  $\mathbf{A}_{B2T2}$  zusammengefasst, siehe Anhang A.7. Die Zuordnungsmatrix  $\mathbf{Q}_{MP,B2T2}^T$ , die die I/O-Flüsse und den Flächenbedarf des Produktsystems Stahlrecyclingbeton (B2T2) und seiner Pfade enthält, findet sich ebenfalls in Anhang A.7.

**Szenario: Recyclingbeton B3 mit Transportvariante T1**

Das fünfte Szenario basiert auf dem Beton B3, der sich an einem Laborbeton mit einer groben Gesteinskörnung aus 100% rezykliertem Material und einem Sandanteil aus natürlichem Material orientiert und dem Transportszenario T1, das vorsieht, dass der vollständige Prozess vom Abbau des Abbruchmaterials bis zum Einbau des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung an ein und demselben Ort geschieht, siehe 2.2.3.

Der Stahlrecyclingbeton B3 benötigt eine angepasste Bemessung, die im Vergleich zu Stahlressourcenbeton zu einer höheren Menge Betonstahl führt. Als Näherung für den Stahlbedarf werden die Modellrechnungen aus 8.1 herangezogen. Der dort berechnete zusätzliche Stahlbedarf des Stahlrecyclingbetons gegenüber dem Stahlressourcenbeton beläuft sich auf 0,6%. Da nicht nachgewiesen ist, ob die Ergebnisse der Modellrechnungen allgemeingültig sind, wurde der Mehrbedarf näherungsweise großzügig verdoppelt und zu 1,5% festgesetzt. Forschungsbedarf besteht für eine genauere Berechnung dieses Stahlmehrbedarfs. Analog zum Vorgehen für den Stahlrecyclingbeton B2 werden die Allokationskoeffizienten des Betonstahlpfads um 1,5% erhöht und in dieser Form für die Koeffizientenmatrix verwendet, siehe 2.3.4.

Bei der Berechnung der Koeffizienten des Gesteinskörnungspfads mit Gleichung (2.5) ergeben sich  $\alpha_{GZ,rez}$  zu 64,1% und  $\alpha_{GZ,nat}$  zu 35,9%. Der Zement- und der Flugaschenanteil des Betons B3 gleichen dem Referenzbeton B0. Es können die Allokationskoeffizienten des Bindemittelpfads ohne Änderung übernommen werden, siehe 2.3.7. Für die Ermittlung der Allokationskoeffizienten des Betonpfads gilt Gleichung (2.8) unter Berücksichtigung des Transportszenarios T1. Die  $\alpha$ -Werte zur Gewichtung des Recyclingbeton- und des Ressourcenbetonpfads ergeben sich zu  $\alpha_{c,rez} = 49,9\%$  und  $\alpha_{c,nat} = 50,1\%$ .

Die Allokationskoeffizienten der genannten Pfade werden zur Koeffizientenmatrix  $\mathbf{A}_{B3T1}$  zusammengefasst, siehe Anhang A.8. Die Zuordnungsmatrix  $\mathbf{Q}_{MP,B3T1}^T$  findet sich ebenfalls in Anhang A.8.

### **Szenario: Recyclingbeton B3 mit Transportvariante T2**

Das sechste Szenario basiert auf dem Beton B3 und dem Transportszenario T2, siehe Abschnitt 2.2.3.

Die Koeffizienten des Betonstahlpfads entsprechen dem Szenario B3 mit Transportvariante T1. Für den Pfad der Gesteinskörnung und den Bindemittelpfad können die Koeffizienten aus B3T1 bis auf die Transportkoeffizienten übernommen werden. Letztere können mit Hilfe der Gleichung (2.5) unter Berücksichtigung der Besonderheiten des Pfads der rezyklierten Gesteinskörnungen für das Transportszenario T2, siehe 2.3.6, errechnet werden. Gleiches gilt für den Betonpfad. Gegenüber dem Szenario B3T1 müssen nur die Transportkoeffizienten angepasst werden. Grundlage hierfür sind Gleichung (2.8) und die Besonderheiten des Recyclingbetonpfads für das Transportszenario T2, siehe 2.3.8.

Die Allokationskoeffizienten der genannten Pfade werden zur Koeffizientenmatrix  $\mathbf{A}_{B3T2}$  zusammengefasst, siehe Anhang A.9. Die Zuordnungsmatrix  $\mathbf{Q}_{MP,B3T2}^T$ , die die I/O-Flüsse und den Flächenbedarf des Produktsystems Stahlrecyclingbeton (B3T2) und seiner Pfade enthält, findet sich ebenfalls in Anhang A.9.

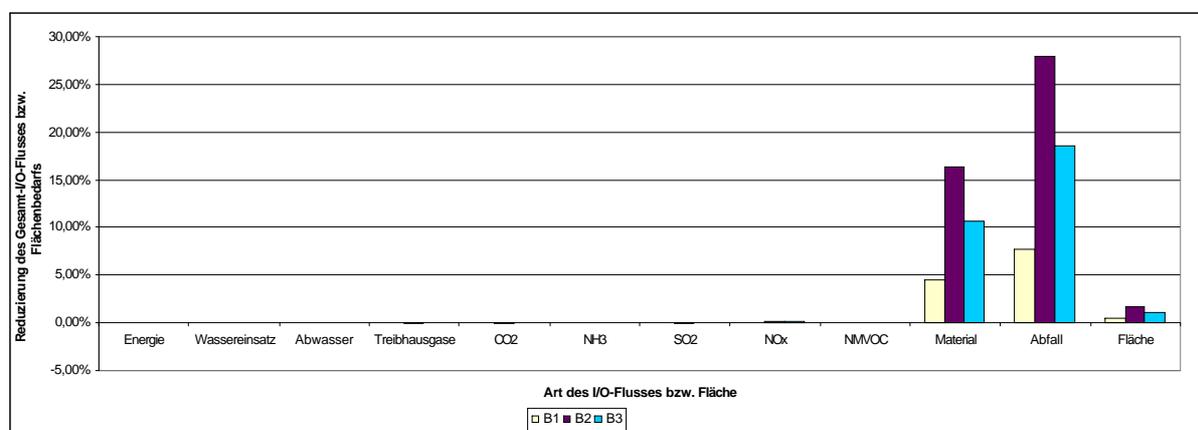
## **2.4 Wirkungsabschätzung als Interpretation der Stoffflüsse**

In diesem Abschnitt werden die Methodik und die Ergebnisse der durchgeführten ökologischen und ökonomischen Abschätzung dargestellt. Es wird gezeigt, dass die Verwendung von Stahlrecyclingbeton anstelle von Stahlressourcenbeton umweltökonomisch zu einer Senkung der Abfallmenge, der Ressourcenentnahme und des Flächenbedarfs bei nahezu gleich blei-

benden Emissionen von Luftschadstoffen führen würde, siehe 2.4.1. Aus ökonomischer Sicht kann dargelegt werden, dass die Verwendung von Stahlrecyclingbeton anstelle von Stahlressourcenbeton auch einen finanziellen Anreiz bieten würde, siehe 2.4.2.

## 2.4.1 Ökologische Perspektive

Die ökologische Perspektive der Wirkungsabschätzung ist nach [22] die Phase einer regulären Ökobilanz, in der die Beurteilung der Bedeutung potentieller Umweltwirkungen mit Hilfe der Ergebnisse der Sachbilanz angestrebt wird. Wie bereits in 2.2.5 erklärt, wird in diesem Abschnitt untersucht, welche Auswirkungen die Verwendung von Recyclingbeton in seinen verschiedenen Szenarien anstelle von Stahlressourcenbeton auf die Gesamt-I/O-Flüsse und den Gesamtflächenbedarf hervorrufen würde. Dies geschieht in einem ersten Schritt mittels des Bezugs der Sachbilanzdaten, siehe 2.3.9, des Stahlressourcenbetons bzw. eines Stahlrecyclingbetons auf die Sachbilanzdaten aller Produktionsbereiche für die Bundesrepublik Deutschland für das Referenzjahr 2001 nach UGR [49]. Im Weiteren werden letztere Sachbilanzdaten als Gesamtsachbilanzdaten bezeichnet. In einem zweiten Schritt werden die ermittelten Anteile des Referenzproduktsystems Stahlressourcenbeton an den Gesamtsachbilanzdaten mit denen der Stahlrecyclingbetonszenarien verglichen.



**Bild 8 Wirkung des Austauschs von Stahlressourcenbeton durch Recyclingbeton auf die Gesamt-I/O-Flüsse und Gesamt-Siedlungs- und Verkehrsfläche aller Produktionsbereiche nach UGR**

Eine Übersicht über die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung findet sich in Anhang A.10. In Bild 8 sind diese Ergebnisse zusätzlich visualisiert. Dargestellt ist die Reduzierung eines I/O-Flusses oder des Flächenbedarfs infolge der Verwendung von Stahlrecyclingbeton anstelle von Stahlressourcenbeton bezogen auf die Gesamtsachbilanzdaten. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit sind nur die Werte der Transportszenarien T1 abgebildet. Da die Unter-

schiede bezogen auf die Gesamtsachbilanzdaten zwischen den Transportszenarien T1 und T2 sehr gering ausfallen, wird auf eine eigene Darstellung verzichtet.

Deutlich erkennbar in Bild 8 ist, dass sich für die Verwendung der Stahlrecyclingbetone B1, B2 oder B3 anstelle von Stahlressourcenbeton trotz eines Mehrbedarfs dieser Recyclingbetone an den energieintensiven Produkten Stahl und ggf. Zement der Energieinput und die Treibhaus- bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen bezogen auf die Gesamtsachbilanzdaten praktisch nicht verändern würden. Auch die Änderungen des Wassereinsatzes, des Abwassers und der Luftschadstoffe wären zu vernachlässigen. Sichtbare Abweichungen ergäben sich nur in den Bereichen Materialentnahme, Abfall und Flächenbedarf. In diesen drei Kategorien könnten die I/O-Flüsse und der Bedarf an Siedlungs- und Verkehrsfläche deutlich reduziert werden.

### **Auswirkung auf den direkten Energieverbrauch im Inland**

Der direkte Energieverbrauch des Stahlressourcenbetons liegt bei 239.709 TJ oder 2,3% des Gesamtinlandsverbrauchs. Die Stahlrecyclingbetonszenarien liegen in einem Bereich zwischen 2,2% und 2,4%. Das bedeutet, dass die Schwankungen in einem Bereich von nur 0,2%-Punkten liegen. Berücksichtigt man die Rechengenauigkeit, kann man die Aussage treffen, dass sich für den direkten Gesamtenergieverbrauch in Deutschland durch die Verwendung von Stahlrecyclingbeton anstelle von Stahlressourcenbeton keine Änderungen ergäben.

### **Auswirkung auf den Wassereinsatz und das Abwasser im Inland**

Der für den Stahlressourcenbeton notwendige Wassereinsatz im Inland liegt bei 275 Mio. m<sup>3</sup> oder 0,7% des Gesamtinlandsverbrauchs. Für das Abwasser ergibt sich ein Volumen von 241 Mio. m<sup>3</sup>, was ebenfalls 0,7% des Gesamtabwassers ausmacht. Alle Stahlrecyclingbetonszenarien erreichen in beiden Kategorien den gleichen Wert von 0,7% und hätten somit den gleichen Anteil wie der Stahlressourcenbeton. Es lässt sich daher die Aussage treffen, dass sich für den Wassereinsatz und das Abwasser in Deutschland durch die Verwendung von Stahlrecyclingbeton anstelle von Stahlressourcenbeton keine Änderungen ergäben.

### **Auswirkungen auf die direkten Treibhausgas-, CO<sub>2</sub>-, NH<sub>3</sub>-, SO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- und NMVOC-Emissionen im Inland**

Die direkten Treibhausgas- und Luftschadstoff-Emissionen des Stahlressourcenbetons liegen größtenteils bei 2,1% bis 3,7% der jeweiligen Gesamtinlandsemission. Für die NH<sub>3</sub>- und NMVOC-Emissionen liegen die Anteile an der Gesamtinlandsemission sogar unter 1,0%. Es ist zu beobachten, dass die Stahlrecyclingbetonszenarien mit der Transportvariante T1 gleich oder sogar um 0,1%-Punkt besser abschneiden als der Stahlressourcenbeton. Für Stahlrecyc-

lingbetone mit der Transportvariante T2 liegen die Anteile an der Gesamtinlandsemission um etwa 0,2%-Punkte höher.

Berücksichtigt man die Rechengenauigkeit, kann man die Aussage treffen, dass sich für die direkten Treibhausgas- und Luftschadstoff-Emissionen in Deutschland durch die Verwendung von Stahlrecyclingbeton anstelle von Stahlressourcenbeton praktische keine Änderungen ergäben. Dieses Ergebnis überrascht, da man vermuten könnte, dass sich der Mehrbedarf der Betone B2 und B3 an den energieintensiven Produkten Betonstahl und ggf. Zement in den Bereichen Energieinput und Treibhaus- bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen deutlicher auswirken würde. Erklärbar ist dies, da in Bezug auf die Gesamtsachbilanzdaten andere Emittenten wesentlich deutlicher ins Gewicht fallen. Zu diesen Emittenten gehören die übrige (etwa 97,5%) Stahlproduktion und die Erzeugung und Verteilung von Elektrizität (Energiewirtschaft)<sup>3</sup>.

### **Auswirkungen auf den Materialeinsatz (Verwertete Entnahme von Feststoffen) im Inland**

Die verwertete Entnahme von Feststoffen für den Stahlressourcenbeton liegt bei 221,6 Mio. t oder 18,9% der Gesamtinlandsentnahme. Während die Transportszenarien keinen Einfluss auf den Materialeinsatz für die Stahlrecyclingbetone haben, wirkt sich die Betonzusammensetzung deutlich aus. Je höher der Anteil des rezyklierten Materials an der Gesamtgesteinskörnung ist, umso deutlicher würde die Reduzierung der Materialentnahme ausfallen.

Mit dem angepassten Beton B1 könnte eine Verringerung von 4,4%-Punkten auf 14,5% der Gesamtinlandsentnahme realisiert werden. Für die Betone B2 und B3 mit angepasster Bemessung wären Reduzierungen um 16,3%-Punkte bzw. 10,6%-Punkte möglich.

### **Auswirkungen auf das Abfallaufkommen im Inland**

Das Abfallaufkommen für den Stahlressourcenbeton liegt bei 125,3 Mio. t oder 38,0% des Gesamtabfallaufkommens im Inland. Die Situation für das Abfallaufkommen hängt über die gewählte Abschätzung der Recyclingquote, siehe 2.3.8, deutlich mit dem Anteil des rezyklierten Materials an der Gesamtgesteinskörnung zusammen. Für die Auswirkungen des Ersatzes des Stahlressourcenbetons durch einen Stahlrecyclingbeton auf das Abfallaufkommen sind daher Ähnlichkeiten zu den Auswirkungen auf die Materialentnahme zu beobachten. Im Fall

---

<sup>3</sup> Bei der Erzeugung von Strom werden Energieträger wie z.B. Steinkohle mit einem Wirkungsgrad von weit unter 100% in Elektrizität umgewandelt. Das heißt, dass Energie aufgewendet werden muss, um Energie zu erzeugen. Die aufgewendete Energie und die direkten Emissionen werden daher der Energiewirtschaft zugeordnet.

des Stahlrecyclingbetons B1 könnte eine Änderung des Abfallaufkommens um 7,7%-Punkte erreicht werden. Für die Stahlrecyclingbetone B2 und B3 liegen diese Minderungen bei 27,9%-Punkten bzw. 18,6%-Punkten.

### **Auswirkungen auf die Siedlungs- und Verkehrsfläche inkl. Abbauland im Inland**

Der Bedarf des Stahlressourcenbetons an Siedlungs- und Verkehrsfläche inkl. Abbauland beläuft sich auf 801 km<sup>2</sup> oder 4,1% der gesamten Siedlungs- und Verkehrsfläche inkl. Abbauland in der Bundesrepublik Deutschland. Durch den Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen müssen natürliche Gesteinskörnungen nicht abgebaut werden. Es fallen somit Abbauflächen weg, die sich oft jahrzehntelang nicht in das Landschaftsbild einfügen. Bezogen auf die gesamte Siedlungs- und Verkehrsfläche inkl. Abbauland sind die möglichen Einsparungen durch die Verwendung von Stahlrecyclingbeton anstelle von Stahlressourcenbeton in einem Bereich von 0,4%-Punkten bis 1,6%-Punkten.

### **2.4.2 Ökonomische Perspektive**

In Übereinstimmung mit den Zielen der wirtschaftlichen Betrachtung, siehe 2.1.2, beschränkt sich die ökonomische Wirkungsabschätzung auf betriebswirtschaftliche Aspekte. Es soll abgeschätzt werden, ob sich Stahlrecyclingbeton in einem Vergleich der direkten Kosten gegenüber Stahlressourcenbeton behaupten könnte. Unter der Annahme, dass sich Einbau- und Schalungskosten durch den Einsatz von Stahlrecyclingbeton nicht ändern und zusätzliche Betonüberwachungskosten in Bezug auf das Bauvolumen vernachlässigbar sind, ist nur eine Betrachtung der Materialkosten erforderlich.

Für den angepassten Stahlrecyclingbeton B1 besteht kein zusätzlicher Stahl- und nach 2.2.3 auch kein zusätzlicher Zementbedarf. Durch die im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen billigeren rezyklierten Gesteinskörnungen kann für die Verwendung des Stahlrecyclingbetons B1 anstelle von Stahlressourcenbeton von niedrigeren Erstellungskosten ausgegangen werden.

Der Stahlrecyclingbeton B2 benötigt eine höhere Stahlmenge, B3 darüber hinaus noch eine höhere Zementmenge als Stahlressourcenbeton. Das Zusammenspiel dieser Faktoren mit den niedrigeren Preisen für rezyklierte Gesteinskörnungen ist exemplarisch für einen an B2 und B3 orientierten Stahlrecyclingbeton durch Modellrechnung ausgewertet, siehe 8.2. Die Auswertung zeigt, dass die Verwendung des Stahlrecyclingbetons mit angepasster Bemessung tendenziell ebenfalls eine günstigere Erstellung als Stahlressourcenbeton erlaubt.

## 2.5 Auswertung und Ausblick

Die Studie zeigt, dass die Verwendung von Stahlrecyclingbeton anstelle von Stahlressourcenbeton einen ökologischen und wirtschaftlichen Nutzen ermöglicht. Verkürzt kann daher der Stahlrecyclingbeton als ökologischer und wirtschaftlicher Baustoff bezeichnet werden. Aus diesem Grund ist die Forschung, wie man den Stahlrecyclingbeton beherrschen kann, sinnvoll.

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung sind durch den Anteil des rezyklierten Materials an der Gesamtgesteinskörnung bestimmt, siehe 2.5.1. Neben der Beschreibung dieses signifikanten Parameters wird normgemäß [23] zur Sicherstellung der Vertrauenswürdigkeit der Studie die Einhaltung des Untersuchungsrahmens geprüft, siehe 2.5.2. Es folgen die eigentliche Auswertung mit Schlussfolgerungen und Empfehlungen, siehe 2.5.3, und ein Ausblick mit Forschungsideen, siehe 2.5.4.

### 2.5.1 Signifikanter Parameter

Der signifikante Parameter steuert die Studie. Im Fall der hier getroffenen vergleichenden Aussage über Stahlressourcen- und Stahlrecyclingbeton ist dies der Anteil des rezyklierten Materials an der Gesamtgesteinskörnung des verwendeten Betons. Dieser Anteil wirkt sich fast ausschließlich auf die drei Sachbilanzkategorien Materialentnahme, Abfallaufkommen und Flächenbedarf aus. Die Wirkungsabschätzung hat gezeigt, dass sich die untersuchten Transportszenarien in Bezug auf die Gesamtsachbilanz nicht signifikant unterscheiden. Gleiches gilt für den durch den Anteil des rezyklierten Materials an der Gesteinskörnung hervorgerufenem Mehrbedarf an Stahl und Zement.

### 2.5.2 Einhaltung des Untersuchungsrahmens

Nach Ökobilanznorm [23] wird gefordert, die Vertrauenswürdigkeit einer Studie durch die Prüfung der Vollständigkeit, der Konsistenz und der Sensitivität von Daten, Ergebnissen und Schlussfolgerungen nachzuweisen.

Die Vollständigkeit ist gegeben durch die Verwendung von allgemein zugänglichem und unabhängig geprüftem Datenmaterial und von nachvollziehbaren, dokumentierten Annahmen und Näherungen bei fehlenden Informationen insbesondere für die Aufstellung der Sachbilanz, siehe 2.3. Durch die einheitliche Verwendung von Systemgrenzen, Allokationsregeln, zeitlichen und räumlichen Bezügen und Modellierungen (siehe z.B. Menge der Gesteinskörnungen, des Zements und des Betons) kann die Konsistenz als nachgewiesen angesehen werden. Die Sensitivitätsprüfung trifft eine Aussage über die Zuverlässigkeit von Ergebnissen

und Schlussfolgerungen. Sie ist sichergestellt durch die Einhaltung der Vollständigkeit in Zusammenspiel mit der Berechnung verschiedener Szenarien, die die Wirkung der Änderung des signifikanten Parameters rezyklierte Gesteinskörnung auf die Ergebnisse quantifiziert.

Werden die Schlussfolgerungen auf Basis von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung getroffen, können sie somit als vertrauenswürdig betrachtet werden.

### **2.5.3 Schlussfolgerungen und Empfehlungen**

Die Wirkungsabschätzung zeigt, dass der mögliche ökologische Nutzen des Stahlrecyclingbetons in Bezug auf Materialentnahme, Abfallaufkommen und Flächenbedarf groß ist und vom Anteil des rezyklierten Materials an der Gesamtgesteinskörnung abhängt. Wirtschaftlich ist er eine Konkurrenz zum Stahlressourcenbeton. Allein die technische Umsetzbarkeit birgt Schwierigkeiten. Daher sollten diese ausgeräumt werden, was zu einem Stück im technischen Teil dieser Dissertation bereits geschehen ist.

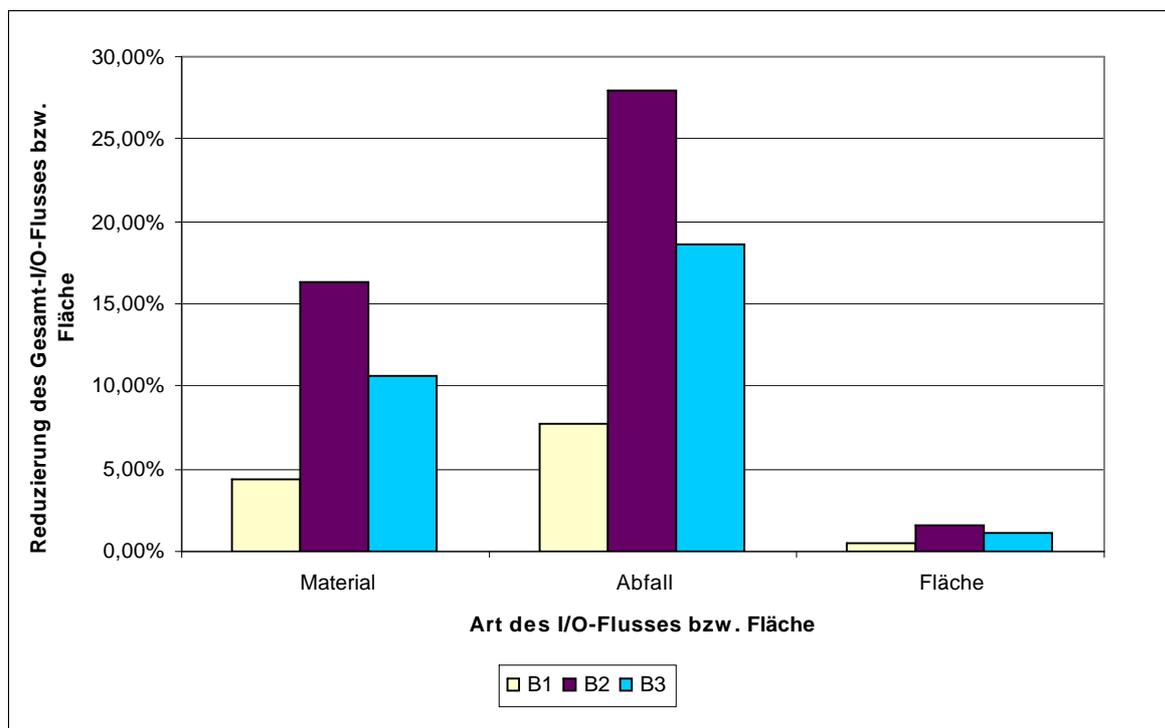
#### **Ökologische und ökonomische Bewertung des Stahlrecyclingbetons in Bezug auf den Stahlressourcenbeton**

Der Anteil rezyklierten Materials an der Gesamtgesteinskörnung steuert den Inputfluss Materialentnahme, den Outputfluss Abfallaufkommen und die Bestandsgröße Flächenbedarf. Je höher dieser Anteil ist, umso höher ist auch die Reduzierung der genannten Größen, siehe Bild 9. Diese Verminderungen stehen im Einklang mit den Zielen der Studie natürliche Ressourcen zu schonen, Abfälle zu vermeiden und Freiräume zu erhalten, siehe 2.1. Weiterhin werden Treibhausgase und Luftschadstoffe zwar nicht reduziert, jedoch auch nicht wesentlich erhöht.

Der Stahlrecyclingbeton ist über seine ökologischen Vorteile hinaus durch die preiswerten rezyklierten Gesteinskörnungen und den nur geringfügig höheren Stahl- und Zementbedarf wirtschaftlich gleichwertig oder sogar günstiger als der Stahlressourcenbeton. Daher kann formuliert werden, dass die Verwendung von Stahlrecyclingbeton anstelle von Stahlressourcenbeton sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvoll ist. Dieser Umstand ist eine Legitimation für die Forschung an Stahlrecyclingbeton.

Durch die numerischen Ergebnisse der Studie sind mögliche subjektive Bewertungen des Bürgers nicht erfassbar, die das Ergebnis noch unterstreichen würden. Durch die Verwendung von Stahlrecyclingbeton ist es im Idealfall möglich, dass auf einer Abbruchbaustelle aus den Abbruchmassen wieder neue Bauwerke entstehen, ohne dass schwere Lastwagen natürlichen Zuschlag aus einem Steinbruch zu einem Betonwerk und als Transportbeton zur Baustelle

schaffen müssen. Dem betroffenen Bürger wird ein großer Teil unangenehmen Verkehrsaufkommens erspart.



**Bild 9 Reduzierung des Gesamt-I/O-Flusses bzw. Fläche in Abhängigkeit des Anteils rezyklerten Materials an der Gesamtgesteinskörnung (ausgedrückt über die Baustoffszenarien B1, B2 und B3)**

Ein weiteres Beispiel zur schlechten Erfassbarkeit der subjektiven Werthaltung ist der Flächenbedarf. Die mögliche Reduzierung der Flächenbeanspruchung um 0,4%-Punkte bis 1,6%-Punkte erscheint als nur gering. Es fallen jedoch hierbei Abbauflächen weg, die sich oft jahrzehntelang nicht in das Landschaftsbild einfügen, wie das beispielsweise ein Bauerhof oder ein Naturschutzgebiet tun würden. Daher ist der numerisch geringe Beitrag subjektiv betrachtet dennoch eine wirksame Schonung der Landschaft, die die Schönheit und die Identität unseres Landes ausmacht und Lebensqualität für seine Bewohner bietet.

### Technische Umsetzbarkeit der Potentiale

Wie in 2.2.8 beschrieben, gelten die berechneten Potentiale zur Reduzierung von I/O-Flüssen und des Flächenbedarfs streng genommen nur für den Fall, dass die gesamte Menge an Stahlressourcenbeton durch Stahlrecyclingbeton ersetzt würde. Die Richtlinie für die Anwendung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung [9], die die angepasste Bemessung enthalten soll, schließt jedoch einige Anwendungen vollständig aus. Darunter sind z.B. die Anwendung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnungen für Spannbeton oder verschiedene aggressive Ex-

positionsclassen. Während der angepasste Beton B1 auch für Außenbauteile geeignet ist, darf der Beton B2 nur für Innenbauteile verwendet werden. Der Beton B3 mit einem Anteil des rezyklierten Materials an der Gesteinskörnung von 100% ist in der Richtlinie zur Anwendung als Beton für tragende Bauteile nicht vorgesehen. Diese sind jedoch keine bemessungstechnischen Probleme, sondern solche der Baustofftechnik bzw. der Dauerhaftigkeit.

Die genannten Einschränkungen mindern das Potential des Stahlrecyclingbetons zur Reduzierung der Sachbilanzdaten und sollten quantifiziert werden, was außerhalb des Rahmens dieser Arbeit liegt. Da der mögliche ökologische Nutzen jedoch groß und auch ein wirtschaftlicher Anreiz vorhanden ist, sollte zum einen eine Vertiefung der umweltökonomischen Gesamtrechnung in Bezug auf die Verwendung von Beton für Innen-, Außen- und nicht tragende Bauteile angestrebt und zum anderen Möglichkeiten gefunden werden, wie die Dauerhaftigkeit für Stahlrecyclingbeton speziell mit hohem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung (angepasste Bemessung) verbessert werden könnte.

#### **2.5.4 Ausblick und Forschungsbedarf**

Die Studie zeigt durch ihre Ergebnisse Möglichkeiten zur Ressourcenschonung auf. Darüber hinaus lässt sie zusätzliche Lösungen aber auch Fragen erkennen, insbesondere zu Angebot und Nachfrage von Ressourcen und damit zu einem intelligenten Ressourcenmanagement, zu Weiternutzung, Weiterverwendung und Recycling und zu Bilanztechnik und Modellierung.

##### **Angebot und Nachfrage: Wege zum intelligenten Ressourcenmanagement**

Das Abfallaufkommen ist in dieser Studie unter der Annahme eines Gleichgewichts zwischen benötigter rezyklierter Gesteinskörnung und angebotener, geeigneter Abfallmenge modelliert. In der Wirklichkeit ist dieses Gleichgewicht von Angebot und Nachfrage in dieser Form nicht notwendigerweise gegeben und hängt von unterschiedlichen Faktoren ab, siehe Weil [54].

Ein wesentlicher Faktor zu Angebot und Nachfrage ist, dass wiederaufbereitete Gesteinskörnungen gedowncycled werden, was bedeutet, dass sie für Anwendungen eingesetzt werden, für die sie überqualifiziert sind. Noch höher qualifizierte Stoffe füllen diese Lücke und stehen als Ressourcen nicht mehr zur Verfügung, die Ressourceneffizienz sinkt. Beispiele für Downcycling sind die Nutzung von wiederaufbereiteten Gesteinskörnungen als reaktionsarmes Füllmaterial in Deponien oder als Dammschüttungen im Erdbau.

Als Konsequenz sollte zum einen die Umweltbilanzierung für die Verwertung genau beschrieben werden, wo dies noch nicht geschehen ist, und zum anderen sollten für den Fall

einer zu hohen Downcyclingrate bzw. einer zu geringen Ressourceneffizienz technische Optionen als Alternative entwickelt werden.

Mit diesen Informationen ließe sich die Frage beantworten, welcher Abfallstoff eine bestimmte Aufgabe gerade noch erfüllt, für die beispielsweise die rezyklierten Gesteinskörnungen bereits überqualifiziert sind. Dies wäre der erste Schritt der Entwicklung eines intelligenten Ressourcenmanagements, das das richtige Material für die richtige Anwendung vorsieht.

### **Weiternutzen – Weiterverwenden – Rezyklieren**

Kohler et al. [32] stellen aus Energie- und Stoffflussbetrachtungen für das potentiell langlebige Produkt Bauwerk die Leitlinie auf, dass Weiternutzen besser als Weiterverwenden ist und Weiterverwenden besser als Rezyklieren ist. Das Bauwerk ist bisher jedoch eine an bestimmte Randbedingungen wie Klima, Platzverhältnisse und Nutzungsbedürfnisse angepasste Einzelanfertigung. Ziele wie Flexibilität in Bezug auf die Nutzung zur Ermöglichung einer Weiterverwendung oder standardisierte Konstruktionen zur Weiterverwendung werden in der Regel aus Gründen der direkten Kosten vernachlässigt, wie Graubner et al. [28] argumentieren. Solange dieses Problem nicht technisch oder gesellschaftlich gelöst ist, bleibt nur die Übergangslösung des Rezyklierens.

### **Bilanztechnik und Modellierung**

Wie bereits unter 2.5.3 erwähnt, ist eine Vertiefung der umweltökonomischen Gesamtrechnung in Bezug auf Verwendung von Beton für Innen- und Außenbauteilen und als Beton für nicht tragende Bauteile (z.B. Sauberkeitsschicht) gewünscht. Auch die Modellierung im Rahmen der Bilanzierung kann verbessert werden. Ziel ist die systematischere, über die Modellrechnung von Beispielen hinausgehende Erfassung der betrachteten funktionellen Einheit auf Produktniveau. Hierdurch soll eine genauere Erfassung des Stahlbedarfs oder der Erstellungskosten einschließlich der Überwachungskosten die Glaubwürdigkeit in die Studie noch weiter erhöhen. Ein Ansatzpunkt hierfür kann beispielsweise die Betrachtung des Bauwerksbestands sein, siehe Kohler et al. [32].

Ein generelles Problem der Bilanzierung ist die Behandlung von Import und Export. Es stellen sich hierbei Fragen wie beispielsweise, was mit dem I/O-Fluss eines exportierten Produkts passiert. Für z.B. den Emissionshandel ist dabei interessant, ob Emissionen im Herstellungsland bleiben, oder ob sie bilanztechnisch mitexportiert werden.



---

### 3 Der Baustoff Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung

Ziel des Kapitels „Der Baustoff Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung<sup>4</sup>“ ist es für die weiteren Untersuchungen dieser Arbeit möglichst baupraxisrelevante Recyclingbetonmischungen einschließlich der Anforderungen an diese festzulegen und deren grundlegenden Eigenschaften einschließlich Prüfung zu beschreiben.

Da die Herstellung des Recyclingbetons aufgrund des großen und schwankenden Saugverhaltens der rezyklierten Gesteinskörnungen zum Zeitpunkt der Erstellung der Arbeit noch erhebliche Probleme bereitete, ist die Verfahrenstechnik und Betontechnologie ebenfalls thematisiert:

- Die in Abschnitt 3.1 festgelegten Anforderungen insbesondere an die Dauerhaftigkeit wirkten sich auf die Wahl und die Zusammensetzung der verwendeten Gesteinskörnungen aus, da diese einen maßgebenden Einfluss auf die Materialeigenschaften des neuen Baustoffs haben. Aus diesem Grund wurden vier verschiedene Mischungen von Gesteinskörnungen für die Betonherstellung der Probekörper verwendet. Diese vier Mischungen „1“ bis „4“ unterscheiden sich durch die Ausgangsrohstoffe bzw. den Liefertyp nach DIN 4226-100 [19] und die mögliche Expositionsklasse.
- Neben der Zusammensetzung der Gesteinskörnungsmischungen geht Abschnitt 3.2 auf die Herkunft, Art und Beschaffenheit des Recycling-Rohmaterials ein.
- Für die Herstellung des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung wurden weiterhin Binde-, Zusatzmittel und Zusatzstoffe benötigt. Die Auswahl dieser wird in 3.3 dargestellt.
- Abschnitt 3.4 bringt die in den vorangegangenen Abschnitten behandelten Bestandteile zusammen. Die vier Gesteinskörnungsmischungen aus 3.2 bilden den Ausgangspunkt für die vier Betonmischungen „1“ bis „4“, siehe Tabelle 25. Bei der Festlegung der Rezeptur und den Mischungsanweisungen war für den neuen Baustoff insbesondere die hohe Saugfähigkeit der rezyklierten Gesteinskörnungen zu beachten.

---

<sup>4</sup> Der bisherige Begriff „Zuschlag“ ist nicht mehr in den aktuellen Ausgaben der relevanten Normen enthalten. Der neue normgemäße Begriff ist „Gesteinskörnung“.

- Die in 3.1 festgelegten Eigenschaften der Versuchsmischungen wurden für den Frischbeton, siehe 3.5, und den Festbeton, siehe 3.6, nachgewiesen. In diesen Abschnitten werden die erreichten Werte mit erwarteten Werten verglichen. Die Auswirkungen der Betoneigenschaften sind in Kapitel 6 eingearbeitet.

Mischung	Expositionsklasse	Druckfestigkeitsklasse	Konsistenzklasse	Liefertyp der Gesteinskörnung nach DIN 4226-100
1	XC1	C 20/25	F2 oder F3	1
2	XC1 – XC3	C 20/25	F2 oder F3	1
3	XC1	C 20/25	F2 oder F3	(2)
4	XC1	C 20/25	F2 oder F3	4

**Tabelle 25 Anforderungen an Betonmischungen**

### 3.1 Klasseneinteilung und Eigenschaften

Der Beton für die Probekörper ist in Übereinstimmung mit der Norm DIN EN 206-1 [21] und der sie ergänzenden Norm DIN 1045-2 [14] festgelegt und hergestellt worden. In diesen Normen sind Klassen definiert, in die die verschiedenen Betone eingeteilt werden, um ihre Eigenschaften zu beschreiben.

Die Hauptaufgabe des Betons ist, die Druckkräfte im Bauteil aufzunehmen. Für die Bemessung eines Bauteils geht man von einer durch die Norm DIN 1045-1 definierten Druckfestigkeitsklasse aus. Diese ist durch Tests an Probewürfeln oder Probezylinder auf der Baustelle oder im Labor nachzuweisen, siehe auch DIN 1045-2 [14].

Für die in dieser Arbeit verwendeten Betone wurde die Druckfestigkeitsklasse C20/25 angestrebt. Eyerer [25] schätzt, dass diese Betondruckfestigkeitsklasse in Deutschland den größten Anteil an tragenden Bauteilen einnimmt. Deshalb ist diese Klasse besonders baupraxisrelevant.

Die zweite Aufgabe des Festbetons ist der Schutz der Stahlbewehrung vor Korrosion. Im Rahmen der Zusammenarbeit mit einem Partnerprojekt des Lehrstuhls für Baustoffkunde der TU München (F193), in dem man sich in erster Linie mit der Korrosion des Stahls im Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung beschäftigte, wurden für die verschiedenen Betone, siehe Tabelle 25, in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung die möglichen Expositionsklassen bestimmt. Die Mischungen 1, 3 und 4, die auch im Sandanteil (Korngröße < 4 mm) aus rezykliertem Material bestehen, weisen große Dauerhaftigkeitsprobleme auf und sollten daher

nur für Innenbauteile verwendet werden. Sie werden in die Expositionsklasse XC1 eingeteilt. Für die Mischung 2, die im Sandanteil der Gesteinskörnung normales Material (nach DIN 4226-1) verwendet, ist diese Einschränkung nicht gegeben, sie kann für die Expositionsklassen XC1 bis XC3 verwendet werden. Prinzipiell wären auch die Klasse XC4 oder die Klassen XF1 bis XF3 möglich, jedoch müsste hierzu die Druckfestigkeitsklasse erhöht werden bzw. ein betontechnologischer Nachweis erbracht werden, was aber nicht Gegenstand der Arbeit war. Weitere Informationen zum Thema Dauerhaftigkeit bei Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen sind auch dem Zwischenbericht des entsprechenden Forschungsvorhabens F193 [27] zu entnehmen.

Weitere bemessungsrelevante Eigenschaften des Festbetons wie E-Modul und Zugfestigkeit wurden vorab nicht festgelegt, sondern sollten für die neuen Mischungen durch Prüfung ermittelt werden, siehe Abschnitt 3.6.

An den Frischbeton wurde die Anforderung einer leichten Verarbeitbarkeit gestellt, weshalb für die Betonmischungen die Konsistenzklassen F2 und F3 angestrebt wurden, die ein Ausbreitmaß von 35 cm bis 48 cm vorsehen.

## 3.2 Gesteinskörnungen

Der Hauptbestandteil des Betons ist die Gesteinskörnung die ca. 80% des Gewichts des Betons ausmacht und auf seine Materialeigenschaften maßgebenden Einfluss hat. Normalerweise besteht die Gesteinskörnung aus natürlichen Ressourcen. Im Fall dieser Arbeit wurden zwar auch natürliche Gesteinskörnungen nach DIN 4226-1 [18] verwendet, das Hauptaugenmerk liegt jedoch auf den rezyklierten nach DIN 4226-100 [19].

Im Rahmen der Laborversuche [5], [59], [60], [66] wurden vier verschiedene Betone aus einer jeweils dafür entworfenen Gesteinskörnung hergestellt. Im Folgenden werden diese als Gesteinskörnungsmischungen „1“ bis „4“ bezeichnet, siehe 3.2.3. Diese vier Mischungen unterscheiden sich wie erwähnt durch die Ausgangsrohstoffe bzw. durch ihre Liefertypen. Die Liefertypen geben Auskunft darüber, welche Stoffe und welche Mengen dieser Stoffe in der Gesteinskörnung sein müssen bzw. dürfen. Die Herkunft und die Liefertypen des Ausgangsmaterials aus dem die Gesteinskörnungen hergestellt werden, 3.2.1, und die Eigenschaften des Ausgangsmaterials, 3.2.2, werden besprochen.

Die detaillierte Darstellung der Zusammensetzung des als Ausgangsstoff verwendeten Recyclingmaterials ist von großer Bedeutung für die Umsetzung der Ergebnisse in die Praxis. Zum einen sollte erforscht werden, inwieweit die untersuchten Materialien tatsächlich anfallen und

zum anderen, ob das Material einem realen, wiederaufbereiteten Material und somit der Praxis entspricht.

### 3.2.1 Herkunft und Liefertypen des Ausgangsmaterials

Um den Austausch von Erfahrungen und Ergebnissen mit dem Partnerprojekt F193 zu erleichtern, wurden die Gesteinskörnungen vom gleichen Baustoffhändler bezogen. Dieser Händler aus Mittelfranken nimmt wie eine Deponie Bauschutt an, lagert diesen jedoch nicht ab, sondern bereitet ihn durch Reinigung, Brechen in verschiedenen Mühlen (abschließend mit einer Prallmühle) und Siebung zu Gesteinskörnungen auf. Im Sortiment dieses Baustoffhändlers finden sich entsprechend zu den normalen Gesteinskörnungen auch rezyklierte Brechsande und Splitte aus Betonabbruch, dem Liefertyp 1 nach DIN 4226-100 [19]. Andere rezyklierte Gesteinskörnungen wie der Liefertyp 3 aus Mauerwerkbruch (Ziegel und Kalksandstein) können auf Bestellung geliefert werden. Anzumerken ist jedoch, dass die Sonderproduktionen im Verhältnis zu rezyklierten Gesteinskörnungen aus Betonbruch sehr teuer sind. Weiterhin sind die bei diesem Händler abgegeben Mengen an Mauerwerkbruch (besonders Kalksandsteinbruch) im Vergleich zu Betonabbruch gering, was dazu führte, dass sich eine für die Laborversuche [66] benötigte Nachlieferung aufgrund fehlender Rohstoffe drei Monate verzögerte.



**Bild 10** Beispiele für die gelieferten rezyklierten Körnungen (links: Ziegelsplitt 8/16; rechts: BetonSplitt 8/16)

Rohmaterial	Korngruppe		
	0/4	4/8	8/16
Betonbruch	0/4	4/8	8/16
Ziegelbruch	0/4	4/8	8/16
Kalksandsteinbruch	0/4	4/8	8/16

**Tabelle 26** Ausgangsmaterialien nach Rohmaterial und Korngruppe

Bestellt wurden als Ausgangsmaterial für die Mischungen, siehe 3.2.3, Gesteinskörnungen aus rezykliertem Betonbruch, Ziegel-Mauerwerkbruch und Kalksandstein-Mauerwerkbruch. Diese drei Körnungen wurden jeweils getrennt in den Korngruppen 0/4, 4/8 und 8/16 geliefert, siehe Tabelle 26 und Bild 10.

### **3.2.2 Eigenschaften des Ausgangsmaterials**

Zur Erstellung einer Betonrezeptur, siehe 3.4, ist es nötig, die Eigenschaften der gelieferten Gesteinskörnungen zu kennen. Diese wurden im Materialprüfungsamt für das Bauwesen, Innenstadt, Abteilung Massivbau der Technischen Universität München nach DIN 4226-100 [19] geprüft und in Protokollen niedergelegt, siehe Anhang B.1.

Zu den aufgenommenen Charakteristika der Gesteinskörnungen gehörten die Zusammensetzungen der Körnungen und die Kornform, die über den Wasseranspruch erheblichen Einfluss auf die Rezeptur nehmen. So erhält man beispielsweise durch den Wiederaufbereitungsvorgang eine gebrochene Kornform, die den Wasseranspruch erhöht. Weiterhin enthalten die Prüfprotokolle die Kornrohdichten und die Wasseraufnahmen der Gesteinskörnungen. Die dafür geforderten Werte lagen dabei innerhalb der durch DIN 4226-100 [19] vorgegebenen Grenzen. Zusätzlich wurde vor der Betonage die Eigenfeuchte, die ebenfalls bei der Herstellung des Betons eine wichtige Rolle spielt, aufgenommen.

Bei den Ergebnissen der Prüfungen ist zu beachten, dass die Werte nach Angaben der Baustoffprüfer schwierig zu ermitteln waren, eine Beobachtung, die im Rahmen des Partnerprojekts ebenfalls gemacht wurde und auch in der Literatur [7] zu finden ist. Die Beurteilung des Wassersaugens und der Eigenfeuchte für das Betonrezept unterlag deshalb verschiedenen Plausibilitätskontrollen, siehe 3.4.

Für den rezyklierten Betonbruch lag zur Information ein vom Baustoffhändler in Auftrag gegebenes Gutachten für straßenbauliche Anwendungen vor, da der Betonbruch normalerweise für diese Zwecke verwendet wird.

### **3.2.3 Mischungen**

Es existiert eine Vielzahl an unterschiedlichen rezyklierten Gesteinskörnungen, die sich teilweise erheblich durch ihre Stoffeigenschaften unterscheiden. Um diese Bandbreite im Rahmen einer Versuchsreihe abbilden zu können, wurden vier Typen von Gesteinskörnungsmischungen gebildet. Diese definieren sich jeweils über bestimmte Anteile der aus 3.2.1 bekannten Grundstoffe Betonbruch, Ziegelbruch und Kalksandsteinbruch an der Gesteinskörnung. Dabei steht jede Mischung für ein bestimmtes Abbruchs- bzw. Recycling-Szenario. Durch die

Prüfung dieser repräsentativen Mischungen soll auf andere mögliche Mischungen und Szenarien geschlossen werden können.

Die vier Szenarien sind jeweils einer Gesteinskörnungsmischung zugeordnet. Die Szenarien lassen sich wie folgt beschreiben:

- Das erste Szenario beschreibt eine Mischung für Innenbauteile mit sortiertem Ausgangsmaterial. Es kommt ausschließlich Betonbruch zum Einsatz. Diese Gesteinskörnungsmischung entspricht somit vollständig Liefertyp „1“ nach DIN 4226-100 [19]. Das Szenario wird für das Versuchsprogramm aus zwei Gründen gewählt. Erstens ist nach Kohler et al. [32] über die Hälfte der in der Bundesrepublik gespeicherten Baustoffe Beton, siehe Tabelle 16 auf Seite 44 dieser Arbeit. Man kann daher davon ausgehen, dass dieser auch den größten Anteil an wieder verwertbaren Baurestmassen ausmacht. Zweitens ist für diese Gesteinskörnung schon eine Vielzahl von Forschungsergebnissen vorhanden. Zusätzlich war nach den ersten Erfahrungen des Autors rezyklierter Betonbruch für die Herstellung von Beton besser geeignet als andere rezyklierte Materialien wie Mauerwerksbruch oder Kalksandsteinbruch. Diese Vermutung sollte durch den Vergleich der ersten Mischung mit Mischungen, die aus anderen rezyklierten Materialien bestehen, überprüft werden. Die Mischung dient ebenfalls als Eichversuch für die Frage, welche Vor- und Nachteile Mischungen haben, die aus mehreren Ausgangsmaterialien zusammengesetzt sind und ob eine Sortentrennung unbedingt notwendig ist.
- Für das zweite Szenario kommt in der Betonmischung als rezykliertes Material ebenfalls nur Betonbruch zur Verwendung. Allerdings soll die Mischung auch für Außenbauteile geeignet sein. Deshalb wird gegenüber der ersten Mischung der für die Dauerhaftigkeit problematische Sand (ca. 35% des Gesamtzuschlags) durch eine natürliche, normal schwere Gesteinskörnung ausgetauscht. Diese Gesteinskörnungsmischung entspricht ebenfalls vollständig Liefertyp „1“ nach DIN 4226-100 [19]. Mit diesem Szenario soll beantwortet werden, ob sich durch den Zusatz von natürlichem Sand die Bemessung gegenüber der ersten Mischung ändert. Dies bringt die Frage mit sich, ob die Liefertypen für die Bemessung differenzierter dargestellt werden müssen.
- Im dritten Szenario soll für die Betonmischung das Ausgangsmaterial nicht sortiert sondern nur gereinigt, gebrochen und gesiebt werden. Es kommt Beton-, Ziegel- und Kalksandsteinbruch zur Verwendung. Ein Einsatz für Außenbauteile war nicht vorgesehen. Dem Entwurf der Mischung liegt eine mögliche Verteilung der Abbruchmassen

eines Einfamilienhauses zugrunde. Dieser Mischung wird zur Verbesserung noch reiner Betonbruch zugegeben, was zur Annahme von einem Anteil von 50% Betonbruch, 20% Ziegel und 30% Kalksandstein (insg. 50% Mauerwerkbruch) führt. Das Mauerwerkmaterial ist wesentlich weicher und poröser, wodurch sich eine Änderung der Materialeigenschaften ergibt. Der Einfluss der geänderten Materialeigenschaften auf die Bemessung sollte untersucht werden. Da sich dieses Szenario auf Innenbauteile beschränkt, kann auch der Sandanteil der Gesteinskörnung aus rezykliertem Material bestehen. So kann ein Maximum an Abbruchmaterial (auch Ziegel- und Kalksandsteinbruch) wieder in den Stoffkreislauf eingegliedert werden. Es ist anzumerken, dass mit dieser dritten Mischung eine Gesteinskörnung untersucht wurde, die gerade nicht mehr unter den Liefertyp „2“ fällt, da der Anteil an Betonbruch mit 50% unter den geforderten 70% liegt. Der Grund hierfür ist in der zeitlichen Entwicklung der Normen bzw. Richtlinien zu sehen. Die DIN 4226-100 [19], die die Bandbreite der rezyklierten Gesteinskörnungen ebenfalls in Klassen, den Liefertypen, einteilt, liegt in ihrer neuesten Fassung erst seit Februar 2002 vor. Die Einteilung der Norm, die sich etwas von der durch die Laborversuche festgelegten unterscheidet, lag somit erst vor, als schon die Vorversuche und die erste komplette Testreihe des Projekts betoniert und geprüft waren. Aus diesem Grund war es nicht sinnvoll, das Programm zu diesem späten Zeitpunkt zu ändern und die Normeinteilung zu übernehmen. Dies hat zur Folge, dass die untersuchte Mischung „3“ nicht vollständig dem durch die Norm festgelegten Liefertyp „2“ entspricht.

- Das vierte Szenario entspricht dem dritten. Der Unterschied liegt in der Berücksichtigung eines größeren Anteils an Mauerwerkbruch als im dritten Szenario. Gewählt wurde ein Anteil von 66%. Wie oben besprochen, entspricht diese Einteilung ebenfalls nicht vollständig dem Liefertyp „2“ und auch nicht dem Liefertyp „3“, da mit 33% ein für die 5%-Grenze zu großer Kalksandsteinanteil vorliegt und auch der Betonbruchanteil mit 34% über der festgelegten 20%-Marke liegt. Die Begründung für die Überschreitung liegt wie für Szenario und Mischung „3“ in der veränderten Normenlage, siehe oben. Die Gesteinskörnung kann jedoch dem sehr offenen Typ „4“ „Mischsplitt/Mischsand“ zugeordnet werden. Die Mischungen aus den Szenarien sind in Tabelle 27 dargestellt.

Trotz der geringfügigen Unstimmigkeit für Mischung „2“ und „3“ sind Aussagen über alle vier Liefertypen möglich. Sie werden im Kapitel 6 bei der Wiedergabe und der Auslegung der Ergebnisse berücksichtigt.

Für die Herstellung von Beton aus den rezyklierten Gesteinskörnungen ist es betontechnologisch wie in der normalen Betonherstellung auch notwendig, die Kornzusammensetzung (Siebdurchgänge) der Körnungen für die Betonrezeptur anzupassen. Deshalb wurden die Ausgangsmaterialien in getrennten Körnungen mit definierter Kornzusammensetzung (0/4, 4/8, 8/16), siehe 3.2.1, vorgehalten und für die Betonherstellung entsprechend im Labor des Materialprüfungsamtes gemischt. Es ist jedoch denkbar, dass später diese Gesteinskörnungen, die Mischungen aus rezyklierten Gesteinskörnungen darstellen, wie normale Gesteinskörnungen als reguläre Liefermischungen von Baustoffhändlern angeboten werden.

Gesteinskörnungsmischung	Anteile der Ausgangskörnungen			
	Natürliche Gesteinskörnung 0/4	Betonbruch 0/4, 4/8, 8/16	Mauerwerkbruch (Ziegel) 0/4, 4/8, 8/16	Mauerwerkbruch (Kalksandstein) 0/4, 4/8, 8/16
1	-	100%	-	-
2	35%	65%	-	-
3	-	50%	20%	30%
4	-	34%	33%	33%

**Tabelle 27 Mischungsverhältnisse der verwendeten rezyklierten Gesteinskörnungen**

Damit handelt es sich bei den verwendeten Mischungen nicht um künstliche Mischungen unter Laborbedingungen, sondern um baupraktische mit der Einschränkung, dass das Mischen der Ausgangsmaterialien von Laboranten und nicht von Betonwerk-Arbeitern bzw. einer Maschine vorgenommen wird.

Im Weiteren wird zu den vorgestellten Mischungen „1“ bis „4“ immer wieder von einer Referenzmischung „0“ die Rede sein. Diese Mischung stammt noch aus einem vorausgegangenen Forschungsvorhaben von Betzle [1] und repräsentiert eine normale Gesteinskörnung nach DIN 4226-1 [18] mit den bekannten Eigenschaften. Aus diesem Grund werden für diese Mischung Fragen wie die nach Liefertypen natürlich nicht relevant.

### 3.3 Zement, Zusatzstoffe und Zusatzmittel

Für die untersuchten Recyclingbetonmischungen wurde als Bindemittel Zement CEM I verwendet. Zum Großteil kam als Zusatzstoff Flugasche zur Anwendung. Alle Mischungen benötigten zur Erreichung der vorgegebenen Konsistenzklasse Fließmittel (hier: WOERMENT FM30).

Die Wahl des Zements CEM I „32,5 R“ wurde durch die gewünschte Vergleichbarkeit mit den Referenzversuchen von Betzle et al. [1] und den Versuchen des Partnerprojekts F193 bestimmt. Die Verwendung von Steinkohlenflugasche (SAFAMENT HKV) ist baupraktisch üblich (Kostenvorteil, Verarbeitbarkeit) und nach Weil [53] auch ökologisch sinnvoll.

### **3.4 Betonmischungen – Rezepte und Verfahrenstechnik**

Der Entwurf der Betonmischung soll die zielgenaue Herstellung des Betons entsprechend der in 3.1 festgelegten Anforderungen unter Berücksichtigung der nach 3.2 gewählten Szenarien für die Gesteinskörnungen ermöglichen. Entwurf, siehe 3.4.1, und Herstellung, siehe 3.4.2, erfolgen analog zum Ressourcenbeton unter besonderer Berücksichtigung des hohen Wasser-saugens der rezyklierten Gesteinskörnungen. Ausgehend von Probemischungen wurden die Mischungen für die Hauptprobekörper, siehe Kapitel 4, interaktiv optimiert, siehe Abschnitt 3.4.3.

#### **3.4.1 Entwurf der Betonrezepte**

Der erste Schritt beim Entwurf eines Betonrezeptes ist die Wahl der Kornzusammensetzung für die jeweilige Gesteinskörnungsmischung nach Abschnitt 3.2. Diese Zusammensetzung wurde für die Laborversuche an dem entsprechenden Vorschlag für normale Gesteinskörnungen aus dem Anhang DIN 1045-2 [14] orientiert und liegt aufgrund ihrer Splittigkeit für alle Mischungen nahe der Sieblinie A zwischen dieser und Sieblinie B. Damit entspricht sie der Empfehlung aus DIN 1045-2 [14].

Mit der Festlegung des Wasseranspruchs wurde das Saugverhalten der rezyklierten Gesteinskörnung durch die Erhöhung des Grundwerts in der Rezeptur berücksichtigt. Der Grundwert für einen plastischen Beton<sup>5</sup> liegt bei hohem Wasseranspruch des Zuschlags für eine Sieblinie nahe der Norm-Sieblinie A16 bei 170 kg/m<sup>3</sup>, wie Reinhardt [41] darstellt. Aufgrund der Splittigkeit des Materials wird unter Einbeziehung eigener Erfahrungen eine Erhöhung des Grundwertes um 7-11% vorgeschlagen. Für die verwendeten Rezepte wurde der Mittelwert von 9% gewählt.

Da es sich bei der rezyklierten Gesteinskörnung um kein natürliches Material handelt, für das der Grundwert eigentlich ausgelegt ist, wurde eine weitere Erhöhung je nach Saugfähigkeit der Ausgangsstoffe um 10-15% vorgenommen.

---

<sup>5</sup> Ein plastischer Beton hat nach DIN 1045-2 einen Zielwert für das Ausbreitmaß von 38 cm und liegt damit in der Ausbreitmaßklasse F2.

Der so modifizierte Grundwert wurde als Grundanteil des Wassers gewählt, der später durch Erfahrungen mit den Probemischungen nochmals erhöht wurde.

Nach den in 3.1 festgelegten Eigenschaften soll die Betonfestigkeitsklasse C20/25 erreicht werden. Aus Hilfsmitteln wie dem Diagramm nach Walz ergibt sich daraus ein w/b-Wert von ca. 0,60. Um etwaige negative Einflüsse der rezyklierten Gesteinskörnung auf die Druckfestigkeit zu kompensieren, wurde dieser Wert auf 0,55 gesenkt, was aber nicht nötig war, wie später erklärt wird. Dadurch, dass Wasser und Bindemittel so festgelegt waren, ließ sich mittels Stoffraumberechnung bestimmen, wie viel Platz für die Gesteinskörnung aus 3.2 übrig blieb. Somit wurde der Grundentwurf komplettiert.

### **3.4.2 Verfahrenstechnik**

Die Herausforderung für die Verfahrenstechnik bei der Herstellung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung liegt im komplexen Wasserhaushalt der Gesteinskörnung. Die im Hause durchgeführten Gesteinsprüfungen, siehe Anhang B.1, zeigten, dass die Ermittlung des Saugverhalten der Zuschläge nicht genau möglich ist, da Einzelwerte stark streuen und mitunter nicht plausibel erscheinen. Ähnliche Beobachtungen sind auch z.B. von Dahms [7] gemacht worden. Gleiches gilt für die Bestimmung der Eigen- und der Kernfeuchte der einzelnen Fraktionen der Gesteinskörnungen. Diese Parameter bestimmen jedoch zusammen den Wasserhaushalt der Gesteinskörnung und damit auch des Betons. Der Wasseranteil bezogen auf den Bindemittelanteil der Betonmischung hat erheblichen Einfluss auf die Druckfestigkeit des Festbetons und die Verarbeitbarkeit des Frischbetons.

In einem vorangegangenen Forschungsvorhaben von Zilch und Roos [64] wurde, um die Feuchtigkeit der Gesteinskörnung kontrollieren zu können, der Zuschlag ofengetrocknet und vor dem eigentlichen Mischvorgang mit 20 % des Anmachwassers vermennt. Nach einer 10-minütigen Einweichzeit wurden das restliche Wasser, der Zement und die Zusatzmittel eingemischt. Diese Trocknungsmethode lässt sich nicht baupraktisch umsetzen, da entsprechend große Trocknungskapazitäten (z.B. Öfen) i.d.R. nicht vorgehalten werden. Selbst für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche waren solche Kapazitäten nicht vorhanden.

Um die Trocknungsmethode zu umgehen, wurde ein iteratives Verfahren gewählt. Die erste Charge des Betons wurde nach dem Grundentwurf hergestellt. Hierbei wurde eine lufttrockene, rezyklierte Gesteinskörnung verwendet. Anhand der Messung des Ausbreitmaßes der ersten Charge wurde für die zweite Charge die Menge an zusätzlichem Fließmittel und zusätzlichem Zugabewasser ermittelt. Dieses weitere Zugabewasser stand nicht für das Abbinden des Zements zur Verfügung, sondern war durch Schwankungen bzw. Vergrößerungen des Sau-

gens der Gesteinskörnung nötig. Zielwert des Ausbreitmaßes für die zweite Charge waren 38 cm. Mit diesem Verfahren konnten die angestrebten Baustoffkennwerte erreicht werden, siehe Anhang C.2.

### 3.4.3 Optimierung der Mischung

Zu Beginn der praktischen Untersuchungen der verschiedenen Recyclingbetonmischungen, vgl. Abschnitt 3.2, herrschte Unsicherheit bezüglich der jeweils zu erzielenden Druckfestigkeit. Da diese für die jeweilige Mischung der eigentlichen Probekörper, vgl. Kapitel 4, jedoch genau erzielt werden sollte, wurden die Probemischungen „M1“ bis „M4“ erstellt.

In einem ersten Schritt (vgl. Mischung „M1“ und „M1a“) wurde exemplarisch dargestellt, dass der Einsatz von Flugasche im Recyclingbeton sich insbesondere in Bezug auf die Druckfestigkeit vergleichbar wie für Ressourcenbeton auswirkt, vgl. Normregelungen [14], [21].

Da man vermutete, dass bei gleichem w/b-Wert und Zementanteil die Druckfestigkeit eines Recyclingbetons unter der eines Ressourcenbetons läge, wurden für die Probemischungen als „Sicherheitsmaßnahmen“ jeweils ein geringer w/b-Wert (0,55) mit einem höheren Zementanteil gewählt, als es das Walz-Diagramm für die angestrebte Druckfestigkeitsklasse C20/25 für einen Ressourcenbeton vorsah. Es ergaben sich für die Probemischungen jedoch deutlich größere Druckfestigkeiten als angestrebt, vgl. Anhang C.3.

Anhand dieser Ergebnisse konnte die mittlere Würfeldruckfestigkeit für die eigentlichen Probekörper auf etwa 25 N/mm<sup>2</sup> bei geringer Standardabweichung eingestellt werden, vgl. Abschnitt 3.6. Hierzu wurden in Abhängigkeit der bei der jeweiligen Probemischung erzielten Druckfestigkeit die Sicherheitsmaßnahmen zurückgenommen.

Für den Einsatz auf der Baustelle mit den höheren Schwankungsbreiten bei der Betonherstellung muss aus Sicherheitsgründen wieder mehr Zement benutzt werden. Es ist jedoch denkbar, seinen Anteil noch weiter zu optimieren, was jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht umgesetzt wurde.

## 3.5 Frischbetonprüfungen

Die Frischbetonprüfungen wurden nach DIN 1048-1 [15] mit Erweiterungen ausgeführt. Der Anhang C.2 gibt einen Überblick über die ermittelten Einzelwerte. Für jede Mischung wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Lufttemperatur und Frischbetontemperatur
- Darrprobe zur Ermittlung des vorhandenen w/b-Werts

- Ausbreitmaß für die Feststellung der Konsistenz
- Luftgehalt mit Luftporen-Topf

Der Einfluss auf die Rissbildung durch eine zu hohe Lufttemperatur, eine zu hohe Frischbetontemperatur oder eine zu große Differenz zwischen diesen beiden Parametern sollte ausgeschlossen werden. Um dies zu erreichen, mussten die entsprechenden Werte aufgenommen und geprüft werden. Die Ergebnisse zeigten, dass die beiden Temperaturen nie außergewöhnlich hoch (Frischbetontemperatur: max. 24,5°C, Lufttemperatur: max. 24,0°C) und nie weit auseinander (max.  $\Delta T = 1,5$  K) lagen.

Bei der für die praktischen Versuche verwendeten Herstellungsmethode war es nötig, den wirklich vorhandenen w/b-Wert der Betonmischung zu kontrollieren. Es sollte damit ausgeschlossen werden, dass ein viel zu hoher (z.B. 25% höher) w/b-Wert vorliegt und infolge zu geringe Festigkeiten erreicht würden.

Als Messmethode wurde die Darrprobe nach Norm eingesetzt. Da sie eher als Kontrolle fungierte, wurden jeweils nur 1000 g Beton gedarrt. Durch eine größere Menge wäre die Probe zwar repräsentativer gewesen, hätte aber auch nicht das eigentliche Hauptproblem bei der Darrung gelöst. Beim Darren erhitzt man eine Betonprobe und treibt ihren Wasseranteil aus. Im Fall des rezyklierten Zuschlags wird jedoch nicht nur das Wasser ausgetrieben, das wirklich dem Bindemittel zur Verfügung steht und damit den w/b-Wert ausmacht. Ebenfalls werden die Kernfeuchte und davor bereits die Kapillarfeuchte herausgetrocknet, die sich durch das Saugen des Zuschlags im Korn befindet und dem Bindemittel eben nicht zur Verfügung steht. Als Resultat wird der Wasseranteil zu hoch eingeschätzt.

Um dieses Phänomen zu kompensieren, wurde die ausgetriebene Wassermenge einer Probe mehrmals in regelmäßigen Abständen von ca. 3-4 Minuten durch Wiegen bestimmt und eine dem zeitlichen Wasserverlust entsprechende Darrkurve aufgestellt. Dabei wurde der erste Messwert bestimmt, nachdem der Beton im Darrtopf oberflächenfeucht erschien. Die gesammelten Kurven finden sich in Anhang C.2.

Mit diesen Kurven sollte ein realer w/b-Wert ermittelt werden. Man kann die Annahme treffen, dass sich das dem Bindemittel zur Verfügung stehende Wasser schneller her austrocknen lässt als die Kapillarfeuchte. Das bedeutet, dass die Stelle, an der sich der Graph abflacht und sich damit der Darr-Prozess verlangsamt, als Anfang des Heraustrocknens der Kapillarfeuchte definiert werden kann. Der Wasseranteil an dieser Stelle wird im Rahmen dieser Arbeit als „realer“ w/b-Wert angenommen werden.

Als eine weitere Frischbetonprüfung wurde das Ausbreitmaß für die Feststellung der Konsistenz bestimmt, an die definierte Anforderungen bestehen, siehe 3.1. Zusätzlich diente das Ausbreitmaß für den unter 3.4.3 beschriebenen Optimierungsprozess. Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass nur die Mischung für Probekörper A4 mit 34 cm Ausbreitmaß unter der geforderten Konsistenzklasse F2 lag. Der Großteil von jeweils neun Mischungen lag in der Klasse F2 oder F3, zwei lagen oberhalb dieser Klassen in F4.

Ein Luftgehalt im Beton deutlich über 4% wirkt sich in der Regel ungünstig auf die Druckfestigkeit des Betons aus. Um entsprechende Einflüsse frühzeitig erkennen und ggf. die entsprechende Charge nicht für den Einbau zuzulassen, wurde der Luftgehalt mit dem Luftporen-Topf ermittelt. Da in keiner Mischung ein Luftgehalt  $> 4\%$  gemessen wurde, musste keine Mischungen zurückgewiesen werden.

### 3.6 Festbetonprüfung

Die Festbetonprüfung erfolgte im Rahmen von Nebenversuchen an genormten Probekörpern (Würfel mit Kantenlänge 150 mm bzw. Zylinder mit Durchmesser 150 mm und Höhe 300 mm). Die Hälfte dieser Körper lagerte entsprechend DIN 1048-5 [16] (in Übereinstimmung mit DIN 1045-2 [14]) 7 Tage unter Wasser und 21 Tage in der Klimakammer während die andere Hälfte unter den gleichen Bedingungen wie die Hauptprobekörper (Bauteillagerung), siehe Kapitel 4, aufbewahrt wurden. Nach 28 Tagen wurden die Probekörper der Nebenversuche zeitgleich mit den Hauptprobekörpern geprüft. Im Einzelnen wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Äußeren Erscheinung, siehe 3.6.1
- Druckfestigkeit, siehe 3.6.2
- Zugfestigkeit, siehe 3.6.3
- E-Modul, siehe 3.6.4

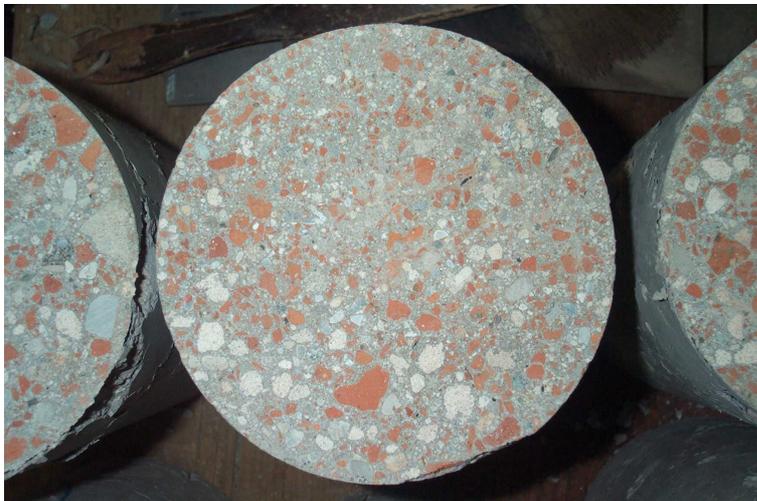
Es wurden jeweils mindestens drei Probekörper pro Eigenschaft aus unterschiedlichen Chargen einer Mischung angefertigt und geprüft. Die einzelnen Ergebniswerte finden sich in Anhang C.2.

Zusätzlich zu der Aufstellung der Ergebnisse der Druckfestigkeiten, des E-Moduls und der Zugfestigkeiten in den oben genannten Abschnitten, findet sich dort auch ein Vergleich mit den Eigenschaften aus den Referenzversuchen mit Ressourcenbeton und den erwarteten Mate-

rialeigenschaften (Näherungen) für Beton mit rezykliertem Zuschlag nach Roos [42]. Eine Bewertung der Folgen für die Bemessung findet sich in Kapitel 6.

### 3.6.1 Äußere Erscheinung

Grundsätzlich ließ sich feststellen, dass sich der Festbeton aus rezyklierter Gesteinskörnung von außen optisch praktisch nicht von Ressourcenbeton unterscheiden lässt. Erst wenn der Beton geschliffen, wie das z.B. für Prüfzylinder notwendig ist, gebrochen oder gesandstrahlt wird, zeigt sich bei Mischungen mit Ziegel eine auffällige Maserung, wie in Bild 11 zu sehen ist. Betone aus Beton- und/oder Kalksandsteinbruchmischungen hingegen können optisch nur vom Fachmann unterschieden werden.



**Bild 11 Geschliffene Betonzylinder mit Ziegel-Anteilen**

### 3.6.2 Druckfestigkeit

Für die Ermittlung der Druckfestigkeit wurden Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm geprüft. Die in Anhang C.3 angegebenen Werte lassen sich wie folgt unterscheiden. Die Daten für  $f_{ci,cube150}$  sind die jeweils kleinsten Einzelwerte aus den Prüfserien, während die Daten für  $f_{cm,cube150}$  deren Mittelwerte bilden. Beide Datenklassen werden nach ihrer Lagerung (Bauteil- oder DIN-Lagerung) nochmals unterschieden.

Die Betondruckfestigkeit ist die Bezugsgröße bei der Bemessung von Bauteilen aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton, da alle anderen Bemessungskennwerte durch diese Größe beschrieben werden. Wie in 3.4.3 beschrieben, wurde versucht, die mittlere Betondruckfestigkeit am Würfel auf 25 N/mm<sup>2</sup> einzustellen. Das nach Norm [14] geforderte Sicherheitsvorhaltenmaß zur Einhaltung der Betondruckfestigkeitsklasse C20/25 war für die Laborversuche nicht maßgebend, da es baupraktische Schwankungen in der Druckfestigkeit ausgleichen soll.

Bei der Zusammenarbeit mit dem Schwesterprojekt F193 wurden Daten aus älteren Versuchen ausgewertet und Standardabweichungen für die Druckfestigkeit von ca. 1,9 N/mm<sup>2</sup> festgestellt. Bei den Versuchen für diese Arbeit, vgl. [60], [66], wurden sogar noch geringere Werte von unter 1,0 N/mm<sup>2</sup> errechnet. In der Bemessungsnorm DIN 1045-1 [13] hingegen wird als Standardabweichung für die Druckfestigkeit 4,9 N/mm<sup>2</sup> angesetzt, was eine wesentlich höhere Schwankungsbreite bedeutet. Der Wert ergibt sich aus dem von der Norm festgelegten Unterschied der 5%-Quantile (charakteristischer Wert) zum Mittelwert der Druckfestigkeit von 8,0 N/mm<sup>2</sup> und dem Wert  $t = 1,64$  für die Beziehung der Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung:

$$\Phi(t;0,1) = 0,95 \quad (3.1)$$

### 3.6.3 Zugfestigkeit

Für die Prüfung der Zugfestigkeit, die als Spaltzugfestigkeit gemessen wurde, kamen Zylinder mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe zur Anwendung. Für die resultierenden Werte aus Anhang C.3 gilt die oben eingeführte Unterscheidung von Einzel- und Durchschnittswerten und den Lagerungsarten.

Die Resultate der Zugfestigkeitsprüfung wurden mit den erwarteten Festigkeiten (Näherungen)  $f_{ctm,erw}$  nach Roos [42] verglichen, wobei einmal die wirklich gemessenen Druckfestigkeit zugrunde gelegt ist ( $f_{ctm,erwM}$ ) und beim anderen Mal die Normdruckfestigkeit ( $f_{ctm,erwN}$ ). Die Abschätzung nach Roos [42] entspricht folgender Gleichung:

$$f_{ctm,erw} = 0,29 \cdot f_{cm}^{2/3} \cdot \left( \frac{\rho}{2400 \frac{kg}{m^3}} \right)^3 \quad (3.2)$$

Dabei ist:

$\rho$  Dichte des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung [kg/m<sup>3</sup>]

$f_{cm}$  Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>].

Die genäherte Zugfestigkeit  $f_{ctm,erwM}$  wurde auf Grundlage des gemessenen Werts der Druckfestigkeit berechnet, siehe oben. Da für die Mehrzahl der Proben die Druckfestigkeit am Probewürfel gemessen wurde, war hier die Umrechnung zwischen Würfel- und Zylinderdruckfestigkeit mit dem Faktor 0,83, siehe DIN 1045-2 [14] und Betontechnische Daten [40], notwendig. Dies soll folgendes Beispiel erklären:

- 1) Für den Probekörper A1 sind zur Bestimmung der Druckfestigkeit Probewürfel verwendet worden. Der Mittelwert der so ermittelten Würfeldruckfestigkeit lag bei  $f_{cm,cube} = 28,1 \text{ N/mm}^2$ . Zur Umrechnung von  $f_{cm,cube}$  auf die Zylinderdruckfestigkeit  $f_{cm,cyl} = f_{cm}$  gilt:  $f_{cm} = f_{cm,cube} \cdot 0,83$ . Für A1 ergibt sich  $f_{cm} = 23,41 \text{ N/mm}^2$ .
- 2) Die gemessene Dichte des Probekörpers A1 ist  $2301 \text{ kg/m}^3$ . Eingesetzt in (3.2) ergibt sich  $f_{ctm,erw} = 0,29 \cdot 23,41^{2/3} \cdot \left(\frac{2301}{2400}\right)^3 = 2,1$ .

Es stellte sich für den Vergleich zwischen Messwert der Zugfestigkeit und Näherungswert der Zugfestigkeit  $f_{ctm,erwM}$  eine gute Übereinstimmung ein. Bei der Beurteilung der resultierenden Werte ist zu bemerken, dass selbst für Ressourcenbeton die Zugfestigkeit um  $\pm 20\%$  schwanken kann, wie z.B. Rüsç [44] feststellte.

Die gute Übereinstimmung bedeutet zum einen eine Bestätigung der Formel von Roos [42] und zum anderen, dass der normal hergestellte Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung, der die Konformitätskriterien einhält, berechenbar wird.

Die genäherte Zugfestigkeit  $f_{ctm,erwN}$  berechnete sich durch Einsetzen der Normdruckfestigkeit von  $f_{cm}=28 \text{ N/mm}^2$  in (3.2). Hierbei wurde die gemessene Zugfestigkeit von der erwarteten Zugfestigkeit  $f_{ctm,erwN}$  überschätzt. Die möglichen Auswirkungen auf die Bemessung sind in Kapitel 6 dargestellt.

### 3.6.4 E-Modul

Wie für die Spaltzugfestigkeit auch, wird für die Prüfung des E-Moduls ein Zylinder mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe benutzt. Für die resultierenden Werte aus Anhang C.3 gilt die oben eingeführte Unterscheidung von Einzel- und Durchschnittswerten und den Lagerungsarten.

Für die Abschätzung des E-Moduls von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung stellt Roos folgende Gleichung auf:

$$E_{cm,erw} = 9100 \cdot f_{cm}^{0,33} \cdot \left(\frac{\rho}{2400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{A_z}{500\%}\right) \quad (3.3)$$

mit

$A_z$  Anteil von Zuschlag aus Ziegelbruch an der Gesamtgesteinskörnung in [%].

Ein erwarteter E-Modul (Näherung)  $E_{cm,erwM}$  lässt sich mit der Gleichung (3.3) und dem gemessenen Wert der Druckfestigkeit berechnen. Die hier benötigte Druckfestigkeit ist die an einem Zylinder gemessene. Liegt nur die Würfeldruckfestigkeit vor, muss diese mit dem Faktor 0,83, siehe [14], umgerechnet werden. Dies soll folgendes Beispiel erklären:

- 1) Für den Probekörper A3 sind zur Bestimmung der Druckfestigkeit Probewürfel verwendet worden. Der Mittelwert der so ermittelten Würfeldruckfestigkeit lag bei  $f_{cm,cube} = 25,5 \text{ N/mm}^2$ . Damit ergibt sich für A3  $f_{cm} = 21,2 \text{ N/mm}^2$ .
- 2) Die gemessene Dichte des Probekörpers A3 ist  $2207 \text{ kg/m}^3$ . Die Ziegelgesteinskörnung (Kalksandstein und normaler Ziegel) beträgt  $778 \text{ kg/m}^3$ . Bezogen auf die Gesamtgesteinskörnung von  $1597 \text{ kg/m}^3$  ergibt sich der Anteil  $A_z = 48,7\%$ .
- 3) Eingesetzt in (3.3) ergibt sich: 
$$E_{cm,erwM} = 9100 \cdot 21,2^{0,33} \cdot \left(\frac{2207}{2400}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{48,7}{500}\right)$$
$$= 19041 \text{ N/mm}^2$$
. Nach Norm wird dieser Wert auf  $19000 \text{ N/mm}^2$  abgerundet.

Der nach (3.3) erwartete E-Modul  $E_{cm,erwM}$  lag mit Ausnahme der Reihe D für jeden Beton über dem gemessenen E-Modul. Anzumerken ist, dass Abweichungen des gemessenen E-Moduls vom Normwert auch für Ressourcenbeton nicht ungewöhnlich sind.



---

## 4 Geometrie, Bewehrung und Messeinrichtung der Probekörper

Für das Ziel der Rissbreitenbegrenzung und der sicheren Konstruktion für Verbundphänomene (Übergreifungsstöße) im Recyclingbeton sollten die theoretischen Überlegungen durch praktische Versuche verifiziert werden. Für die Versuchskörper wie für jedes andere Stahlbetonbauteil gilt, dass deren Spannungen, Dehnungen und Verformungen nicht nur von den Baustoffeigenschaften, vgl. Kapitel 3, sondern auch von der vorliegenden Geometrie einschließlich der Bewehrungsführung bestimmt wird. Dieses Kapitel beschäftigt sich daher mit dem Thema, wie die Geometrie einschließlich der Bewehrungsführung für die Probekörper auszulegen sei, um Aussagen zu folgenden Themen der Bemessung und Konstruktion im Recyclingbeton machen zu können:

- Tragfähigkeit von Übergreifungsstößen
- Rissbildung am Übergang von Übergreifungsstößen zu einfach bewehrten Bereichen
- Rissbildung im einfach bewehrten Bereich

Aufgrund der Komplexität dieser Themen, die sich in einer hohen Anzahl von Parametern zeigt, mussten Vorüberlegungen zu Art und Anzahl der Versuche getroffen werden, aus denen Rahmenbedingungen für Bewehrung und Geometrie abgeleitet wurden, siehe 4.1. Die Verfeinerungen dieser Rahmenbedingungen, werden in den Abschnitten 4.2 bzw. 4.3 beschrieben. Der Abschnitt über den Entwurf der Grundformen stellt die Umsetzung von Geometrie und Bewehrung in Versuchskörper dar, siehe 4.4. Abgerundet wird dieses Kapitel durch die Betrachtung der Messeinrichtung, 4.5.

### 4.1 Vorüberlegungen zu Art und Anzahl der Versuche

Sowohl die Tragfähigkeit von Stößen als auch die Rissbildung im oben beschriebenen Übergangsbereich bzw. im einfach bewehrten Bereich sind in erster Linie mechanische Phänomene, bei denen sich durch äußere Einwirkung (z.B. ein Biegemoment) ein Stahlbeton-Bauteil so verformt, dass die Betonzugfestigkeit bzw. die Verbundfestigkeit überschritten wird und der Beton reißt. Da Bewehrung und Geometrie die Verformung bestimmen, ist die Grundidee, ein Bauteil mit bekannten Material-, Geometrie- und Bewehrungs-Eigenschaften zu belasten und zur oberflächlichen Rissbildung und später zum Stoßversagen zu bringen.

Bei der Untersuchung der Risse im Versuch ist es notwendig, dass die Prüffläche, auf der die Risse entstehen sollen, ausreichend groß ist, um eine statistisch belastbare Anzahl von Messergebnissen (Rissbreiten) zu erhalten. Weiterhin ist auch die Möglichkeit der Ausbildung eines Rissbildes wichtig. Kleine Prüfkörper wie beispielsweise die zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit verwendeten Prismen kommen daher nicht in Frage. Zusätzlich sind Übergreifungsstöße in kleinen Prüfkörpern praktisch nicht möglich.

Bei den durchgeführten Versuchen, vgl. Dokumentationen von Zilch et al. [60], [66], war eine Variation aller Einzelparameter aus Geometrie und Bewehrung (z.B. Breite, Höhe, Stabdurchmesser) über ihre gesamte Bandbreite nicht möglich, da dies zu einer zu großen Anzahl an Probekörpern geführt hätte, was aufgrund der erforderlichen Größe zu teuer geworden wäre. Daher sollten nur Extremfälle, also möglichst ungünstigste Fälle, die Auslegung von Geometrie und Bewehrung bestimmen. Der Bereich zwischen den Extremfällen sollte mit Hilfe theoretischer Überlegungen „aufgefüllt“ werden.

Zur Bestimmung der erforderlichen Anzahl von Extremfällen wurden zwei unabhängige, aber die Rissbildung wesentlich bestimmende Parameter identifiziert. Dies war zum einen der Stabdurchmesser, siehe 4.1.1, und zum anderen die Ausbildung der Übergreifungsstöße, siehe 4.1.2. Die Schlussfolgerungen, die sich daraus ergaben sind in 4.1.3 dokumentiert.

#### **4.1.1 Berücksichtigung des Stabdurchmessers**

Maßgebenden Einfluss auf die Rissbildung hat das Zusammenspiel zwischen Beton und Stahl, welches man als Verbundverhalten bezeichnet. Dieses ist abhängig vom Stabdurchmesser, da die Querschnittsfläche, die die Zugkraft im Stab aufnimmt, quadratisch mit dem Durchmesser anwächst, während die Mantelfläche, über die die Zugkraft in den Beton und damit das Bauteil eingetragen wird, nur linear mit dem Durchmesser ansteigt. Bei einer konstanten maximalen Schubspannung können infolge der größeren Mantelfläche mehrere Stäbe mit einem geringen Durchmesser und einer Gesamtquerschnittsfläche  $A_s$  mehr Kraft zwischen Beton und Stahl übertragen als ein Stab mit großem Durchmesser und der Querschnittsfläche  $A_s$ . Deshalb ist die Untersuchung verschiedener Stabdurchmesser notwendig. Gewählt wurde zum einen eine Bewehrung mit Stäben mit dem Durchmesser 16 mm als obere Grenze für „dünne Stäbe“ und zum anderen mit Stäben mit dem Durchmesser 28 mm. Betonstahlstäbe mit einem Durchmesser größer 28 mm sind in Deutschland als Bewehrung unüblich. Damit sind mindestens zwei Probekörpergeometrien erforderlich.

### 4.1.2 Ausbildung der Übergreifungsstöße und Versuchsaufbau

Bei der Ausbildung des Prüfkörpers in Hinsicht auf die Übergreifungsstöße sind zum einen die Rissbildung am Übergang zum einfach bewehrten Bereich und zum anderen das Versagen des Stoßes selbst von Interesse.

Der Bewehrungsgrad der Längsbewehrung eines Bauteils mit Übergreifungsstoß hat einen großen Einfluss auf das Versagensverhalten und die Rissbildung des Bauteils. Aus diesem Grund sollten Probekörper mit unterschiedlichen Bewehrungsgraden (hoch und normal) untersucht werden.

Gleiches trifft auf die Querbewehrung bzw. Querkraftbewehrung zu. Eine *Querkraftbewehrung* z.B. in Form von Bügeln wirkt sich nach Betzle [1] anders als eine Querbewehrung günstig auf die Rissbildung in Übergreifungsstößen aus. Aus diesem Grund sollten die Probekörper so ausgelegt werden, dass auf eine *Querkraftbewehrung* verzichtet werden konnte und nur eine Querbewehrung einzulegen war.

Auf eine *Querkraftbewehrung* kann nach Norm [13] in Platten (bzw. hier in Plattenausschnitten) verzichtet werden, wenn die Zugkräfte infolge Querkrafteinwirkung allein durch die Längsbewehrung und die Betonzugfestigkeit aufgenommen werden können. Um die Querkräfte gering zu halten und zusätzlich für die Untersuchung der Risse ein konstantes Moment zu erhalten wurde ein 4-Punkt-Biegeversuch gewählt.

Neben diesen grundsätzlichen Überlegungen sind im Weiteren noch Detailüberlegungen z.B. zur Längsbewehrung selbst einschließlich der Auslegung der Übergreifungslänge dokumentiert.

### 4.1.3 Schlussfolgerungen aus den Vorüberlegungen

Um die Einflüsse aus Stabdurchmesser und Bewehrungsgrad auf die Rissbildung im Stoß, am Stoßende und außerhalb des Stoßes getrennt untersuchen zu können, waren insgesamt vier Grundformen von Probekörpern erforderlich, siehe Tabelle 28.

Grundform	Durchmesser der Längsbewehrung $d_s$ [mm]	Bewehrungsgrad
A	28	Hoch (Grenzbewehrung)
B	28	Normal
C	16	Hoch (Grenzbewehrung)
D	16	Normal

**Tabelle 28** Definition der Grundformen

## 4.2 Allgemeine Betrachtung der Bewehrung

Bei der Betrachtung der Bewehrung muss zwischen der Biegebewehrung, die längs eingebaut wird, 4.2.1, und der in 4.2.2 erläuterten Querbewehrung unterschieden werden.

### 4.2.1 Anforderungen an die Längsbewehrung

Die Längsbewehrung war für den Entwurf der Prüfkörper maßgebend. Wie in 4.1 beschrieben, musste unterschiedliches Verbundverhalten infolge von verschiedenen großen Durchmessern der Längsbewehrung durch zwei verschiedene Grundformen berücksichtigt werden. Es war notwendig, diese zwei mit einem hohen und einem niedrigeren Bewehrungsgrad auszuführen, wie im Folgenden erklärt wird, und somit zu vier Grundformen „A“ bis „D“ zu kombinieren. Da man sich entschied, Übergreifungsstöße zu untersuchen, werden hier die erforderlichen bzw. einzubauenden Übergreifungslängen untersucht und durch eine Betrachtung des verwendeten Materials ergänzt.

#### Durchmesser der Längsbewehrung

Der Durchmesser der Längsbewehrung ist für zwei der vier Grundformen mit  $d_s = 28$  mm gewählt worden, für die anderen beiden mit  $d_s = 16$  mm. Während die dickeren Stäbe aufgrund ihrer Verbundeigenschaften das ungünstigste Tragverhalten erfassen und nach DIN 488 Teil 2 [20] größere Durchmesser nicht üblich sind, bilden nach Betzle et al. [1] die 16 mm Stäbe eine obere Grenze der dünnen Stäbe, für die günstigere Verhältnisse erwartet werden. Aufgrund des Sprungs in den Materialeigenschaften (bezogene Rippenfläche) kann nicht so leicht interpoliert werden.

#### Bewehrungsgrad - Grenzbewehrung

Der Bewehrungsgrad der verschiedenen Grundformen beruht auf der Berechnung der „Grenzbewehrung“  $\rho_{l,grenz}$ , einem Bewehrungsgrad, der nach Betzle et al. [1] so gewählt ist, dass gleichzeitig die Streckgrenze der Bewehrung und der Bruch der Biegedruckzone erreicht werden. Ein höherer Bewehrungsgrad ist demzufolge aufgrund der Forderung nach einem duktilen Versagen nicht möglich.

Für den Übergreifungsstoß ist nach Stöckl et al. [50] die Grenzbewehrung der ungünstigste Fall, da beim Zusammentreffen der beiden oben genannten Versagensarten die maximale Balkenkrümmung bei Erreichen der Streckgrenze auftritt. Der Balkenkrümmung setzen die bis zum Betonbruch elastischen Bewehrungsstäbe einen Widerstand entgegen, der zu zusätz-

lichen Absprengkräften auf die Betondeckung führt. Diese Kräfte fördern den Verbundbruch im Stoß.

Nach Betzle et al. [1] müssen allerdings auch Bewehrungsgrade  $\rho_l < \rho_{l,grenz}$  betrachtet werden. Hier wird die Streckgrenze schon bei geringeren Balkenkrümmungen erreicht. Da die Biegedruckzone bei diesen niedrigeren Krümmungen noch nicht bricht, können die Nulllinie, der Hebelarm und damit das aufnehmbare Moment noch weiter steigen. Das bedeutet, dass aufgrund der geringeren Steifigkeit größere Krümmungen möglich sind.

Da aber nur die Stäbe außerhalb des Stoßes fließen (der Stoß selber ist durch die „doppelte“ Bewehrung viel steifer), bleiben die Stäbe im Stoß elastisch und halten bei den erwähnten größeren Balkenkrümmungen immer noch ihren vollen Krümmungswiderstand aufrecht.

Dieser führt wie im Falle der Grenzbewehrung auch zu Absprengkräften auf die Betondeckung.

Um die verschiedenen Bewehrungsgrade einbauen zu können, wurden je nach Balkenquerschnitt und Stabdurchmesser zwischen 2 (Grundform B) und 10 (Grundform C) Stabstränge eingelegt. Die lichten Abstände dieser variieren zwischen  $2 d_s$  (Grundform A und C) und  $10 d_s$  (Grundform D – Annahme, dass sich bei diesem Abstand die Stränge nicht gegenseitig beeinflussen). Aus Gründen der Vergleichbarkeit folgen die beschriebenen Versuche den Referenzversuchen von Betzle et al. [1].

### Übergreifungslängen

Die Aufgabe eines Übergreifungsstoßes ist die sichere Übertragung von Kräften zwischen den gestoßenen Stäben. Die maximal zu übertragende Kraft sei hierbei die maximale Kraft in einem Stab  $F_s$  nach (4.1). Für die Übertragung der Kraft ist die kritische Übergreifungslänge  $\ell_{krit}$  nach (4.2) mit der Näherung nach Eligehausen [24] erforderlich.

$$F_s = \frac{f_{yd}}{\gamma_s} A_s \quad (4.1)$$

$$\ell_{krit} = \frac{f_{yd}}{4 \cdot f_{bd}} d_s \approx 30 \cdot d_s \quad (4.2)$$

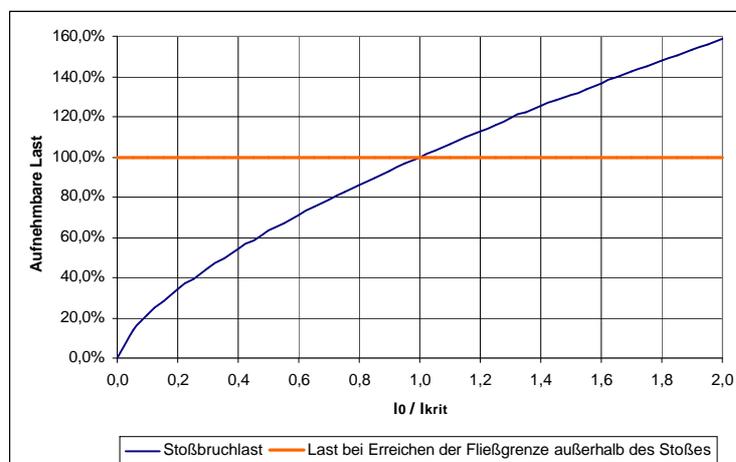
Wird nur die kritische Übergreifungslänge  $\ell_{krit}$  eingebaut, so erfolgt theoretisch ein gleichzeitiges Versagen des Stahls und des Verbundes im Stoß. Das Stahlversagen wäre gutmütig, da es sich durch große Verformungen ankündigen würde. Das Verbundversagen hingegen ist

spröde und verläuft ohne Ankündigung. Damit würde beim Einbau von  $\ell_{\text{krit}}$  ein sprödes Versagen wahrscheinlich.

Das Versagen eines Bauteils sollte sich jedoch immer ankündigen, damit sich etwaig betroffene Menschen rechtzeitig in Sicherheit bringen können. Kann ein schlagartiges Versagen nicht ausgeschlossen werden (z.B. beim Durchstanzen, oder Knicken von Stützen), so erhöht man die Sicherheit dieses Versagens ohne Ankündigung gegenüber dem Versagen mit Ankündigung. Dieser Grundsatz ist auch bei der Formulierung eines Bemessungsansatzes und auch einer ganzen Bemessungsnorm zu beachten.

Vergrößert man die Übergreifungslänge  $\ell_0$  deutlich gegenüber der kritischen Länge  $\ell_{\text{krit}}$ , siehe Gleichung (4.3), so steigert man die Stoßbruchlast  $L$  was dazu führt, dass der Stahl außerhalb des Stoßes fließt, bevor der Stoß versagt. Man erhält ein duktiles Bauteilversagen. Vom Abstand zwischen der Stoßbruchlast und der außerhalb des Stoßes (einfach bewehrter Bereich) aufnehmbaren Last hängt somit die Sicherheit gegen schlagartiges Versagen ab, siehe Bild 12.

$$\ell_{\text{krit}} = \frac{f_{yd}}{4 \cdot f_{bd}} d_s \approx 30 \cdot d_s \quad (4.3)$$



**Bild 12 Einfluss der Übergreifungslänge  $\ell_0$  auf die Stoßbruchlast nach Eligehausen und Last bei Erreichen der der Fließgrenze außerhalb des Stoßes**

Eine Verlängerung der Übergreifung hat zusätzlich den Vorteil, die normalerweise sehr großen Rissbreiten an den Enden der Übergreifung zu verkleinern, siehe Eligehausen [24].

Für die Normung werden deshalb einzubauende Übergreifungslängen gefordert, die wesentlich über der kritischen Länge liegen. Bei der Auslegung der Versuche entsteht dadurch jedoch ein Dilemma: Baut man für die Versuchskörper die z.B. für Ressourcenbeton benötigten Übergreifungslängen ein, so erhält man an den Stoßenden Rissbreiten, wie man sie unter glei-

chen Umständen (z.B. Last) auch bei realen Bauteilen erhält. Allerdings wird man kein Stoßversagen erreichen. Vielmehr werden die Stäbe außerhalb des Stoßes fließen. Allerdings weiß man nicht, ob der Abstand zwischen Stoßversagen und Stabversagen immer noch genau so hoch ist wie für Ressourcenbeton. Deshalb wurde im Rahmen dieser Versuche entschieden, nur die kritische Übergreifungslänge einzubauen.

Die Schwierigkeit dabei ist, dass diese Länge für die neuen Betone unbekannt ist. Weiterhin wird man an den Versuchskörpern auch zu große Rissbreiten erhalten.

Prüfreihe	eingebaute Ü-Länge $l_0$ [mm]	Ü-Länge nach Norm [mm]	Ü-Länge prov/req [-]
A	1530	2650	0,58
B	1210	2650	0,46
C	640	1510	0,42
D	420	1510	0,28

**Tabelle 29 Übersicht über eingebaute Übergreifungslängen**

Für die Versuche wurden in Bezug auf die Norm zu kurze Übergreifungslängen eingebaut, siehe Tabelle 29. Dabei orientierte man sich für die Versuche an den Referenzversuchen von Betzle [1], die auch schon für Ressourcenbeton ein schlagartiges Stoßversagen aktivierten. Man hoffte somit, die wirkliche Stoßtragfähigkeit beobachten zu können.

Durch dieses Vorgehen waren die Rissbreiten untereinander (Ressourcenbeton und Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung) vergleichbar und konnten später über mechanische Gesetzmäßigkeiten und Materialkennwerte nachvollzogen werden.

Für die Bemessung ging man davon aus, dass die grundsätzlichen Gesetze der Mechanik, die für Stöße in Ressourcenbeton gefunden wurden, auch für solche in Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung gelten.

### Material der Längsbewehrung

Für die Längsbewehrung ( $d_s = 16$  mm oder 28 mm) wurde gerader, gerippter, warm gewalzter Stabstahl (BSt 500 S) verwendet. Auf den Einbau von kalt verformten Stahl, der sich ungünstiger verhalten würde, wurde verzichtet, da er für Platten praktisch nur noch in Fertigteilwerken und dort auch nur bis zu einem Durchmesser von 14 mm verwendet wird.

Der Stabstahl für die Längsbewehrung wurde an 4 Proben für die Stäbe mit  $d_s = 16$  mm und an 3 Proben für die Stäbe mit  $d_s = 28$  mm getestet. Hierbei wurde u.a. der E-Modul, die Spannung bei 0,2 % Dehnung und die Querschnittsfläche bestimmt, siehe Anhang C.1.

## 4.2.2 Anforderungen an die Querbewehrung bzw. Querkraftbewehrung

Nach DIN 1045-1 [13] ist für Übergreifungsstöße eine Querbewehrung vorgeschrieben. Für Strangabstände unter  $12 d_s$  sieht diese Norm sogar Bügel als Querbewehrung vor. Alle Versuchsreihen hätten nach Norm somit verbügelt werden müssen. Aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Referenzversuchen von Betzle [1] wurde darauf jedoch verzichtet und nur eine gerade Querbewehrung eingebaut. Das bedeutet, dass die Sicherheit gegen Absprengen der Betondeckung im wirklichen Bauteil höher sein wird als im Versuchskörper.

Maßgebend war für die Querbewehrung im querkraftlosen Bereich zwischen den Auflagern, siehe Versuchsaufbau in Kapitel 5, dass mindestens 20% der Längsbewehrung als Querbewehrung eingelegt (siehe DIN 1045-1 13.3.2 (2) [13]) sein müssen. Zusätzlich wurde durch die Anordnung von Bügeln im Querkraftbereich volle Schubdeckung gewährleistet. Die Querbewehrung im Stoßbereich verfügte über keine lotrechten Schenkel, jedoch waren die Enden mit aufgeschweißten Stahlplatten (45 mm / 45 mm / 7 mm) verankert, um einen Schlupf gemäß den Verhältnissen in breiteren Platten zu vermeiden.

Für die Querbewehrung und die Querkraftbewehrung (Bügel) wurde der Betonstabstahl BSt 500 S aus dem gleichen Werk wie für die Längsbewehrung verwendet, jedoch nicht gesondert untersucht. Er wurde bereits werksseitig geschweißt bzw. gebogen.

## 4.3 Überlegungen zur Geometrie

Grundsätzlich ergeben sich die Probenhöhen und –breiten aus der Bewehrung und Regeln zur Bewehrungsführung. Da erstere aus Gründen der Vergleichbarkeit von den Vergleichskörpern von Betzle et al. [1] übernommen wurden, stimmen die Geometrien mit denen der Referenzversuche überein. Im Folgenden wird kurz ihre Bedeutung erklärt.

### 4.3.1 Probenhöhe

Für Grundform A bzw. C ergibt sich aus der Forderung nach Einlegen einer Grenzbewehrung und dem Strangabstand eine Plattendicke von ca. 35 cm (A) bzw. 18 cm (C). Da, wie bereits von z.B. Betzle [1] beschrieben, die Biegedruckfestigkeit unter einer andauernden Last abnimmt, wurden die Querschnitte etwas vergrößert.

Nach der alten, zurückgezogenen DIN 1045 von 1972 [11] gab es einen maximalen Abstand von Stäben in einem Bauteilquerschnitt in Abhängigkeit vom Durchmesser der eingelegten Stäbe und dem Querschnitt des Bauteils, der durch die Gleichung (41) der alten Norm festgelegt war. Für die Grundformen B und D sollte der Bewehrungsgrad unterhalb der Grenzbe-

wehrung liegen. Hierbei wurde ein lichter Stababstand von  $10 d_s$  angestrebt. Dieser Stababstand würde nach der Formel aus der alten DIN 1045 für die Grundform B ( $d_s = 28$  mm) eine viel zu große Höhe ergeben. Deshalb wurde diese zu 40 cm gesetzt, was immer noch einen akzeptablen Stababstand von  $6 d_s$  ergibt.

Die Höhe für Grundform D ( $d_s = 16$  mm) berechnet sich aus dem angestrebten lichten Stababstand von  $10 d_s$  und der obigen Formel zu 42 cm und wurde zu 40 cm gewählt.

### 4.3.2 Probenbreite

Die Probenbreite richtet sich nach den Stababständen und den Betondeckungen und bietet bei den niedrig bewehrten Körpern mindestens zwei Strängen Platz.

### 4.3.3 Betondeckung

Die Betondeckung zur Übertragung der Verbundkräfte hängt immer vom Stabdurchmesser ab, siehe Überlegungen dazu in 4.2.1. Nach Norm [13] sollte sie  $1 d_s$  betragen. Eine Vergrößerung der Betondeckung darüber hinaus aus Dauerhaftigkeitsgründen war nicht Thema dieser Forschungsarbeit.

Für die Körper der Reihe A und C wurde die Forderung nach einer Betondeckung von  $1 d_s$  eingehalten. Es sollte jedoch auch untersucht werden, wie sich der Verbund für Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung durch eine Über- bzw. Unterschreitung der Grenze von  $1 d_s$  verändert. Die Körper der Reihe C wurden somit mit einer Betondeckung von nur  $0,75 d_s$  hergestellt, die Körper der Reihe D mit einer Betondeckung von  $1,4 d_s$ .

## 4.4 Entwurf der Grundformen „A“ bis „D“

In diesem Abschnitt findet sich eine Zusammenfassung der Merkmale der vier Grundformen „A“ bis „D“, siehe Tabelle 30.

Grundform	Außenmaße			Ø Längsbewehrung $d_s$ [mm]	Übergreifungslänge $\ell_0$ [mm]	Lichter seitl. Strangabstand in $d_s$	Bewehrungsgrad	Statische Nutzhöhe $d$ [m]
	Höhe [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]					
A	400	616	6900	5 Ø 28	1530	$2 d_s$	1,47%	0,34
B	400	460	6900	2 Ø 28	1210	$6 d_s$	0,79%	0,34
C	200	700	4600	10 Ø 16	640	$2 d_s$	1,79%	0,16
D	400	960	4600	5 Ø 16	420	$10 d_s$	0,29%	0,36

Tabelle 30 Grundformen der Balken

#### 4.4.1 Bewehrung der Grundform A

Bei dieser Grundform wird mit Stäben von  $d_s = 28$  mm die Grenzbewehrung angestrebt. Die wirklich eingebaute Bewehrung liegt (wie bei dem Referenzversuch) nach DIN 1045 [12] und DIN 1045-1 [13] bei ca. 88% von  $\rho_{l,grenz}$  [63]. Die Reduzierung wird vorgenommen, da nach Betzle et al. [1] die Biegedruckfestigkeit bei einer Einwirkungsdauer, wie sie im Rahmen der Versuchsdurchführung zu erwarten ist, abnimmt. Für die bauliche Umsetzung des Bewehrungsgehaltes, werden die Stäbe mit lichten Abständen von  $3 d_s$  eingebaut. In Bild 13 und in Anhang D.1 ist der Bewehrungs- und Schalplan für diese Grundform dargestellt.

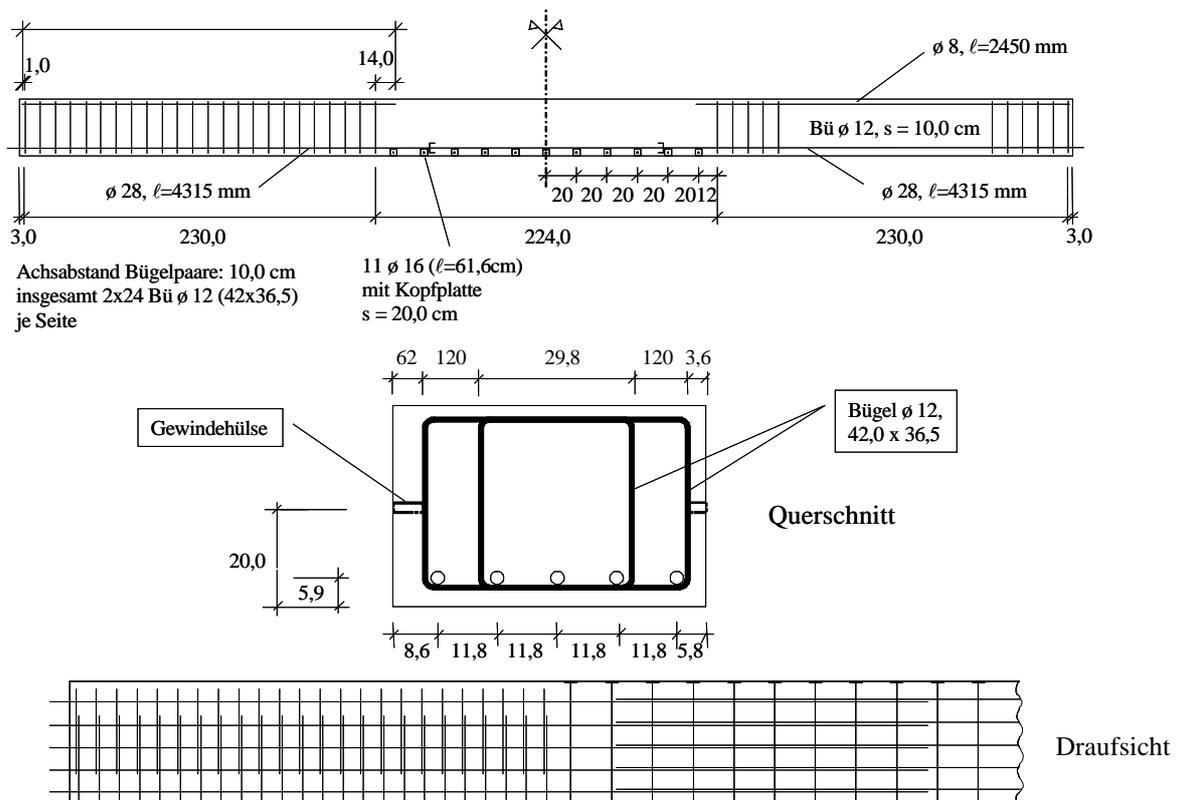


Bild 13 Bewehrungs- und Schalplan Grundform A (Auszug)

#### 4.4.2 Bewehrung der Grundform B

Bei dieser Grundform wird mit Stäben von  $d_s = 28$  mm ein Bewehrungsgrad unterhalb der Grenzbewehrung angestrebt. Die Höhe der Grundform beläuft sich auf 40 cm. Mit Hilfe der Gleichung (41) der DIN 1045 (Ausgabe Januar 1972) wurde für das Referenzprogramm von Betzle et al. [1] ein maximal zulässiger Strangabstand von  $6,8 d_s$  bestimmt. Eingebaut wurden die Stäbe mit einem Abstand von  $6,0 d_s$ . Diesem Beispiel wird aus Gründen der Vergleichbarkeit auch in der aktuellen Grundform B gefolgt, obwohl es in der aktuellen DIN 1045-1

[13] keine solche Bestimmung gibt. In Anhang D.2 ist der Bewehrungs- und Schalplan für diese Grundform dargestellt.

#### 4.4.3 Bewehrung der Grundform C

Da in der Grundform C mit Stäben von  $d_s = 16$  mm auch die Grenzbewehrung angestrebt wird, gilt Abschnitt 4.4.1 sinngemäß. Der Unterschied ist, dass die eingelegte Bewehrungsmenge nach DIN 1045-1 [13] sogar etwas über der Grenzbewehrung liegt. In Anhang D.3 ist der Bewehrungs- und Schalplan für diese Grundform dargestellt.

#### 4.4.4 Bewehrung der Grundform D

Für diese Grundform soll mit Stäben von  $d_s = 16$  mm noch ein wesentlich geringerer Bewehrungsgrad als für Grundform B untersucht werden. Um Messergebnisse für die einzelnen Stäbe zu erhalten, die nicht durch den Nachbarstab beeinflusst sind, wurde für den Referenzversuch ein Strangabstand von  $12 d_s$  (also ein lichter Strangabstand von  $10 d_s$ ) gewählt, da nach Stöckl [51] ab diesem Abstand nur noch eine vernachlässigbar geringe gegenseitige Beeinflussung der Stränge untereinander besteht. Die Bewehrung des Referenzversuchs wird für diese Grundform übernommen. In Anhang D.4 ist der Bewehrungs- und Schalplan für diese Grundform dargestellt.

### 4.5 Messungen

Messungen am und im Probekörper dienen zur Kontrolle und zur quantitativen und qualitativen Beschreibung des Probekörpers. Bevor in Kapitel 6 die gemessenen Werte interpretiert und weiterbearbeitet werden, erfolgt hier eine Aufstellung der durchgeführten Messungen. Diese Aufstellung gibt einen Überblick über die gemessenen Größen, das Vorgehen beim Messen und wie die Messgrößen einzuordnen sind.

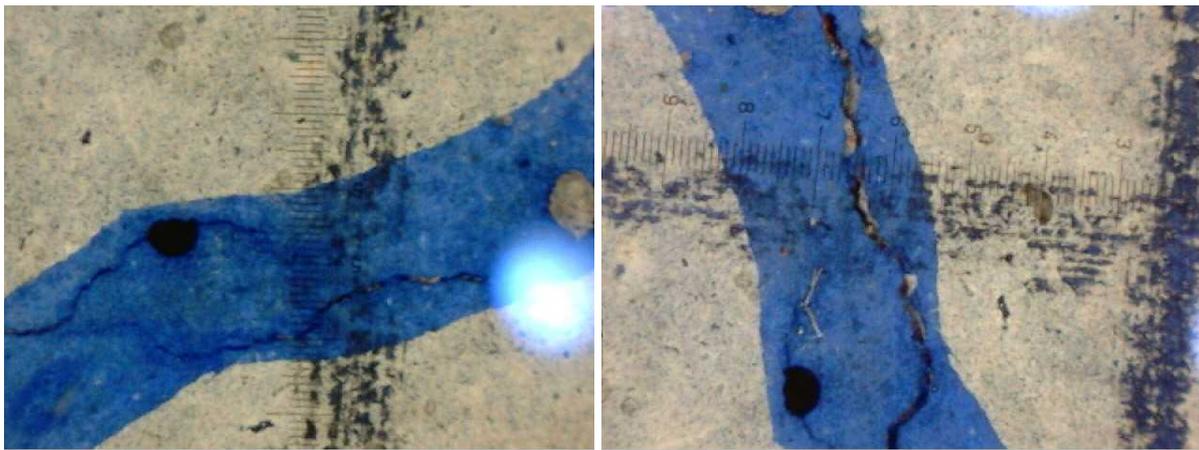
Der eine Teil der Messungen konnte ohne weitere Vorkehrungen am erhärteten Probekörper ausgeführt werden. Zu diesen gehörten die Rissaufnahme, siehe 4.5.1, die Bestimmung der Durchbiegung, siehe 4.5.2, und die Aufnahme der Betonstauchung, siehe 4.5.3.

Der andere Teil bedurfte Vorkehrungen vor der Betonage des Probekörpers. Hierzu gehörten die Ermittlung der Stahlspannungen mittels Dehnmessstreifen, siehe 4.5.5, die Messung der Abplatzung der Betondeckung, siehe 4.5.6, und die Aufnahme des Bewehrungsschlupfs, siehe 4.5.7.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist bei den nachfolgenden Abschnitten, die sich einzeln mit den Messungen auseinandersetzen, immer nur das Ausführungsbeispiel einer Grundform gezeigt. Die anderen Ausführungen sind in Anhang E zu finden.

#### 4.5.1 Rissaufnahme

Die wichtigste Messung im Prüfprogramm ist die Rissaufnahme. Bei ihr werden die sich unter Last bildenden Risse gekennzeichnet, benannt und ihre Position festgehalten. Auf dem Gebrauchslastniveau, siehe 5.3, werden Rissbreiten mit einer Risslupe gemessen und gespeichert. Die Messung erfolgt nicht kontinuierlich entlang der Risslänge, sondern jeweils in einem Abstand von 10 cm. Als Hilfsmittel zur Einhaltung des 10 cm-Abstands dienen die Achsen eines auf den Probekörper aufgezeichneten Rasters, siehe Bild 14 und Bild 15. Zur Erinnerung: Die Rissbreiten sollen später in Kapitel 6 mit den ermittelten Baustoffkennwerten nachgerechnet werden, um zu sehen, ob sich Rissbreiten in Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung mit den üblichen Rechenansätzen behandeln lassen.

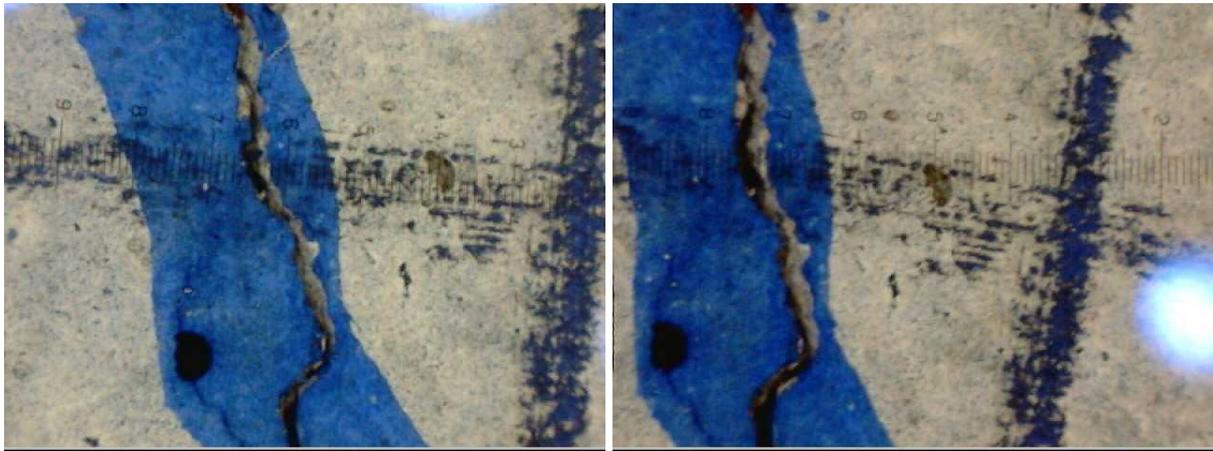


**Bild 14 Mikroskop Aufnahmen der Entwicklung eines Risses (geringe Last – erstes Bild um 90° verdreht)**

Um die Rissentwicklung zu dokumentieren, wird die Rissaufnahme für die anderen Laststufen bis einschließlich 1,25-mal der Last auf dem Gebrauchslastniveau ebenfalls durchgeführt, siehe Bild 15. Der Unterschied bei diesen Messungen ist, dass nicht an allen Achsen des Rasters gemessen wird, sondern nur in zwei Achsen, die direkt über oder in unmittelbarer Nähe der Bewehrungsstränge verlaufen.

Die Probekörper waren dafür entworfen, schlagartig also ohne Ankündigung zu versagen. Da der Zeitpunkt des Versagens aufgrund der neuen Materialeigenschaften und natürlicher Schwankungen zwar angenommen, aber nicht mit Sicherheit exakt bestimmt werden konnte, wurde wegen einer möglichen Verletzungsgefahr darauf verzichtet, auf höheren Laststufen

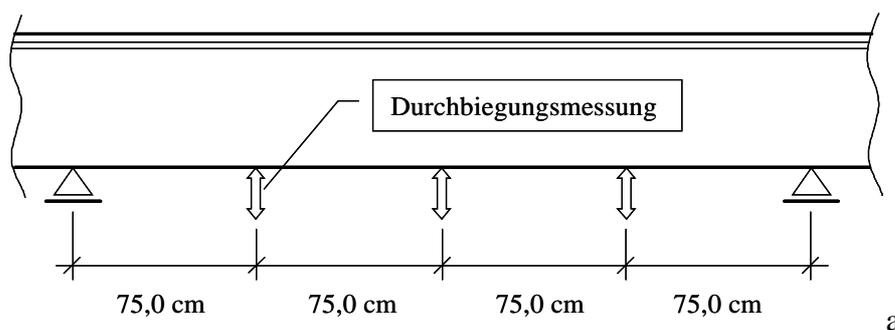
Risse mit der Risslupe aufzunehmen. Als Ausgleich wurden Fotos gemacht, um das Rissbild auf den verschiedenen Laststufen festzuhalten.



**Bild 15** Mikroskop Aufnahmen der Entwicklung eines Risses (höhere Last)

#### 4.5.2 Durchbiegung

Die Durchbiegung in mm wurde jeweils in der Mitte und in den Drittels-Punkten des Probekörpers mit induktiven Wegaufnehmern kontinuierlich und automatisch gemessen. Man erwartete, dass die Durchbiegung eines Recyclingbetonbalkens aufgrund des geringeren E-Moduls höher ist als bei einem vergleichbaren Balken mit natürlichem Zuschlag. Zur Verifizierung brauchte man diese Bauteilantwort. Zusätzlich diente sie für eine Nachrechnung mit Einwirkungen, Bauteilgeometrie und Materialeigenschaften.



**Bild 16** Darstellung der Durchbiegungsmesspunkte am Beispiel der Grundform C und D

#### 4.5.3 Betonstauchung

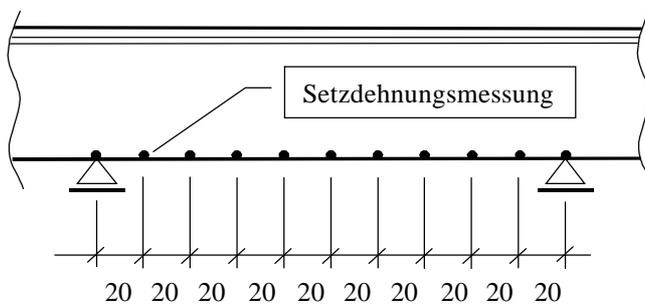
Die Betonstauchung ist die negative Dehnung  $\epsilon_c$  des Betons in der Betondruckzone, die mittels eines Setzdehnungsmessers (SDM – Bild 17) für jede Laststufe bis einschließlich 1,25-mal der Last auf dem Gebrauchslastniveau aufgenommen wurde. Bei den höheren Laststufen wurde auf diese direkt am Prüfkörper stattfindende Messung verzichtet. Der Grund dafür

liegt, wie bei der Rissaufnahme auch, in der Verletzungsgefahr, die aufgrund des schlagartigen Versagens bestand.



**Bild 17 Setzdehnungsmesser (SDM)**

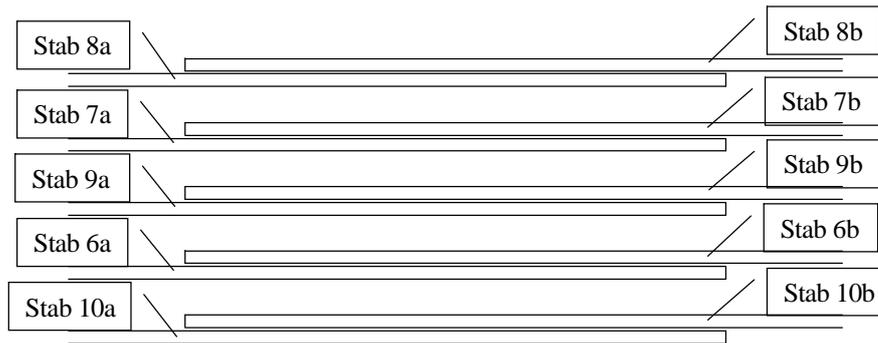
An der Messung selbst sah man, wie weit ein eventueller Betondruckbruch noch entfernt war und konnte zusammen mit den Dehnungen aus der DMS-Messung die Verkrümmung des Balkens berechnen. Die Messmarken, deren relative Verschiebung zueinander man mit dem SDM maß, waren im Abstand von 20 cm an den Seitenflächen des Körpers am unteren Rand angebracht, wie in Bild 18 zu sehen ist.



**Bild 18 Positionen der SDM-Marken am Beispiel der Grundformen C und D**

#### 4.5.4 Überblick über die Messungen im Probekörper

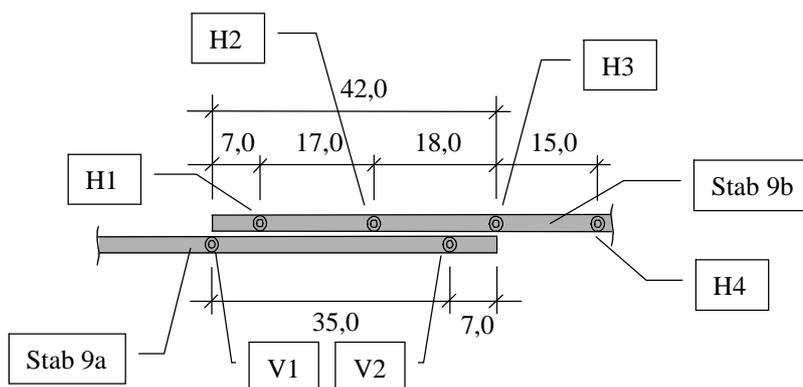
Die Einrichtungen der folgenden drei Messungen (Stahlspannungen, 4.5.5, Spaltung, 4.5.6 und Schlupf, 4.5.7) befanden sich im Probekörper auf oder an den Längsbewehrungsstäben. Zur Orientierung und als Beispiel findet sich in Bild 19 eine Darstellung der Längsbewehrung der Grundform D. Die Stäbe waren zwar von Material und Geometrie her gleich, jedoch unterschieden sie sich dahingehend, ob und welche Messungen an ihnen durchgeführt wurden. Aus diesem Grund sind sie durchnummeriert.



**Bild 19 Kennzeichnung der Längsbewehrung in Grundform D**

#### 4.5.5 Messung der Stahlspannungen mit Dehnmessstreifen (DMS)

Von großem Interesse waren auch die Stahldehnungen und -spannungen. Vor allem im Stoß und in unmittelbarer Nähe des Stoßes gaben sie Auskunft, ob und welche Abschnitte der Bewehrung des Bauteils ab welchem Zeitpunkt im Fließen waren. Diese Betrachtung ist im Zusammenhang mit den Ausführungen zum Entwurf der Probekörper mit dem Ziel eines bestimmten Tragverhaltens wichtig, siehe 4.2.1. Messinstrument für die Stahldehnungen waren die Dehnmessstreifen (DMS), die auf die Längsbewehrung im Stoß geklebt wurden. Sie gaben kontinuierlich und automatisch die Stahldehnung und mittels Umrechnung die Stahlspannung wieder und zeigten so ebenfalls, wie die Kraft zwischen den gestoßenen Stäben übertragen wurde. In Bild 20 finden sich als Beispiel die Positionen der DMS in Grundform D.



**Bild 20 Position der Dehnmessstreifen am Beispiel der Grundform D**

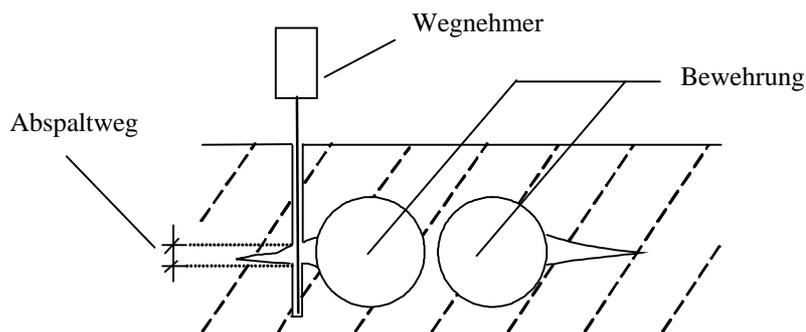
Bei der Interpretation der resultierenden Stahlspannungen, siehe Kapitel 6, ist darauf zu achten, dass die gemessenen Spannungen nur Stichproben sind. Liegt z.B. der DMS in einem Riss, so erhält man im Gegensatz zu DMS zwischen zwei Rissen für die Stahldehnung und die Stahlspannung wesentlich höhere Werte. Dies kommt daher, dass zwischen den Rissen der Beton auf Zug mitwirkt (Tension-Stiffening-Effekt), während im Riss die höhere, so genannte

„nackte“ Stahlspannung vorliegt. Das Ergebnis sind Sprünge im Messgraphen, dessen Ableitung eigentlich stetig sein sollte. Da man aber nicht nachvollziehen kann, wo genau sich der DMS im Bezug auf den Riss befindet, lässt sich dies auch nicht leicht korrigieren.

#### 4.5.6 Messung der Abspaltung der Betondeckung

Im Gegensatz zu den obigen Messungen wurde die Abspaltung der Betondeckung nicht in allen Versuchsreihen gemessen. In den Versuchsreihen, die auf der Grundform C und D beruhten, wurden ausreichend viele Informationen gesammelt, sodass eine Untersuchung in den Versuchsreihen basierend auf den Grundformen A und B nicht erforderlich war.

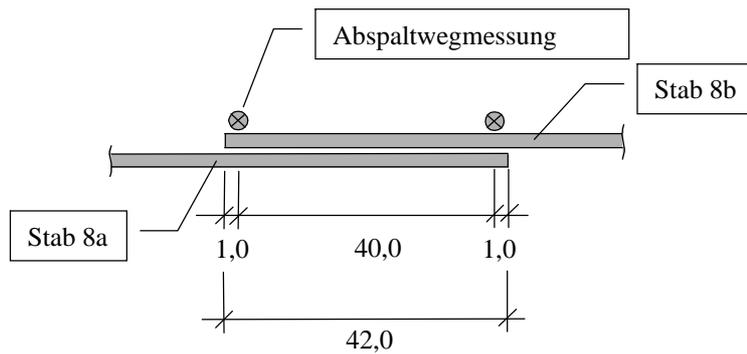
Die Messung der Abspaltung der Betondeckung war eine Wegmessung in mm und fand im Stoßbereich statt. Da zwei Versagensmechanismen für den Stoßbereich möglich waren, siehe 4.2.1, sollte die Abspaltungsmessung zusammen mit der Schlupfmessung, siehe 4.5.7, ggf. Unterschiede für die verschiedenen Mischungen im Bruchverhalten zeigen.



**Bild 21 Schemazeichnung der Messenrichtung für den Abspaltungsweg**

Die Messeinrichtung bestand aus einem mit einem Weggeber gekoppelten Metallstift in einer 6 mm durchmessenden Hülse, die neben einem Bewehrungsstab aus dem Beton führte. Beginn sich die Betondeckung abzuheben, senkte sich der Stift aus der in der Betondeckung verankerten Hülse in die sich öffnende Spalte und maß kontinuierlich die Verschiebung, siehe Bild 21.

Wie sich auch später in den Versuchen zeigte, waren die Abspaltungswegen am Ende des Stoßes am größten. Aus diesem Grund wurden auch dort die Messeinrichtungen installiert. In Bild 22 finden sich die Positionen der Abspaltungswegmessungen beispielhaft für Grundform D.

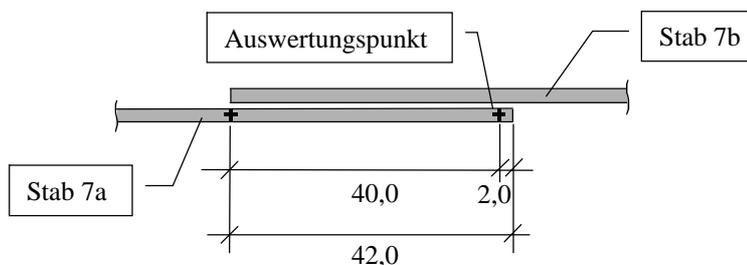


**Bild 22 Position der Abspaltungsweg-Messung am Beispiel der Grundform D**

#### 4.5.7 Schlupfmessung

Ähnlich wie bei der Messung der Abspaltung der Betondeckung auch, wurde die sehr aufwendige Schlupfmessung nicht für alle Versuchsreihen durchgeführt. Durch die Informationen, die in den anderen Reihen gewonnen werden konnten, wurde auf die Bestückung mit der Messeinrichtung für die Reihe basierend auf Grundform A verzichtet.

Die Schlupfmessung war eine Wegmessung in mm. Sie fand im Stoßbereich statt und sollte zeigen, wie sich bei der Belastung des Probekörpers bzw. beim Versagen seines Stoßes die übergreifenden Stäbe aus dem Beton ziehen. Man spricht bei dem Weg, den der Stab relativ zu dem ihn umgebenden Beton macht, von Schlupf.

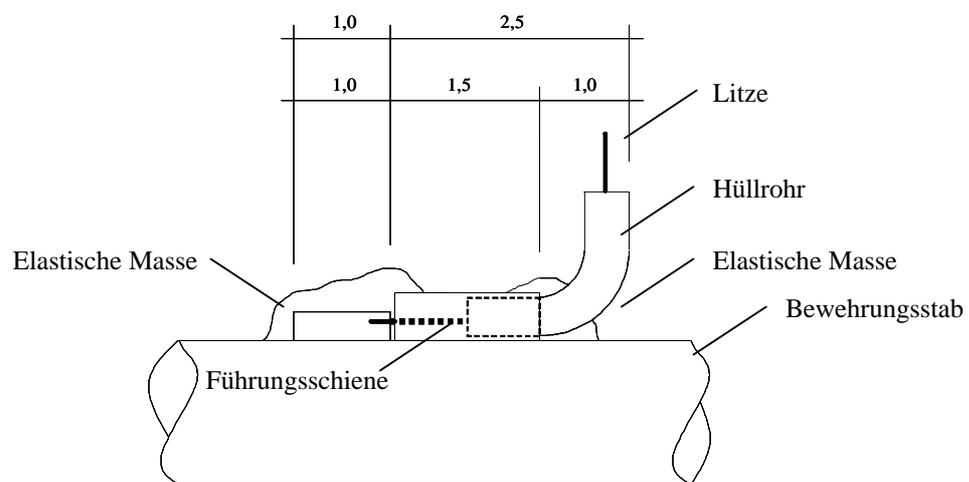


**Bild 23 Positionen der Schlupfmessung am Beispiel der Grundform D**

Vor aber auch während der Schlupfbewegung wird zwischen Stab und Beton eine Verbundspannung übertragen. Man kann die mittlere Verbundspannung von einem Punkt  $P$  bis zum Stabende berechnen, wenn die Länge bis zum Stabende, der Stabdurchmesser und die Stahlspannung am Punkt  $P$  bekannt sind. Zusammen mit der Messung des Schlupfs am Punkt  $P$  ist an dieser Stelle ein Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm ( $\tau$ - $s$ -Diagramm) aufstellbar. Dieses kann mit den für Ressourcenbeton bereits bekannten  $\tau$ - $s$ -Diagrammen verglichen werden, um die für die Rissbildung wichtige maximale Verbundspannung zu bestimmen. Da am Stab- anfang und am Stabende die höchsten Schlupfbewegungen stattfinden, wurden die Wegneh-

mer entsprechend dort installiert, siehe dazu den in Bild 23 dargestellten Messplan für die Versuchsreihe D.

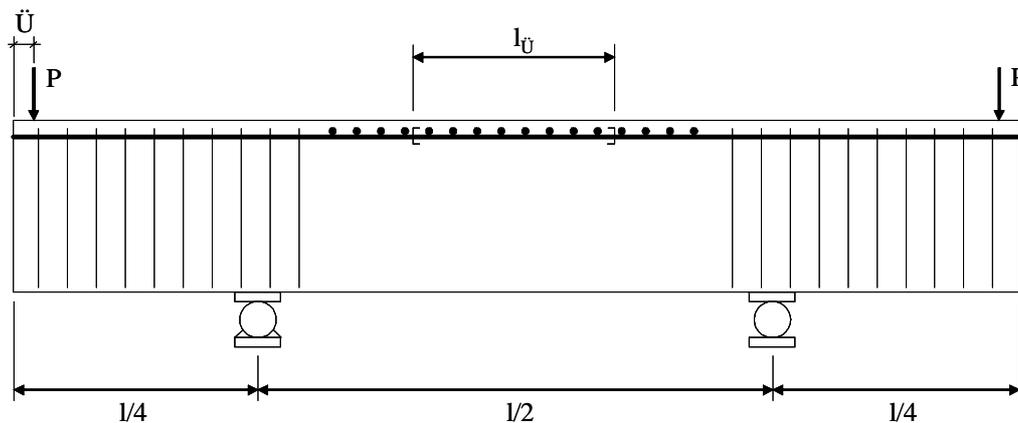
Die Messeinrichtung (Bild 24) selbst besteht aus einer Litze, die an einen Bewehrungsstab gepunktet wird und die sich in einem gebogenen, im Beton verankerten Hüllrohr frei bewegen kann. Verschiebt sich der Stab, wird die Litze durch das Hüllrohr gezogen, was von einem Weggeber kontinuierlich erfasst wird. Zusätzlich ist auf dem Stab eine Führungsschiene angebracht. Diese ist mit einer elastischen Masse überzogen, um das Eindringen von Betonschlempe zu verhindern, die den Mechanismus blockieren könnte. Anzumerken ist abschließend, dass der Schlupf mit dieser Einrichtung nur in einer Richtung messbar ist.



**Bild 24 Schemazeichnung der Schlupfmesseinrichtung an einem Bewehrungsstab**

## 5 Prüfprogramm

Das Prüfprogramm umfasste sechzehn bis zu 6,90 m lange und bis zu 4,5 t schwere Probekörper, die im Labor des Materialprüfungsamtes Abteilung Massivbau bewehrt, betoniert und geprüft wurden. Bei den Probekörpern handelte es sich, wie in 4.1 und 4.2 beschrieben, um Plattenausschnitte mit Übergreifungsvollstößen, die in einem 4-Punkt-Biegeversuch belastet wurden, siehe Bild 25. Aus Sicht der Schnittgrößenermittlung handelte es sich bei ihnen um Biegebalken mit konstantem Moment zwischen den Auflagern.



**Bild 25** Prinzipskizze des Versuchsaufbaus

Die hohe Anzahl von 16 Körpern setzte sich aus vier verschiedenen Grundformen (siehe Tabelle 30) zusammen, die mit jeweils vier verschiedenen Betonmischungen (siehe Tabelle 27) eingebaut und geprüft wurden. Die vier Grundformen repräsentieren maßgebende Fälle für Bewehrung, siehe 4.2, und Geometrie, siehe 4.3, während die vier Betonmischungen mögliche Variationen des Recyclingbetons abdecken, Kapitel 3.

Um die Übersichtlichkeit im Vorhaben zu gewährleisten, erhielt jeder ausgeführte Probekörper eine Kodierung, die jeweils die Körperform bzw. die Geometrie (A – D) und die Mischung (1 – 4) berücksichtigte. So wurde die Kodierung „A2“ dem Probekörper zugewiesen, der mit Stäben mit großem Stabdurchmesser bewehrt wurde und mit diesen die Grenzbewehrung erreichte, wenn er mit der Mischung mit Natursandanteil hergestellt wurde. Weiterhin wurden entsprechend der Grundformen Versuchsreihen gebildet. So wurden z.B. in Versuchsreihe C alle Probekörper mit der Grundform C hergestellt.

Vom generellen Ablauf her wurde beim Prüfprogramm nach Versuchsreihen vorgegangen. Das hatte den Vorteil, dass so die Schalungen nur dreimal und der Versuchstand aufgrund der gleichen Längenabmessungen von Grundform A und B bzw. von Grundform C und D nur

einmal verändert werden mussten. Weiterhin konnte Schalungsmaterial dadurch eingespart werden, dass von den breiten Körpern der Versuchsreihe D über die Reihen C und A zur schmalsten Reihe B übergegangen wurde.

Die genauen Prüftermine der einzelnen Probekörper entsprechen den Terminen der Festbeton-Nebenversuche, siehe Anhang C.3. Die zeitliche Übereinstimmung der Prüftermine von Probekörper und seinen Nebenversuchen musste wegen der möglichen zeitlichen Veränderung der Materialeigenschaften des Betons gefordert werden.

Nach der Herstellung des Probekörpers, siehe 5.1, musste der Probekörper nach ca. 2 Wochen in den Versuchsstand, siehe 5.2, eingebaut werden, in dem die Messcomputer mit den elektronischen Messeinrichtungen verbunden wurden. 28 Tage nach der Herstellung wurde der eigentliche Versuch mit elektronischen und manuellen Messungen durchgeführt, siehe 5.3. Nachdem der Versuch beendet war, erfolgte die fachgerechte Entsorgung.

## **5.1 Herstellung der Probekörper**

Die Schalung der Probekörper bestand aus 21 mm starken Magnoplan Schaltafeln und wurde vor der Betonage mit einem Trennmittel behandelt. Die Längsbewehrung lag bei der Betonage unten, um einen guten Verbund zu erreichen. Das bedeutete, dass der Körper zur Prüfung in seiner endgültigen Lage umgedreht werden musste. Dazu wurden bei den ersten Versuchsreihen seitlich Gewindehülsen einbetoniert, die ein leichteres Wenden und Heben ermöglichten. Später wurde diese Vorrichtung als Drahhaken aus einem zusätzlichen Bewehrungsstab an der im Betonierzustand oberen Seite ausgeführt, was sich als praktischer für die Laboranten erwies.

Die Betonage erfolgte mit einem liegendem Prüfkörper, von innen nach außen mit der zu prüfenden Betonmischung. Da der größte zur Verfügung stehende Labormischer (ein Zwangsmischer) nur ein Fassungsvermögen von ca. 250 l besaß, mussten mehrere Chargen der Betonmischung angefertigt werden.

Um die anfälligen Messeinrichtungen im Inneren des Probekörpers nicht zu gefährden, wurde jeweils die erste Charge, die in den Stoßbereich eingebaut wurde, mit kleinen (ca. 1 l) Schaufeln von Hand eingebracht. Die weitere Betonage erfolgte mit dem Betonkübel, Bild 26. Von den Chargen, die im Stoßbereich platziert wurden, stammten auch die Würfel und Zylinder der dazugehörigen Nebenversuche.



**Bild 26 Betonage im Labor mit dem Betonkübel**

Nach der Betonage wurde jeweils die Oberfläche abgezogen, geglättet und anschließend für ca. fünf Tage abgedeckt, um ein Austrocknen zu vermeiden.

Nach fünf Tagen wurde der Körper ausgeschalt und umgedreht. In dieser Position erfolgte auch der Einbau in den Prüfstand. Das normale Laborklima, in dem der Probekörper bis zu seiner Prüfung lagerte, hatte eine Lufttemperatur von im Mittel ca. 20°C bei einer Luftfeuchte von ca. 60 %.

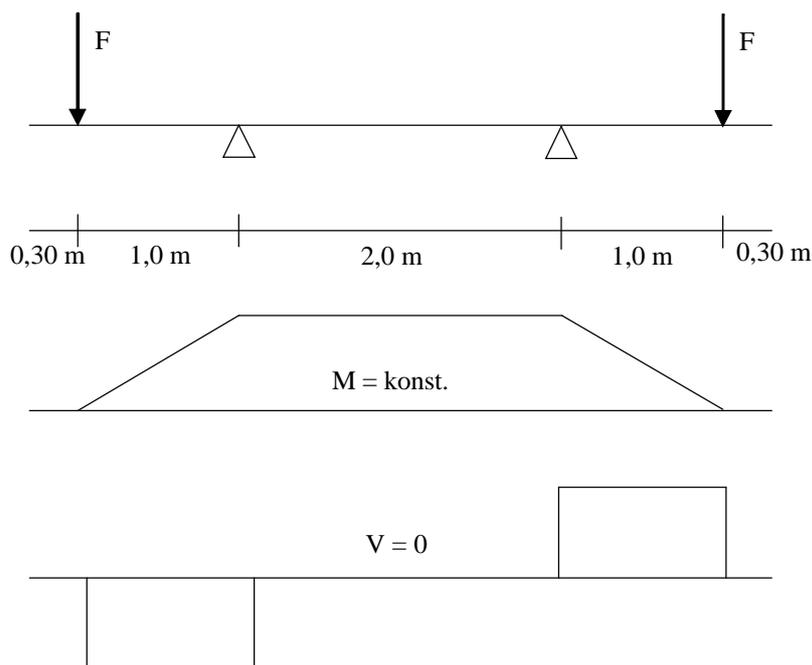
## 5.2 Versuchsaufbau

Die Versuchsaufbauten für die Prüfung der einzelnen Probekörper waren im Prinzip immer gleich. Der Probekörper lagerte auf zwei Stahlrollen mit Lasteinleitungsplatte ober- und unterhalb der Rolle, wie in Bild 25 dargestellt. Um den Probekörper auch von unten zugänglich zu machen, wurde das System auf zwei Betonblöcke gestellt. Im Abstand von  $\frac{1}{2}$ -mal der Stützweite des Probekörpers befanden sich links und rechts der Auflager Hydraulik-Pressen zur Einleitung einer Einzellast. Die Kraft der einzelnen Presse wurde über ein aufgemörteltes I-Profil in den Körper eingeleitet. Zwischen Profil und Presse war eine Kraftmessdose zur Kontrolle der übertragenen Kraft eingebaut.

Das statische System des Aufbaus lässt sich, wie oben bereits erwähnt, als Einfeldträger mit zwei Kragarmen oder als umgedrehter Einfeldträger mit zwei Lasten in den Drittelpunkten beschreiben. Die Kragarme sind von zwei Einzelkräften (Pressen) so belastet, dass sich zwischen den Auflagern im Träger ein konstantes Moment ohne Querkraft ausbildet, siehe Bild 27. Die Biegezugzone und damit der Übergreifungsstoß lagen oben, was den Vorteil hatte, dass die Rissaufnahme wesentlich vereinfacht wurde.

Die Einrichtung des Versuchsstandes, zur Erzeugung eines konstanten Moments, stimmt mit Betzle [1] überein. Ein konstantes Moment wirkt auf einen Übergreifungsstoß ungünstiger als ein veränderliches Moment, siehe Eligehausen [24]. Dadurch ist die Forderung nach einem maßgebenden Prüfzenario auch aus Sicht der Schnittgrößenverteilung erfüllt.

Die in Bild 27 gezeigten Abmessungen gelten nur für die Grundformen C und D. Da die Grundformen A und B 1½-mal länger waren, vergrößerte sich auch der Versuchsaufbau, wie in Anhang E.1 und Anhang E.4 zu vergleichen ist.



**Bild 27** Statisches Modell am Beispiel der Grundformen C und D

### 5.3 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde lastgesteuert und statisch (d.h. nicht dynamisch) durchgeführt. Andere Steuerungsarten wurden zwar in Betracht gezogen, jedoch nicht weiter verfolgt, siehe 5.3.1. Lastgesteuert bedeutete hier, dass die Pressenkraft die führende Versuchsgröße war, mit der auch das einwirkende Biegemoment  $M$  gesteuert wurde. Der Probekörper sollte für die Rissaufnahme unter dem Gebrauchslastniveau  $M_{zul}$ , siehe 5.3.2, untersucht werden. Auch das Versagen und die Tragfähigkeit des Körpers war von Interesse, weshalb auch das Tragfähigkeitsniveau betrachtet werden sollte, siehe 5.3.2. Unter  $M_{zul}$  und zwischen  $M_{zul}$  und dem Tragfähigkeitsniveau wurden zur Kontrolle weitere Lastniveaus angesteuert. Abschließend wurde der Probekörper zu Bruch gefahren.

Auf den Lastniveaus maß man, wie in 4.5.1 und 4.5.3 beschrieben, Risse und Betondehnung. Kontinuierlich und automatisch liefen die übrigen Messungen von Durchbiegung, siehe 4.5.2, Stahldehnung, Abplatzweg und Schlupfweg ab, siehe 4.5.4.

### 5.3.1 Versuchssteuerung (ruhende vs. dynamische Lasten)

Über die Versuchssteuerung legt man fest, ob eine Prüfung statisch (d.h. mit ruhender Belastung) oder dynamisch durchgeführt wird und was die Steuergröße ist. Für die Entscheidung ob die Versuche dynamisch oder statisch durchgeführt werden sollten, wurden folgende Kriterien abgewogen. Die Rissbreiten sind im hohen Maße vom Verbundkriechen abhängig. Verbundkriechen setzt entweder bei lang anhaltenden Belastungen oder in Folge dynamischer Einwirkungen ein. Aus diesem Grund dürfen nach Eligehausen [24] die wirklich im Bauteil anzutreffenden Rissbreiten und dessen Tragfähigkeit nicht durch die unter ruhender Belastung auftretenden Rissbreiten im Probekörper abgeschätzt werden. Die realistischen Risse wird man nur in dynamischen Versuchen messen können. Allerdings sind dynamische Tests wesentlich aufwendiger und damit teurer als Versuche mit ruhender Belastung, wie sie z.B. Betzle [1] durchführte. Als Konsequenz entschied man sich dafür, statische Versuche durchzuführen und den Effekt des Verbundkriechens für die Bemessung rechnerisch zu berücksichtigen. Die Abschätzung der Höhe des Verbundkriechens erfolgte mittels Kriechversuche von Zilch und Roos [64].

Beim Vorgängerprojekt von Betzle et al. [1] von dem viel übernommen wurde, versuchte man die Prüfung weggesteuert durchzuführen. Damit sollte erreicht werden, dass der Verbundbruch im Stoß nicht schlagartig abläuft. Allerdings konnte hierfür keine brauchbare Steuergröße gefunden werden und so wurden die Versuche lastgesteuert durchgeführt.

Dies war auch für diese Versuche vertretbar, da dort weniger der Bruchmechanismus als vielmehr die Rissbildung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit im Vordergrund stand.

### 5.3.2 Laststufen und Definition von $M_{zul}$

Die Probekörper wurden mit einem reinen Biegemoment kurzzeitig (ca. sechs Stunden) auf sechs verschiedenen Laststufen belastet. Von besonderer Bedeutung waren hierbei zwei Hauptlaststufen: das *Tragfähigkeitsniveau* und das *Gebrauchslastniveau*. Neben diesen Hauptlaststufen wurden zur Kontrolle und um die Entwicklung des Probekörpers zu verfolgen noch Zwischenlaststufen angefahren, wie in Tabelle 31 angegeben.

Prüf- reihe	Kenngröße	Laststufe					
		0,33 $M_{zul}$	0,66 $M_{zul}$	$M_{zul}$	1,25 $M_{zul}$	1,5 $M_{zul}$	1,75 $M_{zul}$
A	Pressenkraft [kN]	51,4	102,9	155,9	194,9	233,9	272,8
	Einwirkendes Moment $M$ in [kNm]	77,2	154,3	233,9	292,3	350,8	409,2
B	Pressenkraft [kN]	22,9	45,9	69,5	86,9	104,3	121,6
	Einwirkendes Moment $M$ in [kNm]	34,4	68,8	104,3	130,3	156,4	182,4
C	Pressenkraft [kN]	20,3	40,5	61,4	76,8	92,1	107,5
	Einwirkendes Moment $M$ in [kNm]	20,3	40,5	61,4	76,8	92,1	107,5
D	Pressenkraft [kN]	27,8	55,6	84,2	105,3	126,3	147,4
	Einwirkendes Moment $M$ in [kNm]	27,8	55,6	84,2	105,3	126,3	147,4

**Tabelle 31 Laststufen der Prüfreihen A-D**

### Tragfähigkeitsniveau

Die Laststufe für das Tragfähigkeitsniveau der Geometrien A bis D, die durch das jeweilige rechnerisch aufnehmbare Moment  $M_{R,cal}$  charakterisiert wird, wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit aus den Referenzuntersuchungen von Betzle et al. [1] übernommen und unter folgenden Bedingungen für einen einfach bewehrten Querschnitt entsprechend der Geometrie der Probekörper nachgerechnet:

- Betondeckung zur Berechnung der statischen Nutzhöhe:  $c_{min} = 1 d_s$
- Rechnerische Betondruckfestigkeit:  $f_c = 25 \text{ N/mm}^2$
- Rechnerischer E-Modul:  $E_c = 28800 \text{ N/mm}^2$
- Rechnerische Fließgrenze:  $f_y = 500 \text{ N/mm}^2$

Das aufnehmbare Moment konnte für die Geometrien A und B gut nachgewiesen werden. Für die Geometrien C und D ergaben sich jedoch ca. 20% höhere aufnehmbare Momente als nach Betzle [1], was für die Versuchsauswertung insbesondere bezüglich der Tragfähigkeit berücksichtigt wurde. Es sei darauf hingewiesen, dass das im Rahmen dieser Arbeit definierte Tragfähigkeitsniveau nicht mit dem Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1055-100 [17] identisch ist, da letzteres Sicherheitsbeiwerte berücksichtigt.

### Gebrauchslastniveau

Für die Rissauswertung im Rahmen der Versuche musste festgelegt werden, bei welcher Einwirkung die Rissbreiten aufgenommen und nachgerechnet werden sollten. Für dieses fiktive Gebrauchslastniveau sollte ein ausreichend großer Sicherheitsabstand zum rechnerischen Tragfähigkeitsniveau eingehalten werden, um die untersuchende Person bei der nahe am Probekörper stattfindenden Rissaufnahme nicht zu gefährden.

Im Rahmen der Referenzversuche von Betzle [1] wurde ein solches Gebrauchslastniveau bei  $M_{zul} = 1/1,75 M_{R,cal}$  definiert, siehe Gleichung (5.1). Für die Ergebnisauswertung, siehe Kapitel 6, sind bei der Nachberechnung der Rissbreite, bzw. bei der Kalibrierung der entsprechenden Formeln die Stahlspannungen infolge  $M_{zul}$  berücksichtigt.

$$M_{R,cal} = 1,75 \cdot M_{zul} \quad (5.1)$$

Es sei darauf hingewiesen, dass das im Rahmen dieser Arbeit definierte Gebrauchslastniveau nicht mit dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach DIN 1055-100 [17] identisch ist, sondern frei gewählt.

### Überlegung zur Vereinbarkeit mit neuer Normenlage (DIN 1055-100)

Die Versuche sollten Datenmaterial zur Verfügung stellen für:

- Rissbreitenbegrenzung im Stahlrecyclingbeton im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und für
- Bewehrungsregeln für Übergreifungsstöße im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und im Grenzzustand der Tragfähigkeit.

Daher mussten diese Grenzzustände nach DIN 1055-100 [17] entweder im Laborversuch abgebildet oder später in der Bemessung berücksichtigt werden.

Um den Grenzzustand der Tragfähigkeit versuchstechnisch umsetzen zu können, ist entweder

- eine gezielte Schwächung der Widerstandsseite (z.B. Verringerung des Stahlquerschnitts und der Betondruckfestigkeit in Höhe des Widerstandssicherheitsbeiwerts  $\gamma_s$  bzw.  $\gamma_c$ ) bei gleichzeitiger Erhöhung der Versuchslast um den Einwirkungssicherheitsbeiwert  $\gamma_g$  bzw.  $\gamma_q$ , oder
- eine einseitige Erhöhung der Versuchslast um Widerstands- und Einwirkungssicherheitsbeiwert.

Entscheidet man sich für die zweite Option muss man sich für eine Kombination von Sicherheitsbeiwerten entscheiden und dies bei der Auswertung berücksichtigen. Geht man von Stahlversagen bei Einwirkung von ausschließlich veränderlichen Lasten aus, so erhält man für den Lasterhöhungsfaktor im Versuch  $\gamma_v$  die Gleichung (5.2).

$$\gamma_v = \gamma_s \cdot \gamma_q = 1,15 \cdot 1,5 \approx 1,75 \quad (5.2)$$

Der so errechnete Abstand von 1,75 zwischen einem Lastniveau ohne Sicherheitsbeiwerte (interpretierbar als Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit mit  $\gamma$ -Werten = 1,0) und einem Lastniveau mit Sicherheitsbeiwerten (interpretierbar als Grenzzustand der Tragfähigkeit) ist somit sowohl nach alter Norm DIN 1045 [12] bzw. [11], auf die sich die Referenzversuche [1] bezogen, als auch nach neuer Norm DIN 1045-1 [13] möglich. Beim Bezug sowohl auf alte als auch auf neue Norm müssen bei der Auswertung für die Tragfähigkeit die unterschiedlichen Sicherheiten für schlagartiges Versagen (Beton) und duktiles Versagen (Stahl) berücksichtigt werden. Bei der Betrachtung der Gebrauchstauglichkeit sind die auf einem definierten Lastniveau gemessenen Spannungen und Dehnungen in Bezug auf die dort gemessenen Rissbreiten auszuwerten.

## 6 Wiedergabe und Auslegung der Ergebnisse

Ziel dieses Kapitels ist, die Ergebnisse der Versuche an den vier Referenzkörpern aus Ressourcenbeton [1] und den sechzehn Probekörpern aus Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung, vgl. Zilch und Cyllok [66], darzustellen und zu interpretieren. Die Ergebnisse liegen als kontinuierliche Messungen sowie als diskrete Messungen auf den Hauptlaststufen Gebrauchslast- und Tragfähigkeitsniveau und auf den Nebenlaststufen vor, siehe Kapitel 5.

Der Fokus liegt auf den Auswertungen der Ergebnisse auf den Hauptlaststufen Gebrauchslastniveau, siehe 6.1, und Tragfähigkeitsniveau, siehe 6.2. Die Auswertungen umfassen Nachrechnungen unter Zuhilfenahme der Ergebnisse der Nebenversuche, siehe Kapitel 3 und Interpretationen auf Grundlage von Sekundärliteratur. Die Schlussfolgerungen aus diesen Auswertungen werden in 6.3 zusammengefasst.

Die kontinuierlichen Messdaten und die Messdaten der Nebenlaststufen unterstützen die Auswertung und Interpretation der Messdaten der beiden Hauptlaststufen z.B. bei unerwarteten Veränderungen der untersuchten Prüfkörper zwischen den Hauptlaststufen.

### 6.1 Auswertung der Ergebnisse auf Gebrauchslastniveau

Die für diesen Abschnitt wichtigen Ergebnisse wurden auf Gebrauchslastniveau ermittelt. Die Einwirkung, die zu diesen Ergebnissen führte, war somit jeweils das Biegemoment  $M_{zul}$ , siehe Tabelle 31.

#### 6.1.1 Spannungen und Dehnungen im einfach bewehrten Bereich

Das Kernthema dieser Arbeit ist, eine Aussage über die Rissbreiten in Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung zu machen. Für eine Berechnung von Rissbreiten ist es nötig, die Spannungen im Beton und im Stahl zu kennen. Diese lassen sich über die Dehnungen im Stahl und Beton berechnen.

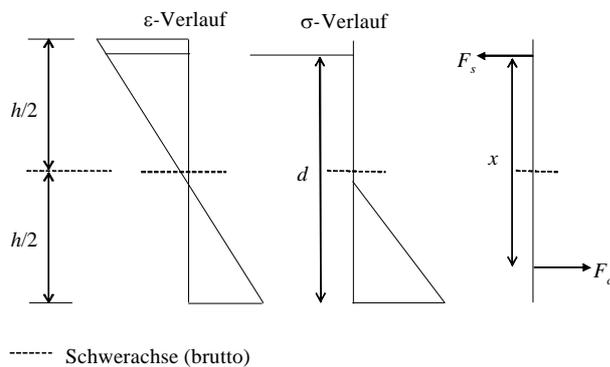
Die Dehnungen im Stahl und Beton können per Iteration ermittelt werden. Für die Iteration werden folgende Annahmen getroffen.

- 1) Ein linearer Ansatz für den Dehnungsverlauf ist gültig (Forderung nach dem Ebenbleiben der Querschnitte aus der Balkentheorie).
- 2) Ein linearer Ansatz für den Spannungsverlauf ist gültig (Aufgrund der auf dem untersuchten Lastniveau herrschenden geringen Dehnungen ist die Arbeitslinie für Stahl und Beton linear).

Darüber hinaus wird auf den Ansatz der Mitwirkung des Betons auf Zug (Tension Stiffening) für die Iteration verzichtet. Das entspricht einer Modellierung der Stahlspannungen im Riss. Die Betonspannungen bleiben durch diese Näherung nahezu unverändert.

Die konstanten Eingangswerte für die Iteration sind das einwirkende Moment  $M_E$ , die Elastizitätsmoduln  $E_s$  und  $E_{cm}$ , die Stahlfläche  $A_s$ , sowie die Breite  $b$  des Querschnitts und die statische Nutzhöhe  $d$ .

Für den ersten Schritt der Iteration werden die Stahldehnungen  $\varepsilon_s$  und die Betonranddehnung  $\varepsilon_{c,Rand}$  sinnvoll abgeschätzt, z.B. mit jeweils 0,1%.



**Bild 28 Dehnungen, Spannungen und Kräftegleichgewicht**

Für die Druckzonenhöhe  $x$  lässt sich mit Hilfe des Strahlensatzes, siehe Bild 28, Gleichung (6.1) formulieren.

$$x = \frac{-\varepsilon_{c,Rand}}{\varepsilon_s - \varepsilon_{c,Rand}} d \quad (6.1)$$

Damit ergibt sich für die resultierende Betondruckkraft  $F_c$  die Gleichung (6.2).

$$F_c = 0,5 \cdot x \cdot b \cdot \varepsilon_{c,Rand} \cdot E_{cm} \quad (6.2)$$

Aus der Lage von  $F_c$  ergibt sich für den inneren Hebelarm  $z$  Gleichung (6.3).

$$z = d - \frac{1}{3} x \quad (6.3)$$

Aus der gegebenen Einwirkung  $M_E$  geteilt durch  $z$  lässt sich die Stahlkraft  $F_s$  bestimmen. Da keine Normalkraft wirkt, gilt Gleichung (6.4).

$$F_s + F_c = 0 \quad (6.4)$$

Aus dieser Bedingung ergeben sich die neue Betonranddehnung  $\varepsilon_{c,Rand}$  und die neue Stahldehnung  $\varepsilon_s$  zu:

$$\varepsilon_{c,Rand} = \frac{-F_s}{0,5 \cdot x \cdot b \cdot E_{cm}} \quad (6.5)$$

$$\varepsilon_s = \frac{F_s}{A_s \cdot E_{cm}} \quad (6.6)$$

Über das Materialgesetz lassen sich aus den Dehnungen die Betonrandspannung  $\sigma_{c,Rand}$  und die Stahlspannung  $\sigma_s$  berechnen.

Für den nächsten Iterationsschritt werden die neuen Dehnungen  $\varepsilon_{c,Rand}$  und  $\varepsilon_s$  als Eingangsparameter verwendet. Die Iteration wird solange fortgesetzt, bis die Eingangsdehnungen den neu berechneten Dehnungen ausreichend gut entsprechen.

Die Berechnungen wurden mit den in Nebenversuchen gemessenen Mittelwerten der Beton E-Moduln (Rechenwerte (NV)) und den nach Roos [42] geschätzten Mittelwerten der Beton E-Moduln (Rechenwerte (Näh)) durchgeführt und in den Tabellen in Anhang F.1 zusammengestellt.

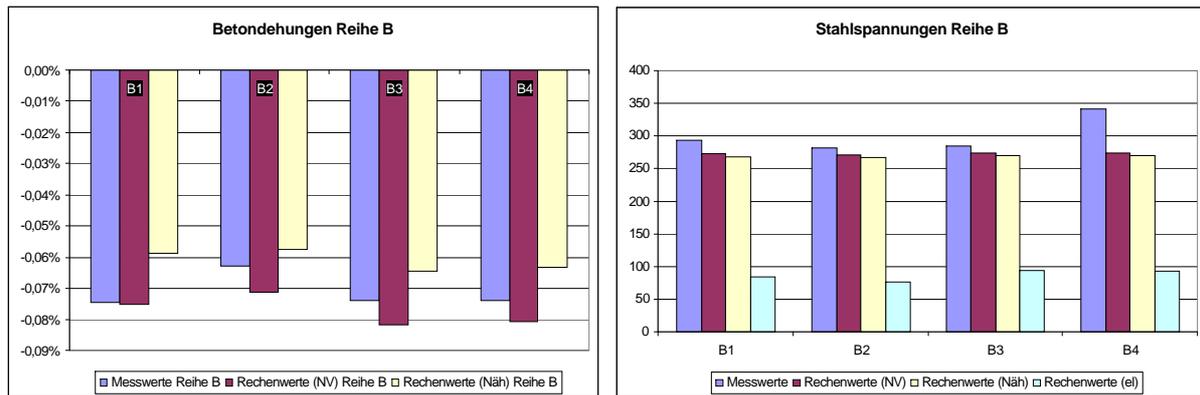
Zur Verifizierung der Modellierung werden die berechneten Spannungen und Dehnungen mit den gemessenen verglichen. Eine Visualisierung dieser Vergleiche ist Anhang F.2 zu entnehmen. Die gemessenen Spannungen und Dehnungen sind ebenfalls in den Tabellen in Anhang F.1 aufgeführt.

Es werden im Grunde keine Betonspannungen gemessen, sondern Betondehnungen. Die Genauigkeit der gemessenen Betondehnungen und damit der Spannungen ist durch das verwendete Messsystem (Marken und Setz-Dehnungs-Messer, siehe 4.5.3) eingeschränkt.

Stahlspannungen werden ebenfalls nicht direkt, sondern als Dehnungen über Dehnmessstreifen (DMS) gemessen. Diese Stahldehnungen werden dann über den E-Modul des Stahls in Spannungen umgerechnet. Hierbei ergibt sich folgende Problematik: Es kann nicht festgestellt werden, ob sich der DMS in einem Riss befindet oder in einem Bereich, in dem der Beton mitwirkt. Liegt der DMS in einem ungerissenen Bereich, in dem der Beton voll mitträgt, so ist die Stahldehnung wesentlich geringer, als wenn der DMS in einem Riss liegt. Modelliert man zusätzlich einen ungerissenen Querschnitt (elastische Modellierung), so erhält man eine Bandbreite, in der der Messwert liegen sollte. Damit ist eine Verifizierung der Modellierung allerdings nur näherungsweise möglich. Darüber hinaus gilt sowohl für Betondehnungen wie

auch für Stahldehnungen und Stahlspannungen, dass die Berechnung mit Mittelwerten durchgeführt wurde. Das heißt, dass allein durch auftretende Materialschwankungen Unterschiede zwischen Messwert und Rechenwert auftreten können.

Mit diesen Einschränkungen der Genauigkeit stimmen die berechneten mit den gemessenen Dehnungen und Spannungen gut bis sehr gut überein. Beispielhaft ist der Vergleich für die Serie B aus Anhang F.2 in Bild 29 dargestellt.



**Bild 29 Vergleich der Dehnungen und Spannungen im einfach bewehrten Bereich**

### 6.1.2 Rissbild im einfach bewehrten Bereich

Die aufgenommenen Rissbilder der einzelnen Prüfkörper sind Anhang F.6 zu entnehmen. Im einfach bewehrten Bereich (außerhalb des Stoßes) entstanden in erster Linie Querrisse aus Biegung. Zu beobachten war, dass die Rissabstände im einfach bewehrten Bereich untereinander nahezu gleich waren.

Bei den Körpern A4 und B3 traten unerwartet Längsrisse auf. Grund für diese war in beiden Fällen ein nahe der Oberfläche einbetoniertes Kabel ( $d = 2 \text{ mm}$ ) zu den Dehnmessstreifen. Als diese Art von Riss das erste Mal aufgetreten war, war bereits der zweite Körper mit diesem Manko produziert worden. Für die weitere Produktion wurde darauf geachtet, dass dieses Kabel nicht mehr oberflächennah geführt wurde. Die Auswirkungen des oberflächennah einbetonierten Kabels beschränken sich auf das Rissbild: Zwei Querrisse die ohne den Längsrisss zusammengelaufen wären, liefen infolge des Längsrissses in etwa senkrecht in den Längsrisss und waren dadurch ggf. etwas versetzt.

Risse aus Zwang sind nicht aufgetreten, da durch die Wahl und die Umsetzung eines statisch bestimmten Systems für den Versuchsaufbaus kein Zwang entstehen konnte.

Schwindrisse konnten vermieden werden, da die Probekörper entsprechend nachbehandelt wurden, siehe 5.1.

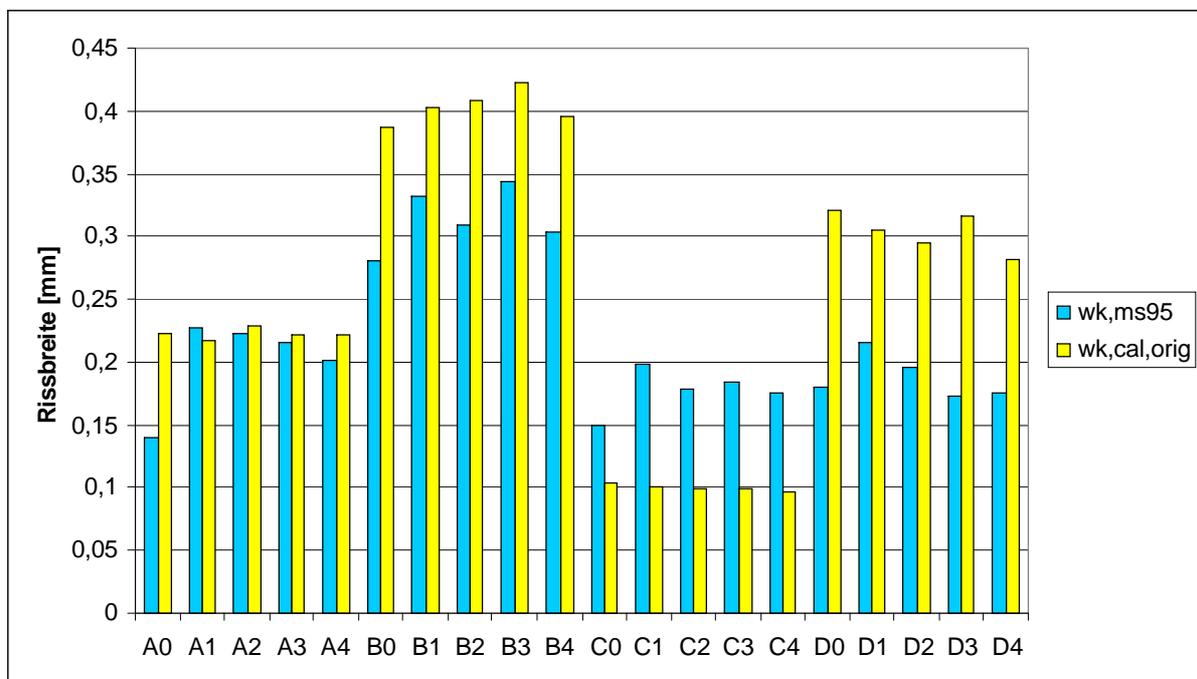
### 6.1.3 Statistische Betrachtung der Rissbreiten im einfach bewehrten Bereich

Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurden im einfach bewehrten Bereich jeweils zwischen 31 und 152 Rissbreiten auf dem Gebrauchslastniveau mit einer Risslupe aufgenommen.

Es wurden für jede dieser Proben jeweils die Parameter  $\mu$  (Mittelwert) und  $\sigma$  (Standardabweichung) berechnet. Für die weitere Auswertung wurde angenommen, dass die Verteilung der Rissbreiten mit einer Gauß-Verteilung abzubilden ist. Die Hypothese wurde mit dem Test nach Kolmogorov-Smirnov untersucht, der ergab, dass für alle Verteilungen außer C4, D3 und D4 die Hypothese nicht abgelehnt werden sollte, siehe Anhang F.7. Als Näherung wurde für C4, D3 und D4 die Hypothese ebenfalls beibehalten.

Mit diesen Randbedingungen wurde für jeden Versuch das 95%-Quantil der Rissbreite bestimmt. Eine Übersicht über diese charakteristischen Werte erhält man in Anhang F.7 und Bild 30, dort mit „wk,ms95“ gekennzeichnet.

Ebenfalls in Bild 30 dargestellt sind die nach den unveränderten Formeln aus DIN 1045-1 berechneten Rissbreiten („wk,cal,orig“), siehe 3.1. Eine grundsätzliche Vergleichbarkeit mit den gemessenen Werten „wk,ms95“ besteht, da die berechneten Rissbreiten ebenfalls das 95%-Quantil repräsentieren [34].



**Bild 30 Vergleich zwischen beobachteten und mit den Formeln (6.7) – (6.9) nach DIN 1045-1 berechneten Rissbreiten**

### 6.1.4 Berechnung und Vergleich der Rissbreiten im einfach bewehrten Bereich

#### Vergleichsrechnung und Vereinfachungen der Formel aus DIN 1045-1

DIN 1045-1 [13] schlägt für die Berechnung der Rissbreiten die Formeln (6.7), (6.8) und (6.9) vor. Die Formeln (6.8) und (6.9) bestehen jeweils aus einer Gleichung (linke Hälfte) und einer Ungleichung (rechte Hälfte). Die linke Hälfte bildet das abgeschlossene Rissbild ab und wird durch die Abbildung des Einzelrisses in der rechten Hälfte begrenzt.

$$w_k = s_{r,\max} \cdot (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (6.7)$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - 0,4 \frac{f_{ct,\text{eff}}}{\text{eff}\rho} \cdot (1 + \alpha_e \cdot \text{eff}\rho)}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (6.8)$$

$$s_{r,\max} = \frac{d_s}{3,6 \text{eff}\rho} \leq \frac{\sigma_s \cdot d_s}{3,6 f_{ct,\text{eff}}} \quad (6.9)$$

Dabei ist

$w_k$  der Rechenwert der Rissbreite (95%-Quantil)

$s_{r,\max}$  der maximale Rissabstand

$\varepsilon_{sm}$  die mittlere Dehnung der Bewehrung unter der maßgebenden Einwirkungskombination unter Berücksichtigung der Mitwirkung des Betons auf Zug zwischen den Rissen

$\varepsilon_{cm}$  die mittlere Dehnung des Betons zwischen den Rissen

$\alpha_e$  das Verhältnis des E-Moduls des Stahls zum E-Modul des Betons

$$\alpha_e = E_s / E_{cm}$$

$\text{eff}\rho$  der effektive Bewehrungsgrad mit  $\text{eff}\rho = A_s / A_{ct,\text{eff}}$

$A_s$  die Querschnittsfläche der Zugbewehrung

$A_{ct,\text{eff}}$  die wirksame Betonzugzone im Zustand II

$f_{ct,eff}$  die wirksame Betonzugfestigkeit

$\sigma_s$  die Betonstahlspannung im Riss

$d_s$  der Stabdurchmesser des Betonstahls

Wertet man (6.7) bis (6.9) mit den Eingangswerten aus den Versuchen aus, ergeben sich die Werte „ $w_{k,cal,orig}$ “, die in Bild 30 dargestellt werden. Diese Rissbreiten nach (6.7) bis (6.9) dürfen jedoch nur eingeschränkt mit den beobachteten Rissbreiten verglichen werden.

Dies hat folgenden Grund: Die Grundlage für die Formeln (6.7) bis (6.9) ist, wie bei König [34] beschrieben, ein mechanisches Modell. Dieses Modell gilt grundsätzlich auch für Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung. Allerdings sind für die Festlegung von Parametern in (6.7) bis (6.9) Vereinfachungen getroffen worden, die für Recyclingbeton nicht gelten.

Die *erste* Vereinfachung wird dadurch getroffen, dass in der Formel nicht zwischen einerseits kurzzeitigen Belastungen und andererseits dauerhaften oder wiederholten Belastungen unterschieden wird. Eine dauerhafte oder wiederholte Belastung führt zur Verminderung des Verbundes (Verbundkriechen) und damit zu größeren Rissbreiten. Zudem ist diese Belastung in der Wirklichkeit häufiger anzutreffen als die kurzzeitige. Aus diesen Gründen wird die dauerhafte oder wiederholte Belastung als obere Grenze für die Rissformel nach DIN 1045-1 verwendet. Die beobachteten Risse sind jedoch Resultat einer kurzzeitigen Belastung, die nicht zu Verbundkriechen führt. Demzufolge sind die gemessenen Rissbreiten zu gering für einen Vergleich mit den nach (6.7) bis (6.9) berechneten Rissbreiten.

Die *zweite* Vereinfachung bezieht sich auf die Betondeckung. Obwohl, wie Mainz [36] beschreibt, sich die Betondeckung auf den Verbund auswirkt, geht sie nicht in die Formeln (6.7) bis (6.9) ein. Als Vereinfachung wird die nach DIN 1045-1 geforderte untere Grenze zur Sicherstellung des Verbundes von  $1,0 d_s$  verwendet. Die Reduzierung des Verbundes bei Unterschreitung der Mindestdeckung bzw. die Verbesserung des Verbundes bei Überschreitung werden mit der Formel somit nicht abgedeckt. Die Rechenwerte für Versuche mit den Querschnitten C und D, siehe Tabelle 30, werden somit verzerrt. Die Rechenwerte für die Versuche mit den Querschnitten A und B bleiben von dieser Vereinfachung näherungsweise unberührt.

Als *dritte* Vereinfachung wird das Verhältnis zwischen mittlerer Verbundspannung  $\tau_{sm}$  und Zugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  konstant gehalten. Dieses kann nach [63] für Ressourcenbeton mit den

Randbedingungen dauerhafter oder wiederholter Belastungen und einer Betondeckung von  $1,0 d_s$  mit der Gleichung (6.10) beschrieben werden.

$$\frac{\tau_{sm}}{f_{ct,eff}} = 1,8 \quad (6.10)$$

Dabei ist

$\tau_{sm}$  die mittlere Verbundspannung.

Für Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung weicht dieses Verhältnis jedoch ab, wie Versuchen aus München [64] zeigen, siehe Tabelle 32.

	Guter Verbund, $c_v=d_s$	Mäßiger Verbund, $c_v=d_s$	Guter Verbund, $c_v=2d_s$	Mäßiger Verbund, $c_v=2d_s$
Ressourcenbeton	2,6	2,2	3,5	2,5
Recyclingbeton mit Natursand	2,9	2,3	3,8	2,4
Recyclingbeton mit Recyclingsand	2,1	1,9	2,7	2,1

**Tabelle 32** Verhältniszahlen zwischen mittlerer Verbundspannung  $\tau_{sm}$  und Zugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  (kurzzeitige Belastung)

Um mit den Formeln (6.7-6.9) die aufgetretenen Rissbreiten nachrechnen zu können, müssen die obigen Vereinfachungen wieder herausgenommen oder angepasst werden. Dazu ist es sinnvoll, sich den Aufbau der Formeln klar zu machen.

### Aufbau der Formel aus DIN 1045-1

Nach (6.7) wird die charakteristische Rissbreite aus dem Unterschied von mittlerer Stahldehnung und mittlerer Betondehnung ( $\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$ ) über den Rissabstand  $s_{r,max}$  berechnet.

Dehnungsunterschied und Rissabstand berechnen sich für die zwei Risszustände (Einzelrissbildung und abgeschlossenes Rissbild) unterschiedlich. Die Einzelrissbildung herrscht vor, solange die zwischen Beton und Bewehrung zu übertragende Kraft  $F_c$  kleiner oder gleich der Risszugkraft  $F_{cr}$  ist. Diese Unterscheidung muss jedoch nicht vom Anwender getroffen werden, sondern ist in die Formeln eingearbeitet. Die Formeln (6.8) und (6.9) bestehen jeweils aus einer Gleichung, die für die abgeschlossene Rissbildung den Rissabstand bzw. den Deh-

nungsunterschied beschreibt und einer Begrenzung in Form einer Ungleichung, die sich aus der Einzelrissbildung ableitet.

### Rissabstand bei Einzelrissbildung

Im Zustand der Einzelrissbildung ist der Rissabstand  $s_{r,max}$  die doppelte Eintragungslänge  $l_t$ .

$$s_{r,max} = 2l_t \quad (6.11)$$

Dabei ist

$l_t$  die Eintragungslänge.

Über diese Länge  $l_t$  wird eine Kraft  $F_c$  in den Beton eingeleitet:

$$F_c = \tau_{sm} l_t U_s \quad (6.12)$$

Dabei ist

$F_c$  eine zwischen Betonstahl und Beton übertragene Kraft. Diese kann bereits zu einem Erstriss führen.

$U_s$  der Stabumfang des Betonstahls.

Dies lässt sich, wie z.B. bei Zilch und Rogge [63] dargestellt, umformen in:

$$l_t = \frac{\sigma_s d_s}{4\tau_{sm}} \frac{1}{1 + \alpha_e \cdot \text{eff}\rho} \approx \frac{\sigma_s d_s}{4\tau_{sm}} \quad (6.13)$$

Der maximale Rissabstand für den Einzelriss ergibt sich mit (6.11) somit zu:

$$s_{r,max} = \frac{\sigma_s \cdot d_s}{2\tau_{sm}} \quad (6.14)$$

Der maximale Rissabstand für den Einzelriss ist auch die obere Grenze für die abgeschlossene Rissbildung, da der Abstand der Risse der Erstrissbildung (Primärrisse) durch die Bildung der Sekundärrisse (abgeschlossene Rissbildung) unterteilt wird und somit für die abgeschlossene Rissbildung nur noch kleinere Rissabstände entstehen können.

Der Kennwert für den Verbund zwischen Bewehrung und Beton ist die mittlere Verbundspannung  $\tau_{sm}$ . Dieser geht jedoch in (6.9) nicht direkt, sondern mittels (6.10) über die Zugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  ein.

### Rissabstand bei abgeschlossener Rissbildung

Der maximale Rissabstand bei abgeschlossener Rissbildung ist ebenfalls die doppelte Eintragungslänge  $l_t$  (6.11). Hierbei wird zwischen zwei Rissen wieder nahezu die Risszugkraft  $F_{cr}$  erreicht. Für den Zustand der abgeschlossenen Rissbildung kann nach König [34] die Risszugkraft als das Produkt aus mitwirkender Betonzugzone  $A_{ct,eff}$  und effektiver Zugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  definiert werden, siehe (6.15).

$$F_{cr} = f_{ct,eff} \cdot A_{ct,eff} \quad (6.15)$$

Dabei ist

$F_{cr}$  die Risszugkraft.

Setzt man für  $F_c$  die Risszugkraft  $F_{cr}$  ein, so lässt sich mit (6.11), (6.12) und (6.15) die Gleichung (6.16) formulieren. Für Ressourcenbeton erhält man mit (6.10) wieder die Gleichung (6.9).

$$s_{r,max} = \frac{f_{ct,eff} \cdot A_{ct,eff} \cdot d_s}{2\tau_{sm} \cdot A_s} = \frac{f_{ct,eff} \cdot d_s}{2\tau_{sm} \cdot \text{eff}\rho} \quad (6.16)$$

### Mittlere Dehnung bei abgeschlossener Rissbildung

In den Dehnungsunterschied geht das Mitwirken des Betons auf Zug ein. Wie in [63] beschrieben, kann die Mitwirkung des Betons auf Zug durch den Völligkeitsbeiwert  $\beta_t$  beschrieben werden, siehe (6.17) und (6.18).

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - \beta_t \frac{F_{cr}}{A_s \cdot E_s} \quad (6.17)$$

$$\varepsilon_{cm} = \beta_t \frac{F_{cr}}{A_{ct,eff} \cdot E_{cm}} \quad (6.18)$$

Dabei ist

$\beta_t$  der Völligkeitsbeiwert.

Aus (6.17) und (6.18) lässt sich mit (6.15) die Gleichung (6.19) herleiten. Setzt man wie in DIN 1045-1 den Völligkeitsbeiwert  $\beta_t$  zu 0,4 erhält man die Gleichung aus (6.8). Dieses  $\beta_t$  enthält bereits die Auswirkungen aus Verbundkriechen infolge einer möglichen dauerhaften oder wiederholten Belastung.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - \beta_t \frac{f_{ct,eff}}{eff\rho} \cdot (1 + \alpha_e \cdot eff\rho)}{E_s} \quad (6.19)$$

### Mittlere Dehnung bei Einzelrissbildung

Der Dehnungsunterschied bei der Einzelrissbildung ist immer geringer als bei der abgeschlossenen Rissbildung. Der größte Einzelriss entsteht unter der Bedingung (6.20) das  $F_c$  gleich  $F_{cr}$  ist. Mit der Umformung (6.21) lässt sich aus (6.19) die untere Grenze (6.22) für den Dehnungsunterschied formulieren. Diese findet sich in (6.8) wieder. Dort ist wie bei der abgeschlossenen Rissbildung der Völligkeitsbeiwert  $\beta_t$  zu 0,4 gesetzt.

$$\text{Für } F_{cr} = F_c: \sigma_s = \frac{F_{cr}}{A_s \cdot E_s} \quad (6.20)$$

$$\frac{f_{ct,eff}}{eff\rho} = \frac{F_{cr}}{A_s} \quad (6.21)$$

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = (1 - \beta_t) \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (6.22)$$

### **Anpassung der Formel zur Rissberechnung**

Die Formeln (6.7) bis (6.9) sollen auf die Besonderheiten des Betons mit hohem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung angepasst werden. Versuche aus München von Roos [64] zeigen, dass bei einem Vergleich von Beton mit hohem Anteil von rezyklierter Gesteinskörnung mit Ressourcenbeton der Recyclingbeton bei gleicher Druckfestigkeit folgende Eigenschaften aufweist:

- Geringerer E-Modul
- Geringere Zugfestigkeit für niedrigere Betonrohddichten (z.B. Verwendung von Ziegelsplitt)
- Gleiche Zugfestigkeiten bei gleichen Betonrohddichten (z.B. Verwendung von Betonsplitt)
- Bezogen auf die Zugfestigkeit: verminderte mittlere Verbundspannung

Für den Recyclingbeton mit Recyclingsand erhöht sich zudem die Kriechzahl  $\varphi$ , also das Verhältnis von Kriechverformung zu elastischer Verformung. In den angesprochenen Versu-

chen von Roos [64] ergaben sich 1,5-fach bis 3-fach so hohe Kriechzahlen wie für Ressourcenbeton und Recyclingbeton mit Natursand.

Das bedeutet auf der anderen Seite, dass ein Großteil der Eigenschaften gerade für Recyclingbeton mit Natursand den Eigenschaften des Ressourcenbetons sehr ähnlich ist.

In den Versuchen von Roos [64] wurde ermittelt, dass der Verlauf der Verbundspannung-Schlupf-Beziehung ( $\tau$ - $s$ -Beziehung) für eine Betondeckung von  $d_s$  und guten Verbund für Ressourcenbeton und Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung sowohl mit Natursand als auch mit Recyclingsand sehr ähnlich ist.

Die  $\tau$ - $s$ -Beziehung allgemein beschreibt König [34] mit einer Exponentialfunktion (6.23).

$$\tau(s, x) = C \cdot s^\alpha(x) \quad (6.23)$$

Dabei ist

$C$  ein Parameter; für Ressourcenbeton, Rippenstahl, guten Verbund und einer Betondeckung  $c_v$  von 1  $d_s$  darf er zu  $0,31 f_{cm}$  gesetzt werden,

$\alpha$  ein Parameter, für Ressourcenbeton, Rippenstahl, guten Verbund und einer Betondeckung  $c_v$  von 1  $d_s$  darf er zu 0,3 gesetzt werden,

$\tau(s, x)$  die Verbundspannung an der Stelle  $x$  in Abhängigkeit vom Schlupf  $s$ ,

$s(x)$  der Schlupf an der Stelle  $x$ .

Die Parameter  $C$  und  $\alpha$  werden von König [34] zur Herleitung der Formeln (6.7) bis (6.9) benutzt. Im Rahmen der Herleitung wird mit den Parametern der weitere Parameter  $\lambda$  beschrieben. Da, wie oben erläutert, sich die Verläufe der  $\tau$ - $s$ -Beziehung für Ressourcen- und Recyclingbeton stark ähneln, werden für Recyclingbeton die gleichen Parameterwerte wie für Ressourcenbeton verwendet.

#### Der Völligkeitsbeiwert $\beta_t$

Mit Hilfe der Parameter  $C$ ,  $\alpha$  und  $\lambda$  bestimmt König [34] den Völligkeitsbeiwert  $\beta_t$  für kurzzeitige Belastungen näherungsweise zu 0,6. Da für den Recyclingbeton, wie oben beschrieben, diese Parameter näherungsweise ebenfalls gelten, wird vorgeschlagen,  $\beta_t$  für kurzzeitige Belastungen ebenfalls zu 0,6 zu setzen.

Für eine dauerhafte oder wiederholte Belastung muss zusätzlich das Verbundkriechen berücksichtigt werden. König [34] bestimmt unter Verwendung der Parameter  $C$  und  $\alpha$  mit Hilfe der Verbundkriechzahl  $\varphi_v$  den Einfluss des Verbundkriechens auf die  $\tau$ - $s$ -Beziehung und formuliert diesen als Multiplikator, vergleiche (6.23) und (6.24a).

$$\tau(s, x) = C \cdot s^\alpha(x) \cdot \frac{1}{(1 + \varphi_v)^\alpha} \quad (6.24a)$$

$$\beta_t = \beta_t(t=0) \cdot \frac{1}{(1 + \varphi_v)^\alpha} \quad (6.24b)$$

Dabei ist

$\varphi_v$  die Verbundkriechzahl,

$\beta_t(t=0)$  der Völligkeitsbeiwert für kurzzeitige Belastung.

Weiter schlägt König [34] vor, den Einfluss des Verbundkriechens auf den Völligkeitsbeiwert  $\beta_t$  durch den gleichen Multiplikator zu beschreiben, siehe (6.24b). Nimmt man für Ressourcenbeton  $\varphi_v$  zu 2,3 an, so errechnet sich eine Abminderung von  $\beta_t$  um 30%. Man erhält mit  $\beta_t(t=0)$  gleich 0,6 den oben bereits erwähnten Langzeitwert von 0,4 für  $\beta_t$ .

Für dauerhafte oder wiederholte Belastungen liegen für Recyclingbeton keine Verbundversuche vor, d.h., dass für den Recyclingbeton die Verbundkriechzahl  $\varphi_v$  unbekannt ist. Allerdings wurde in vorangegangenen Versuchen von Zilch und Roos [64] für Recyclingbeton mit Natursand eine ähnliche Kriechzahl wie für Ressourcenbeton ermittelt. Unter der Annahme, dass sich das Verbundkriechen wie das Betonkriechen verhält, wird deswegen für Recyclingbeton mit Natursand vorgeschlagen, für dauerhafte oder wiederholte Belastung den Völligkeitsbeiwert  $\beta_t$  ebenfalls um 30% auf 0,4 zu senken.

Für Recyclingbeton mit Recyclingsand liegen nach Zilch und Roos [64] um bis zu 200% höhere Kriechzahlen als für Ressourcenbeton vor. Nimmt man an, dass sich das Verbundkriechen im gleichen Maß erhöht, kann man als Abschätzung die Abminderung von  $\beta_t$  für Recyclingbeton mit Recyclingsand zu ca. 50% bestimmen. Während man für dieses Material das  $\beta_t(t=0)$  ebenfalls mit 0,6 angeben kann, sollte man als Abschätzung für dauerhafte oder wiederholte Belastung von einem Wert von 0,3 für  $\beta_t$  ausgehen. An dieser Stelle sei betont, dass zur Verifikation des Langzeitverhaltens entsprechende Versuche sinnvoll erscheinen.

### Die wirksame Betonzugzone $A_{ct,eff}$

Die wirksame Betonzugzone  $A_{ct,eff}$  wurde mittels einer Scheibenberechnung wiederum unter Ausnutzung der bekannten Parameter  $C$ ,  $\alpha$  und  $\lambda$  bestimmt. Verbundkriechen hat nach König [34] keinen relevanten Einfluss auf diese Fläche. Aus diesen Gründen wird sie für den Recyclingbeton nicht modifiziert.

### Das Verhältnis zwischen mittlerer Verbundspannung $\tau_{sm}$ und Zugfestigkeit $f_{ct,eff}$

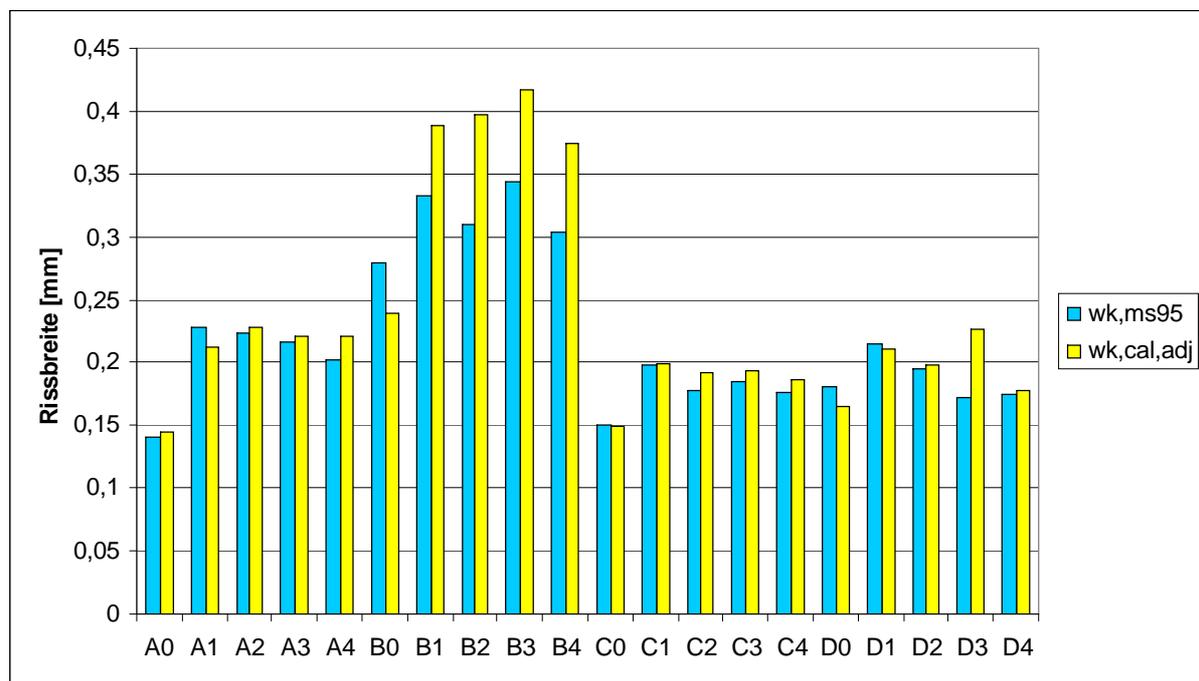
Für die Herleitung der Formeln (6.7) bis (6.9) werden die Parameter  $C$ ,  $\alpha$  und  $\lambda$  nur für die Völligkeit benutzt und haben keine Aussagekraft über das Verhältnis zwischen mittlerer Verbundspannung  $\tau_{sm}$  und Zugfestigkeit  $f_{ct,eff}$ . Der Zusammenhang zwischen mittlerer Verbundspannung und Zugfestigkeit lässt sich aus früheren Versuchen [64] ableiten, siehe Tabelle 32. Das Problem dabei ist, dass bei diesen Versuchen [64] für Recyclingbeton einheitlich geringere Zugfestigkeiten als bei Ressourcenbeton beobachtet wurden. Bei den Versuchen zu dieser Arbeit, vgl. Zilch und Cyllok [66], mit einer höheren Anzahl von Versuchen traten jedoch auch gleiche oder sogar höhere Zugfestigkeiten auf. Dieser Umstand lässt die in Tabelle 32 auf Seite 116 aufgeführten Verhältniszahlen für Recyclingbeton unsicher erscheinen. Sie werden daher nicht einfach übernommen, sondern an den neueren Versuchen kalibriert.

Bei der Kalibrierung stehen vor allem die Versuche mit den Querschnitten A und B im Vordergrund, da sie die Randbedingungen für die Herleitung nach König [34] am besten treffen: Die Längsbewehrung liegt im guten Verbund und die Betondeckung beträgt ca.  $1,0 d_s$ .

Die Versuche mit den Querschnitten C und D liefern zusätzliche qualitative Informationen. So erzeugen Versuche mit dem Querschnitt C aufgrund der geringeren Betondeckung geringere Verhältniszahlen als A und B, während die Versuche mit dem Querschnitt D höhere produzieren.

Zur Kalibrierung wurden die Gleichungen (6.14), (6.16), (6.19) und (6.22) mit einem Völligkeitsbeiwert von 0,6 (Wert für kurzzeitige Belastung) und unterschiedlichen Verhältnissen zwischen mittlerer Verbundspannung  $\tau_{sm}$  und Zugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  ausgewertet. Für einen Verhältniswert von ca. 1,7 für Recyclingbeton erhielt man die beste Übereinstimmung zwischen den Rechenwerten und den entsprechenden 95%-Quantilwerten der Rissbreiten aus den Versuchen mit den Querschnitten A und B. Die noch verbliebenen Unterschiede lagen im Rahmen der Messgenauigkeit. In Bild 31 dargestellt sind die für eine kurzzeitige Belastung und den jeweiligen Verhältniswert (Recyclingbeton: 1,7; Ressourcenbeton 2,6) berechneten Riss-

breiten („wk,cal,adj“). Hierbei wurde eine Korrektur für die abweichenden Betondeckungen der Reihen C und D mit eingerechnet.



**Bild 31 Vergleich zwischen beobachteten und nach den Formeln mit angepassten Parametern berechneten Rissbreiten**

Für den Einfluss des Verbundkriechens schlägt König [34] unter Berücksichtigung von (6.24a) eine Abminderung der mittleren Verbundspannung vor. Es gelten hierbei die gleichen Überlegungen wie für die Abminderung des Völligkeitsbeiwerts. Für Recyclingbeton mit Natursand unter dauerhafter oder wiederholter Belastung errechnet sich somit die Verhältniszahl  $\tau_{sm} / f_{ct,eff}$  zu 1,2. Für Recyclingbeton mit Recyclingsand sinkt dieser Wert auf 0,9.

Die Erkenntnisse aus diesem Abschnitt unter Bezugnahme auf die Quelle von König/Tue [34] wurden bereits in einer Veröffentlichung [61] unter Beteiligung des Autors dieser Arbeit diskutiert und flossen z.B. auch in einen Vorschlag [62] zur Regelung der Rissbreitenbegrenzung in (pr)EN 1992-1-1 [39] ein.

### 6.1.5 Spannungen und Schlupf im Stoßbereich

Die folgenden Abschnitte widmen sich der Betrachtung der Mechanik des Bereichs mit sich übergreifenden Stäben unter besonderer Betrachtung der Stoßenden (Übergangsbereich). Die Stoßenden bilden einen Übergang zwischen dem Bereich des Übergangsstoßes und dem einfach bewehrten Bereich links bzw. rechts des Stoßes.

Eligehausen [24] untersuchte Übergreifungsstöße zugbeanspruchter Rippenstähle mit geraden Stabenden und stellte hierfür die mechanischen Zusammenhänge zwischen Spannungen, Dehnungen, Schlupf und den Materialkennwerten dar. Dazu stellt Eligehausen die Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes unter Verwendung der Verbundspannungs-Schlupf-Beziehung ( $\tau$ - $s$ -Beziehung) auf, siehe 6.1.4. Da keine geschlossene Lösung für diese Differentialgleichung vorliegt, wird sie durch schrittweise Integration (einem numerischen Verfahren) gelöst.

Zur Lösung der Differentialgleichung des verschieblichen Verbundes werden Informationen benötigt zu den Größen Übergreifungslänge, Stabdurchmesser, Bewehrungsgrad, bezogene Rippenfläche, E-Moduln von Stahl und Beton,  $\tau$ - $s$ -Beziehung und zulässige Verbundspannung im Stoßbereich  $\tau_{\text{sml}}$ .

Mit diesen Parametern lässt sich die Bezugsgröße des Grundmaßes der Verankerungslänge für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) aufstellen. Das Grundmaß der Verankerungslänge für den GZG  $l_{\text{b,GZG}}$  entspricht der Eintragungslänge, siehe (6.13), bezieht sich jedoch auf die zulässige Verbundspannung im Stoßbereich  $\tau_{\text{sml}}$ .

$$l_{\text{b}} = \frac{\sigma_{\text{s}} \cdot d_{\text{s}}}{4\tau_{\text{sml}}} \quad (6.25)$$

Die zulässige Spannung  $\tau_{\text{sml}}$  liegt unter dem Wert  $\tau_{\text{sm}}$  im einfach bewehrten Bereich. Dies rührt daher, dass der Verbund zwischen Stab und Beton durch den Einfluss des zweiten Stabs gestört wird. Das Verbundsystem der zwei Stäbe ist somit weicher als der Verbund eines einzelnen Stabs im Beton.

Das Ergebnis der schrittweisen Integration unter Verwendung der oben genannten Parameter ist die Verteilung der Spannungen, Dehnungen, Verschiebungen und des Schlupfs über den Stoß.

Nach Eligehausen [24] ist zu erwarten, dass die Spannungen am Stoßanfang (auf Höhe des Endes des ankommenden Stabes) denen außerhalb des Stoßes entsprechen. Am Stoßende (Stabende) müssen zur Einhaltung des Gleichgewichts die Stahlspannungen des endenden Stabes bei 0 N/mm<sup>2</sup> liegen und damit die gesamte Stabkraft über den Stoß in den ankommenden Stab übertragen haben. Zwischen Stabanfang und Stabende sollte sich ein in etwa linearer Verlauf der Spannungen einstellen. Die erwartete Verteilung der Spannungen konnte für alle Prüfkörper gut nachvollzogen werden, siehe Anhang F.3.

Nach Eligehausen [24] sollte der Schlupf am Stoßanfang am höchsten sein und parabelförmig zum Stabende hin abfallen. Diese Art von Verlauf konnte nicht nachvollzogen werden, siehe Anhang F.5.

Die angewendete Methode zur Schlupfmessung erwies sich als nicht immer problemlos, wie an den Graphen in Anhang F.5 abgelesen werden kann. Dennoch zeigte sich die klare Tendenz, dass der Schlupf eines beobachteten Stabes am Stoßanfang und am Stoßende in etwa gleiche Werte aufzeigt und zur Mitte des Stoßes parabelförmig abfällt.

Da bisher keine Methode gefunden wurde, die Zusammenhänge im Stoß besser zu beschreiben, wurde mit dem Verfahren von Eligehausen [24] weitergearbeitet.

### 6.1.6 Rissbild und Rissbreiten im Stoßbereich

Wie in den Abbildungen in Anhang F.6 zu sehen ist, sind die Rissabstände im Stoßbereich untereinander in etwa gleich. Man erkennt, dass die Rissabstände im Stoßbereich auch den Rissabständen im einfach bewehrten Bereich gleichen.

Versuch	$w_{k,ms95}$ [mm]	$w_{k,cal,adj}$ [mm]	Stoßende $w_{E,mess}$ [mm]	Überschreitung
A0	0,14	0,14	0,25	72,5%
A1	0,23	0,21	0,34	60,6%
A2	0,22	0,23	0,38	66,5%
A3	0,22	0,22	0,46	108,9%
A4	0,20	0,22	0,50	126,2%
B0	0,28	0,24	0,30	25,0%
B1	0,33	0,39	0,52	34,0%
B2	0,31	0,40	0,46	15,8%
B3	0,34	0,42	0,50	19,9%
B4	0,30	0,37	0,44	17,5%
C0	0,15	0,15	0,15	0,5%
C1	0,20	0,20	0,32	61,2%
C2	0,18	0,19	0,28	45,8%
C3	0,18	0,19	0,28	44,5%
C4	0,18	0,19	0,30	60,5%
D0	0,18	0,16	0,20	21,3%
D1	0,22	0,21	0,20	-4,9%
D2	0,19	0,20	0,20	1,1%
D3	0,17	0,23	0,20	-11,9%
D4	0,17	0,18	0,20	12,2%

**Tabelle 33 Rissbreiten der Probekörper am Stoßende**

Die Rissbreiten an den Stabenden sind höher als das 95%-Quantil der Rissbreiten im einfach bewehrten Bereich. Dieser Umstand wird auch bei Stößen in Ressourcenbeton beobachtet und

toleriert. Eligehausen [24] quantifiziert eine tolerierbare Überschreitung des 95%-Quantils der Rissbreiten im einfach bewehrten Bereich mit 25%.

Die gemessenen Rissbreiten am Stoßende  $w_{E,mess}$  überschreiten die 25%-Grenze teilweise deutlich. Im Besonderen sind das die hoch bewehrten Reihen A und C. Die Reihen B und D mit mittleren Bewehrungsgraden hingegen schneiden trotz der nach Norm zu kurzen Übergreifungslänge deutlich günstiger als die Reihen A und C ab, siehe Tabelle 33.

Der hohe Bewehrungsgrad in Kombination mit der geringen Übergreifungslänge wirkt durch die hohen Abspaltkräfte, siehe 4.2.1, sehr ungünstig auf die Rissbreite. Tabelle 33 zeigt dies sowohl für Ressourcenbeton als auch für Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung.

Bezieht man die Rissbreiten am Stoßende der Körper aus Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung auf die Rissbreiten im einfach bewehrten Bereich der Referenzkörper aus Ressourcenbeton ist die Überschreitung wesentlich höher als für die Rissbreite am Stoßende der Referenzkörper aus Ressourcenbeton. Das bedeutet, dass die Bemessung für Übergreifungsstöße in Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung, insbesondere bei Vorhandensein von rezykliertem Sand, angepasst werden muss.

### **6.1.7 Berechnung und Schlussfolgerungen für die Rissbreiten im Stoßbereich**

Die Rissbreitenberechnung im Stoß nach Eligehausen [24] ergibt für eine große Anzahl ausgewerteter Versuche gute Übereinstimmungen. Hierbei lässt sich die Rissbreite am Stoßende  $w_E$  als Summe aus dem Schlupf am Stoßende  $s_{Stoßende}$  und der halben Rissbreite  $w_k$  im einfach bewehrten Bereich ermitteln. Der Schlupf am Stoßende berechnet sich mit der unter 6.1.5 gegebenen Methode.

Eligehausen untersuchte explizit den Einfluss der Materialeigenschaften des Betons im Bauteil auf die Rissbreite am Stoßende  $w_E$ . Der E-Modul geht zwar in die Berechnung des Schlupfes ein, hat jedoch keinen großen Einfluss auf die Rissbreite am Stoßende  $w_E$ . Eligehausen führt aus, dass die Materialeigenschaften des Betons keinen weiteren Einfluss auf die Rissbreite  $w_E$  haben, wenn das Verhältnis Übergreifungslänge zu Grundmaß der Verankerungslänge für den GZG  $l_{b,GZG}$  konstant gehalten wird. Das Grundmaß selbst ist nur von einer Materialeigenschaft des Betons abhängig, nämlich der zulässigen Verbundspannung  $\tau_{sml}$ , siehe (6.25).

Es wird vorgeschlagen, die zulässigen Verbundspannungen von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung gegenüber den zulässigen Verbundspannungen von Ressourcenbeton entspre-

chend der Ergebnisse aus 6.1.4 zu reduzieren, siehe auch 7.3.1. Dadurch würde das gültige Bemessungskonzept genau auf die geänderten Materialeigenschaften des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung angepasst.

## 6.2 Auswertung der Ergebnisse unter Tragfähigkeitsniveau und Bruch

Die in diesem Abschnitt behandelten Ergebnisse wurden auf dem Tragfähigkeitsniveau und bei Erreichen der Bruchlast ermittelt. Die Einwirkung, die zu diesen Ergebnissen führte, war somit entweder das Biegemoment  $1,75 M_{zul}$ , siehe Tabelle 31, oder das Bruchmoment. Eine Übersicht über das Tragverhalten aller Versuche ist Anhang F.8 zu entnehmen.

### 6.2.1 Bruchart

Durch Verkürzung der Übergreifungslänge auf ein Maß unterhalb der durch die Norm [13] geforderten Übergreifungslänge sollte für die Probekörper ein Stoßversagen aktiviert werden. Dies konnte in den Versuchen beobachtet werden.

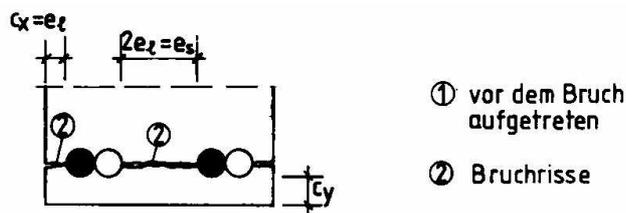
Wie Eligehausen [24] bereits zusammengestellt hat, können sich verschiedene Brucharten und dazugehörige Bruchbilder einstellen. Es lassen sich Zusammenhänge zwischen den Brucharten und den eingebauten Strangabständen feststellen. Das Hauptkriterium hierbei ist das Verhältnis  $e_s/c_y$  zwischen lichtigem Strangabstand  $e_s$  und Betondeckung  $c_y$ . Die genannten Zusammenhänge sind gültig für Vollstöße ohne umschließende Querbewehrung mit mehreren nebeneinander liegenden Stößen. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche entsprachen alle diesen Bedingungen.

#### Hoch bewehrte Körper (Reihe A und C)

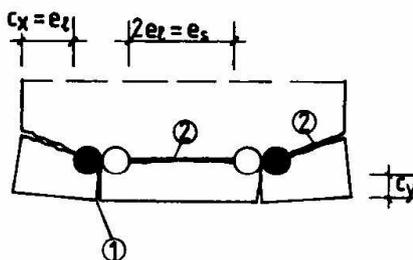
Für die Körper der Reihe A beträgt der lichte Strangabstand  $e_s = 2 d_s$ . Die Betondeckung  $c_y$  in dieser Reihe misst  $0,93 d_s$ . Das ergibt einen Wert von  $e_s/c_y = 2,15$ . Nach Eligehausen lässt sich hierfür Bruchart B (Face and Side Split) mit Absprengen der Betondeckung erwarten, siehe Bild 32, sofern eine ausreichend große Übergreifungslänge gegeben ist.

Für die Körper mit rezyklierter Gesteinskörnung der Reihe A wurde im Versuch jedoch die Bruchart A festgestellt. Es konnten also keine bis zur Bewehrung durchgehenden, parallel zu den Längsstäben verlaufenden Risse beobachtet werden. Es darf jedoch davon ausgegangen werden, dass zwischen den Brucharten Übergangsbereiche liegen, die sich durch jeweils nur einen Wert (z.B.  $e_s/c_y = 1,4$ ) nur begrenzt darstellen lassen. Beim Referenzkörper aus Ressour-

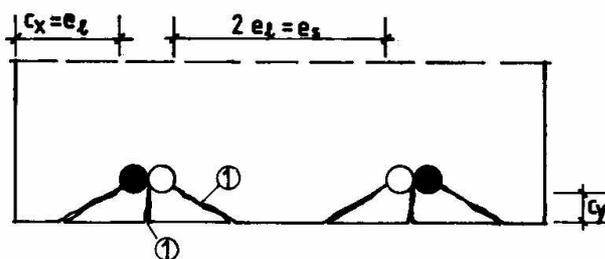
cenbeton wurden die Stäbe aus dem Stoß gezogen, was auf eine zu kurze Übergreifungslänge für diesen Beton hindeutet.



Bruchart A (Side Split),  $e_s/c_y \leq 1,4$



Bruchart B (Face and Side Split)  $1,4 < e_s/c_y < 8$



Bruchart C (V-Type Failure)  $e_s/c_y \geq 8$

**Bild 32** Brucharten A, B und C (aus Eligehausen [24])

Bei den Körpern der Reihe C beträgt der lichte Strangabstand  $e_s = 2 d_s$ . Bei einer Betondeckung  $c_y$  von  $0,75 d_s$  ergibt sich  $e_s/c_y = 2,67$ . Für dieses Verhältnis wird nach Eligehausen ebenfalls die Bruchart B (Face and Side Split) mit Absprengen der Betondeckung erwartet, sofern eine ausreichend große Übergreifungslänge gegeben ist. Wie bereits erwähnt, ist das im Versuch beobachtete Versagen der Körper mit rezyklierter Gesteinskörnung der Reihe C mit Bruchart A nicht ungewöhnlich. Beim Referenzkörper aus Ressourcenbeton wurden die Stäbe aus dem Stoß gezogen, was auf eine zu kurze Übergreifungslänge für diesen Beton hindeutet.

### Körper mit mittlerer Bewehrungsmenge (Reihe B und D)

Für die Körper der Reihe B beträgt der lichte Strangabstand  $e_s = 6 d_s$ . Die Betondeckung  $c_y$  in dieser Reihe misst  $0,93 d_s$ . Das ergibt einen Wert von  $\frac{e_s}{c_y} = 6,45$ . Nach Eligehausen lässt sich

hierfür Bruchart B (Face and Side Split) oder Bruchart C (V-type Failure) mit Absprengen erwarten, siehe Bild 32, sofern eine ausreichend große Übergreifungslänge gegeben ist. Die Körper mit rezyklierter Gesteinskörnung der Reihe B versagten jedoch nicht mit Bruchart B oder Bruchart C, sondern durch ein Herausziehen der Stäbe. Dies deutet auf eine zu kurze Übergreifungslänge zur Übertragung der Stabkraft hin. Der Referenzkörper aus Ressourcenbeton versagte nicht im Stoß, sondern durch Fließen des Stahls außerhalb des Stoßes.

Bei den Körpern der Reihe D beträgt der lichte Strangabstand  $e_s = 10 d_s$ . Bei einer Betondeckung  $c_y$  von  $1,38 d_s$  ergibt sich  $\frac{e_s}{c_y} = 7,25$ . Für dieses Verhältnis wird nach Eligehausen die

Bruchart C (V-type Failure) mit Absprengen der Betondeckung erwartet, sofern eine ausreichend große Übergreifungslänge gegeben ist. Die Körper der Reihe D versagten jedoch nicht mit Bruchart B oder Bruchart C, sondern durch ein Herausziehen der Stäbe. Dies deutet auf eine zu kurze Übergreifungslänge zur Übertragung der Stabkraft hin.

### 6.2.2 Tragfähigkeitsniveau und Bruchlast des Köpers

Im direkten Vergleich mit den Referenzkörpern von Betzle [1] aus Ressourcenbeton lagen die Bruchlasten der neuen Versuche bei oder sogar über den Bruchlasten der Referenzkörper. Die in den durchgeführten Versuchen erreichte Bruchlast lag beinahe immer über der jeweils angestrebten Last auf Tragfähigkeitsniveau der einzelnen Körper, siehe Anhang F.8.

Eine Ausnahme bilden nur die Körper B3, C0 (Referenzkörper!) und C1. Bei den Körpern B3 und C1 fiel eine im Vergleich zu den anderen Mischungen 3 bzw. 1 geringere Zugfestigkeit auf. Die Zugfestigkeit hat Einfluss auf das Grundmaß der Verankerungslänge. Diese Unregelmäßigkeiten würden aber für die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit durch den Teilsicherheitsbeiwert aufgefangen.

Eligehausen stellt für den Grenzzustand der Tragfähigkeit fest, dass die Materialeigenschaften des Betons keinen nennenswerten Einfluss auf die Stoßbruchlast hat, wenn das Verhältnis Übergreifungslänge zu Grundmaß der Verankerungslänge (GZG)  $l_{b,GZG}$  konstant ist.

Das Grundmaß selbst ist nur von einer Materialeigenschaft des Betons abhängig, nämlich der zulässigen Verbundspannung  $\tau_{sml}$ , siehe (6.25). Die Versuche zeigen, dass auf Tragfähigkeits-

niveau die zulässigen Verbundspannungen  $\tau_{\text{sml}}$  des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung denen des Ressourcenbetons gleichen. Unter Gebrauchslastniveau wurde für Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung gegenüber Ressourcenbeton eine geringere Verbundspannung beobachtet.

Die Gleichwertigkeit der Verbundspannungen auf Tragfähigkeitsniveau ließe sich erklären durch eine beim Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung stärker ausgeprägten Fähigkeit, örtliche Spannungsspitzen durch Mikrorissbildung bzw. größere Verformungen auszugleichen. Auf Gebrauchslastniveau wird dieser Mechanismus noch nicht aktiviert, bzw. sind große Verformungen im Zuwachs der Rissbreite zu erkennen. Dies ist jedoch nur eine Vermutung, die durch weitergehende Forschung überprüft werden müsste.

Für eine Betrachtung des Stoßverhaltens auf Tragfähigkeitsniveau ausschließlich unter kurzzeitig wirkenden Lasten bedeuten die Ergebnisse, dass eine angepasste Bemessung für den Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung nicht notwendig ist. Für langfristig wirkende Lasten muss jedoch das Verbundkriechen miteinbezogen werden. Eine Abminderung für den im Vergleich zu Ressourcenbeton stärker kriechenden Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung mit rezykliertem Sand wird somit erforderlich, siehe 6.1.4.

Für die Abminderung wird folgender Zusammenhang ausgenutzt: Im Fall des Grenzzustandes der Tragfähigkeit liegt der Berechnung der Stoßbruchlast eine  $\tau$ - $s$  Beziehung zugrunde, siehe König [34]. Es wird vorgeschlagen, die Amplitude (zulässige Verbundspannung) der  $\tau$ - $s$  Beziehung für die angepasste Bemessung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung mit rezykliertem Sand entsprechend 6.1.4 um 30% nach unten zu korrigieren.

### **6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung neigt in einfach bewehrten Bereichen (außerhalb des Stoßes) zu größeren Rissbreiten als Ressourcenbeton. Im Stoßbereich und besonders an den Enden des Stoßes lassen sich für Beton mit hohen Anteilen an rezyklierter Gesteinskörnung ebenfalls größere Rissbreiten als für Ressourcenbeton beobachten.

Begründet wird dieses Verhalten durch eine geringere übertragbare Verbundspannung für Beton mit hohen Anteilen an rezyklierter Gesteinskörnung auf Gebrauchslastniveau. Wird für diese Betonart in der Sandfraktion rezykliertes Material eingesetzt, muss bei der Bemessung zur Rissbreitenbegrenzung (Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit) zusätzlich ein höheres Verbundkriechen berücksichtigt werden.

---

Die Bruchlast von Stößen aus Beton mit hohem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung und Natursand ist für kurzzeitige Einwirkungen vergleichbar der Bruchlast von Stößen aus Ressourcenbeton.

Für Beton mit hohem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung mit rezykliertem Sand muss für die Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit, die auch dauernde und wiederholte Einwirkungen berücksichtigt, zusätzlich noch ein höheres Verbundkriechen berücksichtigt werden, siehe Kapitel 7.



## 7 Bemessung und Konstruktion

In diesem Kapitel werden Formeln und Anwendungsregeln für die Rissbreitenbegrenzung und die Ausbildung von Übergreifungsstößen in Bauteilen aus Beton mit hohen Anteilen an rezyklierter Gesteinskörnung aufgestellt.

Die Bemessung von Recyclingbeton erfolgt in Deutschland mit der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStB) für Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung [10], vgl. ältere Ausgaben und Entwürfe [8], [9]. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit existierte nur der Teil 1, der ausschließlich das Konzept des angepassten Betons umsetzte und somit nur für geringe Beimischungen rezyklierten Materials in eine natürliche Gesteinskörnung galt.

Um auch große Mengen rezykliertes Material wieder einbauen zu können, war die Erweiterung jener Richtlinie um einen zweiten Teil nötig, der die angepasste Bemessung enthält, siehe Zilch/Roos/Cyllok [43], [65]. Im Zusammenhang mit den in der Literatur vorliegenden Forschungsergebnissen und Bemessungsvorschlägen, wie z.B. von Lü [35] und Meißner [37], sollte folgender Recyclingbeton Gegenstand der Bemessung sein:

- Ausschließlich Recyclingbeton mit Natursand (keine rezyklierte Gesteinskörnung < 2 mm)
- Ausschließlich rezykliertes Material der Liefertypen 1, 2 und 3 (Materialkennwerte eines Betons mit einer Gesteinskörnung des Liefertyps 4 streuen zu breit)

Die Forschungsergebnisse der Laborversuche, siehe Kapitel 6, zu Rissbildung und Übergreifungsstößen sollten in praktische Bemessungsprinzipien und Anwendungsregeln zusammengefasst werden und wurden im Anschluss in den zweiten Teil der Richtlinie eingearbeitet, siehe Zilch/Roos/Cyllok [43], [65], der jedoch zum Zeitpunkt der Publikation dieser Arbeit noch nicht veröffentlicht war. Der für die im Folgenden dargestellten Vorschläge für Prinzipien und Regeln verwendete Begriff Recyclingbeton bezieht sich daher immer auf einen Beton mit rezykliertem Material der Liefertypen 1, 2 oder 3 mit einem Anteil an der Gesamtgesteinskörnung über den Grenzen des Teils 1 der DAfStb-Richtlinie für Beton mit Recyclingbeton [9]. Wenn nicht explizit unterschieden, beziehen sich die Vorschläge immer sowohl auf Recyclingbeton mit Natursand als auch auf Recyclingbeton mit Recyclingsand. Vorschläge zum Recyclingbeton mit Recyclingsand fließen nicht in die Richtlinie ein und sind nur zur Vervollständigung angegeben.

Die im Folgenden gegebenen Vorschläge berücksichtigen die Liefertypen der Gesteinskörnung, siehe Abschnitt 7.1, und beziehen sich auf die Rissbreitenbegrenzung, siehe Abschnitt 7.2, und auf Übergreifungsstöße, siehe Abschnitt 7.3.

## 7.1 Berücksichtigung der Liefertypen der Gesteinskörnung

Im Kapitel 3 bzw. in der Richtlinie für Recyclingbeton [10] werden die verschiedenen Liefertypen für rezyklierte Gesteinskörnungen eingeführt. Die Materialkennwerte eines Betons sind davon abhängig, mit welchem Liefertyp der Beton hergestellt ist. Beeinflusst sind in erster Linie Rohdichte, E-Modul, Zugfestigkeit und zulässige Verbundspannung. E-Modul und Zugfestigkeit von Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen sind nach den Formeln von Roos [42] berechenbar und können so ohne weitere Unterscheidung nach Liefertypen in die Bemessung eingehen.

Die zulässige Verbundspannung hingegen hängt weniger von den Liefertypen ab, sondern ob für den Beton Natursand oder rezyklierter Sand verwendet wird. Eine dahingehende Unterscheidung für die Bemessung ist zweckmäßig.

## 7.2 Bemessungsvorschlag zur Rissbreitenbegrenzung

### 7.2.1 Bemessungsvorschlag

Die Grundbeziehung (6.7) zur Rissbreitenberechnung bleibt für Recyclingbeton sowohl mit Natursand als auch mit Recyclingsand bestehen. Für Recyclingbeton mit Natursand wird vorgeschlagen, ebenfalls die Beziehung (6.8) nicht zu ändern, siehe Kapitel 6.

Das Verhältnis  $\tau_{sm} / f_{ctm}$  des Recyclingbetons mit Natursand ist geringer als das Verhältnis  $\tau_{sm} / f_{ctm}$  des Ressourcenbetons. Berücksichtigt man dies für Gleichung (6.9), so erhält man (7.1).

$$s_{r,max} = \frac{d_s}{2,4 \text{ eff}\rho} \leq \frac{\sigma_s \cdot d_s}{2,4 f_{ct,eff}} \quad (7.1)$$

Für Recyclingbeton mit Recyclingsand wird vorgeschlagen, die Beziehungen (6.8) und (6.9), wie in (7.2) und (7.3) gezeigt, anzupassen. Damit wird in (7.2) das gegenüber Ressourcenbeton geänderte Verhältnis  $\tau_{sm} / f_{ctm}$  für Recyclingbeton mit Recyclingsand berücksichtigt, siehe oben. Für Recyclingbeton mit Recyclingsand ist das Verbundkriechen höher als für Ressourcenbeton oder Recyclingbeton mit Natursand. Die entsprechenden Anpassungen finden sich in (7.2) und (7.3).

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - 0,3 \frac{f_{ct,eff}}{eff\rho} \cdot (1 + \alpha_e \cdot eff\rho)}{E_s} \geq 0,7 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (7.2)$$

$$s_{r,max} = \frac{d_s}{1,8 eff\rho} \leq \frac{\sigma_s \cdot d_s}{1,8 f_{ct,eff}} \quad (7.3)$$

## 7.2.2 Anmerkung zum Bemessungsvorschlag

Die Grundlage für die Formeln zur Berechnung der Rissbreite und des Grundmaßes der Verbundlänge ist, wie bei König [34] beschrieben, ein mechanisches Modell. Das bedeutet, dass anders als bei einem empirischen Modell, für einen neuen Werkstoff keine komplett neue Formel erfunden werden muss. An den Stellen, an denen Vereinfachungen getroffen wurden, die für einen neuen Werkstoff nicht gültig sind, kann eingegriffen werden. Somit lassen sich die Formeln an die Eigenschaften des neuen Werkstoffs anpassen.

Für Recyclingbeton sind diese Stellen zum einen das Verhältnis zwischen mittlerer Verbundspannung  $\tau_{sm}$  und Zugfestigkeit  $f_{ct,eff}$  und zum anderen der Völligkeitsbeiwert  $\beta_t$ . Die an die Eigenschaften des Recyclingbetons angepassten Parameterwerte finden sich in Tabelle 34.

	Kurzzeitige Belastung		Dauerhafte oder wiederholte Belastung	
	$\tau_{sm} / f_{ct,eff}$	$\beta_t$	$\tau_{sm} / f_{ct,eff}$	$\beta_t$
Ressourcenbeton	2,6	0,6	1,8	0,4
Recyclingbeton mit Natur-sand	1,7	0,6	1,2	0,4
Recyclingbeton mit Recyc-lingsand	1,7	0,6	0,9	0,3

**Tabelle 34** Parameter zur Anpassung der Rissberechnung nach DIN 1045-1 Verhältniszahlen zwischen mittlerer Verbundspannung  $\tau_{sm}$  und Zugfestigkeit  $f_{ct,eff}$

Gefunden wurden diese Werte durch theoretische Überlegungen wie im Beispiel der dauerhaften oder wiederholten Belastung und durch Auswertung eigener Versuche für z.B. den Zusammenhang zwischen mittlerer Verbundspannung und Zugfestigkeit. Die theoretischen Überlegungen zur Ermittlung der Parameterwerte für dauerhafte oder wiederholte Belastung sollten jedoch ebenfalls durch Versuche verifiziert werden.

## 7.3 Vorschlag für Bewehrungsregeln für Übergreifungsstöße

Übergreifungsstöße werden nach DIN 1045-1 nicht explizit bemessen, sondern müssen Konstruktionsregeln genügen. Die Konstruktionsregeln genügen den Anforderungen der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit. Die Ergebnisse aus Kapitel 6 zeigen, dass zur Anpassung der Bewehrungsregeln für Übergreifungsstöße nur der Bemessungswert der Verbundspannung angepasst werden muss.

### 7.3.1 Betrachtung des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit

Für den Vorschlag zur Anpassung des Grenzwertes der Verbundspannung für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden die Ergebnisse aus 6.1.7 herangezogen.

Es wird vorgeschlagen, die zulässigen Verbundspannungen von Recyclingbeton gegenüber den zulässigen Verbundspannungen von Ressourcenbeton entsprechend der Ergebnisse aus 6.1.4 zu reduzieren.

In der Norm DIN 1045-1 bezieht sich die zulässige Verbundspannung auf die Zugfestigkeit. In 6.1.4 wird eine Reduzierung des Verhältnisses  $\tau_{sm} / f_{ct,eff}$  für Recyclingbeton unter kurzzeitig wirkender Last von 2,6 (Ressourcenbeton) auf 1,7 vorgeschlagen. Das ist eine Abminderung um 35%.

Aufgrund der ungünstigeren Kriecheigenschaften von Recyclingbeton mit rezykliertem Sand gegenüber Ressourcenbeton oder Recyclingbeton mit Natursand ist eine weitere Reduzierung des Verhältnisses  $\tau_{sm} / f_{ct,eff}$  um 30% notwendig.

Für die allgemeinen Bewehrungsregeln nach DIN 1045-1 liegt das Verhältnis zwischen charakteristischer Verbundspannung  $f_{bk}$  (entspricht  $\tau_{sm}$ ) und dem 5%-Quantilwert der Zugfestigkeit  $f_{ctk;0,05}$  bei 2,25.

$$\frac{f_{bk}}{f_{ctk;0,05}} = 2,25 \quad (7.4)$$

In 6.1.4 ist nur das Verhältnis der zulässigen Verbundspannung zur effektiven Zugfestigkeit (entspricht in der Regel der mittleren Zugfestigkeit) untersucht. Nach DIN 1045-1 lässt sich jedoch die mittlere Zugfestigkeit linear in den 5%-Quantilwert durch die Multiplikation mit den Faktor 0,7 umrechnen. Das bedeutet, dass die angesprochenen Abminderungen ohne wei-

tere Änderung in das Verhältnis  $\frac{f_{bk}}{f_{ct;0,05}}$  eingehen können.

In Anlehnung an Formel (139) nach DIN 1045-1 ergibt sich für Recyclingbeton mit Natur-sand:

$$\frac{f_{bk}}{f_{ctk;0,05}} = 1,45 \quad (7.5)$$

In Anlehnung an Formel (139) nach DIN 1045-1 ergibt sich für Recyclingbeton mit rezyklier-tem Sand:

$$\frac{f_{bk}}{f_{ctk;0,05}} = 1,05 \quad (7.6)$$

### 7.3.2 Betrachtung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit

Für den Vorschlag zur Anpassung des Grenzwertes der Verbundspannung für den Grenzzu-stand der Tragfähigkeit werden die Ergebnissen aus 6.2.2 und das Vorgehen aus 7.3.1 heran-gezogen.

Es wird vorgeschlagen, das Verhältnis  $\frac{f_{bd}}{f_{ctk;0,05}}$  des Bemessungswerts der Verbundspannung und dem 5%-Quantilwert der Zugfestigkeit  $f_{ctk;0,05}$  für Recyclingbeton mit Natursand nicht zu verändern.

Für Recyclingbeton mit rezykliertem Sand sollte das Verhältnis  $\frac{f_{bd}}{f_{ctk;0,05}}$  um 30% abgemindert werden.

In Anlehnung an Formel (139) nach DIN 1045-1 ergibt sich für Recyclingbeton mit Natur-sand die Gleichung (7.7).

$$\frac{f_{bk}}{f_{ctk;0,05}} = 2,25 \quad (7.7)$$

In Anlehnung an Formel (139) nach DIN 1045-1 ergibt sich für Recyclingbeton mit rezyklier-tem Sand die Gleichung (7.8).

$$\frac{f_{bk}}{f_{ctk;0,05}} = 1,60 \quad (7.8)$$

### 7.3.3 Resultierender Vorschlag

Bei der Ausführung der Übergreifungslänge kann nur ein Grenzwert der Verbundspannung berücksichtigt werden. Der maßgebende Grenzwert ist der niedrigere, da dieser zu einem größeren Grundmaß der Verankerungslänge führt und somit auf der sicheren Seite liegt.

Es ist zu beachten, dass für die Einhaltung des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit (GZG) kein Teilsicherheitsbeiwert ( $\gamma = 1,0$ ) für das Material berücksichtigt werden muss. Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) wird der Sicherheitsbeiwert jedoch relevant. Um

das Verhältnis  $\frac{f_{bk}}{f_{ctk;0,05}}$  für GZT und GZG vergleichen zu können, muss  $\frac{f_{bk}}{f_{ctk;0,05}}$  für den GZT durch  $\gamma_c$  geteilt werden.

Vergleicht man die bereinigten Grenzwerte für die Verbundspannung, so ergibt sich für Recyclingbeton mit Natursand, dass der GZG um ca. 3% ungünstiger ist. Für Recyclingbeton mit rezykliertem Sand ergibt sich für den GZG ein um ca. 2% ungünstigerer Grenzwert für die Verbundspannung.

In Anlehnung an Formel (139) nach DIN 1045-1 ergibt sich für Recyclingbeton mit Natursand für den Bemessungswert der Verbundspannung die Gleichung (7.9).

$$f_{bd} = 2,20 \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c} \quad (7.9)$$

In Anlehnung an Formel (139) nach DIN 1045-1 ergibt sich für Recyclingbeton mit rezykliertem Sand für den Bemessungswert der Verbundspannung die Gleichung (7.10).

$$f_{bd} = 1,60 \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c} \quad (7.10)$$

## 8 Beispiel und wirtschaftliche Betrachtung

Ziel dieses Kapitels ist es, die wirtschaftlichen Vor- und Nachteile der Verwendung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung abschätzen zu können. Um dies zu erreichen, wird als repräsentatives Beispiel ein mehrstöckiges Bürogebäude aus Stahlbeton (Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung und/oder Ressourcenbeton) und Mauerwerk vorbemessen.

Durch die angepasste Bemessung für Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung ändern sich die Mengen an Stahl für die betroffenen Bauteile gegenüber der herkömmlichen Bemessung für Ressourcenbeton. Diese Änderungen bilden die Basis für eine wirtschaftliche Betrachtung.

### 8.1 Beispielhafte Bemessung der Decken eines Bürogebäudes aus Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung

Die Bemessung geschieht für alle Stahlbetonbauteile unter Verwendung von DIN 1045-1. Zusätzlich werden geeignete Bauteile des Bauwerks (Decken und Unterzüge) mit Beton mit hohen Anteilen an rezyklierter Gesteinskörnung mit Natursand als Alternative bemessen. Dazu wird eine angepasste Bemessung verwendet, die auf DIN 1045-1 aufbaut.

#### 8.1.1 Anmerkungen zur Vorbemessung von Bauteilen aus Stahlbeton mit rezyklierter Gesteinskörnung

Beton mit hohen Anteilen an rezyklierter Gesteinskörnung weist andere Materialeigenschaften als Ressourcenbeton auf. Das hat zur Folge, dass die normalen Betondruckfestigkeitsklassen (z.B. C20/25), die neben der Druckfestigkeit auch Aussagen über andere Materialkennwerte treffen, nicht mehr anwendbar sind. Für den Beton mit hohen Anteilen an rezyklierter Gesteinskörnung müssen neue Betondruckfestigkeitsklassen definiert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die neuen Betondruckfestigkeitsklassen durch ein „R“ gekennzeichnet, das der entsprechenden Ressourcenbetondruckfestigkeitsklasse vorangestellt wird. Aus einem Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung, dessen Druckfestigkeit der Klasse C20/25 entspricht, wird demnach ein RC20/25.

Für die Biegebemessung wird der Vorschlag von Meißner [37] übernommen, den Abminderungsbeiwert  $\alpha$  zur Berücksichtigung von Langzeitwirkungen auf die Druckfestigkeit von 0,85 für Ressourcenbeton auf 0,8 für Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung zu senken.

Für den Bemessungswert der Betondruckfestigkeit ergibt sich für einen RC20/25:

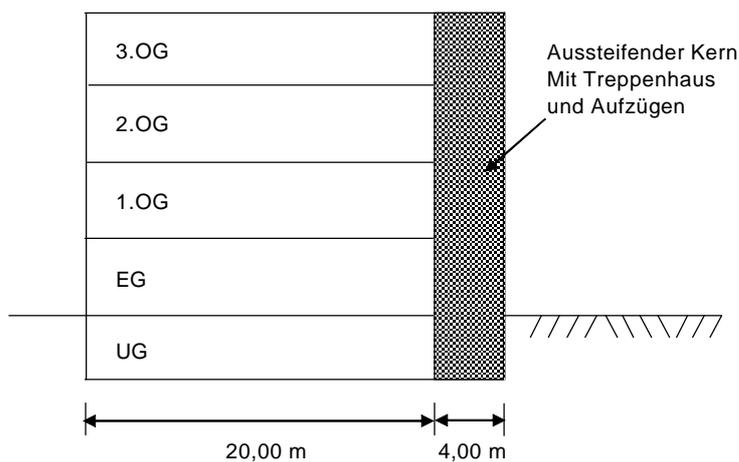
$$f_{cd} = \alpha \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,8 \cdot \frac{20}{1,5} = 10,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Für die Querkraftbemessung geht der Vorschlag von Lü [35] ein, je nach Anteil des rezyklierten Materials an der Gesamtmenge der groben Gesteinskörnung den Abminderungsbeiwert  $\eta_1$  anzupassen. Für 100% rezykliertes Material lässt sich  $\eta_1$  zu 0,8 bestimmen.

Bei der Rissbreitenbegrenzung sollen die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Formeln benutzt werden.

### 8.1.2 System, Lasten und Schnittgrößen

Als Beispiel für die unterschiedlichen Bemessungen von Bauteilen aus Stahlbeton und Stahlbeton mit rezyklierter Gesteinskörnung dient ein 4-geschossiges Bürogebäude, siehe Bild 33.



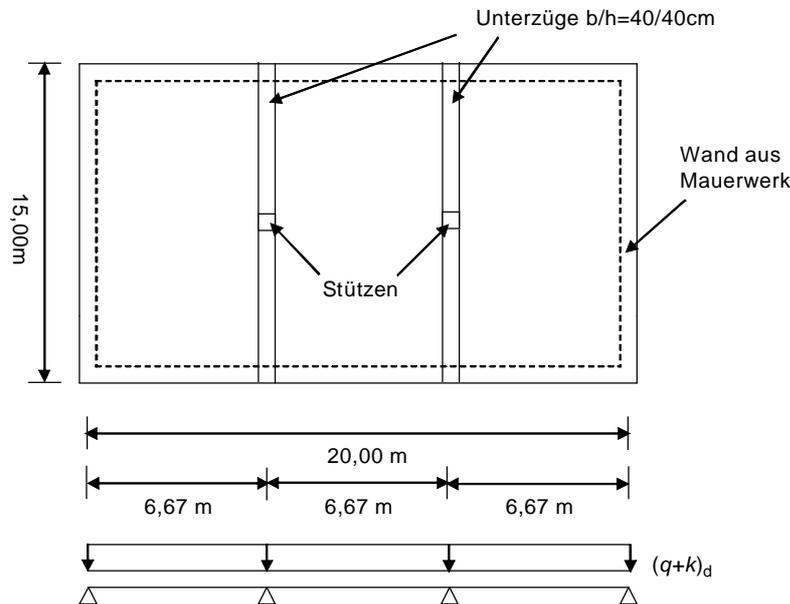
**Bild 33 Ansicht des 4-geschossigen Bürogebäudes**

Das Untergeschoß ist als weiße Wanne in Ressourcenbeton ausgeführt. Bei den Wänden oberhalb der Geländeoberkante handelt es sich um Mauerwerk. Die Stützen und die Decke zwischen Untergeschoß (UG) und Erdgeschoß (EG) sind in Ressourcenbeton C20/25 ausgeführt.

Die Decken ( $h = 20 \text{ cm}$ ) ab dem Erdgeschoss und das Dach einschließlich der jeweils dazugehörigen Unterzüge werden in Stahlbeton C20/25 hergestellt, siehe Bild 34. Das Dach ist mit einer Deckung vor direkter Beregnung geschützt.

Für die Alternative mit Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung werden das Dach, die Decken über dem EG und die dazugehörigen Unterzüge in Stahlbeton mit rezyklierter Gesteinskör-

nung (hohe Anteile, kein rezyklierter Sand - RC20/25, siehe 8.1.1) ausgeführt. Eine Draufsicht und das verwendete statische System sind dem Bild 34 zu entnehmen.



**Bild 34 Draufsicht auf das Deckensystem mit statischem System (ohne aussteifenden Kern)**

Folgende Einwirkungen auf die Decken werden angesetzt:

- Eigengewicht:  $g_k = 5 \text{ kN/m}^2$   $g_d = 6,75 \text{ kN/m}^2$
- Verkehrslast Büro:  $q_k = 2 \text{ kN/m}^2$   $q_d = 3,00 \text{ kN/m}^2$

Aus diesen Einwirkungen ergeben sich für die einachsige gespannte, als 3-Feldträger modellierte Decke folgende Schnittgrößen im Grenzzustand der Tragfähigkeit:

- Maßgebendes Feldmoment:  $M_{Ed,Feld} = 37,5 \text{ kNm/m}$
- Maßgebendes Stützmoment:  $|M_{Ed,Stütz}| = 45,7 \text{ kNm/m}$
- Maßgebende Querkraft:  $V_{Ed} = 36,9 \text{ kN/m}$  (direkte Lagerung; Schnittgröße im Abstand  $d$  von der Auflagerkante)

Darüber hinaus ergeben sich für die Decke folgende Schnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (quasi-ständige Einwirkungskombination,  $\psi_2 = 0,3$ ):

- Maßgebendes Feldmoment:  $M_{Ed,qs,Feld} = 20,50 \text{ kNm/m}$
- Maßgebendes Stützmoment:  $|M_{Ed,qs,Stütz}| = 25,37 \text{ kNm/m}$

Für die Unterzüge (2-Feldträger) ergeben sich unter den oben genannten Einwirkungen folgende Schnittgrößen im Grenzzustand der Tragfähigkeit:

- Maßgebendes Feldmoment:  $M_{Ed,Feld} = 285,2 \text{ kNm}$

- Maßgebendes Stützmoment:  $|M_{Ed,Stütz}| = 457,0 \text{ kNm}$
- Maßgebende Querkraft:  $V_{Ed} = 282,1 \text{ kN}$  (direkte Lagerung; Schnittgröße im Abstand  $d$  von der Auflagerkante)

Darüber hinaus ergeben sich für die Unterzüge folgende Schnittgrößen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (quasi-ständige Einwirkungskombination,  $\psi_2 = 0,3$ ):

- Maßgebendes Feldmoment:  $M_{Ed,qs,Feld} = 152,9 \text{ kNm}$
- Maßgebendes Stützmoment:  $|M_{Ed,qs,Stütz}| = 262,6 \text{ kNm}$

### 8.1.3 Bemessung

#### Bemessung für die Decken

Umweltklasse: XC1

$$c_{nom} = 10 \text{ mm} + 10 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$$

$$d = h - c_{nom} - d_s/2 = 0,17 \text{ m}$$

#### Decken - Ressourcenbeton

Für die Biegebewehrung in der Decke im Feld wird die Stahlquerschnittsfläche wie folgt bestimmt:

$$f_{cd} = \alpha \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,85 \cdot \frac{20}{1,5} = 11,33 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{0,0375}{1 \cdot 0,17^2 \cdot 11,33} = 0,115 \quad \omega = 0,1228$$

$$A_s = \frac{1}{435} \cdot (0,1228 \cdot 1 \cdot 0,17 \cdot 11,33) \cdot 10^4 = 5,42 \text{ cm}^2/\text{m}; \text{ Gewählt: } 5\emptyset 12 = 5,65 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Für die Biegebewehrung in der Decke über der Stützung (Unterzug) wird die Stahlquerschnittsfläche wie folgt bestimmt:

$$\mu_{Eds} = 0,1399 \quad \omega = 0,1519$$

$$A_s = 6,70 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \text{Gewählt: } 6\emptyset 12 = 6,79 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Die Querkrafttragfähigkeit  $V_{Rd,ct}$  biegebewehrter Bauteile ohne Querkraftbewehrung lässt sich bestimmen mit:

$$V_{Rd,ct} = \left[ 0,10 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] \cdot b_w \cdot d$$

Dabei ist:

$$\kappa = 1 + \sqrt{\frac{200}{170}} \leq 2 \quad \kappa = 2$$

$$\eta_1 = 1,0$$

$$\rho_1 = \frac{6,70}{100 \cdot 17} = 0,004 \leq 0,02$$

Wertet man die obige Formel aus, so ergibt sich eine Querkrafttragfähigkeit  $V_{Rd,ct} = 68,0 \text{ kN/m}$ , die über der einwirkenden Querkraft ( $V_{Ed} = 36,9 \text{ kN/m}$ ) liegt. Aus diesem Grund ist keine Querkraftbewehrung notwendig.

Die Berechnung der Rissbreiten beruht auf der Annahme eines E-Moduls für Beton von  $28800 \text{ N/mm}^2$  und einer effektiven Zugfestigkeit entsprechend der mittleren Zugfestigkeit von  $2,2 \text{ N/mm}^2$ , siehe DIN 1045-1. Für die vorliegende Umweltklasse ist nach Norm 1045-1 eine Rissbreitenbegrenzung auf  $0,4 \text{ mm}$  verlangt. Für die Rissbreitenberechnung im Feld stehen als Bewehrungsmenge aus dem GZT mindestens  $5,42 \text{ cm}^2/\text{m}$  zur Verfügung. Daraus errechnet sich eine Rissbreite  $w_k = 0,12 \text{ mm}$ . Zulegen von Stahl zur Einhaltung des GZG ist nicht erforderlich.

Für die Rissbreitenberechnung über der Stützung stehen als Bewehrungsmenge aus dem GZT mindestens  $6,70 \text{ cm}^2/\text{m}$  zur Verfügung. Daraus errechnet sich eine Rissbreite  $w_k = 0,12 \text{ mm}$ . Zulegen von Stahl zur Einhaltung des GZG ist nicht erforderlich.

#### Decken - Beton mit rezykliertem Gesteinskörnung

Für die Biegebewehrung in der Decke im Feld wird die Stahlquerschnittsfläche wie folgt bestimmt:

$$f_{cd} = \alpha \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 0,8 \cdot \frac{20}{1,5} = 10,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\mu_{Eds} = \frac{0,0375}{1 \cdot 0,17^2 \cdot 10,67} = 0,122 \quad \omega = 0,1308$$

$$A_s = \frac{1}{435} \cdot (0,1308 \cdot 1 \cdot 0,17 \cdot 10,67) \cdot 10^4 = 5,46 \text{ cm}^2/\text{m}; \text{ Gewählt: } 5\emptyset 12 = 5,65 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Für die Biegebewehrung in der Decke über der Stützung (Unterzug) wird die Stahlquerschnittsfläche wie folgt bestimmt:

$$\mu_{Eds} = 0,148 \quad \omega = 0,1614$$

$$A_s = 6,73 \text{ cm}^2/\text{m} \quad \text{Gewählt: } 6\emptyset 12 = 6,79 \text{ cm}^2/\text{m}$$

Die Querkrafttragfähigkeit  $V_{Rd,ct}$  biegebewehrter Bauteile ohne Querkraftbewehrung lässt sich bestimmen mit:

$$V_{Rd,ct} = \left[ 0,10 \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] \cdot b_w \cdot d$$

Dabei ist:

$$\kappa = 2$$

$$\eta_1 = 0,8$$

$$\rho_1 = 0,004$$

Wertet man die obige Formel aus, so ergibt sich eine Querkrafttragfähigkeit  $V_{Rd,ct} = 54,4$  kN/m, die über der einwirkenden Querkraft ( $V_{Ed} = 36,9$  kN/m) liegt. Aus diesem Grund ist keine Querkraftbewehrung notwendig.

Die Berechnung der Rissbreiten beruht auf der Annahme eines E-Moduls für Beton von 25200 N/mm<sup>2</sup> und einer effektiven Zugfestigkeit entsprechend der mittleren Zugfestigkeit von 2,3 N/mm<sup>2</sup>. Diese Materialkennwerte entsprechen denen des Betons des Versuchs C2. Für die vorliegende Umweltklasse ist nach DIN 1045-1 eine Rissbreitenbegrenzung auf 0,4 mm verlangt.

Für die Rissbreitenberechnung im Feld stehen als Bewehrungsmenge aus dem GZT mindestens 5,46 cm<sup>2</sup>/m zur Verfügung. Daraus errechnet sich eine Rissbreite  $w_k = 0,17$  mm. Zulegen von Stahl zur Einhaltung des GZG ist nicht erforderlich.

Für die Rissbreitenberechnung über der Stützung stehen als Bewehrungsmenge aus dem GZT mindestens 6,73 cm<sup>2</sup>/m zur Verfügung. Daraus errechnet sich eine Rissbreite  $w_k = 0,11$  mm. Zulegen von Stahl zur Einhaltung des GZG ist nicht erforderlich.

Die Rissbreitenbegrenzung wird in der Regel näherungsweise durch die Begrenzung des Stabdurchmessers mit Hilfe von Tabellen durchgeführt. Diese finden sich bei Zilch et al. [65].

### **Bemessung für den Unterzug (Plattenbalken)**

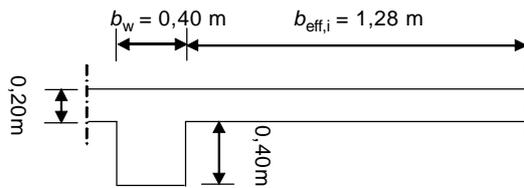
Umweltklasse: XC1

$$c_{nom} = 10 \text{ mm} + 10 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$$

$$d = h - c_{nom} - d_s/2 - d_{s,quer} = 0,56 \text{ m}$$

$$b_{eff,i} = 1,28 \text{ m}$$

$$b_{eff} = 2,96 \text{ m}$$



**Bild 35 Abmessungen Plattenbalken**

Plattenbalken - Ressourcenbeton

Für die Biegebewehrung im Unterzug im Feld wird die Stahlquerschnittsfläche wie folgt bestimmt:

$$\mu_{\text{Eds}} = 0,027 \quad \omega = 0,027$$

$$A_s = 11,20 \text{ cm}^2 \quad \text{Gewählt: } 6\varnothing 16 = 12,06 \text{ cm}^2$$

Für die Biegebewehrung im Unterzug über der Stütze wird die Stahlquerschnittsfläche wie folgt bestimmt:

$$\mu_{\text{Eds}} = 0,322 \quad \omega = 0,404$$

$$A_s = 23,50 \text{ cm}^2 \quad \text{Gewählt: } 8\varnothing 20 = 25,13 \text{ cm}^2$$

In die Querkrafttragfähigkeit  $V_{\text{Rd,ct}}$  biegebewehrter Bauteile ohne Querkraftbewehrung gehen folgende Parameter ein:

$$\kappa = 1 + \sqrt{\frac{200}{560}} \leq 2 \quad \kappa = 1,36$$

$$\eta_1 = 1,0$$

$$\rho_1 = \frac{11,2}{40 \cdot 56} = 0,005 \leq 0,02$$

Es ergibt sich eine Querkrafttragfähigkeit  $V_{\text{Rd,ct}} = 65,6 \text{ kN/m}$ , die unter der einwirkenden Querkraft ( $V_{\text{Ed}} = 282,1 \text{ kN/m}$ ) liegt. Querkraftbewehrung ist erforderlich.

Die Querkraftbewehrung lässt sich bestimmen durch:

$$\frac{A_{sw}}{s_w} = \frac{V_{\text{Ed}}}{f_{yd} \cdot z \cdot \cot\theta}$$

Mit der Näherung  $\cot \theta = 1,2$ , siehe DIN 1045-1, errechnet sich die erforderliche Bewehrung zu:

$$\frac{A_{sw}}{s_w} = 10,72 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \quad \text{Gewählt: } \text{Bü}\varnothing 12, s_w = 20 \text{ cm}$$

Die Berechnung der Rissbreiten beruht auf der Annahme eines E-Moduls für Beton von  $28800 \text{ N/mm}^2$  und einer effektiven Zugfestigkeit entsprechend der mittleren Zugfestigkeit von

2,2 N/mm<sup>2</sup>, siehe DIN 1045-1. Für die vorliegende Umweltklasse ist nach Norm 1045-1 eine Rissbreitenbegrenzung auf 0,4 mm verlangt.

Für die Rissbreitenberechnung im Feld stehen als Bewehrungsmenge aus dem GZT mindestens 11,2 cm<sup>2</sup> zur Verfügung. Daraus errechnet sich eine Rissbreite  $w_k = 0,28$  mm.

Zulegen von Stahl zur Einhaltung des GZG ist nicht erforderlich.

Für die Rissbreitenberechnung über der Stütze stehen als Bewehrungsmenge aus dem GZT mindestens 23,5 cm<sup>2</sup> zur Verfügung. Daraus errechnet sich eine Rissbreite  $w_k = 0,14$  mm.

Zulegen von Stahl zur Einhaltung des GZG ist nicht erforderlich.

### Plattenbalken - Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung

Für die Biegebewehrung im Unterzug im Feld wird die Stahlquerschnittsfläche wie folgt bestimmt:

$$\mu_{Eds} = 0,029 \quad \omega = 0,039$$

$$A_s = 11,2 \text{ cm}^2$$

$$\text{Gewählt: } 6\varnothing 16 = 12,06 \text{ cm}^2$$

Für die Biegebewehrung im Unterzug über der Stütze wird die Stahlquerschnittsfläche wie folgt bestimmt:

$$\mu_{Eds} = 0,342 \quad \omega = 0,439$$

$$A_s = 24,10 \text{ cm}^2$$

$$\text{Gewählt: } 8\varnothing 20 = 25,13 \text{ cm}^2$$

In die Querkrafttragfähigkeit  $V_{Rd,ct}$  biegebewehrter Bauteile ohne Querkraftbewehrung gehen folgende Parameter ein:

$$\kappa = 1 + \sqrt{\frac{200}{560}} \leq 2 \quad \kappa = 1,36$$

$$\eta_1 = 0,8$$

$$\rho_1 = \frac{11,2}{40 \cdot 56} = 0,005 \leq 0,02$$

Es ergibt sich eine Querkrafttragfähigkeit  $V_{Rd,ct} = 52,5$  kN/m, die unter der einwirkenden Querkraft ( $V_{Ed} = 282,1$  kN/m) liegt. Querkraftbewehrung ist erforderlich.

Mit der Näherung  $\cot \theta = 1,2$ , siehe DIN 1045-1, errechnet sich die erforderliche Querkraftbewehrung zu:

$$\frac{A_{sw}}{s_w} = 10,72 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}} \quad \text{Gewählt: } \text{Bü}\varnothing 12, s_w = 20 \text{ cm}$$

Die Berechnung der Rissbreiten beruht auf der Annahme eines E-Moduls für Beton von 25200 N/mm<sup>2</sup> und einer effektiven Zugfestigkeit entsprechend der mittleren Zugfestigkeit von 2,3 N/mm<sup>2</sup>. Diese Materialkennwerte entsprechen denen des Betons des Versuchs C2. Für die vorliegende Umweltklasse ist nach Norm 1045-1 eine Rissbreitenbegrenzung auf 0,4 mm verlangt.

Für die Rissbreitenberechnung im Feld stehen als Bewehrungsmenge aus dem GZT mindestens 11,20 cm<sup>2</sup> zur Verfügung. Daraus errechnet sich eine Rissbreite  $w_k = 0,41$  mm.

Die Überschreitung von 0,01 mm kann vernachlässigt werden. Zulegen von Stahl zur Einhaltung des GZG ist somit nicht erforderlich.

Für die Rissbreitenberechnung über der Stütze stehen als Bewehrungsmenge aus dem GZT mindestens 24,10 cm<sup>2</sup> zur Verfügung. Daraus errechnet sich eine Rissbreite  $w_k = 0,20$  mm.

Zulegen von Stahl zur Einhaltung des GZG ist somit nicht erforderlich.

### 8.1.4 Gegenüberstellung der Stahl und Betonmengen

Der Betonbedarf für eine Decke einschließlich Unterzüge beläuft sich auf insgesamt ca. 65 m<sup>3</sup>. Der verwendete Beton hat Einfluss auf den Stahlbedarf, siehe Tabelle 35. Um einen möglichst allgemeinen, von den Geometrien des Beispiels unabhängigen Stahlbedarf zu erhalten, ist bei dessen Berechnung von der rechnerisch nötigen Stahlmenge ausgegangen worden. Die Beispielrechnung ergibt damit einen insgesamt knapp 1% höheren Stahlverbrauch bei Verwendung des RC20/25 (Beton mit hohen Anteilen an rezyklierter Gesteinskörnung mit Natursand) gegenüber der Verwendung eines C20/25 (Ressourcenbeton).

Position	Stahlbedarf bei Ressourcenbeton [to]	Stahlbedarf bei Recyclingbeton [to]	Verhältnis Stahlbedarf Recyclingbeton / Ressourcenbeton[-]
Decke (Feld)	1,301	1,310	100,7%
Decke (Stütze)	0,482	0,485	100,4%
Decke (Querbewehrung)	0,357	0,359	100,7%
Unterzug (Feld)	0,269	0,269	100,0%
Unterzug (Stütze)	0,207	0,212	102,6%
Unterzug (Querkraftbewehrung)	0,515	0,515	100,0%
<b>Insgesamt</b>	<b>3,130</b>	<b>3,149</b>	<b>100,6%</b>

Tabelle 35 Stahlbedarf einer Decke mit Unterzügen (Beispiel)

## 8.2 Bewertung der Wirtschaftlichkeit

Die Bewertung der Wirtschaftlichkeit basiert auf den Erstellungskosten für das vorangegangene, repräsentative Beispiel eines Bürogebäudes. Verglichen werden nur die Erstellungskosten

ten für die Decken. Die Erstellungskosten beruhen auf Überschlagsrechnungen und baupraktischen Erfahrungswerten für Aufwand und Preise [30].

Der Preis für die Tonne Stahl setzt sich aus Material, Liefer-, Biege- und Einbaukosten zusammen. Ein Wert von 400 €/to wird für den Gesamtpreis angesetzt.

Der Preis für den m<sup>3</sup> Beton setzt sich aus Material, Liefer-, Einbau- und Schalungskosten zusammen. Die Schalungskosten sind bezogen auf das Betonvolumen hoch, da es sich bei den Decken um große Flächen bei nur geringem Volumen handelt. Sie werden mit 115 €/m<sup>3</sup> angesetzt. Für den Einbau des Betons werden Kosten von 20 €/m<sup>3</sup> geschätzt.

Die Materialkosten für den m<sup>3</sup> Beton setzen sich hauptsächlich aus den Preisen für Zuschlag und Zement zusammen. Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung benötigt in der Herstellung etwas mehr Zement. Dafür ist der Preis für die rezyklierte Gesteinskörnung nur etwa bei 50% einer normalen. Berücksichtigt man diese beiden Effekte, so kann man für den Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung einschließlich Lieferung einen Preis von 52 €/m<sup>3</sup> annehmen. Die Kosten für Ressourcenbeton einschließlich Lieferung werden in dieser Berechnung zu 60 €/m<sup>3</sup> angenommen.

Insgesamt belaufen sich die Komplettkosten für Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung auf 187 €/m<sup>3</sup>. Die Gesamtkosten für Ressourcenbeton sind für dieses Beispiel 195 €/m<sup>3</sup>.

Die Herstellung einer Decke in Ressourcenbeton kostet unter Verwendung der in 8.1.4 berechneten Mengen € 13.927,00. Die vergleichbare Decke aus Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung kostet € 13.414,76. Damit ist die Decke aus Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung um € 512,24 oder 3,7% günstiger als die Decke aus Ressourcenbeton.

Material	Stahlbedarf [€]	Betonbedarf [€]	Gesamtkosten [€]
Ressourcenbeton C20/25	1.252,00 €	12.675,00 €	13.927,00 €
Recyclingbeton RC20/25	1.259,76 €	12.155,00 €	13.414,76 €

**Tabelle 36 Kosten einer Decke mit Unterzügen (Beispiel)**

## 9 Zusammenfassung und Empfehlungen

Diese Arbeit dient der Untersuchung der Rissbildung in Stahlbetonbauteilen aus Beton mit hohem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung unter besonderer Berücksichtigung von Übergreifungsstößen. Hierbei werden an die besonderen Materialeigenschaften des Baustoffs angepasste Bemessungsansätze und Bewehrungsregeln als Beitrag für die angepasste Bemessung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung entwickelt. In einem umweltökonomischen Exkurs werden die wirtschaftlichen und ökologischen Vorteile und Nachteile des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung gegenüber dem Ressourcenbeton herausgearbeitet. Es kann gezeigt werden, dass Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung als wirtschaftlicher und ökologischer Baustoff bezeichnet werden kann.

Dieses abschließende Kapitel bietet eine Zusammenfassung der zu Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung gewonnenen technischen, siehe 9.1, und umweltökonomischen Erkenntnisse, siehe 9.2, und endet mit einer Bewertung und einem Ausblick für den Baustoff, siehe 9.3.

### 9.1 Technische Betrachtung – Bemessungsansatz

Beton mit hohem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung hat bei gleicher Druckfestigkeit andere Materialkennwerte (z.B. E-Modul, zulässige Verbundspannung) als Ressourcenbeton. Es konnte festgestellt werden, dass bewehrter Beton mit hohem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung höhere Rissbreiten aufweist als bewehrter Ressourcenbeton, wenn die geänderten Materialkennwerte bei der Rissbreitenbeschränkung nicht berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit konnten Bemessungsansätze und Bewehrungsregeln entwickelt werden, die den Eigenschaften des Betons mit hohem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung gerecht werden. Die Bemessungsansätze decken die Rissbreitenbegrenzung ab. Die Bewehrungsregeln dienen der Ermittlung der erforderlichen Übergreifungslänge für Übergreifungsstöße.

Für die Rissbreitenbegrenzung im Recyclingbeton stehen die neuen Gleichungen (7.1) bis (7.3) zur Verfügung, die für Beton mit hohem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung die Gleichungen (136) bzw. (136) und (137) der DIN 1045-1 [13] ersetzen. Durch die Verwendung der neuen Formeln lassen sich die Rissbreiten für ein Stahlbetonbauteil aus Beton mit hohem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung berechnen. Somit kann für dieses Bauteil eine Bewehrung bestimmt werden, die die Einhaltung der geforderten maximalen Rissbreiten ermöglicht.

Für die Bewehrungsregeln zur Ausführung von Übergreifungsstößen in Beton mit hohem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung musste ein neuer Ansatz zur Berechnung des Bemessungswertes der Verbundspannung gefunden werden. Die Gleichungen (7.9) und (7.10) erfüllen diese Aufgabe. Sie ersetzen für den Recyclingbaustoff die Gleichung (139) der DIN 1045-1 [13]. Mit den neuen Gleichungen lassen sich für Beton mit hohem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung Übergreifungslängen berechnen, die ein Versagen ohne Ankündigung unwahrscheinlich machen und die Rissbreiten am Stoßende begrenzen.

Gefunden wurden die Bemessungsansätze und Bewehrungsregeln durch theoretische Überlegungen und durch Auswertung eigener Versuche. Eine Verifizierung der theoretischen Überlegungen zum Einfluss von dynamischen oder lang anhaltenden Einwirkungen durch Versuche wäre wünschenswert. Diese könnten z.B. dynamische Belastungsversuche sein.

Die hier vorgestellten Bemessungsansätze für die Rissbreitenbeschränkung und Bewehrungsregeln für Übergreifungsstöße in Beton mit hohem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung sind bereits in das Konzept der angepassten Bemessung dieses Baustoffs, vgl. Zilch/Roos/Cyllok [43], [65] eingegangen. Dieses ermöglicht eine sichere Bemessung von Bauteilen aus Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung.

## 9.2 Umweltökonomische Betrachtung

Die Wirkungsabschätzung zeigt, dass der mögliche ökologische Nutzen des bewehrten Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung in Bezug auf Materialentnahme, Abfallaufkommen und Flächenbedarf groß ist und vom Anteil des rezyklierten Materials an der Gesamtgesteinskörnung abhängt. Je höher dieser Anteil ist, umso höher ist auch die Reduzierung der genannten Größen. Diese Verminderungen stehen im Einklang mit den umweltökonomischen Zielen, natürliche Ressourcen zu schonen, Abfälle zu vermeiden und Freiräume zu erhalten. Weiterhin werden Treibhausgase und Luftschadstoffe zwar nicht reduziert, jedoch auch nicht wesentlich erhöht.

Wirtschaftlich betrachtet ist bewehrter Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung aufgrund des preiswerten rezyklierten Materials und des nur geringfügig höheren Stahl- und Zementbedarfs eine Konkurrenz zum bewehrten Ressourcenbeton. Daher kann formuliert werden, dass die Verwendung von Stahlrecyclingbeton anstelle von Stahlressourcenbeton sowohl ökologisch als auch ökonomisch sinnvoll ist.

Die oben erwähnte Reduzierung des Ressourcen- und Flächenbedarfs und des Abfalls wird dadurch eingeschränkt, dass die Verwendung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung für

---

einige Anwendungen, insbesondere bei bestimmten Expositionsklassen aufgrund mangelnder Dauerhaftigkeit nicht zulässig ist. Da der mögliche ökologische Nutzen jedoch groß und auch ein wirtschaftlicher Anreiz vorhanden ist, sollte die Einschränkung in Zusammenhang mit der mangelnden Dauerhaftigkeit umweltökonomisch quantifiziert werden, um zur Entwicklung eines intelligenten Ressourcen- bzw. Baustoffmanagements beizutragen. Weiterhin sollten Möglichkeiten gefunden werden, wie die Dauerhaftigkeit für bewehrten Beton mit hohem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung zur Steigerung der Einsatzmöglichkeiten und damit der möglichen Ressourcenschonung verbessert werden könnte.

### **9.3 Ausblick und abschließende Bewertung**

Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung hat Grenzen, die besonders durch die Dauerhaftigkeit gesetzt werden. Er hat allerdings auch große Möglichkeiten. Wird er als Teil eines intelligenten Baustoff- bzw. Ressourcenmanagements entsprechend seiner Möglichkeiten verwendet, so kann er Kosten sparen und die Umwelt entlasten. Dabei bietet er durch die entwickelten technischen Konzepte zur Bemessung und Konstruktion die gleiche Sicherheit wie Ressourcenbeton.



---

## 10 Literatur

- [1] BETZLE, M., STÖCKL, S., KUPFER, H.: Vollstöße durch Übergreifung von zugbeanspruchten Rippenstählen in Normalbeton. In: *Heft 319 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*. Berlin, München: Wilhelm Ernst und Sohn, 1981
- [2] BAYERISCHE STAATSREGIERUNG: *Umweltpakt Bayern – Nachhaltiges Wirtschaften im 21. Jahrhundert*. unterzeichnet am 23.10.2000 (Vereinbarung zwischen der bayerischen Staatsregierung und der bayerischen Wirtschaft)
- [3] BUNDESKABINETT: *Perspektiven für Deutschland – Nationale Nachhaltigkeitsstrategie der Regierung der Bundesrepublik Deutschland*. beschlossen am 17.04.2002 im Bundeskabinett
- [4] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ARBEIT: *Stahlindustrie*. WWW: <http://www.bmwi.de/Navigation/Wirtschaft/Branchenfokus/stahlindustrie>, zuletzt abgerufen 29.03.2004
- [5] CYLLOK, M.: Concrete with Recycled Aggregate: Laps and Cracks. In *Proceedings of 4th International Ph.D. Symposium in Civil Engineering*, Munich, 2002
- [6] CYLLOK, M.: Effects of using Recycling concrete on the material flow in Germany. In *Proceedings of Juniorstav 2005, 7<sup>th</sup> Professional Conference of postgraduate Students*, Brno, 2005
- [7] DAHMS, J., BRUNE, G.: Wasseraufnahme und Rohdichte von Betonbruch. In: *Beton*, Band 46, Heft 8 (1996), S. 480 – 486
- [8] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (DAFSTB): *Richtlinie Beton mit rezykliertem Zuschlag, Teil .* Berlin: Beuth, August 1998
- [9] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (DAFSTB): *Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100, Teil 1 (6., unveröffentlichter Entwurf)*. Berlin: Beuth, Juli 2002
- [10] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (DAFSTB): *Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100 - Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN 1045-1*. Berlin: Beuth, Dezember 2004
- [11] DIN 1045. *Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung*. Januar 1972
- [12] DIN 1045. *Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung*. Juli 1988
- [13] DIN 1045-1. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion*. Juli 2001

- 
- [14] DIN 1045-2. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*. Juli 2001
- [15] DIN 1048-1. *Prüfverfahren für Beton. Teil 1: Frischbeton*. Juni 1991
- [16] DIN 1048-5. *Prüfverfahren für Beton. Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper*. Juni 1991
- [17] DIN 1055-100. *Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln*. März 2001
- [18] DIN 4226-1. *Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel. Teil 1: Normale und schwere Gesteinskörnungen*. Juli 2001
- [19] DIN 4226-100. *Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel. Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen*. Februar 2002
- [20] DIN 488-2. *Betonstahl. Teil 2: Betonstabstahl, Maße und Gewichte*. Juni 1986
- [21] DIN EN 206-1. *Beton. Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Juli 2001
- [22] DIN EN ISO 14040. *Umweltmanagement – Ökobilanz – Prinzipien und allgemeine Anforderungen*. August 1997
- [23] DIN EN ISO 14043. *Umweltmanagement – Ökobilanz – Auswertung*. Juli 2000
- [24] ELIGEHAUSEN, R.: *Übergreifungsstöße zugbeanspruchter Rippenstäbe mit geraden Stabenden*. Berlin: W. Ernst & Sohn, 1979 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 301)
- [25] EYERER, P., REINHARDT, H.-W.: *Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden – Wege zu einer ganzheitlichen Bilanzierung*. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 2000
- [26] FAULSTICH, M.; WEBER, G.: *Ressourcenschonung in Bayern – Forschungs- und Entwicklungsbedarf im BayFORREST-Bereich 1*. Technische Universität München, Forschungsbericht, 1999
- [27] FRIEDL, L., SCHIEßL, P., VOLKWEIN, A.: *Korrosionsschutz von Stahl in RC-Beton*. unveröffentlicht (1. und 2. Zwischenbericht BayFORREST Forschungsvorhaben F193)
- [28] GRAUBNER, C.-A.; HÜSKE, K.: *Nachhaltigkeit im Bauwesen – Grundlagen, Instrumente, Beispiele*. Berlin: Ernst & Sohn, 2003
- [29] GWOSDZ, W. & LORENZ, W.: *Flächenbedarf für den Abbau von oberflächennahen Rohstoffen (Steine und Erden, Braunkohle und Torf) im Jahr 1997*. Bundesanstalt für Geo-

- wissenschaften und Rohstoffe, 2000 (Fakten, Analysen, wirtschaftliche Hintergrundinformationen, Nr. 9)
- [30] HOFFMANN, M.: *Zahlentafeln für den Baubetrieb*, 4. Auflage. Stuttgart: Teubner, 1996
- [31] KERKHOFF, B.; SIEBEL, E.; WASSING, W. ET AL.: *Einfluss von rezykliertem Zuschlag aus Betonbruch auf die Eigenschaften, insbesondere die Dauerhaftigkeit von Beton*. Berlin: Beuth, 2002 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 514)
- [32] KOHLER, N.; HASSLER U.; PASCHEN, H.: *Stoffströme und Kosten in den Bereichen Bauen und Wohnen*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1999 (ed. Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des 13. Deutschen Bundestages)
- [33] KÖLLER, H. V.: *Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz*. 2. Auflage. Berlin: Erich Schmidt-Verlag, 1996 (Textausgabe mit Erläuterungen)
- [34] KÖNIG, G.; TUE, N.: *Grundlagen und Bemessungshilfen für die Rissbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton*. Berlin: Beuth, 1996 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 466)
- [35] LÜ, S.: *Schubtragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit rezyklierten Zuschlägen*. Berlin: Beuth, 2000 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 504)
- [36] MAINZ, J.: *Modellierung des Verbundtragverhaltens von Betonrippenstahl*. Technische Universität München, 1993 (Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau – TUM, 3/93)
- [37] MEIBNER, M.: *Biegetragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit rezyklierten Zuschlägen*. Berlin: Beuth, 2000 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 505)
- [38] MÜLLER, CH.; SCHIEBL, P.: *Mehrfachrecycling von Beton*. unveröffentlicht (Baustoffkreislauf im Massivbau, BIM)
- [39] PREN 1992-1-1. *Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings*. January 2001 (2<sup>nd</sup> draft)
- [40] READYMIX: *Betontechnische Daten*. 14. Auflage, 1996
- [41] REINHARDT, H.-W.: Beton, in: *Betonkalender 2002 Teil 1*, S. 1 – 152, Berlin: W. Ernst & Sohn, 2002
- [42] ROOS, F.: *Ein Beitrag zur Bemessung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN 1045-1*. Technische Universität München, Dissertation, 2002
- [43] ROOS, F., CYLLOK, M.: *Beinführung eines ökologischen Baustoffs: Recyclingbeton*. In: *Massivbau in ganzer Breite – Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch*. Springer, Berlin, Heideberg, 2005

- 
- [44] RÜSCH, H.: Die Ableitung der charakteristischen Werte der Betonzugfestigkeit. In: *Beton*, Band 25, Heft 2 (1975), S. 55-58
- [45] STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND: *Beförderungsleistung im Inland*. WWW: <http://www.destatis.de/basis/d/verk/verktab5.htm>, letzter Aufruf 16.04.2004
- [46] STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND: *Bodenflächen nach Art der tatsächlichen Nutzung in Deutschland*. WWW: <http://www.destatis.de/basis/d/umw/ugrtab7.htm>, letzter Aufruf 02.04.2004
- [47] STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND: *Erzeugung von Eisen und Stahl (Statistik 42311-0001)*. WWW: <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/Online>, letzter Aufruf 14.06.2004
- [48] STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND: *Umweltnutzung und Wirtschaft – Bericht zu den umweltökonomischen Gesamtrechnungen*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2003
- [49] STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND: *Umweltnutzung und Wirtschaft – Tabellen zu den umweltökonomischen Gesamtrechnungen*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2003
- [50] STÖCKL, S., BETZLE, M., SCHMIDT-THRÖ, G.: Vollstöße durch Übergreifung von zugbeanspruchten Rippenstählen in Leichtbeton. In *Deutscher Ausschuss für Beton Heft 319*. Berlin, München: W. Ernst & Sohn, 1981
- [51] STÖCKL, S., MENNE, B., KUPFER, H.: *Versuche an zugbeanspruchten Übergreifungsstößen von Rippenstählen*. Berlin: W. Ernst & Sohn, 1977 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 276)
- [52] VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE E. V.: *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie (2001)*. Düsseldorf: 2002
- [53] WEIL, M., JESKE, U., SCHEBEK, L.: Ökobilanzielle Betrachtung des Einsatzes von natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen bei der Betonherstellung. In: *Baustoff Recycling und Deponietechnik*, Heft 1, 2003
- [54] WEIL, M., JESKE, U., SCHEBEK, L.: Stoffstromanalyse und Ökobilanz als Hilfen zur umweltorientierten Positionsbestimmung von Beton mit und ohne rezykliertem Zuschlag im mineralischen Baustoffstrom. In: *Technikfolgenabschätzung*, Band 11, Heft 1, 2002, S. 50-64
- [55] WIKIPEDIA: *Aggregation*. WWW: <http://de.wikipedia.org/wiki/Aggregation>, letzter Aufruf 11.6.2004

- 
- [56] WIKIPEDIA: *Makroökonomie*. WWW: <http://de.wikipedia.org/wiki/Makro%C3%B6konomie>, letzter Aufruf 16.8.2006
- [57] WIKIPEDIA: *Top-down and bottom-up design*. WWW: [http://en.wikipedia.org/wiki/Top-down\\_design](http://en.wikipedia.org/wiki/Top-down_design), letzter Aufruf 11.6.2004
- [58] WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT (WCED): *Our common future*. Oxford: Oxford University Press, 1987 (Abschlussbericht)
- [59] ZILCH, K., CYLLOK, M.: *Fracture Mechanics on Concrete with Recycled Aggregate*. Proceedings of 1<sup>st</sup> fib Symposium, Osaka, 2002
- [60] ZILCH, K., CYLLOK, M.: Rissbildung und Verbund – Versuche in Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen. In: W.Fuchs, H.-W. Reinhardt (Hrsg.) *Befestigungstechnik, Bewehrungstechnik und ...*, Stuttgart: Ibidem 2002
- [61] ZILCH, K., CYLLOK, M.: Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung – Berechnung und Beobachtung von Rissbreiten unter reiner Biegung. In P. Schießl, D. Heinz (Hrsg.) *Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. Peter Schießl*, München: cbm 2003 (Schriftenreihe Baustoffe Heft 2/2003)
- [62] ZILCH, K.; CYLLOK, M.: *Proposal for a mutual adjustment of different concepts of crack control in (pr)EN 1992-1-1*, Schlussbericht DIBt, 2005
- [63] ZILCH, K., ROGGE, A.: Grundlagen der Bemessung von Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonteilen nach DIN 1045-1, in: *Betonkalender 2001 Teil 1*, S. 205 – 347, Berlin: W. Ernst & Sohn, 2001
- [64] ZILCH, K., ROOS, F.: *Betonkennwerte für die Bemessung und das Verbundverhalten von Beton mit rezykliertem Zuschlag*. Berlin: Beuth, 2000 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 507)
- [65] ZILCH, K., ROOS, F., CYLLOK, M.: *Entwicklung eines Bemessungsansatzes für Beton mit rezykliertem Zuschlag*. Technische Universität München, Forschungsbericht, 2003. (DAfStb Forschungsvorhaben V430)
- [66] ZILCH, K., ROOS, F., CYLLOK, M.: *Rissbildung bei Beton mit rezykliertem Zuschlag*. Technische Universität München, Forschungsbericht, 2004



# Anhang A Matrizen für die umweltökonomische Betrachtung

## Anhang A.1 Qualitative Zuordnung der Module zu den Produktionsbereichen

### Stahlpfad

Zuzuordnendes Modul	Produktionsbereich nach UGR	CPA des Produktionsbereichs
Gewinnung des Eisenerzes	Gewinnung von Erzen	13
Transporte (Module 2, 4, 6)	Eisenbahnleistungen	60.1
Transporte (Module 2, 4, 6)	Sonst. Landverkehrs- und Transportleistungen in Rohrfernleitungen	60.2 – 60.3
Transporte (Module 2, 4, 6)	Schifffahrtsleistungen	61
Herstellung des Rohstahls aus Eisenerz	Herstellung von Roheisen, Stahl, Rohren und Halbzeug daraus	27.1 – 27.3
Herstellung des Betonstahls aus Rohstahl	Herstellung von Metallernzeugnissen	28
Einbau des Betonstahls	Vorbereitende Baustellenarbeiten, Hoch- und Tiefbauarbeiten	45.1 – 45.2

**Gesteinskörnungspfad (natürliche Gesteinskörnung)**

Zuzuordnendes Modul	Produktionsbereich nach UGR	CPA des Produktionsbereichs
Gewinnung von Steinen und Erden (Sand, Kies und Natursteinen)	Gewinnung von Steinen und Erden, sonstigen Bergbauerzeugnissen	14
Transporte (Module 2, 4)	Eisenbahnleistungen	60.1
Transporte (Module 2, 4)	Sonst. Landverkehrs- und Transportleistungen in Rohrfernleitungen	60.2 – 60.3
Transporte (Module 2, 4)	Schifffahrtsleistungen	61
Verarbeitung von Steinen und Erden (Sand, Kies und Naturstein)	Herstellung von Keramik; Verarbeitung von Steinen und Erden	26.2 – 26.8

**Bindemittelpfad**

Zuzuordnendes Modul	Produktionsbereich nach UGR	CPA des Produktionsbereichs
Gewinnung von Steinen und Erden (Kalkstein)	Gewinnung von Steinen und Erden, sonstigen Bergbauerzeugnissen	14
Transporte (Module 2, 4)	Eisenbahnleistungen	60.1
Transporte (Module 2, 4)	Sonst. Landverkehrs- und Transportleistungen in Rohrfernleitungen	60.2 – 60.3
Transporte (Module 2, 4)	Schifffahrtsleistungen	61
Brennen des Klinkers und Mahlen zu Zement	Herstellung von Keramik; Verarbeitung von Steinen und Erden	26.2 – 26.8
Aufbereiten der Zusatzstoffe	Herstellung von Keramik; Verarbeitung von Steinen und Erden	26.2 – 26.8

**Betonpfad**

Zuzuordnendes Modul	Produktionsbereich nach UGR	CPA des Produktionsbereichs
Herstellung des Betons aus Einsatzstoffen	Herstellung von Keramik; Verarbeitung von Steinen und Erden	26.2 – 26.8
Transporte (Module 2, 4)	Eisenbahnleistungen	60.1
Transporte (Module 2, 4)	Sonst. Landverkehrs- und Transportleistungen in Rohrfernleitungen	60.2 – 60.3
Transporte (Module 2, 4)	Schifffahrtsleistungen	61
Bauleistung (Einbau und Rückbau des Betons)	Vorbereitende Baustellenarbeiten, Hoch- und Tiefbauarbeiten	45.1 – 45.2

**Anhang A.2 Aufschlüsselung der Produktionsbereichsnummern (CPA)**

Produktionsbereich (CPA)	Produktionsbereich (Volltext)
1	Erzeugung von Produkten der Landwirtschaft und Jagd
2	Erzeugung von Produkten der Forstwirtschaft
10	Gewinnung von Kohle und Torf
11	Gewinnung von Erdöl, Erdgas; Erbringung diesbezüglicher Dienstleistungen
13	Gewinnung von Erzen
14	Gewinnung von Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse
14*	wie 14, jedoch eigentlich Produktion von rezyklierten Steinen und Erden, sonstigen rezyklierten Bergbauerzeugnissen
26.2 - 26.8	H. v. Keramik; Verarbeitung von Steinen und Erden
27.1 - 27.3	H. v. Roheisen, Stahl, Rohren und Halbzeug daraus
28	H. v. Metallerzeugnissen
45.1 - 45.2	Vorbereitende Baustellenarbeiten, Hoch- und Tiefbauarbeiten
45.1* - 45.2*	wie 45.1 - 45.2; Abbruchmaterial wird zu Gesteinkörnungen rezykliert
60.1	Eisenbahnleistungen
60.2 - 60.3	Sonst. Landverkehrs- und Transportleistungen in Rohrfernleitungen
61	Schifffahrtsleistungen

### Anhang A.3 Zuordnung der entnommenen Feststoffe zu Produktionsbereichen (2001)

Entnommener Feststoff	Obergruppe	Entnahme in Mio. t	Bezogene Entnahme	Produktionsbereich
Tiere	Biotische Stoffe	0,1	0,01%	1
Pflanzen	Biotische Stoffe	185,1	15,79%	1
Holz	Biotische Stoffe	29,2	2,49%	2
Steinkohle	Energieträger	27,4	2,34%	10
Braunkohle	Energieträger	175,4	14,96%	10
Erdöl	Energieträger	3,4	0,29%	11
Erdgas	Energieträger	15,7	1,34%	11
Erdölgas	Energieträger	0,1	0,01%	11
Energetischer Torf	Energieträger	0,2	0,02%	10
Andere Produkte der Erdöl-, Erdgasgewinnung	Energieträger	0,4	0,03%	11
Eisen- und Manganerze	Erze	0,4	0,03%	13
NE-Erze	Erze	0,0	0,00%	13
Schwefel und Magnetkies	Erze	0,0	0,00%	13
Sonstige Erze	Erze	0,0	0,00%	13
Rohe und ungebrochene Natursteine, unbearbeitete Erden	Steine und Erden	246,5	21,03%	14
Sand und Kies	Steine und Erden	348,5	29,73%	14
Kalk- und Dolomitgestein	Steine und Erden	67,5	5,76%	14
Rohgips und Kreide, Anhydrit	Steine und Erden	4,5	0,38%	14
Tonerdehaltige Rohstoffe	Steine und Erden	37,3	3,18%	14
Quarzit, Feldspat, Pegmatit	Steine und Erden	3,9	0,33%	14
andere rohe und gebrochene Natursteine	Steine und Erden	0,4	0,03%	14
Torf für gärtnerische Zwecke	Steine und Erden	3,4	0,29%	14
Kaliohsalze	Mineralien u. d. Erzeugnisse	7,6	0,65%	14
Stein- und Hütten-, Saline-, Streu- und Auftausalze, Quellsalze	Mineralien u. d. Erzeugnisse	14,2	1,21%	14
Flussspat, Schwerspat und Graphit	Mineralien u. d. Erzeugnisse	0,1	0,01%	14
Schwefel aus der Erdgasgewinnung	Mineralien u. d. Erzeugnisse	1,0	0,09%	14
Sonstige bergbauliche Erzeugnisse	Mineralien u. d. Erzeugnisse	0,0	0,00%	14
<b>Verwertete Entnahme gesamt</b>		<b>1172,1</b>	<b>100,00%</b>	

### Anhang A.4 Zuordnung des Abbaulands auf Produktionsbereiche

Ressource	Flächenäquivalent (Fluss) in km <sup>2</sup>	Anteil am Abbauland	Abbauland (Be- stand) in km <sup>2</sup>	Zuordnung zu Produktionsbe- reich
Bausand, Baukies etc	13,870	42,46%	762,56	14
Quarzsande	0,500	1,53%	27,49	14
Gebrochene Natursteine	3,123	9,56%	171,70	14
Kalk- und Dolomitsteine	1,109	3,39%	60,97	14
Kalkstein für Zement	0,652	2,00%	35,85	14
Tone	1,373	4,20%	75,49	14
Rohkaolin	0,186	0,57%	10,23	14
Gips- und Anhydritstein	0,240	0,73%	13,19	14
Braunkohle, Rheinland	2,180	6,67%	119,85	10
Braunkohle, Lausitz	4,154	12,72%	228,38	10
Braunkohle, Mitteldeutschland	1,007	3,08%	55,36	10
Braunkohle, Helmstedt	0,273	0,84%	15,01	10
Torf	4,000	12,24%	219,92	10
<b>Gesamtabbauland</b>	<b>32,667</b>	<b>100,00%</b>	<b>1796,00</b>	

Anmerkung: Die Daten der Flächenäquivalente und die sich daraus errechnenden Anteile am Abbauland stammen aus dem Jahr 1997. Die Bestandsgröße des Abbaulands bezieht sich auf das Jahr 2001.

Anhang A.5 Zuordnungsmatrix Q<sub>PB</sub> für die BR Deutschland (2001)

Produktionsbereich (CPA)	Energieinput <sup>1)</sup> in TJ	Wassereinsatz <sup>2)</sup> in Mio. m <sup>3</sup>	Abwasser <sup>3)</sup> in Mio. m <sup>3</sup>	GWP-Emissionen <sup>4)</sup> in Mio. t CO <sub>2</sub> -Äquiv.	CO <sub>2</sub> -Emissionen <sup>5)</sup> in Mio. t	NH <sub>3</sub> -Emissionen <sup>6)</sup> in t	SO <sub>2</sub> -Emissionen <sup>7)</sup> in t	NO <sub>x</sub> -Emissionen <sup>8)</sup> in t	NMVOEmissionen <sup>9)</sup> in t	Materialeinsatz <sup>10)</sup> in Mio. t	Abfallaufkommen <sup>11)</sup> in Mio. t	Flächenbedarf <sup>12)</sup> in km <sup>2</sup>
13	313	0	0	0,013	0,013	0	12	17	1	0,4	0,000	0
14	52025	482	451	8,765	8,712	141	1726	15802	3596	734,9	4,577	1226
14*	52025	482	451	8,765	8,712	141	1726	15802	3596	0,0	4,577	69
26.2 - 26.8	259949	173	131	30,791	30,647	203	16818	36699	2842	1,6	1,628	85
27.1 - 27.3	586452	488	422	49,211	48,809	314	75789	74060	4362	1,6	0,000	102
28	117105	49	28	3,851	3,816	86	567	5492	1008	1,6	0,000	268
45.1 - 45.2	209639	48	47	4,026	3,942	218	757	19180	4793	0,0	243,530	704
45.1* - 45.2*	209639	48	47	4,026	3,942	218	757	19180	4793	0,0	0,000	704
60.1	78787	0	0	2,758	2,706	147	636	16316	3941	0,0	0,000	1370
60.2 - 60.3	267165	26	24	16,594	16,23	967	3801	109419	27210	0,0	0,000	447
61	24322	2	1	1,126	1,137	68	267	7867	1913	0,0	0,000	3

<sup>1)</sup> Direkter Energieverbrauch im Inland  
<sup>2)</sup> Wassereinsatz im Inland  
<sup>3)</sup> Abwasser im Inland  
<sup>4)</sup> Direkte Treibhausgas-Emissionen im Inland  
<sup>5)</sup> Direkte CO<sub>2</sub>-Emissionen im Inland  
<sup>6)</sup> Direkte NH<sub>3</sub>-Emissionen im Inland  
<sup>7)</sup> Direkte SO<sub>2</sub>-Emissionen im Inland  
<sup>8)</sup> Direkte NO<sub>x</sub>-Emissionen im Inland  
<sup>9)</sup> Direkte NMVOEmissionen im Inland  
<sup>10)</sup> Materialeinsatz (Verwertete Entnahme von Feststoffen)  
<sup>11)</sup> Abfallaufkommen  
<sup>12)</sup> Siedlungs- und Verkehrsfläche inkl. Abbau- (ungenutzte Siedlungsfläche nicht berücksichtigt)

## Anhang A.6 Produktsystem Recyclingbeton B2T1

### Allokationsmatrix $A_{B2T1}$

Produktionsbereich	Betonstahlpfad	Gesteinskörnungspfad	Bindemittelpfad	Betonpfad
13	2,9%	0,0%	0,0%	0,0%
14	0,0%	0,0%	3,9%	0,0%
14*	0,0%	25,0%	0,0%	0,0%
26.2 - 26.8	0,0%	0,0%	56,1%	0,0%
27.1 - 27.3	2,9%	0,0%	0,0%	0,0%
28	3,0%	0,0%	0,0%	0,0%
45.1 - 45.2	0,0%	0,0%	0,0%	12,7%
45.1* - 45.2*	0,0%	0,0%	0,0%	37,3%
60.1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
60.2 - 60.3	0,0%	0,0%	2,4%	0,3%
61	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

### Sachbilanzdaten des Produktsystems Stahlrecyclingbeton B2T1 und dessen Modulpfade

I/O-Fluss bzw. Bestandsgröße	Pfad				Produktsystem
	Betonstahl	Gesteinskörnung	Bindemittel	Beton	
Energieinput in TJ	20.465	13.005	100.800	105.667	239.937
Wassereinsatz in Mio. m <sup>3</sup>	16	120	117	24	277
Abwasser in Mio. m <sup>3</sup>	13	113	92	24	241
Treibhaus-Emissionen in Mio. t CO <sub>2</sub> -Äquiv.	1,536	2,191	18,027	2,066	23,820
CO <sub>2</sub> -Emissionen in Mio. t	1,524	2,178	17,935	2,023	23,659
NH <sub>3</sub> -Emissionen in t	12	35	143	112	302
SO <sub>2</sub> -Emissionen in t	2.204	431	9.598	391	12.624
NO <sub>x</sub> -Emissionen in t	2.303	3.950	23.865	9.939	40.057
NM VOC Emissionen in t	156	899	2.395	2.483	5.933
Materialeinsatz in Mio. t	0,1	0,0	29,9	0,0	30,0
Abfallaufkommen in Mio. t	0,0	1,1	1,1	31,0	33,2
Flächenbedarf in km <sup>2</sup>	11	17	107	353	489

## Anhang A.7 Produktsystem Recyclingbeton B2T2

### Allokationsmatrix $A_{B2T2}$

Produktionsbereich	Betonstahlpfad	Gesteinskörnungspfad	Bindemittelpfad	Betonpfad
13	2,9%	0,0%	0,0%	0,0%
14	0,0%	0,0%	3,9%	0,0%
14*	0,0%	25,0%	0,0%	0,0%
26.2 - 26.8	0,0%	0,0%	56,1%	0,0%
27.1 - 27.3	2,9%	0,0%	0,0%	0,0%
28	3,0%	0,0%	0,0%	0,0%
45.1 - 45.2	0,0%	0,0%	0,0%	12,7%
45.1* - 45.2*	0,0%	0,0%	0,0%	37,3%
60.1	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
60.2 - 60.3	0,0%	2,2%	2,4%	1,3%
61	0,0%	0,6%	0,0%	0,0%

### Sachbilanzdaten des Produktsystems Stahlrecyclingbeton B2T2 und dessen Modulpfade

I/O-Fluss bzw. Bestandsgröße	Pfad				Produktsystem
	Betonstahl	Gesteinskörnung	Bindemittel	Beton	
Energieinput in TJ	20.465	19.064	100.800	108.205	248.534
Wassereinsatz in Mio. m <sup>3</sup>	16	121	117	24	278
Abwasser in Mio. m <sup>3</sup>	13	113	92	24	242
Treibhaus-Emissionen in Mio. t CO <sub>2</sub> -Äquiv.	1,536	2,563	18,027	2,224	24,350
CO <sub>2</sub> -Emissionen in Mio. t	1,524	2,542	17,935	2,177	24,177
NH <sub>3</sub> -Emissionen in t	12	57	143	121	333
SO <sub>2</sub> -Emissionen in t	2.204	517	9.598	427	12.746
NO <sub>x</sub> -Emissionen in t	2.303	6.403	23.865	10.978	43.549
NM VOC Emissionen in t	156	1.509	2.395	2.742	6.801
Materialeinsatz in Mio. t	0,1	0,0	29,9	0,0	30,0
Abfallaufkommen in Mio. t	0,0	1,1	1,1	31,0	33,2
Flächenbedarf in km <sup>2</sup>	11	28	107	358	504

## Anhang A.8 Produktsystem Recyclingbeton B3T1

### Allokationsmatrix $A_{B3T1}$

Produktionsbereich	Betonstahlpfad	Gesteinskörnungspfad	Bindemittelpfad	Betonpfad
13	2,8%	0,0%	0,0%	0,0%
14	0,0%	9,5%	3,7%	0,0%
14*	0,0%	16,9%	0,0%	0,0%
26.2 - 26.8	0,0%	0,0%	52,1%	0,0%
27.1 - 27.3	2,8%	0,0%	0,0%	0,0%
28	3,0%	0,0%	0,0%	0,0%
45.1 - 45.2	0,0%	0,0%	0,0%	25,3%
45.1* - 45.2*	0,0%	0,0%	0,0%	25,2%
60.1	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
60.2 - 60.3	0,0%	0,4%	2,2%	0,6%
61	0,0%	0,2%	0,0%	0,0%

### Sachbilanzdaten des Produktsystems Stahlrecyclingbeton B3T1 und dessen Modulpfade

I/O-Fluss bzw. Bestandsgröße	Pfad				Produkt-system
	Betonstahl	Gesteinskörnung	Binde-mittel	Beton	
Energieinput in TJ	20.167	14.922	93.434	107.632	236.155
Wassereinsatz in Mio. m <sup>3</sup>	15	127	108	24	275
Abwasser in Mio. m <sup>3</sup>	13	119	85	24	241
Treibhaus-Emissionen in Mio. t CO <sub>2</sub> -Äquiv.	1,514	2,384	16,723	2,140	22,761
CO <sub>2</sub> -Emissionen in Mio. t	1,502	2,368	16,639	2,095	22,604
NH <sub>3</sub> -Emissionen in t	11	41	132	116	301
SO <sub>2</sub> -Emissionen in t	2.172	472	8.909	407	11.959
NO <sub>x</sub> -Emissionen in t	2.269	4.650	22.056	10.388	39.363
NMVOC Emissionen in t	154	1.068	2.198	2.595	6.015
Materialeinsatz in Mio. t	0,1	69,5	27,7	0,0	97,3
Abfallaufkommen in Mio. t	0,0	1,2	1,0	61,7	63,9
Flächenbedarf in km <sup>2</sup>	11	130	99	359	598

## Anhang A.9 Produktsystem Recyclingbeton B3T2

### Allokationsmatrix $A_{B3T2}$

Produktionsbereich	Betonstahlpfad	Gesteinskörnungspfad	Bindemittelpfad	Betonpfad
13	2,8%	0,0%	0,0%	0,0%
14	0,0%	9,5%	3,7%	0,0%
14*	0,0%	16,9%	0,0%	0,0%
26.2 - 26.8	0,0%	0,0%	52,1%	0,0%
27.1 - 27.3	2,8%	0,0%	0,0%	0,0%
28	3,0%	0,0%	0,0%	0,0%
45.1 - 45.2	0,0%	0,0%	0,0%	25,3%
45.1* - 45.2*	0,0%	0,0%	0,0%	25,2%
60.1	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
60.2 - 60.3	0,0%	2,2%	2,2%	1,3%
61	0,0%	0,6%	0,0%	0,0%

### Sachbilanzdaten des Produktsystems Stahlrecyclingbeton B3T2 und dessen Modulpfade

I/O-Fluss bzw. Bestandsgröße	Pfad				Produkt-system
	Betonstahl	Gesteinskörnung	Binde-mittel	Beton	
Energieinput in TJ	20.167	19.772	93.434	109.325	242.698
Wassereinsatz in Mio. m <sup>3</sup>	15	128	108	25	276
Abwasser in Mio. m <sup>3</sup>	13	119	85	24	242
Treibhaus-Emissionen in Mio. t CO <sub>2</sub> -Äquiv.	1,514	2,682	16,723	2,245	23,165
CO <sub>2</sub> -Emissionen in Mio. t	1,502	2,660	16,639	2,198	22,998
NH <sub>3</sub> -Emissionen in t	11	59	132	122	325
SO <sub>2</sub> -Emissionen in t	2.172	540	8.909	431	12.052
NO <sub>x</sub> -Emissionen in t	2.269	6.618	22.056	11.081	42.025
NMVOC Emissionen in t	154	1.558	2.198	2.767	6.677
Materialeinsatz in Mio. t	0,1	69,5	27,7	0,0	97,3
Abfallaufkommen in Mio. t	0,0	1,2	1,0	61,7	63,9
Flächenbedarf in km <sup>2</sup>	11	139	99	361	610

## Anhang A.10 Matrix Wirkungsabschätzung

Verursacher	Energieinput <sup>1)</sup> in TJ	Wassereinsatz <sup>2)</sup> in Mio. m <sup>3</sup>	Abwasser <sup>3)</sup> in Mio. m <sup>3</sup>	GWP-Emissionen <sup>4)</sup> in Mio. t CO <sub>2</sub> -Äquiv.	CO <sub>2</sub> -Emissionen <sup>5)</sup> in Mio. t	NH <sub>3</sub> -Emissionen <sup>6)</sup> in t	SO <sub>2</sub> -Emissionen <sup>7)</sup> in t	NO <sub>x</sub> -Emissionen <sup>8)</sup> in t	NM-VOC-Emissionen <sup>9)</sup> in t	Materialeinsatz <sup>10)</sup> in Mio. t	Abfallaufkommen <sup>11)</sup> in Mio. t	Flächenbedarf <sup>12)</sup> in km <sup>2</sup>
Alle PB	10533383	40668	33022	764,831	658,766	597965	564954	1094089	1362856	1172,1	330,131	19354
Privater Konsum	4071414	3224	3275	218,468	212,135	9127	75297	500967	245744	0,0	48,836	24799
Summe	14604797	43892	36297	983,299	870,901	607092	640251	1595056	1608600	1172,1	378,967	44153
B0	239709	275	241	22,975	22,813	315	11981	40889	6400	221,6	125,281	801
B0 <sup>13)</sup>	2,3%	0,7%	0,7%	3,0%	3,5%	0,1%	2,1%	3,7%	0,5%	18,9%	37,9%	4,1%
BIT1 <sup>13)</sup>	2,3%	0,7%	0,7%	3,0%	3,4%	0,1%	2,1%	3,7%	0,5%	14,5%	30,2%	3,7%
BIT1 <sup>14)</sup>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,1%	0,0%	-4,4%	-7,7%	-0,4%
BIT2 <sup>13)</sup>	2,3%	0,7%	0,7%	3,0%	3,5%	0,1%	2,1%	3,8%	0,5%	14,5%	30,2%	3,7%
BIT2 <sup>14)</sup>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	-4,4%	-7,7%	-0,4%
B2T1 <sup>13)</sup>	2,3%	0,7%	0,7%	3,1%	3,6%	0,1%	2,2%	3,7%	0,4%	2,6%	10,1%	2,5%
B2T1 <sup>14)</sup>	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,1%	0,0%	0,1%	-0,1%	0,0%	-16,3%	-27,9%	-1,6%
B2T2 <sup>13)</sup>	2,4%	0,7%	0,7%	3,2%	3,7%	0,1%	2,3%	4,0%	0,5%	2,6%	10,1%	2,6%
B2T2 <sup>14)</sup>	0,1%	0,0%	0,0%	0,2%	0,2%	0,0%	0,1%	0,2%	0,0%	-16,3%	-27,9%	-1,5%
B3T1 <sup>13)</sup>	2,2%	0,7%	0,7%	3,0%	3,4%	0,1%	2,1%	3,6%	0,4%	8,3%	19,4%	3,1%
B3T1 <sup>14)</sup>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,1%	0,0%	-10,6%	-18,6%	-1,0%
B3T2 <sup>13)</sup>	2,3%	0,7%	0,7%	3,0%	3,5%	0,1%	2,1%	3,8%	0,5%	8,3%	19,4%	3,2%
B3T2 <sup>14)</sup>	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	-10,6%	-18,6%	-1,0%

<sup>1) - 12)</sup> siehe Tabelle Zuordnungsmatrix  $Q_{MP}$

<sup>13)</sup> Anteil am I/O-Fluss bzw. Flächenbedarf aller Produktionsbereiche (in %)

<sup>14)</sup> Differenz zwischen dem Anteil eines Szenarios und dem Anteil des Referenzsystems an allen Produktionsbereichen (in %-Punkten)

# Anhang B Betonrezepte und Gesteinskörnungen

## Anhang B.1 Prüfung der Gesteinskörnungen

MATERIALPRÜFUNGSAMT FÜR DAS BAUWESEN  
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN

**Recyclingzuschlag "Betonbruch" Stand 20.06.2001**

**Ergebnisse der Prüfung nach DIN 4226 T.3, Pos.Nr. in Klammern**

Ergebnisse, die der Norm nicht entsprechen, sind schattiert

**Kornzusammensetzung (3.1) und abschlämmbare Bestandteile (3.6.1.2)**

Durchgänge bei Siebweiten 0,063 und 0,125 durch Naßsiebung bestimmt

Siebweite (in mm)	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
Körnung	Durchgänge in M-%									
<b>0/4a</b>	<b>2,3</b>	<b>4,8</b>	<b>8,9</b>	<b>19,9</b>	<b>39,1</b>	<b>65,5</b>	<b>97,4</b>	<b>100</b>		
Anforderung	<4,0			<60		(55-85)	>90	100		
<b>4/8</b>		<b>0,2</b>	<b>0,3</b>			<b>0,8</b>	<b>6,3</b>	<b>93,6</b>	<b>100</b>	
Anforderung	<2,0						<15	>90	100	
<b>8/16</b>		<b>0,4</b>	<b>0,6</b>				<b>1,2</b>	<b>6,1</b>	<b>97,6</b>	<b>100</b>
Anforderung	<0,5		<3,0					<15	>90	100

Körnung	0/4a	4/8	8/16							

**Stoffe organischen Ursprungs (3.6.2.1), Farbe der Natronlauge**

hellgelb (Holzreste)	x									
braun										

**Kornrohichte (3.4.1.2)**

(g/cm <sup>3</sup> )	2,61	2,61	2,60							
----------------------	------	------	------	--	--	--	--	--	--	--

**Wasseraufnahme in Masse-%**

in 10 Min.	2,06	5,02*	3,87							
Wassersättigung	2,50	5,80	4,00							

\*Einzelwerte 5.44 und 4.61 % !

**Eigenfeuchte ( "Oberflächen" - und Kernfeuchte)**

Masse %	5,0	3,6	2,2							
---------	-----	-----	-----	--	--	--	--	--	--	--

**Bemerkungen:**

MATERIALPRÜFUNGSAMT FÜR DAS BAUWESEN  
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN

**Recycling-Zuschlag "Ziegelbruch" Stand 19.07.2001**

**Ergebnisse der Prüfung nach DIN 4226 T.3, Pos.Nr. in Klammern**

Ergebnisse, die der Norm nicht entsprechen, sind schattiert

**Kornzusammensetzung (3.1) und abschlämmbare Bestandteile (3.6.1.2)**

Durchgänge bei Siebweiten 0,063 und 0,125 durch Naßsiebung bestimmt

Siebweite (in mm)	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
Körnung	Durchgänge in M-%									
<b>0/4a</b>	<b>0,6</b>	<b>1,3</b>	<b>4,2</b>	<b>10,6</b>	<b>24,4</b>	<b>52,1</b>	<b>92,9</b>	<b>100</b>		
Anforderung	<4,0			<60		(55-85)	>90	100		
<b>4/8</b>						<b>2,0</b>	<b>14,0</b>	<b>98,6</b>	<b>100</b>	
Anforderung	<2,0						<15	>90	100	
<b>8/16</b>							<b>1,3</b>	<b>12,7</b>	<b>100,0</b>	<b>100</b>
Anforderung	<0,5							<15	>90	100

Körnung	0/4a	4/8	8/16							

**Wasseraufnahme in Masse-% (DIN 52 103)**

in 10 Min.	11,8	9,3	8,5							
in 24 Std.		11,0	10,1							

**Kornrohichte (3.4.1.2)**

(g/cm <sup>3</sup> )	2,50	2,54	2,48							

**Eigenfeuchte**

Masse %	1,13									

**Bemerkungen:**

Die Wasseraufnahmen wurde an 2 Sandproben mittels Föhn "getrocknet" (Temp. max. 25°C).

4/8 und 8/16 nach DIN 52 103 mit einem Baumwolltuch Oberflächentrocken abgerieben.

Der Verfahrensverlust beim "trocknen" der Proben liegt etwa zwischen 0,5 und 1%.

MATERIALPRÜFUNGSAMT FÜR DAS BAUWESEN  
DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN

**Recycling-Zuschlag "Kalksandsteinbruch" Stand 19.07.2001**

**Ergebnisse der Prüfung nach DIN 4226 T.3, Pos.Nr. in Klammern**

Ergebnisse, die der Norm nicht entsprechen, sind schattiert

**Kornzusammensetzung (3.1) und abschlämmbare Bestandteile (3.6.1.2)**

Durchgänge bei Siebweiten 0,063 und 0,125 durch Naßsiebung bestimmt

Siebweite (in mm)	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
Körnung	Durchgänge in M-%									
<b>0/4a</b>	<b>1,2</b>	<b>1,8</b>	<b>6,0</b>	<b>19,6</b>	<b>49,1</b>	<b>78,1</b>	<b>97,5</b>	<b>100</b>		
Anforderung	<4,0			<60		(55-85)	>90	100		
<b>4/8</b>						<b>5,3</b>	<b>16,0</b>	<b>98,7</b>	<b>100</b>	
Anforderung	<2,0						<15	>90	100	
<b>8/16</b>							<b>2,1</b>	<b>11,1</b>	<b>99,7</b>	<b>100</b>
Anforderung	<0,5							<15	>90	100

Körnung	0/4a	4/8	8/16							

**Wasseraufnahme in Masse-% (DIN 52 103)**

in 10 Min.	6,1	8,7	9,0							
in 24 Std.		9,1	9,7							

**Kornrohichte (3.4.1.2)**

(g/cm <sup>3</sup> )	2,51	2,47	2,40							
----------------------	------	------	------	--	--	--	--	--	--	--

**Eigenfeuchte**

Masse %	2,10									
---------	------	--	--	--	--	--	--	--	--	--

**Bemerkungen:**

Die Wasseraufnahmen wurde an 2 Sandproben mittels Föhn "getrocknet" (Temp. max. 25°C).  
4/8 und 8/16 nach DIN 52 103 mit einem Baumwolltuch Oberflächentrocken abgerieben.  
Der Verfahrensverlust beim "trocknen" der Proben liegt etwa zwischen 0,5 und 1%.

## Anhang B.2 Betonrezepte

Mischung	Datum der Betonage	Zement CEM I 32,5 R [kg/m <sup>3</sup> ]	Flugasche [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasser		Fließmittel [g/kg <sub>mm</sub> ]	Gesteinskörnung (GK) [kg/m <sup>3</sup> ]												Errechnete Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]					
				Grund [kg/m <sup>3</sup> ]	Zusatz [kg/m <sup>3</sup> ]		Natürliche GK			Rezyklierter Betonbruch			Rezyklierter Zielbruch			Rezyklierter Kalksandstein				Summe				
							0/4	4/8	8/16	0/4	4/8	8/16	0/4	4/8	8/16	0/4	4/8	8/16			0/4	4/8	8/16	
M1	27.06.2001	382	-	210	19	1,3	-	-	-	681	425	593	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1699	2310
M1a	12.07.2001	267	115	210	-	3,7	-	-	-	681	425	593	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1699	2291
M2	12.07.2001	237	101	186	-	4,1	652	-	-	-	644	525	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1821	2345
M3	26.07.2001	265	114	208	20	3,7	-	-	-	385	171	298	147	67	114	222	97	165	1666	2273	-	-	1666	2273
M4	26.07.2001	272	117	214	40	5,1	-	-	-	286	115	171	240	108	185	267	105	153	1630	2273	-	-	1630	2273
A0	-	245 I	-	210	-	-	990	693	297	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1980	2435	-	-	1980	2435
A1	25.06.2002	246	105	200	-	12,1	-	-	-	701	438	611	-	-	-	-	-	-	1750	2301	-	-	1750	2301
A2	03.07.2002	204	88	180	-	12,0	677	-	-	-	668	544	-	-	-	-	-	-	1889	2361	-	-	1889	2361
A3	10.07.2002	255	109	246	-	9,1	-	-	-	369	164	286	141	64	109	213	93	158	1597	2207	-	-	1597	2207
A4	31.07.2002	272	117	234	5	14,2	-	-	-	286	115	171	240	108	185	267	105	153	1630	2258	-	-	1630	2258
B0	-	245 I	-	210	-	-	990	693	297	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1980	2435	-	-	1980	2435
B1	10.09.2002	246	105	200	-	10,6	-	-	-	701	438	611	-	-	-	-	-	-	1750	2301	-	-	1750	2301
B2	15.10.2002	204	88	180	-	12,7	677	-	-	-	668	544	-	-	-	-	-	-	1889	2361	-	-	1889	2361
B3	08.10.2002	255	109	246	-	12,8	-	-	-	385	171	299	269	122	208	222	-	-	1676	2286	-	-	1676	2286
B4	07.08.2002	272	117	234	14	14,3	-	-	-	286	115	171	240	108	185	267	105	153	1630	2267	-	-	1630	2267
C0	-	245 I	-	210	-	-	990	693	297	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1980	2435	-	-	1980	2435
C1	05.03.2002	246	105	210	10	7,1	-	-	-	701	438	611	-	-	-	-	-	-	1750	2321	-	-	1750	2321
C2	19.03.2002	204	88	180	5	8,5	677	-	-	-	668	544	-	-	-	-	-	-	1889	2366	-	-	1889	2366
C3	27.03.2002	255	109	246	-	9,0	-	-	-	369	164	286	141	64	109	213	93	158	1597	2207	-	-	1597	2207
C4	07.04.2002	272	117	234	-	12,7	-	-	-	286	115	171	240	108	185	267	105	153	1630	2253	-	-	1630	2253
D0	-	245 I	-	210	-	-	990	693	297	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1980	2435	-	-	1980	2435
D1	05.07.2001	382	-	210	-	3,6	-	-	-	681	425	593	-	-	-	-	-	-	1699	2291	-	-	1699	2291
D2	01.08.2001	338	-	186	4	8,3	652	-	-	-	644	525	-	-	-	-	-	-	1821	2349	-	-	1821	2349
D3	05.12.2001	255	109	246	-	9,0	-	-	-	369	164	286	141	64	109	213	93	158	1597	2207	-	-	1597	2207
D4	17.12.2001	272	117	234	19	9,1	-	-	-	286	115	171	240	108	185	267	105	153	1630	2272	-	-	1630	2272

<sup>1)</sup> In der Mischung 0 (Referenz) wurde PZ 450 F (entspricht in etwa CEM I 42,5) benutzt.

# Anhang C Ergebnisse der Nebenversuche

## Anhang C.1 Nebenversuche Bewehrungsstahl

Stabdurchmesser [mm]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]	Rp 0,2 [N/mm <sup>2</sup> ]	As [mm <sup>2</sup> ]
16	197000	563,35	200,19
28	207000	566,35	605,45

**MPA-BAU**

Standardprotokoll

Stahllabor

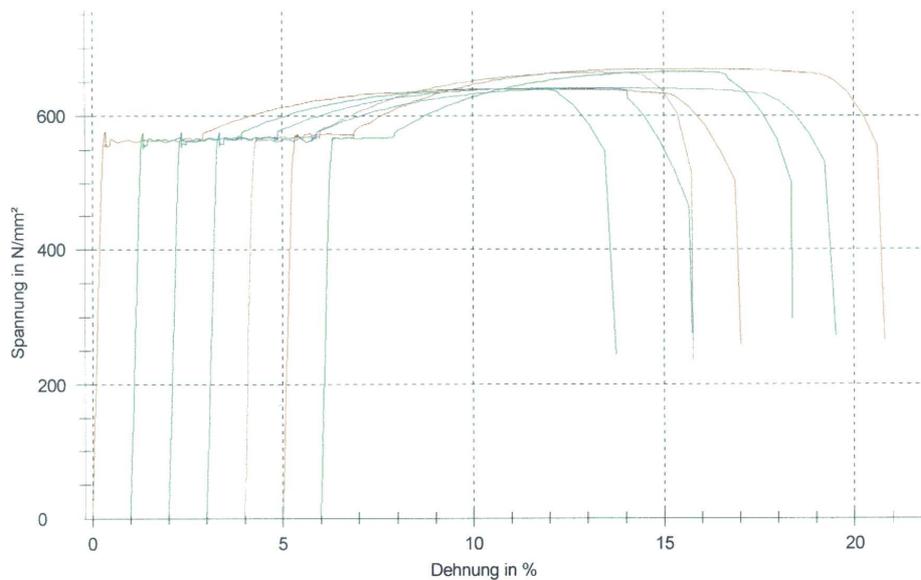
### Parametertabelle:

Kunde : Bay-Forrest  
 Prüfer : Schön  
 Prüfnorm : EN 10002 T1  
 Material : BSt-500-S  
 Datum : 16.06.2001

### Ergebnisse:

Legende	Nr	E-Modul kN/mm <sup>2</sup>	Rp 0,2 N/mm <sup>2</sup>	ReH N/mm <sup>2</sup>	Rm N/mm <sup>2</sup>	Agt %	S0 mm <sup>2</sup>	L0 mm	Rm / Rp0,2	Rm / Re
	1	193,3	564,44	576,09	639,97	10,51	200,79	120,01	1,134	1,11
	2	194,3	565,97	575,03	640,38	10,29	200,64	120,01	1,131	1,11
	3	197,3	558,58	576,77	641,94	10,74	199,57	120,02	1,149	1,11
	4	204,4	564,39	576,23	641,65	10,67	199,74	120,02	1,137	1,11
	5	211,3	564,89	568,42	664,58	9,42	605,77	120,00	1,176	1,17
	6	202,3	567,56	572,32	669,97	10,42	605,60	120,01	1,180	1,17
	7	207,2	566,61	-	665,92	9,44	604,98	120,00	1,175	-

### Seriengrafik:



223505-16.ZSE

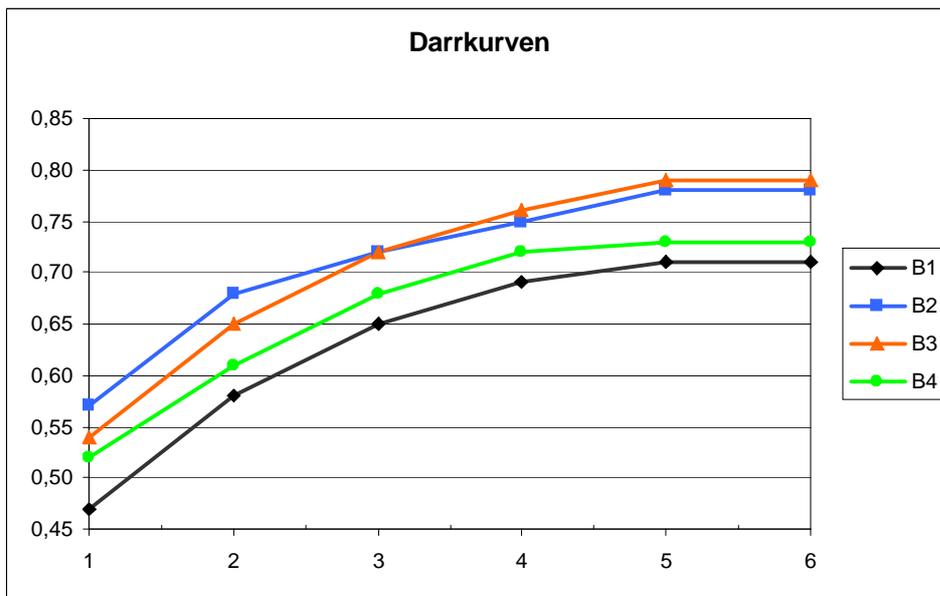
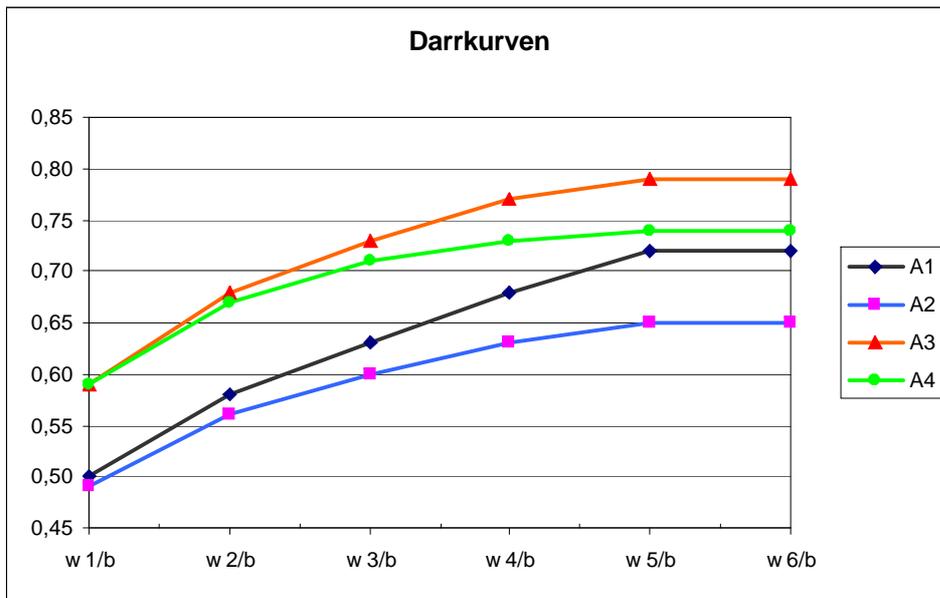
## Anhang C.2 Nebenversuche Frischbeton

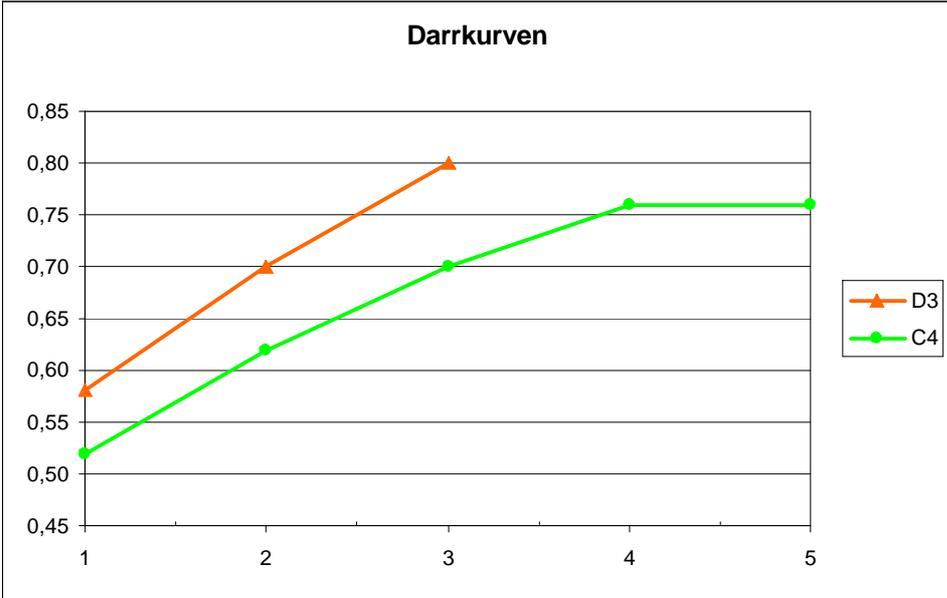
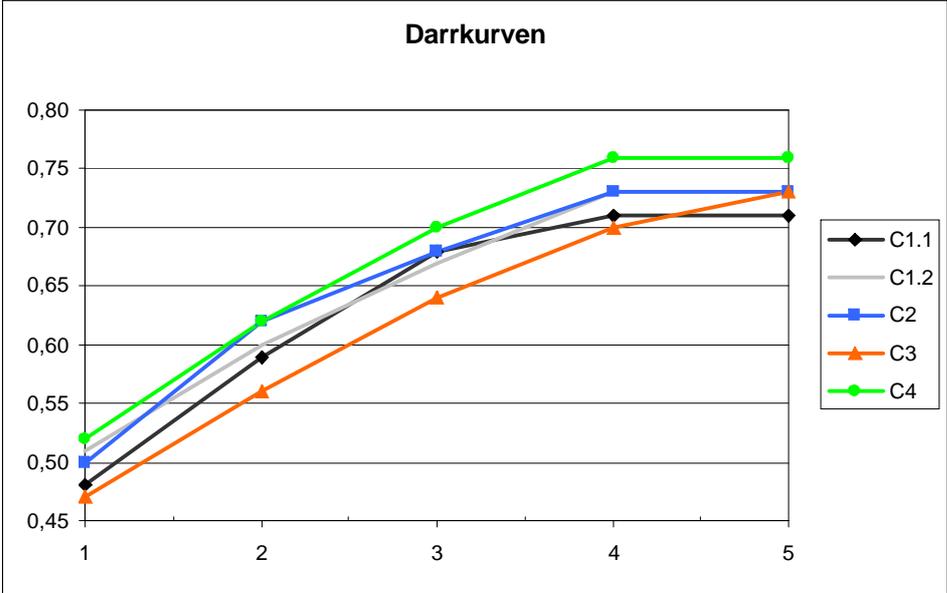
### Übersicht der Frischbeton-Nebenversuche

Mischung	Luftporen- gehalt [%]	Rohdichte (gemessen) [kg/m <sup>3</sup> ]	Raumtem- peratur [°C]	Frischbeton- Temperatur [°C]
M1	2,3	2,22	19,0	20,0
M1a	1,1	2,21	21,5	21,5
M2	1,1	2,30	22,0	22,0
M3	2,4	2,14	22,0	21,0
M4	3,4	2,13	23,0	23,0
A1	1,6	2,21	21,5	23,0
A2	1,6	2,30	21,5	21,5
A3	2,4	2,14	22,0	22,0
A4	4,0	2,09	21,0	21,0
B1	2,6	2,19	20,0	20,0
B2	1,2	2,29	19,0	19,0
B3	3,4	2,09	18,5	19,5
B4	3,9	2,11	22,0	20,5
C1	1,4	2,22	19,0	19,0
C2	1,6	2,29	21,0	20,5
C3	2,8	2,13	19,0	20,0
C4	2,8	2,12	20,0	20,0
D1	1,3	2,23	21,0	21,0
D2	1,5	2,33	24,0	24,5
D3	1,4	2,16	20,0	19,0
D4	2,4	2,15	18,5	20,0

Mischung	Ausbreitmaß (mittel) [cm]	Ausbreitmaß- Klasse	Fließmittel [g/kg <sub>bm</sub> ]	W/B-Wert <sup>1</sup> aus Darrung [-]	erwarteter W/B-Wert
M1	39	F2	1,3	-	0,60
M1a	46	F3	3,7	0,74	0,67
M2	43	F3	4,1	0,82	0,67
M3	40	F2	3,7	0,71	0,73
M4	37	F2	5,1	0,61	0,80
A1	42	F3	12,1	0,71	0,69
A2	41	F2	12,0	0,68	0,75
A3	44	F3	9,1	0,83	0,82
A4	34	F1	14,2	0,82	0,75
B1	39	F2	10,6	0,71	0,69
B2	50	F4	12,7	0,83	0,75
B3	42	F3	12,8	0,79	0,82
B4	37	F2	14,3	0,78	0,78
C1	42	F3	7,1	0,77	0,76
C2	38	F2	8,5	0,76	0,77
C3	43	F3	9,0	0,82	0,82
C4	42	F3	12,7	0,76	0,73
D1	41	F2	3,6	0,85	0,55
D2	44	F3	8,3	0,72	0,56
D3	52	F4	9,0	0,83	0,82
D4	39	F2	9,1	0,76	0,79
<b>Bemerkung 1:</b>	Für die Vorversuche "M" und die Mischungen für die Versuchsreihe "D" liegen nur Einzeldaten aus der Darrung vor.				

## Darrkurven der Reihen A, B, C und D (teilw.)





## Anhang C.3 Nebenversuche Festbeton

### Übersicht der Druck- und Zugfestigkeiten

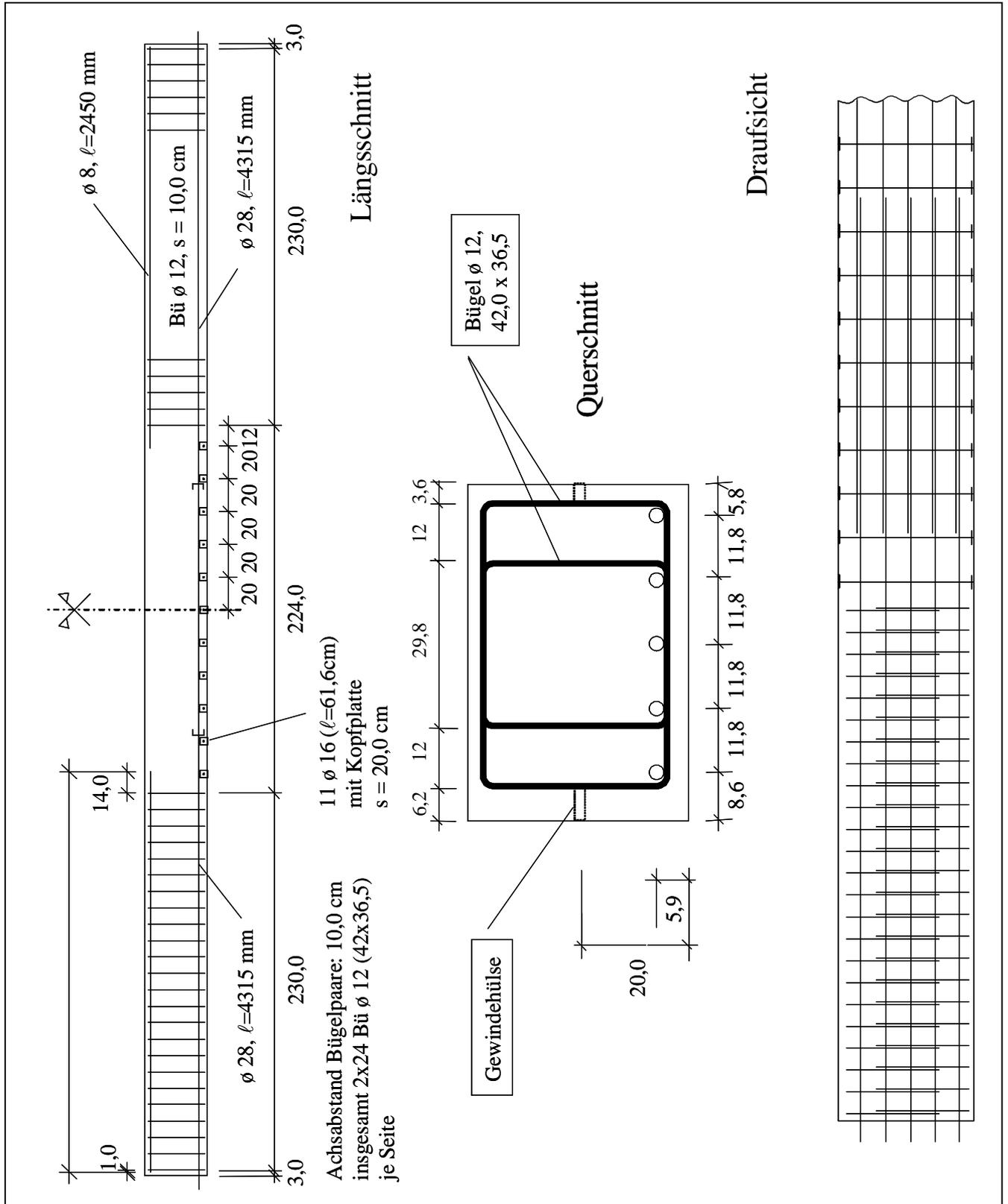
Mischung	Datum der Prüfung	Druckfestigkeit $f_{ci,cube150}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		Druckfestigkeit <sup>1</sup> $f_{cm,cube150}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		Spaltzugfestigkeit $f_{ctm,sp,mess}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		Erwartetes $f_{ctm,sp,erwM}$ aus Messwert [N/mm <sup>2</sup> ]	Erwartetes $f_{ctm,sp,erwN}$ aus Normwert [N/mm <sup>2</sup> ]
		DIN	Bauteil	DIN	Bauteil	DIN	Bauteil		
M1	25.07.2001	39,7	-	40,5	-	-	-	2,7	2,4
M1a	09.08.2001	36,4	-	37,7	-	2,2	-	2,5	2,3
M2	09.08.2001	41,5	-	41,9	-	2,8	-	2,9	2,5
M3	23.08.2001	39,3	-	40,1	-	-	-	2,6	2,3
M4	23.08.2001	33,7	-	34,6	-	-	-	2,3	2,3
A0	-	-	-	27,8	27,0	2,3	2,6	2,5	2,8
A1	23.07.2002	27,7	27,1	28,1	28,1	2,7	2,6	2,1	2,4
A2	31.07.2002	25,8	26,1	26,9	26,7	2,0	2,0	2,2	2,5
A3	07.08.2002	25,4	24,7	25,5	25,1	2,1	1,8	1,7	2,1
A4	28.08.2002	27,9	27,9	29,1	29,3	2,0	1,8	2,0	2,2
B0	-	-	-	30,1	28,8	2,4	2,6	2,6	2,8
B1	08.10.2002	23,6	23,2	24,6	24,0	2,0	1,7	1,9	2,4
B2	12.11.2002	22,2	21,9	23,2	23,1	1,8	1,6	2,0	2,5
B3	05.11.2002	22,5	21,4	23,0	22,6	1,5	1,5	1,8	2,3
B4	04.09.2002	29,0	28,6	29,2	29,9	2,2	2,1	2,1	2,3
C0	-	-	-	27,8	27,7	2,4	2,5	2,5	2,8
C1	02.04.2002	24,0	22,8	24,8	23,2	1,4	1,2	2,0	2,4
C2	16.04.2002	28,0	27,0	28,6	27,6	2,3	2,1	2,3	2,6
C3	24.04.2002	24,5	26,0	25,6	26,4	1,7	1,6	1,7	2,1
C4	05.05.2002	26,5	25,8	27,1	26,8	1,9	1,7	1,9	2,2
D0	-	-	-	28,4	26,9	2,4	2,7	2,5	2,8
D1	02.08.2001	38,9	38,2	40,9	40,5	2,6	2,5	2,7	2,3
D2	29.08.2001	46,8	48,3	48,5	49,8	2,7	2,8	3,2	2,5
D3	02.01.2002	32,3	29,0	32,8	29,9	2,3	1,9	2,0	2,1
D4	14.01.2002	28,8	29,2	30,2	30,3	2,9	2,3	2,1	2,3
<b>Bemerkung 1:</b>	Für die Mischungen 0 (Referenz), D1, D2 und M1 - M4 wurden die Messwerte auf die Würfeldruckfestigkeiten (150mm) umgerechnet.								

## Übersicht der E-Moduln

Mischung	Datum der Prüfung	E-Modul $E_{cm,mess}$ [N/mm <sup>2</sup> ]		Erwartetes $E_{cm,erwM}$ aus Messwert <sup>2</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	Erwartetes $E_{cm,erwN}$ aus Normwert <sup>3</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	Überschreitung $E_{cm,mess}$ (DIN) durch $E_{cm,erwM}$	Überschreitung $E_{cm,mess}$ (DIN) durch $E_{cm,erwN}$
		DIN <sup>1</sup>	Bauteil				
M1	25.07.2001	-	-	26900	25300	-	-
M1a	09.08.2001	-	-	25900	24900	-	-
M2	09.08.2001	-	-	28100	26100	-	-
M3	23.08.2001	-	-	23500	22100	-	-
M4	23.08.2001	-	-	21500	21300	-	-
A0	-	28800	-	-	-	-	-
A1	23.07.2002	19600	21100	23700	25100	17%	22%
A2	31.07.2002	21500	21700	24600	26400	13%	19%
A3	07.08.2002	17700	17800	19000	20900	7%	15%
A4	28.08.2002	17100	16900	20100	21000	15%	19%
B0	-	28800	-	-	-	-	-
B1	08.10.2002	15500	14900	22700	25100	32%	38%
B2	12.11.2002	16800	15900	23400	26400	28%	36%
B3	05.11.2002	13700	13700	19700	22400	30%	39%
B4	04.09.2002	14000	15500	20300	21200	31%	34%
C0	-	28800	-	-	-	-	-
C1	02.04.2002	17900	18200	23100	25600	23%	30%
C2	16.04.2002	22100	21900	25200	26600	12%	17%
C3	24.04.2002	17300	17600	19100	20900	9%	17%
C4	05.05.2002	15500	14500	19500	21000	21%	26%
D0	-	28800	-	-	-	-	-
D1	02.08.2001	22800	21200	26600	24900	14%	8%
D2	29.08.2001	32600	30700	29600	26200	-10%	-24%
D3	02.01.2002	24400	22500	20700	20900	-18%	-17%
D4	14.01.2002	23600	22300	20600	21300	-15%	-11%
<b>Bemerkung 1:</b>	Für die Mischungen 0 (Referenz) liegen keine E-Modul Prüfungen vor. Es wird der sehr hohe Normwert benutzt.						
<b>Bemerkung 2:</b>	E-Modul nach Näherung (Roos) unter Verwendung der Druckfestigkeit aus den Nebenversuchen						
<b>Bemerkung 3:</b>	E-Modul nach Näherung (Roos) unter Verwendung der Druckfestigkeit für C20/25 nach Norm (28 N/mm <sup>2</sup> )						

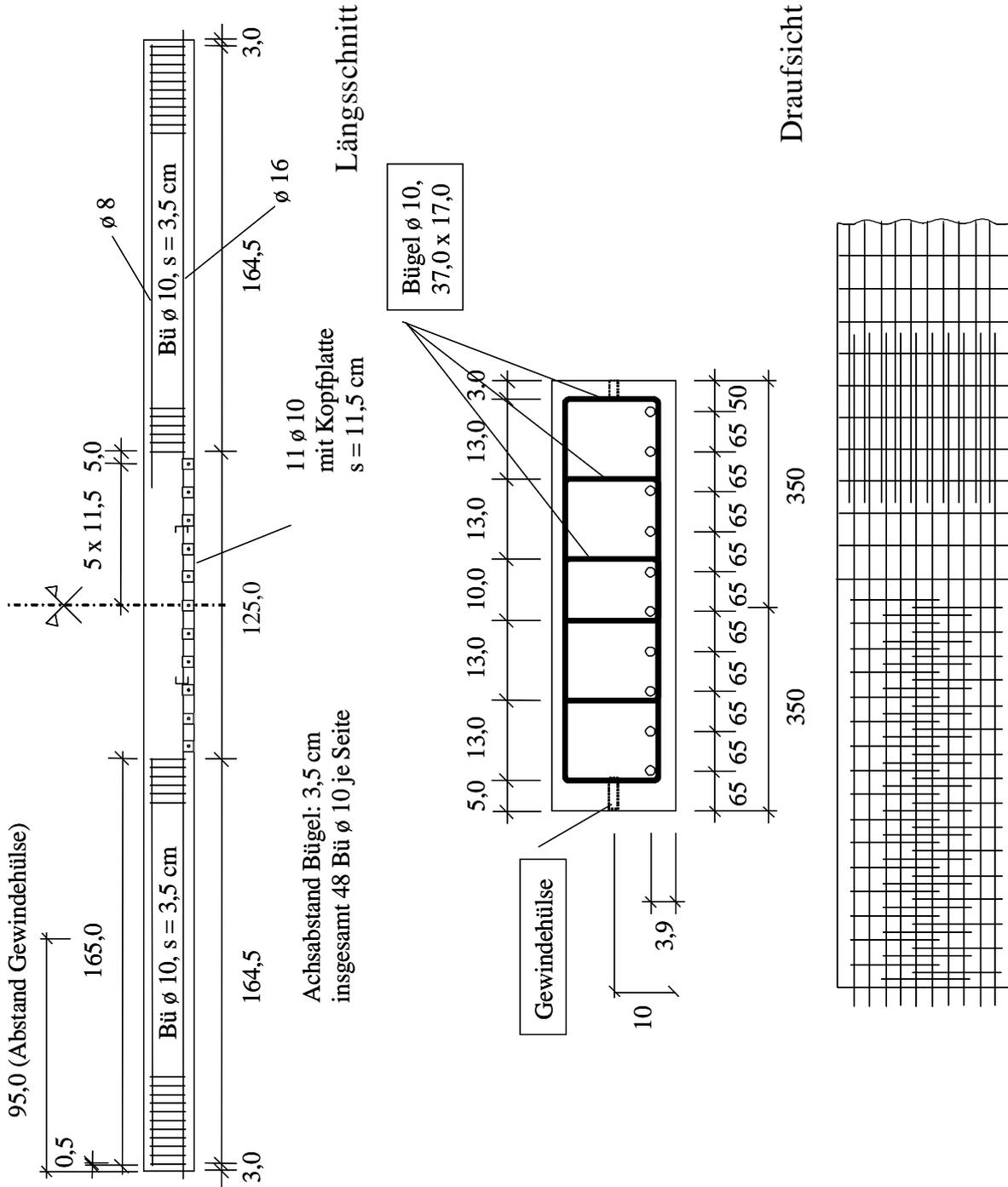
# Anhang D Schal- und Bewehrungspläne

## Anhang D.1 Schal- und Bewehrungsplan Grundform A



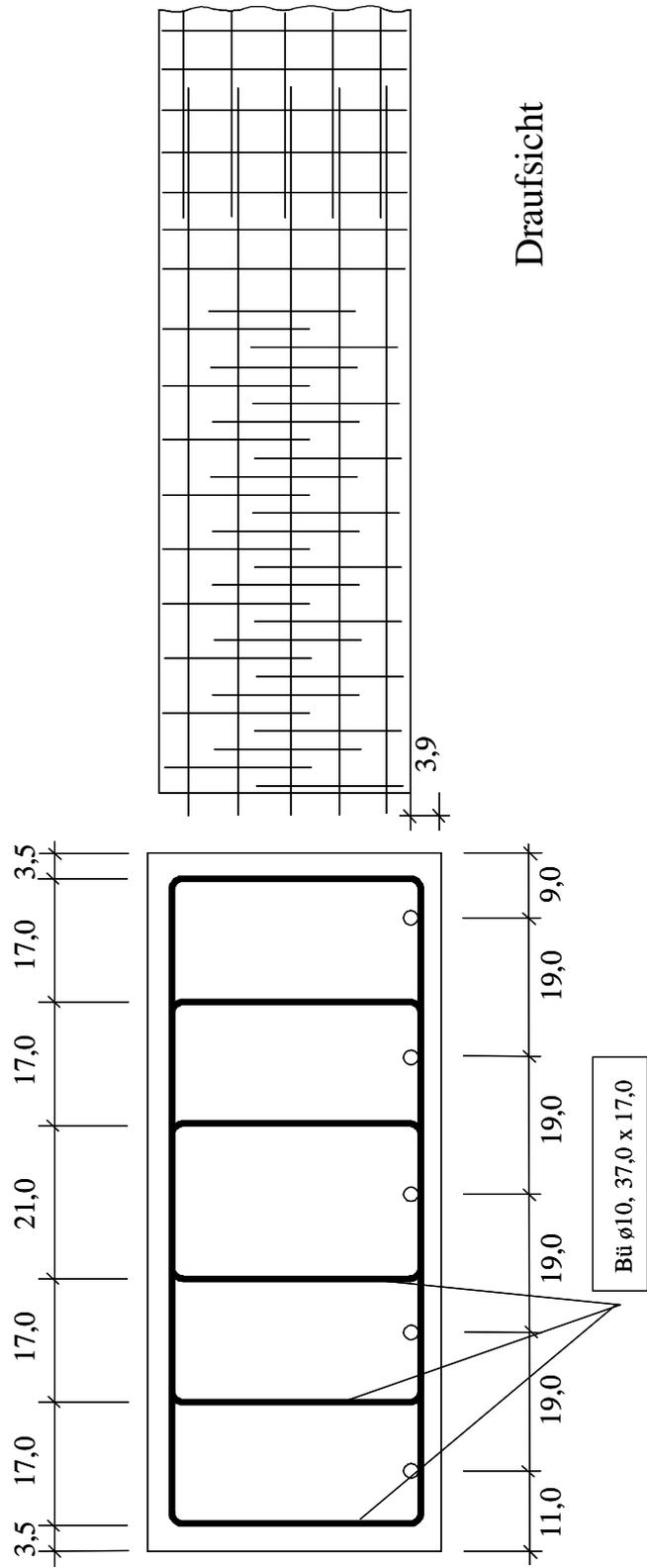
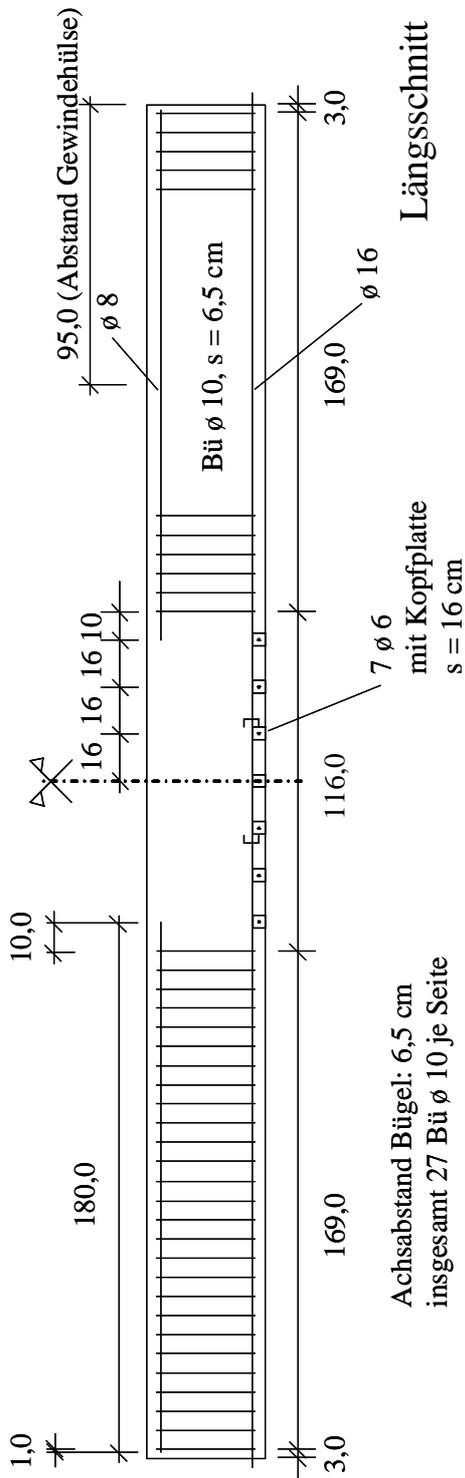


**Anhang D.3 Schal- und Bewehrungsplan Grundform C**



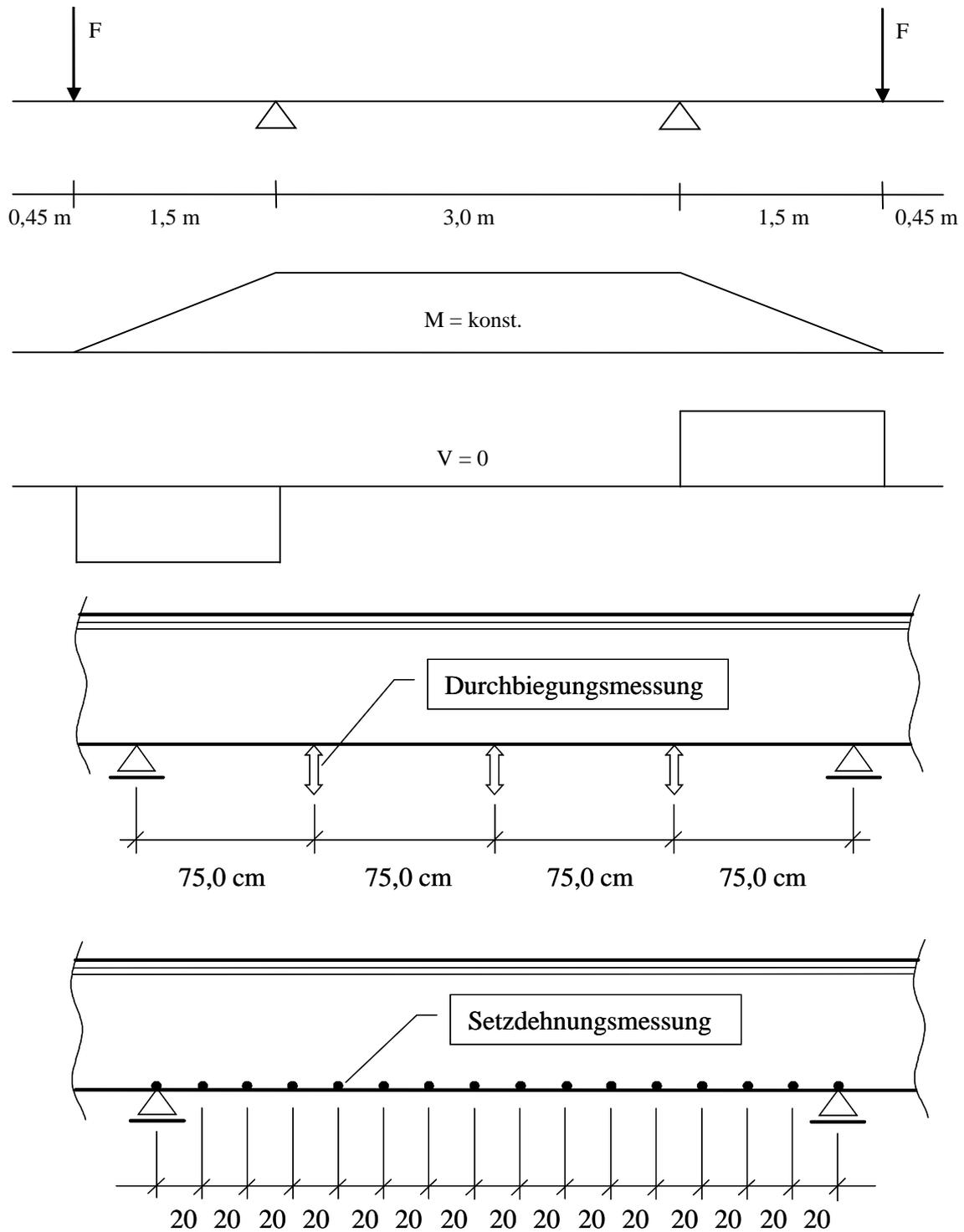
Hinweis: konstanter Bügelabstand  $s=3,5\text{cm}$

**Anhang D.4 Schal- und Bewehrungsplan Grundform D**

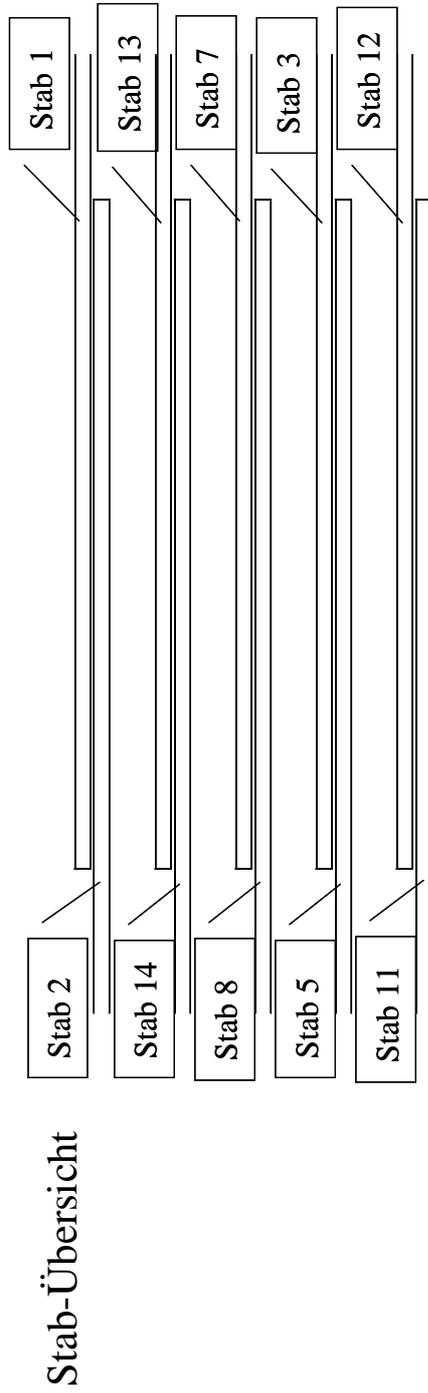


## Anhang E Messeinrichtungen

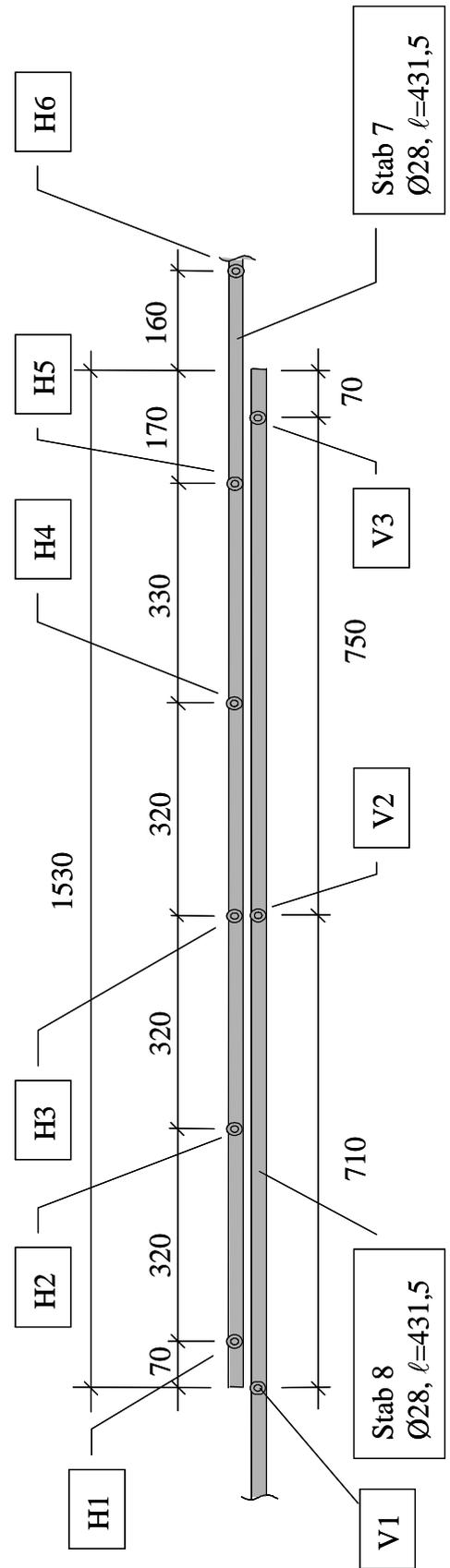
### Anhang E.1 Versuchsaufbau Grundform A und B



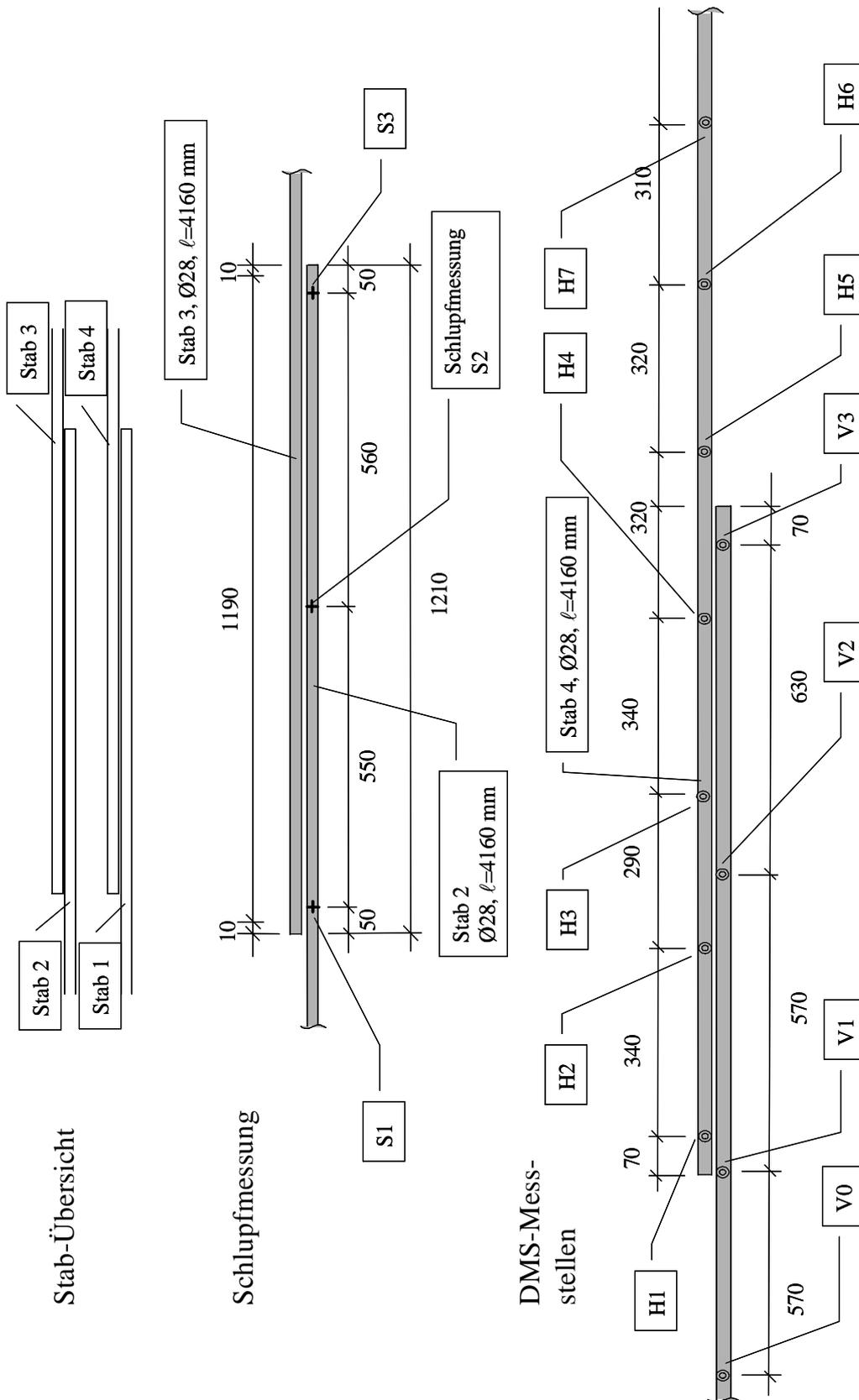
Anhang E.2 Messeinrichtung Grundform A



Übersicht über die DMS-Messstellen

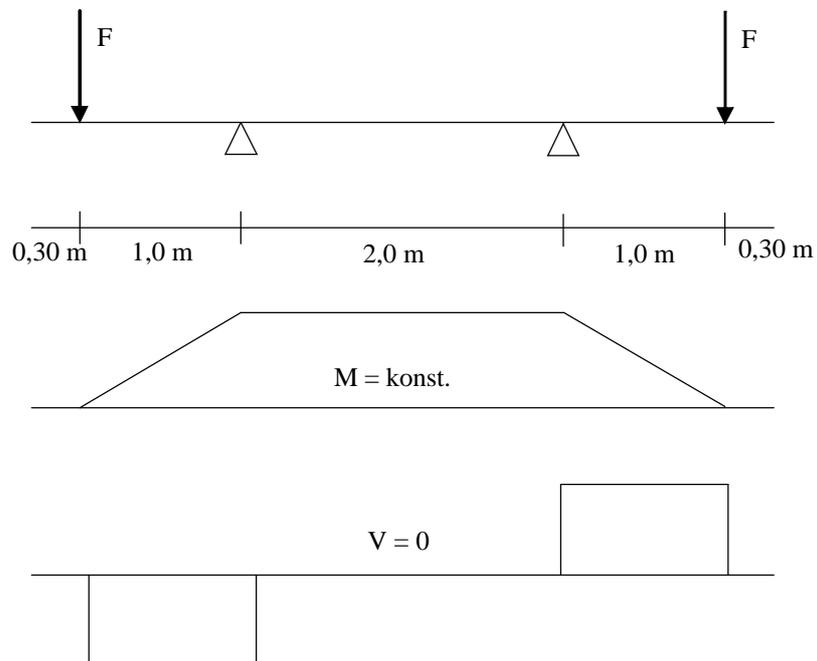


Anhang E.3 Messeinrichtung Grundform B

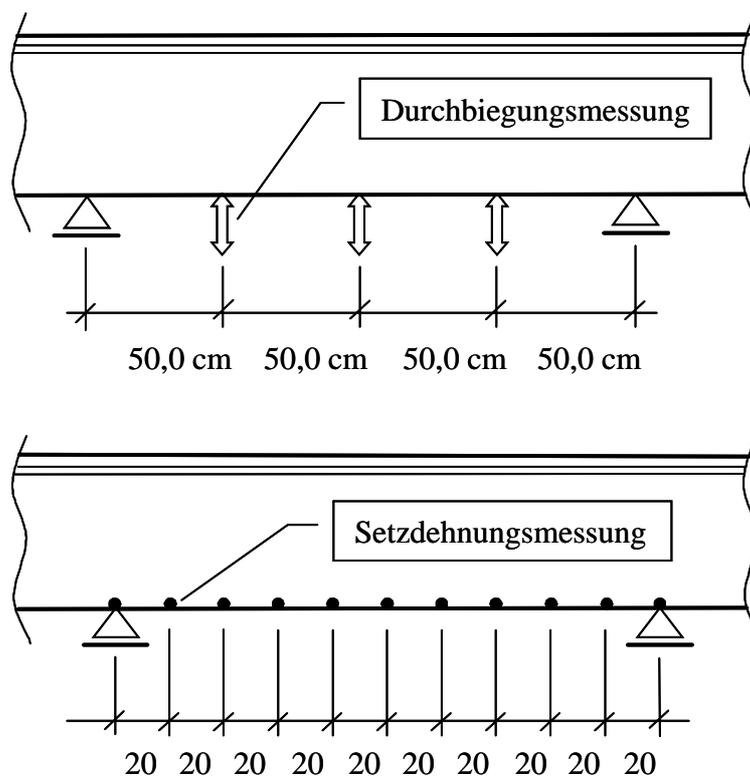


## Anhang E.4 Versuchsaufbau Grundform C und D

### Statisches System und Schnittgrößen

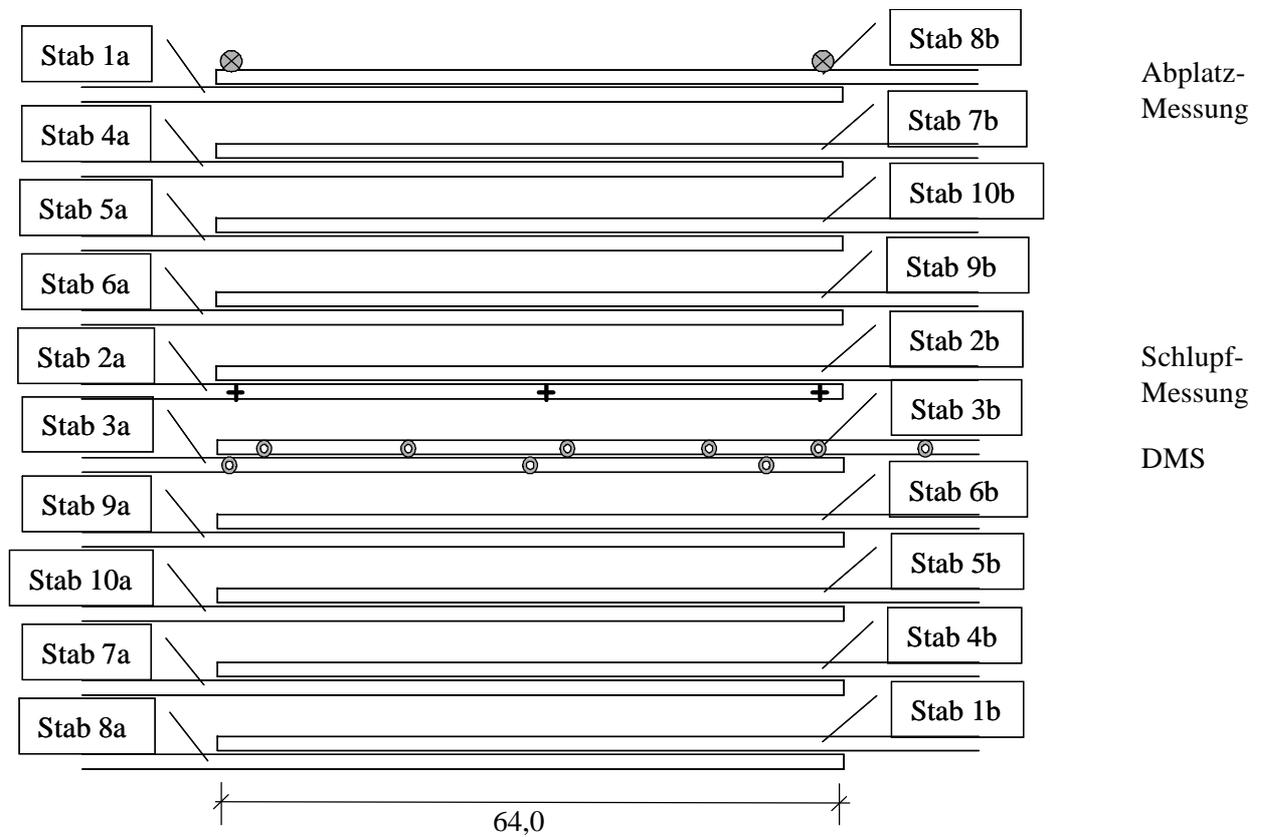


### Durchbiegungs- und Dehnungsmessung

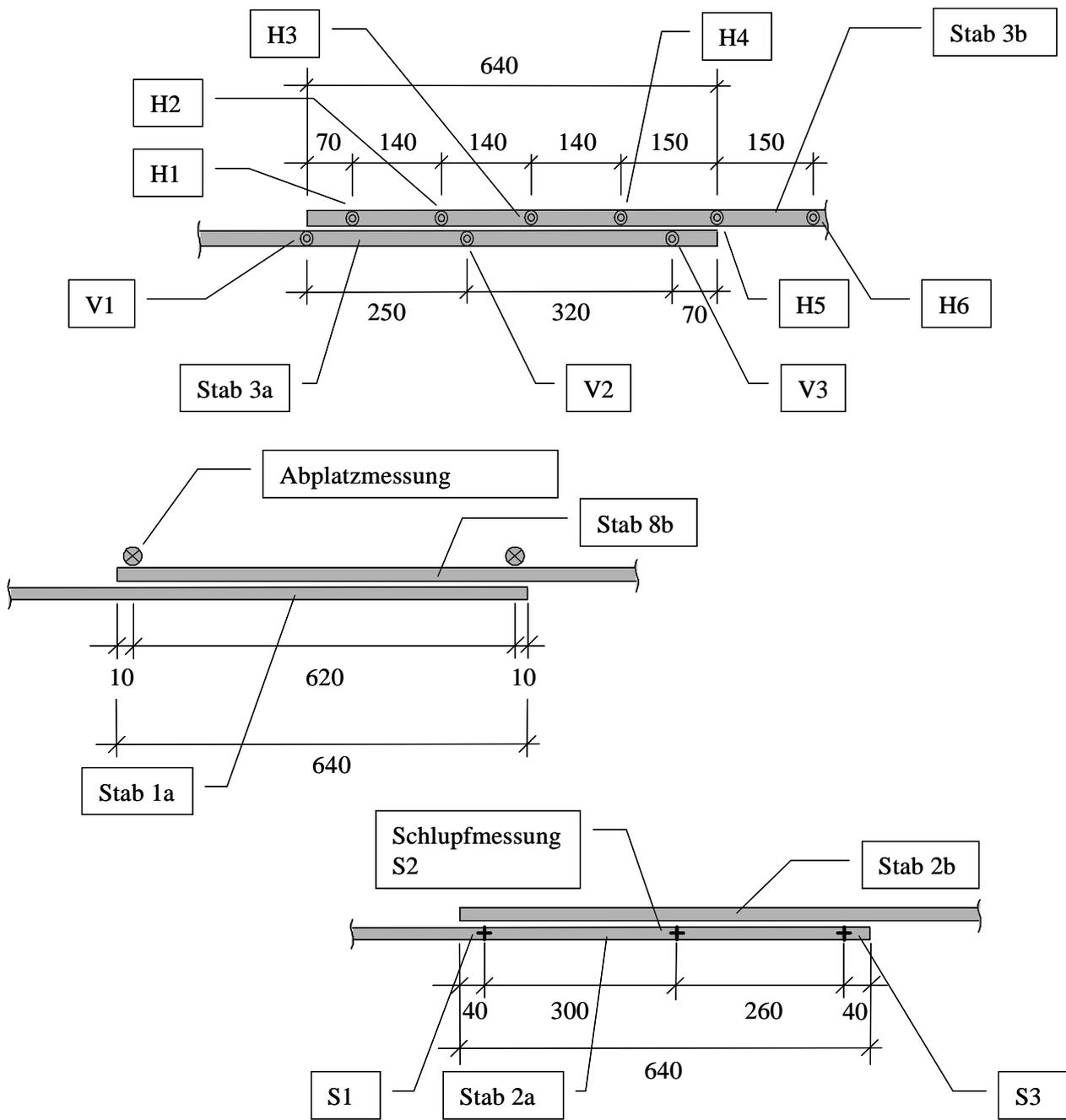


## Anhang E.5 Messeinrichtung Grundform C

### Stab-Übersicht (Draufsicht bei Prüfung)

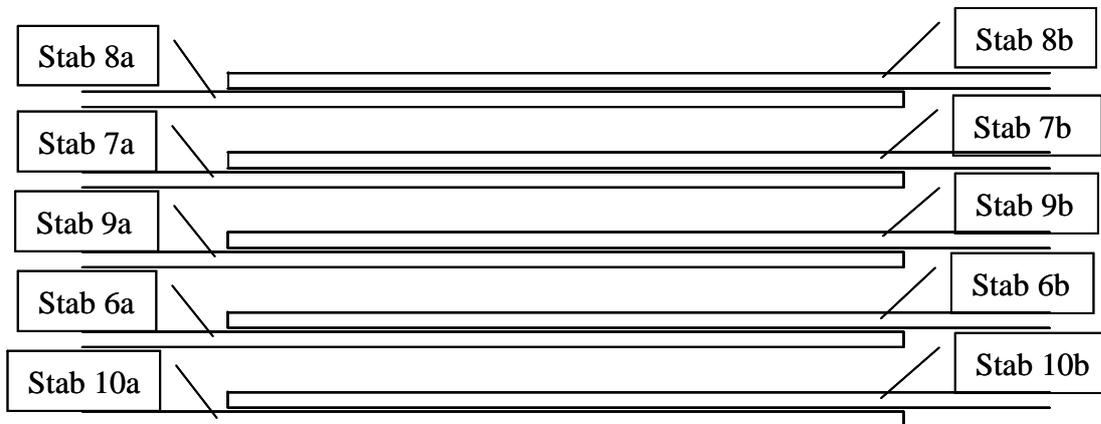


Übersicht über DMS, Abplatz- und Schlupfmessung

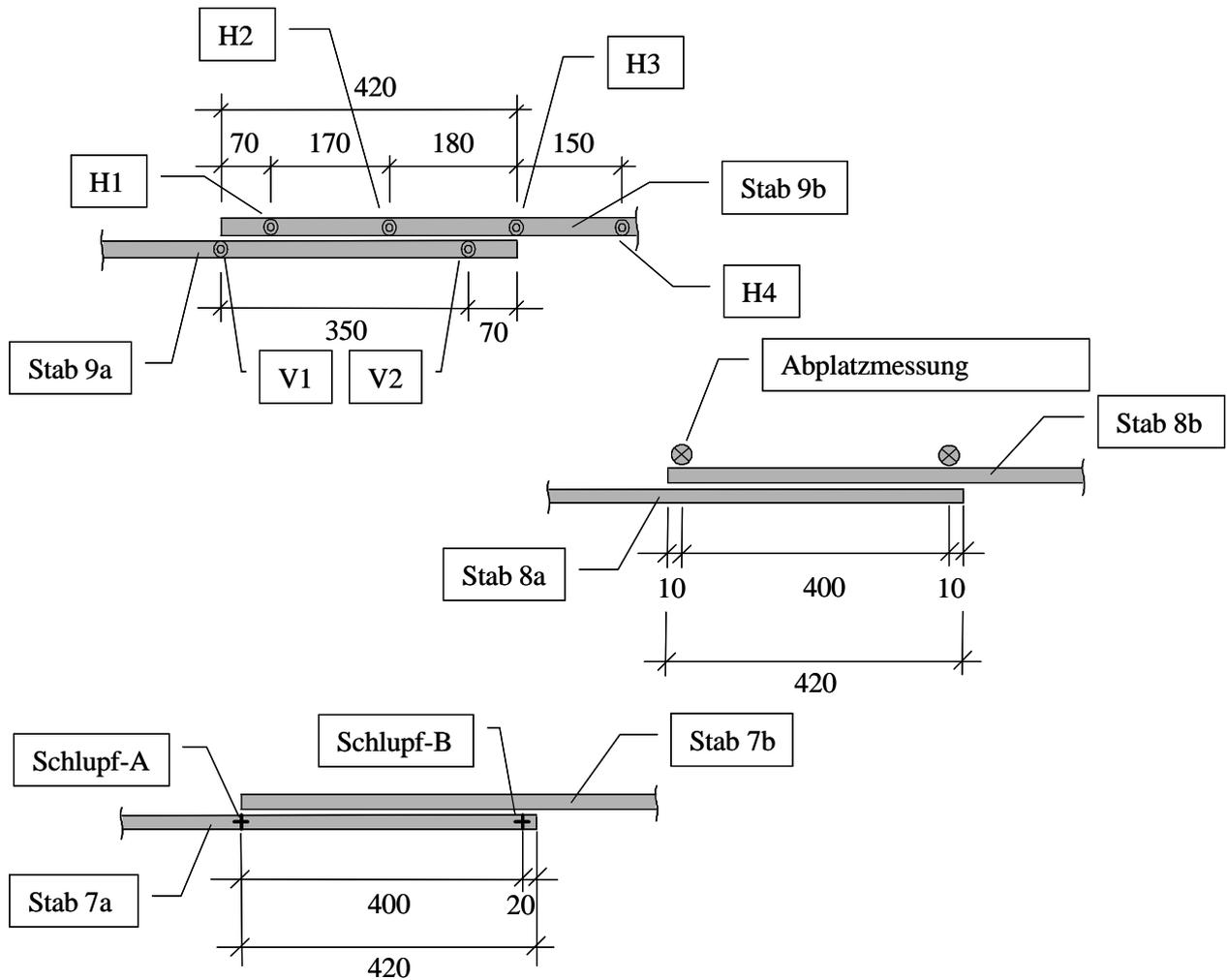


## Anhang E.6 Messeinrichtung Grundform D

### Stab-Übersicht (Draufsicht bei Prüfung)



### Übersicht über DMS, Abplatz- und Schlupfmessung



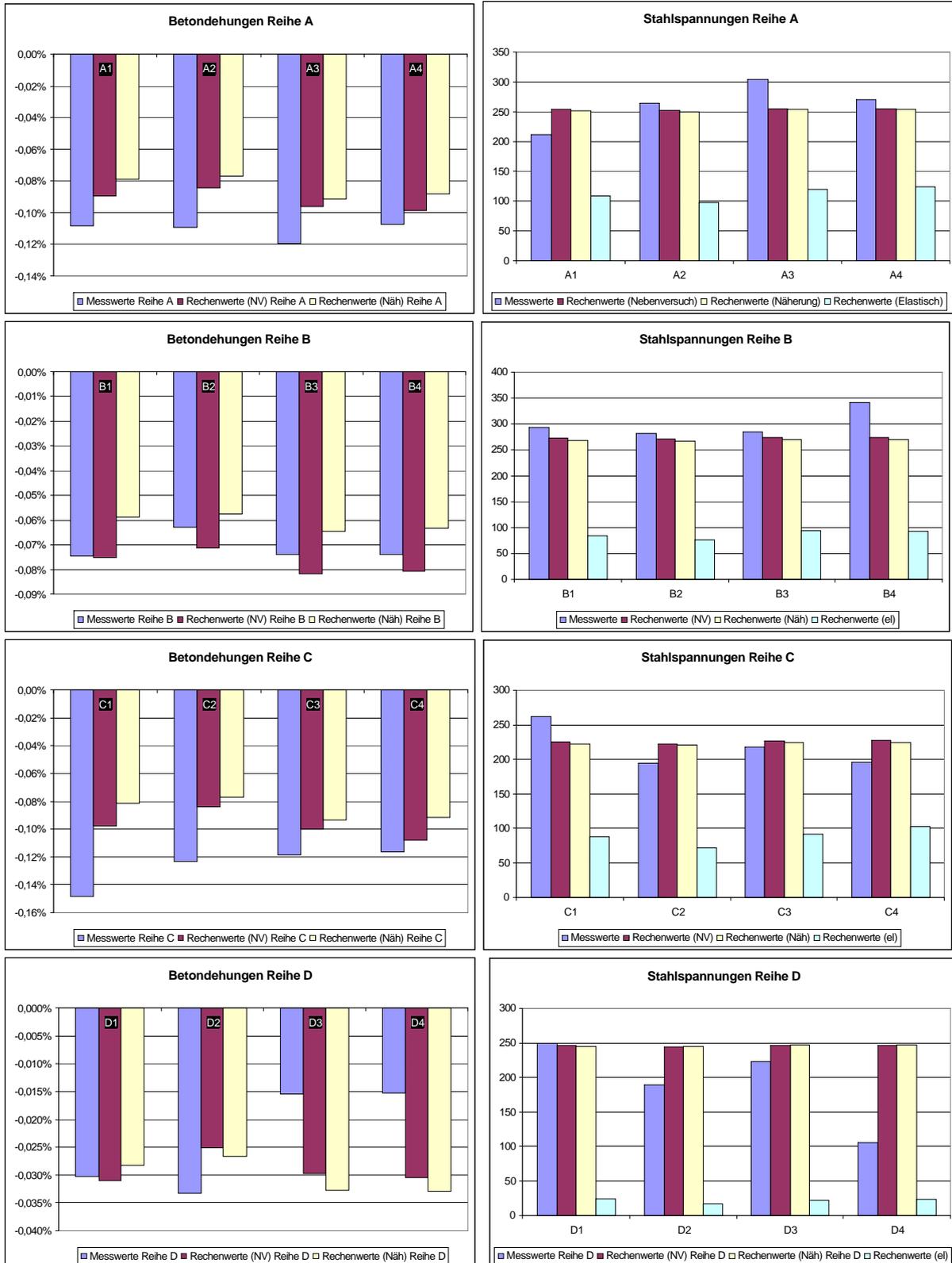
## Anhang F Messergebnisse

### Anhang F.1 Mess- und Rechenwerte für $\sigma_s$ und $\varepsilon_c$ auf Gebrauchslastniveau

Versuch	Messwert <sup>1</sup>			Rechenwert mit gemessenem E-Modul <sup>3</sup> (DIN 1048-5)			
	Normalbereich		Stoßbereich <sup>2</sup>	Normalbereich		Stoßbereich	
	$\varepsilon_c$ [-]	$\sigma_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_c$ [-]	$\varepsilon_c$ [-]	$\sigma_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_c$ [-]	$\sigma_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]
A0	-0,10%	245	-0,10%	-0,069%	248	-0,056%	129
A1	-0,11%	211	-0,11%	-0,090%	253	-0,074%	132
A2	-0,11%	264	-0,11%	-0,084%	252	-0,069%	132
A3	-0,12%	304	-0,12%	-0,096%	255	-0,080%	133
A4	-0,11%	270	-0,11%	-0,099%	255	-0,082%	134
B0	-0,07%	275	-0,07%	-0,051%	265	-0,040%	137
B1	-0,07%	293	-0,07%	-0,075%	273	-0,061%	142
B2	-0,06%	282	-0,06%	-0,071%	272	-0,057%	141
B3	-0,07%	284	-0,07%	-0,082%	275	-0,066%	143
B4	-0,07%	342	-0,07%	-0,081%	274	-0,065%	143
C0	-0,11%	194	-0,11%	-0,070%	219	-0,313%	319
C1	-0,15%	261	-0,15%	-0,098%	225	-0,467%	330
C2	-0,12%	195	-0,12%	-0,084%	222	-0,391%	325
C3	-0,12%	218	-0,12%	-0,100%	226	-0,481%	331
C4	-0,12%	196	-0,12%	-0,108%	228	-0,530%	333
D0	-	220	-	-0,027%	245	-0,020%	125
D1	-0,03%	249	-0,03%	-0,031%	247	-0,023%	126
D2	-0,03%	189	-0,03%	-0,025%	244	-0,019%	125
D3	-0,02%	223	-0,02%	-0,030%	246	-0,023%	126
D4	-0,02%	105	-0,02%	-0,030%	246	-0,023%	126
<b>Bemerkung 1:</b>	Die Messwerte der Dehnungen wurden ursprünglich 2,5 cm von der Unterkante genommen (siehe Diagramme). Für diese Aufstellung sind sie auf den Bauteil-Rand umgerechnet.						
<b>Bemerkung 2:</b>	Für den Stoßbereich wurde aus den Messwerten der Stoß-Mitte ein repräsentativer Wert gewählt.						
<b>Bemerkung 3:</b>	Für die Referenzversuche lag kein E-Modul vor, weshalb der sehr hohe Norm-Wert angenommen wurde.						

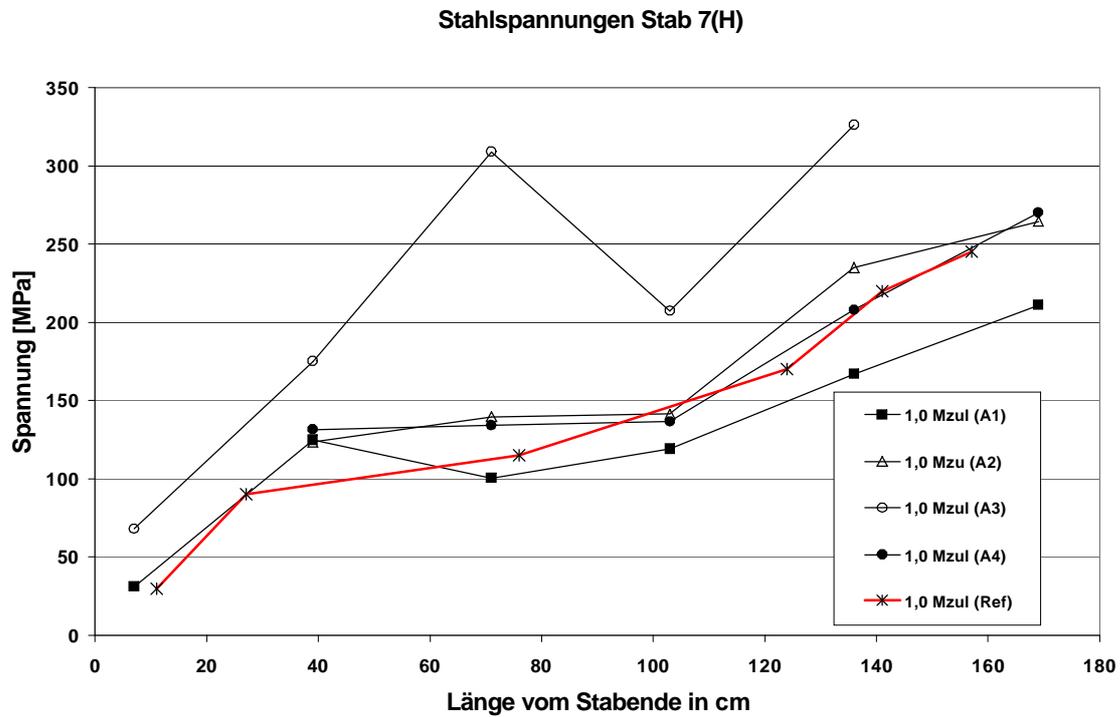
Versuch	Messwert <sup>1</sup>		Rechenwert mit berechnetem E-Modul (nach Roos)	
	Normalbereich		Normalbereich	
	$\varepsilon_c$ [-]	$\sigma_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\varepsilon_c$ [-]	$\sigma_s$ [N/mm <sup>2</sup> ]
A0	-0,10%	245	-0,069%	248
A1	-0,11%	211	-0,079%	250
A2	-0,11%	264	-0,077%	250
A3	-0,12%	304	-0,092%	254
A4	-0,11%	270	-0,088%	253
B0	-0,07%	275	-0,051%	265
B1	-0,07%	293	-0,059%	268
B2	-0,06%	282	-0,058%	267
B3	-0,07%	284	-0,064%	269
B4	-0,07%	342	-0,063%	269
C0	-0,11%	194	-0,070%	219
C1	-0,15%	261	-0,082%	222
C2	-0,12%	195	-0,077%	221
C3	-0,12%	218	-0,093%	224
C4	-0,12%	196	-0,092%	224
D0	-	220	-0,027%	245
D1	-0,03%	249	-0,028%	245
D2	-0,03%	189	-0,027%	245
D3	-0,02%	223	-0,033%	247
D4	-0,02%	105	-0,033%	247
<b>Bemerkung 1:</b>	siehe obige Tabelle			

## Anhang F.2 Darstellung von $\sigma_s$ und $\epsilon_c$ im einfach bewehrten Bereich auf Gebrauchslastniveau

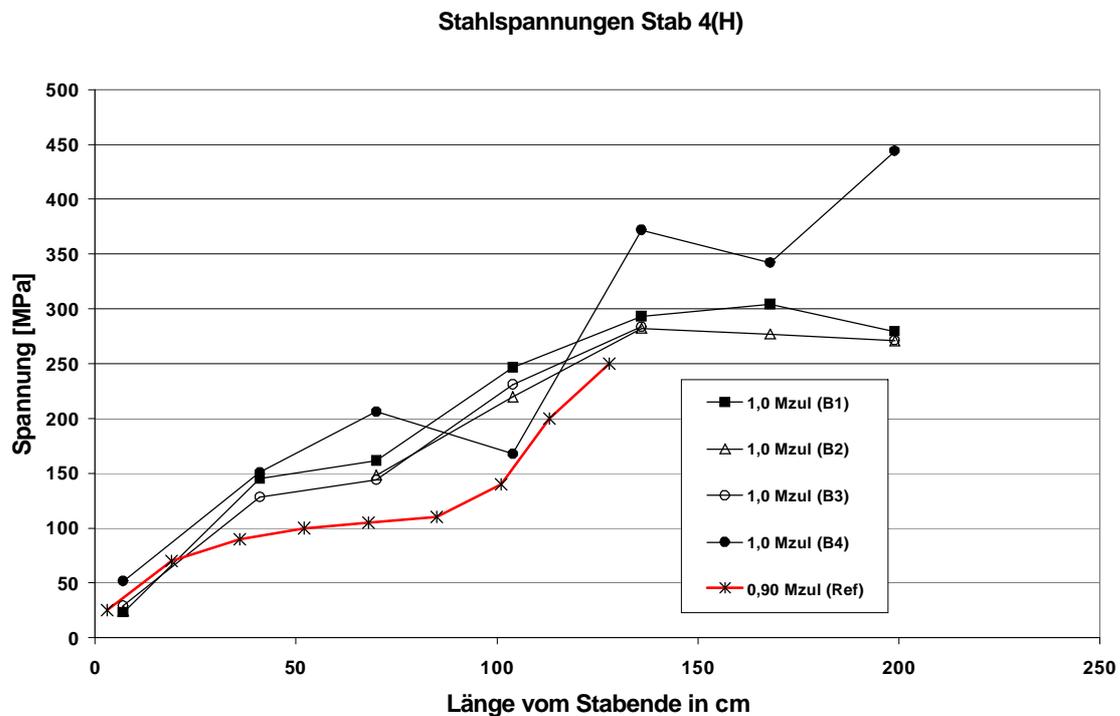


### Anhang F.3 Gemessene Stahlspannungen auf Gebrauchslastniveau

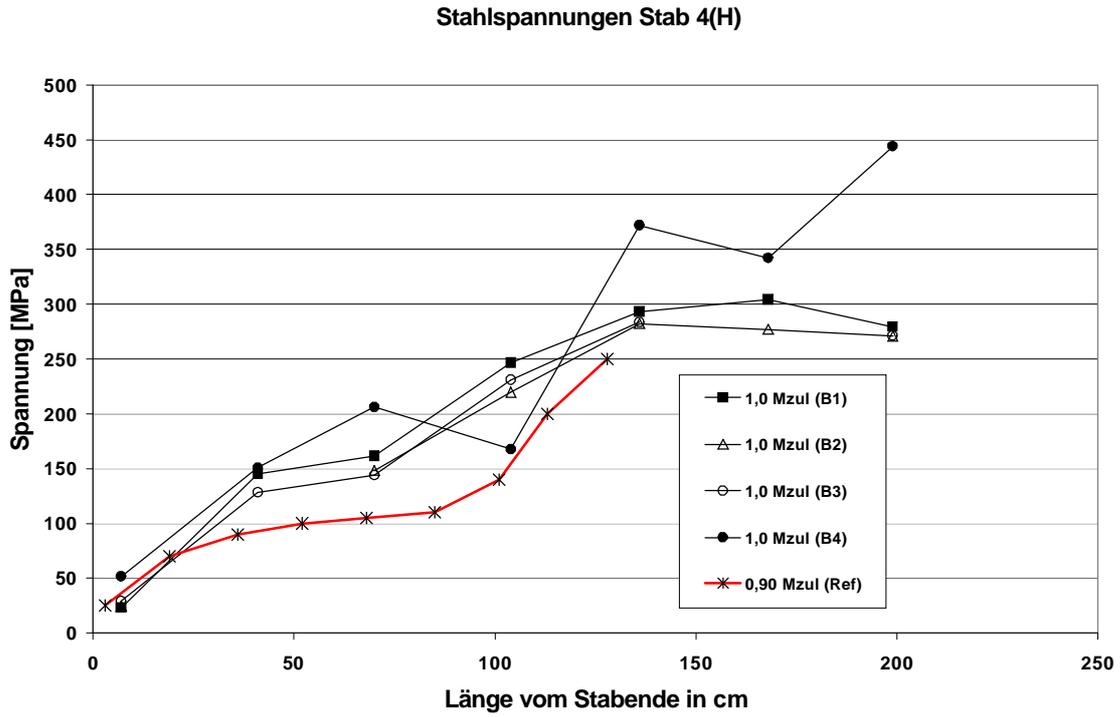
#### Versuchsreihe A



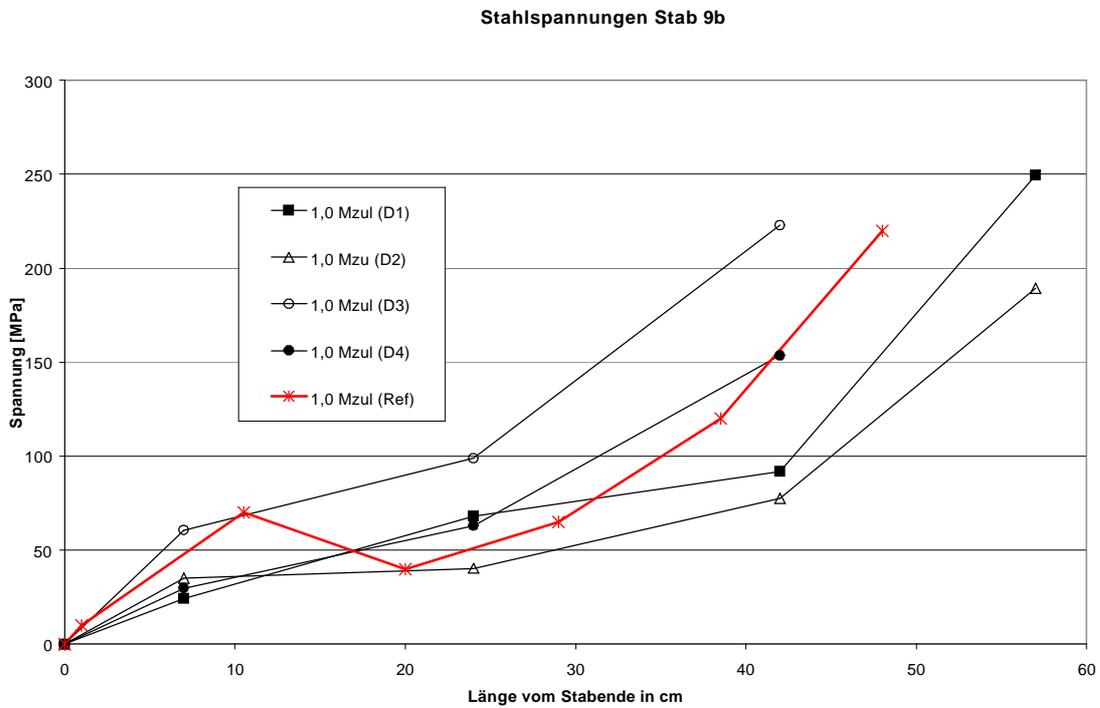
#### Versuchsreihe B



Versuchsreihe C

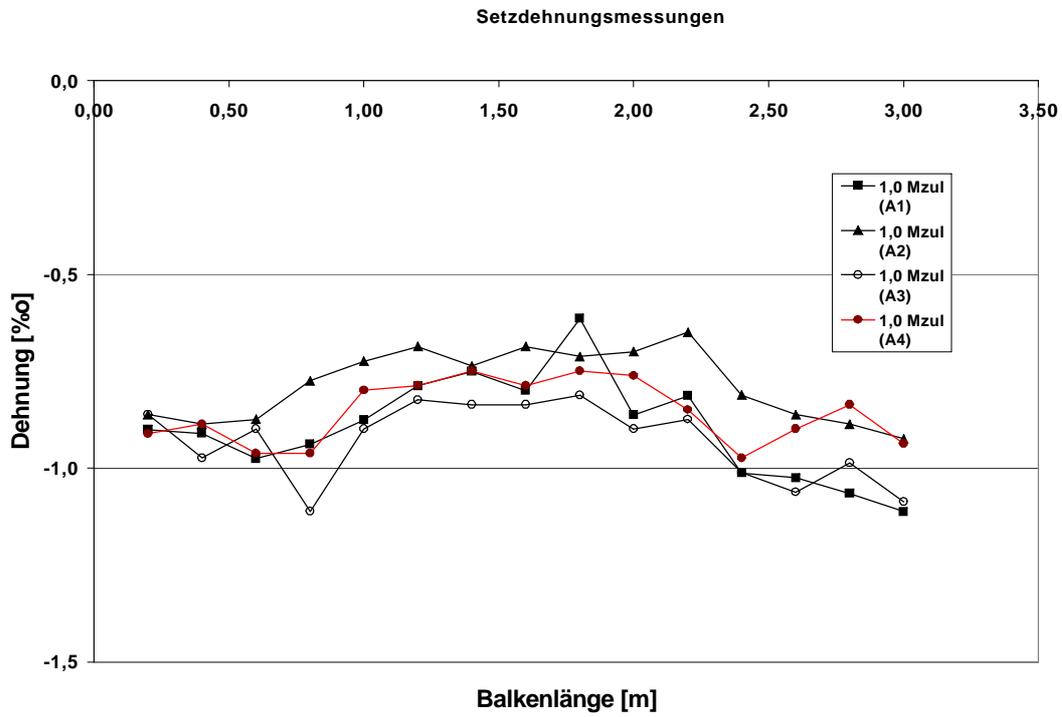


Versuchsreihe D

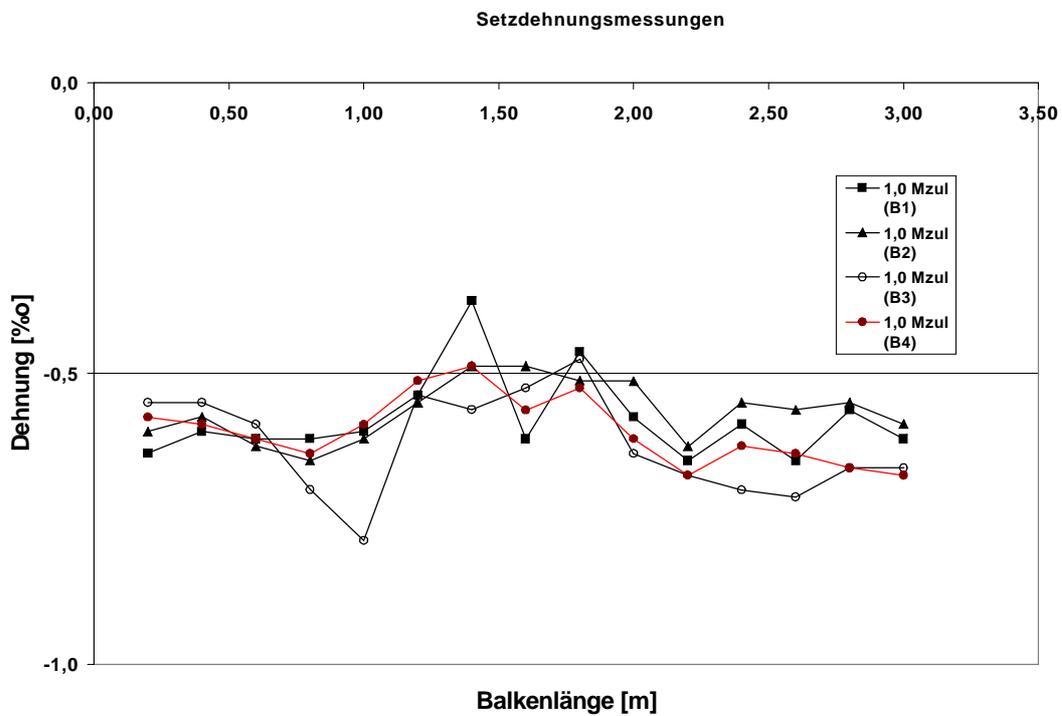


## Anhang F.4 Gemessene Betonstauchungen auf Gebrauchslastniveau

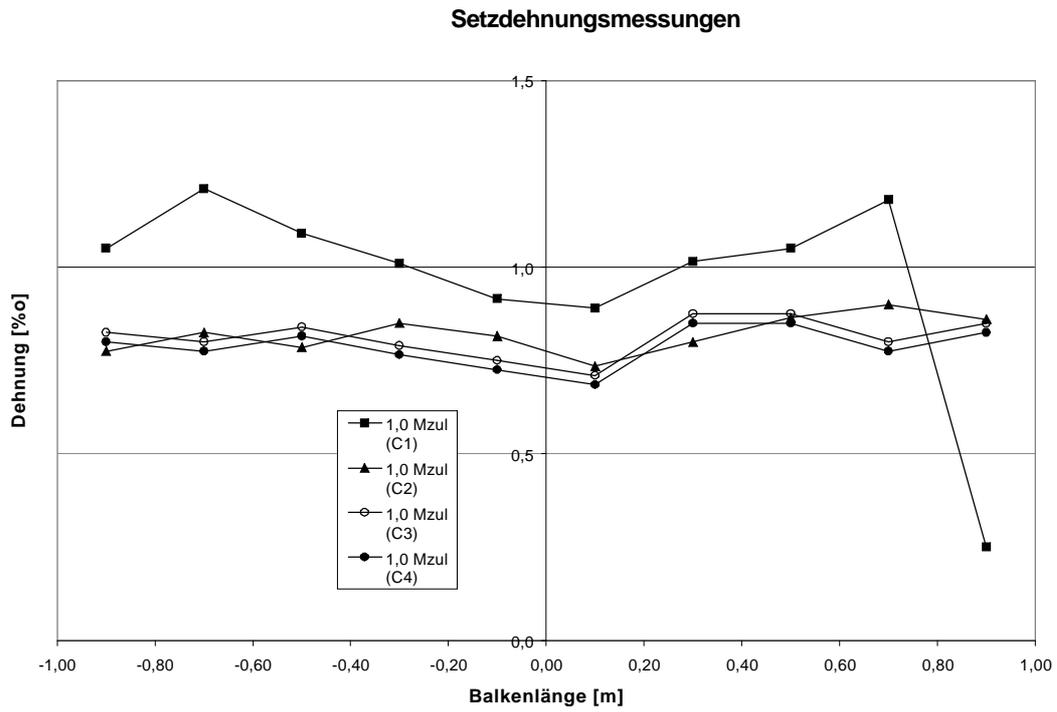
### Versuchsreihe A



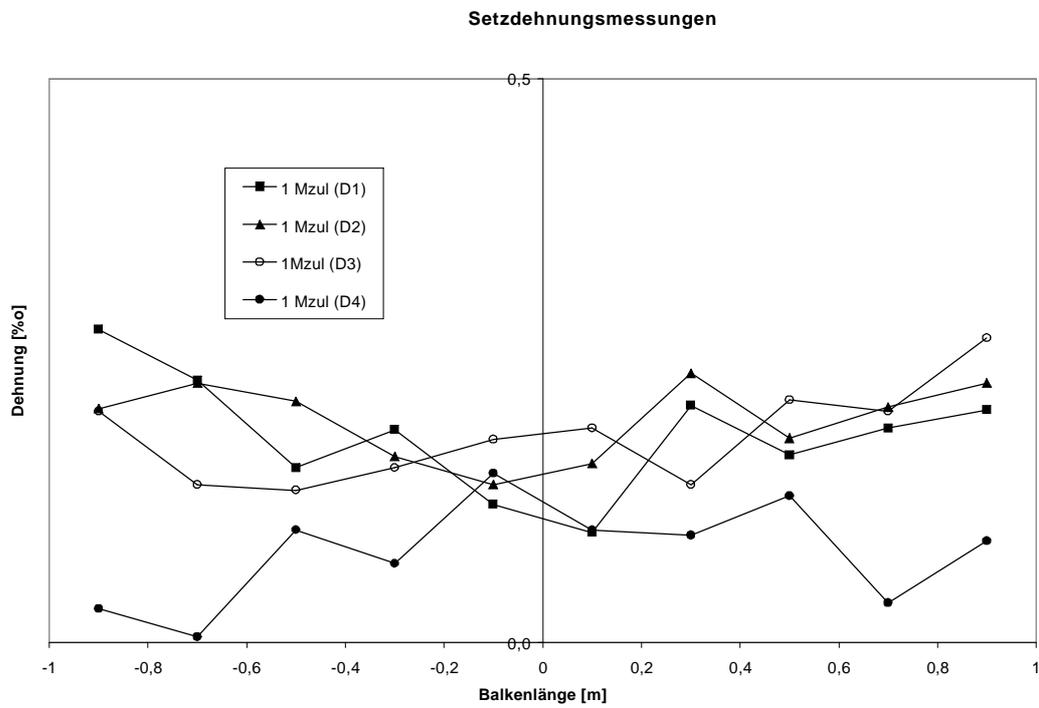
### Versuchsreihe B



Versuchsreihe C

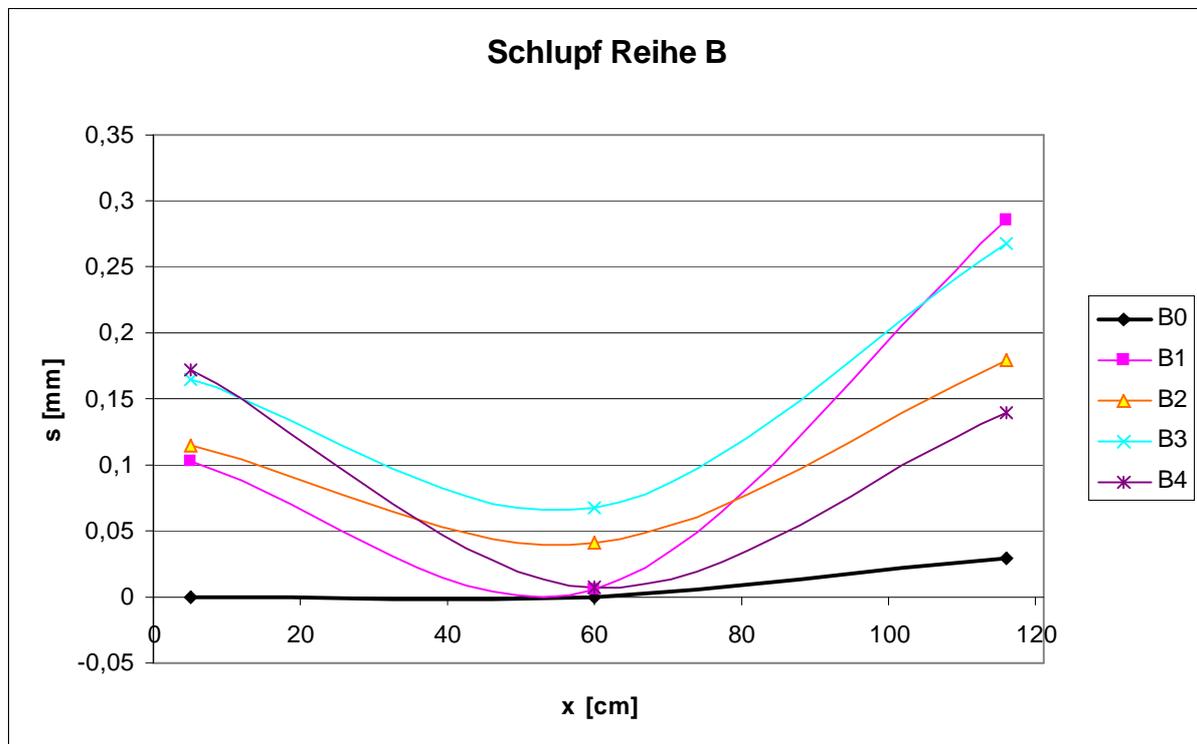


Versuchsreihe D

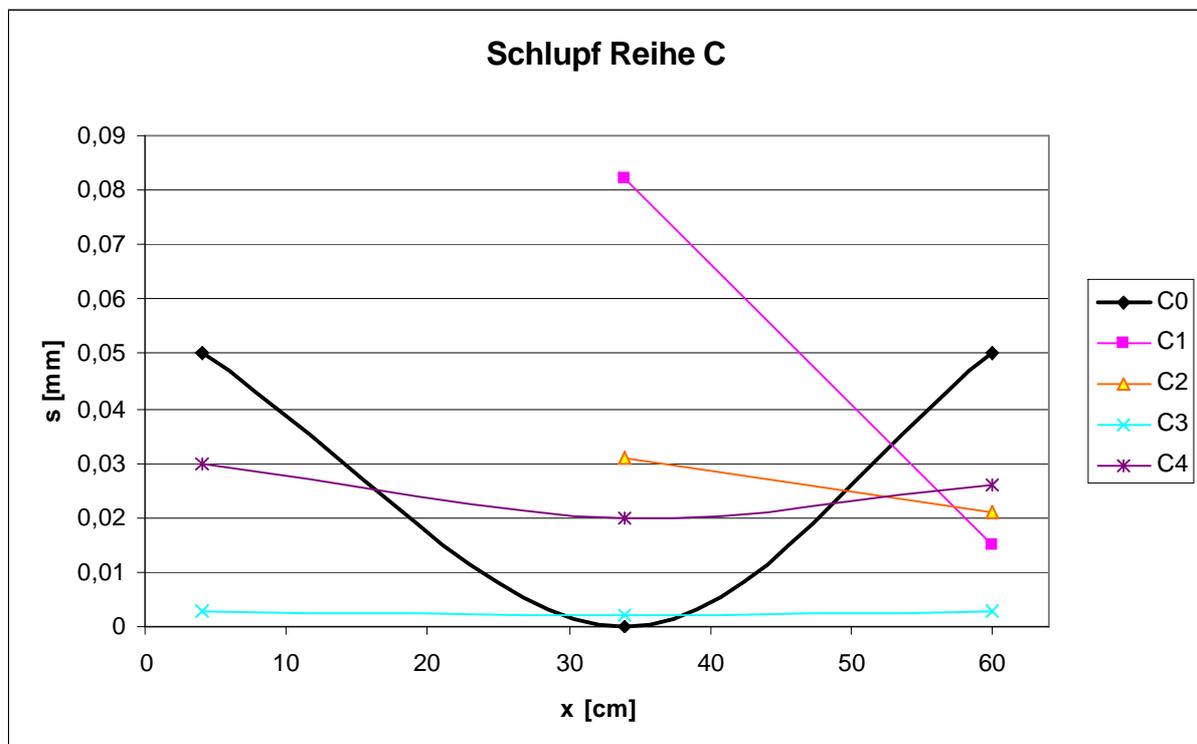


## Anhang F.5 Gemessener Schlupf auf Gebrauchslastniveau

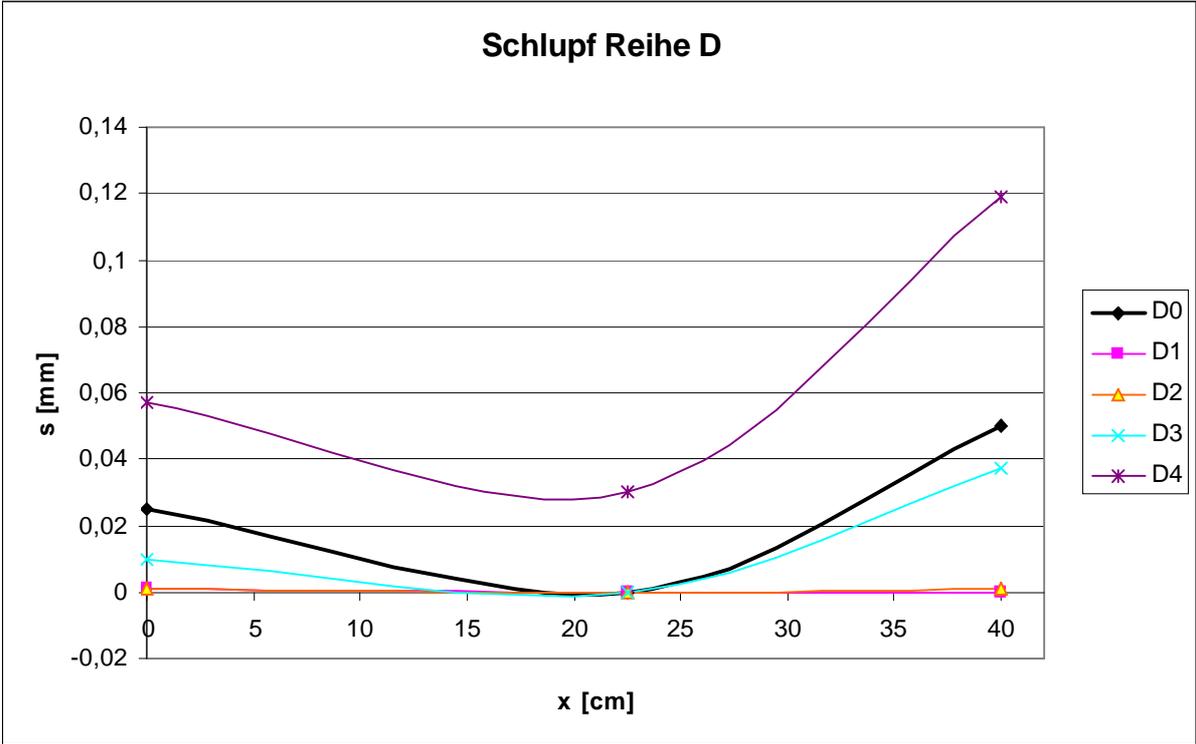
### Versuchsreihe B



### Versuchsreihe C

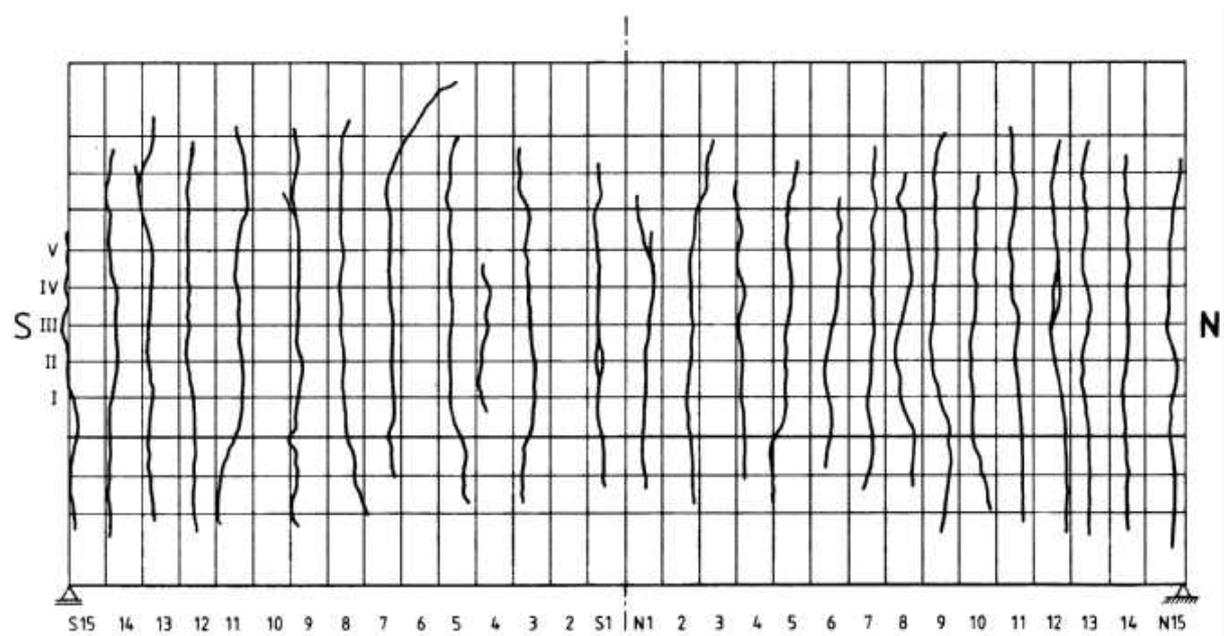


Versuchsreihe D

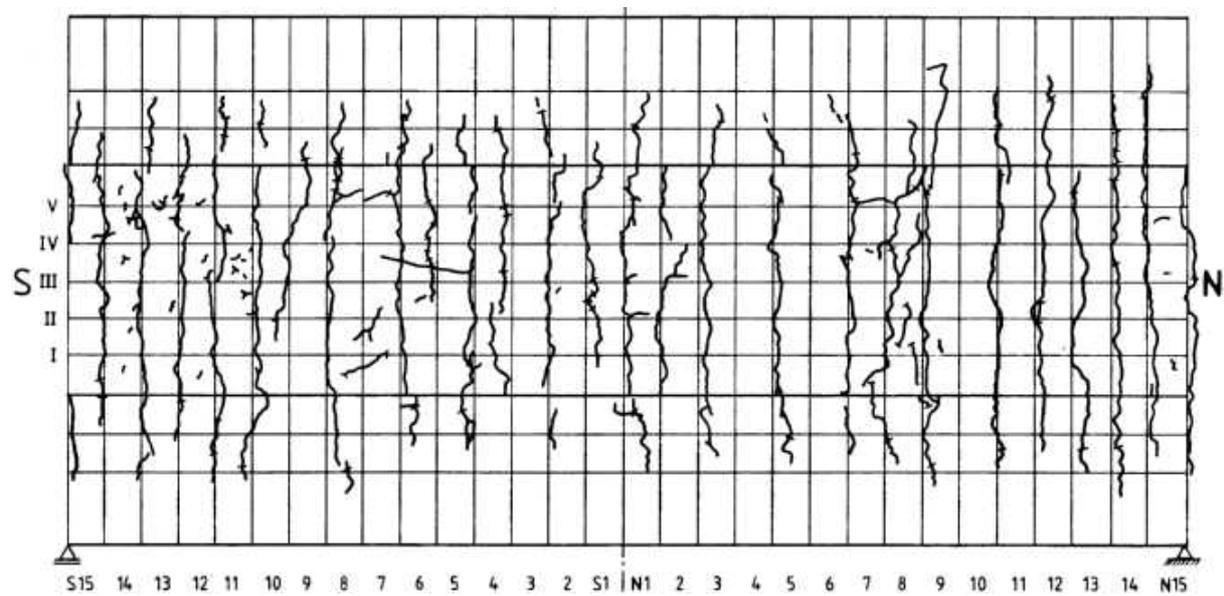


## Anhang F.6 Rissbilder

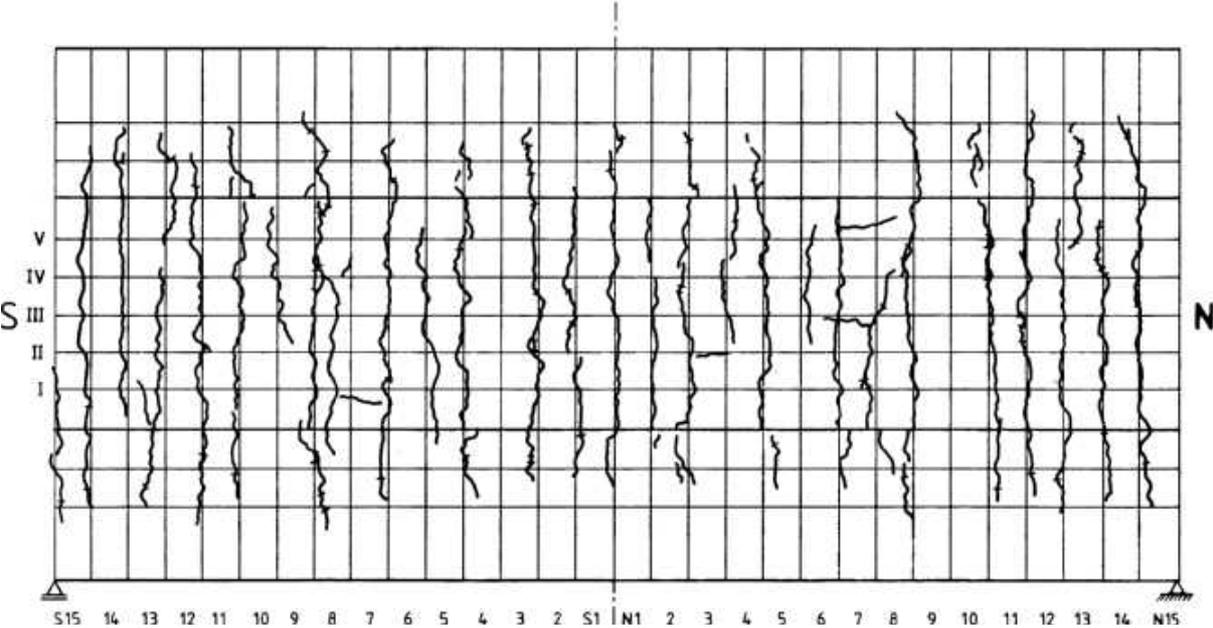
### Versuch A0 (Referenz)



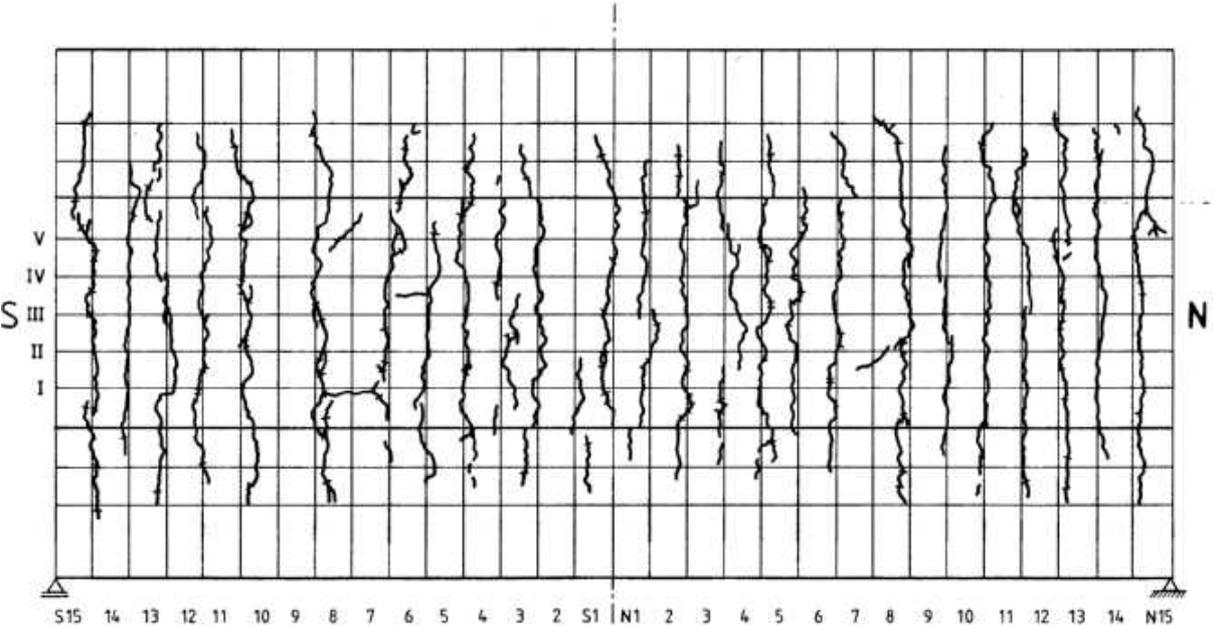
### Versuch A1

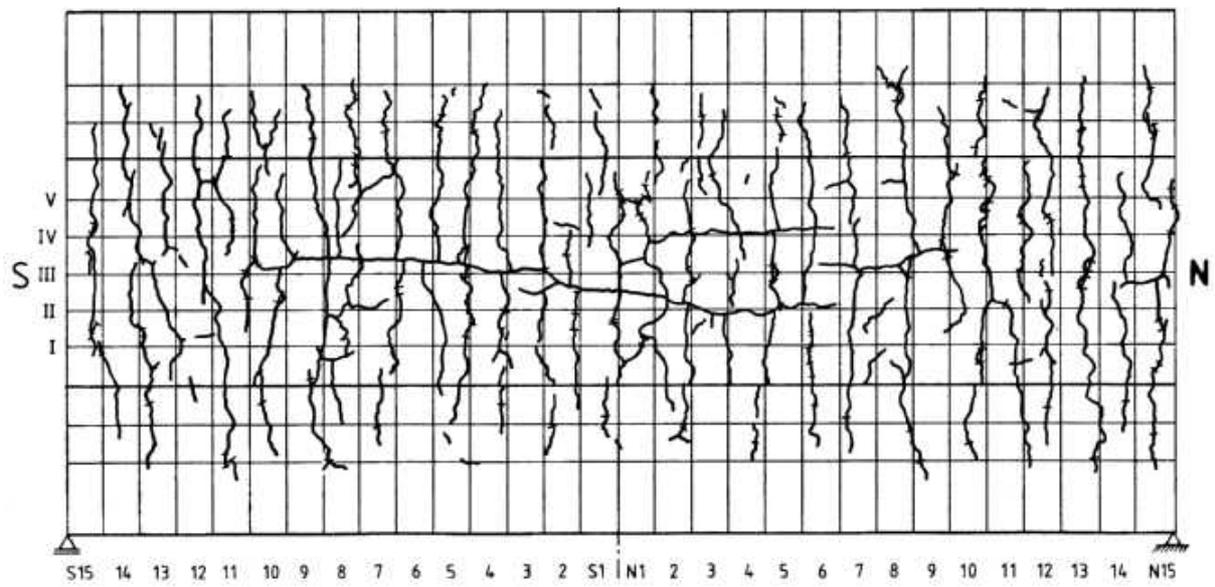
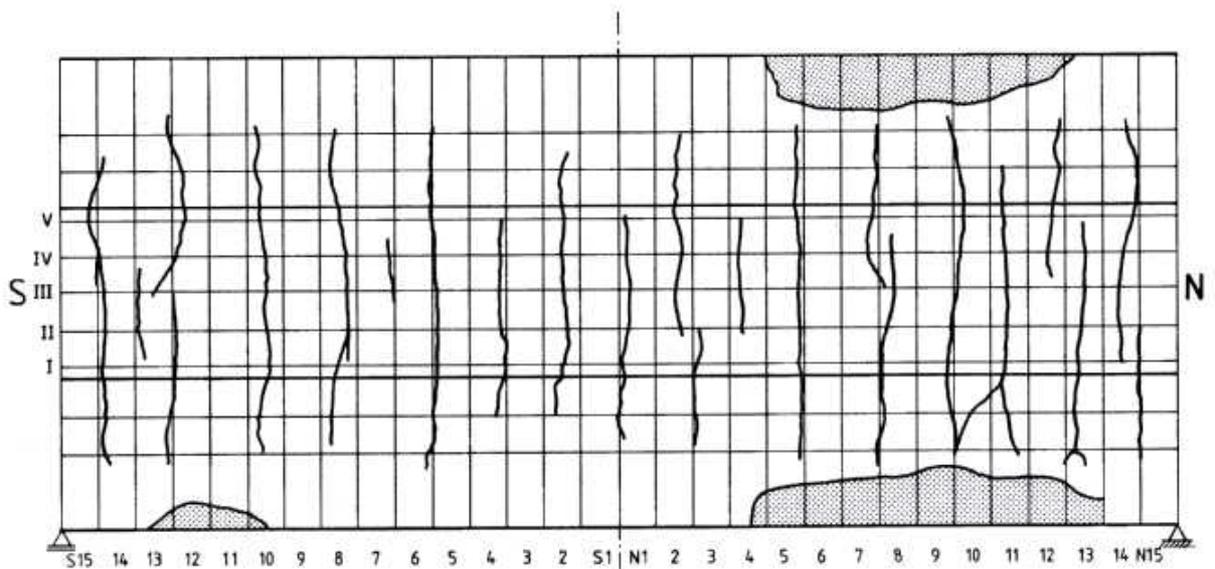


**Versuch A2**

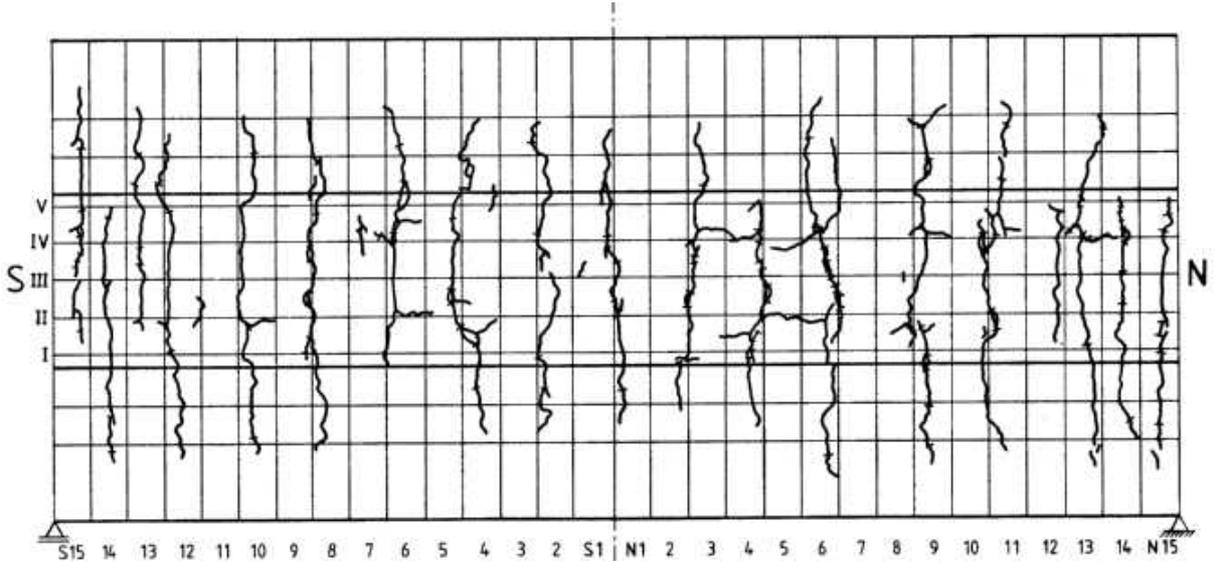


**Versuch A3**

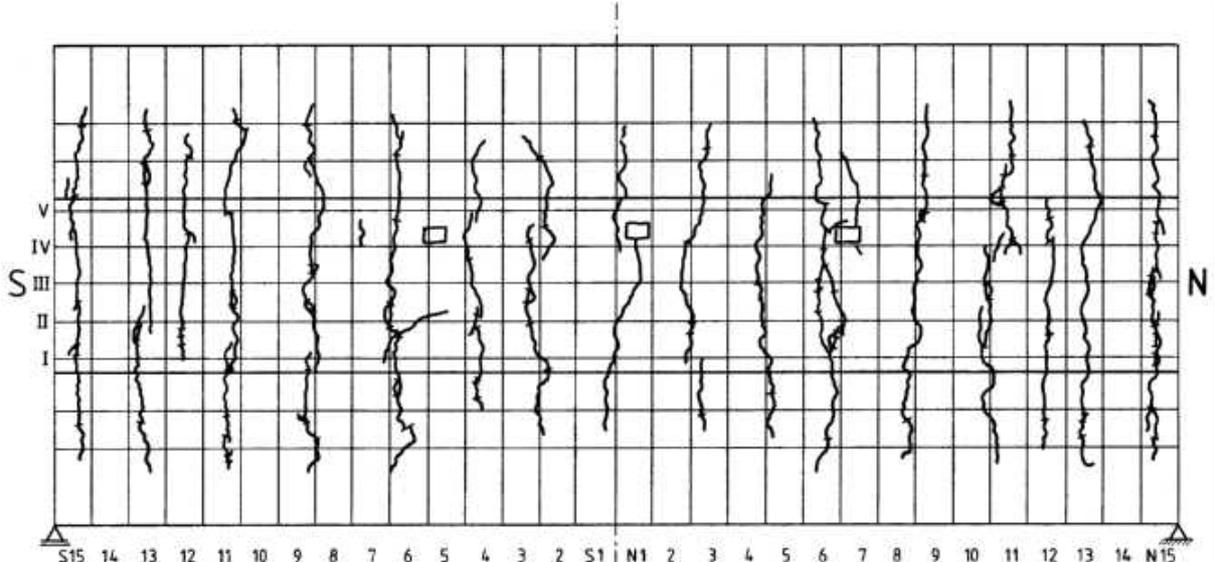


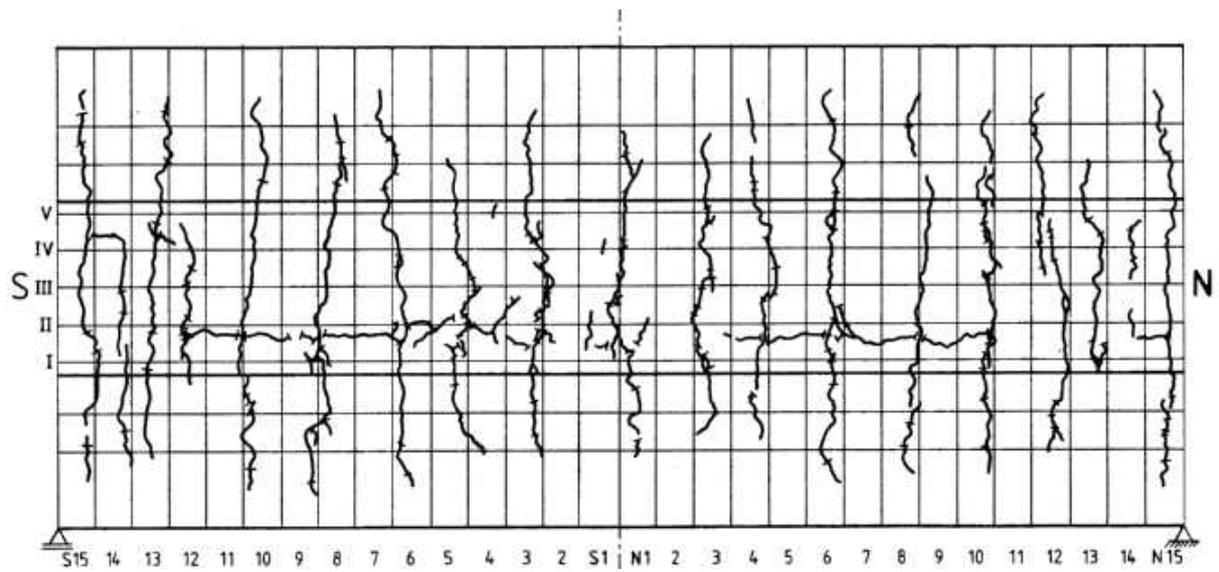
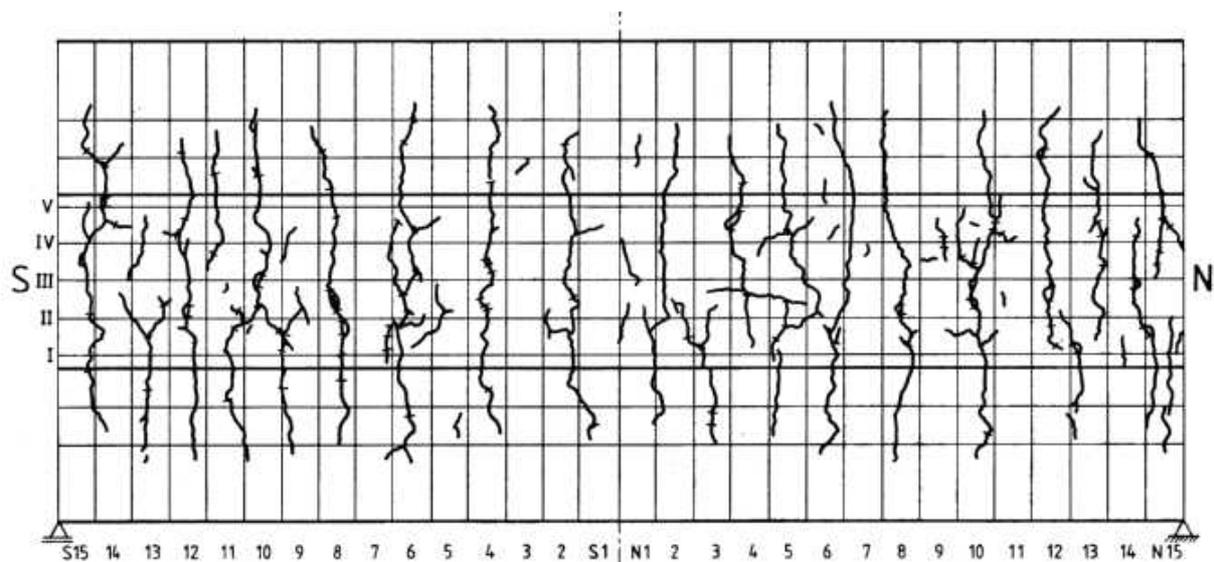
**Versuch A4****Versuch B0**

**Versuch B1**

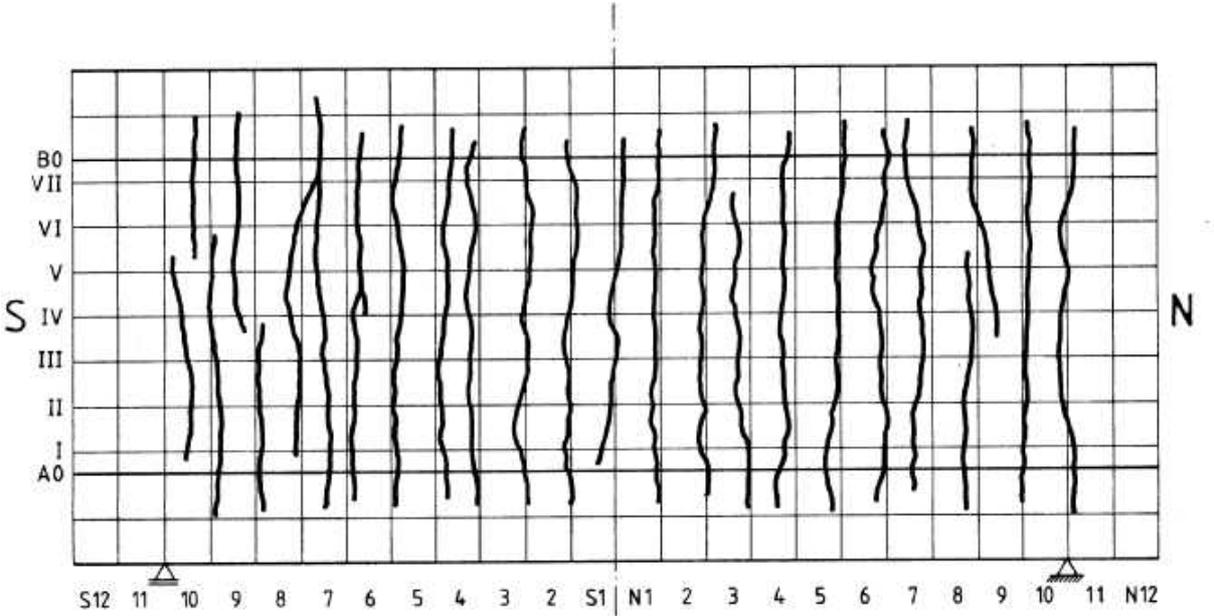


**Versuch B2**

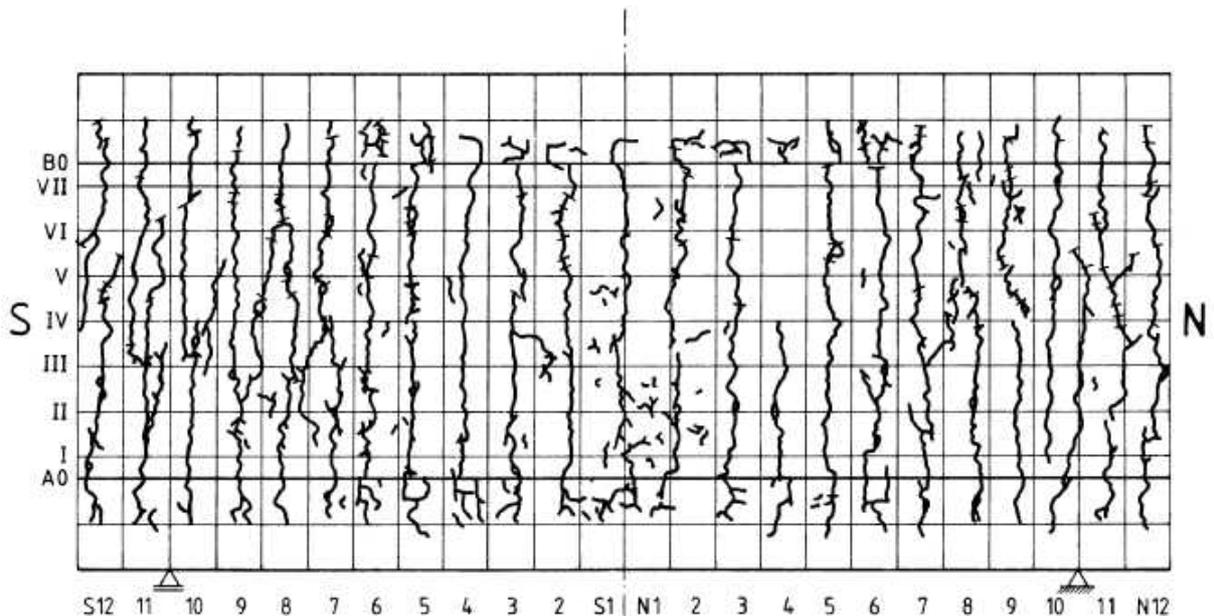


**Versuch B3****Versuch B4**

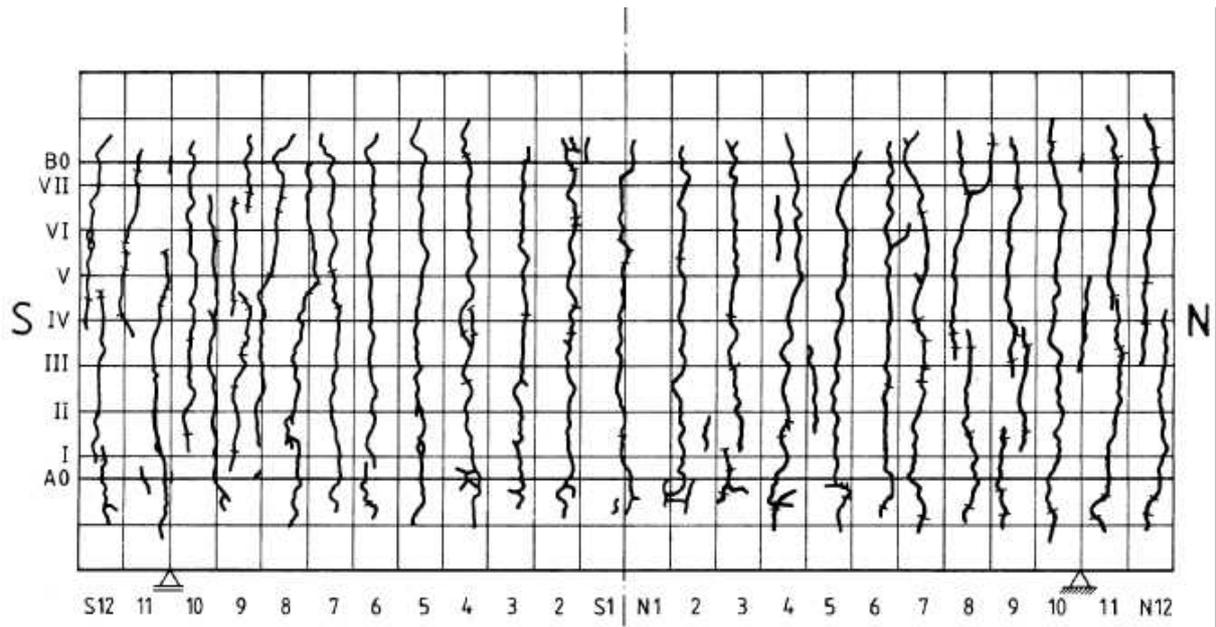
Versuch C0



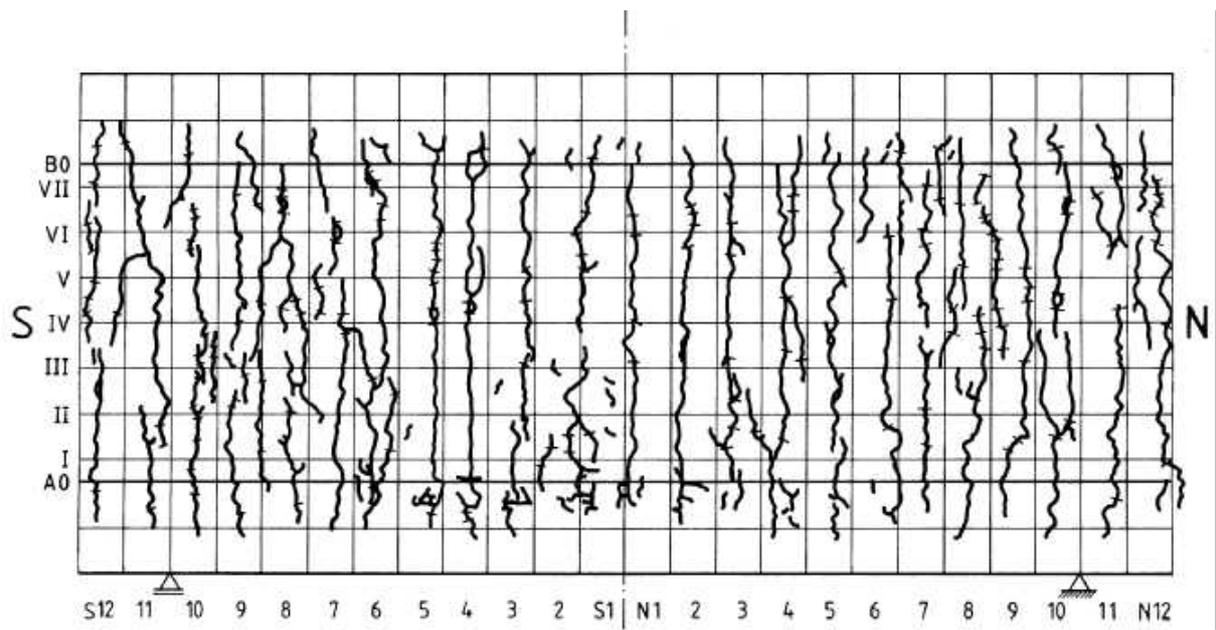
Versuch C1



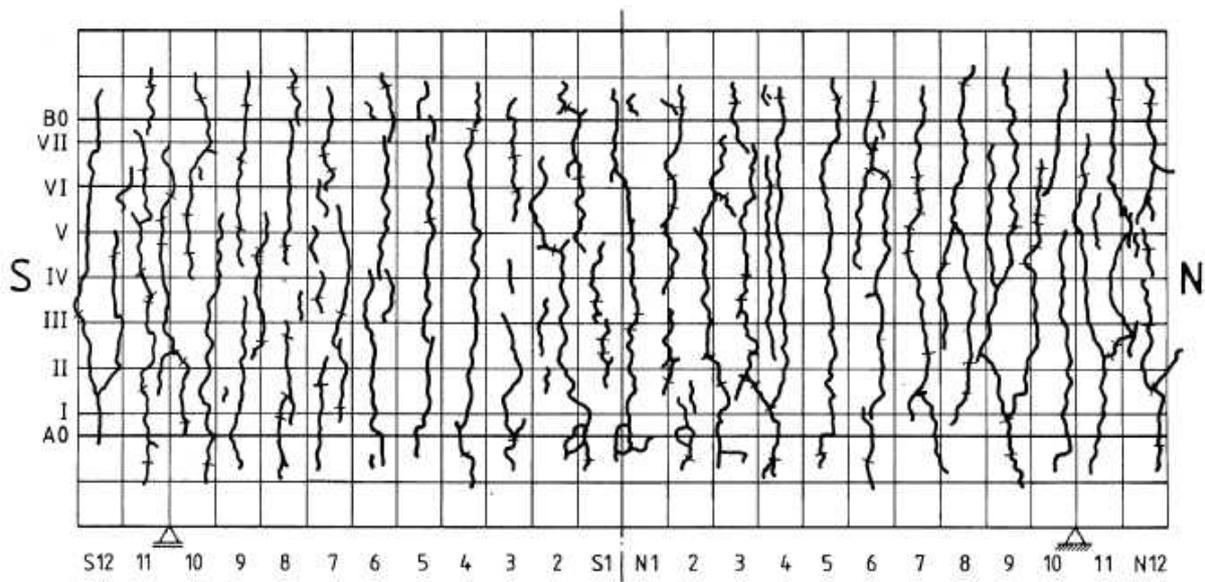
**Versuch C2**



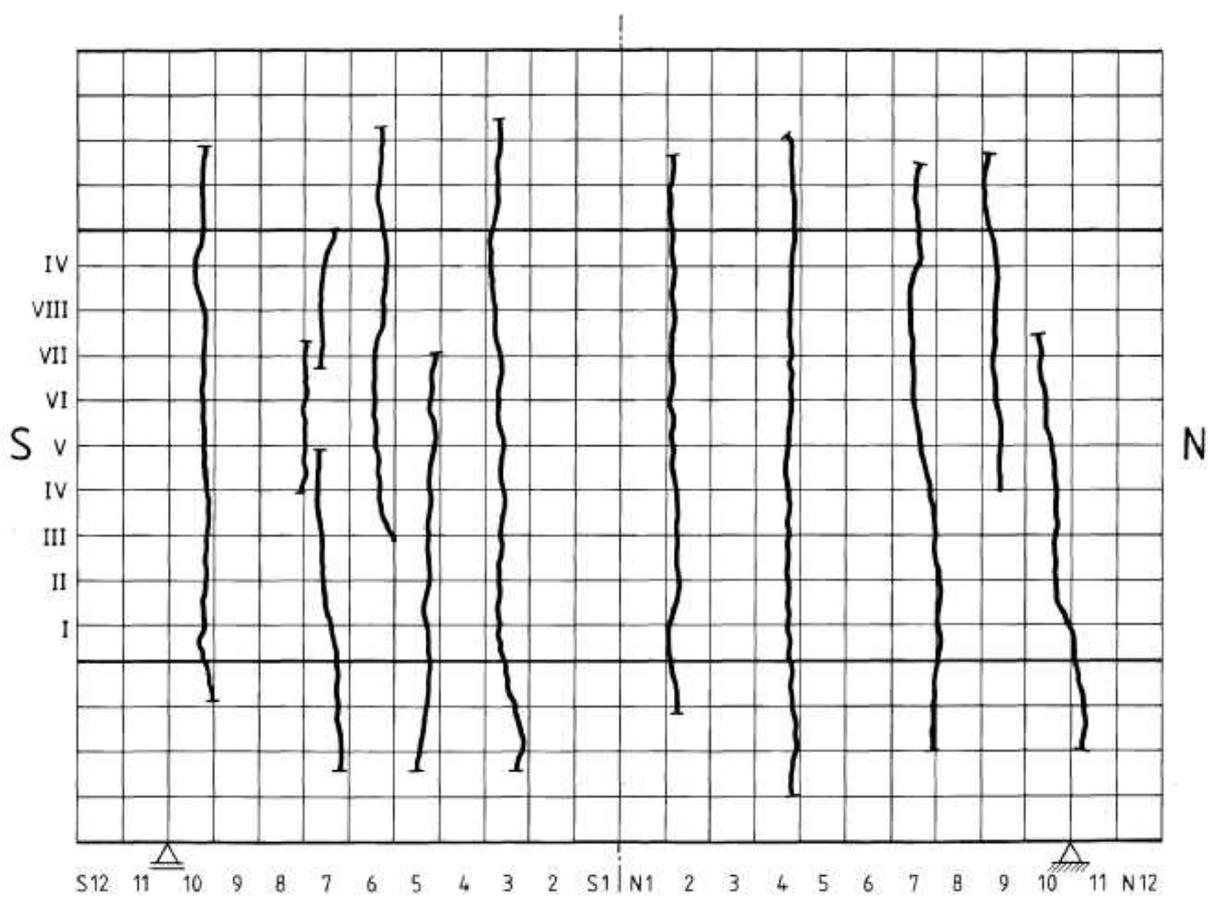
**Versuch C3**



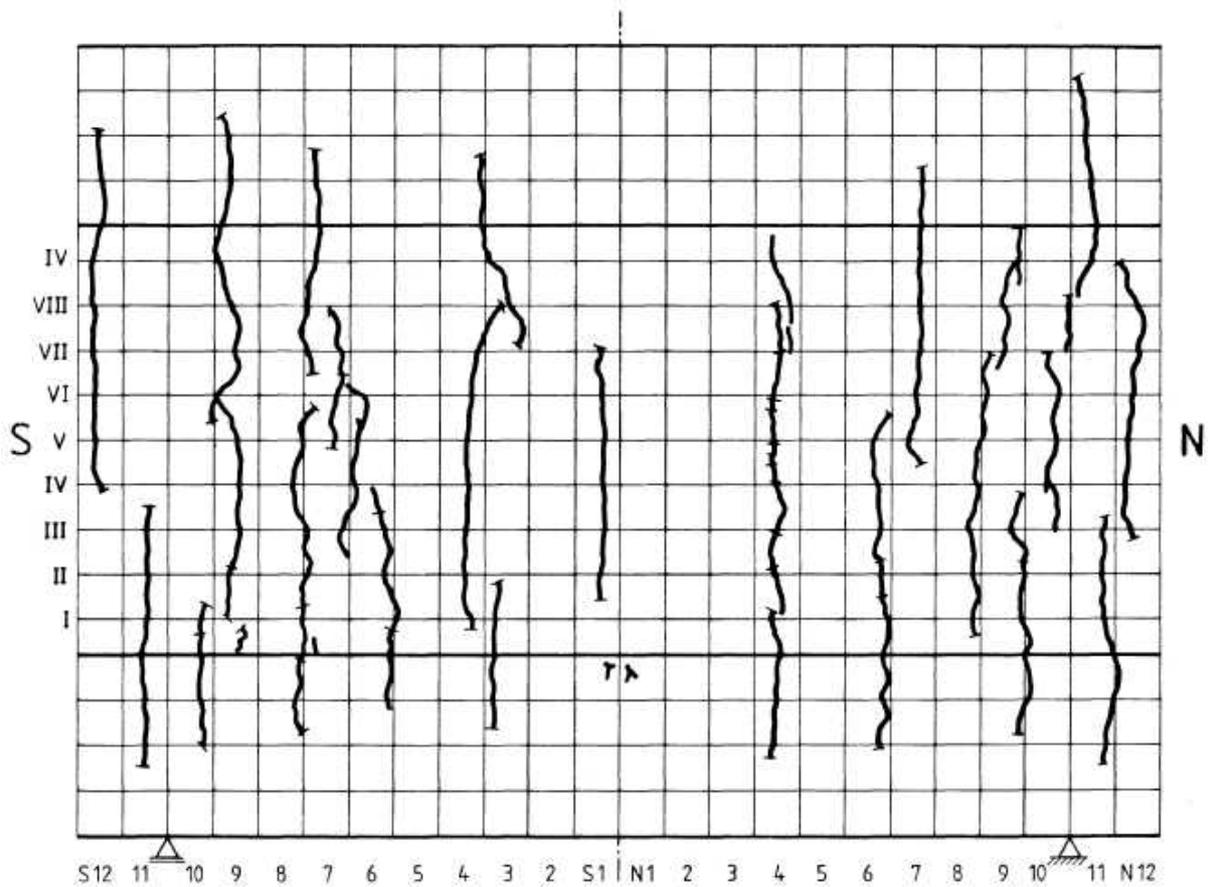
**Versuch C4**



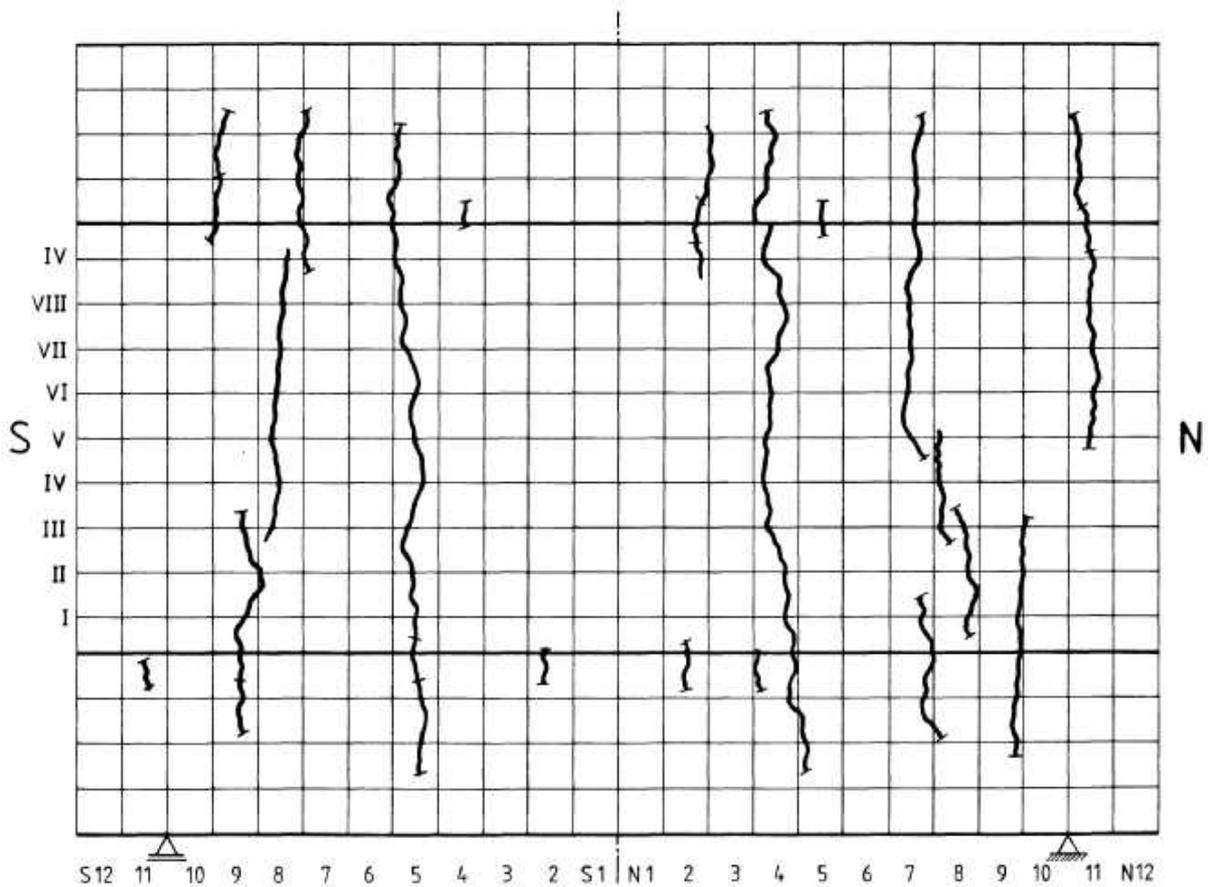
**Versuch D0**



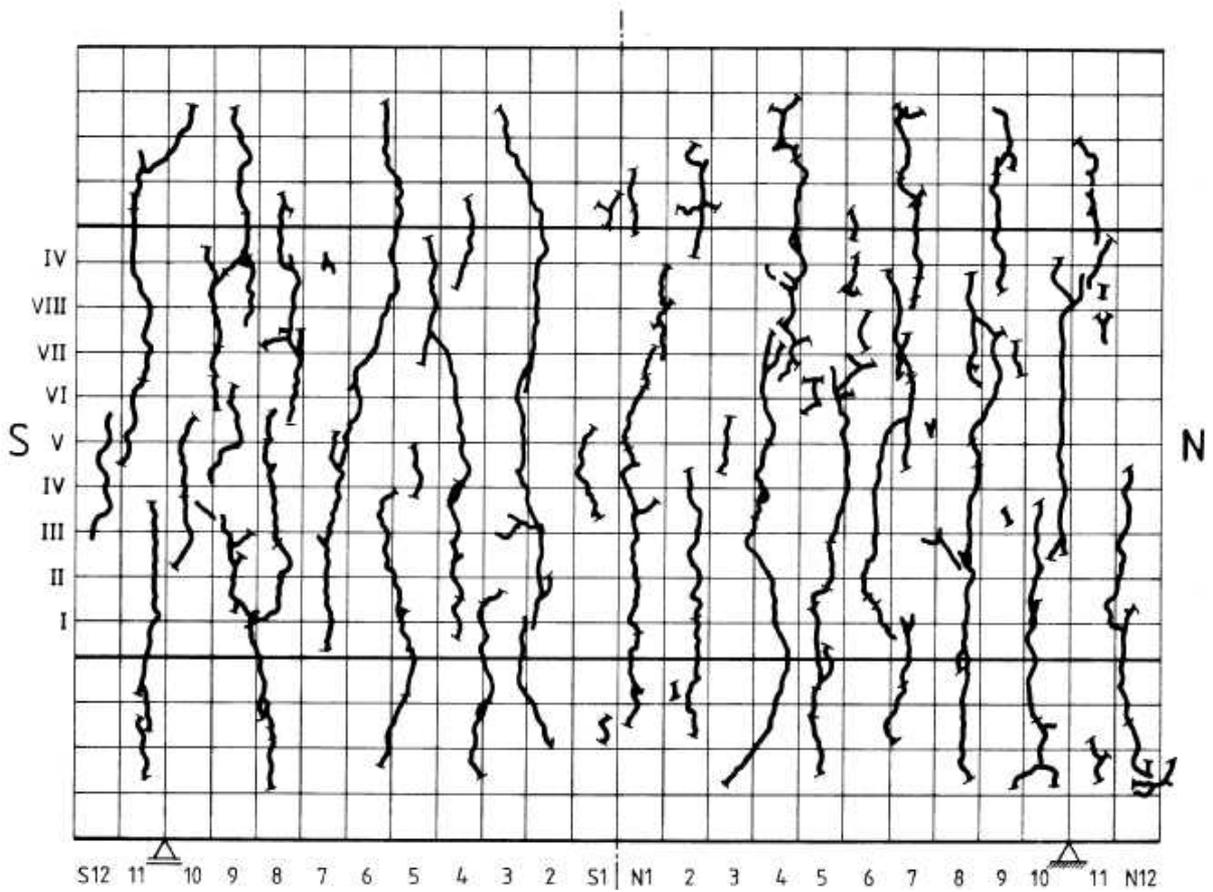
Versuch D1



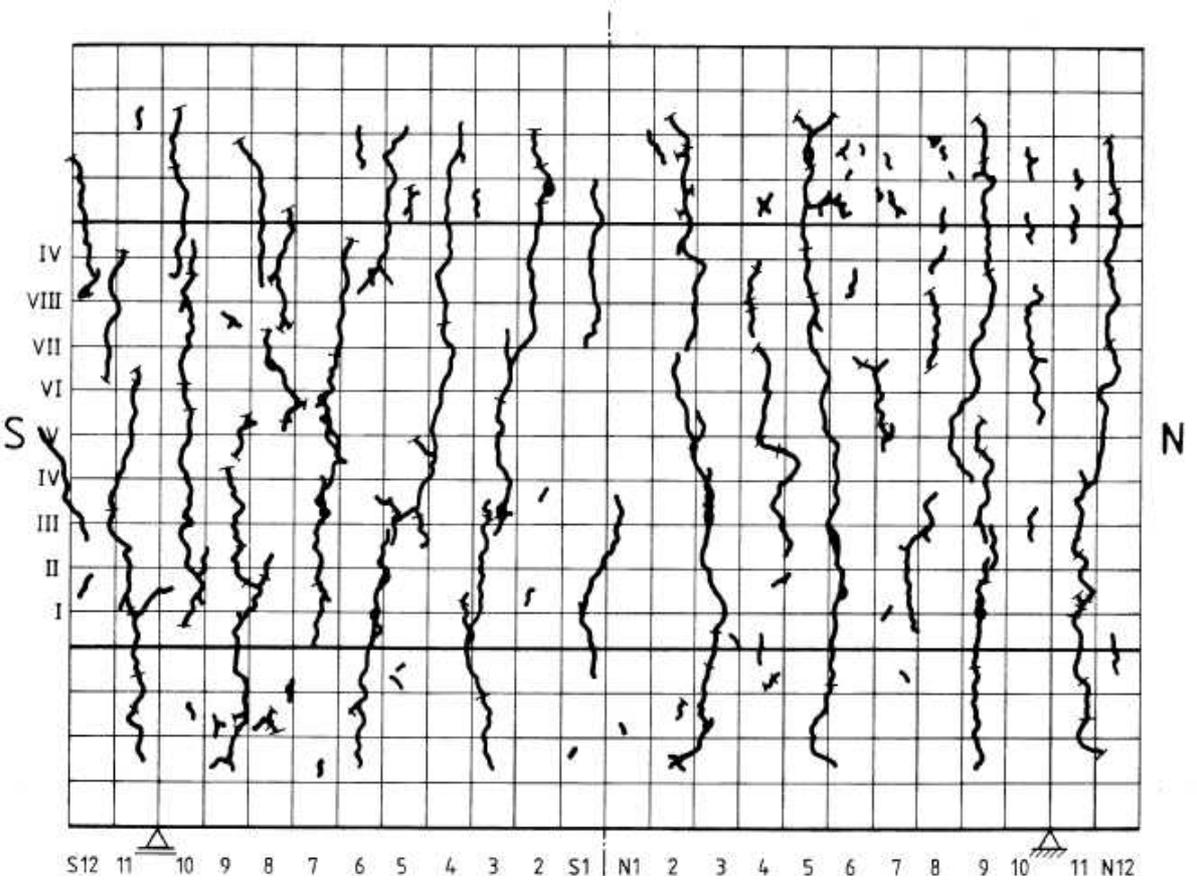
Versuch D2



Versuch D3



Versuch D4



## Anhang F.7 Statistische Rissauswertung

Versuch	Rissdaten	Mittelwert $\mu$	Standardabweichung $\sigma$	Kolmogorov-Smirnov (KS)-Test: Hypothese abweisen?	KS-Signifikanzniveau	95%-Quantile (erw.)	$W_{k,cal}$ [mm]	Einfach bew. Bereich $W_{k,mes,max}$ [mm]	Bemerkung
A0							0,22	0,15	
A1	59	0,147	0,049	nein	0,650	0,227	0,22	0,3	
A2	58	0,133	0,055	nein	0,471	0,223	0,23	0,28	
A3	55	0,144	0,044	nein	0,076	0,216	0,22	0,3	
A4	65	0,128	0,045	nein	0,052	0,202	0,22	0,3	
B0							0,39	0,3	
B1	36	0,177	0,094	nein	0,260	0,332	0,40	0,34	KS zweifelhaft, Anzahl zu gering
B2	31	0,173	0,083	nein	0,803	0,309	0,41	0,34	KS zweifelhaft, Anzahl zu gering
B3	36	0,188	0,095	nein	0,876	0,343	0,42	0,38	KS zweifelhaft, Anzahl zu gering
B4	43	0,150	0,093	nein	0,167	0,304	0,40	0,36	
C0							0,10	0,15	
C1	127	0,134	0,039	nein	0,073	0,198	0,10	0,22	
C2	133	0,106	0,044	nein	0,097	0,178	0,10	0,2	
C3	136	0,111	0,044	nein	0,051	0,184	0,10	0,24	
C4	152	0,095	0,049	ja	0,008	0,176	0,10	0,26	
D0							0,32	0,2	
D1	9	0,133	0,050	nein	0,895	0,216	0,30	0,2	KS zweifelhaft, Anzahl zu gering
D2	31	0,098	0,059	nein	0,402	0,195	0,29	0,2	KS zweifelhaft, Anzahl zu gering
D3	91	0,090	0,050	ja	0,043	0,172	0,32	0,28	
D4	99	0,084	0,055	ja	0,014	0,175	0,28	0,28	

**Anhang F.8 Verhalten beim Versagen**

Versuch	$1,75 M_{zul}$	$M_{u,Vers}$	$\frac{M_{u,Vers}}{1,75 M_{zul}}$	Stoßverhalten	Streckgrenze (einfach bew. Be- reich)
A0	409,3	428,0	1,05	Versagt ohne Aufklappen (Herausziehen der übergreifenden Stäbe)	erreicht
A1	409,3	421,7	1,03	Stoß klappt auf, Druckzone bricht herunter	nicht erreicht
A2	409,3	409,3	1,00	Stoß klappt auf, Druckzone bricht herunter	nicht erreicht
A3	409,3	420,2	1,03	Stoß klappt auf, Druckzone bricht herunter	erreicht
A4	409,3	441,5	1,08	Stoß klappt auf, Druckzone bricht herunter	erreicht
B0	182,5	219,9	1,20	Versagt nicht	weit über- schritten
B1	182,5	182,5	1,00	Versagt ohne Aufklappen (Herausziehen der übergreifenden Stäbe), Risse am Stoßende ausgeprägt (ca. 2 cm)	erreicht
B2	182,5	193,3	1,06	Versagt ohne Aufklappen (Herausziehen der übergreifenden Stäbe), Risse am Stoßende ausgeprägt (ca. 2 cm)	erreicht
B3	182,5	180,3	0,99	Versagt ohne Aufklappen (Herausziehen der übergreifenden Stäbe), Risse am Stoßende ausgeprägt (ca. 2 cm)	nicht erreicht
B4	182,5	192,1	1,05	Versagt ohne Aufklappen (Herausziehen der übergreifenden Stäbe), Risse am Stoßende ausgeprägt (ca. 1 cm)	erreicht
C0	107,5	103,1	0,96	Versagt ohne Aufklappen (Herausziehen der übergreifenden Stäbe)	nicht erreicht
C1	107,5	98,8	0,92	Stoß klappt auf, Druckzone bricht herunter	nicht erreicht
C2	107,5	113,4	1,06	Stoß klappt auf, Druckzone bricht herunter	nicht erreicht
C3	107,5	116,7	1,09	Stoß klappt auf, Druckzone bricht herunter	nicht erreicht
C4	107,5	113,4	1,06	Stoß klappt auf, Druckzone bricht herunter	nicht erreicht
D0	147,4	155,8	1,06	Versagt ohne Aufklappen (Herausziehen der übergreifenden Stäbe)	erreicht
D1	147,4	189,6	1,29	Versagt nicht, Ausfall Presse, Risse am Stoßende bleiben klein (< 5mm)	erreicht
D2	147,4	196,5	1,33	Versagt ohne Aufklappen (Herausziehen der übergreifenden Stäbe), Risse am Stoßende bleiben klein (< 5mm)	erreicht
D3	147,4	180,2	1,22	Versagt ohne Aufklappen (Herausziehen der übergreifenden Stäbe), große klaffende Risse am Stoßende (> 3 cm)	erreicht
D4	147,4	191,9	1,30	Versagt ohne Aufklappen (Herausziehen der übergreifenden Stäbe), große klaffende Risse am Stoßende (> 3 cm)	erreicht