

Use of Recycled Building Materials from Processed Mineral Building Waste in Earthworks

Stefan Huber and Dirk Heyer

This paper deals with the use of mineral substitute building materials from recycled construction waste (RC building materials) in earthworks. Their full potential as an economically and ecologically sensible alternative to primary building materials is currently far from being exhausted despite their suitability for earthworks and their use, which has already been practiced successfully in many cases. This is also due to reservations about their structural suitability and their equivalence to primary building materials. Differences in laboratory testing in connection with the determination of a reference density for compaction in the field and differences in the control of compaction in the field by means of indirect test methods compared with natural building materials also contribute to the existing reservations and can be attributed to material-specific particularities. For example in contrast to most natural building materials, the dry densities of RC building materials do not show any clear dependence on water content when determining the reference density in the Proctor test. This makes it impossible to clearly identify a clear optimum for determining the Proctor density. The reason for this is the porosity of the individual grains of RC building materials. As a result, some of the added water is stored in the pores and is no longer available on the grain surface to facilitate grain rearrangement. For compaction control in the field, the application of the indirect test methods of static and dynamic plate load tests in conjunction with the ZTV E-StB guideline values for coarse-grained soils can lead to the exclusion of RC building materials via the construction contract. Although sufficiently high E_{v2} values are determined in the static plate load test, RC building materials usually have ratio values E_{v2}/E_{v1} above the permissible limit value. When using the dynamic plate load test, however, only E_{vd} values below the required values for the proof of the degree of compaction are usually achieved. This article is intended to provide an overview of the relevant earthwork requirements for RC building materials and their relevant earthwork properties. In addition, the aim is to show where differences and difficulties arise in comparison to natural building materials. Where possible, proposals for solutions should be made with regard to the difficulties encountered.

Verwendung von Recyclingbaustoffen aus aufbereiteten mineralischen Baurestmassen im Erdbau

Stefan Huber und Dirk Heyer

1.	Einleitung.....	374
2.	Bautechnische Anforderungen an RC-Baustoffe im Erdbau.....	376
3.	Erdbautechnisch relevante Eigenschaften von RC-Baustoffen	377
3.1.	Stoffliche Zusammensetzung.....	377
3.2.	Sieblinien.....	379
3.3.	Verdichtbarkeit	380
4.	Verdichtungskontrolle von RC-Baustoffen.....	382
5.	Zusammenfassung	387
6.	Literatur	388

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Verwendung von mineralischen Ersatzbaustoffen aus aufbereiteten Baurestmassen (RC-Baustoffe) im Erdbau. Deren volles Potential als ökonomisch und ökologisch sinnvolle Alternative zu Primärbaustoffen wird trotz ihrer erdbautechnischen Eignung und ihres bereits vielfach erfolgreich praktizierten Einsatzes derzeit bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Mitverantwortlich dafür sind auch Vorbehalte gegenüber ihrer bautechnischen Eignung und ihrer Gleichwertigkeit zu Primärbaustoffen. Zu den bestehenden Vorbehalten tragen auch Unterschiede bei, die bei der Prüfung im Labor im Zusammenhang mit der Festlegung einer Bezugsdichte für die Verdichtung im Feld sowie bei der Verdichtungskontrolle mittels indirekter Prüfverfahren im Feld gegenüber natürlichen Baustoffen auftreten und die auf materialspezifische Besonderheiten zurückzuführen sind. Dieser Beitrag soll einen Überblick über die erdbautechnisch relevanten Anforderungen an RC-Baustoffe sowie ihre erdbautechnisch relevanten Eigenschaften liefern. Zudem soll aufgezeigt werden, wo im Vergleich zu natürlichen Baustoffen Unterschiede und Schwierigkeiten auftreten. Soweit möglich, sollen Lösungsvorschläge hinsichtlich der auftretenden Schwierigkeiten unterbreitet werden.

1. Einleitung

Im Erdbau müssen wie in allen Bereichen des Bauwesens grundsätzlich Anforderungen an die Standsicherheit und die dauerhafte Gebrauchstauglichkeit beachtet werden. Dabei ist es irrelevant, ob Primärbaustoffe oder mineralische Ersatzbaustoffe aus aufbereiteten Baurestmassen (RC-Baustoffe), die sich in den letzten Jahren zunehmend als ökonomisch und ökologisch sinnvolle Alternative zu natürlichen Baustoffen am Markt etablieren, verwendet werden. Die Anforderungen an den Baustoff und die Ausführung der Erdarbeiten variieren allerdings in Abhängigkeit vom Einsatzbereich, wobei sich ihre Größe nach den planmäßigen Einwirkungen auf das Bauwerk während der Nutzung sowie den Verformungen, die ohne Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit toleriert werden können, richtet. Dies soll am Beispiel des in Bild 1 schematisch dargestellten Regelquerschnittes einer Straße verdeutlicht werden.

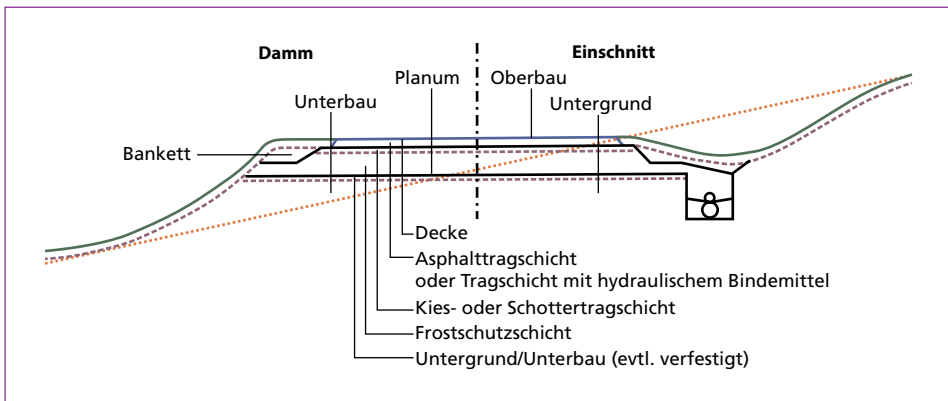


Bild 1: Damm- und Einschnittsquerschnitt einer Straße (Schema)

Quelle: Natzschka, H.: Straßenbau – Entwurf und Bautechnik. 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage 2011, Vieweg+Teuber Verlag, Wiesbaden 2011

Die auf die einzelnen Schichten des Straßenaufbaus einwirkenden Belastungen aus dem Verkehr nehmen mit zunehmender Tiefe ausgehend von den Deckschichten über die ungebundenen Schichten (Trag- und Frostschutzschichten) bis zum Unterbau und dem Untergrund infolge der Lastverteilung über die Tiefe sukzessive ab. Für die höher belasteten ungebundenen Schichten des Straßenoberbaus (Schichten ohne Bindemittel) gelten entsprechend höhere bautechnische Anforderungen sowohl an den Baustoff als auch an die Ausführung der Arbeiten, als für die weniger stark belasteten Bereiche des Straßenunterbaus. Während die einschlägigen Regelwerke für die ungebundenen Schichten des Straßenoberbaus neben direkten Anforderungen an den mindestens zu erreichenden Verdichtungsgrad auch direkte Anforderungen an den Verformungsmodul E_{v2} enthalten, sind für die dem Erdbau zuzurechnenden Bereiche mit Ausnahme des Planums und von Banketten lediglich Anforderungen an den Verdichtungsgrad zu beachten, die im Erdbau zudem meist weniger streng als für die ungebundenen Schichten des Straßenoberbaus sind.

Die Ausführungen zu den Anforderungen an den Verdichtungsgrad im Erdbau zeigen bereits die grundlegende Bedeutung der Verdichtung im Erdbau. Dabei kommt es durch die zugeführte Verdichtungsenergie zu einer Umlagerung der Einzelkörner des Baustoffes in eine dichtere Lagerung, was gleichbedeutend mit einer Erhöhung der Anzahl an Korn-zu-Korn-Kontakten und einer Reduktion des Porenraumes ist. Dies führt zur Erhöhung der Scherfestigkeit und Steifigkeit des Baustoffes und ist somit wesentlich für den anforderungsgerechten Abtrag der Gebrauchslasten und zur Begrenzung der Setzungen. Die Verdichtbarkeit der verwendeten Baustoffe sowie ihre ausreichende Verdichtung besitzen somit entscheidende Bedeutung für die Qualität der ausgeführten Erdarbeiten. Ob die geforderte Qualität im Feld auch erreicht wurde, wird nach Ausführung der Erdarbeiten durch die Verdichtungskontrolle überprüft.

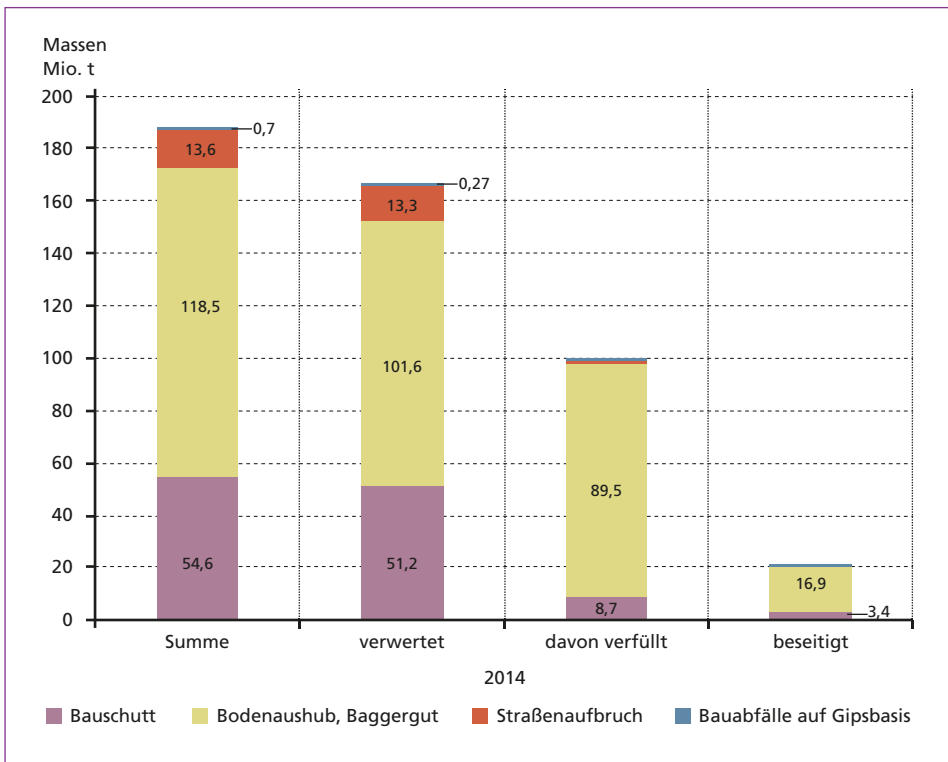


Bild 2: Anfall und Bewirtschaftung mineralischer Restmassen in Deutschland in 2014

Quelle: Kreislaufwirtschaft Bau 2017

Bei RC-Baustoffen kann es u. a. im Verdichtungsverhalten sowie bei der Verdichtungskontrolle mittels indirekter Prüfverfahren im Vergleich zu Primärbaustoffen aufgrund materialspezifischer Besonderheiten allerdings zu Unterschieden kommen. Diese Unterschiede müssen berücksichtigt werden, da sie in der Praxis zu Unklarheiten und damit auch zur Ablehnung von RC-Baustoffen führen können. Dass im Hinblick auf eine möglichst umfassende hochwertige Verwertung mineralischer Baurestmassen

noch erhebliche Anstrengungen notwendig sind, wird auch anhand der in Bild 2 dargestellten jährlich in Deutschland anfallenden Mengen an mineralischen Restmassen sowie ihrer Bewirtschaftungswege verdeutlicht. Demnach wird zwar bereits heute der überwiegende Anteil mineralischer Baurestmassen einer Verwertungsmaßnahme gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) zugeführt und die ab 01.01.2020 nach § 14 KrWG gesetzlich vorgeschriebene Verwertungsquote für nichtgefährliche Bau- und Abbruchabfälle erfüllt. Wird allerdings berücksichtigt, dass ein Großteil davon lediglich in die Verfüllung als gemäß § 6 KrWG nachrangigste Form der Verwertung geht, zeigt sich, dass das Ziel einer umfassenden hochwertigen Verwertung von RC-Baustoffen unterlaufen und ihr volles Potential bei weitem noch nicht ausgeschöpft wird.

Dabei existieren trotz bestehender Unsicherheiten bereits viele Beispiele, die die Eignung von RC-Baustoffen für bautechnische Anwendungen aufzeigen. So zeigen z.B. Krass und Kollar [18], Poon und Chan [20] oder Grégoire et al. [10] die Eignung von RC-Baustoffen für den Einsatz im Ober- und Unterbau von Straßen auf und Vinmans [25] beleuchtete die Herstellung von Schutzwällen aus RC-Baustoffen. Über die Eignung von rezyklierten Betonbruch bzw. eines aufbereiteten Bauschuttgemisches zur Herstellung standfester Bankette wurde von Koukoulidou et al. [17] bzw. von Huber et al. [15] berichtet. Henzinger [12] hat die Möglichkeit aufgezeigt, einen feinkörnigen, erdbautechnisch zu weichen Boden durch die Zugabe von aufbereitetem Bauschutt soweit zu verbessern, dass ein qualifizierter Erdbaustoff entsteht. Derzeit wird auch die Möglichkeit untersucht, RC-Baustoffe zur Herstellung zeitweise fließfähiger Verfüllbaustoffe zu verwenden (vgl. Huber und Heyer [16]).

2. Bautechnische Anforderungen an RC-Baustoffe im Erdbau

Um die Standsicherheit und dauerhafte Gebrauchstauglichkeit eines Erdbauwerkes gewährleisten zu können, existieren im erdbautechnischen Regelwerk sowohl Vorgaben bezüglich der zu verwendenden Baustoffe, als auch der Ausführung und der Qualität der Erdarbeiten. Das maßgebende Regelwerk im Hinblick auf die im Erdbau des Straßenbaus zu verwendenden Baustoffe sind die Technischen Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus (TL BuB E-StB 09). Sie enthalten stoffspezifische erdbautechnische und umweltrelevante Anforderungen an Böden und Baustoffe, die zur Herstellung von Erdbauwerken geliefert werden. Die Einhaltung der umwelttechnischen Vorgaben durch natürliche und rezyklierte Baustoffe ist dabei auch im Erdbau zwingende Voraussetzung für ihre Verwendung. In Bezug auf die bautechnischen Anforderungen von RC-Baustoffen sind die im Labor zu ermittelnde Plastizität und Korngrößenverteilung, der Wassergehalt sowie die stoffliche Zusammensetzung zu berücksichtigen.

Die Anforderungen an die Plastizität und die Korngrößenverteilung sowie den Wassergehalt zielen darauf ab, einen erdbautechnisch geeigneten Baustoff mit guter Verarbeitbarkeit zu gewährleisten. Nach TL BuB E-StB 09 muss ein RC-Baustoff einer der Bodengruppen nach DIN 18196 in den Tabellen 1 bis 3 der TL BuB E-StB 09

entsprechen und einen Wassergehalt aufweisen, der für den Einbau und die Verdichtung geeignet ist. Hierzu sollte der Wassergehalt in der Spanne bei 97 % der Proctordichte liegen. Hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung nach TP Gestein-StB Teil 3.1.5 beschränken die TL BuB E-StB 09 die Anteile an Ausbauspalt bzw. an nichtmineralischen Fremdstoffen wie Holz, Gummi, Kunststoffe oder Textilien auf ≤ 10 Ma.-% bzw. $\leq 0,2$ Ma.-%.

Im Hinblick auf die Ausführung der Erdarbeiten sind in Deutschland die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau (ZTV E-StB 17) maßgeblich. Sie beinhalten u. a. anwendungsbezogene Anforderungen an die ausgeführten Erdarbeiten in Form des Verdichtungsgrades und enthalten Vorgaben in Bezug auf die Prüfung der erzielten Qualität bei der Verdichtungskontrolle. Um eine ausreichende Verdichtung des Erdbaustoffes sicherzustellen, muss demnach mindestens ein gewisser Verdichtungsgrad D_{pr} , der als das Verhältnis aus der im Feld erreichten Trockendichte zu der im Labor bestimmten Proctordichte gebildet wird, erreicht werden. Der Verdichtungsgrad D_{pr} stellt somit das primäre Prüfkriterium im Erdbau dar. Kann er im Zuge der Verdichtungskontrolle nachgewiesen werden, kann von einer ausreichenden Verdichtung ausgegangen werden. Die Höhe des geforderten Verdichtungsgrades richtet sich dabei nach der Art des Bauwerkes und den damit verbundenen planmäßigen Einwirkungen sowie den zulässigen Setzungen, die ohne Einschränkungen der Gebrauchstauglichkeit des Bauwerkes toleriert werden können. Beispielsweise gilt bei Schutzwällen, die in der Regel nicht regelmäßig befahren werden, bereits ein Verdichtungsgrad von $D_{pr} \geq 97$ % als anforderungsgerecht, während bei Banketten, die möglicherweise direkt durch Verkehr befahren werden, ein höherer Verdichtungsgrad von $D_{pr} \geq 100$ % gefordert wird. Zusätzlich muss auf der Oberfläche des Banketts ein Verformungsmodul $E_{v2} \geq 80$ MN/m² bzw. $E_{vd} \geq 40$ MN/m² nachgewiesen werden.

3. Erdbautechnisch relevante Eigenschaften von RC-Baustoffen

3.1. Stoffliche Zusammensetzung

Bei RC-Baustoffen handelt es sich um mineralische Restmassen, die überwiegend beim selektiven Rückbau von Hochbauten und dem Aufbruch von Betonstraßen anfallen und in mobilen oder stationären Aufbereitungsanlagen durch Sortieren, Brechen, Sieben und Klassieren aufbereitet werden. Wirtschaftliche Bedeutung besitzen in erster Linie sortenreiner Betonbruch sowie Bauschuttgemische mit variierender stofflicher Zusammensetzung (RC-Mix). Die stoffliche Zusammensetzung von RC-Mix hat dabei insofern bautechnische Relevanz, als dass einige Bestandteile wie z.B. Porenbeton oder Putze durch ihre geringen Festigkeiten die bautechnischen Eigenschaften ungünstig beeinflussen. [4, 18] Doch auch enthaltene Ziegelanteile können in der Praxis häufig zu Vorbehalten gegenüber der bautechnischen Eignung von RC-Mix führen [15].

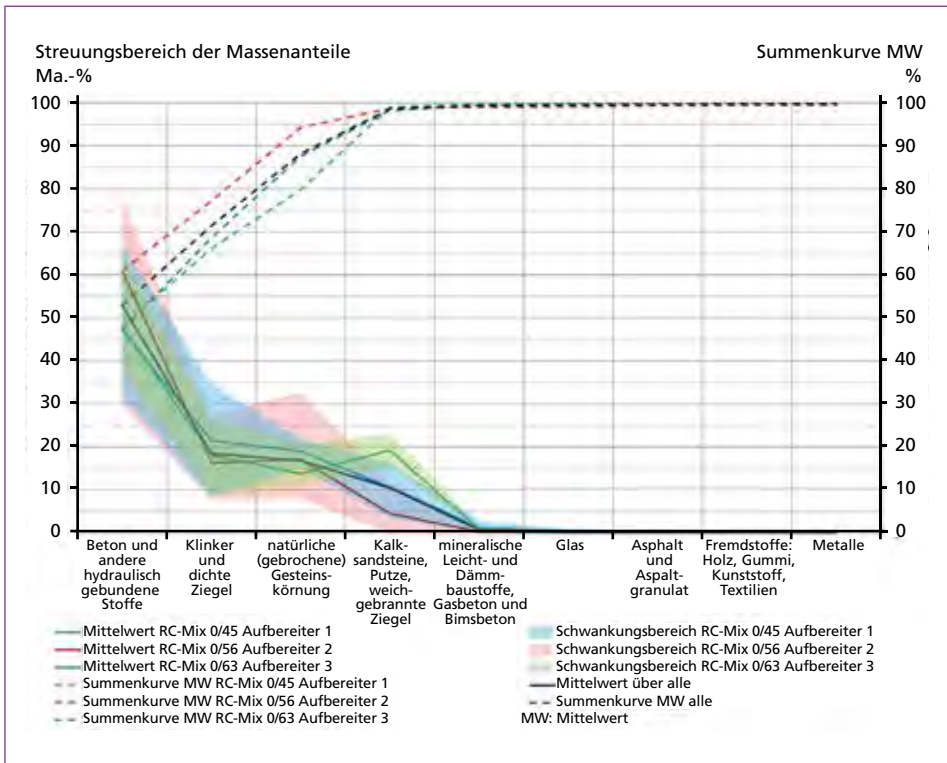


Bild 3: Typische stoffliche Zusammensetzungen von RC-Mix

Um Kenntnis über die zeitliche und räumliche Variation der stofflichen Zusammensetzung von RC-Mix zu erlangen, wurden die im Zuge der Fremdprüfung erstellten Prüfzeugnisse von drei RC-Mixmaterialien, hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung nach TP Gestein-StB Teil 3.1.5 ausgewertet. Berücksichtigt wurden dabei 15 zwischen dem ersten Quartal 2014 und dem letzten Quartal 2016 erstellte Prüfzeugnisse. Das Ergebnis dieser Auswertung in Bild 3 zeigt, dass die Anteile der einzelnen Stofffraktionen zwar einer gewissen Streuung unterliegen, die drei RC-Mixmaterialien im Durchschnitt aber eine vergleichbare stoffliche Zusammensetzung aufweisen und dass die Anforderungen der TL BuB E-StB 09 eingehalten werden (vgl. Abschnitt 2). Bild 3 zeigt überdies, dass die RC-Mixmaterialien überwiegend aus den Stofffraktionen *natürliche Gesteinskörnung*, *Beton und andere hydraulisch gebundene Stoffe*, *Klinker und dichte Ziegel* sowie *Kalksandstein*, *Putze, weichgebrannte Ziegel* bestehen, während unerwünschte Bestandteile wie z.B. *mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe* oder nichtmineralische Fremdstoffe zuverlässig aussortiert werden.

Im Zusammenhang mit der Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung nach TP Gestein-StB Teil 3.1.5 sei darauf hingewiesen, dass die Zuordnung der einzelnen Bestandteile zu den Stofffraktionen durch händisches Sortieren nach Augenschein und subjektiver Einschätzung erfolgt. Eine objektive Zuordnung der Einzelkörner zu

den einzelnen Stofffraktionen ist bei diesem zeitaufwendigen Verfahren dagegen nur schwer möglich, was zu einer je nach Auszählendem unterschiedlichen stofflichen Zusammensetzung führen kann. Eine Auszählung der Kornanteile < 4 mm ist aufgrund der geringen Korngrößen ebenfalls nicht möglich, so dass diese Anteile keine Berücksichtigung finden. Diese Punkte führen dazu, dass die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung mit gewissen Unsicherheiten behaftet ist (vgl. Henzinger et al. [13]).

Im Hinblick auf die Vorbehalte gegenüber den in RC-Mix enthaltenen Ziegelanteilen sei anzumerken, dass die planmäßigen Beanspruchungen in erdbautechnischen Anwendungen meist nicht so hoch sind, als dass die üblicherweise in einem sachgemäß aufbereiteten RC-Mix enthaltenen Ziegelanteile problematisch wären. Entsprechend enthalten die TL BuB E-StB 09 hinsichtlich der zulässigen Ziegelanteile auch keine Vorgaben. Ist mit höheren planmäßigen Belastungen zu rechnen (z.B. ungebundene Schichten des Straßenoberbaus), können hohe Ziegelanteile allerdings problematisch werden. Dementsprechend sind auch strengere Vorgaben in Bezug auf die stoffliche Zusammensetzung zu beachten. Beispielsweise beschränken die TL SoB-StB 04/07, die für ungebundene Schichten zu beachten sind, u. a. auch den Anteil an Klinkern, Ziegeln und Steinzeug auf höchstens 30 Ma.-%. Diese Beschränkung geht auf Untersuchungen von Krass und Kollar [18] zurück, die gezeigt haben, dass RC-Baustoffe mit einem Ziegelanteil von bis zu 30 Ma.-% für die Herstellung von ungebundenen Tragschichten noch geeignet sind. Zu vergleichbaren Ergebnissen kommen auch Arulrajah et al. [1], die Gemische mit 25 Ma.-% Ziegelanteil als unproblematisch für eine Anwendung im Straßenoberbau erachten.

Dass eine pauschale Beurteilung von RC-Baustoffen hinsichtlich ihrer Beständigkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen zu kurz greift, zeigt sich auch in Untersuchungen von Baumgärtel et al. [2], die Siebtrommelversuche nach TP BF-StB Teil C20 an verschiedenen RC-Baustoffen durchgeführt haben. Die Ergebnisse zeigen, dass die beiden mengenmäßig relevantesten Stofffraktionen Beton und Ziegel eine hohe Beständigkeit gegenüber mechanischem Abrieb sowie Wassergehalts- und Temperaturänderungen besitzen, während insbesondere Mörtel und Putze eine deutlich geringere Resistenz besitzen.

3.2. Sieblinien

Im Zuge der Auswertung der stofflichen Zusammensetzung der drei RC-Mixmaterialien (Bild 3) wurden auch ihre Sieblinien ausgewertet (Sieblinienband in Bild 4). Das dargestellte Sieblinienband ist in seinem Verlauf auch auf sortenreinen Betonbruch vergleichbarer Korngröße übertragbar und zeigt, dass RC-Baustoffe meist eine gut abgestufte Sieblinie mit einem Feinkornanteil von weniger als zehn Massenprozent besitzen. Dies ist im Hinblick auf eine Verwendung im Erdbau und der damit verbundenen Anforderung an eine gute Verdichtbarkeit günstig. Die beim Brechen der mineralischen Baurestmassen entstehenden Feinanteile werden bei der Aufbereitung zu großen Teilen wieder abgesiebt. Aufgrund der in der Regel unbedeutenden Anteile an Feinkorn bleibt es meist auch irrelevant, dass RC-Baustoffe bei der Sedimentationsanalyse im

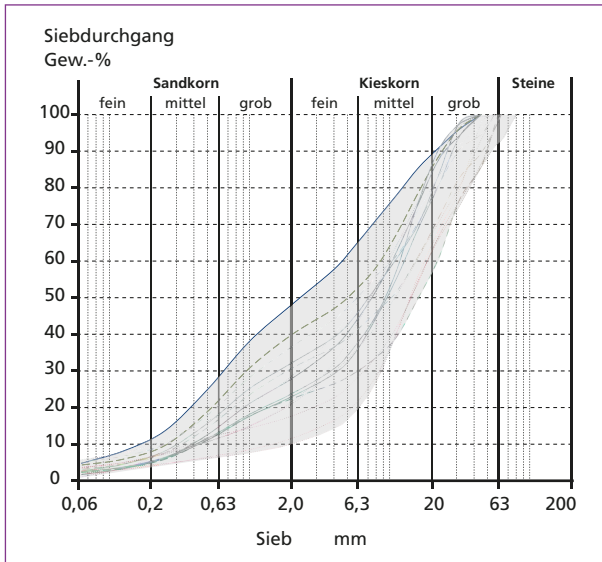


Bild 4:

Typisches Sieblinienband von RC-Mixmaterialien

Zuge der bautechnischen Klassifizierung im Labor häufig in der Lösung ausflocken, was auch mittels Antikoagulationsmittel nicht in den Griff zu bekommen ist. Sollten relevante Feinanteile enthalten sein und soll ihre Massenverteilung ermittelt werden, müsste auf alternative Verfahren zurückgegriffen werden (z.B. Laser Particle Sizer).

3.3. Verdichtbarkeit

Zur Bestimmung der Bezugsdichte für die Praxis sowie zur Ermittlung des optimalen Einbauwassergehaltes wird im Labor vorab der Proctorversuch nach DIN 18127 durchgeführt. Dabei wird die Trockendichte als Funktion des Wassergehaltes ermittelt. Während bei den meisten natürlichen Baustoffen die Trockendichte mit zunehmenden Wassergehalt typischerweise bis zu einem maximalen Wert, der Proctordichte, ansteigt, um bei weiterer Zunahme des Wassergehaltes in etwa parallel zur Sättigungslinie wieder abzufallen, zeigen auch gut abgestufte RC-Baustoffe oft keine ausgeprägte Abhängigkeit der Trockendichte vom Wassergehalt. Anstatt des bekannten parabelförmigen Verlaufes weisen sie mit steigendem Wassergehalt häufig lineare Anstiege (vergleichbar zu enggestuften natürlichen Materialien) oder konkave Krümmungen auf, wodurch die Identifikation eines klaren Optimums zur Festlegung der Proctordichte nicht eindeutig möglich ist (s. auch Krass und Kollar [18]).

Ursächlich für dieses Verhalten ist die Porosität der Einzelkörner, die dadurch ein vergleichsweise hohes Wasseraufnahmevermögen besitzen (vgl. z.B. Diedrich et al. [5]). Dies bewirkt, dass nur mehr ein Teil des zugegebenen Wassers verdichtungsbegünstigend in den Kontaktpunkten der Einzelkörner zur Verfügung steht und die Kornumlagerung erleichtert, während ein weiterer Teil in den Poren des Materials gespeichert wird und nicht weiter verdichtungswirksam ist. Die Größe des in den Poren

gespeicherten Anteils hängt dabei neben der Eigenfeuchte des Materials und der Homogenisierungszeit auch von der Art des Materials ab. Dabei nimmt die Fähigkeit zur Wasseraufnahme mit abnehmender Kornrohichte bzw. zunehmender Porosität der Einzelkörner zu (z.B. Hoffmann [14], Krass und Kollar [18]).

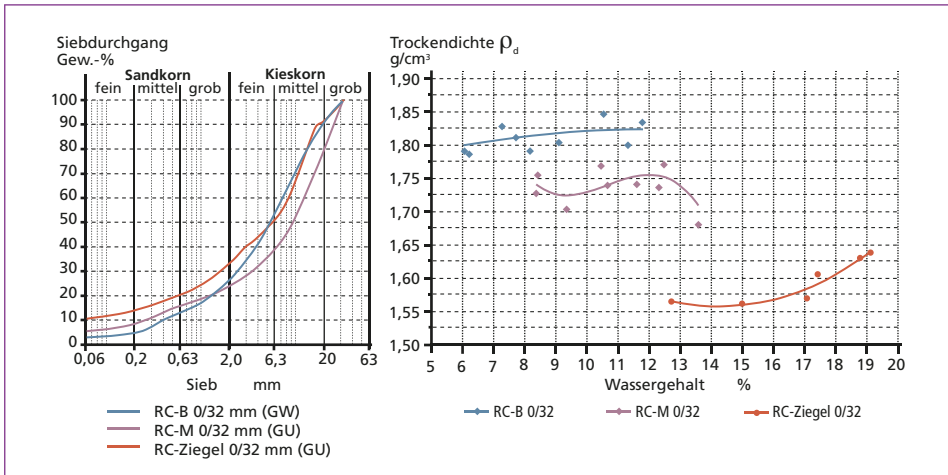


Bild 5: Sieblinien (links) und typische Proctorkurven (rechts) von RC-Baustoffen

Typische im Proctorversuch nach DIN 18127 bestimmte Verdichtungskurven von RC-Baustoffen im Korngrößenbereich 0/32 mm (sortenreiner Betonbruch RC-B, Bauschuttgemisch RC-M, Gemisch aus Mauer- und Dachziegelbruch RC-Ziegel) sind in Bild 5 (rechts) wiedergegeben. Dargestellt sind die Punkte bis zu den Wassergehalten, bei denen es bei der Versuchsdurchführung gerade noch nicht zum Wasseraustritt kommt. Obwohl es sich um gut abgestufte Materialien handelt (Bild 5, links), Bodengruppen nach DIN 18196 in Klammern), zeigen die im Proctorversuch bestimmten Trockendichten infolge der Wasseraufnahme durch die Einzelkörner keine eindeutige Abhängigkeit vom Wassergehalt und ein klares Optimum kann nicht identifiziert werden.

Ergänzend zum Proctorversuch wurde an den untersuchten Materialien die zeitliche Wasseraufnahme sowie die Kornrohichte getrennt für die Kornfraktionen 4/8 mm, 8/16 mm und 16/32 mm in Anlehnung an DIN EN 1097-6 ermittelt (Bild 6). Demnach besitzen die Kornfraktionen des RC-Ziegels die geringsten Kornrohichten und damit die größte Porosität (vgl. Bild 6 (rechts)). Dementsprechend weisen die Kornfraktionen des Ziegels auch das größte Wasseraufnahmevermögen auf (vgl. Bild 6 links). Hingegen nehmen die Kornfraktionen des RC-B, welche die höchsten Kornrohichten und damit die geringste Porosität besitzen, am wenigsten Wasser auf. Der RC-M, der sowohl Anteile an Beton und Ziegeln besitzt, befindet sich sowohl im Hinblick auf die Wasseraufnahme als auch die Kornrohichten erwartungsgemäß zwischen den beiden sortenreinen Materialien. Die in der Literatur häufig berichtete Tendenz, wonach die Wasseraufnahme mit abnehmenden Korngrößen zunimmt (z.B. Diedrich et al. [5], Hansen [11]), konnte in den eigenen Versuchen nicht beobachtet werden.

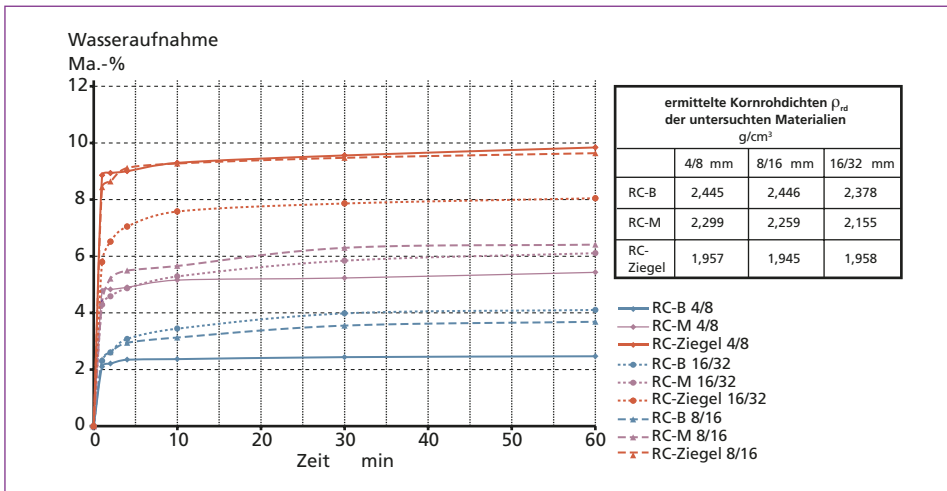


Bild 6: Zeitliche Wasseraufnahme (links) und ermittelte Kornrohdichten (rechts) der im Proctorversuch untersuchten RC-Materialien

Die Tendenz zur höheren Wasseraufnahme mit zunehmender Porosität der Einzelkörner sowie die damit verbundenen niedrigeren Kornrohdichten spiegelt sich auch in den Proctorkurven in Bild 5 (rechts) wider. So besitzt der Betonbruch auch im verdichteten Zustand die höchsten Trockendichten bei den geringsten Wassergehalten, während der RC-Ziegel die niedrigsten Trockendichten bei den höchsten Wassergehalten aufweist. Die Versuchsergebnisse zur zeitlichen Wasseraufnahme zeigen weiterhin, dass zur Gewährleistung der Wiederholbarkeit des Verdichtungsversuches insbesondere die Homogenisierungszeit des Materials vor der Versuchsdurchführung beachtet werden muss, da diese direkten Einfluss auf den Anteil des verdichtungsbegünstigend zur Verfügung stehenden Wassers hat. Da die Identifikation eines eindeutigen Optimums anhand der Proctorkurven in Bild 5 (rechts) zudem nicht möglich ist, muss zur Bestimmung der Bezugsdichte für die Verdichtung im Feld auf eine andere Möglichkeit zurückgegriffen werden. Denkbar ist z.B. die Mittelung der drei höchsten im Proctorversuch erreichten Trockendichten oder aller in den Verdichtungsversuchen ermittelten Trockendichten und die Beaufschlagung mit der Standardabweichung aller ermittelten Trockendichten. Eine weitere Alternative besteht in der ingenieurmäßigen Beurteilung der Ergebnisse und der Festlegung eines *sinnvollen* Optimums.

4. Verdichtungskontrolle von RC-Baustoffen

Zur Sicherstellung einer ausreichenden Verdichtung muss im Erdbau der anwendungsbezogen geforderte Verdichtungsgrad D_{pr} im Zuge der Verdichtungskontrolle im Feld nachgewiesen werden. In der Erdbaupraxis können hierzu direkte und indirekte Prüfverfahren herangezogen werden. Bei den direkten Prüfverfahren wird dabei die Trockendichte als Prüfgröße direkt ermittelt. Beispiele für direkte Prüfverfahren sind die in DIN 18125-2 genormten Volumenersatzverfahren. Sie sind mit Ausnahme des

Ausstechzylinderverfahrens, welches nur für feinkörnige und sandige Böden geeignet ist, weitgehend bei RC-Baustoffen anwendbar. Bei den Volumenersatzverfahren muss allerdings berücksichtigt werden, dass die korrekte Bestimmung des Volumens mit Unsicherheiten behaftet ist.

So wird beim Ballonersatzverfahren, das in der Praxis wegen seiner einfachen Handhabung häufig Anwendung findet, das ausgehobene Prüfvolumen aufgrund der Kantigkeit der Einzelkörner der RC-Baustoffe in der Regel zu klein bestimmt. Der Grund ist, dass die Kantigkeit der Einzelkörner zu vergleichsweise großen Hohlräumen in der Wandung des Prüfvolumens führt, die durch die Blase des Densitometers aufgrund ihrer Elastizität nur schwer erfasst werden können. Dies führt prüfverfahrensbedingt zu größeren Dichten, als tatsächlich im Feld vorhanden sind. Die mit größerem Aufwand verbundenen Gips-, Flüssigkeits- und Sandersatzverfahren sind trotz des größeren Aufwandes ebenfalls nicht prüffehlerfrei. Auch bei der in der Erdbaupraxis weniger verbreiteten direkten Prüfung mit der radiometrischen Sonde, die zwar eine einfache Bedienbarkeit besitzt und eine direkte und schnelle Bestimmung der Trockendichte ermöglicht, dafür aber aufgrund ihrer Radioaktivität eine besondere Qualifikation des Prüfenden und besondere Sorgfalt im Umgang bedarf, können in den RC-Baustoffen enthaltene Metallanteile zu Fehlern bei der Dichte- und Wassergehaltsbestimmung führen.

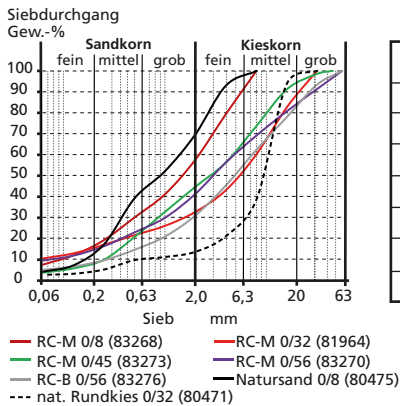
Tabelle 1: Richtwerte nach ZTV E-StB 17 für die Zuordnung vom E_{v2} -Wert (oben) bzw. E_{vd} -Wert (unten) zum Verdichtungsgrad D_{pr} bei grobkörnigen Böden

Bodengruppe	statischer Verformungsmodul E_{v2} MN/m ²	Verdichtungsgrad D_{pr} %
GW, GI	≥ 100	≥ 100
	≥ 80	≥ 98
GE, SE, SW, SI	≥ 80	≥ 100
	≥ 70	≥ 98
Bodengruppe	dynamischer Verformungsmodul E_{vd} MN/m ²	Verdichtungsgrad D_{pr} %
GW, GI, GE	≥ 50	≥ 100
	≥ 40	≥ 98

Für grob- und gemischtkörnige Böden mit einem Feinkornanteil < 15 Ma.-% stellen die indirekten Prüfverfahren statischer und dynamischer Plattendruckversuch aufgrund ihrer schnelleren und einfacheren Durchführbarkeit im Vergleich zu den Volumenersatzverfahren in der Praxis eine weit verbreitete Alternative zu den direkten Prüfverfahren dar. Dabei wird aus der Steifigkeit des Untergrundes, die für bestimmte Böden mit der Trockendichte korreliert, indirekt auf den Verdichtungsgrad geschlossen. Während gemäß den ZTV E-StB 17 für gemischtkörnige Böden mit einem Feinkornanteil zwischen 5 und < 15 Ma.-% zur Ermittlung des Zusammenhanges zwischen dem gewählten indirekten Prüfmerkmal und dem Verdichtungsgrad D_{pr} das Anlegen eines Probefeldes erforderlich ist, enthalten sie für grobkörnige Böden mit einem Feinkornanteil < 5 Ma.-% Tabellenwerte, mit denen bei Kenntnis der Bodengruppe dem Verformungsmodul E_{v2} bzw. E_{vd} ein Verdichtungsgrad zugewiesen werden kann (Tabelle 1). Bei Anwendung

des statischen Plattendruckversuchs und Verwendung der Tabellenwerte nach ZTV E-StB muss neben der absoluten Größe des E_{v2} -Wertes zusätzlich der Verhältniswert E_{v2}/E_{v1} beachtet werden, der einen bestimmten Anforderungswert nicht überschreiten darf ($E_{v2}/E_{v1} \leq 2,3$ für $D_{Pr} \geq 100 \%$ bzw. $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,5$ für $D_{Pr} \geq 98 \%$).

Bei RC-Baustoffen können im Zusammenhang mit der Anwendung der indirekten Prüfverfahren zum Nachweis des Verdichtungsgrades D_{Pr} allerdings Schwierigkeiten auftreten, die bei Nichtberücksichtigung zum Ausschluss von RC-Baustoffen über den Bauvertrag führen können. Die möglichen Schwierigkeiten sollen anhand von Ergebnissen aus Feldversuchen mit mehreren RC-Baustoffen, die bei verschiedenen Verdichtungsgraden eingebaut und mittels direkter und indirekter Prüfverfahren beprobt wurden, verdeutlicht werden. Die Sieblinien der untersuchten RC-Materialien sind in Bild 7 (links) dargestellt, Bild 7 (rechts) gibt die im Labor als Mittelwerte der drei höchsten im Proctorversuch nach DIN 18127 ermittelten Trockendichten bestimmten Proctordichten sowie die Bodengruppen der Materialien nach DIN 18196 wider (Hinweis: RC-M 0/8 (83268), RC-M 0/32 (81964) und RC-M 0/56 (83270) entsprechen der Bodengruppe GU, Tabellenwerte der ZTV E-StB 17 sind strenggenommen nicht anwendbar!). Als natürliche Vergleichsmaterialien sind zudem ein natürlicher Sand und Rundkies in den Ergebnissen mitaufgeführt.



Material	ρ_{Pr} g/cm ³	Bodengruppe nach DIN18196
RC-M 0/8(83268)	1,879	GU
RC-M 0/32 (81964)	1,803	GU
RC-M 0/45 (83273)	1,833	GI
RC-M 0/56 (83270)	1,839	GU
RC-B 0/56 (83276)	1,879	GW
Natursand 0/8 (80475)	1,955	SI
Rundkies 0/32 (80471)	2,147	GI

Bild 7: Sieblinien (links), ermittelte Proctordichten und Bodengruppen nach DIN 18196 (rechts) der in den Feldversuchen untersuchten RC-Baustoffe

Die in den Feldversuchen ermittelten E_{v2} - und E_{v1} -Werte sind in Bild 8 (oben) über den Verdichtungsgrad dargestellt. Die untersuchten RC-Baustoffe weisen allesamt niedrige E_{v1} -Werte auf, die von der Trockendichte nahezu unabhängig sind. Ihre E_{v2} -Werte liegen dagegen deutlich höher. Während die E_{v2} -Werte des RC-Betons 0/56 mm allerdings mit zunehmenden Verdichtungsgrad deutlich ansteigen, zeigen die E_{v2} -Werte der RC-Mixmaterialien eine deutlich weniger stark ausgeprägte Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad. Die E_{v1} - und E_{v2} -Werte der natürlichen Vergleichsmaterialien

in Bild 8 hängen hingegen deutlich vom Verdichtungsgrad ab. Die großen Unterschiede zwischen den E_{v2} - und E_{v1} -Werten bei den RC-Baustoffen resultieren zudem in hohen Verhältniswerten E_{v2}/E_{v1} (Bild 8 (unten)), die auch bei einer Verdichtung bis auf $D_{Pr} = 100$ % bzw. $D_{Pr} = 98$ % oberhalb der jeweiligen Anforderungen an den

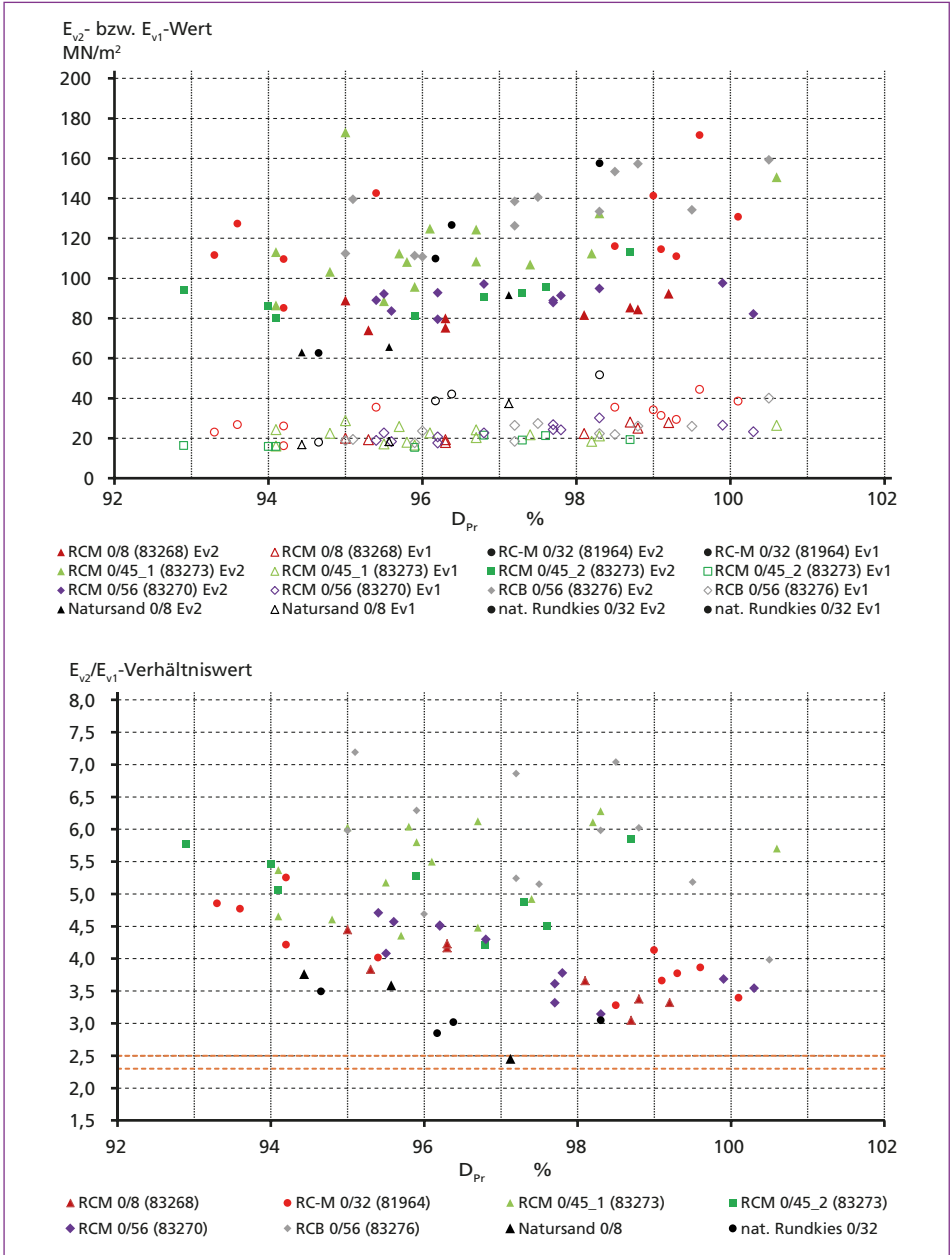


Bild 8: In den Probefeldern ermittelte E_{v2} - und E_{v1} -Werte (oben) sowie Verhältniswerte E_{v2}/E_{v1} (unten)

Verhältniswert E_{v2}/E_{v1} liegen. Die zum Vergleich dargestellten natürlichen Baustoffe wurden zwar nicht auf Verdichtungsgrade von $D_{Pr} \geq 100\%$ bzw. $D_{Pr} \geq 98\%$ verdichtet und halten die dafür geforderten Verhältniswerte ebenfalls noch nicht ein, doch lässt ihr Trend erkennen, dass die Anforderungen an den Verhältniswert bei entsprechendem Verdichtungsgrad erfüllt werden. Die Anwendung des statischen Plattendruckversuchs als indirektes Prüfverfahren zum Nachweis des Verdichtungsgrades würde in diesem Fall bei den RC-Baustoffen zur Ablehnung der Bauleistung und somit zum Ausschluss der RC-Baustoffe über den Bauvertrag führen, auch wenn der geforderte Verdichtungsgrad erreicht wurde.

Die an den RC-Materialien im Rahmen von Probefeldern bestimmten E_{vd} -Werte sind in Bild 9 ebenfalls über den Verdichtungsgrad D_{Pr} dargestellt. Die E_{vd} -Werte der untersuchten RC-Baustoffe zeigen sich nahezu unabhängig vom Verdichtungsgrad und liegen durchgehend deutlich unterhalb der Anforderungswerte nach ZTV E-StB 17 (vgl. Tabelle 1). Die Anwendung des dynamischen Plattendruckversuches als indirektes Prüfverfahren zum Nachweis des Verdichtungsgrades würde auch hier trotz ausreichender Verdichtung der RC-Baustoffe zu ihrer Ablehnung führen. Die zum Vergleich dargestellten E_{vd} -Werte der natürlichen Baustoffe liegen dagegen deutlich oberhalb der E_{vd} -Werte der RC-Baustoffe und zeigen eine klare Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad.

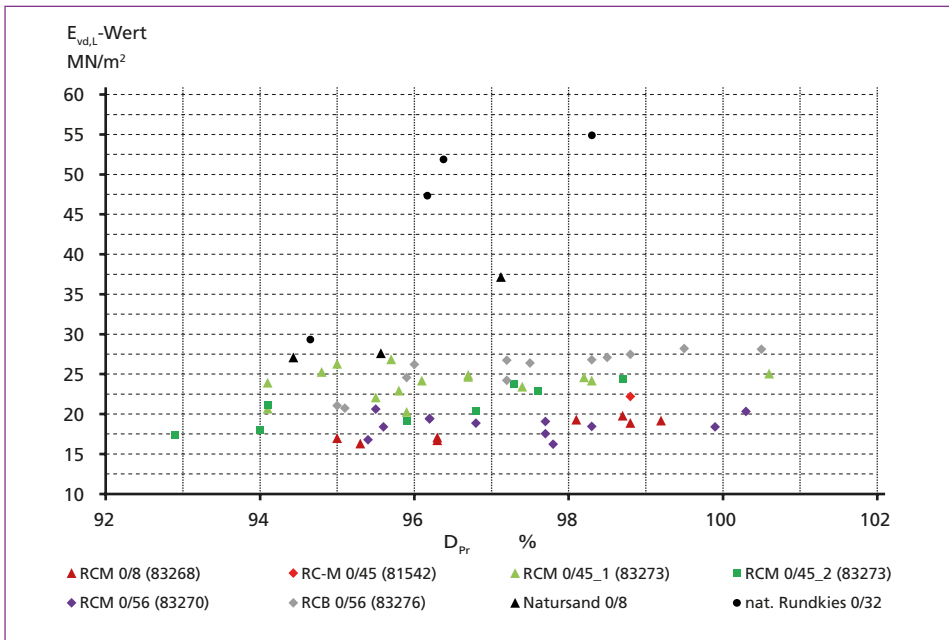


Bild 9: In den Probefeldern ermittelte E_{vd} -Werte

Der Umstand, dass der Nachweis des Verdichtungsgrades mit den indirekten Prüfverfahren statischer und dynamischer Plattendruckversuch mit den derzeit geltenden Richtwerten nicht möglich ist, bedeutet allerdings keineswegs, dass RC-Baustoffe nicht

als Baustoffe für den Erdbau geeignet sind. Die Verformungsmoduln stellen im Erdbau in Zusammenhang mit der Verdichtungskontrolle lediglich Hilfsgrößen zum Nachweis des im Erdbau maßgebenden Prüfkriteriums, die im Feld erreichte Trockendichte, dar. Direkte Anforderungswerte an die Verformungsmoduln existieren im Erdbau hingegen bis auf das Planum und für Bankette nicht. Die für das Planum ($E_{v_2} \geq 45 \text{ MN/m}^2$) und die Bankette ($E_{v_2} \geq 80 \text{ MN/m}^2$) geltenden Anforderungen an den Verformungsmodul E_{v_2} konnten von den untersuchten RC-Baustoffen ebenfalls weitgehend eingehalten werden. Lediglich bei Anwendung des dynamischen Plattendruckversuches würde bei Banketten der geforderte E_{vd} -Wert ($E_{vd} \geq 40 \text{ MN/m}^2$) nicht erreicht werden. Es wird empfohlen, zum Nachweis des Verdichtungsgrades bis auf weiteres entweder auf direkte Prüfverfahren zurückzugreifen oder die indirekten Prüfverfahren vor ihrer Anwendung im Rahmen von Probefeldern zu kalibrieren. Soweit wie bei Banketten direkte Anforderungen an den Verformungsmodul E_{v_2} oder E_{vd} bestehen, sollte der E_{v_2} -Wert als Bewertungskriterium herangezogen werden.

5. Zusammenfassung

Mineralische Ersatzbaustoffe aus aufbereiteten Baurestmassen etablieren sich am Markt zunehmend als ökonomisch und ökologisch sinnvolle Alternative zu natürlichen Baustoffen. Das Ziel des KrWG, mineralische Baurestmassen möglichst umfassend einer hochwertigen Verwertung zuzuführen, wird trotz der bautechnischen Eignung von RC-Baustoffen und ihres bereits vielfach erfolgreich praktizierten Einsatzes nach wie vor unterlaufen und ein großer Teil der verwerteten Massen lediglich verfüllt. Somit wird das volle Potential von RC-Baustoffen bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Eine der Ursachen hierfür liegt in materialspezifischen Besonderheiten der RC-Baustoffe, die zu Unterschieden im erdbautechnischen Verhalten führen und damit Unklarheiten sowie Unsicherheiten hervorrufen können. Diese können zur Ablehnung von RC-Baustoffen beitragen. Die Intention der Untersuchungen bestand daher darin, die erdbautechnisch relevanten Anforderungen an RC-Baustoffe sowie ihre relevanten Eigenschaften für ihre Verwendung im Erdbau aufzuzeigen. Durch die Veranschaulichung des erdbautechnischen Verhaltens und materialspezifischer Besonderheiten von RC-Baustoffen sowie dem Aufzeigen ihrer Eignung als Erdbaustoff sollte ein Beitrag geleistet werden, damit RC-Baustoffe zukünftig vermehrt im Erdbau eingesetzt werden.

Bei RC-Baustoffen handelt es sich um Baustoffe, die in der Praxis überwiegend als sortenreiner Betonbruch oder als aufbereitete Bauschuttgemische (RC-Mix), die hauptsächlich aus Beton und anderen hydraulisch gebundene Stoffen, Klinkern und dichten Ziegeln, natürlicher Gesteinskörnung sowie Kalksandstein, Putzen und weichen Ziegeln bestehen, wirtschaftliche Bedeutung besitzen. Unerwünschte Bestandteile wie mineralische Leicht- und Dämmbaustoffe oder nichtmineralische Fremdstoffe werden dagegen im Zuge des selektiven Rückbaus und der Aufbereitung zuverlässig ausgeschleust. Dadurch, dass es sich um eigens aufbereitete Baustoffe handelt, deren Korngrößenverteilung gezielt beeinflusst werden kann, weisen RC-Baustoffe zudem in der Regel gut abgestufte Körnungslinien auf. Dadurch besitzen sie eine gute Verdichtbarkeit, was im Hinblick auf ihre Anwendung im Erdbau von wesentlicher Bedeutung ist.

In Bezug auf die Verdichtungseigenschaften wurde aufgezeigt, dass es auch bei gut abgestuften RC-Baustoffen aufgrund der Porosität der Einzelkörner und der damit verbundenen Wasseraufnahme bei der Verdichtungsprüfung im Labor im Gegensatz zu den meisten natürlichen Baustoffen zu Unterschieden kommen kann und die Trockendichten oft unabhängig vom Wassergehalt sind. Hieraus können Schwierigkeiten bei der Festlegung der Bezugsdichte für die Verdichtung im Feld resultieren. Weitere Schwierigkeiten können im Zusammenhang mit der Verdichtungskontrolle mittels der indirekten Prüfverfahren statischer und dynamischer Plattendruckversuch auftreten. So besitzen RC-Baustoffe, die ausreichend verdichtet wurden, zwar ausreichend hohe E_{v2} -Werte, doch weisen sie gleichzeitig niedrige, von der Trockendichte nahezu unabhängige E_{v1} -Werte auf, die zu hohen Verhältniswerten E_{v2}/E_{v1} oberhalb der zulässigen Verhältniswerte führen. Die mit dem dynamischen Plattendruckversuch erreichbaren E_{vd} -Werte sind ebenfalls nahezu unabhängig vom Verdichtungsgrad und liegen durchweg deutlich unterhalb der Anforderungswerte. Eine sinnvolle Anwendung der derzeit geltenden Richtwerte in Zusammenhang mit der Verdichtungskontrolle mittels indirekter Prüfverfahren ist damit derzeit nicht möglich. Hier wird bis auf weiteres die Eichung der indirekten Prüfverfahren anhand von direkten Prüfmethode oder unmittelbar die Verwendung direkter Prüfverfahren, die bei RC-Baustoffen weitgehend anwendbar sind, empfohlen.

Trotz dieser Unterschiede sind RC-Baustoffe als Baustoffe für den Erdbau grundsätzlich geeignet. Das Aufzeigen der bautechnischen Anforderungen in Abhängigkeit vom Einsatzbereich hat verdeutlicht, dass der Verdichtungsgrad das primäre Prüfkriterium im Erdbau darstellt und sich seine Größe nach den erwarteten Einwirkungen und den tolerierbaren Verformungen eines Anwendungsbereiches bemisst. Direkte Anforderungen an den Steifemodul existieren im Erdbau mit Ausnahme des Planums und der Bankette hingegen nicht. Die Felduntersuchungen an RC-Baustoffen haben allerdings gezeigt, dass selbst mit ziegelhaltigen RC-Mixmaterialien die direkten Anforderungen an die Steifigkeit in Form des E_{v2} -Moduls erfüllt werden konnten. Demnach können selbst für die Bereiche des Erdbaus mit den höchsten bautechnischen Anforderungen ziegelreiche RC-Baustoffe eingesetzt werden. Sortenreiner Betonbruch erfüllt meist sogar die Anforderungen der höher belasteten Bereiche des Straßenoberbaus und kann somit sogar über den Erdbau hinaus als Baustoff verwendet werden. RC-Baustoffe mit einem hohen Anteil an Ziegeln oder mit Anteilen an mineralischen Leicht- und Dämmstoffen sind hierfür dagegen tendenziell eher ungeeignet. Ein sinnvoller Einsatz von RC-Baustoffen sollte die unterschiedliche Eignung verschiedener RC-Baustoffe für verschiedene Anwendungen berücksichtigen und nicht diejenige Anwendung mit den höchsten Anforderungen als Messlatte für die generelle bautechnische Eignung von RC-Baustoffen setzen.

6. Literatur

- [1] Arulrajah, A.; Piratheepan, M.W.; Bo, M.W.; Sivakugan, N.: Geotechnical characteristics of recycled crushed brick blends for pavement sub-base applications. Canadian Geotechnical Journal, Volume 49, pp. 796 - 811, 2012

- [2] Baumgärtel, T.; Heyer, D.; Vogt, N.: Erdbautechnische Eignung und Klassifikation von Böden mit Fremdbestandteilen und von Bauschutt. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 1020, Carl Schünemann Verlag GmbH, Bremen, August 2009
- [3] Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V.: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2014 – Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2014. Berlin, 2014
- [4] Cardoso, R.; Silva, R. V.; de Brito, J.; Dhir, R.: Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. Waste Management, Ausgabe 49, S. 131 – 145, 2016
- [5] Diedrich, R.; Brauch, A.; Kropp, J.: Rückenstützenbetone mit Recyclingzuschlägen aus Bauschutt. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF 11414 N, Amtliche Materialprüfanstalt Bremen, Bremen 2001
- [6] DIN EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme. Beuth Verlag, 2013
- [7] DIN 18125-2: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte des Bodens – Teil 2: Feldversuche. Beuth Verlag, 2011
- [8] DIN 18127: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch. Beuth Verlag, 2012
- [9] DIN 18196: Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Beuth Verlag, 2011
- [10] Grégoire, C.; Dethy, B.; Theys, F.; Correia, A.G.: Performance assessment and ranking of natural and recycled granular materials for road subbase layers by precision cyclic triaxial testing (EN 13286-7). Ninth International Conference on the Bearing Capacity of Road, Railways and Airfields, Trondheim, May 2013
- [11] Hansen, T. C.: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945 – 1985. Materials and Structures, Volume 19, Issue 3, pp 201 – 246, May 1986
- [12] Henzinger, C.: Bodenverbesserung mit Recyclingmaterial aus Bauschutt. Schriftenreihe des Lehrstuhls und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau der TU München, Heft 63, München 2017
- [13] Henzinger, C.; Barka, E.; Birle, E.; Heyer, D.: Belastbarkeit von eingeführten Volumen-% bzw. Massen-%-Grenzen bei Bodenmaterial. Schlussbericht zu FE 05.183 im Auftrag durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unveröffentlicht, 2016
- [14] Hoffmann, C.; Jacobs, F.: Recyclingeton aus Beton- und Mischabbruchgranulat. Sachstandsbericht der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt und der TFB (Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton), Juli 2007
- [15] Huber, S.; Heyer, D.; Birle, E.: Verwendung von aufbereiteten mineralischen Baurestmassen im Erdbau des Straßenbaus. Beitrag zum Interdisziplinären Forum der Fachsektionstage Geotechnik, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Essen, September 2017
- [16] Huber, S.; Heyer, D.: Anwendungen von Recycling-Baustoffen im Erdbau, Vortrag im Rahmen des 5. BVSE Mineraliktag in Berchtesgaden, ohne Schriftfassung, 2018
- [17] Koukoulidou, A.; Heyer, D.; Birle, E.: Baustoffe für standfeste Bankette. BAST-Bericht, S. 107, Carl Schünemann Verlag, Bremen, 2017
- [18] Krass, K.; Kollar, J.: Eignung von ziegelreichen Recycling-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemittel. Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik Heft 884, Carl Schünemann Verlag, Bremen, 2004
- [19] Natzschka, H.: Straßenbau – Entwurf und Bautechnik. 3., überarbeitete und aktualisierte Auflage 2011, Vieweg+Teuber Verlag, Wiesbaden 2011

- [20] Poon, C. S., Chan, D.: Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base. *Construction and Building Materials*, Vol. 20, 578 – 585, 2006
- [21] TL BuB E-StB: Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2009
- [22] TL SoB-StB 04: Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2007
- [23] TP BF-StB C 20: Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau Teil C 20: Zerfallsbeständigkeit von Gestein – Siebtrommelversuch. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2002
- [24] TP Gestein-StB: Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau Teil 3.1.5: Stoffliche Kennzeichnung von groben rezyklierten Gesteinskörnungen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Köln, 2012
- [25] Vinmans, A.: Geotechnische Beurteilung und Vergleich unterschiedlicher Ersatzbaustoffe beim Bau von Lärmschutzwällen. *Bauingenieur*, Band 88, Springer Verlag, Juli/August 2013

Ansprechpartner



Stefan Huber, M.Sc.

Technische Universität München
Zentrum Geotechnik
Wissenschaftlicher Angestellter
Baumbachstraße 7
81245 München (D)
Telefon: 0049-(0)89-28927152
E-Mail: s.huber@tum.de

ReSource

Abfall • Rohstoff • Energie

Jahresabonnement (4 Ausgaben): 62 Euro (incl. MwSt. und Versand)

30. Jahrgang 2017



29. Jahrgang

ISSN 1868-9531 4. Quartal 2016 Preis 20,00 EUR A 13158 F

(Früher: **MÜLLMAGAZIN** ISSN 0934-3482)

ReSource

Abfall • Rohstoff • Energie Fachzeitschrift für nachhaltiges Wirtschaften

HERAUSGEBER

Dipl.-Pol. Bernhard Reiser

REDAKTION

Professor Dr.-Ing. Dr. h. c.
Karl J. Thomä-Kozmiansky †
Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Dipl.-Pol. Bernhard Reiser

REDAKTIONSBERAT

Professor Dr.-Ing. Michael Beckmann
Professor Dr. rer. nat. Matthias Finkbeiner
Professor Dr.-Ing. Daniel Goldmann
Professor Dr.-Ing. Karl E. Lorber
Dipl.-Ing. Johannes J. E. Martin
Dipl.-Chem.-Ing. Luciano Peloni
Dipl.-Ing. Christian Teibert
Professor Dr. Andrea Versteijl

*Felix Müller, Jan Kosmol, Hermann Kellec, Michael Angrick
und Bettina Reichenberg*
Materialflussindikatoren allein liefern keine hinreichende
Orientierung für Strategien zur Ressourcenschonung

Uwe Lahl

Ein Regulierungsvorschlag zeigt Ansätze, wie die Treibhausgas-
Emissionen aus dem Verkehrssektor bis 2050 drastisch reduziert
werden können

Thomas Krampitz, Holger Lieberwirth und Michael Stegelmann
Die Berücksichtigung des Recyclings im Life Cycle Assessment der
Fahrzeugindustrie ermöglicht Produktentwicklern frühzeitige
Aussagen zur Ressourceneffizienz von Produkt und Prozess

Roland Pomberger und Renata Sarc

Experten aus Forschung und Praxis haben für Österreich
den Beitrag der Abfallwirtschaft zur Ressourcenschonung
und Ressourceneffizienz untersucht

Wolfgang Rommel, Siegfried Kreibitz und Markus Hertel
In erster Linie bestimmen Materialmenge und deren Marktwert
den Stellenwert und die Limitierungen des Recyclings von
Technologierohstoffen

Jan Schlecht, Jan Henning Seelig und Torsten Zeller

Die möglichen Auswirkungen eines Pfandsystems für Elektro- und
Elektronikkleingeräte müssen noch genauer untersucht werden

RHOMBOS

4 2016

Fotos: pixelio.de

Für Wirtschaft und Politik ist ein nachhaltiger Umgang mit Abfall, Rohstoffen und Energie eine Frage der Zukunftssicherung. Umwelttechnisches Know-how und Informationen über grundlegende Entwicklungen sind für den Erfolg entscheidend. Mit der Fachzeitschrift **“ReSource – Abfall, Rohstoff, Energie”** sind Sie bestens über nachhaltiges Wirtschaften informiert.

Neben aktuellen Forschungsergebnissen stellt die Fachzeitschrift praxisrelevante Konzepte und Verfahren zur Vermeidung und Verringerung von Umweltbelastungen vor. Verfahren der konventionellen Abfallbehandlung und -entsorgung wie Verbrennung sowie Recycling, Kompostierung, Vergärung und Deponierung werden auf ihre Effektivität und Umsetzbarkeit geprüft. Experten aus dem In- und Ausland diskutieren Erfordernisse und Beispiele für eine zeitgemäße Rohstoffwirtschaft.

Gerne schicken wir Ihnen ein **Ansichtsexemplar**: RHOMBOS-VERLAG, Kurfürstenstr. 15/16, 10785 Berlin, Tel. 030.261 94 61, Internet: www.rhombos.de, eMail: verlag@rhombos.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky,
Bernd Friedrich, Thomas Pretz, Peter Quicker, Dieter Georg Senk, Hermann Wotruba (Hrsg.):

Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5
– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN 978-3-944310-41-1 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2018

Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm,
Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.

Erfassung und Layout: Claudia Naumann-Deppe, Janin Burbott-Seidel, Sandra Peters,
Ginette Teske, Roland Richter, Cordula Müller, Gabi Spiegel

Druck: Universal Medien GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.