

Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bewertung von
gesteintechnischen Eigenschaften im Rahmen der
Werkseigenen Produktionskontrolle

Sara Neidinger

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung

Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bewertung von gesteintechnischen Eigenschaften im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle

Sara Neidinger

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

Doktors der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. D. Heinz

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Chr. Gehlen
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. K. Thuro (schriftliche Beurteilung)
3. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. J. P. Plank

Die Dissertation wurde am 15.02.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 16.07.2012 angenommen.

Danksagung

Zunächst möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Chr. Gehlen für die Unterstützung und die Förderung der Arbeit danken.

Mein Dank gilt auch den weiteren Prüfern sowie dem Vorsitzenden der Prüfungskommission für das Interesse an dieser Arbeit.

Bei Herrn Dr.-Ing. Th. Wörner bedanke ich mich für die volle Unterstützung während der Durchführung der Arbeit, für die kritische Durchsicht und die zahlreichen wertvollen Hinweise.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr. rer. nat. E. Westiner, der die Idee zu dieser Arbeit hatte und mich dafür motivieren konnte. Daneben danke ich ihm für die stete Diskussionsbereitschaft und die vielen wertvollen Anregungen. Ohne seinen Bezug zur Industrie und die Möglichkeit, die Versuche in seiner Fachgruppe durchführen zu können, wäre die Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Des Weiteren danke ich den Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen des cbm und dabei v. a. denjenigen der Fachgruppe Gesteine für die Möglichkeit und Unterstützung bei der Durchführung der Versuche. Namentlich möchte ich hier die Herren Balthes, Baumann, Dexheimer, Gawlik, Graw, Grieser, Hell, Janeselli, Kreft (jun.), Nur, Reier, Winkler, Zeuner, Zöge sowie Frau Fritz erwähnen.

Daneben danke ich den beiden Sekretärinnen Frau Knaup-Windisch und Frau Finke sowie meinem Zimmerkollegen Herrn Patzak, für die Unterstützung durch Wort und Tat.

Bei Herrn Kreft bedanke ich mich für die Anfertigung der hochwertigen technischen Zeichnungen für das Einzelkornprüfgerät.

Herrn Strehle, der mir das Einzelkornprüfgerät gebaut hat, möchte ich ebenfalls herzlich danken.

Ein besonderes Dankeschön geht auch an die Steinbruchbetreiber, die mir die Möglichkeit eröffnet haben, das neue Verfahren zu testen.

Letztlich danke ich meinen Eltern und meiner ganzen Familie für die Rücksichtnahme, die Motivation und die Unterstützung während der vergangenen Jahre.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Verbundforschungsprojektes „Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton“, welches von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert wurde [1-4]. Die Arbeit greift, über die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen an den Gesteinskörnungen hinaus, auf Ergebnisse der petrographischen Untersuchungen des F. A. Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar [1], der Betonversuche (Labor) des Forschungsinstituts der Zementindustrie und der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung [3] und der Untersuchungen zu den Auslagerungsversuchen der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung [3, 4] zurück. Darüber hinaus flossen in diese Arbeit die Ergebnisse des Forschungsprojektes „Historische Erkundung“ mit ein [63], welches vom Bayerischen Industrieverband Steine und Erden e. V. finanziert wurde.

Inhaltsverzeichnis

Verwendete Abkürzungen, Formelzeichen und Definitionen	IV
a) Abkürzungen und Formelzeichen	IV
b) Definitionen	V
1 Einleitung	1
2 Widerstand von Gesteinskörnungen im Beton gegen Frostbeanspruchung	2
2.1 Bedeutung von Gesteinskörnungen im Beton	2
2.2 Grundlagen zum Gefrierverhalten von Beton	2
2.2.1 Allgemeines	2
2.2.2 Schadensmechanismen	4
2.2.2.1 Schadensmechanismen in Betonen	4
2.2.2.2 Schadensmechanismen in Gesteinskörnungen	6
2.2.3 Schadensbilder	7
2.3 Bedeutung des Verhaltens von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung	9
2.4 Frostprüfverfahren für Gesteinskörnungen und Beton	9
2.4.1 Frostprüfverfahren an der Gesteinskörnung	9
2.4.1.1 Prüfverfahren	9
2.4.1.2 Zusammenhänge zwischen den Frostprüfverfahren an den Gesteinskörnungen	11
2.4.2 Frostprüfverfahren am Beton	12
2.4.2.1 Prüfverfahren	12
2.4.2.2 Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Frostprüfverfahren an Beton	14
2.4.3 Auslagerungsversuche	15
2.5 Übertragbarkeit der Laborversuche auf das Praxisverhalten	15
2.6 Stand des Regelwerks	16
3 Untersuchungen zum Verhalten von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung	20
3.1 Untersuchungsprogramm	20
3.2 Untersuchungsergebnisse	24
3.2.1 Untersuchungen an Gesteinskörnungen	24
3.2.1.1 Allgemeine Untersuchungen	24
3.2.1.2 Frostprüfverfahren an den Gesteinskörnungen	24
3.2.1.3 Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Frostprüfverfahren an den Gesteinskörnungen	27

3.2.2	Laboruntersuchungen an Betonen	29
3.2.2.1	Allgemeine Untersuchungen	29
3.2.2.2	Frostprüfverfahren am Beton (Labor)	29
3.2.2.3	Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Frostprüfverfahren an standardisierten Betonen	29
3.2.2.4	Zusammenhänge zwischen den Frostprüfverfahren an den isolierten Gesteinskörnungen und den Frostprüfverfahren an standardisierten Betonen	30
3.2.2.5	Untersuchungen zum Einfluss der Betonrezeptur	30
3.2.3	Untersuchungen zum Praxisverhalten	32
3.2.3.1	Auslagerungsversuche	32
3.2.3.2	Bauwerksbegutachtung	33
4	Vorschlag einer praxisgerechten Regelung zur Beurteilung des Verhaltens von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung	34
4.1	Bewertung des aktuellen Regelwerks anhand der Untersuchungsergebnisse	34
4.2	Beurteilung der verschiedenen Verfahren zur Charakterisierung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung	35
4.3	Empfehlung für Anforderungen an Gesteinskörnungen für Beton im Hinblick auf das Verhalten der Gesteinskörnung bei Frost-Tausalz-Beanspruchung	38
4.4	Fazit	41
5	Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Qualitätssicherung im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle	42
5.1	Auswahlkriterien	42
5.2	Entwicklung eines einfachen Versuches zur Beurteilung der Qualität von groben Gesteinskörnungen (Einzelkornversuch)	43
5.2.1	Grundlage (Mürbkornversuch nach zurückgezogener Ö-NORM B 3304)	43
5.2.2	Vollzogene Modifikationen	44
5.2.3	Erstellung einer Arbeitsanleitung für den Einzelkornversuch	54
5.2.3.1	Allgemeines	54
5.2.3.2	Einfluss der Randbedingungen	54
5.2.3.3	Reproduzierbarkeit der Untersuchungsergebnisse	59
5.2.3.4	Folgerungen für den Einzelkornversuch	60
5.2.3.5	Arbeitsanleitung	61
5.2.4	Möglichkeiten der Weiterentwicklung des Einzelkornversuches	61
5.3	Anwendungsmethodik	62
5.3.1	Systematik	62
5.3.2	Anwendungsgrenzen	66
5.3.3	Weitere Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens	66

6	Praxisbeispiele für die Qualitätssicherung durch die Implementierung des Einzelkornversuches in die Werkseigene Produktionskontrolle	69
6.1	Vorgehensweise	69
6.1.1	Geländeaufnahme, Probenahme und -aufbereitung	69
6.1.2	Allgemeine Charakterisierung des Materials	69
6.1.3	Feststellung der qualitätssteuernden Parameter und Verifizierung dieser im Einzelkornversuch	70
6.1.4	Anbindung des Einzelkornversuches an normierte Verfahren	71
6.2	Steinbruch A	71
6.2.1	Problemstellung	71
6.2.2	Steinbruchaufnahme und Probenahme	72
6.2.3	Ergebnisse und Beurteilung der Laborversuche	73
6.3	Steinbruch B	80
6.3.1	Problemstellung	80
6.3.2	Steinbruchaufnahme und Probenahme	81
6.3.3	Ergebnisse und Beurteilung der Laborversuche	81
6.4	Steinbruch C	87
6.4.1	Problemstellung	87
6.4.2	Steinbruchaufnahme und Probenahme	89
6.4.3	Ergebnisse und Beurteilung der Laborversuche	89
6.5	Beurteilung der Implementierung des Einzelkornversuches zur Qualitätssicherung im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle	97
7	Zusammenfassung	99
8	Literatur	103

Anhang

- Anhang I: Untersuchungsergebnisse zum Verhalten von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung (Tabellen AI-1 bis AI-31 und Abbildungen AI-1 bis AI-27)
- Anhang II: Untersuchungsergebnisse zur Entwicklung und Implementierung des Einzelkornversuches in die Werkseigene Produktionskontrolle (Tabellen AII-1 bis AII-15)
- Anhang III: Auszug aus der zurückgezogenen Ö-NORM B 3304
- Anhang IV: Arbeitsanleitung zur „Bestimmung des Einzelkornfestigkeitsindex im Einzelkornversuch“
- Anhang V: Detaillierter Bauplan des Einzelkornprüfgerätes

Verwendete Abkürzungen, Formelzeichen und Definitionen

a) Abkürzungen und Formelzeichen

FTW	Frost-Tau-Wechsel
FTS	Frost-Tausalz
MS	Magnesiumsulfat
NS	Natriumsulfat
WA	Wasseraufnahme
MK	Mürbkorn
SZ	Schlagzertrümmerungswert
ΔSZ_{FTW}	Änderung des Schlagzertrümmerungswertes durch Frostbeanspruchung
ΔSZ_{FTS}	Änderung des Schlagzertrümmerungswertes durch Frost-Tausalz-Beanspruchung
w/z	Wasserzementwert
GK	Gesteinskörnung
WPK	Werkseigene Produktionskontrolle
FPP	Freiwillige Produktprüfung
Rel. $E_{dyn.}$	Relativer dynamischer Elastizitätsmodul [%]
R^2	Bestimmtheitsmaß
EKF-Index	Einzelkornfestigkeitsindex [M.-%]
NaCl	Natriumchlorid

Anforderungskategorien nach TL Gestein-StB [30]:

F_1, F_2, F_4	Anforderungskategorien an den Widerstand von Gesteinskörnungen gegen Frost-Tau-Wechsel (d. h. FTW-Wert $\leq 1, 2$ bzw. 4 M.-%)
$SZ_{18}, SZ_{22}, SZ_{26}$	Anforderungskategorien an den Widerstand gegen Zertrümmerung (d. h. SZ $\leq 18, 22$ bzw. 26)
MS_{18}, MS_{25}	Anforderungskategorien an den Widerstand gegen Magnesiumsulfat (d. h. MS-Wert ≤ 18 bzw. 25)

Für die Zuweisung von Gesteinskörnungen zu einer dieser Kategorien, ist der ermittelte Messwert (FTW-Wert, MS-Wert bzw. SZ) ganzzahlig zu runden. Demnach entspricht eine Gesteinskörnung mit einem Schlagzertrümmerungswert von 18,4 der Kategorie SZ_{18} .

Expositionsklassen nach DIN 1045-2, Tabelle 1 [26]:

XF1	Betonbauteile mit mäßiger Wassersättigung, ohne Taumittel
XF2	Betonbauteile mit mäßiger Wassersättigung, mit Taumittel
XF3	Betonbauteile mit hoher Wassersättigung, ohne Taumittel
XF4	Betonbauteile mit hoher Wassersättigung, mit Taumittel

Zemente nach DIN EN 197-1. Tabelle 3 [100]:

CEM I 32,5 R	Portlandzement (Anfangsfestigkeit (2 Tage) ≥ 10 MPa, Normfestigkeit (28 Tage) 32,5 - 52,5 MPa, Erstarrungsbeginn ≥ 75 min, Dehnungsmaß ≤ 10 mm)
CEM III 42,5 N	Hochofenzement mit einer (Anfangsfestigkeit (2 Tage) ≥ 10 MPa, Normfestigkeit (28 Tage) 42,5 - 62,5 MPa, Erstarrungsbeginn ≥ 60 min, Dehnungsmaß ≤ 10 mm)

Weitere in der Arbeit verwendete Zeichen und Abkürzungen sind jeweils an der betreffenden Stelle definiert.

b) Definitionen

Widerstand gegen Frostbeanspruchung

Der Widerstand gegen Frostbeanspruchung bezeichnet im Rahmen dieser Arbeit (in Anlehnung an die TL Gestein-StB [30]) die allgemeine (gesteins-)technische Eigenschaft. Er bezieht sich auf kein spezielles Prüfverfahren und schließt den Widerstand gegen Frostbeanspruchung unter Taumittleinfluss ein.

Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung (FTW-Wert)

Der Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel entspricht nach TP Gestein-StB [101] dem Ergebnis (Abwitterung) des Frost-Tau-Wechsel-Versuches (Dosenfrostversuch mit Wasser). Der Frost-Tau-Wechsel-Versuch wird in dieser Arbeit als FTW-Versuch abgekürzt und die Abwitterung als Frost-Tau-Wechsel-Wert (FTW-Wert) bezeichnet.

Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung (FTS-Wert)

Der Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung entspricht nach TP Gestein-StB [101] dem Ergebnis (Abwitterung) des Frost-Tausalz-Versuches (Dosenfrostversuch mit Taumittel). Der Frost-Tausalz-Versuch wird in dieser Arbeit als FTS-Versuch abgekürzt und die Abwitterung als Frost-Tausalz-Wert (FTS-Wert) bezeichnet.

1 Einleitung

Die Beurteilung der Qualität von Gesteinskörnungen erfolgt generell anhand ihrer gesteintechnischer Eigenschaften. Angepasst an den Verwendungszweck werden an Gesteinskörnungen unterschiedliche Anforderungen gestellt.

Im Rahmen der CE-Kennzeichnung ist der Hersteller von Gesteinskörnungen verpflichtet, die Eigenschaften seiner Produkte zu deklarieren, d. h. jedem Material bestimmte Qualitätsniveaus zuzuweisen, die er mit Lieferung garantiert. Die Einhaltung der deklarierten Werte wird – je nach Anforderungskriterium und Verwendungszweck – regelmäßig (z. B. jährlich) mit normierten Verfahren kontrolliert. Aufgrund der Inhomogenität von Gesteinsvorkommen reicht aber ein derartig weitmaschiges Kontrollsystem für die Qualitätssicherung, insbesondere wenn das tatsächliche Qualitätsniveau nahe am deklarierten Wert liegt, häufig nicht aus. Da es sich bei den genormten technischen Verfahren zumeist um aufwändige, langwierige und kostenintensive Prüfungen handelt, sind diese zur gelegentlichen Überwachung, nicht jedoch zur engmaschigen, laufenden Kontrolle im Rahmen der Qualitätssteuerung geeignet. Bis die Ergebnisse vorliegen, vergeht oftmals zu viel Zeit, um gegebenenfalls rechtzeitig steuernd in die Produktion eingreifen zu können.

Besonders ausgeprägt ist die beschriebene Problematik im Hinblick auf das Verhalten von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung, welches auch die Dauerhaftigkeit damit hergestellter Baustoffgemische (z. B. von Beton) maßgeblich beeinflusst. Erschwerend kommt hinzu, dass eine Vielzahl an normierten Prüfverfahren zur Charakterisierung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung existieren, die eine Beurteilung in verschiedenen Beanspruchungsbereichen ermöglichen, z. T. jedoch zu widersprüchlichen Beurteilungen führen.

Um eine einheitliche Qualität der Gesteinskörnung im Beton sicherzustellen und damit Schäden z. B. im Anwendungsbereich „Straßen- und Brückenbau“ zu vermeiden, ist es zwingend erforderlich, das Kontrollsystem von Gesteinskörnungen, insbesondere im Hinblick auf ihr Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung, zu optimieren.

Hierfür gilt es, aus der Vielzahl an derzeit nebeneinander existierenden Verfahren das zur Beurteilung des Verhaltens einer Gesteinskörnung bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung im Beton am besten geeignete Verfahren festzustellen, und darauf aufbauend praxisgerechte Bewertungskriterien zu entwickeln. Daran angebunden sollte ein einfaches und kostengünstiges Verfahren erarbeitet werden, das den Gesteinskörnungsproduzenten die zeitnahe und gezielte Bewertung der Qualität des produzierten Materials im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle ermöglicht.

Letztlich soll überprüft werden, inwieweit sich die am Beispiel des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung entwickelte Optimierung des Kontrollsystems auch auf andere gesteintechnische Eigenschaften (Festigkeit) übertragen lässt.

2 Widerstand von Gesteinskörnungen im Beton gegen Frostbeanspruchung

2.1 Bedeutung von Gesteinskörnungen im Beton

Beton ist aufgrund seiner Vielseitigkeit weltweit der wichtigste Baustoff. Die Anforderungen an Beton sind abhängig vom Anwendungszweck und Einsatzgebiet. In jedem Fall sollte ein Beton eine hohe Dauerhaftigkeit aufweisen, d. h. die geforderten Eigenschaften sollten möglichst lange gegeben sein. Voraussetzung für die Herstellung eines „guten“ Betons ist, dass alle Bestandteile (Wasser, Zement, Gesteinskörnung, Zusatzmittel und Zusatzstoffe) die erforderliche Qualität aufweisen. Berücksichtigt man, dass Beton zum größten Teil (ca. 70 %) aus Gesteinskörnungen besteht, so wird die Bedeutung der Eigenschaften der verwendeten Gesteinskörnungen deutlich [11].

In Regionen, in denen Frost auftritt, zählt die Frostbeständigkeit zu den wichtigen Kenngrößen für die Dauerhaftigkeit von Beton. Besonders hoch ist die Beanspruchung bei freiliegenden Betonbauwerken mit horizontalen Flächen, wo natürliche, physikalische und mechanische Einwirkungen zusammenwirken (z. B. Straßen). Durch Einsatz von Tausalzen erfolgt eine Verstärkung der Beanspruchung. Kann ein Beton die durch Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung auftretenden Einwirkungen nicht kompensieren, so kommt es zu Frostschäden [11].

2.2 Grundlagen zum Gefrierverhalten von Beton

2.2.1 Allgemeines

Diese Arbeit geht nur auf die wichtigsten und absolut grundlegenden Aspekte im Hinblick auf die sehr komplexen Prozesse, die tatsächlich bei der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung im Beton stattfinden, ein. Die Ansätze werden hier teilweise stark vereinfacht dargestellt, sehr ausführlich mit diesem Thema beschäftigten sich beispielsweise [16, 11, 13, 50, 69].

Der ursächliche Prozess bei der Entstehung von Frostschäden ist das Gefrieren von Porenwasser, was mit einer Ausdehnung von ca. neun Volumenprozenten verbunden ist. Überschreiten die dadurch initiierten Drücke die Festigkeit des umgebenden Werkstoffs, so kommt es zu Frostschäden. Frostschäden können folglich nur auftreten, wenn auch Wasser vorhanden ist.

Da der Druck, der beim Gefrieren von Wasser entsteht, weit über der Bruchdehnung von Beton liegt, müsste bei einem vollständig wassergesättigten Beton das Gefüge theoretisch bereits beim ersten Gefrieren zerstört werden. Tatsächlich treten bei Betonen mit ausreichender Qualität die Schäden jedoch erst nach vielen Frost-Tau-Wechseln auf.

Lange Zeit dachte man, dass es sich hierbei um ein Ermüdungsphänomen, hervorgerufen durch die andauernde Wechselbeanspruchung (v. a. die hydraulischen Drücke), handelt. Aktuell geht man davon aus, dass die Ursache darin liegt, dass die Porenlösung im Betongefüge kein normales Gefrierverhalten aufweist [z. B. 16, 70, 71].

Physikalische und chemische Effekte (Druckerhöhung, gelöste Stoffe, Oberflächeneffekte) bewirken eine Gefrierpunktniedrigung, die sich darin äußert, dass selbst weit unter dem Gefrierpunkt nur ein Teil des Wassers gefriert [12]. Das Ausmaß der Gefrierpunktniedrigung hängt dabei direkt vom Porenradius ab: Je kleiner der Porenradius, desto größer die Gefrierpunktniedrigung [50].

Neben der Gefrierpunktniedrigung können auch „Unterkühlungseffekte“ auftreten [z. B. 50, 13, 16]. Von Unterkühlung spricht man, wenn sich bei der Unterschreitung des Gefrierpunktes bzw. der Gleichgewichtstemperatur kein Eis bildet [16, 50]. Dabei handelt es sich nicht, wie bei der Gefrierpunktniedrigung um eine Verschiebung des Gefrierpunktes, sondern um einen metastabilen Zustand. Ausgangspunkt hierfür sind kleine Eiskeime, die sich im unterkühlten Wasser – bedingt durch statistische Gesetzmäßigkeiten – bilden und auflösen. Erreicht ein Eiskeim den sogenannten kritischen Keimbildungsradius, so wächst er aus thermodynamischen Gründen weiter [111]. Dabei gilt, je niedriger die Temperatur, desto kleiner der kritische Keimbildungsradius. Demnach bilden sich bei niedrigen Temperaturen häufiger stabile, wachstumsfähige Keime als bei höheren Temperaturen [75]. Allein der Unterkühlungseffekt wirkt sich im Hinblick auf die Beanspruchung und Schädigung von Betonen zunächst positiv aus. Als Folge der Unterkühlung kann es jedoch unterhalb einer gewissen Temperatur zur sogenannten „spontanen Eisbildung“ kommen, bei welcher die Kristallisationswärme des Eises vom kalten Beton abgeführt wird und unterkühltes Porenwasser sehr schnell gefriert [17]. Verbunden damit sind eine enorme spontane Ausdehnung sowie die Verhinderung der Wasserverteilung in den Poren, wodurch die Schadenswirkung auf den Beton letztlich verstärkt wird [16].

Das anormale Gefrierverhalten der Porenlösung im Beton äußert sich darin, dass auch unterhalb des Gefrierpunktes ein bedeutender Teil des Wassers ungefroren und damit beweglich bleibt. Die Größe dieses Anteils hängt v. a. von der Porenstruktur ab, welcher folglich eine entscheidende Bedeutung im Hinblick auf das Frostverhalten von Beton zukommt. SETZER & AL. [70] unterscheiden prinzipiell zwischen Grobporen, Kapillaren und Gelporen und ordnen diesen charakteristische Gefrierpunkte bzw. Gefrierphasenübergänge entsprechend der Radius-Gefrierpunkt-Beziehung (RGB) nach STOCKHAUSEN [112] zu (vgl. Tabelle 2-1). Die Definition der Porengröße erfolgt dabei über den hydraulischen Porenradius (R_h).

Porenart		Porengröße	Porenwasser
Grobporen		$R_h > 1\text{mm}$	leer
Kapillaren	Makrokapillaren	$1\text{ mm} > R_h > 30\ \mu\text{m}$	Makroskopisches Wasser hoher Beweglichkeit, Gefrierpunkt bis $-20\ ^\circ\text{C}$ (RGB)
	Mesokapillaren	$30\ \mu\text{m} > R_h > 1\ \mu\text{m}$	Makroskopisches Wasser mittlerer Beweglichkeit, Gefrierpunkt bis $-20\ ^\circ\text{C}$ (RGB)
	Mikrokapillaren	$1\ \mu\text{m} > R_h > 30\ \text{nm}$	Makroskopisches Wasser geringer Beweglichkeit, Gefrierpunkt bis $-20\ ^\circ\text{C}$ (RGB)
Gelporen	Mesogelporen	$30\ \text{nm} > R_h > 1\ \text{nm}$	Vorstrukturiertes Wasser, Gefrierphasenübergänge bei $-24\ ^\circ\text{C}$, $-31\ ^\circ\text{C}$ und $-39\ ^\circ\text{C}$
	Mikrogelporen	$R_h < 1\ \text{nm}$	Vorstrukturiertes Wasser, Gefrierphasenübergänge bei $-90\ ^\circ\text{C}$

R_h : hydraulischer Porenradius

RGB: entsprechend der Radius-Gefrierpunkt-Beziehung nach STOCKHAUSEN [112]

Tabelle 2-1: Definition und Charakterisierung der Porengrößen nach [70]

FAGERLUND [15] erweitert die Vorstellungen dahingehend, dass es einen kritischen Feuchtigkeitsgehalt (kritischer Sättigungsgrad) geben muss, ab dem Beton zerstört wird.

2.2.2 Schadensmechanismen

2.2.2.1 Schadensmechanismen in Betonen

Bezüglich der Schadensmechanismen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung im Beton gibt es eine Vielzahl verschiedener Modelle, wobei keines alle Vorgänge hinreichend erklären kann. Stattdessen handelt es sich offensichtlich um ein Zusammenspiel unterschiedlicher Effekte. Dabei ist es bisher nicht immer möglich, einem realen Schadensbild die maßgebenden Schadensmechanismen zuzuordnen [z. B. 11, 13, 16].

Prinzipiell kann man zwischen physikalischen und chemischen Zerstörungsmechanismen unterscheiden, welche sich nochmals in makroskopische und mikroskopische Effekte untergliedern lassen. Einige Modelle werden im Folgenden kurz vorgestellt:

Makroskopische Effekte

- SPRINGENSCHMID [104] beschreibt, dass Frost-Tausalz-Schäden darauf zurückgeführt werden können, dass Beton beim Abkühlen schichtweise gefriert. Als Ursache hierfür nennt er das Zusammenspiel von Tausalzkonzentration, Temperaturverlauf und Wasserangebot oder fertigungsbedingte Inhomogenitäten zwischen Rand- und Kernbeton. Er geht davon aus, dass das Wasser an der kälteren, wasserreichen Betonoberfläche und im tausalzarmen Betonkern schneller gefriert als in der dazwischen liegenden Schicht. Gefriert zu einem späteren Zeitpunkt auch die Zwischenschicht, so entstehen Spannungen und gegebenenfalls Schäden, da sich das Wasser beim Gefrieren nicht ausreichend ausdehnen kann [16].
- Daneben können bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung kritische Zugspannungen durch unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten – insbesondere von Zementstein und Eis – initiiert werden [105].
- Ein Kristallisationsdruck entsteht, wenn aus einer übersättigten Lösung die gelöste Phase ausfällt und wenn durch den Übergang in den festen Zustand ein Wachstumsdruck auf den umgebenden Werkstoff ausgeübt wird [69]. Im Hinblick auf Frostschädigung von Betonen ist der Kristallisationsdruck, aufgrund der geringen Tausalzkonzentrationen, nur von untergeordneter Bedeutung [16].

Mikroskopische Effekte

- Ein grundlegender Effekt, der bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung zu tragen kommt, ist der hydraulische Druck. Dieser wurde schon früh von POWERS beschrieben [12]. Hydraulischer Druck entsteht, wenn kein Raum vorhanden ist, in welchen das – durch den Gefriervorgang – verdrängte Wasser ausweichen kann. Gemäß POWERS und HELMUTH [12, 14] werden die hydraulischen Drücke, die durch das gefrierende Wasser aufgebaut werden, abgebaut, indem das ungefrorene Wasser aus der gefrierenden Pore herausgedrückt wird. Das herausgedrückte Wasser bleibt aufgrund der Gelstruktur des Zementsteins ungefroren. Die Intensität des Innendrucks hängt von der Kristallisationsgeschwindigkeit des Eises, von

der Menge an verfügbarem Wasser, von der Entfernung zwischen dem Ort der Eisbildung zum Ausweichraum und von der Abkühlgeschwindigkeit ab [16].

- Als weitere wichtige Ursache für Frostschäden gilt der kapillare Effekt, der besagt, dass Wasser aus kleineren Poren (Gelporen) zu bestehenden Eiskristallen in größeren Poren (Kapillaren) wandert [76, 77]. Der Antrieb hierfür ist ein thermodynamisches Ungleichgewicht, das sich zwischen den unterschiedlich großen Poren aufbaut, wenn Porenwasser, das in Kapillaren bereits gefriert, in Gelporen aufgrund von Oberflächeneffekten noch als Wasser vorliegt. Die Wasserumverteilung führt einerseits zum Schwinden der Zementsteinmatrix und andererseits zum Wachstum der Eiskristalle in den Kapillaren, wodurch es zum Aufbau von Spannungen kommt. Der kapillare Effekt kann als Begründung dienen, warum sich Zementstein beim Gefrieren zunächst zusammenzieht [12, 13].
- Beim osmotischen Effekt wird vorausgesetzt, dass der Zementstein wie eine semipermeable Membran wirkt. Gefriert Porenlösung mit gelösten Salzen geringer Konzentration, so reichern sich diese Stoffe in der noch ungefrorenen Restlösung an, wobei auch hier dem unterschiedlichen Gefrierverhalten des Porenwassers in verschieden großen Poren eine große Bedeutung zukommt. Angenommen der Zementstein wirkt als semipermeable Schicht, entsteht durch den Konzentrationsausgleich ein Druckunterschied. In Verbindung mit dem zunehmenden Eiswachstum in den Kapillaren kann es zu einer Überschreitung der Zugfestigkeit des Materials kommen [76, 77].
- Über die bisher beschriebenen Transportvorgänge während des Gefrierens hinaus, erklärt das Modell der Mikroislinsepumpe von SETZER [18] das sogenannte „Frostsaugen“. Darunter ist das Phänomen zu verstehen, dass der Sättigungsgrad von einem durch kapillares Saugen vollständig wassergesättigten Beton durch Frost-Tau-Wechsel erhöht wird. Schmilzt das Eis in den größeren Poren, so führt der Abbau des thermodynamischen Ungleichgewichts und damit des Unterdrucks im Porensystem zu einer Ausdehnung des Probekörpers nach der vorangehenden Gefrierkontraktion. Durch diese Dehnung kann weitere Prüflösung aus der Umgebung angesaugt werden und der Sättigungsgrad des Porensystems erhöht werden [18]. Erreicht dieser den kritischen Sättigungswert, bei dem die Gefrierdehnung des Eises und die hydraulischen Drücke wirksam werden, so wird der Beton sehr schnell geschädigt und zerstört [16].

Zusammenfassend tritt Eisdehnung im Beton erst auf, wenn entweder der Sättigungswert durch Frostsaugen bis zu einem kritischen Wert angestiegen ist oder wenn auch das Gelwasser gefriert. Dann treten, schon kurz nachdem die Eisdehnung einsetzt, die ersten Schäden auf und der Schaden schreitet sehr schnell fort [16].

Über die hier aufgeführten grundlegenden Mechanismen hinaus existiert noch eine Vielzahl an weiteren, häufig sehr speziellen Effekten, welche das Frostverhalten von Beton zusätzlich beeinflussen. Die Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung beruht auf einem komplexen Geflecht verschiedener Mechanismen.

2.2.2.2 Schadensmechanismen in Gesteinskörnungen

Betone bestehen insgesamt zu ca. 70 % aus feinen und groben Gesteinskörnungen. Der Einfluss der feinen Gesteinskörnungen auf das Frostverhalten von damit hergestellten Betonen gilt dabei als vernachlässigbar gering. Dies konnten u. a. GEHLEN & AL. durch Untersuchungen zum „Einfluss der Sandeigenschaften auf die Oberflächendauerhaftigkeit von Waschbeton“ [113] nachweisen. Auch SOMMER [109] konnte keinen Zusammenhang zwischen dem Verhalten von feinen Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung und dem Praxisverhalten damit hergestellter Betone feststellen. Da sich das Verhalten von feinen Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung offensichtlich nicht auf das Praxisverhalten damit hergestellter Betone auswirkt, werden im nationalen und im europäischen Regelwerk keine Anforderungen daran gestellt. Im Regelwerk Österreichs ist hingegen ein Verfahren zur Charakterisierung des Verhaltens von feinen Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung enthalten (Ö-Norm B 3303 [114]). Dabei werden mit den zu prüfenden feinen Gesteinskörnungen standardisierte Betone hergestellt und einer Frostprüfung unterzogen. Die bisherigen Erfahrungen mit diesem Verfahren bestätigen den geringen Einfluss der feinen Gesteinskörnung auf das Frostverhalten damit hergestellter Betone.

Bei den groben Gesteinskörnungen geht man davon aus, dass unter Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung prinzipiell die gleichen Mechanismen wirken wie im Beton [19, 20]. Unterschiedlich scheinen jedoch die Gewichtung und die Geschwindigkeit der ablaufenden Prozesse zu sein [50]. So kann bei den groben Gesteinskörnungen anhand der Wasseraufnahme nicht auf den Widerstand gegen Frostbeanspruchung geschlossen werden. Es gibt Gesteinskörnungen, die nur geringe Wassermengen aufnehmen, aber aufgrund ihrer Porengrößenverteilung dennoch Schäden zeigen. Genauso wenig geht eine hohe Wasseraufnahme zwangsläufig mit einem hohen Schadenspotential einher. Analog zum Beton treten Frostschäden nur auf, wenn ein kritischer Sättigungswert erreicht ist [50].

Die maßgebenden Parameter für das Verhalten von Gesteinen bzw. groben Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung sind die Mineralogie, die chemische Zusammensetzung und das Gefüge (Makrogefüge und Mikrogefüge). Die Hauptangriffspunkte für die Frost- bzw. Frost-Tausalz-Wirkung stellen vorgezeichnete Trennflächen (z. B. Klüfte) und die Mineralkorngrenzen dar. Als entscheidende Kennwerte gelten auch hier der Gesamtporengehalt, die Porenradialverteilung und die Lage des Porenradialmaximums [50, 115].

Bezüglich der Lage des kritischen Porenradius existieren sehr unterschiedliche Meinungen [z. B. 72, 19]. Tendenziell gilt vergleichbar zum Beton: Je größer das Porenvolumen und je kleiner der mittlere Porenradius, desto geringer der Widerstand gegen Frostbeanspruchung. Generell gilt zu beachten, dass in der Regel Zementstein über eine höhere Gesamtporosität [62, 19] und eine feinere Porenradialverteilung [107] verfügt als natürliche Gesteinskörnungen.

Neben der Porenradialverteilung beeinflusst auch die Korngrößenverteilung („Körnigkeit“) der Gesteine ihr Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung. Gemäß [106, 107, 108] steigt das Risiko eines Frostschadens proportional mit der Korngröße an.

Eine Taumittelbeaufschlagung bewirkt bei den Gesteinskörnungen v. a. eine Erhöhung der Flüssigkeitsaufnahme und eine Beschleunigung der physikalischen Schädigungsprozesse. Chemische Umwandlungen der Mineralien spielen hingegen nur eine untergeordnete Rolle [50].

Da sich einige Gesteinskörnungen im Beton nachweislich anders verhalten als im isolierten Zustand, können die Ansätze, die für die isolierten Gesteinskörnungen gelten, nicht ohne weiteres auf Gesteinskörnungen im Beton übertragen werden. Dies konnte bereits mehrfach nachgewiesen werden [z. B. 106, 107, 109, 110]. Indem die Gesteinskörner im Beton in einer Matrix eingebettet und damit „geschützt“ sind, unterliegen sie keiner direkten Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung und ihr Sättigungsgrad ist geringer als der Sättigungsgrad der isolierten Gesteinskörnung bei vergleichbarer Beanspruchung. Ein zweiter Grund für das abweichende Verhalten von Gesteinskörnungen im Beton sind mögliche Wechselwirkungen zwischen der Matrix und der Gesteinskörnung. Demnach sind für das Verhalten von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung verstärkt mineralogische, chemische und granulometrische Eigenschaften (z. B. Oberflächenstruktur, Korngröße) von Bedeutung [110].

2.2.3 Schadensbilder

Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchungen kann im Beton grundsätzlich innere (z. B. Mikrorisse) und/oder äußere Schädigungen (z. B. Abwitterungen bzw. Absplitterungen) hervorrufen [12, 16]. Während die innere Schädigung ein Versagen des Bauteils bewirken kann, beeinträchtigt eine Oberflächenschädigung (Abwitterung der äußeren Mörtelschichten bzw. von oberflächennahen Gesteinskörnungen) die statischen Eigenschaften in der Regel nicht. Ist die Oberfläche jedoch einmal geschädigt, so ermöglicht dies ein verstärktes Eindringen von schädlichen Substanzen, welche dann wiederum innere Schädigungen auslösen können [13].

Ursächlich für Frostschäden im Beton kann entweder das „Versagen“ [11] des Zementsteins oder ein zu geringer Widerstand der Gesteinskörnung gegen Frostbeanspruchung sein.

An Gesteinskörnungen äußern sich Schäden gemäß HEINE [50] in Form von Absplitterungen an der Oberfläche, von Kornbrüchen oder von Zerrieselung. Bei Zementstein bewirkt eine zu geringe Frostbeständigkeit in der Regel Mikrorisse. Abwitterungen (hier: flächige, schichtenweise Zerstörung des Zementsteins an der Betonoberfläche) entstehen hier v. a. unter Einwirkung von Tausalz.

Grundsätzlich werden im Beton folgende Schadensbilder unterschieden [vgl. 11, 13]:

- Oberflächennahe Abplatzungen (Popouts) lassen sich im Hinblick auf das Frostverhalten eines Betons in der Regel auf eine „nicht frostbeständige“ Gesteinskörnung zurückführen.
- Als weiteres Schadensbild, das typisch für Beton mit „nicht frostbeständiger“ Gesteinskörnung ist, gilt D-Cracking, welches sich in einem spezifischen Rissmuster an der Betonoberfläche äußert. Dabei zeichnen sich enge Risse ab, die vorrangig in unmittelbarer Nähe von Längs- und Querfugen auftreten und parallel dazu verlaufen bzw. an diese anstoßen. Daneben ist D-Cracking an freien Plattenkanten und -ecken zu beobachten. Der Ursprung des D-Cracking liegt in der Ausbildung von horizontalen Rissen in den unteren Betonschichten, welche sich im Laufe der Zeit in die höheren Schichten und letztlich in den gesamten Betonkörper ausbreiten.

- Andere Risse oder Brüche wie Spalling, Cracking und Map-Cracking können sowohl vom Zementstein, als auch von der Gesteinskörnung ausgehen. Eine Zuordnung ist ohne genaue Untersuchungen in der Regel nicht möglich. Cracking steht dabei für Querrisse im Bauteil, als Spalling werden Risse an der Betonplattenkante bezeichnet (z. B. an Verkehrsflächen) und Map-Cracking steht für ein landkartenartiges Rissmuster an der Betonoberfläche.
- Daneben können Abwitterungen auch durch die Alkalikieselsäurereaktion bedingt sein.

Einige Schadensbilder wie zum Beispiel Abwitterung und Popouts können sowohl isoliert als auch nebeneinander auftreten und sich gegenseitig bewirken. Ohne genaue Untersuchungen ist keine konkrete Zuordnung von Schadensbildern zu bestimmten Mechanismen und Einflussfaktoren möglich [11].

Da diese Arbeit v. a. auf das Verhalten von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung abzielt, werden im Folgenden die möglichen Ursachen für die Schäden, welche durch Gesteinskörnungen hervorgerufen werden, diskutiert. Dabei handelt es sich nach derzeitigem Kenntnisstand insbesondere um D-Cracking und Popouts [11, 13].

D-Cracking scheint vor allem dann aufzutreten, wenn grobe Gesteinskörnungen verwendet werden, die eine ungünstige Porenverteilung aufweisen, und gleichzeitig eine kritische Feuchtigkeit des Betons bzw. der Gesteinskörnung gegeben ist. Vereinfacht dargestellt bildet sich unter diesen Bedingungen in der Gesteinskörnung ein besonders hoher hydraulischer Druck. Wenn dieser die Zugfestigkeit der Gesteinskörnung übersteigt, kommt es zu Rissen, die sich im Laufe der Zeit auch auf die Zementsteinmatrix und den gesamten Betonkörper ausbreiten. Es gilt zu beachten, dass D-Cracking meist im Betoninneren beginnt und sich erst nach einiger Zeit an der Oberfläche zeigt. Demzufolge kann ein Beton, der oberflächlich gesund wirkt, im Inneren bereits durch D-Cracking geschwächt sein. Tatsächlich wird D-Cracking durch zahlreiche Faktoren beeinflusst und rührt von einem komplexen Zusammenwirken unterschiedlicher Prozesse her [15, 11, 78].

Ebenso wie D-Cracking werden auch Popouts auf „qualitativ minderwertige“, grobe Gesteinskörnungen zurückgeführt. Bei Popouts handelt es sich um Abplatzungen, die vor allem dann entstehen, wenn Gesteinskörnungen mit hohen Sättigungsgraden einer Frostbeanspruchung im Beton ausgesetzt werden. Beim Gefrieren dehnt sich das Wasser aus, was auch zu einer Expansion in der Gesteinskörnung führt. Kann die Gesteinskörnung diese Expansion nicht kompensieren, so kommt es zu Absprengungen, die auch die darüberliegende Zementsteinmatrix erfassen können. Typisch ist ein kraterförmiges Schadensbild [11, 13, 50].

Zwischen Popouts und D-Cracking gibt es gemäß DOMBROWSKI [11] keine direkte Korrelation.

2.3 Bedeutung des Verhaltens von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung

Obwohl Beton insgesamt zu ca. 70 % aus Gesteinskörnungen besteht, sind diese für das Frostverhalten des Betons in der Praxis grundsätzlich nur von nachrangiger Bedeutung. Frostschäden an Betonen, die sich einzig und allein auf die verwendete feine Gesteinskörnung zurückführen lassen, sind aus der Praxis offensichtlich nicht bekannt. Vielmehr gilt der Einfluss der feinen Gesteinskörnungen als vernachlässigbar gering, was auch durch Forschungsarbeiten belegt wird [z. B. 109, 113]. Frostschäden, die nachweislich von groben Gesteinskörnungen mit einem zu geringen Widerstand gegen Frostbeanspruchung ausgehen, treten hingegen gelegentlich auf. Diese hängen stark vom Einsatzbereich (Exposition) des Betonbauteils ab und äußern sich typischerweise in Form von D-Cracking und/oder Popouts. Im Regelfall laufen die schädigenden Frostmechanismen jedoch v. a. in der Zementsteinmatrix und in der Kontaktzone zwischen Matrix und Gesteinskörnung ab [2]. Ursächlich für das konservative Verhalten der Gesteinskörnungen ist sowohl die höhere Porosität, als auch die schützende Wirkung der Zementsteinmatrix um das einzelne Gesteinskorn (vgl. Kapitel 2.2.2.2).

Im Sinne eines dauerhaften und nachhaltigen Bauens mit Beton ist es wichtig eine ausreichende Qualität der groben Gesteinskörnungen im Hinblick auf das Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung sicherzustellen. Dies kann über eine Frostprüfung der Gesteinskörnung erfolgen. Hierzu gilt es, in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich und Verwendungszweck, praxisgerechte Anforderungswerte zu definieren, wie es auch teilweise im Regelwerk, beispielsweise durch die Unterscheidung zwischen verschiedenen Expositionsklassen, bereits vollzogen wird.

2.4 Frostprüfverfahren für Gesteinskörnungen und Beton

2.4.1 Frostprüfverfahren an der Gesteinskörnung

2.4.1.1 Prüfverfahren

Die gängigsten Verfahren zur Beurteilung des Verhaltens einer Gesteinskörnung bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung sind Kristallisationsverfahren (mit Magnesium- oder Natriumsulfat-Lösung) und Frostversuche mit oder ohne Tausalz.

Zur Übersicht sind in Tabelle 2-2 die wichtigsten Eckdaten der verschiedenen Frostprüfverfahren an den Gesteinskörnungen zusammengefasst. Die genauen Rahmenbedingungen und Vorgehensweisen sind der jeweiligen Prüfvorschrift zu entnehmen.

	Kristallisationsversuche		Dosenfrostversuche	
	Magnesiumsulfat-Verfahren (MS-Verfahren)	Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat (NS-Verfahren)	Frost-Tau-Wechsel-Versuch (FTW-Versuch)	Frost-Tausalz-Versuch (FTS-Versuch)
Prüfvorschrift	DIN EN 1367-2	DIN 52111	DIN EN 1367-1	DIN EN 1367-6
Versuchsprinzip	Durch wiederholte Sättigung der Gesteinskörnung mit einer Prüflösung und anschließender Trocknung wird ein Kristallisationsdruck aufgebaut.		Die gesättigte Gesteinskörnung wird in Dosen zusammen mit der Prüflösung wiederholt Frost-Tau-Wechseln im Kälteschrank ausgesetzt.	
Prüflösung	Magnesiumsulfat-Lösung (gesättigt)	Natriumsulfat-Lösung (gesättigt)	Entionisiertes Wasser	1%ige NaCl-Lösung
Prüfkornklasse	10/14 mm	10/14 mm	verschiedene	verschiedene
Anzahl an Einzelversuchen	2	2	3	3
Belastungszyklus	17 h → Prüflösung 2 h → Abtropfen 24 h → Trocknen (110 °C) 5 h → Abkühlen (Exsikator)	16 h → Prüflösung 15 min → Abtropfen 6 h → Trocknen (110 °C) → Abkühlen (Exsikator)	- 17,5 / + 20 °C	- 17,5 / + 20 °C
Anzahl an Belastungszyklen	5	5	10	10
Kennwert	Widerstand gegen Magnesiumsulfat (hier: MS-Wert) bzw. Natriumsulfat (hier: NS-Wert): Massenanteil an Korn unter 10 mm		Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (hier: FTW-Wert) bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung (hier: FTS-Wert): Massenanteil an Korn $\leq d/2$	

Tabelle 2-2: Überblick über die gängigsten Frostprüfverfahren an den Gesteinskörnungen

Durch Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung kommt es einerseits zu Abwitterungen und andererseits zu Gefügeänderungen (Schädigung des inneren Gefüges). Bei den Frostprüfungen an den Gesteinskörnungen erfolgt die Beurteilung ausschließlich über die Abwitterung. Die innere Schädigung bleibt unberücksichtigt. Eine Möglichkeit, die Gefügeänderungen zu erfassen, stellt die Bestimmung der Festigkeitsentwicklung bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung nach DIN EN 1367-1 Anhang B [32] dar. Hierbei werden jeweils an der Prüfkörnung 8/12,5 mm die Schlagzertrümmerungswerte vor und nach dem Frost-Tau-Wechsel- bzw. Frost-Tausalz-Versuch gemäß DIN EN 1097-2 [33] ermittelt und miteinander verglichen. Durch die Beanspruchung kommt es in der Regel zu einem Festigkeitsverlust.

Bei den Kristallisationsversuchen handelt es sich um relativ alte, apparativ zwar kostengünstige, aber arbeitsintensive und zeitaufwändige Verfahren. So dauert die Prüfung zwei bis drei Wochen und es müssen alle Arbeitsschritte händisch zu vorgeschriebenen Zeitpunkten durchgeführt werden. Der größte Nachteil der Kristallisationsversuche ist, dass ausreichende Erfahrungen fehlen, wie sich die Versuchsergebnisse dieser Verfahren mit denen anderer Prüfungen an Gesteinskörnungen und am Beton sowie der Beanspruchung in der Realität korrelieren lassen. Es ist jedoch bekannt, dass

manche Gesteine, die sich beim Magnesiumsulfat-Verfahren als günstig erweisen, bei direkten Frostversuchen (Dosenfrostversuchen) eine starke Abwitterung zeigen [11]. Gleiches gilt auch für die Prüfung mit Natriumsulfat. Des Weiteren gilt als sicher, dass insbesondere bei Karbonaten chemische Reaktionen mit den Prüflösungen die Versuchsergebnisse beeinflussen [7, 50, 110]. Bei Frostbeanspruch spielen chemische Umwandlungen der Mineralien hingegen nur eine untergeordnete Rolle [50] (vgl. Kapitel 2.2.2.2).

Die Dosenfrostversuche sind bei Vorhandensein eines geeigneten Kälteschranks relativ einfache Versuche. Während der zehntägigen Versuchsdauer fallen keine zeitintensiven Arbeiten an. Verschiedene Autoren kommen allerdings zu dem Ergebnis, dass der Frost-Tau-Wechsel-Versuch keine praxisnahen und repräsentativen Ergebnisse liefert, z. B. [9, 50]. Zudem weist das Verfahren eine zu geringe Spreizung und damit Differenzierung der Ergebnisse bei unterschiedlichen Qualitäten auf. Beim Dosenfrostversuch mit Tausalz werden die Gesteinskörnungen einer extremen Belastung ausgesetzt, die vielleicht in der Realität nie auftritt. Im Gegensatz zum Frost-Tau-Wechsel-Versuch wird dem Frost-Tausalz-Versuch eine gute Differenzierung und ein besserer Zusammenhang zur Praxis bescheinigt [9].

Über die direkten (Dosenfrostversuche) und indirekten Frostprüfverfahren (Kristallisationsversuche) hinaus werden teilweise auch die petrographische Beschreibung nach DIN EN 923-3 [24], die Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6 [6] und der Mürbkorngehalt nach der ehemaligen Ö-NORM B 3304 [10] als Hilfsgrößen zur Abschätzung des Widerstands von Gesteinskörnungen bei Frostbeanspruchung herangezogen. Bei diesen Hilfsgrößen handelt es sich um gesteintechnische Eigenschaften, die das Verhalten von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung maßgebend beeinflussen [79, 87, 88, 97].

2.4.1.2 Zusammenhänge zwischen den Frostprüfverfahren an den Gesteinskörnungen

Nach bisherigem Kenntnisstand existieren zwischen den derzeit praktizierten Verfahren keine zufriedenstellenden Zusammenhänge.

So korrelieren Frost-Tau-Wechsel- und Frost-Tausalz-Versuch beispielsweise gemäß [8, 9, 11, 50] nur schlecht miteinander. Dies konnte durch umfangreiche Korrelationsbetrachtungen zwischen beiden Verfahren bestätigt werden [34]. Hier ergab die Auswertung einer großen Datenmenge ein Bestimmtheitsmaß von lediglich 0,53, was auf unterschiedliche Beanspruchungsarten hindeutet.

Daneben wurden auch Korrelationen zwischen dem Magnesiumsulfat-Verfahren und den Dosenfrostversuchen angestellt [34]. Dabei zeigte sich, dass zwischen den Absplitterungen beim Magnesiumsulfat-Verfahren und denen beim Frost-Tau-Wechsel-Versuch praktisch kein Zusammenhang ($R^2=0,28$) und zwischen denen beim Magnesiumsulfat-Verfahren und denen des Frost-Tausalz-Versuchs nur ein mäßiger Zusammenhang ($R^2=0,50$) besteht. Ähnliches wurde zuvor auch schon von DOMBROWSKI [11] und KALKOWSKI [61] festgestellt, die dies auf grundlegend unterschiedliche Mechanismen bei den Kristallisationsversuchen und den Dosenfrostversuchen zurückführen.

Einen Schritt weiter gehen MANN & AL. [8], die u. a. nicht nur keinen ausreichenden Zusammenhang zwischen dem Magnesiumsulfat-Verfahren und den Dosenfrostversuchen, sondern auch zwischen

dem Magnesiumsulfat-Verfahren und der Wasseraufnahme sehen. Auch LÖFFLER [35] bestätigt die geringe Aussagekraft der Kristallisationsversuche und begründet dies mit dem nicht zu vergleichenden Beanspruchungsmechanismus. In [9] wird u. a. auf die Wasseraufnahme als Hilfsgröße zur Charakterisierung des Verhaltens bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung eingegangen. Dabei wurde festgestellt, dass dieser Kennwert nur in gewissem Maße aussagekräftig ist und die direkten Frostprüfverfahren nicht ersetzen kann. Gemäß [8] liegt der Grund für den fehlenden Zusammenhang zu den Absplitterungen im Frost-Tau-Wechsel-Versuch insbesondere darin, dass durch die Wasseraufnahme die Gesamtporosität erfasst wird, ohne die Porengrößenverteilung zu berücksichtigen. Diese beeinflusst jedoch das Verhalten von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung maßgeblich [11, 13, 70, 72-75].

Ergebnisse vergleichender Untersuchungen zwischen der Festigkeitsentwicklung beim Frost-Tau-Wechsel- bzw. Frost-Tausalz-Versuch und anderen Verfahren sind genauso wenig bekannt, wie Korrelationsbetrachtungen zwischen den Kristallisationsversuchen mit Magnesium- und Natriumsulfat.

Zusammenfassend gelten die Dosenfrostversuche aufgrund der Tatsache, dass der zugrunde liegende Beanspruchungsmechanismus der Selbe ist wie in der Praxis, als am aussagekräftigsten. Dabei scheinen sich die Schadensmechanismen mit und ohne Verwendung von Taumitteln teilweise zu unterscheiden, so dass die Widerstandsfähigkeiten – je nach Fragestellung – getrennt zu prüfen sind. Da weder die Kristallisationsversuche noch die Wasseraufnahme mit den Frostversuchen zufriedenstellend korrelieren, können sie diese nicht ersetzen [8].

2.4.2 Frostprüfverfahren am Beton

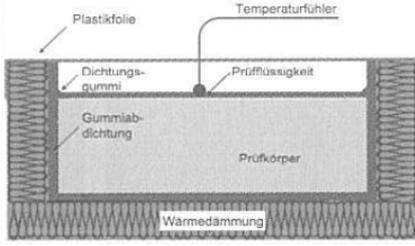
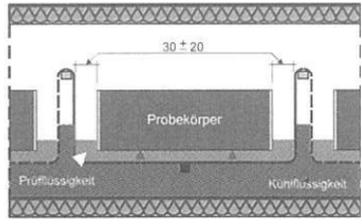
2.4.2.1 Prüfverfahren

Bei den Betonversuchen wird nicht nur die Gesteinskörnung, sondern das gesamte System geprüft. Um das Verhalten von Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung zu charakterisieren, gibt es eine Vielzahl von verschiedenen Verfahren. Einen Überblick darüber geben z. B. [11, 13, 95].

Die vorliegende Arbeit greift zur Charakterisierung des Frost-Tausalz-Verhaltens von Gesteinskörnungen im Beton mit dem CDF-Verfahren und dem Plattenprüfverfahren mit Tausalz die für das nationale Regelwerk (DIN 1045-2 [26] bzw. ZTV-ING Teil 3 [27]) relevanten Verfahren auf. Das CDF-Verfahren wurde von SETZER [80] entwickelt und von HARTMANN [81] modifiziert, das Plattenprüfverfahren mit Tausalz stellt eine Weiterentwicklung des Verfahrens nach Ö-NORM B 3306 [82] dar. Eine vergleichende Betrachtung beider Verfahren stellten SETZER & AUBERG [96] an.

Für die Auswertung im Hinblick auf den Frostwiderstand von Gesteinskörnungen im Beton, an welchen national noch keine Anforderungen gestellt werden, werden die in der europäischen Norm DIN EN 12390-9 [36] aufgeführten Verfahren (CIF-Verfahren; Plattenprüfverfahren mit Wasser) herangezogen. Beim CIF-Verfahren handelt es sich um eine Modifizierung des CDF-Verfahrens durch SETZER und AUBERG [13, 83], das Plattenprüfverfahren mit Wasser ist bis auf das Prüfmedium identisch mit dem Plattenprüfverfahren mit Tausalz.

In Tabelle 2-3 sind die wichtigsten Eckdaten der betrachteten Frostprüfverfahren (Plattenprüfverfahren und CDF- bzw. CIF-Verfahren) zusammenfassend gegenübergestellt. Die genauen Vorgehensweisen und Rahmenbedingungen sind der jeweiligen Prüfvorschrift zu entnehmen.

Parameter	Prüfverfahren			
	Plattenprüfverfahren		CIF-Test	CDF-Test
	DIN EN 12390-9, Abschnitt 6		DIN EN 12390-9, Abschnitt 8	
Prinzipiskizze				
Prüfmedium	demineralisiertes Wasser	3%ige NaCl-Lösung	demineralisiertes Wasser	3%ige NaCl-Lösung
Prüfkörper	4 Platten (150 x 150 x 50) mm ³		5 Platten (150 x 150 x 70) mm ³	
Prüffläche	gesägt		geschalt (Teflonschalung)	
Nachbehandlung	1 d Form 6 d unter Wasser bei 20 °C 21 d Klimaraum (20/65)		1 d Form 6 d unter Wasser bei 20 °C 21 d Klimaraum (20/65)	
Vorlagerung	3 d mit aufstehender Prüfflüssigkeit (3 mm)		7 d in Prüfflüssigkeit (5 mm tief eingetaucht)	
Prüfalter bei Vorlagerungsbeginn	28 d		28 d	
Prüfrichtung	einseitig (von oben)		einseitig (von unten)	
Regelung der Temperatur	Luftkühlung		Flüssigkeitskühlung	
T_{\min}/T_{\max} ¹⁾	-20 °C / +20 °C im Prüfmedium		-20 °C / +20 °C unter Prüfbehälter in Truhemitte	
zul. ΔT bei T_{\min}	± 2 K		± 1 K	
Abkühl- / Auftaugeschwindigkeit	2,5 K/h / 6,5 K/h		10 K/h / 10 K/h	
Dauer / Anzahl der FTW	24 h / 56 FTW		12 h / 56 FTW	12 h / 28 FTW
Prüfkriterium A	Oberflächenschädigung, festgestellt durch Abwitterung der Prüffläche			
Vorgeschlagenes Abnahmekriterium		< 1,0 kg/m ² nach 56 FTW ⁴⁾	< 1,0 kg/m ² nach 28 FTW ⁵⁾	< 1,5 kg/m ² nach 28 FTW ⁵⁾
Prüfkriterium B	Innere Schädigung, festgestellt durch Änderung des dynamischen E-Moduls			
Vorgeschlagenes Abnahmekriterium	rel. $E_{\text{dyn}} < 80 \%$ ⁶⁾		rel. $E_{\text{dyn}} = 75 \%$ / 28 FTW ⁵⁾	rel. $E_{\text{dyn}} = 80 \%$ / n FTW ³⁾⁷⁾

¹⁾ T_{\min} und T_{\max} stellen Mittelwerte dar.

²⁾ Alternativverfahren: E-Modul aus Resonanzfrequenz oder UPTT; Referenzverfahren: Längenänderung

³⁾ Anzahl der FTW je nach Anwendungsfall festzulegen

⁴⁾ Abnahmekriterium nach [37]

⁵⁾ Abnahmekriterium nach [38]

⁶⁾ Abnahmekriterium nach [39]

⁷⁾ Abnahmekriterium nach [40;41]

Tabelle 2-3: Gegenüberstellung des Plattenprüfverfahrens und des CDF-/CIF-Verfahrens [16]

Mittels beider Versuchstypen kann sowohl der Frost- als auch der Frost-Tausalz-Widerstand von Betonen geprüft werden. Um den Frostwiderstand zu bestimmen, wird als Prüfmedium demineralisiertes Wasser verwendet. Für die Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes wird dieses durch 3%ige NaCl-Lösung ersetzt.

Wichtige Unterschiede zwischen beiden Verfahren bestehen v. a. im Hinblick auf die Ausbildung der Prüffläche, die Vorlagerung (Art und Dauer) und die Beanspruchung (Versuchsordnung, Temperaturzyklus bei der Prüfung, Anzahl der Frost-Tau-Wechsel). So werden beim Plattenprüfverfahren gesägte Flächen und beim CDF- bzw. CIF-Verfahren geschaltete Flächen geprüft. Die Vorlagerung dauert beim Plattenprüfverfahren drei Tage, wobei die Prüfflüssigkeit aufsteht (3 mm), beim CIF- bzw. CDF-Verfahren werden die Prüfkörner vor der Prüfung sieben Tage lang 5 mm tief in die Prüfflüssigkeit eingetaucht. Die Beanspruchung bei beiden Verfahren unterscheidet sich durch die Versuchsanordnung, den zu fahrenden Temperaturzyklus (Temperaturverlauf, zulässige Temperaturabweichung, Abkühl- und Auftaugeschwindigkeit, Dauer eines Zykluses) und der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel. Während beim Plattenprüfverfahren und CIF-Verfahren für gewöhnlich 56 Frost-Tau-Wechseln angesetzt werden, werden die Probekörper beim CDF-Verfahren gemäß DIN EN 12390-9 [36] 28 Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt.

Als Prüfkriterium wird bei beiden Versuchstypen (sowohl bei der Prüfung mit 3%iger NaCl-Lösung, als auch bei der Prüfung mit demineralisiertem Wasser) die abgewitterte Masse als Summe der losen Partikel an der Prüfoberfläche und dem Material aus der Prüflösung herangezogen. Das Material aus der Prüflösung wird stets durch Filtern gewonnen, das lose Material der Prüfoberfläche wird beim Plattenprüfverfahren abgebürstet, beim CDF-/CIF-Verfahren wird es durch Ultraschall gelöst.

Im Hinblick auf den Frostwiderstand von Betonen spielt neben der Abwitterung die innere Schädigung durch die Befrostung eine wichtige Rolle [z. B. 11, 13]. Aus diesem Grund wird für die Beurteilung des Frostwiderstandes primär die innere Schädigung beispielsweise durch die Änderung des dynamischen E-Moduls bestimmt.

2.4.2.2 Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Frostprüfverfahren an Beton

Das Hauptproblem bei der Bestimmung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes im Betonversuch liegt in der Versuchsdauer. Des Weiteren verhindern die Vielzahl unterschiedlicher Verfahren und die vor allem international unterschiedlichen Prüfbedingungen aussagekräftige Vergleiche [11].

So kamen MANN & AL. [8] zu keiner einheitlichen Bewertung durch das CDF-Verfahren und das Plattenprüfverfahren. Gemäß [42, 47] ist hingegen eine Korrelation zwischen den verschiedenen Frostprüfverfahren am Beton zwar schwierig, aber möglich. So konnten im Hinblick auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton zwischen den Abwitterungen der hier betrachteten Verfahren (Plattenprüfverfahren und CDF-Verfahren) Korrelationen nachgewiesen werden. Gleiches gilt hinsichtlich des Frost-Widerstandes für die innere Schädigung beim CIF-Verfahren und beim modifizierten Plattenprüfverfahren mit Wasser. Voraussetzung hierfür war eine präzise Analyse der tatsächlichen Randbedingungen bei den zu vergleichenden Verfahren (z. B. Nachbehandlung, Lagerung, Prüffläche, -alter).

Wie bei den Gesteinskörnungen scheint es auch im Beton keinen direkten Zusammenhang zwischen den Frostprüfverfahren mit und ohne Tausalzbeaufschlagung zu geben [z. B. 13, 16]. Dies bestätigt,

dass bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung teilweise unterschiedliche Mechanismen wirken und man vom Frostwiderstand eines Betons nicht zwangsläufig auf seinen Frost-Tausalz-Widerstand schließen kann. Folglich handelt es sich um zwei verschiedene Parameter, die es – je nach Fragestellung – zu bestimmen gilt.

Darüber hinaus existiert offensichtlich auch zwischen der oberflächlichen (Abwitterung) und der inneren Schädigung von Beton durch Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung kein direkter Zusammenhang [z. B. 11, 13, 16]. Vielmehr handelt es sich um unterschiedliche Auswirkungen, die nicht zwangsläufig konform gehen und die es daher beide zu berücksichtigen gilt [13].

2.4.3 Auslagerungsversuche

Bei den Auslagerungsversuchen zum Verhalten von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung handelt es sich um die praxisnächsten Versuche. Es werden Betonprobekörper mit den zu untersuchenden Gesteinskörnungen hergestellt und anschließend über mehrere Jahre ausgelagert. Da die Beanspruchung stark vom Auslagerungsort abhängt, gilt es diesen gezielt – je nach Fragestellung – zu wählen bzw. einzurichten. Der Zustand der Betone kann während und nach der Auslagerung beispielsweise im Hinblick auf ihre Abwitterung (volumetrisch und gravimetrisch) und Gefügeänderungen (Abfall des dynamischen E-Moduls durch Ultraschall- oder Frequenzmessungen, Dehnungsmessungen) geprüft werden. Um einen Zusammenhang zur Beanspruchungsintensität herstellen zu können, wird für gewöhnlich auch der Temperaturverlauf während der Auslagerung erfasst.

2.5 Übertragbarkeit der Laborversuche auf das Praxisverhalten

Zur Charakterisierung des Verhaltens von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung werden sowohl Prüfungen an der isolierten Gesteinskörnung als auch am gesamten Beton angewandt. Dabei sind die Laborversuche an der isolierten Gesteinskörnung im Allgemeinen einfacher, schneller und weniger aufwändig als die Betonversuche. Dafür haben sie den Nachteil, dass mit dem Verhalten der Gesteinskörnung bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung nur eine Komponente des Betons und nicht das komplette System geprüft wird. Da sich jedoch Gesteinskörnungen im Beton unter Frosteinwirkung nachweislich anders verhalten als isoliert, bzw. sie für das Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung eines Betons nicht alleine ausschlaggebend sind [z. B. 8, 50], besteht immer eine gewisse Unsicherheit, weshalb Versuche an Betonen mit der tatsächlich verwendeten Zusammensetzung prinzipiell als aussagekräftiger zu beurteilen sind. Für keine der beiden Laborprüfungstypen können die gleichen, langwierigen, vielfältigen und komplexen Frostrahmenbedingungen geschaffen werden, wie sie in der freien Natur gegeben sind [13, 16]. Deshalb wird im Labor versucht, die Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung zeitgerafft und unter verschärften Bedingungen zu simulieren sowie zu standardisieren [11]. Hierfür ist eine Vielzahl verschiedener Versuchsparameter festzulegen (z. B. Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, Temperaturverlauf, Grad der Sättigung usw.). Eine weitere Möglichkeit ist es, die entscheidende Einflussgröße für das Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung zu finden, zu bestimmen und zu klassifizieren. Dies ist jedoch problematisch, da es mehrere Einflussgrößen gibt. Zusammenfassend ist bei allen Labor-

versuchen die Frage nach der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Praxis berechtigt und daher zu überprüfen. Die praxisnächsten Ergebnisse erhält man sicherlich durch Auslagerungsversuche, bei denen die Betone in der freien Natur gelagert und beurteilt werden. Da Frostschäden jedoch häufig erst nach mehreren Jahren auftreten, ist dies ein sehr langwieriges Verfahren, das nur in Ausnahmefällen (meist im Rahmen von Forschungsprojekten) praktiziert wird bzw. werden kann [11].

2.6 Stand des Regelwerks

Zur Beurteilung des Verhaltens einer Gesteinskörnung bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung kann nach DIN EN 12620 [5] (nationale Umsetzung der Europäischen Norm) bisher der Frost-Tau-Wechsel-Versuch nach DIN EN 1367-1 [21] oder das Magnesiumsulfat-Verfahren nach DIN EN 1367-2 [22] angewendet werden. Nach der Überarbeitung der Europäischen Norm ist zukünftig das Magnesiumsulfat-Verfahren nicht mehr für eine Beurteilung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost-Tausalz-Beanspruchung zulässig. Stattdessen ist dann der Frost-Tausalz-Versuch nach DIN EN 1367-6 [23] anzuwenden. Des Weiteren wird im informativen Anhang F der aktuellen DIN EN 12620 mit der petrographischen Beschreibung nach DIN EN 932-3 [24] und der Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6 [6] auf zwei indikative Prüfverfahren verwiesen, die ebenfalls bei der Beurteilung helfen oder hierfür sogar herangezogen werden können. Werden im Rahmen der petrographischen Beschreibung nach DIN EN 932-3 mürbe und/oder stark saugende Körner festgestellt, so ist dies als Hinweis auf mögliche Schäden bei einer Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung zu werten. Daneben kann eine Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 Anhang F als widerstandsfähig gegen Frostbeanspruchung angesehen werden, wenn ihre Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6 nicht größer als 1 M.-% ist. Da nachgewiesen wurde, dass diese Regelung häufig nicht zielführend ist [z. B. 8, 9], wird sie in der überarbeiteten DIN EN 12620 nicht mehr enthalten sein.

In Deutschland stellte bis vor kurzem die DIN V 20000-103 [25] das nationale Anwendungsdokument zur DIN EN 12620 für Gesteinskörnungen für Beton nach DIN 1045-2 [26] dar. Mittlerweile wurden die nationalen Anforderungen als Anhang U in die DIN 1045-2 integriert.

Die Charakterisierung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frostbeanspruchung erfolgt sowohl im Anwendungsbereich der DIN 1045-2, als auch nach ZTV-ING [27] ausschließlich über den Frost-Tau-Wechsel-Versuch nach DIN EN 1367-1 (Dosenfrostversuch mit Wasser) [21]. Soll eine Gesteinskörnung in Betonbauteilen der Expositionsklasse XF3 (hohe Wassersättigung, ohne Taumittel) eingesetzt werden, so darf die Abwitterung im Dosenfrostversuch maximal 2 M.-% betragen. Für die Expositionsklasse XF1 (mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel) sind maximal 4 M.-% Abwitterung zulässig. Abbildung 2-1 fasst die Anforderungen an den Widerstand von Gesteinskörnungen gegen Frostbeanspruchung im Anwendungsbereich der DIN 1045-2 Anhang U und der ZTV-ING zusammen.

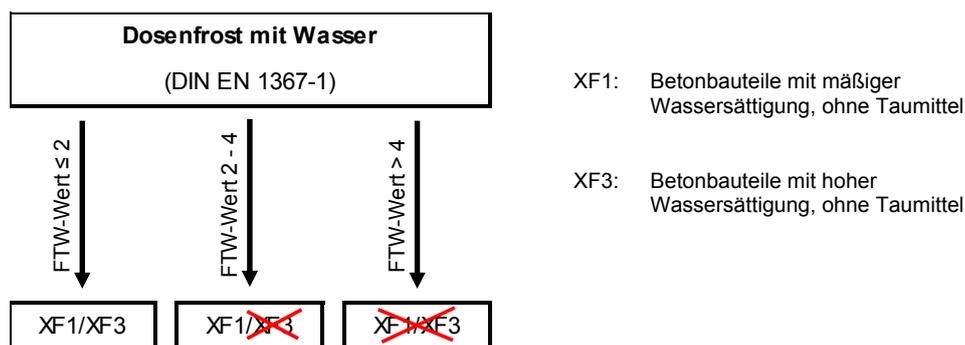
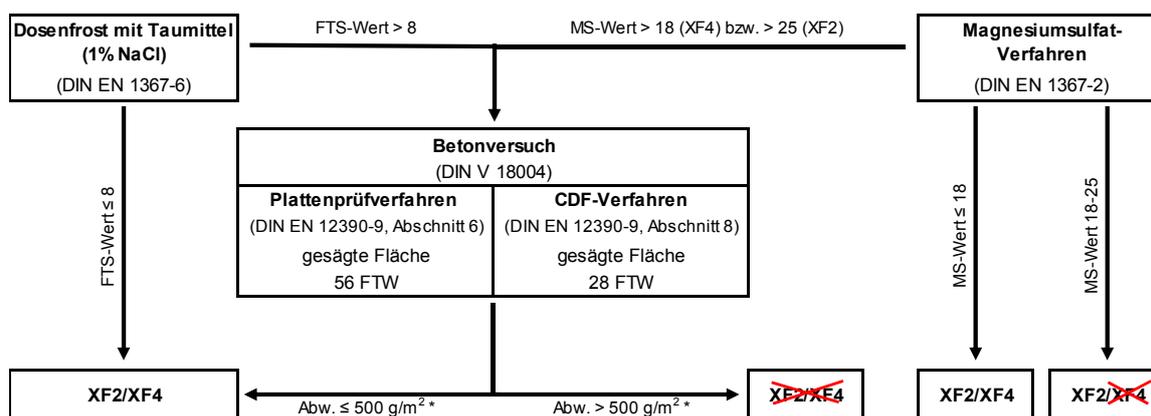


Abbildung 2-1: Anforderungen an den Widerstand von Gesteinskörnungen bei Frostbeanspruchung (ohne Taumittel) in Abhängigkeit von der Expositionsklasse (analoge Regelung für die Anwendungsbereiche der DIN 1045-2 Anhang U und der ZTV-ING)

Zur Beurteilung des Verhaltens von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost-Tausalz-Belastung sind im Anwendungsbereich der DIN 1045-2 prinzipiell das Magnesiumsulfat-Verfahren nach DIN EN 1367-2 [22], der Frost-Tausalz-Versuch nach DIN EN 1367-6 [23] (Dosenfrost mit Taumittel) und der Betonversuch nach DIN V 18004, Abschnitt 4.3 [45] zulässig. Dieser wird nur dann gefordert, wenn Gesteinskörnungen die Anforderungen an den Widerstand gegen Magnesiumsulfat oder Frost-Tausalz-Belastung nicht erfüllen. Der Beton ist dann gemäß DIN V 18004, Abschnitt 4.3.3.2 mittels Plattenprüfverfahren nach DIN EN 12390-9, Abschnitt 6 [36] oder alternativ dazu mittels CDF-Verfahren nach DIN EN 12390-9, Abschnitt 8 [36] zu prüfen. Maßgebend für die Beurteilung sind die Abwitterungen nach 56 bzw. 28 Frost-Tau-Wechseln. Abbildung 2-2 fasst die Regelung im Anwendungsbereich der DIN 1045-2 Anhang U im Hinblick für den Widerstand von Gesteinskörnungen gegen Frost-Tausalz-Belastung zusammen.



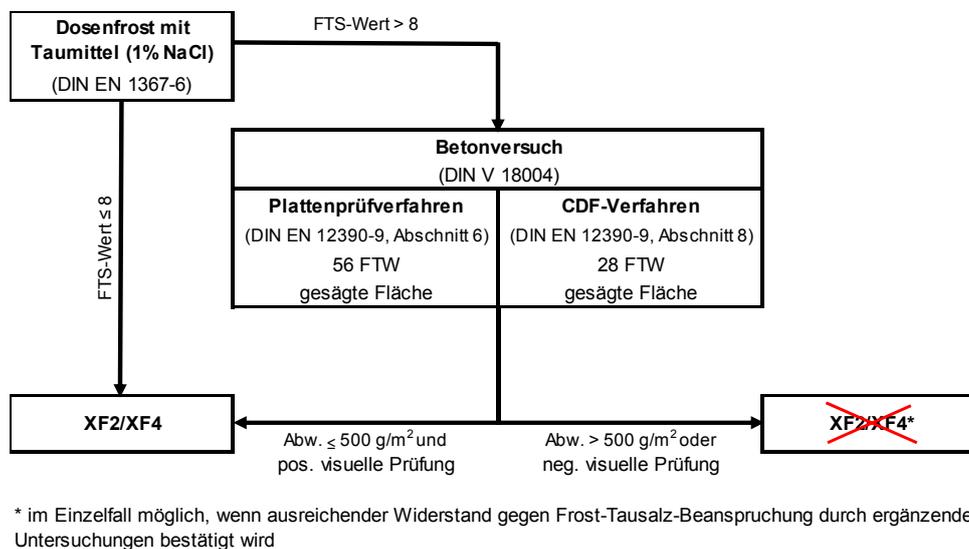
* gilt nur für das Plattenprüfverfahren nach DIN EN 12390-9, Abschnitt 6 nach 56 Frost-Tau-Wechseln

XF2: Betonbauteile mit mäßiger Wassersättigung, mit Taumittel

XF4: Betonbauteile mit hoher Wassersättigung, mit Taumittel

Abbildung 2-2: Anforderungen an den Widerstand von Gesteinskörnungen bei Frostbeanspruchung (mit Taumittel) in Abhängigkeit von der Expositionsklasse (Regelung für den Anwendungsbereich der DIN 1045-2 Anhang U)

Im Hinblick auf das Verhalten von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost-Tausalz-Beanspruchung wird in der aktuellen Fassung der ZTV-ING das Magnesiumsulfat-Verfahren ausgeschlossen. Hier ist als Prüfverfahren an den Gesteinskörnungen nur der Dosenfrost mit Taumittel zulässig. Kann eine Gesteinskörnung den Anforderungswert von maximal 8 M.-% Abwitterung im Dosenfrostversuch nicht einhalten, so muss der Nachweis, analog zum Anwendungsbereich der DIN 1045-2, über einen Betonversuch nach DIN V 18004, Abschnitt 4.3 erbracht werden. Im Gegensatz zum Anwendungsbereich der DIN 1045-2 erfolgt bei einer Prüfung nach ZTV-ING keine Differenzierung zwischen verschiedenen Expositionsklassen. Demnach müssen Gesteinskörnungen für Betonbauteile der Expositionsklasse XF2 die gleichen Anforderungen erfüllen wie Gesteinskörnungen für Betonbauteile der Expositionsklasse XF4. Die Regelung innerhalb des Anwendungsbereiches der ZTV-ING ist in Abbildung 2-3 zusammengefasst.



XF2: Betonbauteile mit mäßiger Wassersättigung, mit Taumittel

XF4: Betonbauteile mit hoher Wassersättigung, mit Taumittel

Abbildung 2-3: Anforderungen an den Widerstand von Gesteinskörnungen bei Frostbeanspruchung (mit Taumittel) in Abhängigkeit von der Expositionsklasse (Regelung für den Anwendungsbereich der ZTV-ING)

Da durch die Einführung dieser Regelung zahlreiche Gesteinskörnungen, die sich bis dato für Ingenieurbauten bewährt hatten, von einer Verwendung z. B. in Beton für Gründungsbauteile, Überbauten, Widerlager oder Pfeiler ausgeschlossen wurden, wurden in Bayern und Baden-Württemberg Sonderregelungen [64, 102, 65] getroffen. Diese basieren auf dem Sachstandsbericht des Centrums für Baustoffe und Materialprüfung München (cbm) zur „Festlegung von Frost-Tausalz-Anforderungen an Gesteinskörnungen nach ZTV-ING Teil 3, Abschnitt 3.1“ [66] und der entsprechenden Stellungnahme der MPA Universität Stuttgart [67], sowie der Tatsache, dass bisher bei der Verwendung von groben Gesteinskörnungen mit maximalen Abwitterungen von 25 M.-% im Frost-Tausalz-Versuch in Bayern und Baden-Württemberg offensichtlich keine gesteinskörnungsbedingten Frostschäden an Ingenieurbauwerken nachgewiesen werden konnten. Im Gegensatz zur bundesweiten Regelung, werden hier in Abhängigkeit von der Expositionsklasse unterschiedliche Anforderungen an Gesteinskörnungen für Beton gestellt. Gesteinskörnungen, die für Kappenbetone eingesetzt werden sollen, müssen einen

FTS-Wert von 5 M.-% einhalten. Für Betone der Expositionsklassen XF4 sind Gesteinskörnungen mit maximalen Abwitterungen von 8 M.-% im Dosenfrost mit Tausalz zugelassen. Sollen Gesteinskörnungen für XF2-Betonbauteile verwendet werden, darf die Abwitterung maximal 25 M.-% betragen. Kann eine Gesteinskörnung den Anforderungswert von maximal 8 M.-% (XF4) bzw. 25 M.-% (XF2) Abwitterung im Dosenfrostversuch nicht einhalten, so muss die Gebrauchstauglichkeit über einen Betonversuch nachgewiesen werden. Hierfür ist nur das CDF-Verfahren nach DIN EN 12390-9, Abschnitt 8 zulässig. Maßgebend für die Bewertung ist die relative Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln – bezogen auf einen Referenzbeton, der mit einer Gesteinskörnung mit maximalem FTS-Wert von 2 M.-% hergestellt wurde. Die Sonderregelung für Bayern und Baden-Württemberg ist innerhalb des Anwendungsbereiches der ZTV-ING in Abbildung 2-4 zusammengefasst.

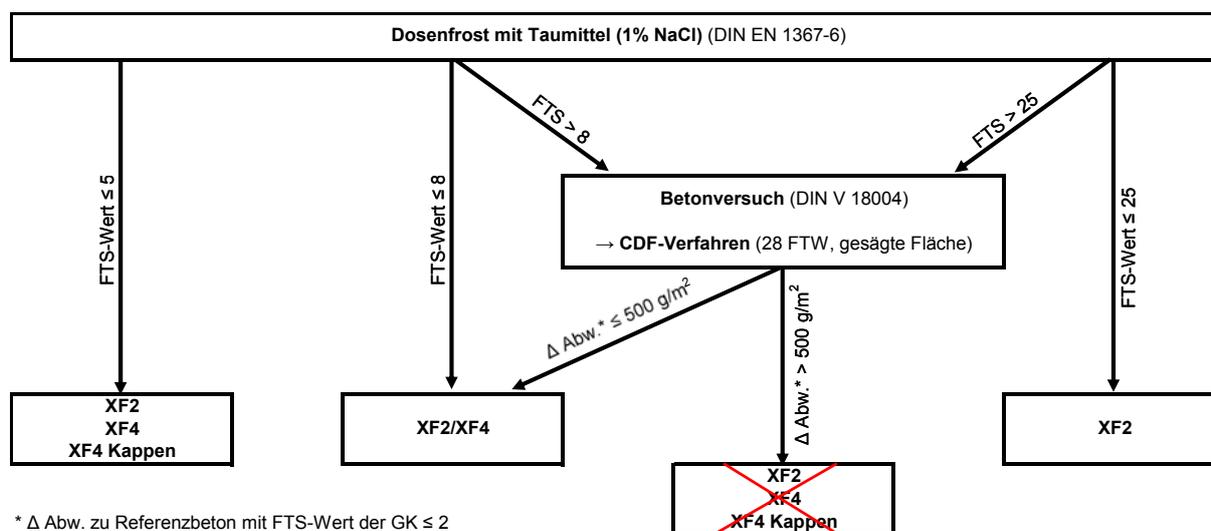


Abbildung 2-4: Anforderungen an den Widerstand von Gesteinskörnungen bei Frostbeanspruchung (mit Taumittel) in Abhängigkeit von der Expositionsklasse (Sonderregelung in Bayern und Baden-Württemberg für den Anwendungsbereich der ZTV-ING)

Zur Prüfung von Gesteinskörnungen für Straßenbeton sehen die TL Gestein-StB [30] als nationales Anwendungsdokument der ZTV Beton [28] und der TL Beton-StB [29] lediglich die Dosenfrostversuche (mit und ohne Taumittel) vor. Für den Unterbeton darf die Abwitterung im Frost-Tau-Wechsel-Versuch maximal 2 M.-% betragen, für den Oberbeton wird – je nach Klimazone – eine maximale Abwitterung im Frost-Tausalz-Versuch von 5 bzw. 8 M.-% gefordert. Betonversuche sind in diesem Anwendungsbereich nicht vorgesehen.

Anmerkung:

Bei der Beurteilung von Gesteinskörnungen anhand von Anforderungswerten ist – unabhängig vom Prüfkriterium – stets darauf zu achten, dass die ermittelten Messwerte und die Anforderungswerte die gleiche Genauigkeit (d. h. Anzahl an Dezimalstellen) aufweisen. Kriterien, die gemäß Prüfvorschrift genauer anzugeben sind, sind für die Beurteilung dementsprechend zu runden. Wird beispielsweise ein FTS-Wert ≤ 8 M.-% gefordert, so bedeutet dies, dass auch eine Gesteinskörnung mit einem FTS-Wert von 8,4 M.-% diese Anforderung erfüllt.

3 Untersuchungen zum Verhalten von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung

3.1 Untersuchungsprogramm

Um die verschiedenen Verfahren zur Charakterisierung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung umfassend bewerten zu können, wurden umfangreiche Untersuchungen gemäß Abbildung 3-1 durchgeführt [1-4]. Dabei wurde im Labor sowohl das Verhalten der isolierten Gesteinskörnungen, als auch der Gesteinskörnungen im Beton untersucht. Der Bezug zur Praxis wurde über Auslagerungsversuche und zusätzliche Bauwerksuntersuchungen hergestellt.

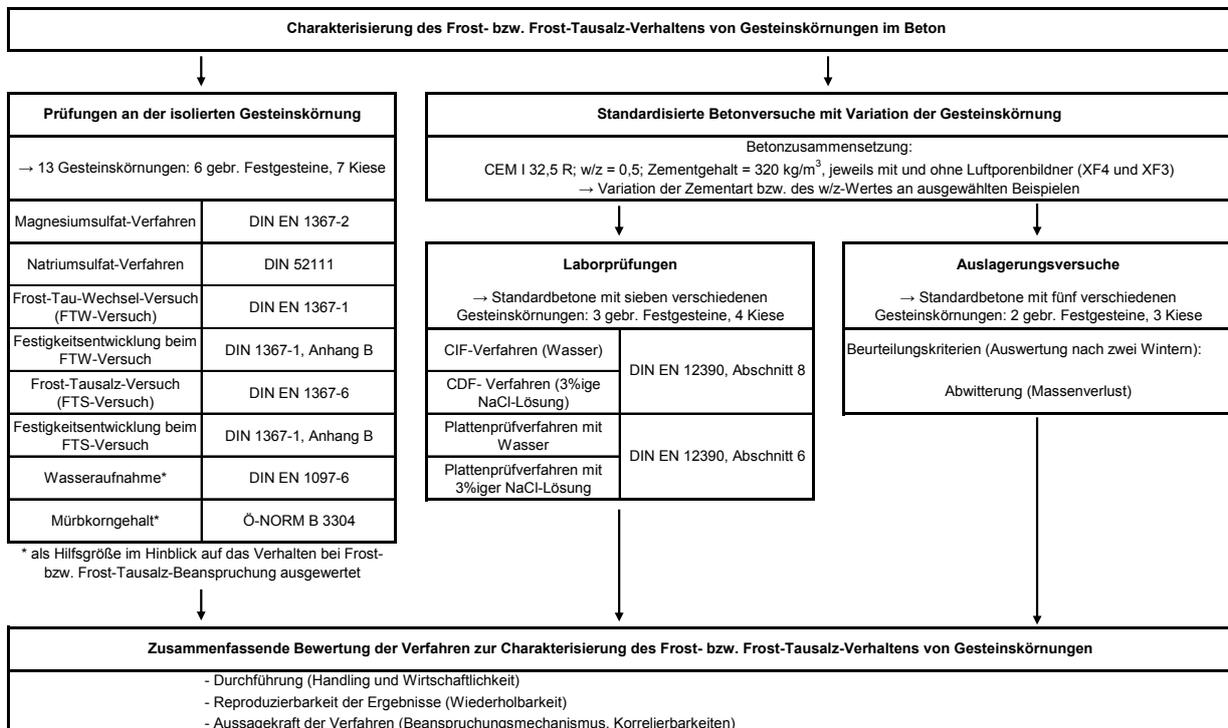


Abbildung 3-1: Untersuchungsprogramm zur Bewertung der verschiedenen Verfahren zur Charakterisierung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung

Prüfung an der isolierten Gesteinskörnung

Die Prüfungen an den isolierten Gesteinskörnungen erfolgten dabei an den 13 in Tabelle 3-1 aufgeführten Gesteinskörnungen (sechs gebrochene Festgesteine und sieben Kiese).

Festgesteine		Kiese	
F1	Basalt 1	K1	Rheinkies rund
F2	Quarzporphyr	K2	Rheinkies gebrochen
F3	Granit	K3	Referenz vdz
F4	Jurakalk	K4	Saalekies
F5	Muschelkalk 2	K5	Weserkies
F6	Muschelkalk 4	K6	Tertiärkies
		K7	Zorgekies

Tabelle 3-1: Zusammenstellung der untersuchten Gesteinskörnungen

Das Verhalten der Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung wurde einerseits durch Kristallisationsversuche mit Magnesium- bzw. Natriumsulfat und andererseits mit Frost-Tau-Wechsel- bzw. Frost-Tausalz-Versuchen (Dosenfrostversuche) sowie Untersuchungen der Festigkeitsentwicklung bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung geprüft. Daneben wurde untersucht, inwieweit sich die allgemeinen Kenngrößen Wasseraufnahme und Mürbkorngehalt zur Charakterisierung einer Gesteinskörnung hinsichtlich ihres Verhaltens bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung eignen.

Anhand von Untersuchungen an der Kornklasse 8/16 mm werden Rückschlüsse auf die Korrelierbarkeit der verschiedenen Verfahren und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gezogen. Mit dem Magnesiumsulfat-Verfahren, dem Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat, dem Frost-Tau-Wechsel-Versuch und dem Frost-Tausalz-Versuch werden dabei die gängigsten Verfahren berücksichtigt und ihre Zusammenhänge beleuchtet. Um auch die Streuung der Einzelwerte bei den verschiedenen Verfahren zu erfassen, wurden hierbei jeweils fünf (statt der geforderten drei) Einzelversuche angesetzt. Des Weiteren wurden die Ergebnisse der Frostprüfverfahren mit den Hilfsgrößen Wasseraufnahme und Mürbkorngehalt verglichen.

Darüber hinaus wurde durch Untersuchungen an der Kornklasse 8/12,5 mm die Festigkeitsentwicklung der Gesteinskörnungen beim Frost-Tau-Wechsel- und beim Frost-Tausalz-Versuch erfasst. Hierfür wurden die Schlagzertrümmerungswerte vor und nach dem Frost-Tau-Wechsel- bzw. Frost-Tausalz-Versuch bestimmt. Da auch der Mürbkorngehalt auf die Festigkeit einer Gesteinskörnung hinweist, wurde dieser zusätzlich ermittelt.

Zur Überprüfung, ob die Materialeigenschaften (insbesondere das Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung) der zu untersuchenden Gesteinskörnungen in den unterschiedlichen Lieferkörnungen vergleichbar sind bzw. ob die Prüfkornklasse 8/16 mm als repräsentativ anzusehen ist, wurden auch Frost-Tau-Wechsel- und Frost-Tausalz-Versuche an den Kornklassen 4/8 und 16/32 mm sowie 8/11; 11/16; 16/22 und 22/32 mm durchgeführt.

Ausgewertet werden bei den verschiedenen Verfahren größtenteils nicht nur die in der Prüfvorschrift geforderten Abwitterungen, sondern auch die vollständigen Korngrößenverteilungen nach den Beanspruchungen.

Standardisierte Betonversuche im Labor

Parallel zu den Untersuchungen an den isolierten Gesteinskörnungen wurden umfangreiche Betonuntersuchungen im Labor durchgeführt [3]. Diese werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit den Ergebnissen der Frostuntersuchungen an den isolierten Gesteinskörnungen verglichen. Mit dem CIF-/CDF-Verfahren und dem Plattenprüfverfahren beschränkt sich die Auswertung dabei auf die national gängigsten Laborverfahren (vgl. Kapitel 2.4.2.1).

Umfassende Betonuntersuchungen wurden unter Verwendung der sieben Gesteinskörnungen der Tabelle 3-2 durchgeführt (drei gebrochene Festgesteine und vier Kiese). Bei diesen Betonen wurde bei identischem Zement (CEM I 32,5 R), Wasserzementwert ($w/z = 0,50$) und Zementgehalt (320 kg/m^3) ausschließlich die Gesteinskörnung variiert. Alle Betone wurden sowohl für die Expositions-klasse XF3 (ohne Luftporenbildner) als auch für die Expositions-klasse XF4 (mit Luftporenbildner) konzipiert.

Festgesteine		Kiese	
F1	Basalt 1	K1	Rheinkies rund
F5	Muschelkalk 2	K2	Rheinkies gebrochen
F6	Muschelkalk 4	K4	Saalekies
		K7	Zorgekies

Tabelle 3-2: Zusammenstellung der Gesteinskörnungen für die Laboruntersuchungen an den Betonen (CEM I 32,5 R; $w/z = 0,50$; Zementgehalt = 320 kg/m^3 ; jeweils mit und ohne Luftporenbildner) [3]

Um auch den Einfluss der Betontechnologie auf das Frostverhalten von Beton zu erfassen, wurde an ausgewählten Betonen die Zementart bzw. der Wasserzementwert variiert (vgl. Tabelle 3-3 und 3-4).

Gesteinskörnung		w/z
F5	Muschelkalk 2	0,50
		0,55
K4	Saalekies	0,50
		0,55
K7	Zorgekies	0,50
		0,55

Tabelle 3-3: Varianten zur Untersuchung des Einflusses des Wasserzementwertes auf das Frostverhalten von Beton (CEM I 32,5 R; Zementgehalt = 320 kg/m^3 ; ohne Luftporenbildner) [3]

Gesteinskörnung		CEM
K1	Rheinkies rund	CEM I 32,5 R
		CEM III 42,5 N
K4	Saalekies	CEM I 32,5 R
		CEM III 42,5 N
K7	Zorgekies	CEM I 32,5 R
		CEM III 42,5 N

Tabelle 3-4: Varianten zur Untersuchung des Einflusses der Zementart auf das Frostverhalten von Beton ($w/z = 0,50$; Zementgehalt = 320 kg/m^3 ; jeweils ohne und mit Luftporenbildner) [3]

Zur vollständigen Beurteilung der Ergebnisse wurden auch die wichtigsten allgemeinen Kennwerte (Rohdichte, Druckfestigkeit, Wasseraufnahme und Porigkeit) der Betone ermittelt.

Auslagerungsversuche mit standardisierten Betonen

Vervollständigt werden die Untersuchungen von Gesteinskörnungen im Beton durch Auslagerungsversuche. Ausgelagert wurden hierbei fünf Betonvarianten, die sich ausschließlich durch die verwendete Gesteinskörnung unterscheiden (vgl. Tabelle 3-5) und auch labortechnisch eingehend untersucht wurden. Diese fünf Betonvarianten wurden u. a. als XF4-Betone (mit Luftporenbildnern) hergestellt und entsprechend ausgelagert. Als Standort wird der Autobahntunnel Farchant genutzt [4].

Festgesteine		Kiese	
F5	Muschelkalk 2	K1	Rheinkies rund
F6	Muschelkalk 4	K4	Saalekies
		K7	Zorgekies

Tabelle 3-5: Zusammenstellung der Varianten für die Auslagerungsversuche (CEM I 32,5 R; $w/z = 0,50$; Zementgehalt = 320 kg/m^3 ; mit Luftporenbildner) [4]

Zusätzlich wurden orientierend auch einzelne Betone ausgelagert, bei denen ein anderer Zement oder ein anderer Wasserzementwert gewählt wurde. So wurden unter Verwendung der Gesteinskörnung F5 einerseits Betonprobekörper mit einem Wasserzementwert von 0,50 und andererseits solche mit einem Wasserzementwert von 0,45 ausgelagert. Die Zementart wurde exemplarisch bei den Betonen mit der Gesteinskörnung K4 variiert (CEM I 32,5 R und CEM III 42,5 N).

Die Beurteilung der ausgelagerten Proben erfolgt nach jedem Winter. Dabei wird u. a. die Abwitterung volumetrisch und gravimetrisch bestimmt. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Daten handelt es sich um die Ergebnisse nach zwei Wintern Auslagerungsdauer.

Bauwerksbegutachtungen

Unabhängig von diesen Prüfungen der eigens hierfür hergestellten Betone, wurde das Verhalten von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung in der Praxis über die Begutachtung von Betonbauwerken überprüft [63]. Dabei wurde der Zustand von verschiedenen Bauteilen an insgesamt 33 Bauwerken (Brücken) unterschiedlichen Alters (1967-2007) erfasst. Bei den begutachteten Bauteilen handelte es sich um Widerlager, Pfeiler (XF2) und Kappen (XF4), von denen bekannt war, welche Gesteinskörnungen zur Herstellung verwendet wurden. Für die Auswertung der Ergebnisse wurde vorausgesetzt, dass die verwendeten Gesteinskörnungen den zum Zeitpunkt der Herstellung geltenden Anforderungen entsprochen, d. h. für die XF2-Bauteile maximal eine Abwitterung von 2 M.-% im Frost-Tau-Wechsel-Versuch nach DIN EN 1367-1 [21] aufgewiesen haben. Dies entspricht dem Anforderungswert an Gesteinskörnungen nach DIN 4226-1 [59], die bis zur Einführung der europäischen Normung maßgebend war. Um für Kappen verwendet werden zu können, durften Gesteinskörnungen maximal 5 M.-% Abwitterung im Frost-Tausalz-Versuch nach DIN EN 1367-6 [23] aufweisen. Die Kenntnis, ob die bisher verwendeten Materialien den Anforderungen im Bauwerk genügen oder ob Frostschäden auftreten, die sich auf die verwendeten Gesteinskörnungen zurückführen lassen, dient direkt der Beurteilung der ehemaligen und indirekt der Beurteilung der aktuellen Anforderungsniveaus.

3.2 Untersuchungsergebnisse

3.2.1 Untersuchungen an Gesteinskörnungen

3.2.1.1 Allgemeine Untersuchungen

Die 13 Materialien wurden anhand der Bestimmung der petrographischen Zusammensetzung (DIN EN 932-3 [24]), der Kornform (DIN EN 933-3 [43] und DIN EN 933-4 [44]), der Rohdichte und der Wasseraufnahme (WA) (DIN EN 1097-6 [6]), des Schlagzertrümmerungswertes (SZ) (DIN EN 1097-2 [33]) und des Mürbkorngehaltes (MK-Gehalt) (zurückgezogene Ö-NORM B 3304 [10]) allgemein charakterisiert. Um Aussagen über die Gleichmäßigkeit des Materials treffen zu können, wurden die Kornform, die Rohdichte und die Wasseraufnahme an sämtlichen Lieferkörnungen (4/8, 8/16 und 16/32 mm) ermittelt. Die Wasseraufnahme und der Mürbkorngehalt wurden auch als mögliche Hilfsgrößen zur Charakterisierung von Gesteinskörnungen im Hinblick auf ihr Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung ausgewertet.

Die Ergebnisse der allgemeinen Untersuchungen der Gesteinskörnungen sind der vorliegenden Arbeit im Anhang I (Tabellen AI-1 bis AI-6, Abbildungen AI-1 und AI-2) beigefügt.

3.2.1.2 Frostprüfverfahren an den Gesteinskörnungen

Neben den allgemeinen Untersuchungen wurden an den 13 Gesteinskörnungen einerseits Kristallisationsversuche mit Magnesium- und Natriumsulfat und andererseits Dosenfrostversuche mit und ohne Tausalz (Frost-Tau-Wechsel- und Frost-Tausalz-Versuch) durchgeführt und bewertet. Neben den Abplitterungen wurde bei allen Verfahren zusätzlich überprüft, inwieweit sich die Beanspruchungen insgesamt auf die Korngrößenverteilung auswirken. Hierfür wurde diese sowohl vor, als auch nach der Beanspruchung bestimmt und über eine Körnungsziffer miteinander verglichen (alternative Aus-

wertung). Die ermittelten Ergebnisse der Frostuntersuchungen an den Gesteinskörnungen sind vollständig im Anhang I aufgeführt, im Text wird lediglich auf die wichtigsten Erkenntnisse hingewiesen.

Magnesiumsulfat-Verfahren (MS-Verfahren)

Das Magnesiumsulfat-Verfahren wurde nach DIN EN 1367-2 [22] an der Prüfkornklasse 10/14 mm durchgeführt. Der Magnesiumsulfatwert (MS-Wert) einer Gesteinskörnung entspricht dem Mittelwert aus jeweils fünf Einzelversuchen. Die Ergebnisse des Magnesiumsulfat-Verfahrens sind im Anhang I graphisch und tabellarisch aufgeführt (Tabelle AI-7, Abbildungen AI-3 und AI-4).

Über den erzielten Wertebereich (1,4 - 37,6 M.-%) konnte nachgewiesen werden, dass Gesteinskörnungen durch das Magnesiumsulfat-Verfahren gut differenziert werden können. Gleichzeitig weist die starke Streuung der Einzelwerte auf eine geringe Wiederholbarkeit des Verfahrens hin. Dabei deutet sich an, dass sich minimal veränderte Rahmenbedingungen (z. B. Temperatur, Magnesiumsulfat-Lösung) stark auf die Ergebnisse auswirken.

Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat (NS-Verfahren)

Die Bestimmung des Widerstandes gegen Natriumsulfat (NS-Wert) erfolgte nach DIN 52111 [31]. Dabei wurde der NS-Wert analog zum Magnesiumsulfat-Verfahren an der Kornklasse 10/14 mm ermittelt, um beide Verfahren möglichst gut miteinander vergleichen zu können. Auch hier wurden fünf Einzelversuche angesetzt. Im Anhang I (Tabelle AI-8, Abbildungen AI-5 und AI-6) sind die ermittelten NS-Werte tabellarisch und graphisch zusammengefasst.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat mit einem Wertebereich von 0,4 und 6,6 M.-% weniger gut differenziert als das Magnesiumsulfat-Verfahren. Die Einzelwerte bei fünf Messproben streuen, wie auch beim Magnesiumsulfat-Verfahren, deutlich (z. B. zwischen 2,5 und 7,2 M.-% bei K4 oder zwischen 2,9 und 6,2 M.-% bei F5). Dies kann als Hinweis auf eine geringe Wiederholbarkeit des Verfahrens gedeutet werden.

Frost-Tau-Wechsel-Versuch (FTW-Versuch)

Der Frost-Tau-Wechsel-Versuch wurde nach DIN EN 1367-1 [21] an den Kornklassen 4/8, 8/16, 16/32, 8/11, 8/12,5, 11/16, 16/22 und 22/32 mm durchgeführt. Bei der Prüfkornklasse 8/16 mm wurde die Anzahl der Einzelversuche von drei auf fünf erhöht, um auch Aussagen zur Streuung der Einzelwerte treffen zu können. Alle Ergebnisse (FTW-Werte) sind tabellarisch im Anhang I (Tabellen AI-9 a-c) zusammengefasst. Ausgewählte Ergebnisse sind auch graphisch dargestellt (Abbildung AI-7: Vergleich der FTW-Werte der fünf Einzelversuche der Kornklasse 8/16 mm; Abbildung AI-8: Vergleich der FTW-Werte der Körnungen 4/8, 8/16 und 16/32 mm; Abbildung AI-9: Vergleich der FTW-Werte der Kornklassen 8/11 und 11/16 mm mit denjenigen der weiter gefassten Kornklasse 8/16 mm).

Die Tatsache, dass die FTW-Werte aller untersuchten Gesteinskörnungen innerhalb eines relativ engen Wertebereiches (0,1 - 4,0 M.-%) liegen, weist auf eine geringere Differenzierung des Frost-Tau-Wechsel-Versuches hin. Eine gute Wiederholbarkeit des Verfahrens scheint gegeben zu sein. Dies lässt sich aus dem Vergleich der FTW-Werte der fünf Einzelversuche folgern, welche bei nahezu allen Proben vergleichsweise dicht beieinander liegen.

Eine allgemeingültige Tendenz bezüglich einer Korngrößenabhängigkeit des FTW-Wertes konnte aus dem Vergleich der FTW-Werte der verschiedenen Lieferkornklassen nicht abgeleitet werden. Da die Versuchsergebnisse der Prüfkornklasse 8/16 mm in der Regel gut mit dem Mittel über alle Kornklassen übereinstimmen, ist es begründbar, sich auf diese Prüfkornklasse zu einigen.

Frost-Tausalz-Versuch (FTS-Versuch)

Der Frost-Tausalz-Versuch wurde nach DIN EN 1367-6 [23] durchgeführt. Es wurde der Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung (FTS-Werte) der Kornklassen 4/8, 16/32, 8/11, 8/12,5, 11/16, 16/22 und 22/32 mm als Mittelwert aus drei Einzelversuchen bestimmt. Um eine Aussage bezüglich der Streuung der Einzelversuche bei diesem Verfahren zu ermöglichen, wurde bei der Kornklasse 8/16 mm die Anzahl an Einzelversuchen auf fünf erhöht. Alle Ergebnisse sind tabellarisch im Anhang I (Tabellen AI-10 a-c) zusammengefasst. Ausgewählte Ergebnisse sind auch graphisch dargestellt (Abbildung AI-10: Vergleich der FTS-Werte der fünf Einzelversuche der Kornklasse 8/16 mm; Abbildung AI-11: Vergleich der FTS-Werte der Körnungen 4/8, 8/16 und 16/32 mm; Abbildung AI-12: Vergleich der FTS-Werte der Kornklassen 8/11 und 11/16 mm mit denjenigen der weiter gefassten Kornklasse 8/16 mm).

Die Ergebnisse belegen, dass der Frost-Tausalz-Versuch mit einer Spreizung der FTS-Werte von 0,3 bis 52,8 M.-% sehr gut differenziert. Wie die FTS-Werte der Einzelversuche zeigen, lassen sich die Ergebnisse des Frost-Tausalz-Versuches darüber hinaus auch gut reproduzieren. So weichen die Einzelwerte in der Regel nur geringfügig vom Mittelwert ab. Vergleicht man die Streuung der Einzelwerte mit denjenigen der übrigen Frostprüfverfahren an den Gesteinskörnungen, so zeichnet sich der Frost-Tausalz-Versuch eindeutig durch die beste Wiederholpräzision aus.

Weder der Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Lieferkörnungen 4/8, 8/16 und 16/32 mm noch der Vergleich der Kornklassen 8/11, 11/16 mit 8/16 und 16/22, 22/32 mit 16/32 mm ermöglicht eine allgemeingültige Aussage im Hinblick auf eine mögliche Korngrößenabhängigkeit des Verfahrens. Wie schon beim Frost-Tau-Wechsel-Versuch stimmt der Mittelwert der Kornklasse 8/16 mm bei den untersuchten Gesteinskörnungen aber gut mit Mittel über alle Kornklassen überein. Damit kann die Prüfkornklasse 8/16 mm als geeignete Prüfkornklasse gewertet werden.

Festigkeitsentwicklung der Gesteinskörnungen beim Frost-Tau-Wechsel- bzw. Frost-Tausalz-Versuch

Die Festigkeitsentwicklung der Gesteinskörnungen beim Frost-Tau-Wechsel- bzw. Frost-Tausalz-Versuch wurde an der Prüfkornklasse 8/12,5 mm gemäß DIN EN 1367-1 Anhang B [32] bestimmt. Dabei wird der Schlagzertrümmerungswert (SZ) nach DIN EN 1097-2 [33] vor und nach dem Frost-Tau-Wechsel- bzw. dem Frost-Tausalz-Versuch bestimmt und beide Werte jeweils miteinander verglichen. Im Anhang I sind die SZ-Änderungen durch den Frost-Tau-Wechsel- (ΔSZ_{FTW}) bzw. den Frost-Tausalz-Versuch (ΔSZ_{FTS}) graphisch dargestellt und die zugehörigen Werte tabellarisch zusammengefasst (Tabelle AI-11, Abbildung AI-13).

Da das Material durch die Frost-Tau-Wechsel- bzw. Frost-Tausalz-Versuche beansprucht wird, ist im Normalfall eine Abnahme der Festigkeit zu erwarten, welche sich in einer Zunahme der Schlagzertrümmerungswerte – also in positiven ΔSZ – äußern müsste. Beim Frost-Tau-Wechsel-Versuch ist dies in neun von 13 Fällen so. Zweimal (K3 und F1) konnten nahezu keine Unterschiede zwischen

den Festigkeiten vor und nach Versuchsdurchführung festgestellt werden und bei K5 und F5 wurden sogar am beanspruchten Material bessere Schlagzertrümmerungswerte ermittelt. Ähnlich fällt die Bilanz auch beim Frost-Tausalz-Versuch aus. Hierbei konnte elfmal ein Festigkeitsverlust festgestellt werden, während in zwei Fällen (K6 und F1) das Material durch die Prüfung an Festigkeit gewonnen zu haben scheint. Die scheinbaren Verbesserungen bezüglich des Widerstandes gegen Zertrümmerung lassen sich dadurch erklären, dass beim Schlagversuch nach dem Frost-Tau-Wechsel- bzw. Frost-Tausalz-Versuch mit der definierten Prüfkörnung 8/12,5 mm vor allem Material geprüft wird, welches sich beim Frost-Tau-Wechsel- bzw. Frost-Tausalz-Versuch als „gut“ herausgestellt hat. „Schwaches Material“, das bei der Schlagprüfung des Ausgangsmaterials mit enthalten war, wird durch die Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung zerstört, so dass sich dieses in der Regel in der „Abwitterung“ wiederfindet und daher beim Schlagversuch nach der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung nicht miterfasst wird.

Insgesamt konnten nur geringe Veränderungen der Festigkeit durch die Dosenfrostversuche festgestellt werden, die häufig noch innerhalb des Streubereiches des Schlagversuches liegen. Tendenziell bewirkt eine Frost-Tausalz-Beanspruchung höhere prozentuale Festigkeitsverluste als die reine Frostbeanspruchung. Demnach konnte bestätigt werden, dass die Verwendung von Tausalz eine Verschärfung der Frostbeanspruchung bewirkt (vgl. Kapitel 2.1 und 2.2.2.2).

Alternative Auswertung mittels der Korngrößenverteilung (Körnungsziffer)

Die umfangreichere Auswertung mittels einer Körnungsziffer liefert bei den verschiedenen Verfahren vergleichbare Ergebnisse, so dass die bisherige Auswertung zur Charakterisierung des Verhaltens bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung über die Abwitterung als zweckmäßig zu erachten ist (vgl. Anhang I Tabellen AI-12 a, b).

3.2.1.3 Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Frostprüfverfahren an den Gesteinskörnungen

Anhand der Untersuchungsergebnisse der Kornklasse 8/16 mm (bzw. 10/14 mm bei den Kristallisationsversuchen) werden einerseits die Zusammenhänge zwischen den Hilfsgrößen (WA, MK-Gehalt) und den Ergebnissen der Frostprüfverfahren (Kristallisationsversuche mit Natrium- bzw. Magnesiumsulfat und den Frost-Tau-Wechsel-Versuchen mit und ohne Tausalz) sowie andererseits die Zusammenhänge zwischen den Frostprüfverfahren untereinander beleuchtet. Des Weiteren wird an der Prüfkörnung für den Schlagversuch (8/12,5 mm) der Vergleich der Dosenfrostergebnisse mit und ohne Tausalz mit der dadurch bedingten Festigkeitsentwicklung gezogen. Da der Mürbkornversuch und der Schlagversuch prinzipiell ähnliche Ansätze verfolgen, werden auch die Ergebnisse dieser beiden Versuche miteinander verglichen. Abschließend wird der Zusammenhang zwischen Frost-Tausalz- und Frost-Tau-Wechsel-Versuch – unter Berücksichtigung aller Kornklassen – aufgezeigt.

Die grundlegenden Daten und Diagramme zu den Korrelationsbetrachtungen sind im Anhang I aufgeführt (Abbildungen AI-14 bis AI-17, Tabellen AI-13 bis AI-17). Die wichtigsten Erkenntnisse sind im Folgenden kurz zusammengefasst:

- Zwischen den Hilfsgrößen Wasseraufnahme bzw. Mürbkorngehalt einerseits und den Frostprüfverfahren andererseits konnten keine direkten Zusammenhänge nachgewiesen werden. Gleichzeitig zeigte sich jedoch auch, dass es sich bei diesen beiden Hilfsgrößen um wichtige Einflussfaktoren im Hinblick auf das Verhalten von Gesteinskörnungen unter Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung handelt, die im Einzelfall – beispielsweise im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle – durchaus zur Abschätzung des Verhaltens einer Gesteinskörnung bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung geeignet sein können.
- Vergleicht man die Ergebnisse der verschiedenen Frostprüfverfahren, so ergeben sich bestenfalls mäßige Zusammenhänge. Bei einer getrennten Betrachtung von Kiesen und gebrochenen Festgesteinen werden die Zusammenhänge deutlicher. Daneben deutet sich an, dass es bei der Beurteilung der Versuchsergebnisse die petrographische Zusammensetzung einer Gesteinskörnung zu berücksichtigen gilt. Dies lässt sich aus der Tatsache ableiten, dass Karbonate bei den Kristallisationsversuchen (insbesondere beim Magnesiumsulfat-Verfahren) deutlich besser abschneiden als beim Frost-Tausalz-Versuch (vgl. Kapitel 2.4.1.1).
- Wie der Vergleich der Festigkeitsänderungen (SZ-Änderung) mit den zugehörigen Abwitterungsmengen (FTW-Wert bzw. FTS-Wert) zeigt, besteht zwischen der Abwitterung und der Gefügeänderung (Festigkeitsänderung) beim Frost-Tau-Wechsel- bzw. Frost-Tausalz-Versuch kein direkter Zusammenhang – auch nicht, wenn man Kiese und gebrochene Festgesteine getrennt betrachtet (vgl. Anhang I Tabellen AI-15 und AI-16, Abbildung AI-16). Demnach handelt es sich bei Abwitterung und Festigkeitsänderung um zwei voneinander unabhängige Auswirkungen der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung, die beide bei einer vollständigen Charakterisierung einer Gesteinskörnung hinsichtlich ihres Verhaltens bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung berücksichtigt werden müssen (vgl. Kapitel 2.4.2.2).
- Korreliert man die Ergebnisse des Schlagversuches (SZ) mit den MK-Gehalten, so erhält man für die Kornklasse 8/12,5 mm ein Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,48$. Betrachtet man nur die gebrochenen Festgesteine, so ergibt sich sogar ein Wert von 0,86. Mit 0,09 deutlich schlechter ist dagegen der Zusammenhang bei den Kiesen. Dies könnte u. a. auf die größere Inhomogenität in den Kiesen zurückzuführen sein. Insgesamt hängen beide Verfahren – in Anbetracht der Tatsache, dass der MK-Gehalt in seiner Ausführung und Auswertung noch verbesserungsfähig ist – sehr gut zusammen (vgl. Anhang I Abbildung AI-17).
- Frost-Tau-Wechsel- und Frost-Tausalz-Versuch wurden an zahlreichen Körnungen durchgeführt. Die insgesamt sehr niedrigen Bestimmtheitsmaße ($\leq 0,41$) (vgl. Anhang I Tabelle AI-17) bestätigen die Vermutung, dass bei beiden Verfahren unterschiedliche Materialeigenschaften geprüft werden (vgl. Kapitel 2.4.1.2). Bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung wirken unterschiedliche Mechanismen, die sich bei verschiedenen Gesteinen zudem unterschiedlich auswirken. So gibt es Gesteinskörnungen, die als widerstandsfähig gegenüber Frostbeanspruchung gelten, unter Taumittleinfluss jedoch diese Eigenschaft verlieren.

3.2.2 Laboruntersuchungen an Betonen

3.2.2.1 Allgemeine Untersuchungen

Die wichtigsten allgemeinen Kennwerte (Rohdichte, Druckfestigkeit, Wasseraufnahme, Porosität) der herangezogenen Betone sind im Anhang I aufgeführt (Tabellen AI-18 und AI-19).

3.2.2.2 Frostprüfverfahren am Beton (Labor)

Grundlegend für die Auswertung im Rahmen dieser Arbeit sind v. a. die Ergebnisse der Frostprüfungen an standardisierten Betonen, bei denen lediglich die Gesteinskörnung variiert wurde. Betrachtet werden dabei mit dem CIF-/CDF-Verfahren und den Plattenprüfverfahren (mit Wasser und 3%iger NaCl-Lösung) nach DIN EN 12390-9 [36] die derzeit gängigsten Verfahren, wobei unterschiedliche Versuchsvarianten – im Hinblick auf die Prüffläche (gesägt bzw. geschalt), die Auswertung (Abwitterung bzw. relativer dynamischer E-Modul) und die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (28 bzw. 56) – berücksichtigt werden. Ergebnisse hiervon liegen für sieben der detailliert untersuchten Gesteinskörnungen vor (K1, K2, K4, K7, F1; F5, F6), wobei sowohl Versuchsreihen für die Exposition XF3 als auch für die Exposition XF4 gefahren wurden. Für beide Versuchsreihen wurde zur Herstellung ein Zement CEM I 32,5 R bei einem Zementgehalt von 320 kg/m^3 und einem Wasserzementwert von 0,5 verwendet, den XF4-Betonen wurde aber ein Luftporenbildner zugegeben. Darüber hinaus wird an ausgewählten Beispielen durch Variation des Wasserzementwertes bzw. der Zementart (bei identischer Gesteinskörnung) auch der betontechnologische Einfluss betrachtet. Die Datengrundlage für die folgende Auswertung stammt aus [3] und ist im Anhang I (Tabellen AI-20, AI-21 und AI-24 bis AI-26) enthalten.

3.2.2.3 Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Frostprüfverfahren an standardisierten Betonen

Vergleicht man die Ergebnisse der verschiedenen Frostprüfverfahren an standardisierten Betonen, so ergibt sich für das CIF-Verfahren und das Plattenprüfverfahren mit Wasser genauso wie für das CDF-Verfahren und das Plattenprüfverfahren mit 3%iger NaCl-Lösung ein mäßiger Zusammenhang (vgl. Anhang I Abbildung AI-18). Obwohl hier nur die Gesteinskörnung variiert wurde, liegen die Bestimmtheitsmaße lediglich bei 0,50 bzw. 0,66. Daneben weisen Betone, die eine hohe Abwitterung bei dem einen Verfahren haben, nicht zwangsläufig auch hohe Abwitterungen im jeweils anderen Verfahren auf. Demnach konnten die Beobachtungen von MANNS & AL. [8] bestätigt werden (vgl. Kapitel 2.4.2.2). Vermutlich wirken bei beiden Verfahren durch die unterschiedliche Beanspruchungsart und -intensität differierende Mechanismen, die sich in Abhängigkeit vom Beton unterschiedlich äußern. Auch hier besteht folglich die Gefahr, dass Betone – je nach dem gewählten Prüfverfahren – unterschiedlich bewertet werden. Um dies zu vermeiden, ist es erstrebenswert, sich zukünftig auf ein Verfahren zu einigen. Hierbei ist das Verfahren zu bevorzugen, welches die Ergebnisse der tatsächlichen Beanspruchung am besten widerspiegelt.

3.2.2.4 Zusammenhänge zwischen den Frostprüfverfahren an den isolierten Gesteinskörnungen und den Frostprüfverfahren an standardisierten Betonen

Die Zusammenhänge, die man erhält, wenn man die Ergebnisse der Betonversuche mit den Ergebnissen der Frostprüfungen an den Gesteinskörnungen korreliert, sind tabellarisch im Anhang I (Tabellen AI-22 und AI-23) aufgeführt. Ausgewählte Beispiele sind auch graphisch dargestellt (Abbildungen AI-19 bis AI-21). Nachstehend sind die wichtigsten Erkenntnisse kurz zusammengefasst:

- Der Vergleich der denkbaren Hilfsgrößen Wasseraufnahme und Mürbkorngehalt mit den Ergebnissen der verschiedenen Frostprüfungen am Beton (hier: CIF-/CDF-Verfahren, Plattenprüfverfahren mit oder ohne Taumittel, gesägte Prüffläche, 56 Frost-Tau-Wechsel) zeigt keine direkten Zusammenhänge (vgl. Anhang I Abbildung AI-19). Folglich ist es allein anhand der Hilfsgrößen Wasseraufnahme oder Mürbkorngehalt offensichtlich nicht möglich, auf das Frost- bzw. Frost-Tausalz-Verhalten von Gesteinskörnungen im Betonversuch zu schließen.
- Ähnliches gilt auch für den Zusammenhang zwischen der direkten Frostprüfung von isolierten Gesteinskörnungen (FTW-Versuch) und der Prüfung von Gesteinskörnungen im Beton (hier: CIF-Verfahren nach 56 Frost-Tau-Wechseln mit gesägter Prüffläche und Plattenprüfverfahren nach 56 Frost-Tau-Wechseln mit gesägter Prüffläche), wenn Wasser das Prüfmedium darstellt (vgl. Anhang I Abbildung AI-20). Egal ob man die Abwitterung oder die Festigkeitsänderung beim Frost-Tau-Wechsel-Versuch betrachtet, lässt sich ein eindeutiger Zusammenhang zu den Kenngrößen der Betonversuche (Abwitterung, relativer dynamischer E-Modul) nicht feststellen. Am besten korrelieren mit FTW-Wert und dem relativen dynamischen E-Modul zwei Kennwerte, die unterschiedliche Auswirkungen der Befrostung erfassen (Abwitterung bzw. innere Schädigung).
- Deutlich bessere Zusammenhänge zeigen sich im Hinblick auf die Frostprüfungen mit Taumittelbeaufschlagung (vgl. Anhang I Abbildung AI-21). Insbesondere die Ergebnisse des Frost-Tausalz-Versuches und des CDF-Verfahrens stimmen mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,95 gut überein. Korreliert man den FTS-Wert mit der Abwitterung beim Plattenprüfverfahren, so erhält man noch ein Bestimmtheitsmaß von 0,73. Der Zusammenhang von den Kristallisationsversuchen zu den entsprechenden Betonversuchen ist hingegen deutlich geringer.

Zusammenfassend spiegelt im Hinblick auf die Frostprüfung mit Wasser weder die Festigkeitsentwicklung, noch die Abwitterung beim Frost-Tau-Wechsel-Versuch das Verhalten von Gesteinskörnungen im standardisierten Betonversuch wider. Beim FTS-Wert handelt es sich hingegen offensichtlich um eine aussagekräftige Kenngröße zur Charakterisierung des Verhaltens von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost-Tausalz-Beanspruchung. Die Kristallisationsversuche scheinen hierfür weniger geeignet. Diese Ergebnisse entsprechen dem derzeitigen Kenntnisstand (vgl. Kapitel 2.4.1.1).

3.2.2.5 Untersuchungen zum Einfluss der Betonrezeptur

Neben den Untersuchungen zum Einfluss der Gesteinskörnung auf das Frost- bzw. Frost-Tausalz-Verhalten von Beton wird an vereinzelt Proben auch der Einfluss der Betonrezeptur dargestellt. Hierfür wurden einerseits mit drei verschiedenen Gesteinskörnungen (K1, K4, K7) Betone hergestellt und vergleichend untersucht, die sich nur durch die Zementart (CEM I 32,5 R und CEM III 42,5 N) un-

terscheiden, andererseits wurde bei ansonsten identischer Zusammensetzung lediglich der Wasserzementwert ($w/z = 0,50$ bzw. $0,55$) variiert. Die diesbezüglich für diese Arbeit herangezogenen Grundlagen sind im Anhang I (Tabellen AI-24 bis AI-26) tabellarisch aufgeführt und graphisch (Abbildungen AI-22 und AI-23) dargestellt. Zusammenfassend konnten im Hinblick auf den Einfluss der Betonrezeptur (Zementart, w/z) die folgenden Erkenntnisse gewonnen werden:

- Durch Variation der Zementart wird bestätigt, dass der Zement einen großen Einfluss auf die Ergebnisse der Frostuntersuchungen am Beton ausübt [vgl. z. B. 13, 50, 92-94]. So unterscheiden sich die Untersuchungsergebnisse bei Betonen mit lediglich unterschiedlichen Zementarten in der Regel stärker, als bei Betonen, bei denen ausschließlich die Gesteinskörnung variiert werden (vgl. Anhang I Abbildung AI-22). Betrachtet man des Weiteren beispielsweise die Abwitterungen nach 56 Frost-Tau-Wechseln beim CIF-Verfahren (gesägte Prüffläche), so erhält man unter Verwendung von CEM III 42,5 N, unabhängig von der verwendeten Gesteinskörnung, nahezu identische Werte. Ähnliches gilt auch für die Bestimmung des relativen dynamischen E-Moduls unter Verwendung des CEM I 32,5 R oder im Hinblick auf die Abwitterung nach 56 Frost-Tau-Wechseln beim Plattenprüfverfahren mit CEM III 42,5 N. Differenzierende Ergebnisse liefern die Untersuchungen hier hingegen unter Verwendung des CEM I 32,5 im Hinblick auf die Abwitterung. Darüber hinaus fällt auf, dass sich Gesteinskörnungen im Beton je nach Zementart unter Frostbeanspruchung unterschiedlich verhalten. So weist beispielsweise der Beton mit K4 sowohl beim CIF-Verfahren als auch beim Plattenprüfverfahren mit Wasser unter Verwendung von CEM I 32,5 R die höchsten Abwitterungen der drei untersuchten Betone auf, während bei den Betonen mit CEM III 42,5 N derjenige mit K4 die geringsten Abwitterungen zeigt.
- Durch die Untersuchungsergebnisse an Betonen mit variablen Wasserzementwerten kann der große Einfluss der Betonzusammensetzung auf das Verhalten von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung bestätigt werden [vgl. z. B. 13, 50, 92-94]. So wirkt sich eine Veränderung des Wasserzementwertes deutlich auf die Ergebnisse der Frostuntersuchungen an Betonen aus, wobei hier kein allgemein gültiger direkter Zusammenhang zwischen dem Wasserzementwert der Betone und den Kenngrößen der Frostversuche erkennbar ist. Besonders deutlich wird dies bei den Abwitterungen im CIF-Verfahren nach 56 Frost-Tau-Wechseln (vgl. Anhang I Abbildung AI-23): Während sich beim Beton mit K7 die Erhöhung des Wasserzementwertes von $0,50$ auf $0,55$ in einer Verringerung der Abwitterung äußert, wirkt sich der höhere Wasserzementwert bei den Betonen mit F5 bzw. K4 negativ aus. Ursächlich für die teilweise widersprüchlichen Ergebnisse könnten betontechnologische Aspekte sein (z. B. unterschiedliche Verdichtungsgrade der Betone).

Wie bereits u. a. von HEINE [50] beschrieben, scheinen die betontechnologischen Parameter von entscheidender Bedeutung für den Frostwiderstand von Beton zu sein. Dabei geht HEINE davon aus, dass der Einfluss der Gesteinskörnung in Betonen mit einer „guten Matrix“ vergleichsweise gering ist, während eine qualitativ hochwertige Gesteinskörnung in einer „schlechten Matrix“ nicht viel bewirkt.

Aus der Tatsache, dass sich Gesteinskörnungen im Beton in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung teilweise unterschiedlich verhalten, ist zu folgern, dass Betonversuche mit standardisierten Zusammensetzungen nicht zielführend sind. Um das tatsächliche Verhalten von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung beschreiben zu können, ist es stattdessen notwendig, Betonversuche mit der in der Praxis verwendeten Zusammensetzung zu fahren.

3.2.3 Untersuchungen zum Praxisverhalten

3.2.3.1 Auslagerungsversuche

Der Bezug zwischen dem Praxisverhalten von Gesteinskörnungen im Beton zu den Ergebnissen aus den Laborversuchen kann beispielsweise über Auslagerungsversuche hergestellt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit herangezogenen Ergebnisse sind im Anhang I (Tabelle AI-27) tabellarisch zusammengefasst [4]. Ausgewählte Aspekte wurden auch graphisch dargestellt (Abbildungen AI-24 bis AI-27). Bei den verwendeten Daten handelt es sich um die bis dato vorliegenden Abwitterungen der Probekörper nach zwei Jahren Auslagerungsdauer. Frostschäden im Beton treten üblicherweise zwar erst nach mehreren Wintern auf, erste Tendenzen deuten sich aber auch nach zwei Wintern schon an.

Unabhängig von der verwendeten Gesteinskörnung (K1, K4, K7, F5, F6) sind bei allen Probekörpern, die mit CEM I 32,5 R, w/z = 0,50 hergestellt und unter XF4-Bedingungen ausgelagert wurden, die Abwitterungen nach zwei Wintern vernachlässigbar gering (vgl. Anhang I Abbildung AI-24). Erste relevante Veränderungen zeigen sich jedoch bei den Probekörpern, bei welchen die Betonzusammensetzung variiert wurde. Insbesondere der Beton mit CEM III 42,5 N fällt gegenüber dem ansonsten identisch zusammengesetzten Beton mit CEM I 32,5 R deutlich ab. Bei den Probekörpern mit unterschiedlichen Wasserzementwerten (CEM I 32,5 R unter Verwendung der Gesteinskörnung F5; w/z = 0,45 bzw. 0,50) sind die Abwitterungen hingegen bislang noch zu gering, um Tendenzen ableiten zu können.

Zusammenfassend deutet sich in den Auslagerungsversuchen – wie schon in den Laborversuche – an, dass die „richtige Betonrezeptur“ (z. B. Zementart, w/z) entscheidender für das Frostverhalten eines Betons ist, als die verwendete Gesteinskörnung – eine gewisse Qualität der Gesteinskörnung vorausgesetzt. Da die Ergebnisse nach zwei Jahren Auslagerungsdauer noch nicht eindeutig genug sind, eine solch weitreichende Aussage zu treffen, bedarf es unbedingt der Überprüfung dieser These über die späteren Ergebnisse der Auslagerungsversuche.

Die insgesamt noch sehr geringe Differenzierung der Ergebnisse nach zwei Jahren Auslagerungsdauer – insbesondere im Hinblick auf den Einfluss der Gesteinskörnung – und die geringe Anzahl an parallelisierbaren Versuchen, schränken die Aussagekraft von vergleichenden Betrachtungen mit den Prüfergebnissen an den Gesteinskörnungen sowie den Laboruntersuchungen der Betone ein. Die ermittelten Zusammenhänge sind im Anhang I (Abbildung AI-25 bis AI-27) dargestellt, stichhaltige Rückschlüsse lässt die Korrelationsbetrachtung noch nicht zu.

3.2.3.2 Bauwerksbegutachtung

Um einen aussagekräftigen Bezug zwischen den Ergebnissen aus den Laborversuchen und dem Praxisverhalten von Betonen herstellen zu können, wurde der Zustand von Bauteilen an insgesamt 33 Bauwerken (Brücken) unterschiedlichen Alters (1967-2007) begutachtet. Betrachtet wurden Widerlager, Pfeiler (XF2) und Kappen (XF4), von denen bekannt war, welche Gesteinskörnungen zur Herstellung verwendet wurden. Zusammenfassend wurden dabei die folgenden Erkenntnisse gewonnen:

- An den begutachteten XF2- und XF4-Bauteilen wurden insgesamt wenige und in ihrem Ausmaß relativ geringe Schäden festgestellt.
- Der Großteil der Schäden ist mit Sicherheit nicht gesteinskörnungsbedingt. Lediglich in zwei von 33 Fällen könnten die verwendeten Gesteinskörnungen mit ausschlaggebend für die vorliegenden Schäden sein.
- Die Qualität der verwendeten Gesteinskörnungen ist für die aufgetretenen Einwirkungen als ausreichend zu bezeichnen.
- Die vereinzelt festgestellten Schäden, welche auf die Gesteinskörnungen zurückgeführt werden konnten, zeigen, dass die Qualität der Gesteinskörnung das Frost- bzw. Frost-Tausalz-Verhalten des Betons mit beeinflusst.
- Es konnten keine systematischen Abhängigkeiten zwischen den Schadensbildern am Bauteil und den verwendeten Gesteinskörnungen, deren FTS-Werten bzw. dem Alter der Bauteile festgestellt werden. Demnach spielt die Gesteinskörnung hinsichtlich der Frostbeständigkeit von Beton offensichtlich eine untergeordnete Rolle. Stärker beeinflusst wird die Frostbeständigkeit eines Betonbauteils hingegen von betontechnologischen Aspekten, wie der Betonzusammensetzung, Herstellung und Verarbeitung. Dies deutete sich schon in den Betonversuchen im Labor und den Auslagerungsversuchen an und konnte durch die Bauwerksbegutachtung bestätigt werden.

4 Vorschlag einer praxisgerechten Regelung zur Beurteilung des Verhaltens von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung

4.1 Bewertung des aktuellen Regelwerks anhand der Untersuchungsergebnisse

Je nach Anwendungsgebiet und Expositionsklasse werden an Gesteinskörnungen im Hinblick auf ihr Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung unterschiedliche Anforderungen gestellt (vgl. Kapitel 2.6). In Tabelle AI-28 im Anhang I ist zusammenfassend dargestellt, welche Anforderungen von den untersuchten Gesteinskörnungen erfüllt werden, und welche Einsatzbereiche damit möglich sind. Aus der Zusammenstellung können v. a. die folgenden Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Zieht man als Beurteilungskriterium für das Verhalten der Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung einerseits die Wasseraufnahme und andererseits die Frostprüfverfahren heran, so erhält man teilweise kontroverse Ergebnisse. Dabei tritt sowohl der Fall auf, dass Gesteinskörnungen mit Wasseraufnahmen > 1 M.-% nachweislich über einen ausreichenden Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (FTW-Wert) bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung (FTS-Wert) verfügen (K5) als auch der schwerwiegendere umgekehrte Fall (F5 und F6). Demnach konnte bestätigt werden, dass eine Beurteilung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung anhand der Wasseraufnahme nicht bei allen Gesteinskörnungen zielführend ist und daher nicht zur allgemeinen Bewertung herangezogen werden sollte (vgl. Kapitel 2.2.2.2 und 2.4.1). Die Tendenz, dass die Wasseraufnahme als Hilfsgröße zur Beurteilung des Verhaltens von Kiesen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung besser geeignet ist, als für gebrochene Festgesteine spiegelt sich auch in der Bewertung wider.
- In DIN 1045-2 [26] ist zur Beurteilung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost-Tausalz-Beanspruchung für die Expositionsklassen XF2 und XF4 sowohl das Magnesiumsulfat-Verfahren als auch der Frost-Tausalz-Versuch zulässig. Beurteilt man die gleichen Gesteinskörnungen nach beiden Verfahren, so erhält man relativ häufig unterschiedliche Beurteilungen. Dies bestätigt den bisherigen Kenntnisstand (vgl. Kapitel 2.4.1.2) und zeigt die Notwendigkeit, sich auf eines der beiden Verfahren zu beschränken.

Im Hinblick auf den **Frostwiderstand** von Beton darf eine Gesteinskörnung sowohl im Anwendungsgebiet der ZTV-ING [27] als auch nach DIN 1045-2 nur dann für die Expositionsklasse XF1 bzw. XF3 eingesetzt werden, wenn sie die Kategorien F_4 bzw. F_2 erfüllt, d. h. maximal Abwitterungen im Frost-Tau-Wechsel-Versuch von 2 bzw. 4 M.-% aufweist. Der Nachweis eines ausreichenden Frostwiderstandes über einen Betonversuch ist nicht vorgesehen, Anforderungen existieren demnach im aktuellen Regelwerk nicht. Legt man für das CIF-Verfahren die vorgeschlagenen Abnahmekriterien aus der Literatur zu Grunde (Abwitterung $< 1,0$ kg/m² bzw. rel. $E_{\text{dyn}} \geq 75$ % [38]; vgl. Kapitel 2.4.2.1), so wären alle geprüften Gesteinskörnungen als ausreichend widerstandsfähig gegen Frostbeanspruchung ein-

zustufen (vgl. Anhang I Tabelle AI-29). Zum gleichen Ergebnis kommt man auch mittels der Dosenfrostversuche an den isolierten Gesteinskörnungen.

Um Gesteinskörnungen, deren ausreichender Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung mit FTS-Werten > 8 M.-% nach ZTV-ING Teil 3 bzw. DIN 1045-2 gegebenenfalls im Betonversuch nachgewiesen werden müsste, handelt es sich bei den Proben K4, K7, F5 und F6 (vgl. Anhang I Tabelle AI-30 und Kapitel 2.6). Im Anwendungsbereich der DIN 1045-2 dürfte F6 aufgrund des Ergebnisses des Plattenprüfverfahrens für die Exposition XF2 und XF4 eingesetzt werden. K4, K7 und F5 verfügen hingegen auch im Betonversuch über zu hohe Abwitterungsmengen, um für diesen Bereich zugelassen werden zu können. Ein ähnliches Bild ergibt sich für den Anwendungsbereich der ZTV-ING. Der Unterschied besteht darin, dass hier die Beurteilung alternativ zum Plattenprüfverfahren auch über das CDF-Verfahren erfolgen kann. Bei den vorliegenden Untersuchungen führen beide Methoden letztlich zu vergleichbaren Beurteilungen (vgl. Anhang I Tabelle AI-30).

Neben den im nationalen Regelwerk verankerten Anforderungswerten werden in der Literatur auch andere Abnahmekriterien für frost-tausalz-beständige Betone genannt (vgl. Kapitel 2.6). So darf nach [37] die Abwitterung eines Betons nach 56 Frost-Tau-Wechseln im Plattenprüfverfahren (gesägte Prüffläche) maximal $1,0 \text{ kg/m}^2$ betragen. Beim CDF-Verfahren sind maximal Abwitterungen von $1,5 \text{ kg/m}^2$ nach 28 Frost-Tau-Wechseln zulässig [38]. Dieses Abnahmekriterium erfüllen alle untersuchten Betone. Die Prüfung mit dem Plattenprüfverfahren würden K7 und F5 hingegen nicht bestehen. Vergleicht man diese Beurteilungen mit den Beurteilungen gemäß nationalem Regelwerk (vgl. Anhang I Tabelle AI-31), so wird deutlich, dass man auch hier eine andere Beurteilung erhält. Nach nationalem Regelwerk (ZTV-ING Teil 3 bzw. DIN 1045-2) dürfte auch K4 nicht uneingeschränkt für die Expositionsklassen XF2 und XF4 eingesetzt werden.

Insgesamt wird deutlich, dass derzeit nebeneinander eine Vielzahl von Abnahmekriterien für verschiedene Frostprüfverfahren an Betonen existiert, die häufig zu unterschiedlichen Bewertungen führen. Es ist daher zwingend notwendig, sich auch bei den Betonversuchen auf das praxisnächste Verfahren zu einigen und ein geeignetes Kriterium festzulegen. Diesbezüglich besteht weiterer Forschungsbedarf.

4.2 Beurteilung der verschiedenen Verfahren zur Charakterisierung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung

Wertung der Hilfsgrößen als Kriterium für das Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung

Bei der Wasseraufnahme und dem Mürbkorngehalt handelt es sich um denkbare Hilfsgrößen zur Charakterisierung des Verhaltens bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung. Wichtige Anforderungen an indirekte Verfahren sind eine gute Spreizung der Ergebnisse, eine gute Wiederholbarkeit und v. a. ein guter Zusammenhang zwischen der Hilfsgröße und der zu beschreibenden Eigenschaft. Tabelle 4-1 enthält eine zusammenfassende Beurteilung der Wasseraufnahme und des Mürbkorngehaltes als Hilfsgrößen zur Charakterisierung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung.

Kriterium		WA	MK-Gehalt
Differenzierung (Spreizung)		o	+
Wiederholbarkeit		+	?
Zusammenhang zu Frostprüfverfahren	MS	o	-
	NS	-	-
	FTW	-	-
	FTS	-	-

Tabelle 4-1: Beurteilung der möglichen Hilfsgrößen zur Charakterisierung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung (+ positiv; o neutral; - negativ)

Während die Spreizung der Ergebnisse bei der Wasseraufnahme als eher gering einzustufen ist, ist die Wiederholbarkeit eindeutig gegeben. Der Mürbkornversuch verfügt prinzipiell über eine gute Spreizung. Um die Wiederholbarkeit beurteilen zu können, gibt es bislang zu wenige Daten, da es sich derzeit um kein anerkanntes und praktiziertes Verfahren handelt.

Gegen den Einsatz beider Kennwerte als alleinige Hilfsgröße zur Charakterisierung des Verhaltens bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung spricht der unzureichende Zusammenhang zu den Frostprüfverfahren an den Gesteinskörnungen. So liegt kein Bestimmtheitsmaß über 0,50 und es gibt zahlreiche Gesteinskörnungen, bei denen die Hilfsgrößen ein anderes Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchungen erwarten lassen, als es sich in den Frostprüfverfahren darstellt. Dies gilt gleichermaßen für die Wasseraufnahme, wie für den Mürbkorngehalt.

Zusammenfassend sind die Hilfsgrößen Wasseraufnahme und Mürbkorngehalt als Parameter zu werten, die das Verhalten von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung beeinflussen, jedoch nicht umfassend beschreiben. Die Beurteilung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung sollte deshalb nicht mittels einer der Einflussfaktoren, sondern anhand einer realitätsnahen Beanspruchung (Frostbeanspruchung) im Labor erfolgen. Die Hilfsgrößen sollten hierfür lediglich als hinweisende, nicht aber als allgemein gültige Kriterien herangezogen werden.

Dennoch ist es sehr wahrscheinlich, dass sich im Einzelfall das Verhalten von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung gut durch eine Hilfsgröße abschätzen lässt.

Beurteilung der Frostprüfverfahren an den Gesteinskörnungen

Vorrangig sollte das Verfahren zur Bestimmung des Verhaltens einer Gesteinskörnung bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung das tatsächliche Verhalten dieser Gesteinskörnung in der Praxis widerspiegeln. Dies ist in der Regel gewährleistet, wenn der Beanspruchungsmechanismus identisch ist. Von den hier betrachteten Verfahren an den Gesteinskörnungen ist dies bei den Dosenfrostversuchen gegeben, indem die Gesteinskörnung – wie auch in der Natur – durch Befrostung beansprucht wird. Inwieweit die Kristallisationsversuche mit Natrium- bzw. Magnesiumsulfat die Frostwirkung simulieren, ist hingegen sehr umstritten. Es entsteht zwar auch – ähnlich wie beim Frost – ein Kristallisations-

druck, dieser scheint jedoch anders zu wirken. Ursächlich hierfür sind vermutlich chemische Reaktionen zwischen der Prüflösung (Natrium- bzw. Magnesiumsulfat) und der Gesteinskörnung [vgl. 7, 50, 110, 115].

Darüber hinaus muss ein Prüfverfahren möglichst wirtschaftlich sein. Eine große Rolle spielt dabei der Faktor Zeit. So steht für die Prüfung im Labor nicht annähernd die gleiche Zeit zur Verfügung, wie die Beanspruchung in der Natur anhält. Um das Verhalten von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung dennoch zeitnah beurteilen zu können, wird das Material sowohl bei den Dosenfrostversuchen, als auch bei den Kristallisationsversuchen einer verschärften Prüfung im Labor unterzogen. Die Bedingungen, denen das Material dabei ausgesetzt wird, treten in dieser Intensität tatsächlich nicht auf, sollen aber die eigentlich länger anhaltende Beanspruchung ausgleichen. GUSE spricht diesbezüglich vom „Zeitraffereffekt“ [in 103].

Des Weiteren sollen die Ergebnisse reproduzierbar und differenzierend sein. Ausreichend differenzierende Ergebnisse können die meisten der angewandten Verfahren aufweisen. Am besten unterscheiden sich die Werte beim Frost-Tausalz-Versuch und beim Magnesiumsulfat-Verfahren. Relativ eng liegen lediglich die Ergebnisse beim Frost-Tau-Wechsel-Versuch beisammen. Eine deutlichere Differenzierung lässt sich hinsichtlich der Streuung der Einzelwerte, welche als Hinweis auf die Wiederholpräzision der Verfahren gesehen werden können, treffen. Diesbezüglich schneidet der Frost-Tausalz-Versuch mit Abstand am besten ab (7 % Streuung der Einzelwerte). Alle anderen Verfahren weisen Unsicherheiten von über 20 %, das Magnesiumsulfat-Verfahren sogar von über 50 %, auf und sind diesbezüglich alles andere als zufriedenstellend. Dabei gilt es zu beachten, dass die Ursachen für die Streuungen der Werte sowohl in den Verfahren als auch in den Materialinhomogenitäten zu suchen sind.

In Tabelle 4-2 werden die Frostprüfverfahren an den Gesteinskörnungen (MS-Verfahren, NS-Verfahren, FTW-Versuch, FTS-Versuch) zusammenfassend schematisch bewertet.

Kriterium	MS-Verfahren	NS-Verfahren	FTW-Versuch	FTS-Versuch
Beanspruchungsmechanismus	Kristallisationsdruck ?		Frostbeanspruchung +	
Durchführung	-	-	+	+
Differenzierung	+	o	-	+
Streuung der Einzelwerte	-	-	o	+

Tabelle 4-2: Zusammenfassende Beurteilung der Frostprüfverfahren an Gesteinskörnungen (+ positiv; o neutral; - negativ)

Insgesamt kann festgestellt werden, dass eine Differenzierung von Gesteinskörnungen im Hinblick auf ihr Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung durch Prüfung der isolierten Gesteinskörnung grundsätzlich möglich ist. Dabei liefert jedes Verfahren (Magnesiumsulfat-Verfahren, Kristallisationsversuch und Dosenfrostversuche) spezifische und unterschiedlich stark differenzierende Werte. Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der unterschiedlichen Prüfverfahren an den Gesteins-

körnungen gibt es praktisch nicht. Damit wird die Notwendigkeit bestätigt, sich zukünftig auf ein Verfahren zur Prüfung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung zu einigen. Für die Anwendung bei Gesteinskörnungen bietet sich – beurteilt nach dem Beanspruchungsmechanismus, der Differenzierung und der Streuung der Ergebnisse sowie der Durchführbarkeit – vordringlich der Dosenfrostversuch an. Dabei sollte – je nach Einsatzbereich – der Dosenfrost mit bzw. ohne Taumittel angewandt werden, da sich Gesteinskörnungen nachweislich bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung unterschiedlich verhalten. Daneben konnte gezeigt werden, dass eine Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung bei Gesteinskörnungen sowohl zu Abwitterungen als auch zu Schädigungen des inneren Gefüges führen kann und dass beides bei einer vollständigen Charakterisierung einer Gesteinskörnung im Hinblick auf das Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung zu berücksichtigen ist [91].

Der Vergleich der Ergebnisse der Frostuntersuchungen an den isolierten Gesteinskörnungen mit den Ergebnissen von standardisierten Betonversuchen im Labor (CIF-/CDF-Verfahren und Plattenprüfverfahren mit Wasser bzw. Tausalz) sowie mit den Ergebnissen der Auslagerungsversuche und den Bauwerksuntersuchungen zeigt, dass die Prüfung der isolierten Gesteinskörnung nicht alleine maßgebend für das Frost- bzw. Frost-Tausalz-Verhalten eines Betons ist. Als gesichert gilt, dass die verwendete Gesteinskörnung eine gewisse Qualität aufweisen muss, um Schäden am Bauwerk zu vermeiden. Dies kann durch die Dosenfrostversuche mit und ohne Tausalz hinreichend genau überprüft und sichergestellt werden. Da die Frostbeständigkeit von Beton auch von anderen Faktoren wie der Kontaktzone oder dem Mörtel (z. B. Zementart, w/z) abhängt, ist die alleinige Beurteilung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung über Betonversuche mit standardisierten Zusammensetzungen als kritisch anzusehen. Um das tatsächliche Verhalten der Betone beschreiben zu können, sollten im Bedarfsfall, wie auch in ähnlicher Form schon von MANN & AL. [8] vorgeschlagen, Betonversuche mit der in der Praxis verwendeten Zusammensetzung angesetzt werden [91].

4.3 Empfehlung für Anforderungen an Gesteinskörnungen für Beton im Hinblick auf das Verhalten der Gesteinskörnung bei Frost-Tausalz-Beanspruchung

Nachdem mit den Dosenfrostversuchen (mit bzw. ohne Taumittel) die für die Charakterisierung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung am besten geeigneten Verfahren definiert wurden (vgl. Kapitel 4.2), gilt es nun, anwendungsbezogene Anforderungen an diese Verfahren zu stellen.

Im Hinblick auf die aktuell gültigen Anforderungen an den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (FTW-Wert) wird kein Änderungsbedarf gesehen. Die Anforderungskategorien von F₂ bzw. F₄ an XF3- bzw. XF1-Betone haben sich langfristig bewährt und gelten als praxisgerecht.

Schwieriger gestaltet sich die Festlegung von geeigneten Anforderungswerten im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung. Mit Inkrafttreten der überarbeiteten europäischen Norm (EN 12620) ist das Magnesiumsulfat-Verfahren nicht mehr für eine Beurteilung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost-Tausalz-Beanspruchung zulässig. Stattdessen sind Gesteinskör-

nungen ausschließlich mit dem Dosenfrostversuch mit Tausalz oder alternativ dazu durch den Betonversuch nach DIN V 18004, Abschnitt 4.3 [45] zu prüfen. Die Zweckmäßigkeit dieser Umstellung konnte im Rahmen dieser Arbeit belegt werden. Damit einher gehend müssen jedoch praxismgerechte Anforderungswerte für den Dosenfrostversuch mit Tausalz definiert werden, welche anschließend auch national umzusetzen sind. Folglich bedarf es hier auch einer Überarbeitung der DIN 1045-2 (Tabelle F.2.2).

Damit vergleichbar war die Problemstellung bei der Einführung der ZTV-ING Teil 3 [27]. Auch hier durfte das bis dahin zulässige Magnesiumsulfat-Verfahren (MS) nach DIN EN 1367-2 [22] nicht weiter zur Beurteilung des Widerstands von Gesteinskörnungen gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung herangezogen werden und es mussten Anforderungen an den Dosenfrostversuch mit Tausalz definiert werden. Die Anforderungen wurden damals aus der bisherigen Regelung übernommen und unabhängig von der Expositionsklasse auf maximal 8 M.-% Abwitterung im Frost-Tausalz-Versuch festgelegt. Diesen Anforderungswert konnten bestimmte Gesteinskörnungen, für die jedoch positive baupraktische Erfahrungen vorliegen, nicht erbringen und wurden damit von einer Verwendung in XF2-Betonbauteilen ausgeschlossen. In Bayern und Baden-Württemberg wurde deshalb das Anforderungskriterium der ZTV-ING für den Nachweis des Widerstandes der groben Gesteinskörnungen gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung für die Expositionsklasse XF2 produktneutral auf maximal 25 M.-% Abwitterung beim Frost-Tausalz-Versuch angehoben [64, 102, 65] (vgl. Kapitel 2.6). Maßgebend hierfür waren primär die Ergebnisse labortechnischer Untersuchungen [66, 67].

Diese Regelung wurde als Grundlage herangezogen und überprüft, inwieweit das hier definierte Kriterium für die Expositionsklasse XF2 tatsächlich zielführend ist. Davon ist auszugehen, wenn einerseits gezeigt werden kann, dass der ursprüngliche Anforderungswert von maximal 2 M.-% nach DIN 4226-1 [59] im Dosenfrostversuch mit Wasser richtig gewählt war und dass andererseits der für die Expositionsklasse XF2 angepasste Anforderungswert von maximal 25 M.-% Abwitterung im Frost-Tausalz-Versuch – bezogen auf das Praxisverhalten der Betone – dem „alten“ entspricht.

Aus der Tatsache, dass bei der Begutachtung von insgesamt 33 Bauwerken kaum Schäden an XF2-Bauteilen festgestellt wurden, lässt sich folgern, dass die bisher für XF2- bzw. XF4-Bauteile eingesetzten Gesteinskörnungen den Anforderungen in den meisten Fällen genügen, und damit der ursprünglich gültige Anforderungswert nach DIN 4226-1 von maximal 2 M.-% Abwitterung im Frost-Tau-Wechsel-Versuch sinnvoll gewählt war.

Eine direkte Übertragung des bewährten FTW-Anforderungswertes auf den Frost-Tausalz-Versuch ist nicht möglich, da es keinen zufriedenstellenden Zusammenhang zwischen dem Frost-Tau-Wechsel- und dem Frost-Tausalz-Versuch zu geben scheint (vgl. Kapitel 3.2.1.3). Die Begutachtung von XF2-Betonbauteilen aus Gesteinskörnungen mit bekannten und eher kritischen FTS-Werten (> 8 M.-% Abwitterung), ermöglicht hingegen Rückschlüsse darauf, ob der Anforderungswert von 25 M.-% zweckmäßig ist. Da bei der Begutachtung insgesamt nur wenige Schäden festgestellt wurden, kann man davon ausgehen, dass der angepasste Anforderungswert nicht zu hoch gewählt wurde. Gleichzeitig verdeutlichen die vereinzelt auftretenden Schäden, die vermutlich durch Gesteinskörnungen mit zu geringem Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung hervorgerufen wurden, dass sich nicht jede Gesteinskörnung zum Einsatz für XF2-Bauteile eignet und ein gewisser Widerstand gegen Frost-

Tausalz-Beanspruchung gegeben sein muss. In den beiden Fällen, bei denen die Schäden vermutlich gesteinskörnungsbedingt sind, würde die verwendete Gesteinskörnung die angepasste Anforderungen an den FTS-Wert vermutlich nicht erfüllen und dürfte aktuell nicht eingesetzt werden. Dies kann als weiteres Argument für die Umstellung des Anforderungskriteriums und die Anpassung des Anforderungswertes gewertet werden.

Das positive Praxisverhalten der begutachteten Kappen deutet darauf hin, dass der in Bayern geltende Anforderungswert an Gesteinskörnungen für Kappen von 5 M.-% Abwitterung im Frost-Tausalz-Versuch treffend gewählt wurde.

Zusammenfassend konnte durch die Bauwerksbegutachtung gezeigt werden, dass die bisher für XF2-Bauteile und Kappen verwendeten Gesteinskörnungen den an sie gestellten Anforderungen im Einsatzgebiet genügen. Daneben deutet der gute Zustand der begutachteten Brücken mit Gesteinskörnungen im kritischen FTS-Wertebereich (> 8 M.-%) an, dass der neue Anforderungswert, der basierend auf Laboruntersuchungen festgelegt wurde, in der richtigen Größenordnung liegt und den baupraktischen Erfahrungen gerecht wird.

Da die Anforderungswerte, die im Zuge der Sonderregelung für Bayern und Baden-Württemberg festgelegt wurden, als zielführend und praxisgerecht bestätigt werden konnten, wird empfohlen, diese ins allgemeine Regelwerk zu integrieren (ZTV-ING und DIN 1045-2). Demnach sollten Gesteinskörnungen im Hinblick auf das Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Verhalten die Anforderungen der Tabelle 4-3 erfüllen. An Gesteinskörnungen für Unterbetone, für Oberbetone bzw. für Oberbetone für die Klimazone III sollten analoge Anforderungen wie an Gesteinskörnungen für XF3-Betone, XF4-Betone bzw. Kappen gestellt werden. Alternativ soll weiterhin die Möglichkeit bestehen, den Nachweis eines ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstandes über einen Betonversuch zu erbringen.

Expositionsklasse	XF1	XF2	XF3	XF4	Kappen
Straßenbau			Unterbetone	Oberbetone	Oberbetone¹⁾
FTW-Wert [M.-%]	4	-	2	-	-
FTS-Wert [M.-%]	-	25	-	8	5

¹⁾ für Klimazone III (RStO) [68]

Tabelle 4-3: Empfehlung für Anforderungen an Gesteinskörnungen für Beton im Hinblick auf das Verhalten der Gesteinskörnung bei Frost-Tausalz-Beanspruchung – zu prüfen im FTS-Versuch mit 1%iger NaCl-Lösung (alternativ ist auch ein Betonversuch möglich)

4.4 Fazit

Die Gesteinskörnung spielt hinsichtlich der Frostbeständigkeit von Beton offensichtlich eine untergeordnete Rolle. Entscheidender für die Frostbeständigkeit eines Betonbauteils sind hingegen v. a. betontechnologische Aspekte, wie die Betonzusammensetzung, Herstellung und Verarbeitung. Dennoch ist eine Prüfung der Gesteinskörnung notwendig, da eine gewisse Qualität der Gesteinskörnung Voraussetzung ist, um Schäden an Bauwerken zu vermeiden. Darüber hinaus ist der Hersteller im Rahmen der CE-Kennzeichnung vertraglich dazu verpflichtet, die Eigenschaft seiner Produkte zu deklarieren, d. h. den Gesteinskörnungen bestimmte Qualitätsniveaus zuzuweisen, welche er damit zu jedem Zeitpunkt der Lieferung zusagt. Da sich das Verhalten von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung nachweislich am besten über die Dosenfrostversuche (mit bzw. ohne Tausalz) charakterisieren lässt, sollten diese zur Deklaration herangezogen werden. Die Dosenfrostversuche ermöglichen die Überprüfung und Sicherstellung der für die Herstellung von frostbeständigen Betonen erforderlichen Qualität der Gesteinskörnungen. Diese hängen stark vom Einsatzbereich (Exposition) ab, weshalb dahingehend differenzierte, praxisorientierte und einheitliche Anforderungswerte gelten müssen.

Die Einhaltung der deklarierten Werte muss der Hersteller im Hinblick auf das Verhalten von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung alle zwei Jahre nachweisen. Für die Qualitätssicherung reicht dies, insbesondere wenn das Qualitätsniveau von Gesteinskörnungen nahe am deklarierten Wert liegt, häufig nicht aus. Eine Erhöhung der Prüfhäufigkeit würde die Sicherheit für die Produzenten zwar steigern, jedoch das Problem nicht beheben, dass zu viel Zeit vergeht, bis die Ergebnisse vorliegen und die Produzenten somit die Qualität steuern könnten. Deshalb wird nach einem Verfahren gesucht, mit dem der Gesteinskörnungsproduzent sein Material zeitnah im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle beurteilen kann und welches ihm das rechtzeitige Eingreifen in die Produktion ermöglicht. Die Dosenfrostversuche sind hierzu nicht geeignet, da sie zu aufwändig und damit nicht in die werkseigene Produktionskontrolle integrierbar und zu langwierig sind.

5 Entwicklung eines praxisgerechten Prüfverfahrens zur Qualitätssicherung im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle

5.1 Auswahlkriterien

Das Verfahren zur Qualitätssicherung im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) soll dem Produzenten die zeitnahe Bewertung des produzierten Materials und somit ein rechtzeitiges Eingreifen in die Produktion ermöglichen. Die Idee ist es, einen Versuch in die Werkseigene Produktionskontrolle zu integrieren, der maschinentechnisch relativ einfach und vom Werkspersonal handhabbar sein muss. Gleichzeitig muss er zeitnah Ergebnisse liefern, die im Bezug zu den mit dem normierten Verfahren deklarierten Werten des Vorkommens stehen.

Im Hinblick auf das Verhalten von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung handelt es sich theoretisch v. a. bei der Wasseraufnahme, der petrographischen Zusammensetzung und dem Mürbkorngehalt um Kriterien [87, 88, 97], für die innerhalb eines Vorkommens ein direkter Zusammenhang zu den normierten Verfahren (Dosenfrostversuchen) bestehen könnte. Als allein-stehende Kriterien zur direkten Beurteilung eignen sich alle drei nicht. So konnte im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden, dass weder für die Wasseraufnahme, noch für den Mürbkorngehalt ein allgemeingültiger direkter Zusammenhang zu den Dosenfrostversuchen besteht (vgl. Kapitel 3.2.1.3). Dass auch die petrographische Beschreibung allein ungeeignet ist, um den Widerstand von Gesteinskörnungen gegen Frostbeanspruchung abzuschätzen, konnte nachgewiesen werden, indem verschiedene Gesteinskörnungen einerseits nach Schweizer Norm SN 670 115 [57], d. h. anhand einer erweiterten petrographischen Beschreibung und andererseits anhand der Dosenfrostversuche beurteilt wurden. Beide Verfahren führten teilweise zu unterschiedlichen Beurteilungen. Um mittels der Hilfsgrößen das Verhalten von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung abschätzen zu können, bedarf es demnach auf jeden Fall der Kalibrierung am normierten Verfahren.

Da eine hinreichende petrographische Beschreibung nur durch einen „mit technischer Gesteinskunde vertrauten Geologen, Mineralogen oder Materialprüfer“ [nach 60] erfolgen kann und solche nur in wenigen Werken ständig verfügbar sind, wurde der Ansatz, die petrographische Beurteilung als einfachen Versuch zur Qualitätssicherung in die Werkseigene Produktionskontrolle zu integrieren, nicht weiterverfolgt.

Als am ehesten zielführend wurde hingegen das Prinzip des Mürbkornversuches – das Verhalten der Einzelkörner bei mechanischer Beanspruchung als Maß für die Qualität von Gesteinskörnungen heranzuziehen – erachtet. So wurden zwischen dem Mürbkorngehalt nach der ehemaligen Ö-NORM B 3304 [10] und den Ergebnissen der Dosenfrostversuche (insbesondere für die gebrochenen Festgesteine) bessere Zusammenhänge festgestellt als zwischen der Wasseraufnahme und den Dosenfrostversuchen (vgl. Kapitel 3.2.1.3; Anhang I Abbildung AI-15, Tabellen AI-13 und AI-14). In Österreich erfolgte die Beurteilung der „Festigkeit“ und der „Frostbeständigkeit“ von Gesteinskörnungen lange

Zeit anhand des Mürbkorngehalts nach Ö-NORM B 3304 (vgl. Anhang III). Erst im Jahre 2004 wurde die Ö-NORM B 3304 zurückgezogen und in der Folgenorm (Ö-NORM EN 12620 [53] bzw. Ö-NORM B 3131 [54]) der Mürbkornversuch durch direkte Prüfungen zur Bestimmung der Festigkeit (LA-Verfahren nach Ö-NORM EN 1097-2, Abschnitt 5 [55]) und des Verhaltens bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung (Dosenfrostversuch nach Ö-NORM EN 1367-1[56]) ersetzt. Diese sind nachweislich besser zur allgemeinen Charakterisierung geeignet. Für die Überprüfung der Qualität innerhalb eines Werkes könnte der Mürbkornversuch jedoch sehr hilfreich sein, zumal dieser in seiner bisherigen Form bei weitem noch nicht ausgereift und deutlich verbesserungsfähig ist. Um letztlich das gesamte Potential, das in diesem Versuch steckt, für die Qualitätssicherung im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle nutzen zu können, wurde der Mürbkornversuch weiterentwickelt und optimiert.

5.2 Entwicklung eines einfachen Versuches zur Beurteilung der Qualität von groben Gesteinskörnungen (Einzelkornversuch)

5.2.1 Grundlage (Mürbkornversuch nach zurückgezogener Ö-NORM B 3304)

Anhand des Mürbkorngehaltes nach Ö-NORM B 3304 [10] (vgl. Anhang III) wurde ursprünglich die „Festigkeit“ und „Frostbeständigkeit“ von Gesteinskörnungen für Beton beurteilt. So wurden Gesteinskörnungen, die höchstens 5 M.-% an mürbem Korn enthielten, grundsätzlich als ausreichend „fest und frostbeständig“ eingestuft. Nur wenn der Mürbkornanteil über 5 M.-% lag, musste die Beurteilung anhand von Betonprüfungen (Bestimmung der Druckfestigkeit und/oder des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung) erfolgen. Insgesamt wurden die folgenden drei Verwendungsklassen unterschieden:

Verwendungsklasse I („fest und frostbeständig“):

Gesteinskörnungen mit höchstens 5 M.-% Mürbkorn, bzw. Gesteinskörnungen, deren ausreichende Festigkeit und Frostbeständigkeit über genormte Betonversuche nachgewiesen wurde.

Verwendungsklasse II („fest aber nicht frostbeständig“):

Gesteinskörnungen mit mehr als 5 M.-% Mürbkorn, die eine vergleichende Betonfestigkeitsprüfung bestanden haben.

Verwendungsklasse III:

Gesteinskörnungen mit 5 bis 20 M.-% Mürbkorn ohne Nachweis der Festigkeit und der Frostbeständigkeit.

Dabei versteht man gemäß Ö-NORM B 3304 unter Mürbkorn „alle schiefrigen, angewitterten, rissigen, schlecht konglomeratisch verfestigten, absandenden Körner und freie Glimmerschüppchen, sowie alle Körner die bei der Mürbkornprüfung als mürbe eingestuft werden“. Während der Mürbkornanteil von Korngruppen und Kornklassen bis zu einem Größtkorn von 4 mm dabei unter einem Mikroskop abgeschätzt wird, ist der Mürbkorngehalt von Korngruppen und Kornklassen mit einem Größtkorn über 4 mm anhand des Hammerversuches zu beurteilen. Dabei werden mindestens 200 Körner der zu untersuchenden Kornklasse nach 24-stündiger Wasserlagerung mit einem Hammer einzeln zer schlagen. Die Masse des Hammers muss für die Kornklassen mit einem Kleinstkorn größer 8 mm

500 g und für feinere Kornklassen (4 bis 8 mm) 250 g betragen. Als Fallhöhe sind 30 cm vorgeschrieben (vgl. Abbildung 5-1).

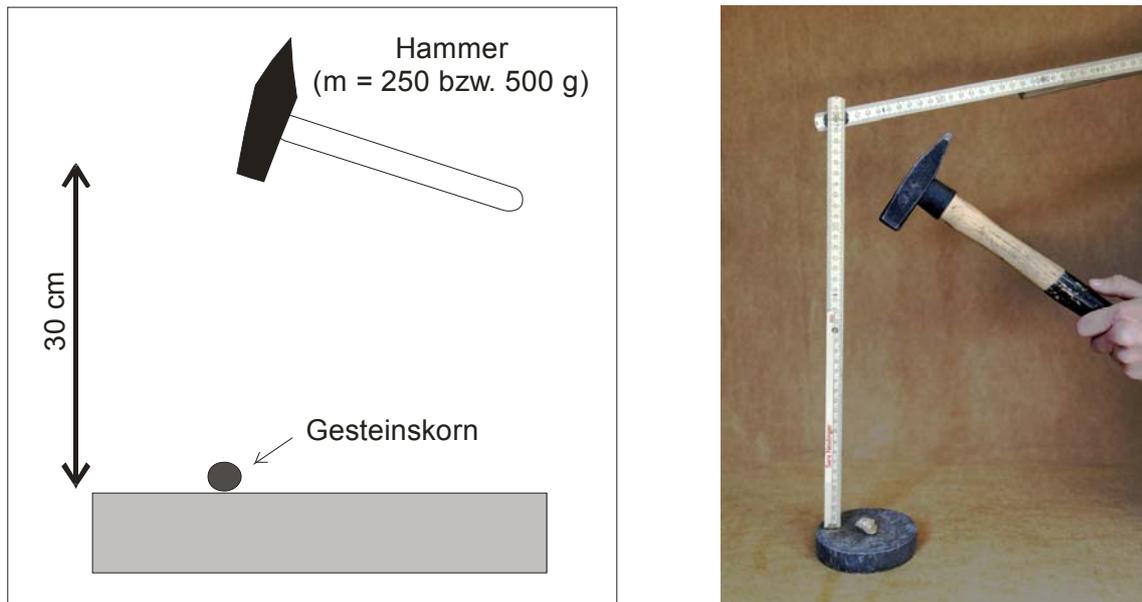


Abbildung 5-1: Mürbkornversuch nach zurückgezogener Ö-NORM B 3304 (links: schematische Prinzipskizze; rechts: praktische Umsetzung)

Die Beurteilung der Körner erfolgt nach der Art und Weise, wie sie sich beim Hammerschlag verhalten. So werden Körner, die „mit dumpfem Klang in viele Stücke zerfallen“ als mürbe eingestuft. Körner, die hingegen „gar nicht oder mit hellem Klang in wenige Bruchstücke mit scharfkantigen Bruchflächen zerspringen“, gelten als fest und gut. Der Anteil an mürben Körnern wird in Massenprozent (M.-%) vom Gesamtmaterial angegeben (hier: Mürbkorngehalt MK-Gehalt).

Der Hauptkritikpunkt am Mürbkornversuch ist die hohe Subjektivität des Verfahrens aufgrund des großen Einflusses des Bearbeiters. So ist sowohl die Lastaufbringung (Hammerschlag), als auch die Beurteilung (visuelle Ansprache bzw. nach Beurteilung durch das Gehör) stark vom durchführenden Laboranten abhängig, weshalb dieses Verfahren häufig kritisiert und in Frage gestellt wurde.

5.2.2 Vollzogene Modifikationen

Insbesondere im Hinblick auf diese große Schwäche – die Subjektivität des Versuches – wurde der Mürbkornversuch (Hammerversuch für grobe Gesteinskörnungen) weiterentwickelt. Dabei wurde sowohl bei der Lastaufbringung, als auch bei der Beurteilung der Einfluss durch den Bearbeiter weitestgehend reduziert. Entstanden ist letztlich der Einzelkornversuch.

Vereinheitlichung der Beanspruchung

Um zu gewährleisten, dass alle Körner – unabhängig vom Bearbeiter – die gleiche Beanspruchung erfahren, wurde das Einzelkornprüfgerät entwickelt. Dabei handelt es sich um ein kleines Schlaggerät, bei dem ein Fallgewicht von 250 g bzw. 500 g aus einer Höhe von 30 cm einmal auf das zu untersuchende Korn fallengelassen wird (vgl. Abbildung 5-2).

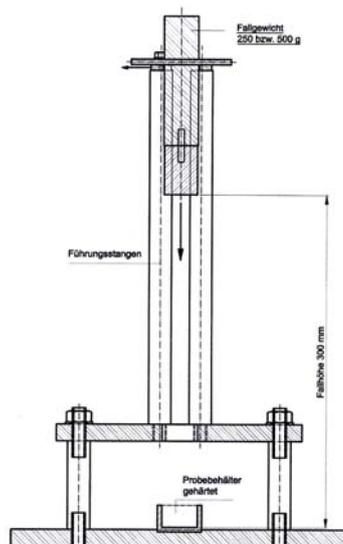


Abbildung 5-2: Einzelkornprüfgerät (links: schematische Prinzipskizze von K.-H. Kreft; rechts: praktische Umsetzung)

Bei der Konstruktion des Gerätes wurde darauf geachtet, ein möglichst robustes Gerät mit wenig Materialverschleiß und einem geringen Reibungswiderstand herzustellen. Der Aufbau des Einzelkornprüfgerätes im Detail ist Anhang V zu entnehmen.

Modifikation der Auswertung

Des Weiteren wurde der Versuch im Hinblick auf die Auswertung modifiziert. Dabei wurden grundsätzlich die Ansätze des Mürbkornversuches verfolgt:

- Charakterisierung der Körner mittels des Bruchverhaltens beim Einzelkornversuch
- Charakterisierung der Körner anhand des Klangverhaltens beim Einzelkornversuch

Zur besseren Beurteilung des Bruchverhaltens von Gesteinskörnern im Einzelkornversuch wurden insgesamt neun verschiedene Einzelkornfestigkeitsklassen definiert. Grundlegendes Kriterium hierfür ist das Bruchverhalten beim „Hammerschlag“ (vgl. Abbildung 5-3). Die teilweise zusätzlich angegebenen Hilfskriterien (Massenanteile bestimmter Kornfraktionen) gelten ausschließlich für Gesteinskörner der Kornklasse 8/11 mm und sind als Möglichkeit zur „Eichung“ oder Überprüfung des subjektiven Empfindens zu sehen. Sie sind stets in Kombination mit dem beschriebenen Bruchbild der entsprechenden Einzelkornfestigkeitsklasse und unter Berücksichtigung der Gesteinsart anzuwenden.

Klasse	Beschreibung	Beispiel (Granit)	Beispiel (Kalkstein)
1	Korn bleibt weitgehend unverändert (kein Bruch)		
2	Korn bleibt weitgehend erhalten; kleine oberflächliche Absplitterungen		
3a	Korn zerspringt in wenige gleich große Stücke; scharfkantige Bruchflächen; geringer Feinanteil		
	Hilfskriterium*: Anteil ≤ 2 mm: < 10 M.-%		
3b	Korn zerspringt in wenige gleich große Stücke; deutlicher Feinanteil		
	Hilfskriterium*: Anteil ≤ 2 mm: ≥ 10 M.-%		
4a	Korn zerspringt in viele gleich große Bruchstücke; geringer Feinanteil		
	Hilfskriterien*: Anteil ≤ 2 mm: < 20 M.-% Anteil $\leq 5,6$ mm: 100 M.-%		

Klasse	Beschreibung	Beispiel (Granit)	Beispiel (Kalkstein)
4b	Korn zerspringt in viele gleich große Bruchstücke; deutlicher Feinanteil		
	Hilfskriterien*: Anteil ≤ 2 mm: 20 - 70 M.-% Anteil $\leq 5,6$ mm: 100 M.-%		
5a	Korn zerspringt unregelmäßig (Gemisch aus großen und kleinen Bruchstücken); geringer Feinanteil		
	Hilfskriterium*: Anteil ≤ 2 mm: < 20 M.-%		
5b	Korn zerspringt unregelmäßig (Gemisch aus großen und kleinen Bruchstücken); deutlicher Feinanteil		
	Hilfskriterium*: Anteil ≤ 2 mm: 20 - 70 M.-%		
6	Korn zerfällt zu Mehl bzw. zu sehr feiner Gesteinskörnung		
	Hilfskriterien*: Anteil ≤ 2 mm: ≥ 70 M.-% Anteil ≤ 4 mm: 100 M.-%		

* für die Prüfung von Gesteinskörnern der Kornklasse 8/11 mm

Abbildung 5-3: Klassifizierung von Gesteinskörnungen nach ihrem Bruchbild im Einzelkornversuch

Diese Klassifizierung ermöglicht eine differenzierende Beurteilung der Gesteinskörnungen nach ihrem Bruchbild im Einzelkornversuch. Letztlich wird der Anteil an Körnern in einer oder in mehreren Einzelkornfestigkeitsklassen bestimmt.

Die Beurteilung des zweiten Kriteriums – des Klangs beim Hammerschlag – erfolgte beim Mürbkornversuch bislang durch Abschätzung über das menschliche Gehör. Durch akustische Messungen (Resonanzanalyse) wurde überprüft, inwieweit es sich beim Klang um ein relevantes Beurteilungskriterium für die Qualität von Gesteinskörnern handelt und die Beurteilung durch das menschliche Gehör ausreicht, um diesen hinreichend zu beurteilen.

Hierfür wurde der Klang bei der Zertrümmerung für verschiedene qualitativ unterschiedliche Varietäten einer Gesteinsart einerseits durch das menschliche Gehör beurteilt und andererseits über ein Mikrofon aufgezeichnet. Durch Parallelisierung der Ergebnisse werden mögliche Bewertungskriterien zur Unterscheidung zwischen „dumpf“ und „hell“ klingenden Körnern definiert. Der anhand dieses Bewertungskriteriums bestimmte „Anteil an dumpf klingenden Körnern“ wird anschließend in Bezug zu den Ergebnissen der normierten Prüfungen (Dosenfrostversuche) gesetzt. Indem die Ergebnisse der Beurteilung nach dem Klangverhalten mit den Ergebnissen der Beurteilung nach dem Bruchverhalten verglichen werden, wird darüber hinaus überprüft, inwieweit Zusammenhänge zwischen beiden Ansätzen bestehen.

Der Versuchsaufbau zur Aufnahme des Klanges beim Einzelkornversuch ist in Abbildung 5-4 dargestellt. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte anhand des Programmes Sonic TC.

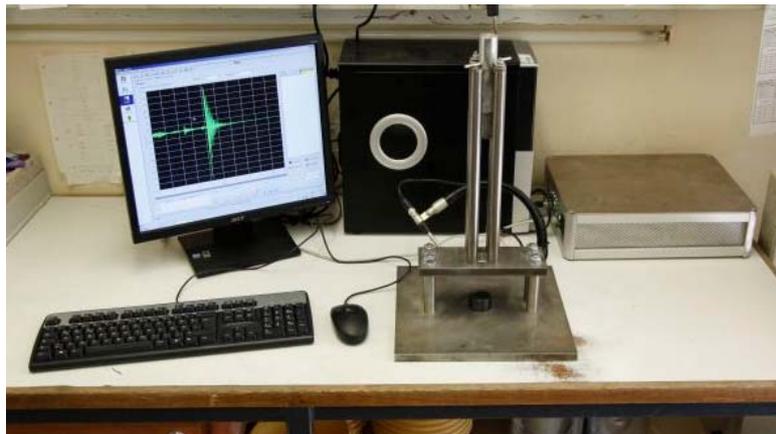


Abbildung 5-4: Versuchsaufbau zur akustischen Aufnahme des Klangverhaltens beim Einzelkornversuch

Unterschiede zwischen „dumpf“ und „hell“ klingenden Körnern zeigen sich prinzipiell sowohl im Zeitsignal (Zeit-Spannungs-Diagramm) als auch im Frequenzspektrum (Frequenz-Pegel-Diagramm).

Im Zeitsignal verfügen Klänge, die das menschliche Gehör als „hell“ empfindet, in der Regel über größere Amplituden (Spannungen) als „dumpfe“ Klänge (vgl. Abbildung 5-5). Dabei gilt zu beachten, dass die gemessenen Spannungen stark von der Mikrofonposition und insbesondere dem Mikrofonabstand abhängen.

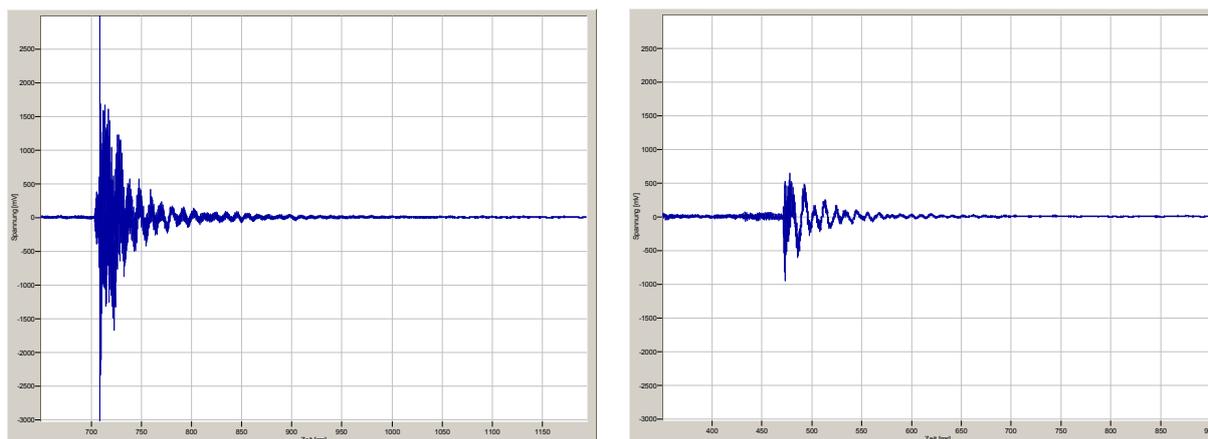


Abbildung 5-5: Typische Zeitsignale bei der Prüfung eines „hell“ klingenden (links) und eines „dumpf“ klingenden Korns (rechts) im Einzelkornversuch (bei identischer Position des Mikrophons)

Vergleicht man die Ergebnisse der Beurteilung des Klanges durch das menschliche Gehör mit den jeweiligen maximalen Amplitude (Spannung) im aufgezeichneten Zeitsignal, so wird deutlich, dass Gesteinskörner, die man als „dumpf“ klingend empfindet, bei der hier gewählten Mikrophonposition in der Regel maximal eine Spannung von 1000 mV aufweisen (vgl. exemplarisch Abbildung 5-6). Demnach scheint dies bei der hier gewählten Versuchsanordnung um ein geeignetes Kriterium zur Unterscheidung von „dumpf“ und „hell“ klingenden Gesteinskörnern zu sein.

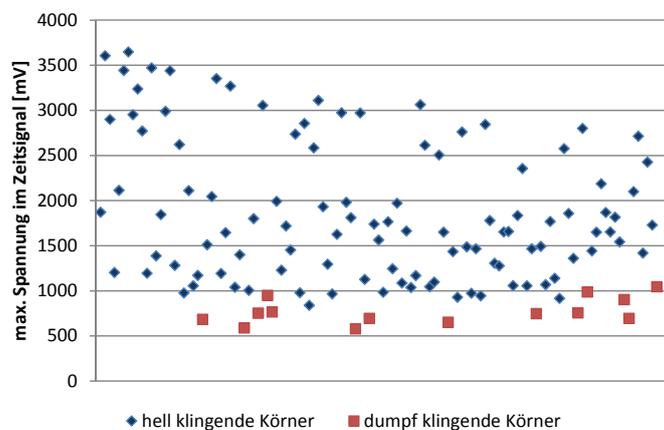


Abbildung 5-6: Auswertung zur parallelen Charakterisierung des Klanges beim Einzelkornversuch über die maximale Spannung im Zeitsignal (beim hier gewählten Versuchsaufbau) und über das menschliche Gehör (Unterscheidung zwischen „dumpf“ und „hell“ klingenden Körnern)

Parallel zum Anteil an Körnern mit Amplituden im Zeitsignal < 1000 mV wurde auch der Massenanteil an „qualitativ minderwertigen“ Körnern gemäß Bruchbild (Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6) sowie der FTW-Wert und der FTS-Wert bestimmt. Die ermittelten Daten sind in Tabelle AII-1 im Anhang enthalten.

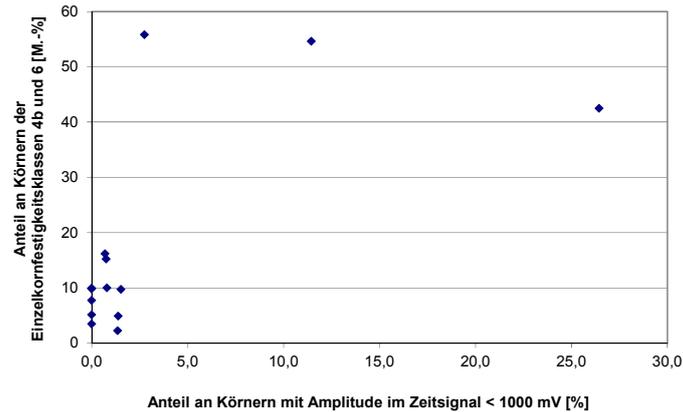


Abbildung 5-7: Zusammenhänge beim Einzelkornversuch zwischen der Beurteilung von „qualitativ minderwertigen“ Körnern anhand des Bruchverhaltens (Anteil an Körnern der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6) und anhand des Klangverhaltens (Anteil an Körnern mit maximalen Amplituden im Zeitsignal < 1000 mV)

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass zwischen dem Bruchverhalten (beurteilt durch den Anteil an Körnern der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6) und dem Klang (beurteilt mit dem Anteil an Körnern mit maximalen Amplituden im Zeitsignal < 1000 mV) generell kein direkter Zusammenhang besteht (vgl. Abbildung 5-7). Dies war zu erwarten, da es sich um zwei unterschiedliche Gesteinseigenschaften handelt, die nicht zwingend miteinander einhergehen. Auffallend ist, dass Gesteinskörner, die „dumpf“ klingen, im Regelfall auch anhand des Bruchverhalten als „ungünstig“ einzustufen sind (hier: Einzelkornfestigkeitsklassen 4b oder 6). Umgekehrt klingen bei weitem nicht alle Gesteinskörner „dumpf“, die anhand des Bruchverhaltens als „ungünstig“ einzustufen sind.

Zieht man als Bewertungskriterium für die Qualität einer Gesteinskörnung ausschließlich das Klangverhalten beim Einzelkornversuch heran (hier: Anteil an Körnern mit Amplituden im Zeitsignal < 1000 mV) und vergleicht diese mit den normierten Verfahren zur Überprüfung der Qualität von Gesteinskörnungen (FTW-Wert, FTS-Wert), so ergeben sich die Zusammenhänge der Abbildung 5-8. Vergleichend sind auch die Zusammenhänge zwischen dem Bruchverhalten (Anteil an Körnern der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6) und den normierten Verfahren dargestellt.

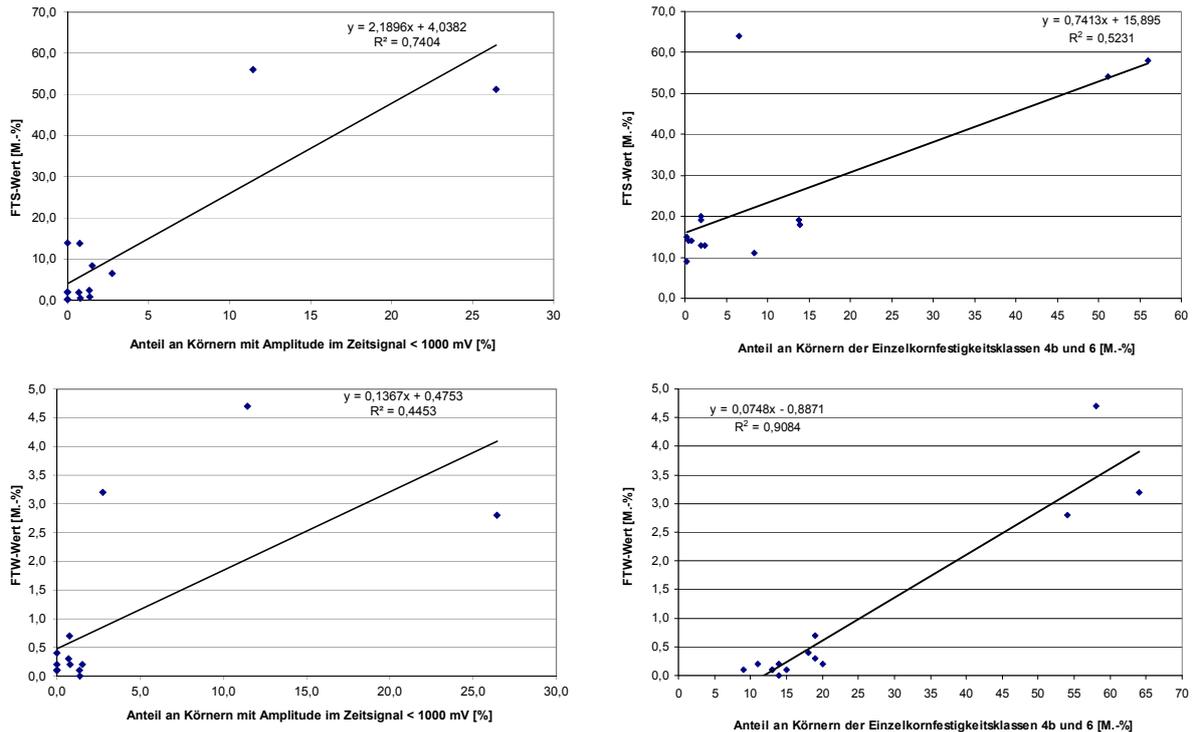


Abbildung 5-8: Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen des Einzelkornversuches (Anteil an Körnern mit Amplituden im Zeitsignal < 1000 mV bzw. Anteil an Körnern der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6) und den normierten Verfahren zur Charakterisierung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung (FTW-Wert, FTS-Wert)

Im vorliegenden Beispiel verfügen die Proben mit den höchsten FTS-Werten auch über den höchsten „Anteil an dumpf klingenden Körnern“. Die unterschiedlichen Qualitäten im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung spiegeln sich im Klangverhalten (Anteil an Körnern mit maximalen Amplituden im Zeitsignal < 1000 mV) besser wider als im Bruchverhalten (Anteil an Körnern der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6).

Auch zwischen den FTW-Werten und den entsprechenden Anteilen an Körnern mit maximalen Amplituden im Zeitsignal < 1000 mV besteht ein gewisser Zusammenhang. So weisen auch hier die Gesteinskörnungen mit den höchsten FTW-Werten hohe „Anteile an dumpf klingenden Körnern“ auf. Aus dem Vergleich der FTW-Werte mit dem Bruchverhalten (Anteil an Körnern der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6) wird jedoch deutlich, dass das Bruchverhalten in diesem Fall besser geeignet ist, um unterschiedliche Qualitäten im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel zu unterscheiden.

Demnach konnte bestätigt werden, dass es sich sowohl beim Bruchverhalten, als auch beim Klang einer Gesteinskörnung um aussagekräftige Kriterien zur Bewertung der Qualität von Gesteinskörnungen handelt. Welches letztlich die Qualität besser widerspiegelt, hängt von der Gesteinsart und dem zu beurteilenden Qualitätskriterium (FTW-Wert, FTS-Wert) ab.

Im Regelfall werden zur Unterscheidung zwischen „hell“ und „dumpf“ klingenden Körnern weniger die Zeit-, sondern vielmehr die Frequenzspektren, herangezogen. Bei der akustischen Resonanzanalyse

äußern sich die Frequenzen im Spektrum als Peaks, mit welchen ein Gegenstand bevorzugt schwingt, wenn er von außen angeregt wird (Resonanzfrequenzen) [86]. Die Anregung erfolgt im vorliegenden Fall direkt durch den „Hammerschlag“ im Einzelkornprüfgerät. Der Vorteil gegenüber der Beurteilung über das Zeitsignal ist, dass es sich bei den Resonanzfrequenzen um reine Materialkonstanten handelt, die nicht von der Position des Mikrophons abhängen und die dadurch einfacher zu reproduzieren sind.

Generell zeichnen sich „dumpfe“ Klänge durch niedrigere Resonanzfrequenzen aus, als „helle“ [vgl. hierzu auch 13]. Diese Tendenz konnte auch bei der Beurteilung von „hell“ und „dumpf“ klingenden Gesteinskörnern festgestellt werden. Hierzu ist in Abbildung 5-9 vergleichend das Frequenzspektrum eines „hell“ und eines „dumpf“ klingenden Kornes dargestellt.

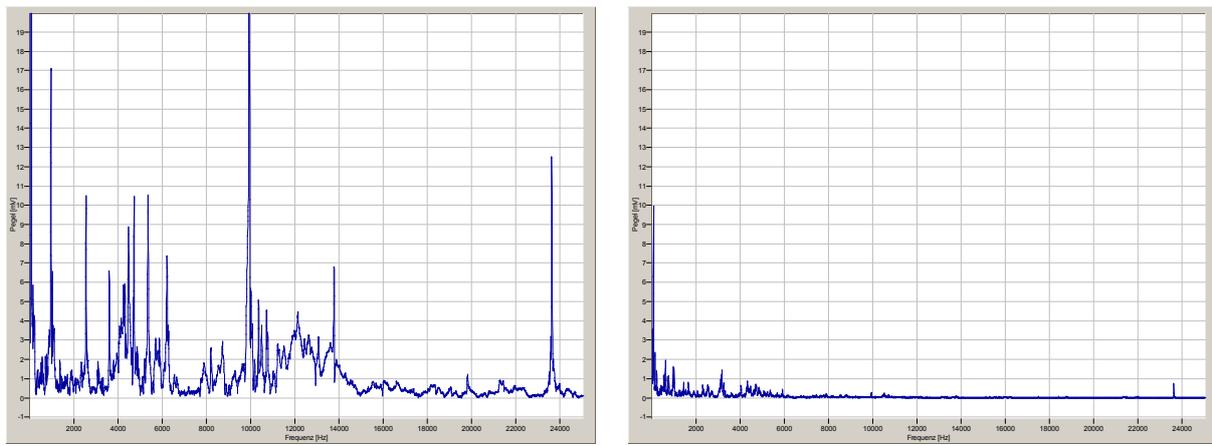


Abbildung 5-9: Typische Frequenzspektren bei der Prüfung eines „hell“ klingenden (links) und eines „dumpf“ klingenden Kornes (rechts) im Einzelkornversuch

Bei der Anregung durch den „Hammerschlag“ im Einzelkornprüfgerät ist eine Unterscheidung zwischen „hell“ und „dumpf“ klingenden Körnern durch die gemessenen Resonanzfrequenzen jedoch nicht immer möglich. Die Ursache hierfür liegt vermutlich darin, dass das „Eigengeräusch“ des Einzelkornprüfgerätes den Klang der Gesteinskörner überlagert bzw. übertönt und sich beide im Frequenzspektrum nicht eindeutig differenzieren lassen. Eine eindeutige Zuordnung der Frequenzen ist nicht möglich, da das Einzelkornprüfgerät kein einheitliches Resonanzfrequenzspektrum aufweist (vgl. Abbildung 5-10). Dies ist darauf zurückzuführen, dass, je nachdem wie das Fallgewicht durch die Führung gleitet bzw. in den Probenbehälter trifft, die Anregung unterschiedlich ist.

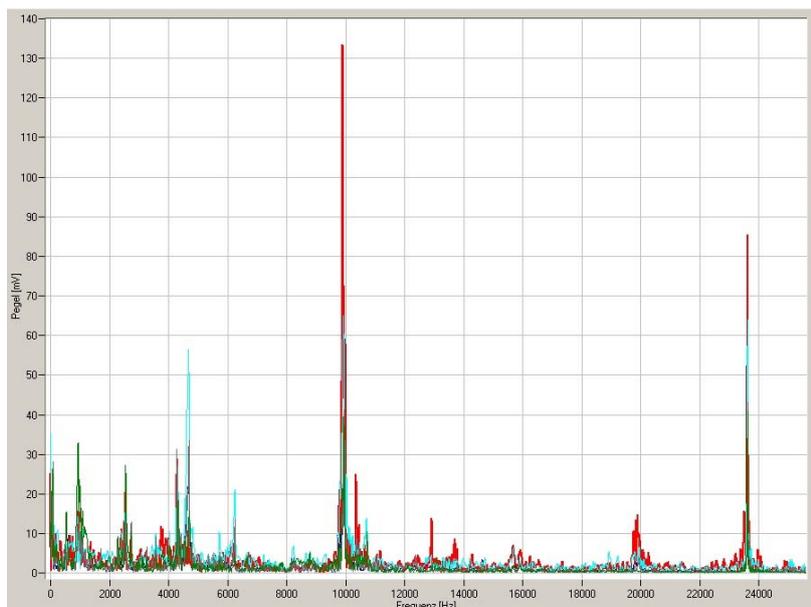


Abbildung 5-10: Frequenzspektrum des „Eigengeräusches“ des Einzelkornprüfgerätes (5 Einzelversuche)

Bereinigt man die gemessenen Resonanzspektren um die Frequenzen, die durch das Gerät hervorgerufen werden können, so bleiben nur selten charakteristische Resonanzfrequenzen übrig. Zieht man hingegen das unbereinigte Frequenzspektrum zur Bewertung heran, so gehen die Resonanzfrequenzen der Gesteinskörner im „Eigengeräusch“ des Einzelkornprüfgerätes unter (vgl. Anhang II Tabelle All-2).

Insgesamt ist eine Unterscheidung zwischen „hell“ und „dumpf“ klingenden Körnern mittels ihrer Resonanzfrequenzen prinzipiell möglich. Um dies gegebenenfalls auch bei der Prüfung mit dem Einzelkornprüfgerät anwenden zu können, bedarf es einer Lärmoptimierung des Gerätes.

Für die Beurteilung des Klanges von Gesteinskörnungen beim Einzelkornversuch im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle ist die akustische Resonanzanalyse prinzipiell denkbar, aber nicht zwingend notwendig. Nach den bisher vorliegenden Erkenntnissen ist der Mehraufwand im Vergleich zum Nutzen unverhältnismäßig hoch. Wie die Parallelisierung der Beurteilung des Klanges über die maximale Spannung im Zeitsignal und über das menschliche Gehör zeigt, kann die Beurteilung des Klanges von Gesteinskörnern im Einzelkornversuch über das menschliche Gehör als ausreichend erachtet werden. So führen beide Methoden zu vergleichbaren Ergebnissen (vgl. Abbildung 5-6). Unter dem Aspekt, das Verfahren zur Qualitätskontrolle möglichst einfach zu halten, wird im Rahmen dieser Arbeit mit der Beurteilung über das menschliche Gehör die weniger aufwändige Vorgehensweise weiterverfolgt. Eine Modifizierung bezüglich der Beurteilung des Klanges beim Einzelkornversuch – beispielsweise durch eine Lärmoptimierung des Gerätes in Verbindung mit einer umfassenden Betrachtung der Resonanzfrequenzspektren – kann gegebenenfalls zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen.

Versuchsdurchführung

Beim Einzelkornversuch sind mindestens 200 Körner der zu untersuchenden Gesteinskörnung zu prüfen. Auf jedes dieser Körner wird im Einzelkornprüfgerät einmalig ein definiertes Gewicht aus definierter Höhe fallen gelassen. Schließlich werden die Körner nach ihrem Klang beim Aufschlag des Gewichtes oder ihrem Bruchverhalten klassifiziert.

Welches Kriterium (z. B. „Anteil an dumpf klingenden Körnern“ oder „Anteil an Körnern in einer oder mehreren Einzelkornfestigkeitsklassen“) letztlich zur Beurteilung der Qualität einer Gesteinskörnung beispielsweise im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle heranzuziehen und damit zu bestimmen ist, ist abhängig von der Gesteinsart und der speziellen Fragestellung. Im Regelfall werden hierzu Körner der Einzelkornfestigkeitsklassen 6 und ggf. 4b und/oder „dumpf“ klingende Körner, zu rechnen sein. Bezeichnet wird der Anteil an „problematischen“ Körnern als **E**inzel**k**orn**f**estigkeitsindex (EKF-Index).

5.2.3 Erstellung einer Arbeitsanleitung für den Einzelkornversuch

5.2.3.1 Allgemeines

Ausgehend von der in Kapitel 5.2.2 angegebenen Vorgehensweise wird zunächst der Einfluss der versuchstechnischen Randbedingungen bestimmt. Dabei wird überprüft, inwieweit die Vorlagerung der Proben, die Gesteinsart, die Korngröße und die Kornform die Ergebnisse beeinflussen. Im Anschluss daran erfolgen Untersuchungen im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Hier wird sowohl der Aspekt der Vergleichspräzision als auch der Wiederholpräzision berücksichtigt. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden Festlegungen für den Einzelkornversuch getroffen, welche letztlich in die Arbeitsanleitung „Bestimmung des Einzelkornfestigkeitsindex im Einzelkornversuch“ einfließen.

5.2.3.2 Einfluss der Randbedingungen

Das Verfahren zur Bestimmung des Einzelkornfestigkeitsindex (EKF-Index) einer Gesteinskörnung soll dazu dienen, die Qualität von groben Gesteinskörnungen abzuschätzen. Hierfür gilt es vorab zu überprüfen, inwieweit die übrigen Merkmale der zu prüfenden Gesteinskörnung (v. a. Vorlagerung der Proben, Gesteinsart, Korngröße, Kornform, Vorlagerung) die Bewertung beeinflussen.

Vorlagerung

Der Mürbkornversuch wurde gemäß der zurückgezogenen Ö-NORM B 3304 [10] an wassergesättigten Proben durchgeführt. Hierbei müssen die Proben für 24 Stunden wassergelagert werden, bevor sie geprüft werden können. Da diese Vorgabe die Dauer des Versuches deutlich steigert und ein Versuch zur Qualitätssicherung im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle möglichst zeitnah und einfach durchgeführt werden sollte, wurde überprüft, inwieweit sich die Ergebnisse bei unterschiedlichen Wassergehalten unterscheiden und ob eine Prüfung im wassergesättigten Zustand tatsächlich notwendig ist, oder ob die Gesteinskörnungen auch im trockenen bzw. natürlichen Zustand geprüft werden können. Um dem nachzugehen, wurde an drei verschiedenen Gesteinsarten (Kalkstein, Quarz, Granit) vergleichend der EKF-Index (hier: Anteil der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6 sowie dumpf klingender Körner) an wassergesättigten und trockenen Proben bestimmt. Die Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Vorlagerung wurden an der Kornklasse 8/11 mm durchge-

führt, da diese eng gefasst ist und somit der mögliche Einfluss der Korngröße vernachlässigt werden kann. Gleichzeitig ist die Korngröße 8/11 mm eine gängige Prüfkornklasse und liegt im mittleren Korngrößenbereich. Die Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf die Abhängigkeit des Einzelkornversuches von der Vorlagerung sind in Abbildung 5-11 dargestellt.

8/11	EKF-Index [M.-%]	
	nass	trocken
Quarz	30	23
Granit	92	71
Kalkstein	4	6

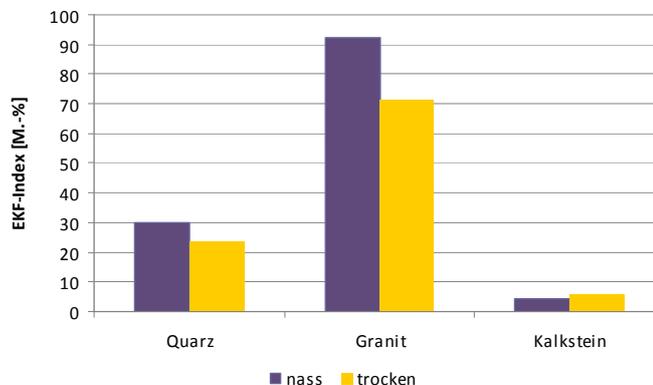


Abbildung 5-11: Tabellarische und graphische Darstellung der Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf die Abhängigkeit des Einzelkornversuches von der Vorlagerung (Prüfkornklasse 8/11 mm)

In wassergesättigten Gesteinskörnungen klingen und brechen „schwache Gesteinskörner“ teilweise anders als in trockenen Proben, was sich aber nicht zwingend in einer unterschiedlichen Beurteilung äußern muss. Der Unterschied zwischen dem Verhalten einer trockenen und einer wassergesättigten Probe fällt dabei bei verschiedenen Materialien unterschiedlich aus. So verhalten sich manche Gesteinskörnungen im wassergesättigten Zustand ähnlich wie im trockenen Zustand (hier z. B. der Kalkstein), andere zeigen ein deutlich verändertes Verhalten (hier v. a. der Granit). Große Unterschiede deuten auf eine hohe Wasseraufnahme bzw. Reaktivität der Gesteinskörnung mit Wasser hin.

Gesteinsart

Das Bruchverhalten eines Gesteinskornes beim Hammerschlag hängt nicht nur von seiner Qualität, sondern auch maßgebend von der Gesteinsart ab. Vergleicht man beispielsweise das Bruchverhalten eines Quarzes mit demjenigen eines Kalksteines, so brechen beide in der Regel von Grund auf völlig unterschiedlich (vgl. Abbildung 5-12). Dies gilt es bei der Beurteilung zwingend zu berücksichtigen.



Abbildung 5-12: Typisches Bruchverhalten eines spröden Quarzes (links) und eines Kalksteins (rechts)

Korngröße

In Anlehnung an die zurückgezogene Ö-NORM B 3304 ist der Einzelkornversuch ab einer Korngröße von 4 mm durchzuführen. Werden zwei unterschiedlich große Gesteinskörner gleicher Form durch die gleiche Kraft zerschlagen, so wird relativ betrachtet das kleinere Korn stärker beansprucht. Um dem entgegenzuwirken, werden im Einzelkornversuch Körner ≤ 8 mm mit einem Fallgewicht von 250 g und Körner > 8 mm mit einem Fallgewicht von 500 g beansprucht. Die Grenze zwischen beiden Messbereichen ist dabei sehr scharf. Innerhalb der Messbereiche wird nicht weiter differenziert und nach oben gibt es bis dato keine Grenzkorngröße. Folglich wird eine Gesteinskörnung 8/11 mm relativ betrachtet stärker beansprucht als eine Gesteinskörnung 11/16 mm, was sich auch in einem höheren EKF-Index äußern müsste.

Um den Einfluss der Korngröße auf den Einzelkornversuch zu überprüfen, wurde bei drei verschiedenen Gesteinsarten (Kalkstein, Quarz, Granit) der EKF-Index (hier: Anteil der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6 sowie dumpf klingender Körner) in unterschiedlichen Kornklassen bestimmt. Um eine Beeinflussung der Ergebnisse durch unterschiedliche Vorbelastungen zu minimieren, wurden dabei die verschiedenen Kornklassen auf die gleiche Art und Weise aufbereitet und es wurden nur „gut geformte“ Körner nach DIN EN 933-4 [44] geprüft. Der Kornklassenbereich ≤ 8 mm wurde in die Kornklassen 5/6 und 6/8 mm unterteilt und bei den Körnern > 8 mm wurden die Kornklassen 8/11, 11/16 und 16/22 mm untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchungen bezüglich der Korngrößenabhängigkeit des Einzelkornversuches sind in den Abbildungen 5-13 und 5-14 zusammengefasst.

Fallgewicht 250 g	EKF-Index [M.-%]	
	5/6	6/8
Quarz	41	17
Granit	100	98
Kalkstein	57	20

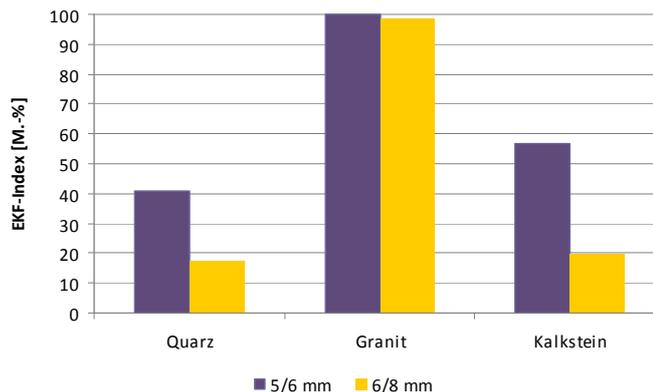


Abbildung 5-13: Tabellarische und graphische Darstellung der Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf die Korngrößenabhängigkeit des Verfahrens im Bereich von 5 bis 8 mm (Fallgewicht 250 g)

Fallgewicht 500 g	EKF-Index [M.-%]		
	8/11	11/16	16/22
Quarz	30	7	0
Granit	92	27	9
Kalkstein	4	0	0

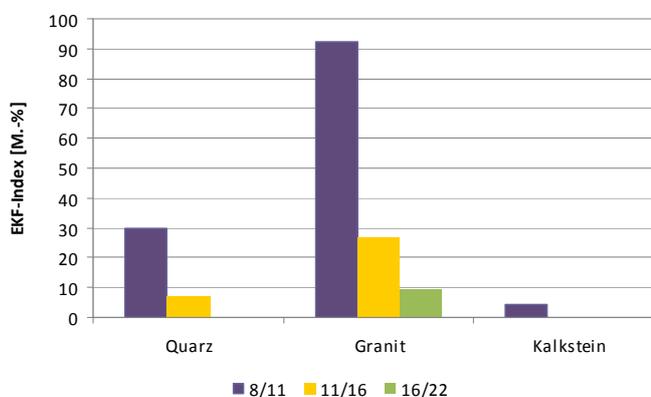


Abbildung 5-14: Tabellarische und graphische Darstellung der Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf die Korngrößenabhängigkeit des Verfahrens im Bereich von 8 bis 22 mm (Fallgewicht 500 g)

Aufgrund der unterschiedlichen Fallgewichte sind die Ergebnisse der Kornklassen ≤ 8 mm nicht direkt mit denjenigen der Kornklassen > 8 mm vergleichbar. Betrachtet man beide Bereiche getrennt voneinander, so wurden in der Regel für die jeweils kleineren Korngrößen höhere EKF-Indizes bestimmt als für die gröberen. Beim Granit unterscheiden sich die EKF-Indizes der Kornklassen 5/6 und 6/8 mm kaum. Mit einem EKF-Index von annähernd 100 M.-% ist hier die Qualität für eine Differenzierung zu gering (bzw. die Masse des Fallgewichtes zu hoch). Ähnliches gilt für Gesteinskörnungen sehr hoher Qualität. Enthält eine Gesteinskörnung keine „qualitativ minderwertigen“ Körner, so äußert sich dies durch ähnlich niedrige Werte über verschiedene Kornklassen (vgl. Kalkstein in den Kornklassen 11/16 und 16/22 mm). Darüber hinaus konnte bestätigt werden, dass bei konstantem Fallgewicht mit zunehmender Korngröße die Differenzierung der Ergebnisse geringer wird. So wurden in der Kornklasse 8/11 mm für die verschiedenen Gesteinskörnungen EKF-Indizes zwischen 4 und 92 M.-% ermittelt, während in der Kornklasse 16/22 mm die Werte nur noch von 0 bis 9 M.-% reichen. Ursächlich für die geringe Differenzierung bei gröberen Kornklassen ist die Tatsache, dass für Gesteinskörnungen > 16 mm die Beanspruchung durch ein Fallgewicht von 500 g relativ gering ist. Der Einzelkornversuch sollte daher vorzugsweise an Kornklassen zwischen 4 und 16 mm durchgeführt werden. Zusammen-

fassend konnte bestätigt werden, dass der Einzelkornversuch stark korngößenabhängig ist: Je feiner die Prüfkornklasse ist, desto stärker ist die Belastung und desto höher ist damit der EKF-Index. Um dem entgegenzuwirken müsste theoretisch das Fallgewicht möglichst stufenlos auf die jeweilige Korngröße abgestimmt werden.

Kornform

Gleichzeitig ist zu erwarten, dass der Einzelkornversuch von der Form der zu prüfenden Gesteinskörnung abhängt. Ein plattiges Korn erfährt eine andere Beanspruchung als ein vergleichbares gedrungenes Korn. In der Regel verfügen gedrungene Gesteinskörner über eine höhere Qualität als plattige Körner. Bei plattigen Körnern kommt der Orientierung der Körner bei der Prüfung eine entscheidende Rolle zu.

Inwieweit eine unterschiedliche Kornform der Gesteinskörner den EKF-Index (hier: Anteil der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6 sowie dumpf klingender Körner) beeinflusst, wurde an drei verschiedenen Gesteinsarten (Kalkstein, Quarz, Granit) untersucht. Als Prüfkornung wurde die Kornklasse 8/11 mm gewählt, da diese eng gefasst ist und somit der Einfluss der Korngröße vernachlässigt werden kann. Gleichzeitig ist die Korngröße 8/11 mm eine gängige Prüfkornklasse und liegt im mittleren Korngrößenbereich. Aus dieser Kornklasse wurden jeweils die „schlecht“ und „gut geformten Körner“ nach DIN EN 933-4 [44] aussortiert und getrennt voneinander geprüft („100 % gut geformt“ und „100 % schlecht geformt“). „Gut geformt“ sind gedrungene Körner mit einem Verhältnis von maximaler Länge zu minimaler Breite von $\leq 3:1$, ist das Verhältnis $> 3:1$, dann gelten die Körner als „schlecht geformt“ (plattig oder spießig). Die „schlecht geformten“ Gesteinskörner wurden stets flach in den Probebehälter eingelegt. Die Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf die Abhängigkeit des Einzelkornversuches von der Kornform sind in Abbildung 5-15 dargestellt.

8/11 (Fallgewicht 500 g)	EKF-Index [M.-%]	
	100 % gut geformt	100 % schlecht geformt
Quarz	30	22
Granit	92	81
Kalkstein	4	26

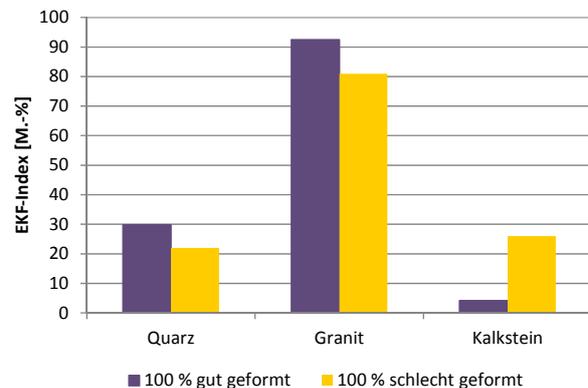


Abbildung 5-15: Tabellarische und graphische Darstellung der Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf die Kornformabhängigkeit des Einzelkornversuches (Prüfkornklasse 8/11 mm)

Die Ergebnisse der Prüfungen an „gut geformten“ gegenüber „schlecht geformten“ Gesteinskörnungen unterscheiden sich deutlich, wobei keine eindeutige Tendenz erkennbar ist. Während beim Quarz und beim gebrochenen Granit der EKF-Index bei den „gut geformten Körnern“ höher liegt als bei den „schlecht geformten Körnern“, zeigt sich beim gebrochenen Kalkstein die umgekehrte Tendenz. Folglich scheinen sich hier mehrere Einflussfaktoren zu überlagern. Um dies im Detail nachvollziehen zu können, müssten womöglich die „schlecht geformten Körner“ genauer differenziert werden. Sehr

detailliert mit der Frage, inwieweit die Kornform und die Aufbereitung das Festigkeitsverhalten von Gesteinskörnungen beeinflusst, beschäftigten sich LEINS & AL. [84] und FEIX [85].

5.2.3.3 Reproduzierbarkeit der Untersuchungsergebnisse

Ein wichtiges Kriterium für ein neues Prüfverfahren ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Diese spiegelt sich in der Wiederholpräzision und der Vergleichspräzision eines Verfahrens wider. Erste Hinweise auf die Wiederholpräzision sollen fünf Einzelversuche an drei verschiedenen Gesteinskörnungen (Kalkstein, Basalt, Granit) liefern. Um auch den Einfluss des Bearbeiters abschätzen zu können, wurde der EKF-Index (hier: Anteil an Körnern der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6 sowie dumpf klingender Körner bzw. Anteil an Körnern der Einzelkornfestigkeitsklassen 6) von drei verschiedenen Laboranten bestimmt. Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

8/11	EKF-Index ¹⁾ [M.-%]		
	Granit	Basalt	Kalkstein
	Probe 1	92	9
Probe 2	89	10	24
Probe 3	93	10	23
Probe 4	91	9	27
Probe 5	91	9	28
Mittelwert	91	10	25
Minimum	89	9	23
Maximum	93	10	28

8/11	EKF-Index [M.-%]					
	Granit		Basalt		Kalkstein	
	1)	2)	1)	2)	1)	2)
Laborant 1	21	2	0	0	14	1
Laborant 2	25	3	2	1	19	3
Laborant 3	13	1	0	0	10	2
Mittelwert	20	2	1	0	14	2
Minimum	13	1	0	0	10	1
Maximum	25	3	2	1	19	3

¹⁾ Anteil an Körnern der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b, 6 sowie dumpf klingender Körner

²⁾ Anteil an Körnern der Einzelkornfestigkeitsklasse 6

Tabelle 5-1: *Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse des Einzelkornversuches (Prüfkornklasse 8/11 mm)*

Theoretisch müssten durch die vollzogenen Modifikationen die Ergebnisse des Einzelkornversuches im Vergleich zum ursprünglichen Mürbkornversuch mit dem Hammerschlag nach Ö-NORM 3304 [10] besser reproduzierbar sein. Grundlegend hierfür ist die Vereinheitlichung der Beanspruchung, wodurch die verfahrensbedingte Unsicherheit einzig und allein auf die Subjektivität bei der Beurteilung reduziert werden konnte. Auch die Beurteilung konnte durch eine genauere Differenzierung der möglichen Bruchbilder verbessert werden (vgl. Kapitel 5.2.2). Erschwert wird die Interpretation der Reproduzierbarkeit dadurch, dass die Selben Proben beim Einzelkornversuch nicht mehrfach geprüft werden können. Dadurch lassen sich die natürlichen Inhomogenitäten der Gesteinskörnungen nicht „ausschalten“, so dass diese die verfahrensbedingte Unsicherheit überlagern.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Ergebnisse prinzipiell gut reproduziert werden können, solange die Prüfung durch die gleiche Person erfolgt und diese über ausreichend Erfahrung im Hinblick auf die Beurteilung verfügt. Wie grundlegend die Erfahrung des Bearbeiters auch beim Einzelkornversuch ist, wird durch die Ergebnisse der Versuchsreihe mit unterschiedlichen Laboranten deutlich. Hierzu ist an-

zumerken, dass die Laboranten als Grundlage für die Versuchsdurchführung nur die Arbeitsanleitung (vgl. Anhang IV) erhalten haben und bislang über nahezu keine Erfahrung mit diesem Verfahren verfügten. Dabei zeigen die Untersuchungsergebnisse, dass insbesondere die Abgrenzung des Anteils der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6 (inkl. der „dumpf“ klingenden Körner) ohne genauere Einweisung schwierig ist. So weichen hier die Ergebnisse der unterschiedlichen Laboranten deutlich voneinander ab. Im Gegensatz dazu stimmen die Ergebnisse im Hinblick auf den Anteil an Körnern der Einzelkornfestigkeitsklasse 6 bei allen Laboranten sehr gut überein. Folglich lässt sich dieser offensichtlich relativ einfach und eindeutig bestimmen.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse des Einzelkornversuches gut reproduzierbar sind, soweit die Beurteilungskriterien genau genug definiert wurden und genügend Erfahrung im Hinblick auf die Bewertung vorhanden ist.

5.2.3.4 Folgerungen für den Einzelkornversuch

Das Bruchverhalten eines Gesteinskorns hängt maßgeblich von der Gesteinsart ab. Dies gilt es bei der Beurteilung zu berücksichtigen.

Daneben ist der Einzelkornversuch stark Korngrößenabhängig. Um die Beeinflussung der Untersuchungsergebnisse durch unterschiedliche Korngrößen zu minimieren, sollte für vergleichende Untersuchungen im Hinblick auf die Qualität von Gesteinskörnungen immer die gleiche, möglichst eng gefasste Prüfkörnung gewählt werden (z. B. hier 8/11 mm). Zielführend ist der Einzelkornversuch generell in einem Korngrößenbereich von 4 bis 16 mm.

Da die Kornform einer Gesteinskörnung maßgeblich von der Aufbereitung abhängt und die Ergebnisse des Einzelkornversuches durch die Kornform beeinflusst werden, sind vergleichende Untersuchungen möglichst an identisch aufbereiteten Proben durchzuführen.

Die Prüfung ist sowohl an trockenen als auch an wassergesättigten Proben durchführbar. Welche der beiden Varianten zu bevorzugen ist, ist abhängig von der Gesteinsart und der Fragestellung.

Die Bewertung des Einzelkornversuches ist subjektiv. Die Ergebnisse sind gut reproduzierbar, sofern der Bearbeiter diesbezüglich über ausreichend Erfahrung verfügt. Bei unterschiedlichen Bearbeitern bedarf es zwingend eines Abgleichs der Bewertungskriterien.

Indem der Einzelkornversuch im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle und damit nur innerhalb eines Gesteinsvorkommens angewendet werden soll, entfällt mit der Gesteinsabhängigkeit die größte Schwierigkeit des Verfahrens. Darüber hinaus wird der Versuch hier in der Regel stets durch die gleiche Person durchgeführt, so dass auch der zweite Hauptkritikpunkt, der große Einfluss durch den Bearbeiter, deutlich minimiert werden kann. Auch die Forderungen, den Versuch aufgrund der Abhängigkeit durch die Kornform und die Korngröße an identisch aufbereiteten Proben der gleichen Kornklasse durchzuführen, ist bei einem Einsatz des Versuches im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle gegeben. Im Hinblick auf die Vorlagerung der Proben ist nicht entscheidend, ob die Prüfung im trockenen oder wassergesättigten Zustand, sondern dass die Prüfung stets unter den gleichen Rahmenbedingungen durchgeführt wird. Bei vergleichbarer Aussagekraft ist die Prüfung an der trockenen Probe aufgrund der Zeitersparnis zu bevorzugen.

5.2.3.5 Arbeitsanleitung

Die gewonnenen Erkenntnisse und die aufgeführten Modifikationen des Mürbkornversuches wurden in die zurückgezogene Ö-NORM B 3304 [10] integriert, so dass eine neue Anleitung als Arbeitsgrundlage entstanden ist, welche die Probenvorbereitung, die Versuchsanordnung, die Vorgehensweise und die Auswertung beim Einzelkornversuch regelt. Die Arbeitsanleitung zur „Bestimmung des Einzelkornfestigkeitsindex im Einzelkornversuch“ ist der vorliegenden Arbeit im Anhang IV beigelegt.

Ein allgemeingültiges Schema zur Beurteilung des Anteils an „problematischen“ Körnern, der durch den EKF-Index erfasst wird, ist u. a. aufgrund der starken Gesteinsabhängigkeit des Verfahrens nicht zielführend und daher in der Arbeitsanleitung auch nicht enthalten. So ist für jede Fragestellung gesondert zu entscheiden, wie sich ein „problematisches“ Korn beispielsweise im Hinblick auf das Verhalten einer Gesteinskörnung bei Frost-Tausalz-Beanspruchung äußert und durch welches Bewertungskriterium beim Einzelkornversuch man dieses am besten fassen kann. Die Arbeitsanleitung beschreibt lediglich die Durchführung des Einzelkornversuches und zeigt mögliche Kriterien für die letztlich individuelle Bewertung auf.

5.2.4 Möglichkeiten der Weiterentwicklung des Einzelkornversuches

Ziel der Arbeit war es ein einfaches und kostengünstiges Verfahren zu entwickeln, das den Gesteinskörnungsproduzenten die zeitnahe und gezielte Bewertung der Qualität des produzierten Materials im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle ermöglicht. Unter Berücksichtigung dieser Auflagen wurde der Einzelkornversuch entwickelt. Besonders wurde darauf geachtet, dass das Verfahren im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle Anwendung finden soll und damit möglichst unempfindlich, einfach zu handhaben und kostengünstig sein soll. Kosten und Nutzen sollen in einem optimalen Verhältnis zueinander stehen.

Müssten diese Auflagen nicht eingehalten werden, so gäbe es verschiedene Ansatzpunkte, den Einzelkornversuch weiter zu optimieren:

- Um den Aufwand für den Bearbeiter zu reduzieren, könnte das Hochziehen und Auslösen des Fallgewichtes im Einzelkornversuch elektronisch gesteuert und damit automatisiert werden. Dies geht mit einer Erhöhung der Herstellungskosten einher, präzisiert das Ergebnis jedoch nicht.
- Bei elektronischer Steuerung wäre es möglich, das Gerät so zu entwickeln, dass Fallhöhe und Fallgewicht (stufenlos) variiert werden können. Denkbar wäre auch eine automatische Anpassung des Fallgewichtes (oder auch der Fallhöhe) in Abhängigkeit von der Korngröße, welche beispielsweise photooptisch bestimmt werden könnte. Mit einer solchen Anordnung könnte der Einfluss der Korngröße auf die Untersuchungsergebnisse minimiert und die Ergebnisse unterschiedlicher Korngrößen direkt vergleichbar gemacht werden (vgl. Kapitel 5.2.3.2).
- Bezüglich der Beurteilung der Körner nach ihrem Klang besteht ebenfalls noch die Möglichkeit der Weiterentwicklung. Hier könnte vor allem der Ansatz weiterverfolgt werden, den Klang über die Resonanzfrequenzen zu charakterisieren. Hierzu ist es jedoch zwingend erforderlich, das Einzelkornprüfgerät hinsichtlich seines „Eigengeräusches“ zu optimieren. Dies wäre auch

im Hinblick auf die Lärmbelastung und somit unter dem Aspekt des Arbeitsschutzes zu begrüßen.

- Bei der Beurteilung der Körner im Einzelkornversuch nach ihrem Bruchverhalten könnten photooptische Auswertungen oder Siebungen hilfreich sein.

Letztlich gilt es jedoch zu berücksichtigen, dass der Einzelkornversuch gesteinsabhängig ist und daher keine allgemeingültige Standardisierung des Verfahrens möglich ist.

5.3 Anwendungsmethodik

5.3.1 Systematik

Prinzipiell werden die technischen Eigenschaften von Gesteinskörnungen mittels verschiedener Prüfverfahren in Zahlen gefasst, um die verschiedenen Gesteinskörnungen unter ingenieurtechnologischen Aspekten vergleichen zu können [87]. Die Charakterisierung jeder gesteintechnischen Eigenschaft erfolgt im Regelfall durch normierte Verfahren. Je nach Einsatzbereich werden unterschiedliche Anforderungen an Gesteinskörnungen gestellt, die über Anforderungskriterien definiert werden. Diese sind in den jeweils geltenden Anwendungsnormen festgelegt. Exemplarisch sind in Tabelle 5-2 die Anforderungen nach Anhang A der TL Beton-StB [29] im Hinblick auf den Widerstand gegen Zertrümmerung, den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel und den Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung aufgeführt, wie sie bundesweit für Gesteinskörnungen für den Anwendungsbereich Fahrbahndecken aus Beton gelten.

	Betontragschicht	Unterbeton	Oberbeton
Widerstand gegen Zertrümmerung	Gesteinsbezogen gemäß Anhang A der TL Gestein-StB		
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel	F ₄ (d. h. Absplitterung ≤ 4 M.-%)	F ₂ (d. h. Absplitterung ≤ 2 M.-%)	-
Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung	-	-	Absplitterung ≤ 8 M.-%; bzw. ≤ 5 M.-%*

*für Klimazone III (RStO) [68]

Tabelle 5-2: Anforderungen für Fahrbahndecken aus Beton nach Anhang A der TL Beton-StB [29]

Im Rahmen der CE-Kennzeichnung (Konformitätsnachweis 2+) ist der Produzent vertraglich verpflichtet, seine Produkte zu deklarieren, d. h. sie bezüglich ihrer Eigenschaften in Qualitätskategorien einzuordnen, denen sie auf jeden Fall entsprechen. Aus diesen deklarierten Kategorien ergeben sich die möglichen Einsatzbereiche.

Um sicherzustellen, dass die von ihm hergestellten Produkte die deklarierten Anforderungen erfüllen, muss der Hersteller eine werkseigene Produktionskontrolle installieren und durchführen. Hierbei wird die Qualität der Gesteinskörnungen überprüft und dokumentiert. Der Prüfumfang (zu überprüfende Eigenschaft, Prüfverfahren und Mindestprüfhäufigkeit) hängt vom Anwendungsgebiet ab und ist in den jeweils anzuwendenden Regelwerken beschrieben. Exemplarisch ist in Tabelle 5-3 die im Rahmen

der Werkseigenen Produktionskontrolle vorgeschriebene Mindestprüfhäufigkeit ausgewählter Eigenschaften von Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 [5] aufgeführt.

Eigenschaft	Mindestprüfhäufigkeit
Stoffliche Kennzeichnung	alle 3 Jahre
Rohdichte	1 mal im Jahr
Korngrößenverteilung	1 mal in der Woche
Kornform von groben Gesteinskörnungen	1 mal im Monat
Wasseraufnahme als Kriterium für den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel	1 mal im Jahr
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel	1 mal alle 2 Jahre
Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung	1 mal alle 2 Jahre

Tabelle 5-3: Im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle vorgeschriebene Mindestprüfhäufigkeit ausgewählter Eigenschaften von Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 [Auszug aus 30]

Der Hersteller kann die geforderten Prüfungen selbst durchführen oder sie an Unterauftragnehmer vergeben. Dabei werden die weniger aufwändigen und häufig durchzuführenden Prüfungen, wie beispielsweise die Korngrößenverteilung oder die Bestimmung der Kornform, vor Ort durchgeführt, während die aufwändigen Verfahren, wie die Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung oder gegen Frost-Tau-Wechsel oder Frost-Tausalz-Beanspruchung, an Prüfstellen vergeben werden müssen. Diese Versuche werden in der Regel im Zuge einer Freiwilligen Produktprüfung (FPP) durchgeführt, bei der alle relevanten Kriterien eines Produktes durch eine zertifizierte Prüfstelle überprüft werden.

Die Charakterisierung und Deklaration von Gesteinskörnungen im Hinblick auf das Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung sollte – wie im Rahmen dieser Arbeit gezeigt werden konnte – über die Dosenfrostversuche erfolgen. Die Einhaltung der deklarierten Werte (FTW-Wert bzw. FTS-Wert) ist im Anwendungsbereich Straßenbeton (vgl. Tabelle 5-2 und 5-3) alle zwei Jahre nachzuweisen.

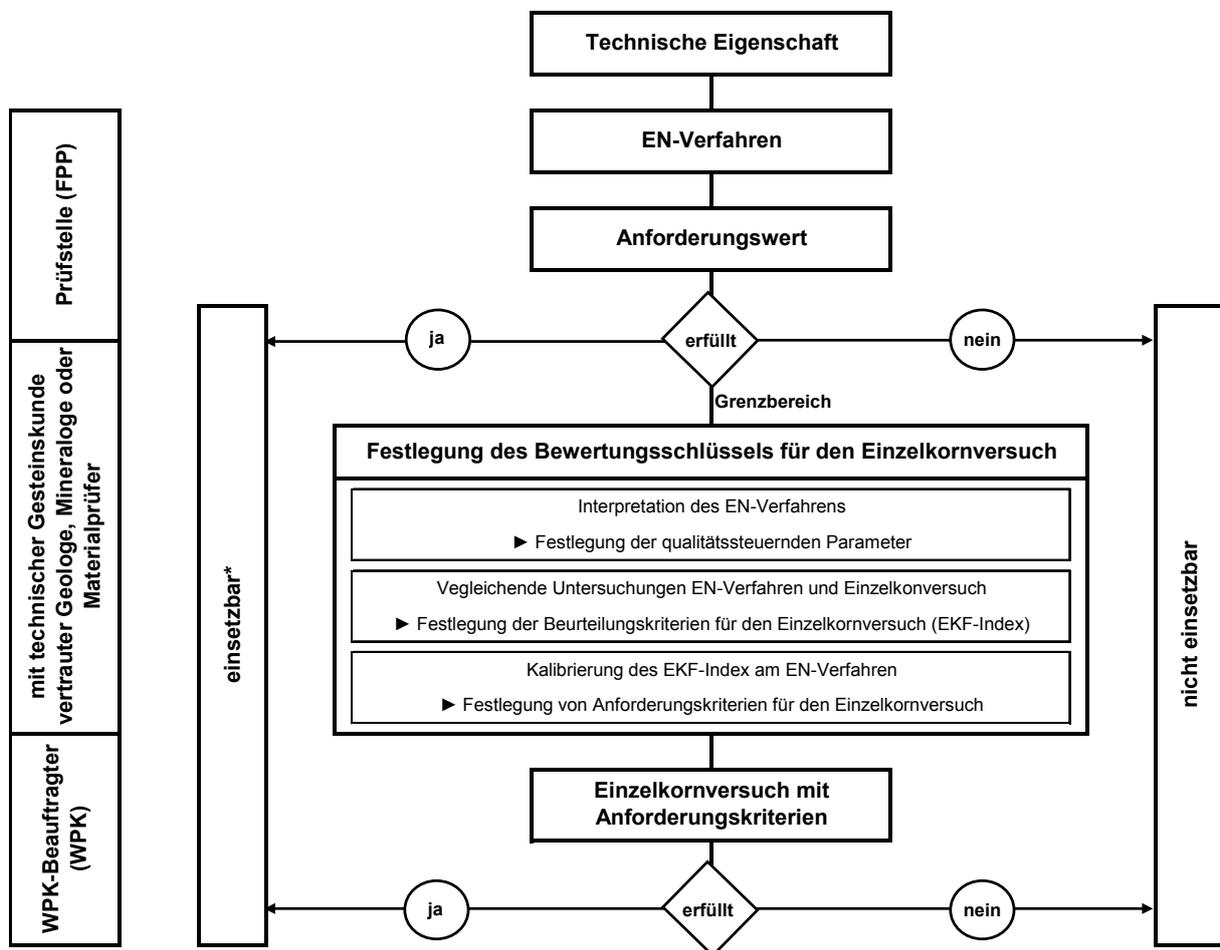
Je nach den natürlichen Begebenheiten eines Vorkommens kann dieses weitmaschige Kontrollsystem eine ausreichende Sicherheit für den Produzenten liefern oder nicht. Handelt es sich beispielsweise um ein sehr homogenes Vorkommen, bei dem die ermittelten Werte eindeutig der geforderten Kategorie entsprechen, so kann das Material bedenkenlos im entsprechenden Anwendungsbereich eingesetzt werden. Genauso gibt es den umgekehrten Fall, dass die Qualität des Materials auf keinen Fall einer bestimmten Kategorie entspricht.

In vielen Fällen ist eine solch allgemeingültige Aussage jedoch nicht möglich, insbesondere wenn es sich um Vorkommen mit verschiedenen Gesteinsvarietäten unterschiedlicher Qualität oder um Gesteinskörnungen nahe am deklarierten Wert handelt. Das Ziel muss es sein, die Materialien möglichst hochwertig einzusetzen, aber nur wenn sichergestellt ist, dass sie für den jeweiligen Anwendungsbereich auch geeignet sind. Dazu benötigt der Produzent ein Verfahren, das er vor Ort in seine

Werkseigene Produktionskontrolle integrieren kann und das ihm die zeitnahe Beurteilung der Qualität der produzierten Materialien ermöglicht.

Die normierten Verfahren scheiden hierfür aus, da sie zu aufwändig sind und es vor allem zu lange dauert, bis die Ergebnisse vorliegen (z. B. drei Wochen bei den Dosenfrostversuchen). Verfügt ein Betrieb über einen werkseigenen „mit technischer Gesteinskunde vertrauten Geologen, Mineralogen oder Materialprüfer“ (nach DIN 52106 [60]), so könnte dieser die Qualität direkt abschätzen und beurteilen. Voraussetzung ist, dass es ihm möglich ist, die Ergebnisse aus der normierten Prüfung petrographisch nachzuvollziehen.

Da jedoch die wenigsten Betriebe über einen solchen Fachmann verfügen und sich die Beurteilung anhand petrographischer Aspekte für Außenstehende nur schwer nachvollziehen lässt, wurde ein System entwickelt, bei dem die Beurteilung durch einen WPK-Beauftragten (Beauftragten für die Werkseigene Produktionskontrolle) erfolgt und gleichzeitig für jedermann nachvollziehbar ist. Dieses ist in Abbildung 5-16 schematisch dargestellt.



* nach vorgeschriebenem Prüfzyklus mit EN-Verfahren zu überprüfen

Abbildung 5-16: Systematik zur Qualitätssicherung im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle

Die grundlegende Idee dabei ist es, den für die zu überprüfende technische Eigenschaft einer Gesteinskörnung qualitätssteuernden Parameter in einem einfachen Versuch kenntlich zu machen und diesen zur Beurteilung heranzuziehen.

Hierfür müssen zunächst die qualitätssteuernden Parameter eines Vorkommens identifiziert und festgelegt werden. Dies kann am besten durch die Interpretation der Ergebnisse des normierten Verfahrens (hier: Dosenfrostverfahren) durch einen „mit technischer Gesteinskunde vertrauten Geologen, Mineralogen oder Materialprüfer“ erfolgen [nach 60]. Ziel ist es herauszufinden, welche Gesteinsvarietäten die Qualität herabsetzen und damit problematisch sind.

Gelingt dies, so gilt es im zweiten Schritt ein Beurteilungskriterium zu finden, wie man diese Körner durch ein einfaches Verfahren kenntlich machen kann. Hierfür sind vergleichende Betrachtungen zwischen dem einfachen Verfahren und dem normierten Verfahren notwendig. Als einfaches Verfahren zur Überprüfung der Qualität von Gesteinskörnungen wurde der Einzelkornversuch entwickelt (vgl. Kapitel 5.2). Der Anteil an „problematischen“ Körnern spiegelt sich im EKF-Index wider.

Im nächsten Schritt muss überprüft werden, wie groß der Anteil an solchen „problematischen“ Körnern (EKF-Index) in einer Probe sein darf, damit sie den deklarierten Anforderungswert auf jeden Fall erfüllt. Dies muss für jede Fragestellung eigens festgelegt werden, was einer „Kalibrierung“ des einfachen Verfahrens am normierten Verfahren entspricht.

Die Anbindung des Einzelkornversuches an die normierte Prüfung ist der maßgebende Unterschied und Fortschritt zur bisherigen Vorgehensweise bei der Verwendung von Hilfsgrößen (Wasseraufnahme nach DIN EN 12620, Anhang F [5], Mürbkornversuch nach ehemaliger Ö-NORM B 3304 [10], petrographische Beurteilung nach SN 670 115 [57]) zur Charakterisierung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung. So wurden bisher stets die absoluten Werte (Wasseraufnahme, Anteil an mürbem Korn bzw. petrographisch ungeeigneter Anteil) für die diesbezügliche Beurteilung herangezogen, was nachweislich zu Fehleinschätzungen führen kann. Ursächlich hierfür ist, dass alle Gesteinsarten nach den gleichen Kriterien beurteilt wurden und das grundsätzlich unterschiedliche Verhalten verschiedener Gesteinsarten unberücksichtigt blieb. So wurden nicht die tatsächlich „problematischen“ Körner erfasst, sondern allgemein definierte „mürbe“ bzw. „petrographisch ungeeignet Körner“. Vergleichende Untersuchungen zwischen Dosenfrostversuchen einerseits und dem Mürbkornversuch bzw. der petrographischen Beurteilung andererseits zeigten jedoch, dass je nach Gesteinsart (und Fragestellung) „problematische“ Körner völlig unterschiedlich definiert werden müssen. Dies wird nun durch die Anbindung und Kalibrierung des Einzelkornversuches an das normierte Verfahren gewährleistet.

Somit wird durch einen „mit technischer Gesteinskunde vertrauten Geologen, Mineralogen oder Materialprüfer“ [nach 60] ein werkseigenes Anforderungskriterium mit dazugehörigem Bewertungsschlüssel für den Einzelkornversuch festgelegt, der es dann dem WPK-Beauftragten ermöglicht, die Qualität des produzierten Materials im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle zeitnah zu kontrollieren und selbst zu beurteilen. Folglich kann der Hersteller gegebenenfalls zeitnah in die Produktion eingreifen und die Qualitätssicherheit wird erhöht.

Die erfolgreiche Installation eines solchen Nachweissystems ergänzt die normative Vorgehensweise. Durch sie kann eine höhere Liefer- und Gebrauchssicherheit erreicht werden. Die Tatsache, dass Produkte sachgerecht eingesetzt werden, sollte sich langfristig positiv auf die Dauerhaftigkeit damit hergestellter Baustoffgemische (z. B. von Betonen) auswirken und damit dem nachhaltigen Bauen dienen. Daneben bringt ein solches System auch wirtschaftliche Vorteile.

5.3.2 Anwendungsgrenzen

Voraussetzung für die vorgestellte Anwendungsmethodik ist, dass sich von den Untersuchungen am Einzelkorn auf das Verhalten der Gesteinskörnung als Ganzes schließen lässt bzw. dass das Verhalten der Einzelkörner als Qualitätskriterium für die jeweilige Gesteinskörnung geeignet ist. Dies ist beim Verhalten von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung im Regelfall gegeben [88, 62, 89, 90].

Wie auch die bisher teilweise zur Beurteilung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung herangezogenen Hilfsgrößen, eignet sich der Einzelkornversuch alleine nicht, das Verhalten verschiedener Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung zu charakterisieren. Stattdessen ist der Einzelkornversuch als Hilfsversuch im Rahmen der Werks-eigenen Produktionskontrolle zu sehen, die Qualität von Gesteinskörnungen innerhalb eines Vorkommens zu überprüfen. Voraussetzung hierfür ist die Anbindung an das maßgebende normierte Verfahren (z. B. Dosenfrostversuch), wobei für jede Fragestellung eigene Beurteilungskriterien und Anforderungswerte zu definieren sind.

Da der Einzelkornversuch stark gesteinsabhängig ist, sind der Anwendung der vorgestellten Methodik zur Beurteilung der Qualität von Gesteinskörnungen Grenzen gesetzt. So deutet der fehlende Zusammenhang bei den Kiesen zwischen den ermittelten Mürbkorngehalten und den jeweiligen Ergebnissen der normierten Verfahren an, dass es sehr aufwändig und schwierig ist, heterogen zusammengesetzte Gesteinskörnungen zu beurteilen (vgl. Anhang I Abbildung AI-17, Tabelle AI-13). Ursächlich hierfür ist das von Grund auf sehr unterschiedliche Verhalten verschiedener Gesteinsarten im Einzelkornversuch. Theoretisch müsste hierbei für jede Gesteinsart ein eigenes Beurteilungskriterium definiert werden, was die Prüfung wieder sehr kompliziert und nur für einen Fachmann handhabbar machen würde. Dies entspricht jedoch nicht der Zielsetzung. Bei gebrochenen Natursteinen oder homogen zusammengesetzten Kiesen funktioniert das Verfahren hingegen in der Regel gut.

5.3.3 Weitere Anwendungsmöglichkeiten des Verfahrens

Entwickelt wurde die vorgestellte Anwendungsmethodik mit dem Einzelkornversuch primär zur Qualitätssteuerung und -sicherung von Gesteinskörnungen für Beton im Hinblick auf ihr Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung.

Angewendet werden kann sie aber nicht nur für Gesteinskörnungen für Beton, sondern in allen Bereichen, bei denen für die Beurteilung der Qualität einer Gesteinskörnung die Dosenfrostversuche herangezogen werden. Dies gilt beispielsweise für Gesteinskörnungen für Asphalt und Baustoffgemische für Schichten ohne Bindemittel. Theoretisch besteht auch die Möglichkeit, das System auf Versuche am Baustoffgemisch (z. B. Beton, Asphalt) zu beziehen.

Darüber hinaus kann die prinzipielle Vorgehensweise eventuell auch auf andere technische Eigenschaften übertragen werden. Aufgrund der vergleichbaren Beanspruchungsart beim Einzelkornversuch und beim Schlagversuch liegt es beispielsweise nahe, den Einzelkornversuch zur Qualitätssicherung und -steuerung im Hinblick auf den Widerstand gegen Zertrümmerung, bei dem es sich auch um ein entscheidendes Qualitätskriterium handelt, heranzuziehen. Dass dies gut funktionieren müsste, deutet schon der relativ gute allgemeingültige Zusammenhang zwischen dem Schlagzertrümmerungswert und dem Mürbkorngehalt an (vgl. Kapitel 3.2.1.3; Anhang I Abbildung AI-17). Der Hauptunterschied zwischen beiden Verfahren liegt darin, dass beim Schlagversuch das Verhalten der gesamten Gesteinskörnung und beim Einzelkornversuch das Verhalten der einzelnen Körner betrachtet werden. Entscheidend für eine erfolgreiche Implementierung des Einzelkornversuches in die werkseigene Produktionskontrolle ist hier daher, ob sich aus den Untersuchungen am Einzelkorn auf das Verhalten der Gesteinskörnung schließen lässt. Dies ist vermutlich abhängig von der jeweiligen Gesteinskörnung [vgl. 85, 98].

Über den Einsatz des Einzelkornversuches zur Qualitätssicherung im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle hinaus kann dieser auch herangezogen werden, wenn es den Widerstand von Einzelkörnern bei mechanischer Beanspruchung zu bestimmen gilt. Als Beispiel hierfür sei die petrographische Untersuchung nach SN 670 115 [57] (Qualitative und quantitative Mineralogie und Petrographie von Gesteinskörnungen) genannt. Diese beinhaltet u. a. die Bestimmung des „Anteils an harten Körnern“. Die Beurteilung der Härte der Gesteinskörner hat dabei über eine Abschätzung der Druckfestigkeit (über Erfahrungswerte vergleichbarer Gesteine) und des Anteils an harten Mineralien zu erfolgen. Der Einzelkornversuch könnte diesbezüglich eine wertvolle Hilfestellung geben.

Des Weiteren könnte sich der Einzelkornversuch auch zur Charakterisierung der inneren Schädigung durch Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung eignen, den es bei der Beurteilung des Widerstandes von Gesteinskörnungen gegen Frostbeanspruchung stets zu berücksichtigen gilt (vgl. Kapitel 3.2.1.3). Bei „Edelsplitten“ war der Nachweis eines ausreichenden Widerstandes gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung nach TL Min-StB [58] ursprünglich über eine maximale Abwitterung von 1 M.-% im Dosenfrostversuch mit Wasser zu erbringen. Gleichzeitig durfte der Festigkeitsverlust – bestimmt anhand des Schlagversuches vor und nach Befrostung – 3 M.-% nicht überschreiten. Dabei wirkte die Befrostung als Anregung und die Änderung des Schlagzertrümmerungswertes charakterisierte die Schädigung des inneren Gefüges. Da die Anregung und damit die Selektion des Materials durch die bloße Frostbeanspruchung nicht so stark waren, hat diese Vorgehensweise gut funktioniert.

Mit Einführung eines direkten Prüfverfahrens zur Bestimmung des Widerstandes von Gesteinskörnungen gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung (Dosenfrost mit Tausalz) wurde die Bestimmung der Gefügeänderung aus dem Regelwerk (TL Gestein-StB [30]) gestrichen und fortan nur noch die Abwitterung bestimmt. Man dachte, die Gefügeänderung aufgrund der stärkeren Beanspruchung mit der Abwitterung zu erfassen. Dass die Bestimmung der Änderung des Schlagzertrümmerungswertes beim Frost-Tausalz-Versuch nicht zielführend ist, zeigen u. a. auch die vorliegenden Ergebnisse. So konnte kein befriedigender Zusammenhang zwischen den Festigkeitsänderungen beim Frost-Tausalz-Versuch und den Betonversuchen bzw. Auslagerungsversuchen festgestellt werden. Das Problem hierbei liegt in der intensiven Beanspruchung durch die Tausalzprüfung, die eine starke Selektion bewirkt.

Folglich wird im Schlagversuch nach der Frost-Tausalz-Beanspruchung nur jenes Material geprüft, welches der Befrostung standgehalten hat, das diesbezüglich „schwache“ Material bleibt hingegen unberücksichtigt. Aussagekräftig ist der Schlagversuch hier prinzipiell dann, wenn die Gesteinskörnung eine gewisse Qualität, aber keine zu großen Qualitätsunterschiede aufweist.

Als Alternative wäre es durchaus denkbar, die Gefügeänderung zukünftig über den Einzelkornversuch zu bestimmen. Dies hätte den Vorteil, dass die Gesteinskörnung schon vor der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung genau differenziert wird und sich die Ergebnisse damit besser einschätzen ließen.

6 Praxisbeispiele für die Qualitätssicherung durch die Implementierung des Einzelkornversuches in die Werkseigene Produktionskontrolle

6.1 Vorgehensweise

6.1.1 Geländeaufnahme, Probenahme und -aufbereitung

Anhand von konkreten Anwendungsbeispielen aus der Praxis soll die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik nun getestet werden. Dabei wird überprüft, inwieweit sich der Einzelkornversuch für die Qualitätssicherung und -steuerung im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung (FTW- bzw. FTS-Wert) und auch den Schlagzertrümmerungswert (SZ) bei gebrochenen Festgesteinen eignet.

Die Erprobung des Verfahrens erfolgte anhand von drei Steinbrüchen mit unterschiedlichen Gesteinsarten und unterschiedlichen Problemstellungen. Für diese wurden zunächst die entscheidenden qualitätssteuernden Parameter (Schwachstellen) durch geologische, gesteintechnische und/oder aufbereitungstechnische Untersuchungen definiert und bestimmt. Grundlegend hierfür waren eine geologische Differenzierung der Abbaubereiche und eine zielführende Probenahme. Die Aufnahme der Steinbrüche hatte zum Ziel, Bereiche gleicher gesteintechnischer Eigenschaften (Qualitäten) auszumachen und zu beproben. Hierfür wurde vor Ort gesprengtes Rohmaterial entnommen.

Im Labor wurde dann überprüft, ob sich die augenscheinlich unterschiedlichen Qualitäten tatsächlich in den gesteintechnischen Kennwerten widerspiegeln. Hierfür wurde das Material zunächst händisch zerkleinert und anschließend durch einen Backenbrecher und eine Prallmühle aufbereitet. Dabei wurde darauf geachtet, dass alle Proben eines Steinbruchs auf die gleiche Weise aufbereitet wurden, um den Einfluss einer unterschiedlichen Aufbereitung möglichst gering zu halten (vgl. Kapitel 5.2.3.2 und 5.2.3.4).

6.1.2 Allgemeine Charakterisierung des Materials

Die so aufbereiteten Materialien aus den unterschiedlichen Qualitätsbereichen wurden durch die Merkmale der Tabelle 6-1 charakterisiert.

Kenngröße	Prüfvorschrift
Petrographische Beschreibung	DIN EN 932-3
Korngrößenverteilung	DIN EN 933-1
Kornform	DIN EN 933-4
Rohdichte und Wasseraufnahme	DIN EN 1097-6
Schlagzertrümmerungswert	DIN EN 1097-2
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel	DIN EN 1367-1
Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung	DIN EN 1367-6

Tabelle 6-1: Untersuchungsprogramm zur allgemeinen Charakterisierung der Proben

Petrographische Beschreibung

Die Ausgangsmaterialien wurden makroskopisch unter Zuhilfenahme einer Lupe petrographisch beschrieben und fotografiert (DIN EN 932-3 [24]).

Korngrößenverteilung

Um das teilweise sehr unterschiedliche Brechverhalten der verschiedenen Proben darzustellen, wurde nach der Aufbereitung die Korngrößenverteilung nach DIN EN 933-1[99] bestimmt und als Kenngröße hierfür eine Körnungsziffer ermittelt. Diese wurde berechnet aus der Summe der Siebdurchgänge durch die verwendeten Siebe (5, 8, 11, 16 mm) geteilt durch die Anzahl der Siebe (4).

Kornform

Da die Kornform die Ergebnisse des Einzelkornversuches maßgebend beeinflusst und damit bei der Beurteilung stets zu berücksichtigen ist, wurden die Kornformkennzahl nach DIN EN 933-4 [44] und der EKF-Index bei allen Gesteinskörnungen an derselben Probe (Körnung 8/11 mm) bestimmt.

Rohdichte und Wasseraufnahme

Rohdichte und Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6 [6] gelten als die „Fingerabdrücke“ von Gesteinskörnungen. Sie wurden für alle Gesteinskörnungen an der Körnung 8/11 mm bestimmt. Änderungen dieser beider Merkmale gehen häufig mit Qualitätsunterschieden einher.

Schlagzertrümmerungswert

Der Widerstand gegen Zertrümmerung wurde mittels der Schlagprüfung nach DIN EN 1097-2 [33] ermittelt. Normgemäß ist der Schlagzertrümmerungswert an der Prüfkörnung 8/12,5 mm zu bestimmen. Da bei vielen Proben eine Prüfung an der Kornklasse 8/12,5 mm aufgrund einer zu geringen Probenmenge nicht möglich war und über Vergleichsuntersuchungen an der TU München ein guter Zusammenhang zwischen der Prüfung an der Körnung 8/12,5 mm und derjenigen an der Körnung 5/8 mm nachgewiesen werden konnte [46], wurden die Betrachtungen im Hinblick auf den Schlagzertrümmerungswert einheitlich mittels Untersuchungen an der alternativen Prüfkörnung 5/8 mm angestellt.

Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung

Der Frost-Tau-Wechsel-Versuch wurde in Anlehnung an DIN EN 1367-1 [21] und der Frost-Tausalz-Versuch in Anlehnung an DIN EN 1367-6 [23] durchgeführt. Um eine der Hauptfragestellungen dieser Arbeit – den Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Dosenfrostversuche und dem Einzelkornversuch – möglichst gut beurteilen zu können, wurden für diese Verfahren die gleichen Kornklassen (8/11 mm) herangezogen. Die Probenmenge für die Dosenfrostversuche wurde jeweils auf 250 g reduziert.

6.1.3 Feststellung der qualitätssteuernden Parameter und Verifizierung dieser im Einzelkornversuch

Mittels der Ergebnisse der allgemeinen Laboruntersuchungen und den Erfahrungen der Steinbruchbesitzer wurde versucht, die qualitätssteuernden Parameter der verschiedenen Vorkommen zu benennen. Hierfür wurden zunächst die Unterschiede in den gesteintechnischen Parametern (insbesondere Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung, Schlagzertrümmerungswert (5/8)) zwischen den makroskopisch im Steinbruch unterschiedenen und beprobten Bereichen herausgearbeitet und bewertet. Durch die gezielte Probenahme und Prüfung von unterschiedlichen

Gesteinsvarietäten im Steinbruch konnten die Qualitätsunterschiede nicht nur erfasst, sondern auch den entsprechenden Gesteinsvarietäten zugeordnet werden. So wurde beispielsweise klar, welche Gesteinsvarietäten einen geringen Widerstand gegen Frostbeanspruchung oder gegen Zertrümmerung aufweisen. Diese galt es im zweiten Schritt durch den Einzelkornversuch kenntlich zu machen, da es sich im Regelfall bei Gesteinskörnungen um ein Gemisch aus aufbereiteten Gesteinen unterschiedlicher Qualität handelt, bei denen sich die unterschiedlichen Gesteinsvarietäten und damit auch -qualitäten nicht einfach optisch unterscheiden bzw. bestimmen lassen. Deshalb wurde untersucht, ob eine Unterscheidung verschiedener Gesteinsqualitäten im Einzelkornversuch möglich ist und welche Kriterien hierfür heranzuziehen sind. Unter den Gesichtspunkten, den Einzelkornversuch möglichst einfach zu halten und zeitnah Ergebnisse zu erzielen, wurden stets trockene Proben betrachtet.

6.1.4 Anbindung des Einzelkornversuches an normierte Verfahren

Konnten die „problematischen“ Gesteinskörner mit Hilfe des Einzelkornversuches identifiziert werden, so gilt es herauszufinden, wie groß der Anteil an solchen „problematischen“ Körnern in einer Probe sein darf, damit sie den bestehenden Anforderungswert (z. B. im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung oder den Schlagzertrümmerungswert) sicher erfüllt. Hierfür werden die Ergebnisse aus dem Einzelkornversuch mit denjenigen der normierten Verfahren verglichen und ein werkseigenes Anforderungskriterium mit dem dazugehörigen Bewertungsschlüssel festgelegt. Zur Absicherung dieses Wertes werden teilweise zusätzlich Korrelationsbetrachtungen mit Untersuchungen an Rückstellproben aus der Produktion angestellt. Auch hierbei wurden parallel der Einzelkornversuch und die jeweilige normierte Prüfung durchgeführt. Zur weiteren Erfahrungssammlung wurde der Einzelkornversuch in die Werkseigene Produktionskontrolle eines Betriebes installiert.

6.2 Steinbruch A

6.2.1 Problemstellung

Im tieferen Bereich (Sohle 2) des Steinbruches steht „Hauptdolomit“ über „Raibler Schichten“ in normaler Lagerung an. Dabei verfügen die „Raibler Schichten“ (v. a. Raibler Kalksteine) im Allgemeinen über die besseren gesteintechnischen Eigenschaften. In den letzten Jahren erfolgte der Abbau hauptsächlich in diesem Bereich des Steinbruches, wo die Eigenschaften der relativ homogenen Gesteine gut bekannt und eine räumliche Trennung von Kalkstein und Dolomit durch selektiven Abbau möglich war.

Aus Standsicherheitsgründen muss nun jedoch der höhere Bereich des Steinbruchs abgebaut werden (Sohle 1). Auch hier stehen überwiegend Dolomite und Kalksteine an. Diese sind jedoch hinsichtlich ihrer gesteintechnischen Eigenschaften nicht mit den Gesteinen im Liegenden vergleichbar. Die Gesteinsvielfalt und der Unterschied der Gesteinsqualitäten sind hier deutlich größer und der Wechsel erfolgt sehr engräumig. Dazu ist die Schichtfolge durch die Nähe zur Oberfläche stärker verwittert und wird von Störungen durchzogen. Stratigraphisch betrachtet sind die Kalksteine und Dolomite, die im höheren Bereich des Steinbruches anstehen, vermutlich zu den Raibler Schichten zu zählen. Ihre Ausbildung ist jedoch keinesfalls ungestört und typisch. Grund dafür könnte eine Überschiebung der

Raibler Schichten auf den Hauptdolomit sein, die zwischen der oberen und der unteren Sohle zu vermuten ist und die die inverse Lagerung (Raibler Schichten über Hauptdolomit) erklären würde.

Ein selektiver Abbau von großen, relativ homogenen Paketen mit vergleichbaren gesteintechnischen Eigenschaften wie im tieferen Bereich ist in diesem neuen heterogenen Bereich nicht möglich. Folglich handelt es sich bei Gesteinskörnungen, die aus Gesteinen aus diesem Bereich des Steinbruchs aufbereitet werden, stets um eine Mischung von unterschiedlichen Gesteinsvarietäten. Die Qualität der Gesteinskörnungen hängt dabei stark vom Aufgabegut ab, unterliegt starken Schwankungen und ist noch nicht hinreichend bekannt. Um sicherzustellen, dass das Material in Anwendungsbereichen eingesetzt wird, für welche es qualitativ auch geeignet ist, ist es besonders bei neuen Abbaugeländen und „unübersichtlichen“ Lagerungsverhältnissen wie hier wichtig, die Qualität der Gesteinskörnungen regelmäßig zu kontrollieren. Da dies – in der notwendigen Häufigkeit – nicht durch die aufwändigen normierten Prüfverfahren erfolgen kann, wird eine einfache Lösung im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle angestrebt.

6.2.2 Steinbruchaufnahme und Probenahme

Da sich das dargestellte Problem speziell auf den höheren Teil des Steinbruchs bezieht, wurde dieser detailliert aufgenommen und beprobt (vgl. Abbildung 6-1).



Abbildung 6-1: Panorama Steinbruch A (Sohle 1)

Die Aufnahme erfolgte dahingehend, Bereiche ähnlicher Gesteinsausbildungen auszumachen und zu beproben. In diesem Sinne wurden im oberen Bereich des Steinbruchs A (Sohle 1) neun verschiedene Qualitätsbereiche unterschieden. Diese wurden von links nach rechts durchnummeriert und beprobt (1 - 9). Da der Bereich 9 aus Sicherheitsgründen nicht direkt zugänglich war, wurden hier Steine der verschiedenen Gesteinsvarietäten aus dem gesprengten Haufwerk entnommen (Proben 9A, 9B und 9C). Bei den Proben 10 und 11 handelt es sich um Proben, deren Lage in der Wand nicht direkt ersichtlich war, welche aber als Bruchstücke im Haufwerk enthalten waren.

6.2.3 Ergebnisse und Beurteilung der Laborversuche

Aufbereitung

Alle Proben wurden im Labor folgendermaßen aufbereitet:

- Vorzerkleinerung mit dem Hammer
- Backenbrecher (große Öffnungsweite)
- Prallmühle (Öffnungsweite 15 mm)

Allgemeine Charakterisierung des Materials

Die petrographischen Beschreibungen und die Korngrößenverteilungen der Proben (nach der Aufbereitung) sind, wie auch die Ergebnisse der gesteintechnologischen Untersuchungen (Rohdichte ρ , Wasseraufnahme WA, Schlagzertrümmerungswert $SZ_{5/8}$, Kornformkennzahl SI, FTW- und FTS-Wert), tabellarisch im Anhang II (Tabellen AII-3 bis AII-5) zusammengefasst.

Die scheinbaren Rohdichten der verschiedenen Gesteinsvarietäten aus dem Steinbruch A liegen zwischen 2,726 und 2,851 g/cm³ und damit im für Kalkstein bzw. Dolomit typischen Bereich. Im Hinblick auf die Kornform wurden Kornformkennzahlen (SI) zwischen 2,6 und 12,0 ermittelt. Damit entsprechen alle Proben mindestens der Kategorie SI₁₅, d. h. der Anteil an schlecht geformten Körnern beträgt maximal 15 M.-%. Dass sich die Proben beim Brechen teilweise sehr unterschiedlich verhalten, äußert sich in sehr unterschiedlichen Korngrößenverteilungen bei identischer Aufbereitung. So brechen die Proben 1, 5B, 9B1, 9B2 und 10 feiner als die übrigen Proben, was sich in hohen Körnungsziffern (> 50) widerspiegelt.

Die Wasseraufnahmen der Proben aus dem Steinbruch A unterscheiden sich mit Werten zwischen 0,3 und 4,4 M.-% relativ deutlich. Die „Anforderung“ an die Wasseraufnahme nach DIN EN 12620 Anhang F [5] (≤ 1 M.-%) erfüllt etwa die Hälfte der untersuchten Proben (vgl. Abbildung 6-2).

Anmerkung:

Bei der Beurteilung von Gesteinskörnungen anhand von Anforderungswerten ist – unabhängig vom Prüfkriterium – stets darauf zu achten, dass die ermittelten Messwerte und die Anforderungswerte die gleiche Genauigkeit (d. h. Anzahl an Dezimalstellen) aufweisen. Kriterien, die gemäß Prüfvorschrift genauer anzugeben sind, sind für die Beurteilung dementsprechend zu runden. Wird beispielsweise wie hier eine $WA \leq 1$ M.-% gefordert, so bedeutet dies, dass auch eine Gesteinskörnung mit einer WA von 1,4 M.-% diese Anforderung erfüllt.

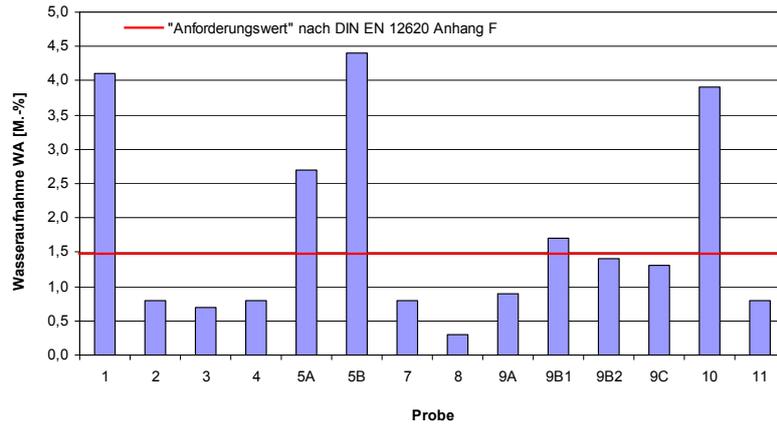


Abbildung 6-2: Wasseraufnahmen der Proben aus dem Steinbruch A im Vergleich zum „Anforderungswert“ nach DIN EN 12620 Anhang F

Die ermittelten FTW-Werte reichen von 0,0 bis 4,7 M.-%. Der größte Teil der Proben erfüllt dabei die Kategorie F₁, die Proben 1 und 10 entsprechen der Kategorie F₄ und die Probe 5B verfügt mit 4,7 M.-% über einen FTW-Wert > 4 M.-% (vgl. Abbildung 6-3).

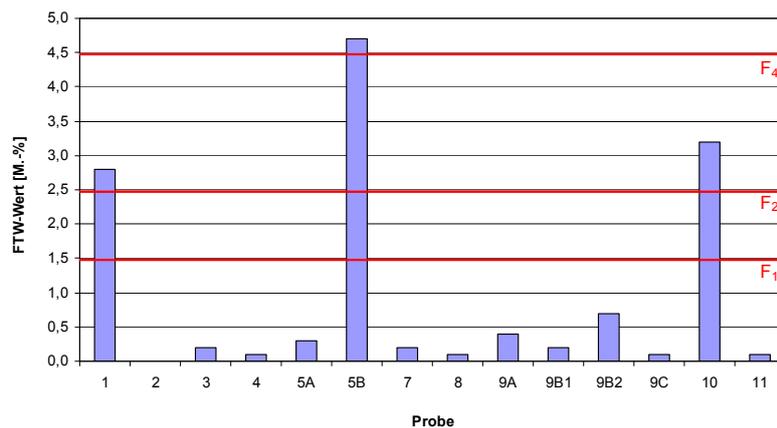


Abbildung 6-3: FTW-Werte der Proben aus dem Steinbruch A im Vergleich zu den maßgebenden Kategorien

Im Hinblick auf den FTS-Wert fallen insbesondere die Proben 1 und 5B mit Abwitterungen über 50 M.-% negativ auf (vgl. Abbildung 6-4). FTS-Werte zwischen 8 und 25 M.-% weisen die Proben 9A und 9B2 auf. Die Abwitterung bei den übrigen Proben beträgt im Frost-Tausalz-Versuch maximal 8 M.-%.

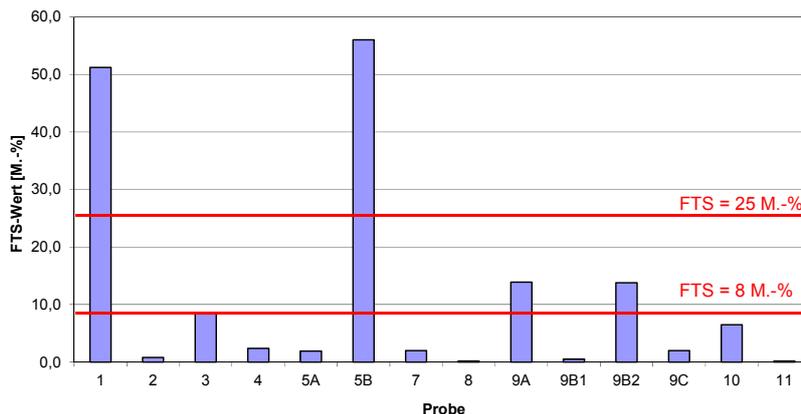


Abbildung 6-4: FTS-Werte der Proben aus dem Steinbruch A im Vergleich zu den maßgebenden Kategorien

Das Spektrum des Schlagzertrümmerungswertes – bestimmt an der Kornklasse 5/8 mm – reicht im betrachteten Bereich des Steinbruches von 19,5 bis 35,8. In den TL Gestein-StB [30] wird für Kalksteine ein Schlagzertrümmerungswert von maximal 28 gefordert. Diesen erfüllen mit Ausnahme der Proben 5B und 10 alle geprüften Gesteinskörnungen. Der Kategorie SZ₂₆ (maximaler SZ von 26), welche in Bayern beispielsweise für den Einsatzbereich Schichten ohne Bindemittel gefordert wird [51, 52], entspricht auch die Probe 1 nicht (vgl. Abbildung 6-5).

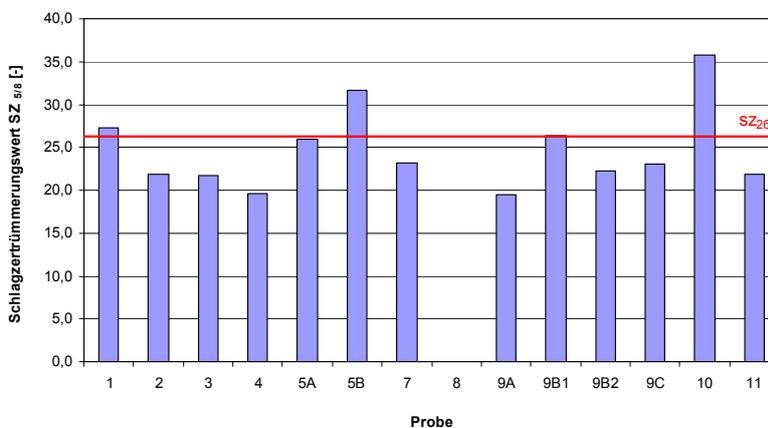


Abbildung 6-5: Schlagzertrümmerungswerte der Proben aus dem Steinbruch A im Vergleich zum anzustrebenden Grenzwert

Die Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung und auf den Widerstand gegen Zertrümmerung sind zusammenfassend in Tabelle 6-2 dargestellt.

Probe	FTW-Wert	FTS-Wert	SZ _{5/8}
	[M.-%]	[M.-%]	[-]
1	2,8	51,2	27,3
2	0,0	0,8	21,8
3	0,2	8,4	21,7
4	0,1	2,4	19,6
5A	0,3	1,9	26,0
5B	4,7	56,0	31,7
7	0,2	2,0	23,2
8	0,1	0,2	-
9A	0,4	13,9	19,5
9B1	0,2	0,5	26,4
9B2	0,7	13,8	22,2
9C	0,1	2,0	23,1
10	3,2	6,5	35,8
11	0,1	0,2	21,8

Tabelle 6-2: Untersuchungsergebnisse der Proben aus dem Steinbruch A im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel, Frost-Tausalz-Beanspruchung und Zertrümmerung

Beurteilt man die Materialien aus dem Steinbruch A nach SZ_{5/8}, FTW-Wert, FTS-Wert und über das Brechverhalten, so verfügen die Proben 1, 5B und 10 insgesamt über die geringste Qualität und fallen diesbezüglich gegenüber den anderen Proben deutlich ab.

Da es sich bei der Sohle 1 um einen neuen Abbaubereich handelt und folglich mit diesen Materialien noch nicht viele Erfahrungen vorliegen, wurden die Untersuchungsergebnisse der verschiedenen Gesteinsvarietäten u. a. dazu verwendet, das vorhandene Potential festzustellen und somit die geeigneten Einsatzbereiche für diese Materialien zu definieren. Die Untersuchungen – kombiniert mit den bisher vorliegenden Erfahrungen – zeigen, dass das Potential vorhanden ist, Material der Kategorien F₁, SZ₂₆ mit maximalen FTS-Werten von 8 M.-% zu gewinnen. Gesteinskörnungen dieser Qualität können in Bayern für Schichten ohne Bindemittel nach TL SoB-StB [51, 52]), Betone nach DIN 1045-2 Anhang U [26] und für Asphalttragschichten nach TL Asphalt-StB [48, 49] eingesetzt werden. Für diese Einsatzbereiche gelten die Anforderungen der Tabelle 6-3.

Einsatzbereich		FTW-Wert [M.-%]	FTS-Wert [M.-%]	SZ [-]
TL SoB-StB*	Schichten ohne Bindemittel	≤ 4	-	≤ 26
DIN 1045-2 Anhang U	Regelanforderung für Beton	XF1: ≤ 4 XF3: ≤ 2	XF2: ≤ 8 XF4: ≤ 8	-
TL Asphalt-StB*	Asphalttragschicht	≤ 4	-	≤ 26

* unter Berücksichtigung des bayerischen Einführungserlasses

Tabelle 6-3: Anforderungen an den FTW-Wert, den FTS-Wert und den SZ für verschiedene Einsatzbereiche

Primär wird angestrebt, die Gesteinskörnungen für XF1- und XF3-Betone nach DIN 1045-2 Anhang U, Schichten ohne Bindemittel und Asphalttragschichten zu verwenden. Um für alle diese Bereiche geeignet zu sein, muss eine Gesteinskörnung den Kategorien F_2 und SZ_{26} entsprechen. Da in diesem Vorkommen weder der Schlagzertrümmerungswert, noch der FTW-Wert grundsätzlich als unproblematisch zu erachten ist, gilt es diesbezüglich im Rahmen der Qualitätssicherung die Schnittmenge der Gesteinskörnungen kenntlich zu machen, die beide Kategorien erfüllen, und ein Maß zu finden, wie man diese Schnittmenge vom Rest sicher unterscheiden kann.

Darüber hinaus wäre es erstrebenswert, auch Gesteinskörnungen definieren zu können, die maximal eine Abwitterung von 8 M.-% im Frost-Tausalz-Versuch aufweisen und damit für XF2- und XF4-Betone nach DIN 1045-2 Anhang U verwendet werden könnten. An den Schlagzertrümmerungswert existieren für diesen Einsatzbereich keine Anforderungen, so dass hier die Qualität ausschließlich über den FTS-Wert abgeschätzt werden kann.

Charakterisierung der Materialien im Einzelkornversuch

An allen Proben wurde der EKF-Index nach der Arbeitsanleitung (vgl. Anhang IV) an der Kornklasse 8/11 mm ermittelt (Prüfkornklasse 8/11 mm). Als problematisch (im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung und gegen Zertrümmerung) wurden dabei Gesteinskörner eingestuft, die bei der Prüfung im trockenen Zustand die Bruchbilder 4b bzw. 6 zeigten und/oder „dumpf“ klangen. Die Ergebnisse (EKF-Indizes) sind in Abbildung 6-6 graphisch dargestellt, und im Anhang II (Tabelle AII-6) im Detail tabellarisch aufgeführt.

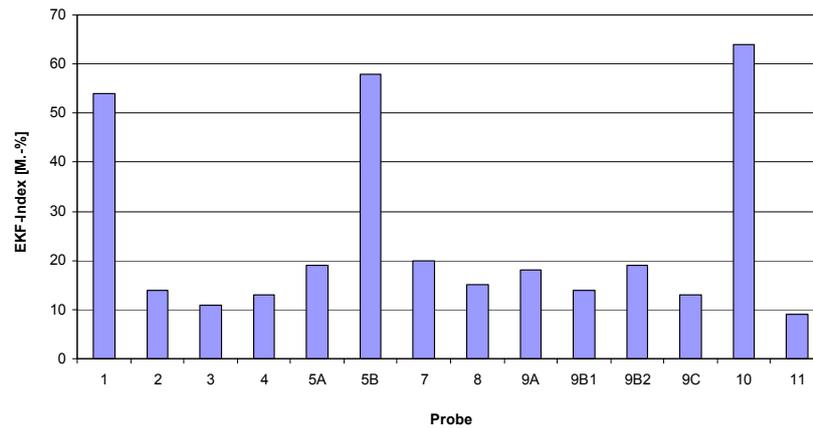


Abbildung 6-6: EKF-Indizes (Massenanteil der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6 sowie dumpf klingender Körner) der Proben aus dem Steinbruch A

Die EKF-Indizes der Proben aus dem Steinbruch A liegen insgesamt zwischen 9 und 64 M.-% wobei der Großteil der Proben maximal Werte von 20 M.-% aufweist. Mit über 50 M.-% auf einem deutlich höheren Niveau liegen hingegen die EKF-Indizes der Proben 1, 5B und 10. Bei diesen Proben handelt es sich genau um die Proben, die auch bei der Qualitätsprüfung durch die normierten Verfahren ($SZ_{5/8}$, FTW-, FTS-Wert) negativ aufgefallen sind. Darüber hinaus zählen sie zu den Proben, bei denen beim Brechvorgang vergleichsweise viel feines Korn entsteht.

Zusammenhänge zwischen dem EKF-Index und den Prüfmerkmalen der normierten Verfahren

Wie die Ergebnisse des Einzelkornversuches (EKF-Indizes) mit denjenigen der normierten Verfahren ($SZ_{5/8}$, FTW-Wert, FTS-Wert) insgesamt korrelieren, zeigt Abbildung 6-7. Vergleichend sind auch die Zusammenhänge zwischen der Wasseraufnahme und den normierten Verfahren dargestellt.

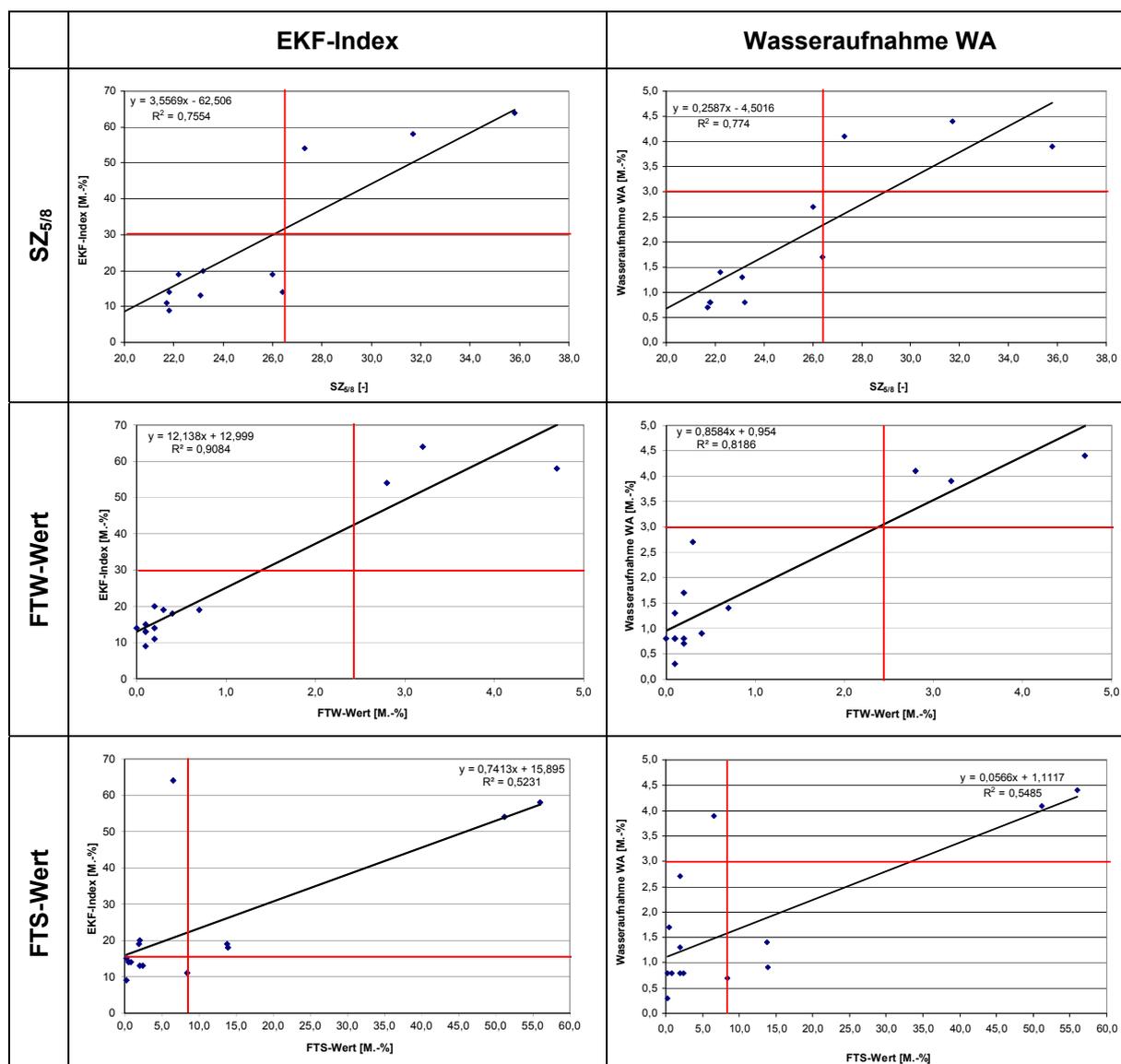


Abbildung 6-7: Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen der normierten Verfahren (SZ_{5/8}, FTW-Wert, FTS-Wert) und dem EKF-Index bzw. der Wasseraufnahme

Die primäre Fragestellung war hier, ein Kriterium für den Einzelkornversuch zu finden, mit dem beurteilt werden kann, ob die produzierte Gesteinskörnung sowohl der Kategorie F₂ als auch SZ₂₆ sicher entspricht und damit für XF1- und XF3-Betone nach DIN 1045-2 Anhang U, für Schichten ohne Bindemittel und Asphalttragschichten verwendet werden kann. Wie die Korrelationsbetrachtungen zeigen, ist dies möglich, indem man als Beurteilungskriterium einen EKF-Index von 30 M.-% heranzieht, wobei dieser dem Anteil an Körnern der Einzelkornfestigkeitsklassen 6 und 4b sowie an dumpf klingenden Körnern entspricht. Es ist davon auszugehen, dass Gesteinskörnungen, die im Einzelkornversuch maximal einen EKF-Index von 30 M.-% aufweisen, sicher die Kategorien F₂ bzw. SZ₂₆ erfüllen.

Auch zur Beurteilung, ob Gesteinskörnungen sicher über einen FTS-Wert ≤ 8 M.-% verfügen, und damit diesbezüglich für XF2- und XF4-Betone nach DIN 1045-2 verwendet werden können, kann der EKF-Index herangezogen werden. So konnte nachgewiesen werden, dass mit einem EKF-Index von maximal 15 M.-% maximal eine Abwitterung von 8 M.-% im Frost-Tausalz-Versuch einhergeht.

Auch bei der Wasseraufnahme handelt es sich um eine Hilfsgröße, die insbesondere wichtige Hinweise auf das Verhalten von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung liefern könnte. Vergleicht man für die Proben aus dem Steinbruch A die Wasseraufnahmen mit den $SZ_{5/8}$ und den FTW-Werten, so erhält man vergleichbare Zusammenhänge, wie zwischen dem $SZ_{5/8}$ bzw. FTW-Wert und dem EKF-Index (vgl. Abbildung 6-7). So scheinen hier Proben mit Wasseraufnahmen von maximal 3,0 M.-% maximal über einen $SZ_{5/8}$ von 26 und einen FTW-Wert von 2 M.-% zu verfügen. Im Hinblick auf den Widerstand der Gesteinskörnungen gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung ist die Wasseraufnahme keine aussagekräftige Größe.

Zur Überprüfung der festgelegten „EKF-Index-Anforderungswerte“ wurden über zwei Jahre von Seiten des Werkes Stichproben von „Splitten“ der Korngröße 8/11 mm zurückgestellt, an welchen dann u. a. die Dosenfrostversuche und der Einzelkornversuch parallel durchgeführt wurden. Da jedoch alle Proben mit FTW-Werten $\leq 0,1$ M.-% und FTS-Werten ≤ 4 M.-% weit unter den angestrebten Grenzwerten von 2 bzw. 8 M.-% lagen, konnten die EKF-Index-Anforderungswerte nur in der Form bestätigt werden, dass alle Rückstellproben auch diese klar eingehalten haben.

6.3 Steinbruch B

6.3.1 Problemstellung

Im Steinbruch B stehen verschiedene Granitvarietäten an, die sich bezüglich ihrer Farbe und ihrer gesteintechnischen Eigenschaften deutlich unterscheiden. So kommen in diesem Bruch von vollständig verwitterten und entfestigten bis hin zu frischen, „steinharten“ Graniten zahlreiche Varietäten vor. Farblich wird zwischen einer blauen und einer roten Varietät unterschieden. Aus Mangel an stichhaltigen Kriterien zur Beurteilung der Qualität der anstehenden Granite wird teilweise anhand der Färbung „klassifiziert“. Diesbezüglich leidet der Steinbruchbetreiber unter dem Vorurteil, dass der rote Granit generell verwittert und damit schlechter als der blaue Granit sei. Dies ist zwar tendenziell, aber nicht generell richtig. So gibt es sowohl bei den roten als auch bei den blauen Graniten qualitativ die unterschiedlichsten Varietäten. Die Untersuchungen zielen daher darauf ab, eine möglichst einfache Methode zu finden, um die Qualität der verschiedenen Gesteinsvarietäten verlässlich zu beurteilen.

Verwendet wird das Material v. a. im Bereich Schichten ohne Bindemittel nach TL SoB-StB [51, 52] sowie für Asphalttragschichten. Gesteinskörnungen für diese Anwendungsbereiche müssen den Kategorien F_4 und SZ_{26} entsprechen (vgl. Tabelle 6-3). Wie die bisherigen Erfahrungen zeigen, gibt es Bereiche im Steinbruch, die hierfür geeignet sind, aber auch Bereiche, die die erforderlichen Kategorien nicht erfüllen. Problematisch ist das Material meist im Hinblick auf den Widerstand gegen Zertrümmerung. Es ist von existentieller Bedeutung für den Steinbruchbetreiber, zwischen geeigneten und ungeeigneten Gesteinskörnungen unterscheiden zu können. Des Weiteren ist es im vorliegenden Beispiel von wesentlicher Bedeutung, dass die Kontrolle des produzierten Materials zeitnah erfolgt, da das gesiebte Material in der Regel ohne Liegezeit direkt weiterverarbeitet wird. Die erforderliche Kontrolle kann weder in der notwendigen Häufigkeit noch innerhalb eines vertretbaren Zeitfensters mit Hilfe von normierten Prüfungen abgedeckt werden, so dass nach einer einfachen und schnellen Lösung im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle gesucht wird.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit des Materials aus dem Steinbruch B ist erfahrungsgemäß als Gesteinskörnung im Beton nach DIN 1045-2 Anhang U. Um hier sowohl für die Expositionsklasse XF1 als auch XF3 eingesetzt werden zu können, darf das Material maximal eine Abwitterung von 2 M.-% im Frost-Tau-Wechsel-Versuch aufweisen. Für die Expositionsklassen XF2 und XF4 muss sichergestellt sein, dass ein FTS-Wert von 8 M.-% eingehalten wird. Anforderungen an den Schlagzertrümmungswert werden hier nicht gestellt (vgl. Tabelle 6-3).

6.3.2 Steinbruchaufnahme und Probenahme

Auch der Steinbruch B wurde unter gesteintechnischen Gesichtspunkten aufgenommen (vgl. Abbildung 6-8). Es wurden auf den insgesamt fünf Sohlen (Talboden TB, Sohle I - IV) 30 verschiedene Qualitätsbereiche unterschieden, durchnummeriert (1-30) und beprobt. Die Position der verschiedenen Bereiche ist, wie die Zuordnung der entnommenen Proben zu den entsprechenden Bereichen, im Anhang II (Tabelle AII-7) dargestellt.



Abbildung 6-8: Panorama Steinbruch B

6.3.3 Ergebnisse und Beurteilung der Laborversuche

Aufbereitung

Alle Proben wurden im Labor folgendermaßen aufbereitet:

- Vorzerkleinerung mit dem Hammer
- Backenbrecher (große Öffnungsweite)
- Prallmühle (Öffnungsweite 15 mm)

Allgemeine Charakterisierung des Materials

Die petrographische Beschreibung, die Korngrößenverteilung (nach der Aufbereitung) und die Ergebnisse der gesteintechnischen Untersuchungen sind tabellarisch im Anhang II (Tabellen AII-8 bis AII-10) zusammengefasst.

Die scheinbaren Rohdichten der verschiedenen Gesteinsvarietäten aus dem Steinbruch B liegen in der Regel zwischen 2,648 und 2,691 g/cm³ und sind damit typisch für Granite. Für das Material, das aus einer „Störungszone“ stammt, wurde mit 2,579 g/cm³ ein deutlich niedrigerer Wert festgestellt. Der „Anteil schlecht geformter Körner“ (Kornformkennzahl SI) liegt bei allen Proben unter 15 M.-%. Folg-

lich entsprechen sie mindestens der Kategorie Sl_{15} . Beurteilt man das Brechverhalten anhand der Korngrößenverteilung nach dem Brechvorgang, so verhalten sich die Probe 17 und das Störungsmaterial dahingegen extrem, dass vergleichsweise viel feines Material entsteht. Relativ grob brechen hingegen die Proben 3, 4 und 15.

Bezüglich der Wasseraufnahme differenzieren die Proben aus dem Steinbruch B nur geringfügig (0,5 bis 1,3 M.-%) (vgl. Abbildung 6-9). Der „Anforderungswert“ von 1 M.-%, als Kriterium der DIN EN 12620 Anhang F für einen ausreichenden Widerstand gegen Frostbeanspruchung, wird von allen Proben erfüllt.

Anmerkung:

Bei der Beurteilung von Gesteinskörnungen anhand von Anforderungswerten ist – unabhängig vom Prüfkriterium – stets darauf zu achten, dass die ermittelten Messwerte und die Anforderungswerte die gleiche Genauigkeit (d. h. Anzahl an Dezimalstellen) aufweisen. Kriterien, die gemäß Prüfvorschrift genauer anzugeben sind, sind für die Beurteilung dementsprechend zu runden. Wird beispielsweise wie hier eine $WA \leq 1$ M.-% gefordert, so bedeutet dies, dass auch eine Gesteinskörnung mit einer WA von 1,4 M.-% diese Anforderung erfüllt.

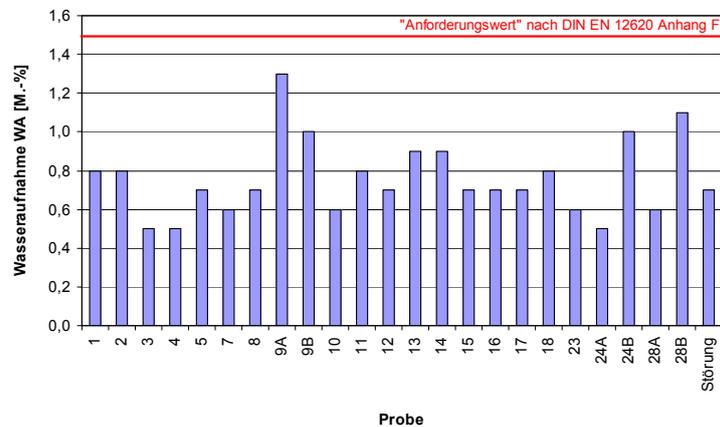


Abbildung 6-9: Wasseraufnahmen der Proben aus dem Steinbruch B im Vergleich zum „Anforderungswert“ nach DIN EN 12620 Anhang F

Im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel entsprechen – bis auf die Probe „Störung“ – alle Varietäten der für Schichten ohne Bindemittel geforderten Kategorie F_4 (vgl. Abbildung 6-10). Die Probe „Störung“ wurde direkt aus einer räumlich eng begrenzten und optisch gut abgrenzbaren Störungszone entnommen, die vom Steinbruchbetreiber bei der Produktion ausgespart wird. Folglich kann davon ausgegangen werden, dass Gesteinskörnungen aus dem Steinbruch B der Kategorie F_4 entsprechen, was sich auch mit den bisher vorliegenden Erfahrungen deckt.

Gesteinskörnungen, die im Beton nach DIN 1045-2 Anhang U für die Expositionsklassen XF1 und XF3 eingesetzt werden sollen, müssen die Kategorie F_2 sicher erfüllen. Dies ist im Steinbruch B nicht immer gewährleistet, wie die Messwerte der Proben 17 und 24A in Abbildung 6-10 zeigen:

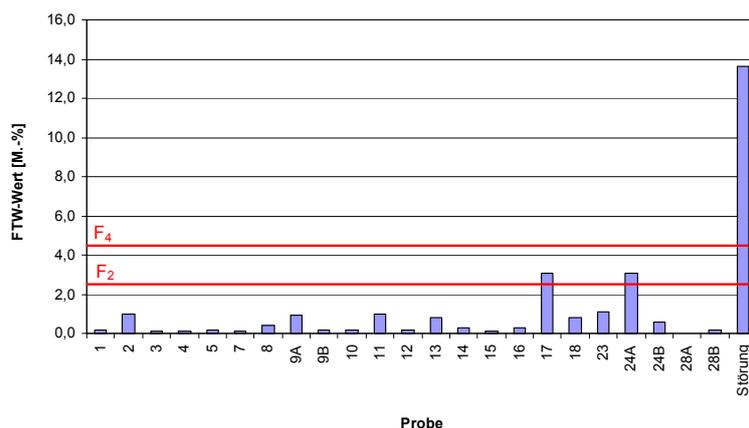


Abbildung 6-10: FTW-Werte der Proben aus dem Steinbruch B im Vergleich zum evtl. anzustrebenden Grenzwert

Die Schlagzertrümmerungswerte – bestimmt an der Kornklasse 5/8 mm – reichen im Steinbruch B von 24,8 bis 33,3. Angestrebt wird hier primär ein Wert von 26, um in Bayern für den Anwendungsbereich Schichten ohne Bindemittel und für Asphalttragschichten liefern zu können. Durch die Untersuchungen konnte bestätigt werden, dass es im Steinbruch sowohl Bereiche gibt, die diese Anforderung erfüllen, als auch Bereiche, die diesbezüglich als unzureichend einzustufen sind (vgl. Abbildung 6-11).

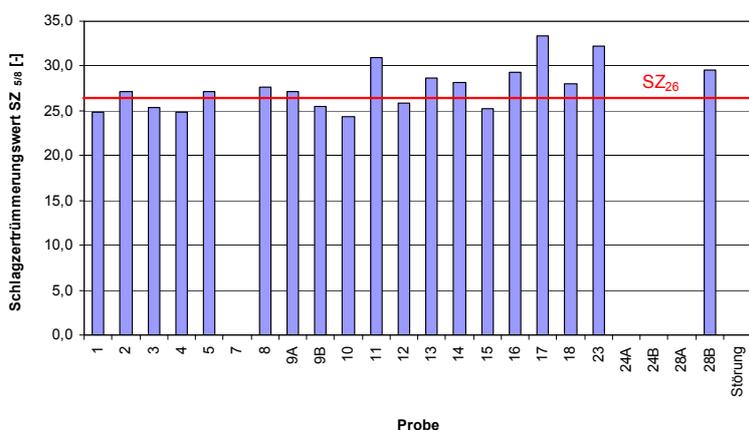


Abbildung 6-11: Schlagzertrümmerungswerte der Proben aus dem Steinbruch B im Vergleich zum anzustrebenden Grenzwert

Hinsichtlich des Widerstandes bei Frost-Tausalz-Beanspruchung scheinen große Bereiche des Steinbruchs unproblematisch zu sein (vgl. Abbildung 6-12). Lediglich die Proben 24 A und „Störung“ verfügen für einen Einsatz für XF2- bzw. XF4-Betone nach DIN 1045-2 Anhang U über zu hohe Werte (Anforderung: FTS ≤ 8 M.-%).

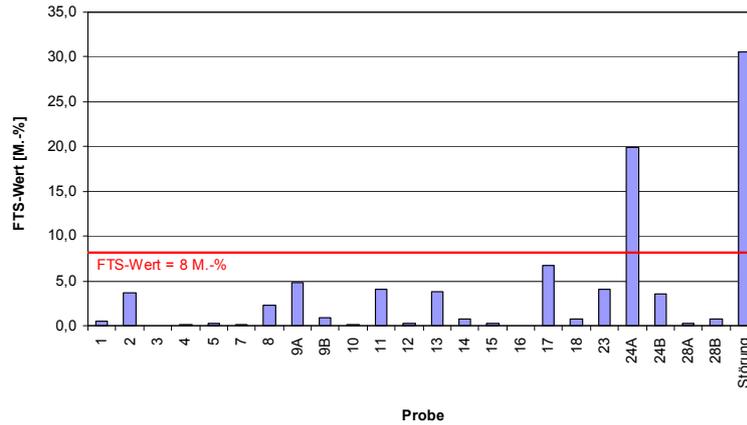


Abbildung 6-12: FTS-Werte der Proben aus dem Steinbruch B im Vergleich zum eventuell anzustrebenden Grenzwert

Die Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung und auf den Widerstand gegen Zertrümmerung sind zusammenfassend in Tabelle 6-4 dargestellt.

Probe	FTW-Wert	FTS-Wert	SZ _{5/8}
	[M.-%]	[M.-%]	[-]
1	0,2	0,5	24,8
2	1,0	3,7	27,1
3	0,1	0,0	25,4
4	0,1	0,1	24,9
5	0,2	0,3	27,2
7	0,1	0,1	-
8	0,4	2,3	27,7
9A	0,9	4,8	27,2
9B	0,2	0,9	25,5
10	0,2	0,1	24,3
11	1,0	4,1	31,0
12	0,2	0,2	25,9
13	0,8	3,8	28,7
14	0,3	0,8	28,1
15	0,1	0,3	25,2
16	0,3		29,3
17	3,1	6,7	33,3
18	0,8	0,8	28,0
23	1,1	4,0	32,2
24A	3,1	19,9	-
24B	0,6	3,6	-
28A	-	0,3	-
28B	0,2	0,7	29,6
Störung	13,6	30,5	-

Tabelle 6-4: Untersuchungsergebnisse der Proben aus dem Steinbruch B im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel, Frost-Tausalz-Beanspruchung und Zertrümmerung

Beurteilt man die Materialien aus dem Steinbruch B nach $SZ_{5/8}$, FTW-Wert, FTS-Wert und über das Brechverhalten, so verfügen die Proben 17, 24A und „Störung“ insgesamt über die geringste Qualität und fallen diesbezüglich gegenüber den anderen Proben deutlich ab.

Durch die Untersuchungen an den verschiedenen im Steinbruch auftretenden Gesteinsvarietäten konnte bestätigt werden, dass in der Regel der für Schichten ohne Bindemittel und Asphalttragschichten geforderte FTW-Wert von 4 M.-% eingehalten wird und dass es sich diesbezüglich beim Schlagzertrümmerungswert um das entscheidende Qualitätskriterium handelt. Da sich der Steinbruchbetreiber – trotz positiver Ergebnisse bei der Güteüberwachung – hier nie sicher sein kann, ob das abgebaute Material den Anforderungen tatsächlich genügt, ist es unerlässlich, ein geeignetes Kriterium zu finden, mit dem sicher nachgeprüft werden kann, ob die produzierte Gesteinskörnung SZ_{26} erfüllt.

Um gegebenenfalls auch Gesteinskörnungen für Beton nach DIN 1045-2 Anhang U liefern zu können, muss (je nach Expositionsklasse) F_2 , F_4 bzw. FTS-Wert ≤ 8 M.-% erfüllt sein. Dies ist zwar in weiten Bereichen, aber nicht im gesamten Steinbruch gegeben. Auch zur diesbezüglichen Beurteilung gilt es ein geeignetes Maß zu finden.

Charakterisierung der Materialien im Einzelkornversuch

Bei den Proben aus dem Steinbruch B wurden Gesteinskörner (im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung und gegen Zertrümmerung) als problematisch eingestuft, die beim Einzelkornversuch die Bruchbilder 4b bzw. 6 zeigten und/oder „dumpf“ klangen. Dabei erfolgte die Prüfung an trockenen Körnern der Kornklasse 8/11 mm. Die diesbezüglichen Ergebnisse (EKF-Indizes) sind in Abbildung 6-13 graphisch dargestellt, und im Anhang II (Tabelle AII-11) im Detail tabellarisch aufgeführt

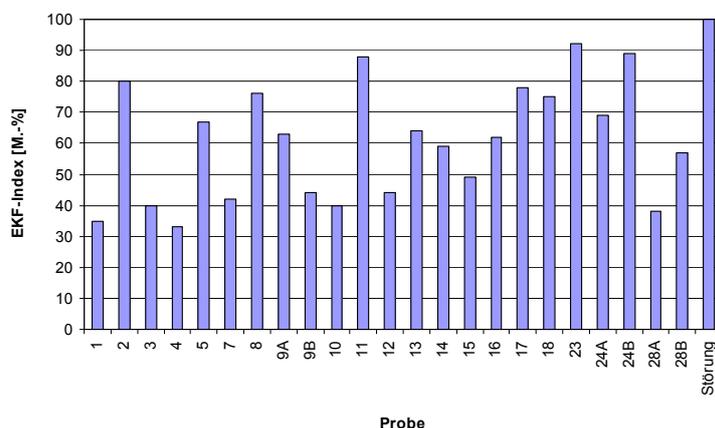


Abbildung 6-13: EKF-Indizes (Massenanteil der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6 sowie dumpf klingender Körner) der Proben aus dem Steinbruch B

Die EKF-Indizes der Proben aus dem Steinbruch B sind insgesamt sehr hoch. Sie reichen von 33 bis 100 M.-%. Ausschließlich aus „problematischen“ Körnern besteht das Material, welches direkt aus einer Störungszone („Störung“) stammt. Daneben weisen auch die Proben 2, 8, 11, 17, 18, 23 und 24B EKF-Indizes von über 70 M.-% auf. Die geringsten EKF-Indizes (30 - 40 M.-%) wurden für die Proben 1, 3, 4, 10 und 28A ermittelt.

Zusammenhänge zwischen dem EKF-Index und den Prüfmerkmalen der normierten Verfahren

Die Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen des Einzelkornversuches (EKF-Index) und den normierten Verfahren ($SZ_{5/8}$, FTW-Wert, FTS-Wert) zeigt Abbildung 6-14. Vergleichend sind auch die Zusammenhänge zwischen der Wasseraufnahme und den normierten Verfahren dargestellt.

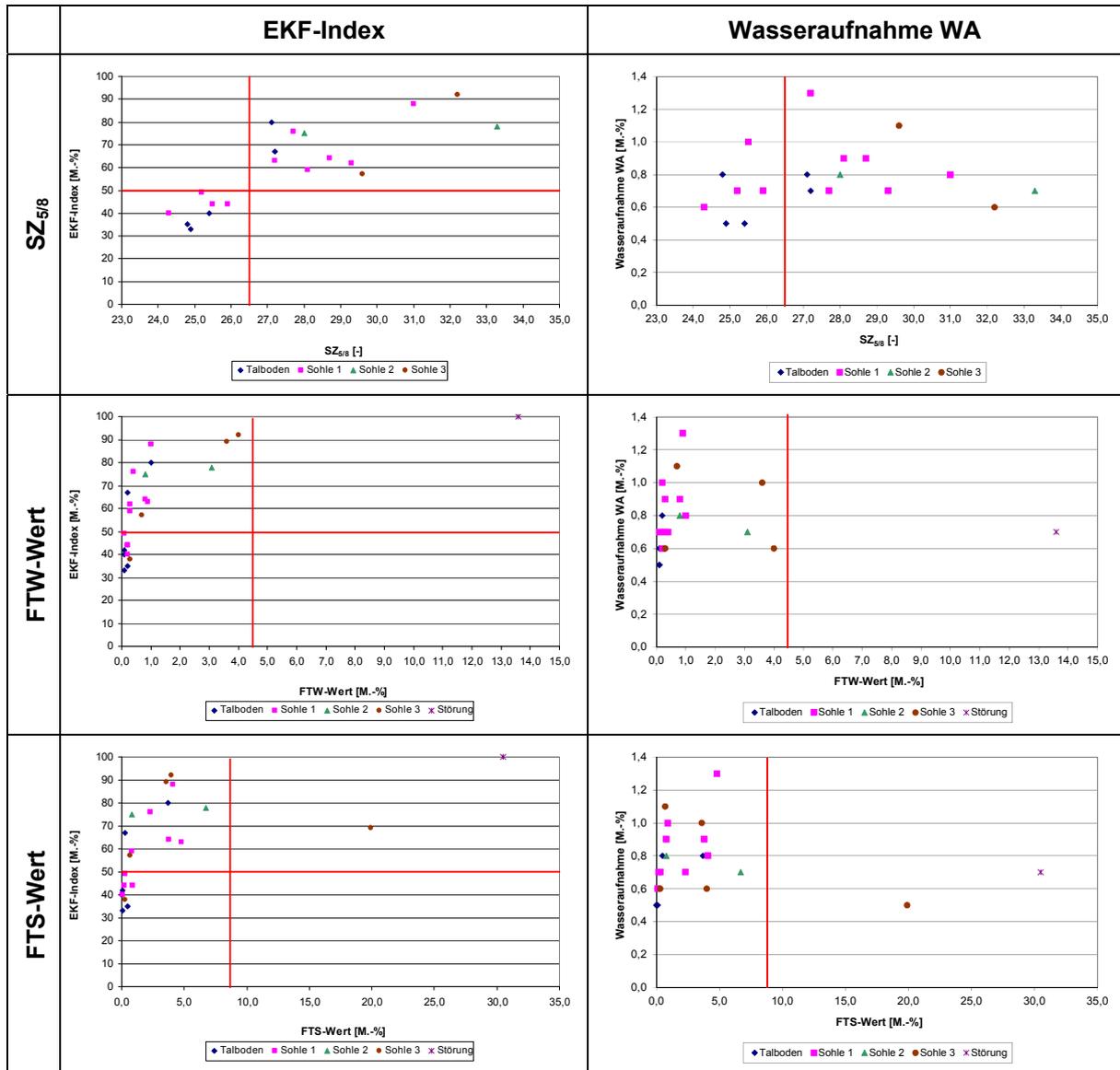


Abbildung 6-14: Zusammenhänge zwischen den normierten Verfahren ($SZ_{5/8}$, FTW-Wert, FTS-Wert) und dem EKF-Index bzw. der Wasseraufnahme

Der EKF-Index – definiert als Anteil der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6 inklusive dem Anteil an dumpf klingenden Körnern – ist im Steinbruch B offensichtlich gut geeignet, um einen Schlagzertrümmerungswert der Gesteinskörnungen von maximal 26 nachzuweisen. So verfügen alle Proben, die diese Anforderung erfüllen, maximal über einen EKF-Index von 50 M.-%. Darüber hinaus belaufen sich auch für alle Proben mit Schlagzertrümmerungswerten größer 26 die EKF-Indizes auf über 50 M.-%.

Im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel und Frost-Tausalz-Beanspruchung ist das Material aus dem Steinbruch B weitgehend unproblematisch. Die wenigen Ausreißer (v. a. 17, 24A und „Störung“) würden mit dem Kriterium eines maximal zulässigen EKF-Index von 50 M.-% auf jeden Fall ausgeschlossen.

Verfügt demnach eine Gesteinskörnung aus dem Steinbruch B über einen EKF-Index (Summe der Anteile an Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6 und dem Anteil an dumpf klingenden Körnern) von maximal 50 M.-% im Einzelkornversuch, so ist sichergestellt, dass sich das Material diesbezüglich sowohl für Schichten ohne Bindemittel nach TL SoB-StB [51, 52], Asphalttragschichten nach TL Asphalt-StB [48, 49], als auch für Beton nach DIN 1045-2 Anhang U [26] eignet (vgl. Tabelle 6-3).

Mit Hilfe der Wasseraufnahme können im Steinbruch B weder Rückschlüsse auf den FTW- und FTS-Wert noch auf den Schlagzertrümmungswert gezogen werden (vgl. Abbildung 6-14). So lässt sich kein zulässiger Maximalwert für die Wasseraufnahme definieren, der mit einem Schlagzertrümmungswert von ≤ 26 , einen FTW-Wert ≤ 4 M.-% (bzw. 2) und/oder einen FTS-Wert ≤ 8 M.-% einhergeht. Darüber hinaus gibt es hier Proben, die bezüglich der Wasseraufnahme deutlich unter dem nach DIN EN 12620 Anhang F geforderten Grenzwert von 1 M.-% für ausreichend widerstandsfähige Gesteinskörnungen gegen Frostbeanspruchung liegen, gemäß den Dosenfrostversuchen jedoch als kritisch einzustufen wären. Damit verdeutlichen die Untersuchungsergebnisse aus dem Steinbruch B, dass ein Anforderungswert von 1 M.-% an die Wasseraufnahme als allgemeingültiges Kriterium zur Abschätzung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung nicht zielführend ist.

Im Steinbruch B wurde der Einzelkornversuch – noch in seiner ursprünglichen Form (Mürbkornversuch) – bereits gelegentlich zur Qualitätskontrolle eingesetzt. Die Ergebnisse deuten an, dass dies hier prinzipiell gut möglich zu sein scheint. Unter Verwendung des modifizierten Verfahrens ließe sich die Aussagekraft des Verfahrens sicher noch deutlich optimieren.

6.4 Steinbruch C

6.4.1 Problemstellung

Im Steinbruch C stehen über neun Sohlen überwiegend Diabase – jedoch in sehr unterschiedlicher Ausbildung – an (Diabas/-breccie/-tuff/-konglomerat). Oberflächennah (Sohle 1-4) ist das Material stark verwittert. An Störungszonen grenzen Diabaskomplexe teilweise an weiche Schiefererien. Die Verwitterung greift hier tiefer in die Schichtfolge ein. Insgesamt wechseln die Gesteinsvarietäten (Qualitäten) im Steinbruch sehr kleinräumig. Die Bandbreite der auftretenden Gesteine reicht von vollständig entfestigten Gesteinen (in Verwitterungs- oder Störungszonen) bis hin zu massigen, intakten, steinharten Diabasen. Insbesondere aufgrund der Kleinräumigkeit des Vorkommens ist ein selektiver Abbau nicht immer möglich. So können Schwächezonen nicht vollständig ausgespart werden und es handelt sich bei den produzierten Gesteinskörnungen in der Regel um ein Gemisch aus aufbereiteten Gesteinen unterschiedlicher Qualität. Dies äußert sich in unterschiedlichen gesteintechnischen Eigenschaften des Gemisches, lässt sich aber allein durch eine visuelle Betrachtung nicht hinreichend abschätzen.

Im Steinbruch C werden u.a. hochwertig einsetzbare Gesteinskörnungen für den Straßenbau („Splitte und Edelsplitte“) produziert (Sohlen 7-9). Dabei werden die Gesteinskörnungen für verschiedene Bereiche herangezogen (z. B. für Fahrbahndecken aus Beton oder für die Herstellung von Asphalten). Die höchsten Anforderungen im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung und auf den Widerstand gegen Zertrümmerung werden hierbei an Gesteinskörnungen für Asphaltbinder und Asphaltdeckschichten gestellt (vgl. Tabelle 6-5). Um hierfür und damit theoretisch auch für die übrigen Einsatzbereiche der Tabelle 6-5 geeignet zu sein, müssen grobe Gesteinskörnungen die Kategorien SZ₁₈ und F₁ erfüllen und/oder dürfen im Frost-Tausalz-Versuch maximal Abwitterungen von 5 M.-% bzw. 8 M.-% aufweisen. Die bisherigen Erfahrungen deuten an, dass der limitierende Parameter in diesem Vorkommen v. a. der Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung ist.

Einsatzbereich		FTW-Wert [M.-%]	FTS-Wert [M.-%]	SZ [-]
TL SoB-StB*	Schichten ohne Bindemittel	≤ 4	-	≤ 26
DIN 1045-2 Anhang U	Regelanforderung für Beton	XF1: ≤ 4 XF3: ≤ 2	XF2: ≤ 8 XF4: ≤ 8	-
TL Beton-StB*	Betontragschicht	≤ 4	-	≤ 22
	Unterbeton	≤ 2	-	≤ 22
	Oberbeton	-	≤ 8 bzw. ≤ 5 ¹⁾	≤ 18
TL Asphalt-StB*	Asphalttragschicht	≤ 4	-	≤ 26
	Asphaltbinder	≤ 1	-	≤ 18 ²⁾ bzw. 22 ³⁾
	Asphaltdeckschicht	≤ 1	≤ 8 bzw. ≤ 5 ¹⁾	(≤ 18, 22 bzw. 26) ⁴⁾

* unter Berücksichtigung des bayerischen Einführungserlasses

¹⁾ für Klimazone III (RStO) [68]

²⁾ für Verkehrsflächen mit besonderer Beanspruchung

³⁾ für Verkehrsflächen mit normaler Beanspruchung

⁴⁾ abhängig von der Asphaltart

Tabelle 6-5: Anforderungen an den FTW-Wert, den FTS-Wert und den SZ-Wert für verschiedene Einsatzbereiche

Im Einsatzbereich von hochwertigen Gesteinskörnungen für den Straßenbau muss in der Regel in kurzer Zeit viel Material bereitgestellt werden, Zeit für langwierige Prüfungen bleibt meist nicht. Folglich wird nach einem Verfahren gesucht, welches dem Produzenten hilft, zeitnah zwischen Gesteinskörnungen ausreichender und problematischer Qualität zu unterscheiden und damit zur Qualitätssicherung beiträgt.

6.4.2 Steinbruchaufnahme und Probenahme

Der Steinbruch C ist in neun Sohlen mit Höhen von bis zu 15 m aufgeschlossen (vgl. Abbildung 6-15).



Abbildung 6-15: Panorama Steinbruch C

Während die oberflächennahen Gesteine (Sohlen 1-3) als „nicht klassifiziertes Material“ Verwendung finden, wird das Material der Sohlen 4-6 für Schichten ohne Bindemittel und die Gesteine der tiefsten Sohlen (7-9) für die Produktion von hochwertigen groben Gesteinskörnungen für den Straßenbau („Splitte und Edelsplitte“) abgebaut. Da an die Gesteine des oberflächennahen Bereiches keine Qualitätsanforderungen gestellt werden, wurden diese nur am Rande untersucht. Die Hauptfragestellung bei diesem Steinbruch, die Qualität der hochwertigen Gesteinskörnungen für den Straßenbau zu sichern, bezieht sich auf den tieferen Abbaubereich. Auf diesem lag daher der Schwerpunkt der Steinbruchaufnahme und der Laboruntersuchungen, detailliert wurde v. a. die Sohle 8 betrachtet. Hier allein konnten zwölf verschiedene „Gesteinsvarietäten“ unterschieden werden, welche durchnummeriert und beprobt wurden (8-1 bis 8-12).

Darüber hinaus wurden auch die Sohlen 2, 4 und 6 beprobt (Proben 2, 4, und 6). Die hier genommenen Proben stellen Mischproben aus den wichtigsten anstehenden Gesteinsvarietäten dieser Sohlen dar. Die primäre Zielsetzung hier war es, die Eignung dieser Sohlen für den Einsatzbereich Schichten ohne Bindemittel (und Asphalttragschichten) zu überprüfen (F_4 , SZ_{26}) und gegebenenfalls mögliche weitere Einsatzbereiche aufzuzeigen.

6.4.3 Ergebnisse und Beurteilung der Laborversuche

Aufbereitung

Alle Proben wurden im Labor einheitlich aufbereitet. Dabei wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

- Vorzerkleinerung mit dem Hammer
- Backenbrecher (große Öffnungsweite)
- Prallmühle (Öffnungsweite 15 mm)
- Prallmühle (Öffnungsweite 12 mm)

Allgemeine Charakterisierung des Materials

Die petrographische Beschreibung und die Korngrößenverteilung der Proben (nach der Aufbereitung) aus dem Steinbruch C sind im Anhang II (Tabellen AII-12 bis AII-14) tabellarisch zusammengefasst.

Der Großteil der Gesteinskörnungen aus dem Steinbruch C weist mit scheinbaren Rohdichten zwischen 2,800 und 2,860 g/cm³ typische Rohdichten für Diabase auf. Deutlich davon weichen die Rohdichten der Proben 2 und 8-7 ab. Bei der Probe 2 lässt sich dies auf einen hohen Verwitterungsgrad zurückführen (Sohle 2), die Probe 8-7 stammt aus einer verwitterten Störungszone. Die Kornformkennzahlen der im Labor aufbereiteten Gesteinskörnungen streuen stark (ca. 20 - 80) und liegen insgesamt auf einem relativ hohen Niveau. Hierin spiegelt sich die unterschiedlich stark ausgeprägte Schieferung in den anstehenden Gesteinen wider. Durch eine Anpassung der Aufbereitung ließe sich die Kornform des Materials sicherlich optimieren. Die Aufbereitung im Rahmen dieser Arbeit sollte für alle Proben aus dem Steinbruch C jedoch auf die gleich Art und Weise erfolgen, um Aussagen über das unterschiedliche Brechverhalten zu ermöglichen und sicherzustellen, dass alle Gesteinsvarietäten eine identische Beanspruchung erfahren haben. Im Hinblick auf die Korngrößenverteilung nach dem Brechvorgang verhalten sich insbesondere die Proben 8-12 und 2 auffällig. Bei diesen fällt ein extrem hoher Anteil an feinem Korn (≤ 5 mm) an, was sich durch ihren hohen Verwitterungsgrad erklären lässt.

Die Wasseraufnahmen der Proben aus dem Steinbruch C reichen von 0,5 bis 7,1 M.-% (vgl. Abbildung 6-16). Der Großteil der Proben verfügt dabei über Werte zwischen 0,5 und 1,9 M.-%. Nur die Proben 8-12 und 2, die sich auch bezüglich der Rohdichte und im Brechverhalten von den anderen Proben abheben, nehmen deutlich mehr Wasser auf. Aufgrund der Wasseraufnahme als widerstandsfähig gegen Frostbeanspruchung könnten nach DIN EN 12620 Anhang F alle Proben bis auf 8-1, 8-7 und 8-12 sowie 2, 4 und 6 eingestuft werden.

Anmerkung:

Bei der Beurteilung von Gesteinskörnungen anhand von Anforderungswerten ist – unabhängig vom Prüfkriterium – stets darauf zu achten, dass die ermittelten Messwerte und die Anforderungswerte die gleiche Genauigkeit (d. h. Anzahl an Dezimalstellen) aufweisen. Kriterien, die gemäß Prüfvorschrift genauer anzugeben sind, sind für die Beurteilung dementsprechend zu runden. Wird beispielsweise wie hier eine $WA \leq 1$ M.-% gefordert, so bedeutet dies, dass auch eine Gesteinskörnung mit einer WA von 1,4 M.-% diese Anforderung erfüllt.

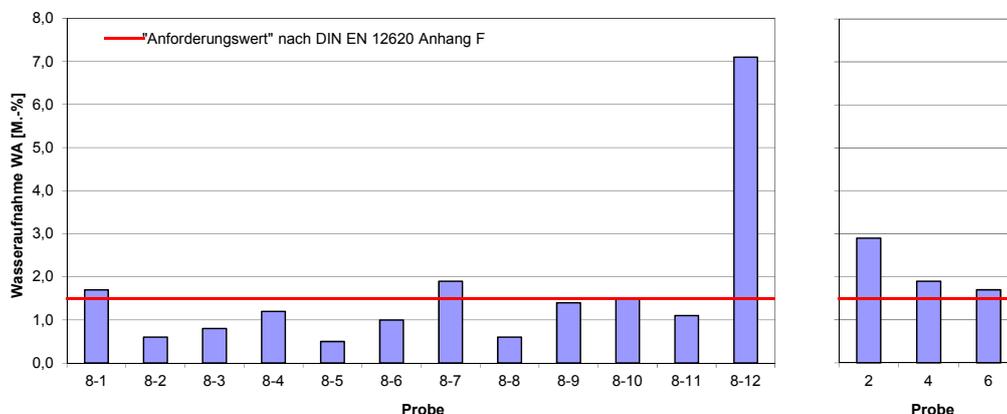


Abbildung 6-16: Wasseraufnahmen der Proben aus dem Steinbruch C im Vergleich zum „Anforderungswert“ nach DIN EN 12620 Anhang F

Im Hinblick auf das FTW-Verfahren erfüllen alle Gesteinskörnungen der Sohle 8 die höchste Kategorie F_1 (vgl. Abbildung 6-17). Folglich ist das Material der Sohle 8 diesbezüglich als unproblematisch einzustufen. Dies bestätigt auch die bisherigen Erfahrungen, so dass eine Kontrolle über die vertraglich festgelegte Häufigkeit hinaus hier nicht notwendig scheint.

Ähnliches lässt sich auch für die Sohlen 4 und 6 feststellen, deren Materialien für den Einsatzbereich Schichten ohne Bindemittel (und Asphalttragschichten) vorgesehen sind. Um hierfür geeignet zu sein, müssen Gesteinskörnungen der Kategorie F_4 entsprechen. Die Mischproben von den Sohlen 4 und 6 weisen FTW-Werte von maximal 1,5 M.-% auf und liegen damit deutlich unter dem Anforderungswert von 4 M.-%.

Bei der einzigen Probe, die die Kategorie F_4 nicht erfüllt (Probe 2), handelt es sich um oberflächennahes Verwitterungsmaterial, welches als „nicht klassifiziertes Material“ verwendet wird. Der hohe FTW-Wert von über 10 M.-% bestätigt die geringe Qualität dieses Materials.

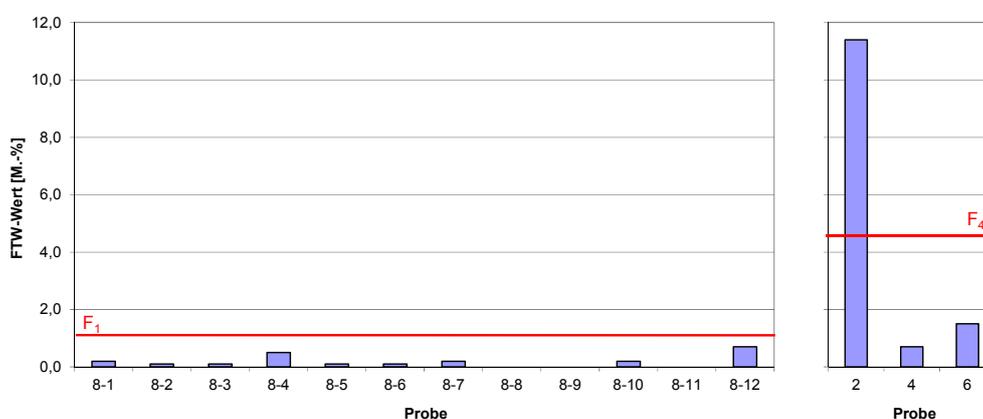


Abbildung 6-17: FTW-Werte der Proben aus dem Steinbruch C im Vergleich zum jeweils anzustrebenden Grenzwert

Das Spektrum des Schlagzertrümmerungswertes – bestimmt an der Kornklasse 5/8 mm – reicht auf der Sohle 8 des Steinbruches C von 14,4 bis 21,8 (vgl. Abbildung 6-18). Damit sollte die Einhaltung der Kategorie SZ_{22} , welche beispielsweise für Asphaltbinder für Verkehrsflächen mit normaler Beanspruchung maßgebend ist, im Regelfall gewährleistet sein. Auch dies deckt sich mit den bisherigen Erfahrungen. Angestrebt wird jedoch insbesondere auf der Sohle 8 ein Wert von 18, um dieses Material auch für den Einsatzbereich Asphaltbinder für Verkehrsflächen mit besonderer Beanspruchung und Asphaltdeckschichten liefern zu können. Dieses Qualitätsniveau kann nicht in jedem Fall eingehalten werden. Dies deuten die Schlagzertrümmerungswerte von drei der zwölf auf Sohle 8 entnommenen Proben an (8-2, 8-3, 8-12), die über dem angestrebten Wert liegen.

Das Material von den Sohlen 4 bis 6 (Proben 4, 6), das bisher für den Einsatzbereich Schichten ohne Bindemittel verwendet wird, hat Schlagzertrümmerungswerte von bis zu 19,0 und liegt damit deutlich unter dem hierfür geforderten Wert von 26. Die untersuchten Materialien entsprechen sogar der Kategorie SZ_{22} , was eine Lieferung in einige neue Einsatzbereiche eröffnet.

Selbst die Mischprobe aus dem oberflächennahen Verwitterungsbereich (Probe 2) hat einen Schlagzertrümmerungswert von 20,4. Dies zeigt das Potential, was im Hinblick auf den Widerstand gegen Zertrümmerung im Material aus dem Steinbruch C steckt.

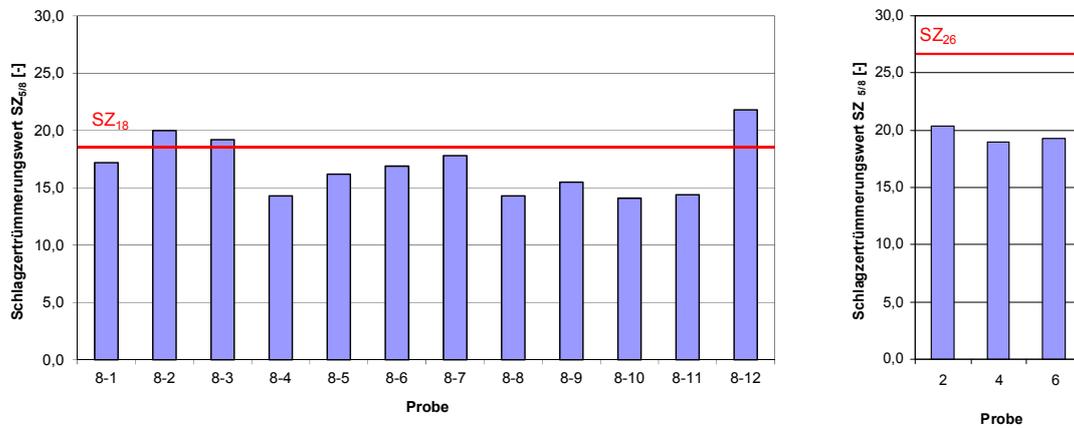


Abbildung 6-18: Schlagzertrümmerungswerte der Proben aus dem Steinbruch C im Vergleich zum jeweils anzustrebenden Grenzwert

Ein deutlich anderes Bild zeigt sich im Hinblick auf den Widerstand der Gesteinskörnungen gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung (vgl. Abbildung 6-19). Diesbezüglich werden – auch innerhalb des tieferen Bereiches – große Qualitätsunterschiede deutlich. So treten hier nebeneinander Gesteinsvarietäten mit FTS-Werten deutlich unter dem im Idealfall anzustrebenden Grenzwert von 5 M.-% und solche mit bis zu 35,4 M.-% Abwitterung im Frost-Tausalz-Versuch auf. Den Anforderungswert von 8 M.-%, der für viele Einsatzbereiche maßgebend ist (vgl. Tabelle 6-5), überschreiten die Proben 8-4, 8-10, 8-12. Über maximal 5 M.-% Abwitterung im Frost-Tausalz-Versuch, wie sie für Asphaltdeckschichten und Oberbeton innerhalb der Klimazone III [68] gefordert werden, verfügen auch die Proben 8-6, 8-7 und 8-9 nicht.

An Gesteinskörnungen für Schichten ohne Bindemittel bestehen bezüglich des Widerstandes gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung keine Anforderungen. Die FTS-Werte der Proben von den Sohlen 4 und 6 liegen bei 14,8 und 6,1 M.-%.

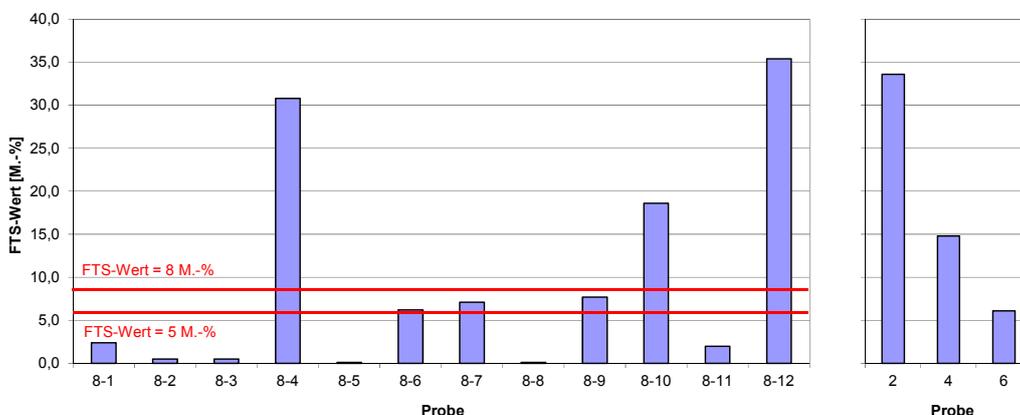


Abbildung 6-19: FTS-Werte der Proben aus dem Steinbruch C im Vergleich zu den evtl. anzustrebenden Grenzwerten

Die Untersuchungsergebnisse im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung und auf den Widerstand gegen Zertrümmerung sind zusammenfassend in Tabelle 6-6 dargestellt.

Probe	FTW-Wert	FTS-Wert	SZ _{5/8}
	[M.-%]	[M.-%]	[-]
8-1	0,2	2,4	17,2
8-2	0,1	0,5	20,0
8-3	0,1	0,5	19,2
8-4	0,5	30,8	14,3
8-5	0,1	0,1	16,2
8-6	0,1	6,2	16,9
8-7	0,2	7,1	17,8
8-8	0,0	0,1	14,3
8-9	0,0	7,7	15,5
8-10	0,2	18,6	14,1
8-11	0,0	2,0	14,4
8-12	0,7	35,4	21,8
2	11,4	33,6	20,4
4	0,7	14,8	19,0
6	1,5	6,1	19,3

Tabelle 6-6: *Untersuchungsergebnisse der Proben aus dem Steinbruch C im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel, Frost-Tausalz-Beanspruchung und Zertrümmerung*

Die Untersuchungen von Gesteinsvarietäten der Sohlen 4 und 6 zeigen, dass die dort anstehenden Materialien im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel und gegen Zertrümmerung im Regelfall gut für den Anwendungsbereich Schichten ohne Bindemittel und Asphalttragschichten geeignet sind. Die Einhaltung der hierfür erforderlichen Kategorien F₄ und SZ₂₆ ist sicher möglich. Da die Materialien offensichtlich auch die Kategorien F₂ und SZ₂₂ erfüllen können, kann auch ein Einsatz im Unterbeton und in der Betontragschicht in Betracht gezogen werden.

Das Hauptaugenmerk der Untersuchungen im Steinbruch C liegt jedoch im tieferen Bereich (Sohle 8). Wie die Erfahrungen und die Voruntersuchungen zeigen, gilt es ein geeignetes Kriterium zu finden, um die Qualität des Materials der Sohle 8 im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung und den Schlagzertrümmerungswert zu kontrollieren. Der Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel stellt offensichtlich bei den Proben von der Sohle 8 in der Regel kein Problem dar.

Um in Betontragschichten, Unterbetonen, Asphalttragschichten bzw. -binder eingesetzt werden zu können, müssen Gesteinskörnungen u. a. einen ausreichenden Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (F₁) sowie einen ausreichenden Widerstand gegen Zertrümmerung (SZ₁₈) aufweisen. Darüber hinaus dürfen Gesteinskörnungen für Oberbeton und Asphaltdeckschichten – neben Schlagzertrümmerungswerten von maximal 18 – im Frost-Tausalz-Versuch maximal Abwitterungen von 8 bzw. 5 M.-% (für

Klimazone III [68]) aufweisen. Damit Material für all die aufgeführten Anwendungsbereiche geeignet ist, müssen folglich die Kategorien F_1 , SZ_{18} und FTS-Werte ≤ 8 bzw. 5 M.-% erfüllt sein (vgl. Tabelle 6-5).

F_1 ist bei den Materialien der Sohle 8 im Regelfall gewährleistet, um SZ_{18} und FTS-Werte ≤ 8 bzw. 5 M.-% sicher einhalten zu können, bedarf es hingegen eines selektiven Abbaus. Der Hersteller braucht ein Beurteilungskriterium, mit dem er jederzeit nachweisen kann, ob produziertes Material diesen Anforderungen sicher entspricht.

Charakterisierung der Materialien im Einzelkornversuch

Bei den Proben aus dem Steinbruch C wurden Gesteinskörner als problematisch eingestuft, die beim Einzelkornversuch die Bruchbilder 4b bzw. 6 zeigten und/oder „dumpf“ klangen. Dabei erfolgte die Prüfung an trockenen Körnern der Kornklasse 8/11 mm. Die diesbezüglichen Ergebnisse (EKF-Indizes) sind in Abbildung 6-20 graphisch dargestellt, und im Anhang II (Tabelle AII-15) im Detail tabellarisch aufgeführt.

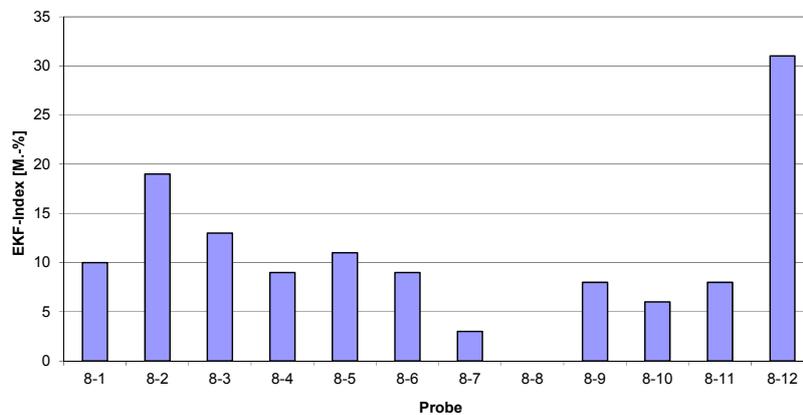


Abbildung 6-20: EKF-Indizes (Massenanteil der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6 sowie dumpf klingender Körner) der Proben aus dem Steinbruch C

Die EKF-Indizes der Proben aus dem Steinbruch C liegen insgesamt zwischen 0 und 31 M.-%. Die höchsten Werte weisen dabei die Proben 8-12, 8-2 und 8-3 auf, welche gleichzeitig über die höchsten Schlagzertrümmerungswerte verfügen. Bei der Probe 8-12 handelt sich zudem um die Probe, die auch bezüglich ihres Brechverhaltens bei der Aufbereitung auffällig war.

Zusammenhänge zwischen den Hilfsgrößen und den normierten Verfahren

Wie die Ergebnisse des Einzelkornversuches (EKF-Index) mit denjenigen der normierten Verfahren ($SZ_{5/8}$, FTW-Wert, FTS-Wert) zusammenhängen, zeigt Abbildung 6-21.

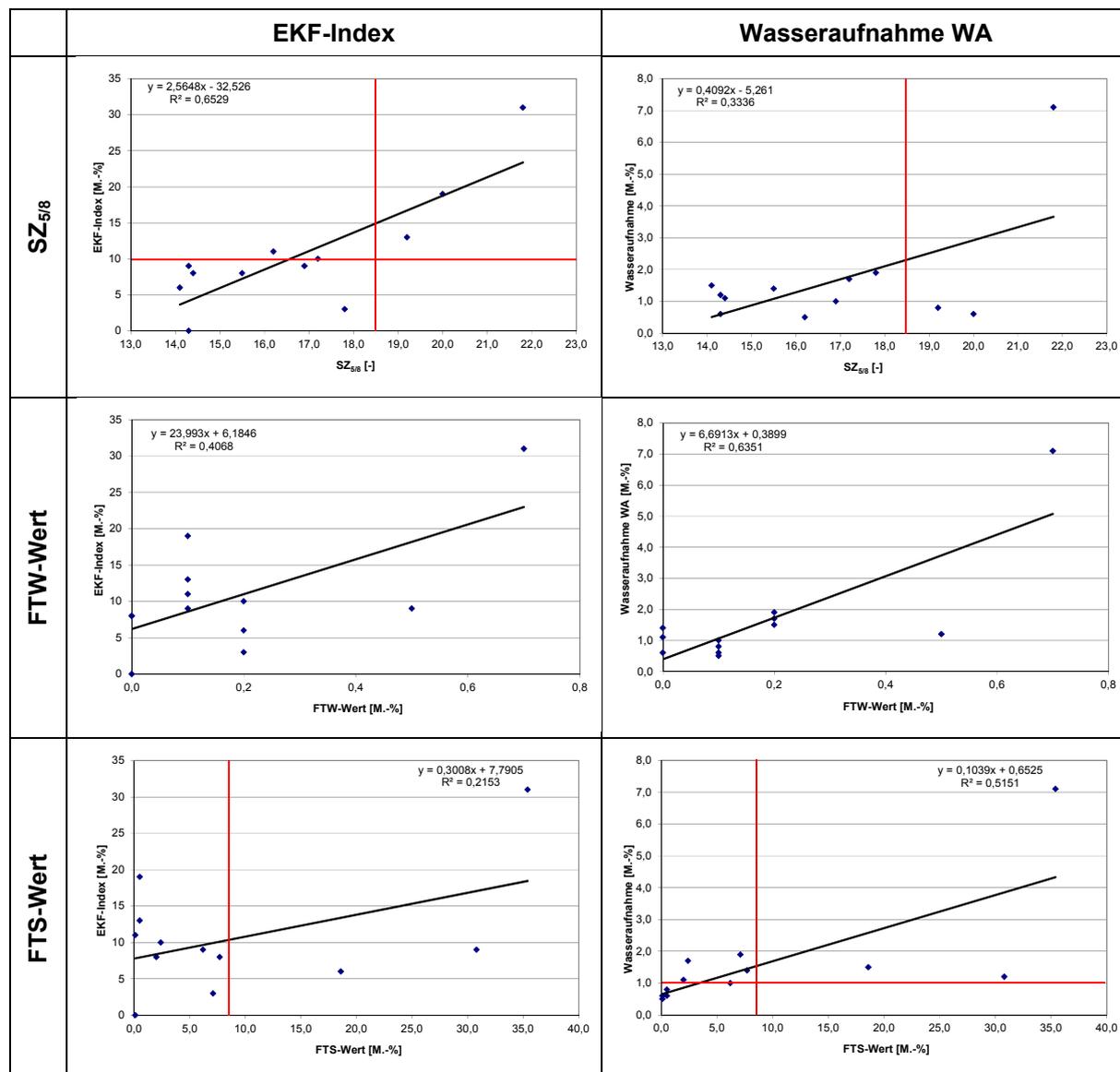


Abbildung 6-21: Zusammenhänge zwischen den normierten Verfahren ($SZ_{5/8}$, FTW-Wert, FTS-Wert) und dem EKF-Index bzw. der Wasseraufnahme

Betrachtet man im Steinbruch C ausschließlich die Sohle 8, so ist der EKF-Index offensichtlich gut geeignet, um einen Schlagzertrümmerungswert der Gesteinskörnungen von maximal 18 nachzuweisen. Die Grenzen für den EKF-Index wären hierfür bei 10 M.-% zu wählen. Anhand der Wasseraufnahme ist eine solche Klassifizierung hingegen nicht möglich. Weist eine Gesteinskörnung der Sohle 8 maximal einen EKF-Index von 10 M.-% auf, so kann der Hersteller davon ausgehen, dass die Kategorie SZ_{18} erfüllt ist und das Material bezüglich des Widerstandes gegen Zertrümmerung (und gegen Frost-Tau-Wechsel) für Betontragschichten, Unterbetone und Asphaltbinder geeignet ist.

Keinen direkten Zusammenhang gibt es hingegen bei den Gesteinskörnungen aus dem Steinbruch C zwischen den Schlagzertrümmerungswerten und den FTS-Werten. So sind bezüglich des Widerstandes gegen Zertrümmerung andere Gesteinsvarietäten für die Qualität maßgebend als beim Frost-Tausalz-Versuch. Demnach können beide Eigenschaften nicht mit dem gleichen EKF-Index bewertet werden.

Es wurde bisher keine Möglichkeit gefunden, den FTS-Wert der Gesteinskörnungen der Sohle 8 über den Einzelkornversuch abzubilden. Im Vergleich der Wasseraufnahmen der Gesteinskörnungen mit den FTS-Werten deutet sich an, dass sich hier die Wasseraufnahme zur groben Abschätzung der Qualität eignen könnte. Zumindest weisen alle Gesteinskörnungen mit Wasseraufnahmen $\leq 1,0$ M.-% auch FTS-Werte $\leq 8,0$ M.-% auf. Bevor dies jedoch als Beurteilungskriterium herangezogen wird, sollte die Gültigkeit dieser These durch eine weitere Versuchsreihe überprüft werden.

Eignet sich die Wasseraufnahme in diesem Beispiel tatsächlich zur Qualitätssteuerung im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung, so kann der Hersteller dadurch entscheiden, ob das produzierte Material diesbezüglich für Betone nach DIN 1045-2 Anhang U (XF2 und XF4) geeignet ist. Möchte er in Oberbetone oder Asphaltdeckschichten liefern, so müsste er zusätzlich einen ausreichenden Widerstand gegen Zertrümmerung (SZ_{18}) über den Einzelkornversuch sicherstellen.

6.5 Beurteilung der Implementierung des Einzelkornversuches zur Qualitätssicherung im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle

In Tabelle 6-7 ist zusammenfassend dargestellt, bei welchen Fragestellungen der Einzelkornversuch als einfacher Versuch zur Qualitätssicherung erprobt wurde und welche Lösungsansätze gefunden wurden.

		Einsatzbereich	Kategorien	Beurteilungskriterium im Rahmen der WPK
Steinbruch A (Kalkstein)	Sohle 1	Schichten ohne Bindemittel, Asphalttragschichten, Beton nach DIN 1045-2 Anhang U (XF1/XF3)	F ₂ SZ ₂₆	EKF-Index ¹⁾ ≤ 30 M.-%
		Beton nach DIN 1045-2 Anhang U (XF2/XF4)	FTS-Wert ≤ 8 M.-%	EKF-Index ¹⁾ ≤ 15 M.-%
Steinbruch B (Granit)		Schichten ohne Bindemittel, Asphalttragschichten, Beton nach DIN 1045-2 Anhang U	F ₂ SZ ₂₆ FTS-Wert ≤ 8 M.-% ²⁾	EKF-Index ¹⁾ ≤ 50 M.-%
Steinbruch C (Diabas)	Sohlen 4-6	Schichten ohne Bindemittel, Asphalttragschichten Beton nach DIN 1045-2 Anhang U (XF1)	F ₄ ²⁾ SZ ₂₆ ²⁾	-
		Betontragschichten, Unterbeton, Beton nach DIN 1045-2 Anhang U (XF3)	F ₂ ³⁾ SZ ₂₂ ³⁾	-
	Sohle 8	Betontragschichten, Unterbeton, Asphalttragschichten, Asphaltbinder, Beton nach DIN 1045-2 Anhang U (XF1/XF3)	F ₁ ²⁾ SZ ₁₈	EKF-Index ¹⁾ ≤ 10 M.-%
		Oberbeton ⁴⁾ , Asphaltdeckschicht ⁴⁾ , Beton nach DIN 1045-2 Anhang U (XF2/XF4)	FTS-Wert ≤ 8 M.-% F ₁ ²⁾ SZ ₁₈	SZ ₁₈ : EKF-Index ¹⁾ ≤ 10 M.-% FTS-Wert ≤ 8 M.-%: WA ≤ 1,0 M.-% ³⁾

¹⁾ EKF-Index = Massenanteile der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b und 6b und dumpf klingender Körner

²⁾ In der Regel gewährleistet

³⁾ Absicherung erforderlich, ob sicher gewährleistet

⁴⁾ nicht für Klimazone III (RStO) [68]

Tabelle 6-7: Fragestellungen und Lösungsansätze bei den Anwendungsbeispielen zum Einzelkornversuch als einfaches Verfahren zur Qualitätssicherung im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle (WPK)

Für die Kalksteine der Sohle 1 des Steinbruchs A wurde eine Möglichkeit gefunden, mit der im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle mit dem Einzelkornversuch nachgewiesen werden kann, wann die produzierten Materialien sicher die Kategorien F_2 , SZ_{26} oder FTS-Wert ≤ 8 M.-% erfüllen und somit diesbezüglich für den Einsatz in Schichten ohne Bindemitteln, Asphalttragschichten und Beton nach DIN 1045-2 Anhang U geeignet sind. Hierfür gilt es, im Einzelkornversuch den Massenanteil der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b, 6 sowie der dumpf klingenden Körner zu bestimmen (EKF-Index). Dieser kann dann zur Qualitätsbeurteilung der produzierten Gesteinskörnungen herangezogen werden (vgl. Tabelle 6-7).

Für den Hersteller des Steinbruchs B ist es von existentieller Bedeutung, jederzeit überprüfen zu können, ob das produzierte Material sicher den Kategorien F_2 , SZ_{26} und FTS-Wert ≤ 8 M.-% entspricht und er dieses für Schichten ohne Bindemittel, Asphalttragschichten, Beton nach DIN 1045-2 Anhang U liefern kann. Auch hierfür wurde ein aussagekräftiges Maß im Einzelkornversuch gefunden. Beträgt der EKF-Index – definiert als Massenanteil der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b, 6 sowie der dumpf klingenden Körner – maximal 50 M.-%, so kann der Hersteller davon ausgehen, dass die Qualität des Materials im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung und den Widerstand gegen Zertrümmerung für diese Einsatzbereiche ausreicht.

Die Implementierung des Einzelkornversuches in die werkseigene Produktionskontrolle des Steinbruchs C ermöglicht dem Hersteller eine zeitnahe Abschätzung, ob das produzierte Material sicher den Kategorien F_1 und SZ_{18} entspricht und ob dieses diesbezüglich damit u. a. für Betontragschichten, Unterbeton, Asphalttragschichten und Asphaltbinder geeignet ist. Dies ist gewährleistet, wenn der EKF-Index – definiert als Massenanteil der Einzelkornfestigkeitsklassen 4b, 6 sowie der dumpf klingenden Körner – maximal bei 10 M.-% liegt. Um nachweisen zu können, ob das produzierte Material auch den Anforderungen an Oberbeton und Asphaltdeckschichten (ohne Klimazone III [68]) genügt, d. h. u. a. einen FTS-Wert ≤ 8 M.-% aufweist, bedarf es eines zusätzlichen Beurteilungskriteriums. Möglicherweise könnte sich hierfür die Wasseraufnahme eignen.

Darüber hinaus konnte durch die Einzelkornversuche nachgewiesen werden, dass die Diabase der Sohlen 4 bis 6 im Steinbruch C die Anforderungen an Gesteinskörnungen (bzgl. SZ, FTW-Wert, FTS-Wert) für Schichten ohne Bindemittel, Asphalttragschichten und Betone nach DIN 1045-2 Anhang U (XF1) sicher erfüllen. Daneben deutet sich an, dass offensichtlich sogar das Potential vorhanden ist, das Material in Betontragschichten, Unterbeton und Beton nach DIN 1045-2 Anhang U (XF3) einzusetzen. Dies bedarf jedoch noch einer Absicherung durch genauere Untersuchungen.

7 Zusammenfassung

Grundlagen und Zielsetzung

Die Beurteilung der Qualität von Gesteinskörnungen erfolgt generell anhand ihrer gesteintechnischen Eigenschaften. Angepasst an den Verwendungszweck werden an Gesteinskörnungen unterschiedliche Anforderungen gestellt.

Im Rahmen der CE-Kennzeichnung ist der Hersteller von Gesteinskörnungen verpflichtet, die Eigenschaften seiner Produkte zu deklarieren, d. h. jedem Material bestimmte Qualitätsniveaus zuzuweisen, die er mit Lieferung garantiert. Die Einhaltung der deklarierten Werte wird – je nach Anforderungskriterium und Verwendungszweck – regelmäßig (z. B. jährlich) mit normierten Verfahren kontrolliert. Aufgrund der Inhomogenität von Gesteinsvorkommen reicht aber ein derartig weitmaschiges Kontrollsystem für die Qualitätssicherung, insbesondere wenn das tatsächliche Qualitätsniveau nahe am deklarierten Wert liegt, häufig nicht aus. Da es sich bei den genormten technischen Verfahren zumeist um aufwändige, langwierige und kostenintensive Prüfungen handelt, sind diese zur gelegentlichen Überwachung, nicht jedoch zur engmaschigen, laufenden Kontrolle im Rahmen der Qualitätssteuerung geeignet. Bis die Ergebnisse vorliegen, vergeht oftmals zu viel Zeit, um gegebenenfalls rechtzeitig steuernd in die Produktion eingreifen zu können.

Besonders ausgeprägt ist die beschriebene Problematik im Hinblick auf das Verhalten von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung, welches auch die Dauerhaftigkeit damit hergestellter Baustoffgemische (z. B. von Beton) maßgeblich beeinflusst. Erschwerend kommt hinzu, dass eine Vielzahl an normierten Prüfverfahren zur Charakterisierung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung existieren, die eine Beurteilung in verschiedenen Beanspruchungsbereichen ermöglichen, z. T. jedoch zu widersprüchlichen Beurteilungen führen.

Um das Qualitätsniveau von Gesteinskörnungen für Beton dauerhaft und nachhaltig sicherzustellen und somit Schäden insbesondere im Anwendungsbereich „Straßen- und Brückenbau“ zu minimieren, war es zwingend erforderlich, das Kontrollsystem von Gesteinskörnungen insbesondere im Hinblick auf ihr Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung im Beton zu hinterfragen und zu optimieren.

Hierfür galt es aus der Vielzahl an derzeit nebeneinander existierenden technischen Verfahren das zur Beurteilung des Verhaltens einer Gesteinskörnung bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung im Beton am besten geeignete Verfahren festzulegen, welches mit zur CE-Kennzeichnung heranzuziehen ist. Es sollte v. a. praxisnah, aber auch in einem angemessenen zeitlichen Rahmen durchführbar sein und differenzierende, gut reproduzierbare Ergebnisse liefern. Um die derzeit gängigsten bzw. die für das nationale bzw. europäische Regelwerk relevanten Verfahren hinreichend beurteilen zu können, wurden diese im Rahmen der Arbeit vergleichend untersucht. Betrachtet wurden im Hinblick auf die Prüfung an der isolierten Gesteinskörnung die Dosenfrostversuche (mit bzw. ohne Tausalz) und Kristallisationsversuche (mit Magnesiumsulfat bzw. Natriumsulfat) und zur Charakterisierung des Verhaltens von Gesteinskörnungen im Beton die Plattenprüfverfahren (mit bzw. ohne

Tausalz) und das CDF- bzw. CIF-Verfahren. Darüber hinaus wurden auch gesteintechnische Eigenschaften (Wasseraufnahme, Mürbkorngehalt), die teilweise ebenfalls zur Beurteilung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung herangezogen werden, berücksichtigt. Da bekannt war, dass sich die Ergebnisse der Laborversuche und hier vor allem die Prüfungen an den Gesteinskörnungen nicht ohne weiteres auf das Praxisverhalten damit hergestellter Betone übertragen lassen, wurde zudem der Praxisbezug über Auslagerungsversuche von standardisierten Betonen sowie über Bauwerksuntersuchungen überprüft.

Des Weiteren sollte ein einfaches und kostengünstiges Verfahren entwickelt werden, das den Gesteinskörnungsproduzenten die zeitnahe Bewertung der Qualität des produzierten Materials im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle ermöglicht. Da die normierten Verfahren zu aufwändig und langwierig sind, wurde der Ansatz verfolgt, hierfür eine relativ einfach und schnell bestimmbare gesteintechnische Eigenschaft heranzuziehen, die das Verhalten von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung maßgeblich bestimmt und sich am normierten Verfahren, das auch für die Deklaration verwendet wird, kalibrieren lässt. Hierfür in Betracht gezogen wurden die Wasseraufnahme, die petrographische Beurteilung und der Mürbkorngehalt. Basierend auf vergleichenden Untersuchungen zwischen den gesteintechnischen Eigenschaften und den normierten Verfahren wurde schließlich der vielversprechende Ansatz des Mürbkornversuches – das Verhalten der Einzelkörner unter mechanischer Beanspruchung als Maß für die Qualität von Gesteinskörnungen heranzuziehen – weiterverfolgt und daraus der Einzelkornversuch entwickelt. Mit diesem wurde eine Anwendungsmethodik zur Qualitätssicherung im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle erarbeitet, welche letztlich an drei Praxisbeispielen mit unterschiedlichen Problemstellungen getestet wurde.

Ergebnisse

Es konnte nachgewiesen werden, dass eine Differenzierung von Gesteinskörnungen im Hinblick auf ihr Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung durch Prüfung der isolierten Gesteinskörnung grundsätzlich möglich ist. Dabei liefert jedes Verfahren (Magnesiumsulfatversuch, Kristallisationsversuch und Dosenfrostversuche) spezifische und unterschiedlich stark differenzierende Werte. Zusammenhänge zwischen den Ergebnissen dieser Prüfverfahren an den Gesteinskörnungen gibt es praktisch nicht, teilweise führen die Ergebnisse verschiedener Verfahren sogar zu unterschiedlichen Beurteilungen. Damit wurde die Notwendigkeit bestätigt, sich auf ein Verfahren zur Prüfung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung zu einigen. Für die Anwendung bei Gesteinskörnungen bietet sich – beurteilt nach dem Beanspruchungsmechanismus, der Differenzierung und der Streuung der Ergebnisse sowie der Durchführbarkeit – vordringlich der Dosenfrostversuch an. Dabei sollte – je nach Einsatzbereich – der Dosenfrost mit bzw. ohne Taumittel angewandt werden, da sich Gesteinskörnungen nachweislich bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung unterschiedlich verhalten. Daneben konnte gezeigt werden, dass eine Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung bei Gesteinskörnungen sowohl zu Abwitterungen als auch zu Schädigungen des inneren Gefüges führen kann und dass beides bei einer vollständigen Charakterisierung einer Gesteinskörnung im Hinblick auf das Verhalten bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung zu berücksichtigen ist.

Der Vergleich der Ergebnisse der Frostuntersuchungen an den isolierten Gesteinskörnungen mit den Ergebnissen von standardisierten Betonversuchen im Labor (CIF-/CDF-Verfahren und Plattenprüfverfahren mit Wasser bzw. Tausalz) sowie mit den Ergebnissen der Auslagerungsversuche und den Bauwerksbegutachtungen zeigt, dass die Prüfung der isolierten Gesteinskörnung nicht alleine maßgebend für das Frost- bzw. Frost-Tausalz-Verhalten eines Betons ist. Die verwendete Gesteinskörnung muss jedoch eine gewisse Qualität aufweisen, wenn Schäden am Bauwerk vermieden werden sollen. Dies kann im Rahmen der CE-Kennzeichnung durch die Dosenfrostversuche mit und ohne Tausalz hinreichend genau überprüft und sichergestellt werden. Da die Frostbeständigkeit von Beton auch von anderen Faktoren wie der Kontaktzone oder dem Mörtel (z. B. Zementart, w/z-Gehalt) abhängt, ist die alleinige Beurteilung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung über Betonversuche mit standardisierten Zusammensetzungen als kritisch anzusehen. Um das tatsächliche Verhalten der Betone beschreiben zu können, sollten im Bedarfsfall Betonversuche mit der in der Praxis verwendeten Zusammensetzung angesetzt werden.

Darüber hinaus konnte aufgezeigt werden, dass die Hilfsgrößen Wasseraufnahme und Mürbkorngehalt das Verhalten einer Gesteinskörnung bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung mit beschreiben helfen, sich jedoch nicht als jeweils alleinig entscheidendes und v. a. als allgemeingültiges Kriterium zur Beurteilung eignen und die Dosenfrostversuche nicht ersetzen können. Gleichzeitig deutet sich an, dass sich im Einzelfall das Verhalten von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung sehr wohl durch Hilfsgrößen wie den Mürbkorngehalt abschätzen lässt.

Folgerichtig wurde eine Anwendungsmethodik zur Qualitätssicherung im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle entwickelt. Die grundlegende Idee dabei ist, den für die zu überprüfende technische Eigenschaft einer Gesteinskörnung qualitätssteuernden Parameter in einem einfachen Versuch kenntlich zu machen und diesen zur Beurteilung heranzuziehen.

Hierfür müssen zunächst die qualitätssteuernden gesteintechnischen Parameter eines Vorkommens identifiziert und festgelegt werden. Dies kann am besten durch die Interpretation der Ergebnisse eines normierten Verfahrens durch einen „mit technischer Gesteinskunde vertrauten Geologen, Mineralogen oder Materialprüfer“ erfolgen. Ziel ist es herauszufinden, welche Gesteinsvarietäten die Qualität ungünstig beeinflussen.

Anschließend gilt es ein Beurteilungskriterium zu finden, wie man diese „problematischen“ Körner durch ein einfaches physikalisches Verfahren kenntlich machen kann. Hierfür sind vergleichende Betrachtungen zwischen dem einfachen Verfahren und dem normierten Verfahren notwendig. Als einfaches Verfahren zur Überprüfung der Qualität von Gesteinskörnungen wurde der Einzelkornversuch entwickelt, bei dem es sich um eine Weiterentwicklung des Mürbkornversuches nach der ehemaligen Ö-NORM B 3304 handelt. Der Einzelkornversuch nutzt das Grundprinzip des Mürbkornversuches, die Qualität von Gesteinskörnungen über das Verhalten der Einzelkörner bei mechanischer Beanspruchung zu beurteilen. Dabei erfolgt der „Hammerschlag“ im Einzelkornversuch nicht mehr händisch, sondern im Einzelkornprüfgerät, womit stets die gleiche, genau definierte Last und damit ein vergleichbarer Energieeintrag aufgebracht wird. Des Weiteren wurde das Verfahren im Hinblick auf die Beurteilung der Gesteinskörnungen beim „Hammerschlag“ erweitert.

Als Grundlage für die Implementierung des Einzelkornversuches zur Qualitätssicherung im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle wurde eine Arbeitsanleitung erstellt, welche die Durchführung des Einzelkornversuches beschreibt und mögliche Bewertungskriterien (z. B. Anteil an dumpf klingenden Körnern, verschiedene Einzelkornfestigkeitsklassen) aufzeigt. Da der Einzelkornversuch stark korngrößen- und kornformabhängig ist, sollten vergleichende Untersuchungen ausschließlich an einer identisch aufbereiteten, möglichst eng gefassten Kornklasse (z. B. 8/11 mm) durchgeführt werden. Um auch die Beeinflussung der Ergebnisse durch unterschiedliche Feuchtegehalte der Proben und durch unterschiedliche Bearbeiter möglichst gering zu halten, sollte die Prüfung stets durch die gleiche Person und an Proben mit dem gleichen Wassergehalt (z. B. trocken) erfolgen.

Eine allgemeingültige Definition, welches Kriterium zur Beurteilung der Qualität von Gesteinskörnungen heranzuziehen ist, ist u. a. aufgrund der starken Gesteinsabhängigkeit des Verfahrens nicht zielführend. Vielmehr ist für jede Fragestellung gesondert zu entscheiden, wie sich ein „problematisches“ Korn beispielsweise im Hinblick auf das Verhalten einer Gesteinskörnung bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung äußert und durch welches Bewertungskriterium beim Einzelkornversuch man dieses am besten fassen kann. Hierfür bedarf es stets der Anbindung an das maßgebende normierte Verfahren. Den Anteil der im Einzelversuch kenntlich gemachten „problematischen“ Körner gibt der Einzelkornfestigkeitsindex (EKF-Index) wieder. Letztlich wird definiert, wie groß der EKF-Index in der produzierten Gesteinskörnung sein darf, damit die angestrebten Anforderungswerte sicher eingehalten werden können. Auch dies muss für jede Fragestellung eigens festgelegt werden, was einer „Kalibrierung“ des einfachen Verfahrens am normierten Verfahren durch den „mit technischer Gesteinskunde vertrauten Geologen, Mineralogen oder Materialprüfer“ entspricht.

Wie die Implementierung der neu entwickelten Anwendungsmethodik in verschiedenen Steinbrüchen mit unterschiedlichen Problemstellungen zeigt, handelt es sich dabei um ein sehr vielfältig einsetzbares Nachweissystem für die werkseigene Produktionskontrolle. So kann bei „kritischen“ Gesteinskörnungen zeitnah überprüft werden, ob das produzierte Material im Hinblick auf den Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel, gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung und/oder gegen Zertrümmerung sicher über eine ausreichende Qualität für den jeweils geplanten Anwendungsbereich verfügt. Die dadurch erhöhte Liefer- und Gebrauchssicherheit sollte sich langfristig positiv auf die Dauerhaftigkeit damit hergestellter Baustoffgemische (z. B. von Betonen) auswirken und damit dem nachhaltigen Bauen dienen. Daneben ermöglicht das Verfahren eine optimale und wirtschaftliche Nutzung von Lagerstätten.

8 Literatur

- [1] ERFURT, D.; LUDWIG, H.-M.: Verbundforschung Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen - Teilprojekt „Projektmanagement – Petrographie – Auslagerung“. – Zwischenbericht zum AiF-Vorhaben Nr. 15214 BG/1 (04/2008).
- [2] WESTINER, E.; WÖRNER, TH.; NEIDINGER, S.; BRAMESHUBER, W.; RAHIMI, A.: Verbundforschung Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen - Teilprojekt „Prüfung der Gesteinskörnung und Bedeutung der Kontaktzone“. – Schlussbericht zum AiF-Vorhaben Nr. 15212 N (01/2011).
- [3] MÜLLER, CH.; ALONSO, M. T.; WEISE, F.; MAIER, B.; EHRIG, K.; MEINEL, D.: Verbundforschung Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen - Teilprojekt „Prüfung von Gesteinskörnungen im Beton“. – Schlussbericht zum AiF-Vorhaben Nr. 15213 N (25.11.2010).
- [4] WEISE, F. MAIER, B. EHRIG, K., MEINEL, D.: Verbundforschung Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen - Teilprojekt „Auslagerungsversuche zum Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand der Gesteinskörnungen im Beton“. – Präsentation auf der 6. Sitzung der Betreuungsgruppe zum AiF-Vorhaben Nr. 15214 BG (29.11.2010).
- [5] DIN EN 12620, Gesteinskörnungen für Beton.
- [6] DIN EN 1097-6, Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme.
- [7] SCHULZE, K.; FEIX, R: Untersuchungen über die wesentlichen Einflussfaktoren bei Frost-Tau-Wechsel-Versuchen an Mineralstoffen und Entwicklung eines FTW-Verfahrens mit automatischer Prüfzyklensteuerung. – Bericht über den Forschungsauftrag Nr. 9.104, 336 Seiten, München 1982.
- [8] MANNS, W.; NEUBERT, B.; WIES, S.: Frostwiderstand von Betonzuschlag. – Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 9293, 89 Seiten, Stuttgart 1996.
- [9] PETURSSON, P.; SCHOUENBORG, B.: Frost Resistance Test on Aggregates with and without Salt (FRAS). – Draft Report, Nordtest Project No. 1624-03, 2004.
- [10] Ö-NORM B 3304, 1981-04, Betonprüfung. (zurückgezogen)
- [11] DOMBROWSKI, K.: Einfluss von Gesteinskörnungen auf die Dauerhaftigkeit von Beton. – Dissertation an der Bauhaus Universität Weimar, 273 Seiten, Weimar 2003.
- [12] POWERS, T.C.: A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. – Proceedings of the American Concrete Industrie, 41(4), 1945.
- [13] AUBERG, R.: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton mit dem CDF- und CIF-Test. – Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Band 6, 248 Seiten, Aachen 1999.
- [14] HELMUTH, R.A.: Investigations of the Low Temperature Dynamic Mechanical Response of Hardened Cement Paste. – Dept. of Civil Engineering, Stanford Univ., Technical Report 154, 1972.
- [15] FAGERLUND, G.: Kritischer Sättigungsgrad beim Gefrieren von porösem und sprödem Material. – Institut für Bautechnik, TH Lund, Report 34, Lund (Schweden) 1972.
- [16] DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON (DAFSTB) [Hrsg.]: Sachstandbericht: Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse, Heft 560, Beuth-Verlag 2005.
- [17] ERBAYDAR, S.: Eisbildung, Volumendilatationen und Wassertransport im Gefüge von Betonen bei Temperaturen bis -60 °C. – Dissertation TU München, 1986.
- [18] SETZER, M.J.: Mikroeislinnenbildung und Frostschaden. – In: EILIGEHAUSEN, R. [Hrsg.]: Werkstoffe im Bauwesen - Theorie und Praxis (Construction Materials - Theory and application), Ibidem, Stuttgart 1999.

- [19] RUSIN, Z.: A Mechanism of expansion of concrete aggregate due to frost action. – Cement and Concrete Research 21, 1991.
- [20] CHATTERJI, S.; JENSEN, A.D.: Formation and development of interfacial zones between aggregates and portland cement pastes in cement-based materials. – MASO, J.C. [eds.] Interfaces in cementitious composites, Proceedings of International RILEM Conference, Toulouse 1992, E & FN Spon, London 1993.
- [21] DIN EN 1367-1, Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel.
- [22] DIN EN 1367-2, Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen – Teil 2: Magnesiumsulfat-Verfahren.
- [23] DIN EN 1367-6, Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen – Teil 6: Beständigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel in der Gegenwart von Salz.
- [24] DIN EN 932-3, Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 3: Durchführung und Terminologie einer vereinfachten petrographischen Beschreibung.
- [25] DIN V 20000-103, Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 103: Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620.
- [26] DIN 1045-2, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.
- [27] ZTV-ING, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING).
- [28] ZTV Beton, Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton (ZTV Beton).
- [29] TL Beton-StB, Technische Lieferbedingungen für Baustoffe und Baustoffgemische für Trag-schichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton (TL Beton-StB 07). – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- [30] TL Gestein-StB, Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein-StB 04). – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV 613, Köln.
- [31] DIN 52111: 1999, Kristallisationsversuch, Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen.
- [32] DIN EN 1367-1:1999, Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel - Anhang B.
- [33] DIN EN 1097-2, Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung.
- [34] Datensammlung des Arbeitsausschusses 6.1 „Gesteinskörnungen“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln.
- [35] LÖFFLER, K.: Methoden zur Untersuchung der Veränderung an Splitt durch Frost und deren Beurteilung aus Laborversuchen. – Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 117, 40 Seiten, Bonn 1971.
- [36] DIN EN 12390-9, Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-widerstand, Abwitterung.
- [37] Swedish Standard SS 13 72 74: Method for determining the frost resistance of concrete: Børas-Method. – Swedish National Testing and Research Institut.
- [38] BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (BAW) [Hrsg.]: Frostprüfung von Beton, Merkblatt Juli 2004.
- [39] RILEM Recommendation: RILEM TC176 IDC/Slab-Test - Freeze-Thaw Resistance of Concrete - Internal deterioration. – Materials and Structures, 2004.
- [40] RILEM Draft Recommendation: RILEM TC176 IDC (2001)/CIF-Test - Capillary suction, Internal damage and Freeze Thaw test - Reference method and alternative methods A and B. – Materials and Structures 34, S. 515-525; 2001.

-
- [41] RILEM Recommendation: RILEM TC176 IDC/CIF-Test - Capillary suction, Internal damage and Freeze thaw Test – Reference method and alternative methods A and B, Materials and Structures, 2004.
- [42] SETZER, M.J.: Frostscha den - Grundlagen und Prüfung. – In: Beton- und Stahlbetonbau, Heft 7/02, Ernst & Sohn Verlag 2002.
- [43] DIN EN 933-3, Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 3: Bestimmung der Kornform – Plattigkeitskennzahl.
- [44] DIN EN 933-4, Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 4: Bestimmung der Kornform – Kornformkennzahl.
- [45] DIN V 18004, Anwendungen von Bauprodukten in Bauwerken - Prüfverfahren für Gesteinskörnungen nach DIN V 20000-103 und DIN V 20000-104.
- [46] Datensammlung zum Zusammenhang zwischen SZ und $SZ_{5/8}$. – TU München, MPA BAU.
- [47] RILEM Recommendation TC 117 FDC: CDF-Test - test method for the freeze thaw and deicing resistance of concrete - Tests with sodium chloride (CDF). – Materials and Structures, 1996.
- [48] TL Asphalt-StB, Technische Lieferbedingungen für Asphaltmischgut für den Bau von Verkehrsflächenbefestigungen (TL Asphalt-StB 07). – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV 756, Köln.
- [49] Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern Nr. II D9-43434-001/08 vom 10.11.2008.
- [50] HEINE, P.: Gesteinskörnungen im Beton unter Frost-Tau-Belastung - Auswirkungen auf Prüfung und Anwendung. – Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Band 7, Shaker Verlag, Aachen 2004.
- [51] TL SoB-StB, Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (TL SoB-StB 04, Fassung 2007). – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV 697, Köln.
- [52] Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern Nr. II D9-43415-004/05 vom 20.06.2008 und 31.03.2010.
- [53] Ö-NORM EN 12620, Gesteinskörnungen für Beton.
- [54] Ö-NORM B 3131, Gesteinskörnungen für Beton - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 12620.
- [55] Ö-NORM EN 1097-2, Abschnitt 5, Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung.
- [56] Ö-NORM EN 1367-1, Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung des Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel.
- [57] SN 670 115, Qualitative und quantitative Mineralogie und Petrographie von Gesteinskörnungen.
- [58] TL Min-StB, Technische Lieferbedingungen für Mineralstoffe im Straßenbau (TL Min-StB 2000, Ausgabe 2000).
- [59] DIN 4226-1, Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel – Teil 1: Normale und schwere Gesteinskörnungen, 2001-07.
- [60] DIN 52106, Prüfung von Gesteinskörnungen - Untersuchungsverfahren zur Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit.
- [61] KALKOWSKI, S.: Kristallisationsversuche und ihre Aussage über die Frost-Tausalz-Beständigkeit von Gesteinsprobekörpern und Gesteinskörnungen für dauerhaften Beton – Vergleich von Prüfverfahren. – Studienarbeit F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus Universität Weimar, 2002.
- [62] GLOCK, G.: Frost-Taumittel-Widerstand von Betonzuschlagstoffen und Beton. – Dissertation RWTH Aachen, 1991.

- [63] WESTINER, E.; WÖRNER, TH.; NEIDINGER, S.: Untersuchungen zum Frost-Tausalz-Widerstand von Beton der Expositionsklasse XF2 nach ZTV-ING, Teil 1: Historische Erkundung. – Schlussbericht zum Forschungsprojekt des Bayerischen Industrieverbandes Steine und Erden e. V., TU München, 11/2009.
- [64] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), Fortschreibung Juli 2006, Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern vom 2. Juli 2008 Az.: IID8-43420-004/03 – In: Allgemeines Ministerialblatt Nummer 6, München 30. Juli 2008, 21. Jahrgang.
- [65] Verwaltungsvorschrift des Innenministeriums über die Fortschreibung der Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), der Technischen Lieferbedingungen und Prüfvorschriften (TL/TP-ING) und des Merkblattes für die Bauüberwachung von Ingenieurbauten (M-BÜ-ING) vom 20. Juli 2008 Az.: 63-3944.0/144 – In: Gemeinsames Amtsblatt des Landes Baden-Württemberg Nummer 6, Stuttgart, 30. Juli 2008, 56. Jahrgang.
- [66] SCHIEßL, P.; WESTINER, E.: Festlegung von Frost-Tausalz-Anforderungen an Gesteinskörnungen nach ZTV-ING Teil 3, Abschnitt 3.1. – Sachstandbericht zu einer Besprechung an der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern am 01.02.07, Centrum für Baustoffe und Materialprüfung an der Technischen Universität, 2007. (nicht veröffentlicht)
- [67] GEHLEN, CH.: Stellungnahme zum Sachstandbericht, cbm, TU München zum Thema Frost-Tausalz-Anforderungen an Gesteinskörnungen. – Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA), 2007. (nicht veröffentlicht)
- [68] RStO: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen. – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV 499, Köln.
- [69] STARK, J.; JUNG, H.: Dauerhaftigkeit von Beton, Der Baustoff als Werkstoff. – F.A. Finger Institut für Baustoffkunde der Bauhaus Universität Weimar, Birkhäuser Verlag, Basel 2001.
- [70] SETZER, M.J.; AUBERG, R.; HARTMANN, V.: Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Transportbeton. – Schriftenreihe des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie, Heft 11, 1999.
- [71] ZECH, B.: Zum Gefrierverhalten des Wassers im Beton. – Dissertation TU München, 1981.
- [72] KANEUJI, M.; WINSLOW, D.N.; DOLCH, W.L.: The relationship between an aggregate's pore size distribution and its freeze-thaw durability in concrete. – In: Cement and Concrete Research 10, Nr. 3, 1980.
- [73] MARKS, V.J.; DUBBERKE, W.: Durability of Concrete and the Iowa Pore Index Test. – Transportation Research Record 853, S. 25-30, USA 1982.
- [74] MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M.: Concrete - Structure, Properties, and Materials. – Prentice Hall, USA 1993.
- [75] STOCKHAUSEN, H.; DORNER, H.; ZECH, B.; SETZER, M.J.: Untersuchungen von Gefriervorgängen in Zementstein mit Hilfe der DTA. – In: Cement and Concrete Research 9, 1979.
- [76] POWERS, T.C.; HELMUTH, R.A.: Theory of volume changes in hardened Portland cement pastes during freezing. – In: Highway Research Board Proceedings 32, 1953.
- [77] POWERS, T.C.: Basic considerations pertaining to freezing and thawing tests. – Proceedings of the American Society of Testing Materials 55, 1955.
- [78] DOMBROWSKI, K.: Frost-Tausalz-Widerstand von Straßenbeton - Untersuchungen zu D-cracking. – Diplomarbeit Bauhaus-Universität Weimar, 1996.
- [79] FOOKES, P.G.: Aggregates: A review of prediction and performance. – In: J. GLANVILLE, A. NEVILLE [eds.] Prediction of concrete durability. Proceedings of Stats 21st Anniversary Conference, Nov. 1995, London 1997.
- [80] SETZER, M.J.: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Betonwaren. – Forschungsbericht aus dem Fachbereich Bauwesen, Universität GH Essen, Heft 49, 1990.
- [81] HARTMANN, V.: Optimierung und Kalibrierung der Frost-Tausalz-Prüfung von Beton - CDF-Test. – Dissertation Universität GH Essen, 1993.

-
- [82] Ö-NORM B 3306, 9.82, Prüfung der Frost-Tausalz-Beständigkeit von vorgefertigten Beton-erzeugnissen.
- [83] SETZER, M.; AUBERG, R.: Prüfverfahren des Frostwiderstandes von Beton. – Bestimmung der Inneren Schädigung - CIF-Test. – In: Beton & Fertigteiltechnik 64, 4/1998.
- [84] LEINS, W.; KOHLER, G.; MEYER, G.; BERG VON, P.: Beanspruchung und Prüfung von Gesteinssplitten - Internationale Splittprüfverfahren, deren Aussagekraft und die Beeinflussung der Prüfwerte durch die Kornform. – Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 156, Bundesminister für Verkehr, 1974.
- [85] FEIX, R.: Untersuchungen über die möglichen Veränderungen spezifischer Gesteinseigenschaften von Splitten durch verschiedene Zerkleinerungssysteme. – Prüfamf für bituminöse Baustoffe und Kunststoffe der technischen Universität München, Bericht über den Forschungsauftrag Nr. 9.33, München 1978.
- [86] HERTLIN, I.: Akustische Resonanzanalyse. – Informationsschriften zur zerstörungsfreien Prüfung, ZfP kompakt und verständlich, Band 5, Wuppertal 2003.
- [87] QUERVAIN DE, F.: Technische Gesteinskunde. – Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart, 1967.
- [88] FEIX, R.; SCHULZE, K.: Untersuchungen über die wesentlichen Einflussfaktoren bei Frost-Tauwechsel-Versuchen an Mineralstoffen und Entwicklung eines FTW-Verfahrens mit automatischer Prüfzyklensteuerung. – Bericht über den Forschungsauftrag Nr. 9.104, München 1982.
- [89] NAGEL, J.: Beanspruchung und Prüfung von Gesteinssplitten. – Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 93, Bundesminister für Verkehr, 1969.
- [90] LÖFFLER, K.: Methoden zur Untersuchung der Veränderungen an Splitt durch Frost und deren Beurteilung aus Laborversuchen. – Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 117, Bundesminister für Verkehr, 1971.
- [91] WESTINER, E.; WÖRNER, TH.; NEIDINGER, S.; BRAMESHUBER, W.; RAHIMI, A.: Verbundforschung Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter besonderer Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen - Teilprojekt „Prüfung der Gesteinskörnung und Bedeutung der Kontaktzone“. – Zusammenfassung zum AiF-Vorhaben Nr. 15212 N, 2011.
- [92] MANNS, W.; ZEUS, K.: Zur Bedeutung von Zuschlag und Zement für den Frost-Taumittel-Widerstand von Beton. – In: Straße und Autobahn, Heft 4/1981.
- [93] HILSDORF, H.K.; GÜNTHER, M.: Einfluss der Nachbehandlung und Zementart auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. – In: Beton- und Stahlbetonbau 81 (3), 1986.
- [94] KLINGSCH, W.: Einfluss der Nachbehandlungsart und der Zementzusammensetzung auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. – In: Betontechnik 9(2), 1988.
- [95] PLÄHN, J.; GOLZ, W.: Vergleichsuntersuchungen an vier Prüfverfahren für den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. – In: Straße und Autobahn, Heft 1/1984.
- [96] SETZER, M.J.; AUBERG, R.: Frost-Tausalz-Widerstand von Betonpflastersteinen. – Korrelation und Vergleich CDF-Test und Slab Test, Forschungsbericht FB Bauwesen Universität Essen, Heft 56, 1994.
- [97] VERBECK, G.J.; LANDGREN, R.: Influence of physical characteristics of aggregates on frost resistance of concrete. – In Proceedings of American Society for Testing Materials, Vol. 60, 1960.
- [98] FEIX, R.: Einfluss der Schlagfestigkeit von Splitten auf deren Verhalten in bituminösen Fahrbelägen. – Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 260, Bundesminister für Verkehr, 1978.
- [99] DIN EN 933-1, Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung, Siebverfahren.
- [100] DIN EN 197-1, Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement.
- [101] TP Gestein-StB, Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TP Gestein-StB 08). – Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, FGSV 610, Köln.

- [102] Bekanntmachung der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern Nr. II D8-43420-004/03 vom 29.09.2011.
- [103] MÜLLER, H. S. ; NOLTING, U.; HAIST, M. [Hrsg.]: Symposium: Dauerhafter Beton - Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung. – 85 S., Universitätsverlag Karlsruhe, 2009.
- [104] SPRINGENSCHMID, R.: Grundlagen und Praxis der Herstellung und Überwachung von Luftporenbeton. – In: Zement und Beton 47, Heft 1, S. 19-25, 1969.
- [105] PODVALNYI, A. M.: Phenomenological aspect of concrete durability theory. – Materials and Structures, Vol. 9, 1976.
- [106] LANGE, H.; MODRY, S.: Einfluss der Porosität von Kalksteinzuschlagstoffen auf die Frostbeständigkeit des Betons. – Beton, S. 16-20, 1971.
- [107] MCINNIS, C.: Guide to durable Concrete. – ACI, Manual of concrete practice, Part I: Materials and General Properties of Concrete, 201.2R-1-8, 1996.
- [108] MCINNIS, C.; LAU, E. C.: Maximum aggregate size effect on frost resistance of concrete. – ACIJournal 68(2), S. 144-149, 1971.
- [109] SOMMER, H.: Zur Frostbeständigkeit von Betonzuschlag. – Internationales Kolloquium Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, S. 73-76, Esslingen 1983.
- [110] GILLOT, J. E.: Effect of Microstructure and Composition of Limestone, Marble, Basalt, and Quartzite in Presence of Solutions of Calcium Chloride and Magnesium Sulfate. – Durability of building materials and components, S. 605-616, 1980.
- [111] BADMAN, R.: Das physikalisch gebundene Wasser des Zementsteins in der Nähe des Gefrierpunkts. – Dissertation TU München, 1981.
- [112] STOCKHAUSEN, N.: Die Dilatation hochporöser Festkörper bei Wasseraufnahme und Eisbildung. – Dissertation TU München, 1981.
- [113] GEHLEN, CHR.; LOWKE, D.; SKARABIS, J.: Einfluss der Sandeigenschaften auf die Oberflächendauerhaftigkeit von Waschbetonen. – Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1061, 2011.
- [114] Ö-NORM B 3303, 09-2002, Betonprüfung. (zurückgezogen)
- [115] GILLHUBER, ST.: Anwendungsbezogene gesteinsphysikalische Eigenschaften und Verwitterungsprozesse des Teplá-Trachyts. – Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe B, Heft 13, München 2010.

Anhang

- Anhang I: Untersuchungsergebnisse zum Verhalten von Gesteinskörnungen im Beton bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung (Tabellen AI-1 bis AI-31 und Abbildungen AI-1 bis AI-27)
- Anhang II: Untersuchungsergebnisse zur Entwicklung und Implementierung des Einzelkornversuches in die Werkseigene Produktionskontrolle (Tabellen AII-1 bis AII-15)
- Anhang III: Auszug aus der zurückgezogenen Ö-NORM B 3304
- Anhang IV: Arbeitsanleitung zur „Bestimmung des Einzelkornfestigkeitsindex im Einzelkornversuch“
- Anhang V: Detaillierter Bauplan des Einzelkornprüfgerätes

Petrographische Zusammensetzung der Kiese (16/32 mm)								
Kürzel	Anteil [M.-%]							
	Quarz/ Quarzit	Grauwacke	Sandstein	Kalkstein	Kieselschiefer	Hornst./ Flint	Sonstiges	
K1	70	16	5	0	3	4	3	Porphy
K2	59	19	8	0	4	2	7	Porphy
K3	vergleichbar mit K1							
K4	33	7	5	44	4	0	6	Rhyolith bis Andesit
K5	13	4	67	1	2	2	12	8 % Granit; 4 % Tonschiefer
K6	93	0	< 1	0	1	0	5	Gneis
K7	16	47	1	0	6	0	30	26 % Porphy; 3 % Tonschiefer; < 1 % Granit

Tabelle AI-1: Petrographische Zusammensetzung der Kiese nach DIN EN 932-3 (bestimmt an der Kornklasse 16/32 mm) [1]

Kiese	Kornform									
	Plattigkeitskennzahl FI [-]					Kornformkennzahl SI [-]				
Kürzel	4/8	8/16	16/32	MW	STR	4/8	8/16	16/32	MW	STR
K1	14,8	17,2	15,6	15,9	2,4	24,6	15,7	32,0	24,1	16,3
K2	15,0	8,0	10,6	11,2	7,0	30,4	9,5	24,7	21,5	20,9
K3	22,1	26,8	23,8	24,2	4,7	29,3	16,2	39,2	28,2	23,0
K4	15,4	42,4	27,9	28,6	27,0	24,3	22,3	52,3	33,0	30,0
K5	15,9	24,1	19,8	19,9	8,2	26,7	19,0	20,1	21,9	7,7
K6	7,7	5,4	3,7	5,6	4,0	17,9	5,3	5,3	9,5	12,6
K7	14,2	16,3	17,0	15,8	2,8	25,8	16,1	25,3	22,4	9,7

Tabelle AI-2a: Auswertung der Kornformuntersuchungen an den Kiesen nach DIN EN 933-3 und DIN EN 933-4 (MW: Mittelwert; STR: Streuung)

Fest- gesteine	Kornform									
	Plattigkeitskennzahl FI [-]					Kornformkennzahl SI [-]				
Kürzel	4/8	8/16	16/32	MW	STR	4/8	8/16	16/32	MW	STR
F1	23,4	13,7	17,0	18,0	9,7	37,7	8,4	22,3	22,8	29,3
F2	10,8	4,6	6,7	7,4	6,2	18,8	1,0	5,9	8,6	17,8
F3	8,7	5,3	13,7	9,2	8,4	18,9	1,5	21,3	13,9	19,8
F4	10,4	7,2	3,0	6,9	7,4	20,2	2,1	2,0	8,1	18,2
F5	10,1	7,8	5,1	7,7	5,0	16,8	5,0	15,7	12,5	11,8
F6	5,4	11,6	26,0	14,3	20,6	9,0	4,0	26,0	13,0	22,0

Tabelle AI-2b: Auswertung der Kornformuntersuchungen an den gebrochenen Festgesteinen nach DIN EN 933-3 und DIN EN 933-4 (MW: Mittelwert; STR: Streuung)

Schlagzertrümmerungswert (SZ) [-]			
Kiese		Festgesteine	
Kürzel	8/12,5	Kürzel	8/12,5
K1	22,9	F1	12,9
K2	21,3	F2	14,3
K3	23,8	F3	15,8
K4	26,8	F4	21,1
K5	23,2	F5	20,6
K6	24,4	F6	18,1
K7	21,7		

Tabelle AI-3: Widerstände gegen Zertrümmerung der untersuchten Gesteinskörnungen nach DIN EN 1097-6

Rohdichte [g/cm ³]															
Kiese	scheinbar				auf ofentrockener Basis				auf wassergesättigter und ofentrockener Basis						
	4/8	8/16	16/32	MW	STR	4/8	8/16	16/32	MW	STR	4/8	8/16	16/32	MW	STR
Kürzel															
K1	2,646	2,619	2,643	2,636	0,024	2,546	2,545	2,595	2,562	0,050	2,584	2,573	2,614	2,590	0,041
K2	2,652	2,614	2,655	2,640	0,041	2,587	2,550	2,612	2,583	0,062	2,612	2,575	2,629	2,605	0,054
K3	2,645	2,639	2,635	2,640	0,010	2,545	2,551	2,583	2,560	0,038	2,582	2,584	2,602	2,589	0,020
K4	2,614	2,626	2,643	2,628	0,029	2,512	2,523	2,573	2,536	0,061	2,551	2,562	2,600	2,571	0,049
K5	2,630	2,597	2,633	2,620	0,036	2,512	2,494	2,548	2,518	0,054	2,557	2,533	2,580	2,557	0,047
K6	2,657	2,636	2,636	2,643	0,021	2,612	2,582	2,604	2,599	0,030	2,629	2,602	2,616	2,616	0,027
K7	2,667	2,635	2,660	2,654	0,032	2,464	2,467	2,576	2,502	0,112	2,540	2,531	2,608	2,560	0,077

Tabelle A1-4a: Auswertung der Rohdichteuntersuchungen an den Kiesen nach DIN EN 1097-6 (MW: Mittelwert; STR: Streuung)

Rohdichte [g/cm ³]															
Fest- gesteine	scheinbar				auf ofentrockener Basis				auf wassergesättigter und ofentrockener Basis						
	4/8	8/16	16/32	MW	STR	4/8	8/16	16/32	MW	STR	4/8	8/16	16/32	MW	STR
Kürzel															
F1	3,148	3,115	3,106	3,123	0,042	3,070	3,058	3,076	3,068	0,018	3,095	3,076	3,086	3,086	0,019
F2	2,643	2,635	2,628	2,635	0,015	2,553	2,561	2,585	2,566	0,032	2,587	2,589	2,602	2,593	0,015
F3	2,655	2,628	2,651	2,645	0,027	2,610	2,601	2,625	2,612	0,024	2,627	2,611	2,635	2,624	0,024
F4	2,677	2,681	2,673	2,677	0,008	2,523	2,548	2,559	2,543	0,036	2,580	2,597	2,602	2,593	0,022
F5	2,745	2,755	2,742	2,747	0,013	2,693	2,695	2,711	2,700	0,018	2,712	2,717	2,722	2,717	0,010
F6	2,723	2,717	2,738	2,726	0,021	2,705	2,685	2,718	2,703	0,033	2,712	2,697	2,725	2,711	0,028

Tabelle A1-4b: Auswertung der Rohdichteuntersuchungen an den gebrochenen Festgesteinen nach DIN 1097-6 (MW: Mittelwert; STR: Streuung)

Kiese	Wasseraufnahme WA [M.-%]				
Kürzel	4/8	8/16	16/32	MW	STR
K1	1,5	1,1	0,7	1,1	0,8
K2	0,9	1,0	0,6	0,8	0,4
K3	1,5	1,3	0,8	1,2	0,7
K4	1,6	1,6	1,0	1,4	0,6
K5	1,8	1,6	1,3	1,6	0,5
K6	0,7	0,8	0,5	0,7	0,3
K7	3,1	2,6	1,2	2,3	1,9

Tabelle AI-5a: Auswertung zur Wasseraufnahme der Kiese (MW: Mittelwert; STR: Streuung)

Festgesteine	Wasseraufnahme WA [M.-%]				
Kürzel	4/8	8/16	16/32	MW	STR
F1	0,8	0,6	0,3	0,6	0,5
F2	1,3	1,1	0,6	1,0	0,7
F3	0,6	0,4	0,4	0,5	0,2
F4	2,3	2,0	1,7	2,0	0,6
F5	0,7	0,8	0,4	0,6	0,4
F6	0,3	0,5	0,3	0,4	0,2

Tabelle AI-5b: Auswertung zur Wasseraufnahme der gebrochenen Festgesteine (MW: Mittelwert; STR: Streuung)

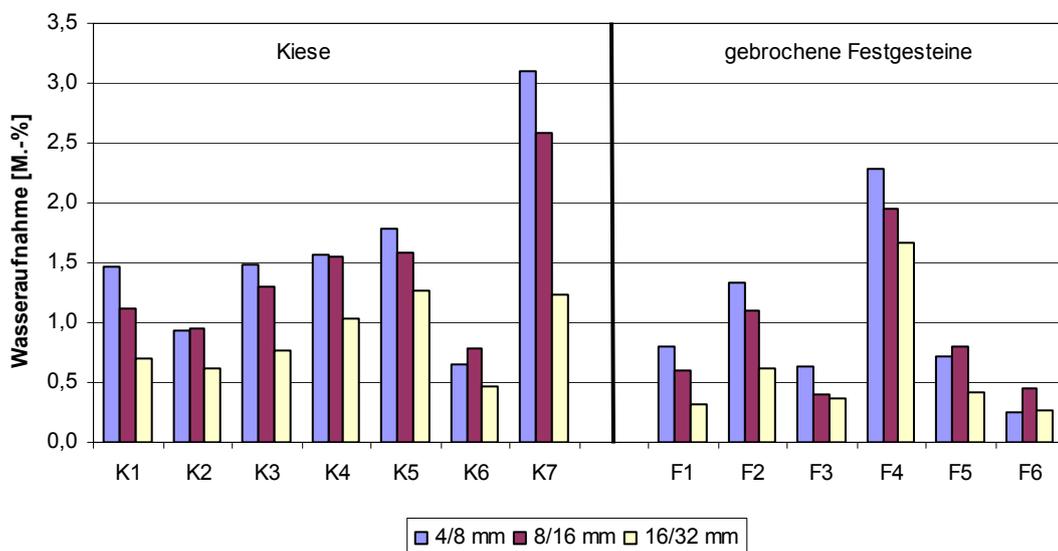


Abbildung AI-1: Wasseraufnahmen der Kornklassen 4/8, 8/16 und 16/32 mm

Kiese	Mürbkorngehalt (MK-Gehalt) [M.-%]				
	Kürzel	8/16	8/12,5	MW	STR
K1		32,0	30,1	31,1	1,9
K2		9,1	20,5	14,8	11,4
K3		14,8	35,0	24,9	20,2
K4		19,5	24,6	22,1	5,1
K5		22,2	26,8	24,5	4,6
K6		25,1	20,0	22,6	5,1
K7		29,4	44,7	37,1	15,3

Tabelle AI-6a: Auswertung zum MK-Gehalt bei den Kiesen (MW: Mittelwert; STR: Streuung)

Festgesteine	Mürbkorngehalt [M.-%]				
	Kürzel	8/16	8/12,5	MW	STR
F1		1,6	5,6	3,6	4,0
F2		0,9	6,2	3,6	5,3
F3		6,6	17,0	11,8	10,4
F4		10,4	21,5	16,0	11,1
F5		8,2	22,0	15,1	13,8
F6		15,9	18,6	17,3	2,7

Tabelle AI-6b: Auswertung zum MK-Gehalt bei den gebrochenen Festgesteinen (MW: Mittelwert; STR: Streuung)

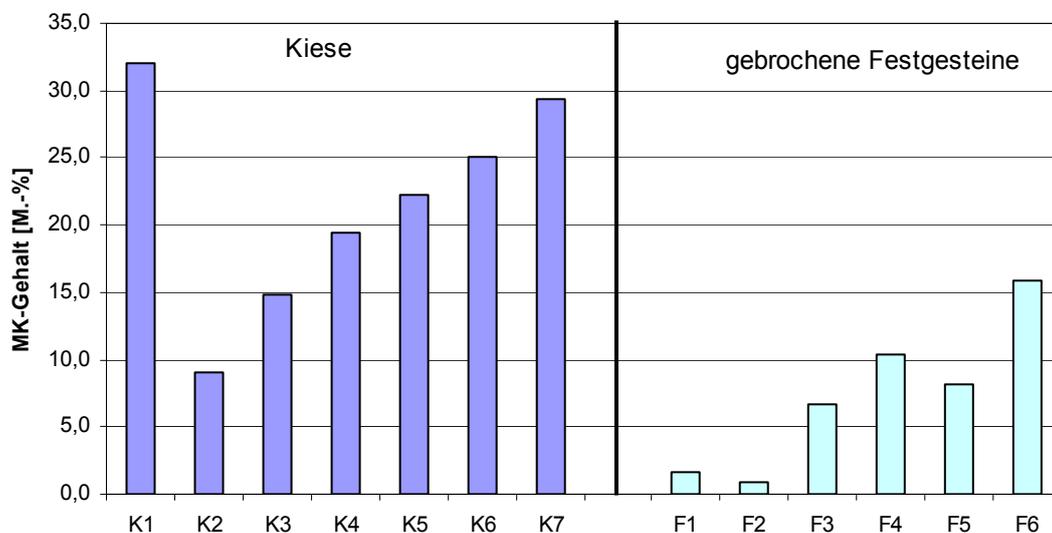


Abbildung AI-2: MK-Gehalte der Kornklassen 8/16 mm

Magnesiumsulfat-Verfahren (MS-Einzelwerte) [M.-%]							
	Kürzel	MW	1	2	3	4	5
Kiese	K1	3,2	6,4	6,1	1,3	0,7	1,5
	K2	7,1	14,8	16,2	1,4	1,0	2,3
	K3	1,8	0,9	3,6	1,7	1,7	1,2
	K4	12,8	16,5	17,0	11,2	10,4	8,7
	K5	6,1	10,4	11,2	2,2	2,0	4,7
	K6	5,8	7,3	4,7	4,9	6,1	6,1
	K7	37,6	45,3	49,8	31,7	28,6	32,5
Festgesteine	F1	4,6	8,4	8,8	1,7	2,4	1,7
	F2	4,4	12,0	8,4	0,7	0,3	0,6
	F3	1,4	2,4	3,3	0,2	0,5	0,5
	F4	10,5	20,8	23,6	2,9	4,1	0,9
	F5	9,7	13,1	18,4	5,3	6,5	5,4
	F6	11,5	15,0	14,4	8,1	9,2	10,8

Tabelle AI-7: Zusammenstellung der Einzelergebnisse beim MS-Verfahren (Prüfkornklasse: 10/14 mm) (MW: Mittelwert)

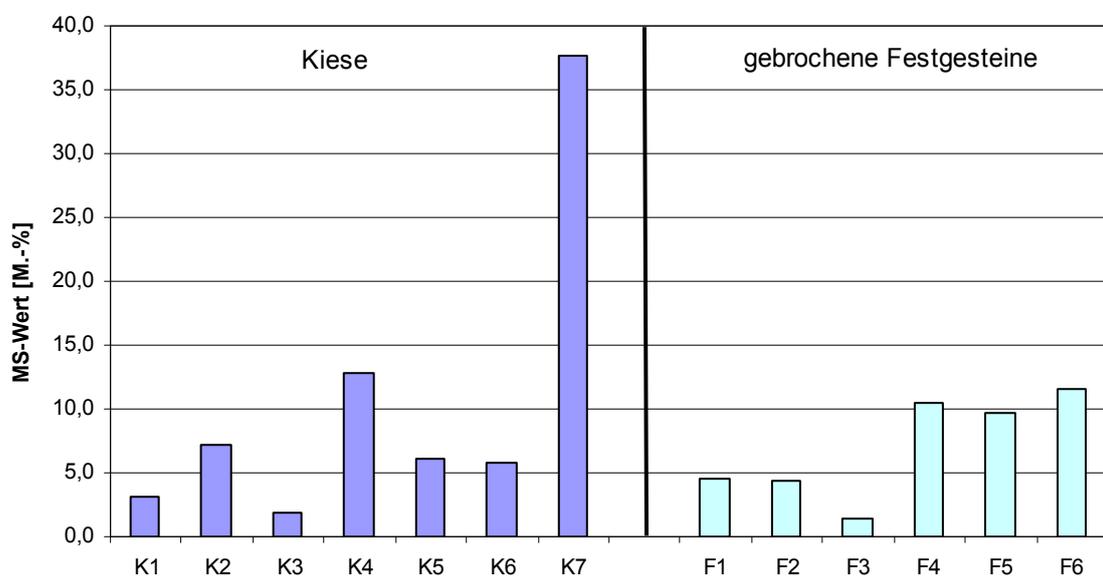


Abbildung AI-3: MS-Werte (Mittelwerte) der Prüfkornklasse 10/14 mm

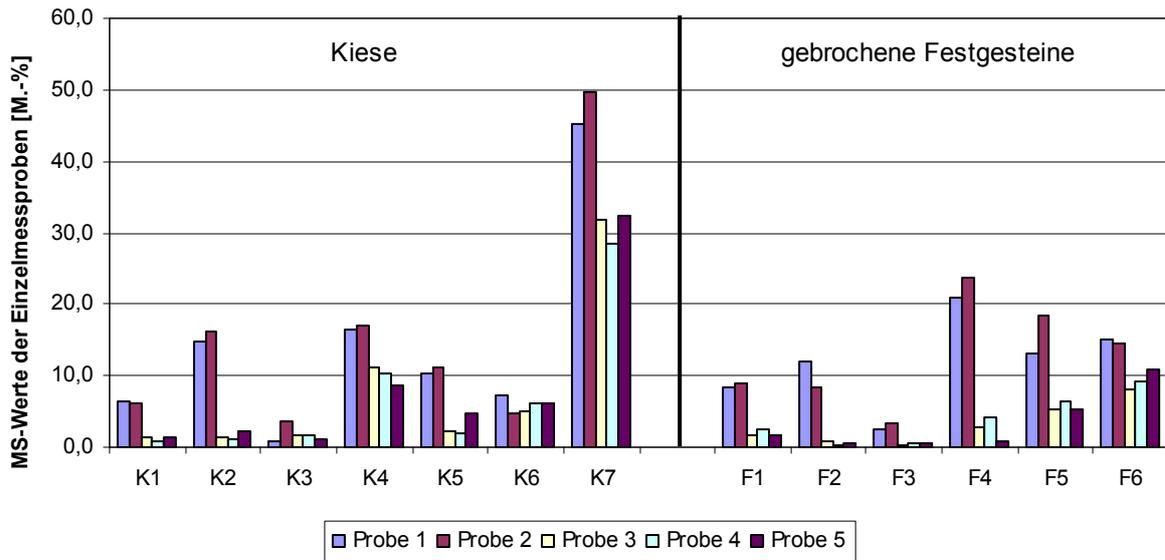


Abbildung AI-4: MS-Werte der Einzelmessproben (Prüfkornklasse: 10/14 mm)

Kristallisationsversuch mit Natriumsulfat (NS-Einzelwerte) [M.-%]							
	Kürzel	MW	1	2	3	4	5
Kiese	K1	1,5	2,7	2,2	0,8	0,4	1,2
	K2	0,9	1,1	1,1	0,7	0,5	1,0
	K3	0,9	0,1	0,7	1,4	1,2	1,1
	K4	4,6	2,5	5,5	3,6	7,2	4,2
	K5	2,8	1,4	4,0	3,5	3,6	1,5
	K6	0,8	0,6	0,5	1,2	0,5	1,1
	K7	5,2	5,2	4,4	5,5	6,8	4,1
Festgesteine	F1	1,8	1,9	2,0	1,5	1,3	2,5
	F2	0,5	0,7	0,4	0,8	0,5	0,3
	F3	0,4	0,2	0,9	0,2	0,1	0,4
	F4	1,8	1,7	2,4	2,5	1,4	1,0
	F5	4,6	4,0	5,7	4,0	2,9	6,2
	F6	6,6	7,3	6,2	6,7	5,2	7,5

Tabelle AI-8: Zusammenstellung der Einzelergebnisse beim NS-Verfahren (Prüfkornklasse 10/14 mm) (MW: Mittelwert)

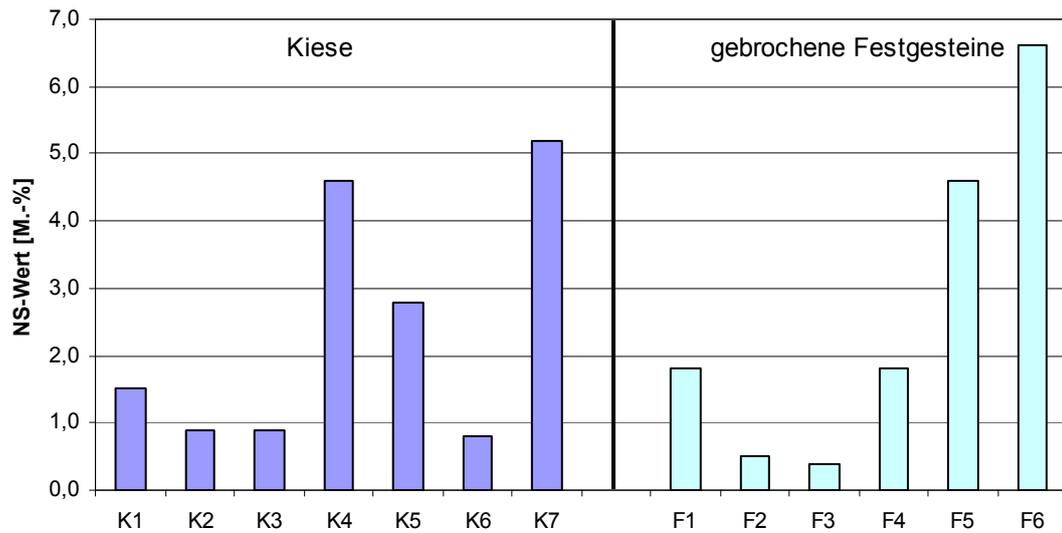


Abbildung AI-5: NS-Werte (Mittelwerte) der Prüfkornklasse 10/14 mm

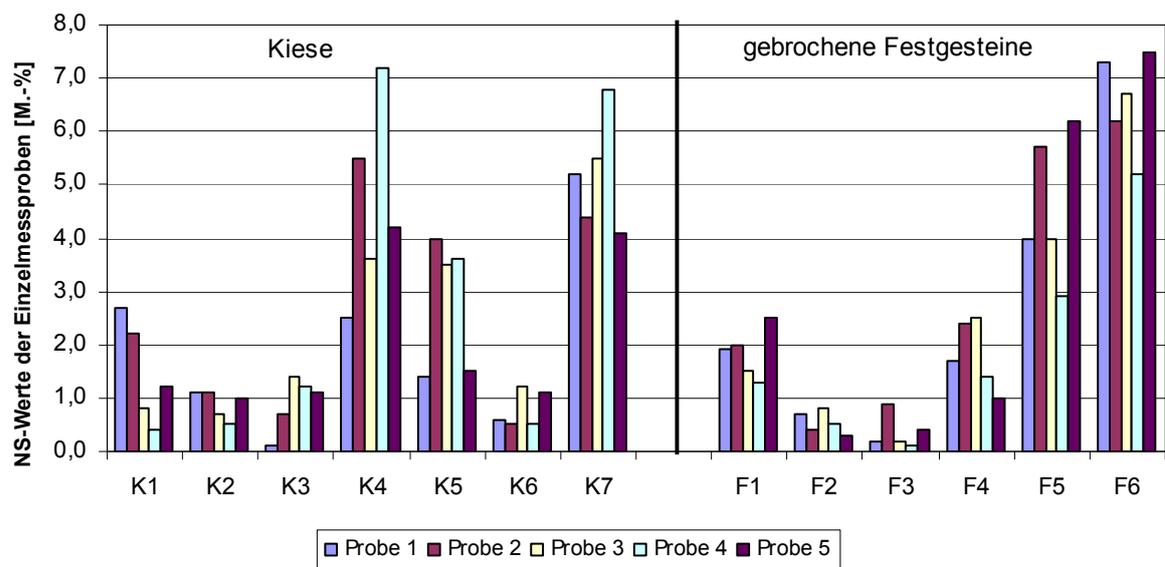


Abbildung AI-6: NS-Werte der Einzelmessproben (Prüfkornklasse 10/14 mm)

		Frost-Tau-Wechsel-Versuch (FTW-Einzelwerte) [M.-%]																																		
Korn- klasse	Kürzel	8/16					8/12,5			4/8			8/11			11/16			16/22			22/32			16/32											
		MW	1	2	3	4	5	MW	1	2	3	MW	1	2	3	MW	1	2	3	MW	1	2	3	MW	1	2	3									
Kiese	K1	0,2	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,6	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3		
	K2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	1,2	0,9	1,2	1,4	0,5	0,3	0,5	0,6	0,7	0,6	0,7	0,8	0,5	0,5	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,5	0,4	0,4		
	K3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,5	0,2	0,1	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4	0,3		
	K4	0,5	0,4	0,4	0,5	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	1,1	0,6	0,8	0,6	0,7	1,1	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3	0,4	0,2	0,4	0,7	0,8	0,7	0,7	
	K5	2,1	2,5	1,7	2,2	1,9	2,0	1,5	1,2	1,6	1,7	1,2	1,2	1,4	1,1	1,2	1,1	1,1	1,3	3,4	3,1	3,4	3,7	3,6	3,1	3,5	4,2	2,5	3,5	2,5	1,5	4,0	2,4	5,1	4,5	
	K6	0,3	0,2	0,1	0,3	0,4	0,4	0,3	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,5	0,3	0,2	0,5	0,3	0,3	0,2	0,5	0,2	0,3	0,4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,5	0,4	0,5	0,4	0,4	
	K7	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7	0,5	0,7	0,8	0,6	0,8	1,5	1,3	1,5	1,8	0,9	0,9	0,8	0,9	0,7	0,9	0,7	0,6	0,8	0,9	0,8	0,6	0,7	1,1	0,6	0,5	0,6	0,6	0,5	0,7	
Festgesteine	F1	0,6	0,6	0,5	0,5	0,8	0,6	0,4	0,3	0,4	0,5	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5	0,6	0,4	0,4	0,6	0,6	0,5	0,6	0,5	0,6	0,4	0,6		
	F2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,1	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	
	F3	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	0,6	0,8	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,3
	F4	0,7	0,5	1,1	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,9	0,8	0,9	1,1	0,7	0,7	0,7	0,7	2,3	2,3	2,1	2,5	1,1	1,3	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	0,9	1,4	1,3	1,2	1,8	
	F5	1,0	1,2	1,1	1,0	1,0	0,8	1,1	1,0	1,0	1,3	1,6	1,5	1,6	1,8	1,5	1,5	1,7	1,3	2,9	2,5	3,4	2,7	1,6	1,2	1,5	2,0	1,8	2,2	1,4	1,7	1,5	1,0	1,8	1,6	
	F6	2,3	2,5	2,0	1,9	2,5	2,5	1,7	1,8	1,8	1,4	0,4	0,4	0,4	0,3	2,0	2,0	1,9	2,2	3,0	3,5	3,4	2,1	3,1	2,7	3,1	3,4	3,7	3,6	3,8	3,8	2,7	2,8	2,8	2,5	

Tabelle AI-9a: Zusammenstellung der Einzelergebnisse beim FTW-Versuch (MW: Mittelwert)

Kiese	Frost-Tau-Wechsel-Versuch (FTW-Wert) [M.-%]										
	Kürzel	4/8	8/16	8/11	11/16	8/12,5	16/32	16/22	22/32	MW	STR
K1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
K2	1,2	0,3	0,5	0,7	0,3	0,4	0,5	0,4	0,4	0,5	0,9
K3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2
K4	0,8	0,5	0,8	0,8	0,6	0,7	0,6	0,3	0,3	0,6	0,5
K5	1,2	2,1	1,2	3,4	1,5	4,0	3,6	2,5	2,5	2,4	2,8
K6	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	0,1
K7	1,5	0,6	0,9	0,7	0,7	0,6	0,8	0,7	0,7	0,8	0,9

Tabelle AI-9b: Auswertung des FTW-Versuches bei den Kiesen (MW: Mittelwert; STR: Streuung)

Fest-gesteine	Frost-Tau-Wechsel-Versuch (FTW-Wert) [M.-%]										
	Kürzel	4/8	8/16	8/11	11/16	8/12,5	16/32	16/22	22/32	MW	STR
F1	0,3	0,6	0,4	0,6	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,5	0,3
F2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3	0,3
F3	0,3	0,2	0,3	0,4	0,3	0,4	0,3	0,3	0,6	0,4	0,4
F4	0,9	0,7	0,7	2,3	0,7	1,4	1,1	0,8	0,8	1,1	1,6
F5	1,6	1,0	1,5	2,9	1,1	1,5	1,6	1,8	1,8	1,6	1,9
F6	0,4	2,3	2,0	3,0	1,7	2,7	3,1	3,7	3,7	2,4	3,3

Tabelle AI-9c: Auswertung des FTW-Versuches bei den gebrochenen Festgesteinen (MW: Mittelwert; STR: Streuung)

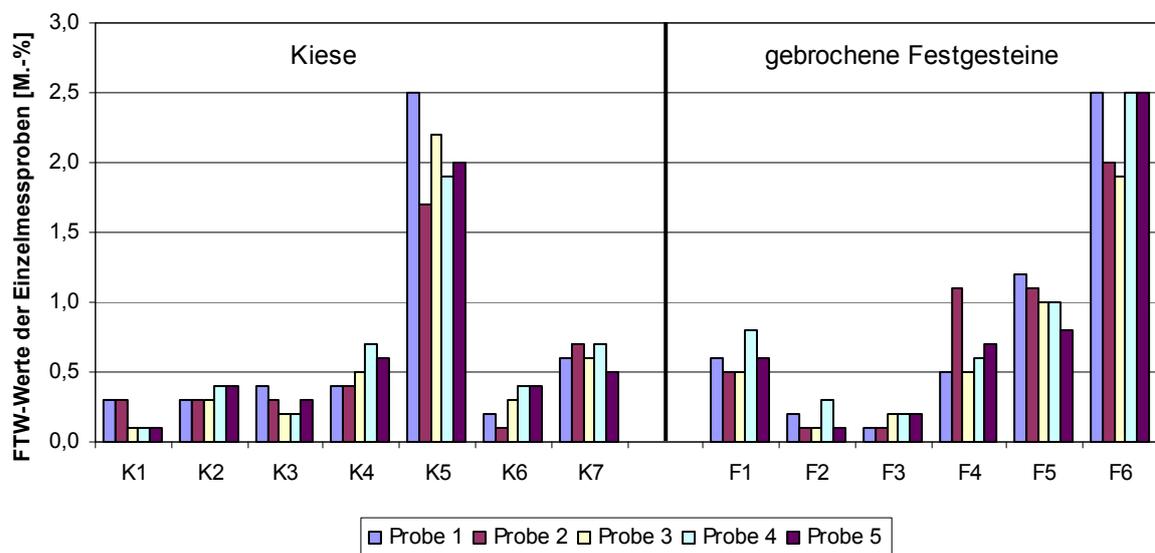


Abbildung AI-7: FTW-Werte der Einzelmessproben (Kornklasse 8/16 mm)

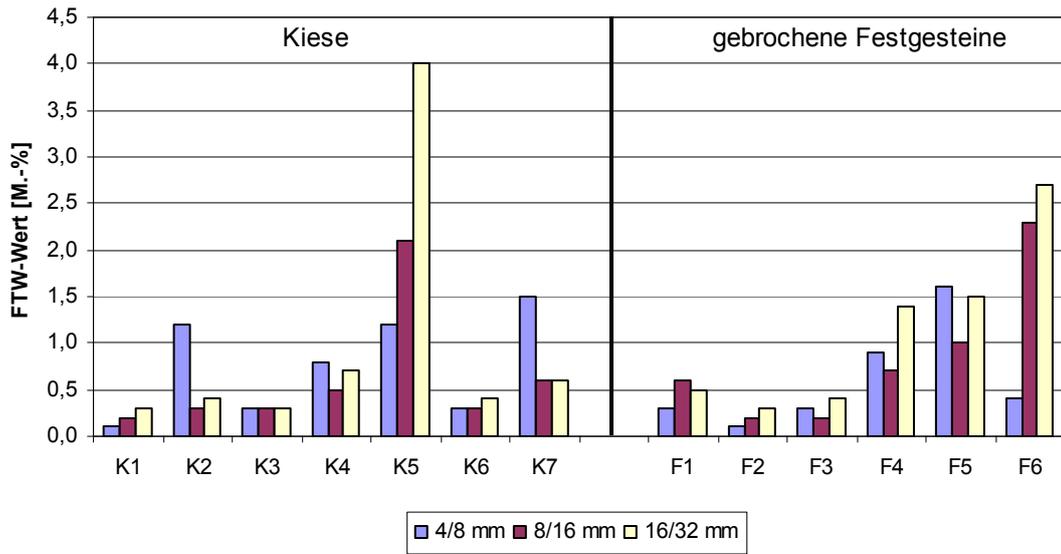


Abbildung AI-8: FTW-Werte der Kornklassen 4/8, 8/16 und 16/32 mm

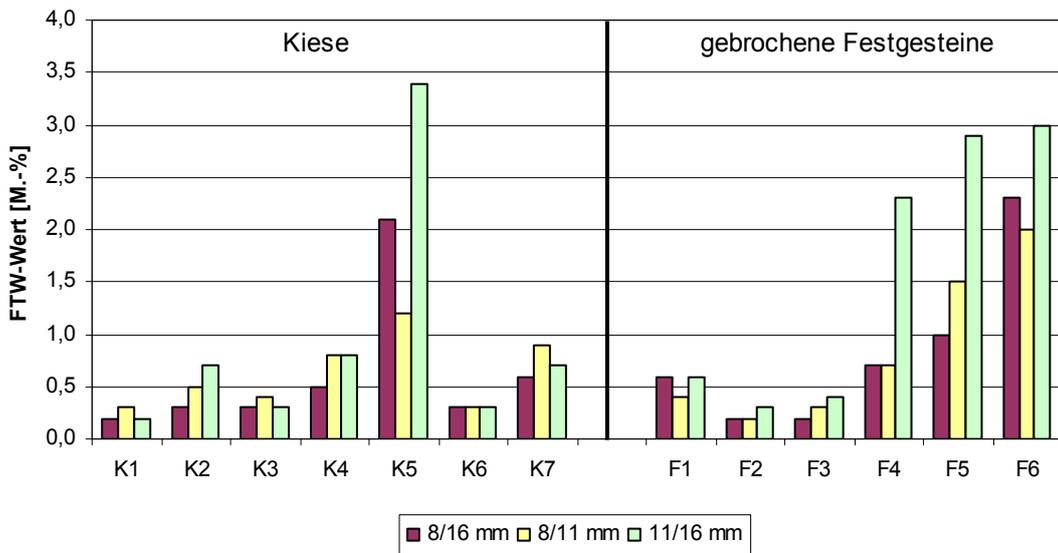


Abbildung AI-9: FTW-Werte der Kornklassen 8/16, 8/11 und 11/16 mm

		Frost-Tausalz-Versuch (FTS-Einzelwerte) [M.-%]																																							
Korn- klasse	Kürzel	8/16					8/12,5					4/8					8/11					11/16					16/22					22/32					16/32				
		MW	1	2	3	4	5	MW	1	2	3	MW	1	2	3	MW	1	2	3	MW	1	2	3	MW	1	2	3	MW	1	2	3	MW	1	2	3						
Klasse	K1	4.1	4.9	4.5	3.2	4.0	3.8	4.4	4.2	4.6	4.4	5.2	4.8	5.3	5.4	5.1	5.6	4.2	5.6	3.2	2.6	4.1	3.0	1.6	1.5	1.4	1.8	0.8	1.0	0.8	0.5	1.0	1.3	0.6	1.0						
	K2	2.4	2.9	2.0	1.7	2.9	2.4	2.3	1.4	2.4	3.0	2.8	3.1	2.4	2.9	2.2	2.4	2.1	2.0	2.3	2.1	2.3	2.6	1.2	0.9	1.1	1.5	1.3	0.6	2.1	1.3	0.8	1.1	0.8	0.4						
	K3	3.5	4.6	3.7	2.9	3.0	3.2	3.9	4.2	3.8	3.8	5.7	5.9	5.4	5.9	5.5	6.2	5.4	4.9	3.5	3.7	3.3	3.4	1.5	1.9	1.3	1.4	0.8	0.7	0.6	1.1	1.8	1.7	1.9	1.7						
	K4	13.2	14.1	12.8	12.8	12.7	13.7	13.6	12.3	15.5	12.9	7.8	7.7	8.0	7.8	14.4	15.9	14.6	12.6	15.7	16.8	16.7	13.6	6.9	7.4	7.2	6.2	4.8	4.6	4.4	5.3	3.8	4.2	3.5	3.8						
	K5	6.5	5.9	6.5	5.9	7.5	6.9	6.8	6.1	6.6	7.8	6.1	6.0	5.7	6.5	8.0	7.2	8.5	8.3	8.1	8.2	8.9	7.2	5.6	6.3	5.2	5.4	4.3	4.1	4.4	4.5	6.2	7.6	5.3	5.7						
	K6	0.9	0.9	1.0	0.6	1.2	0.8	0.7	0.4	0.8	0.9	0.8	0.7	0.5	1.2	0.8	0.6	0.8	0.9	0.7	0.6	1.0	0.6	0.6	0.4	0.8	0.4	0.8	0.5	0.4	0.7	0.4	0.3	0.5	0.4	0.1					
	K7	30.6	29.0	29.8	29.4	34.6	30.1	36.8	36.4	37.6	36.4	52.8	54.2	52.4	51.7	42.6	41.2	42.3	44.3	34.1	33.5	34.0	34.7	17.3	17.1	17.6	17.2	8.1	7.9	8.3	8.1	12.9	12.5	13.0	13.3						
Festgesteine	F1	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2	1.1	1.5	1.6	1.3	1.6	1.2	1.2	1.1	1.2	1.8	1.9	1.7	1.7	1.7	1.7	1.8	1.7	1.1	1.1	1.4	0.9	1.5	1.3	1.0	2.1	1.0	0.8	0.7	1.4						
	F2	3.1	3.3	2.8	3.4	3.1	2.8	3.3	3.3	3.4	3.1	2.7	3.1	2.2	2.9	3.6	3.7	3.4	3.7	4.8	5.0	4.9	4.5	4.0	4.4	3.7	3.9	4.3	4.6	4.7	3.7	4.4	4.1	4.0	5.1						
	F3	0.3	0.3	0.3	0.4	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.9	0.8	0.9	1.0	0.5	0.6	0.5	0.5					
	F4	34.6	33.9	33.6	34.6	37.3	33.7	35.2	37.0	36.7	31.8	29.4	29.4	30.3	28.4	44.5	45.7	45.8	41.9	30.6	29.6	31.3	30.8	36.1	38.7	36.7	33.0	19.9	19.3	21.8	18.6	28.1	29.1	27.6	27.7						
	F5	29.1	28.9	30.0	26.0	28.9	31.7	26.3	25.9	27.0	25.9	15.4	14.2	16.5	15.5	35.0	34.3	36.4	34.4	43.7	43.7	44.6	42.7	35.2	35.3	34.9	35.3	25.0	26.4	22.6	26.1	25.9	23.9	26.4	27.4						
	F6	18.1	17.8	16.2	19.4	18.5	18.5	18.3	18.6	18.1	18.2	4.9	4.7	4.7	5.3	23.0	25.2	21.6	22.3	32.7	32.0	32.3	33.8	17.0	17.7	16.2	17.1	11.2	10.7	12.2	10.7	12.3	11.4	14.5	11.1						

Tabelle AI-10a: Zusammenstellung der Einzelergebnisse beim FTS-Versuch (MW: Mittelwert)

Kiese	Frost-Tausalz-Versuch (FTS-Wert) [M.-%]									
	Kürzel	4/8	8/16	8/11	11/16	8/12,5	16/32	16/22	22/32	MW
K1	5,2	4,1	5,1	3,2	4,4	1,0	1,6	0,8	3,2	4,4
K2	2,8	2,4	2,2	2,3	2,3	0,8	1,2	1,3	1,9	2,0
K3	5,7	3,5	5,5	3,5	3,9	1,8	1,5	0,8	3,3	4,9
K4	7,8	13,2	14,4	15,7	13,6	3,8	6,9	4,8	10,0	11,9
K5	6,1	6,5	8,0	8,1	6,8	6,2	5,6	4,3	6,5	3,8
K6	0,8	0,9	0,8	0,7	0,7	0,3	0,6	0,5	0,7	0,6
K7	52,8	30,6	42,6	34,1	36,8	12,9	17,3	8,1	29,4	44,7

Tabelle AI-10b: Auswertung des FTS-Versuch bei den Kiesen (MW: Mittelwert; STR: Streuung)

Fest-gesteine	Frost-Tausalz-Versuch (FTS-Wert) [M.-%]									
	Kürzel	4/8	8/16	8/11	11/16	8/12,5	16/32	16/22	22/32	MW
F1	1,2	1,2	1,8	1,7	1,5	1,0	1,1	1,5	1,4	0,8
F2	2,7	3,1	3,6	4,8	3,3	4,4	4,0	4,3	3,8	2,1
F3	0,5	0,3	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	0,9	0,5	0,6
F4	29,4	34,6	44,5	30,6	35,2	28,1	36,1	19,9	32,3	24,6
F5	15,4	29,1	35,0	43,7	26,3	25,9	35,2	25,0	29,5	28,3
F6	4,9	18,1	23,0	32,7	18,3	12,3	17,0	11,2	17,2	27,8

Tabelle AI-10c: Auswertung des FTS-Versuches bei den gebrochenen Festgesteinen (MW: Mittelwert; STR: Streuung)

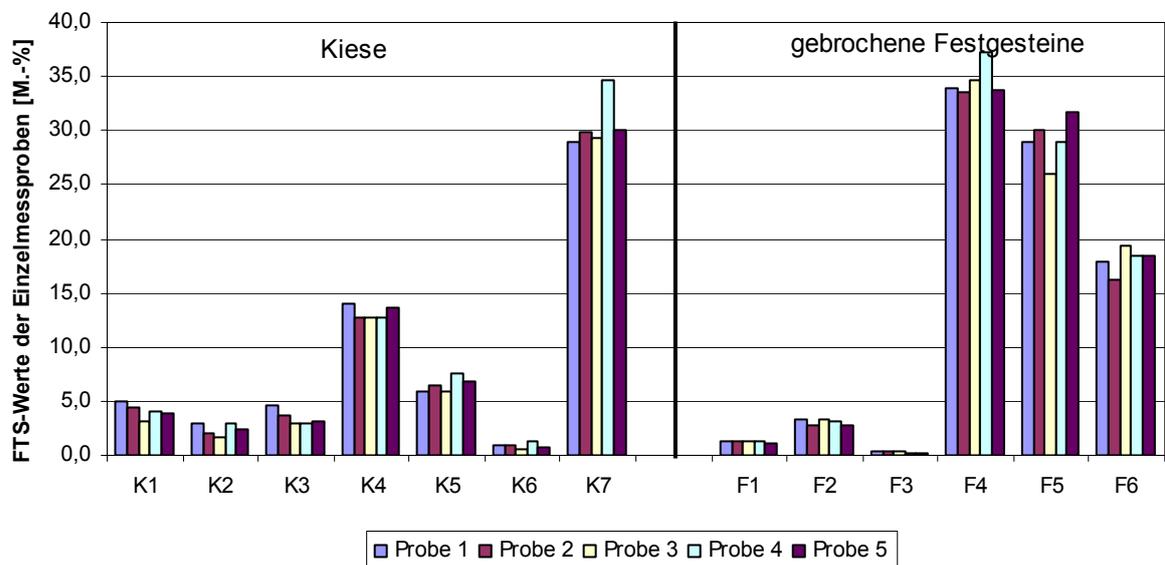


Abbildung AI-10: FTS-Werte der Einzelmessproben (Kornklasse 8/16 mm)

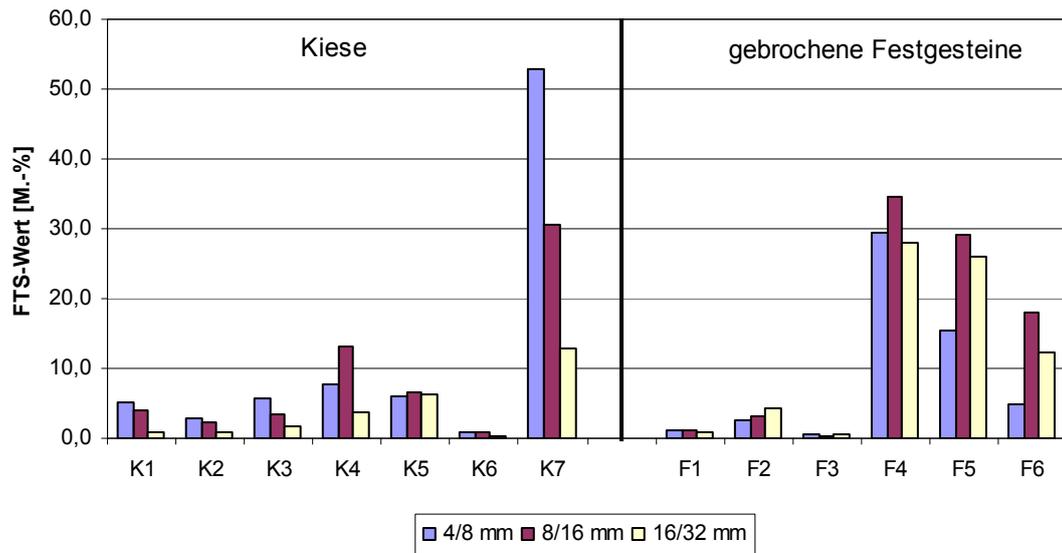


Abbildung AI-11: FTS-Werte der Kornklassen 4/8, 8/16 und 16/32 mm

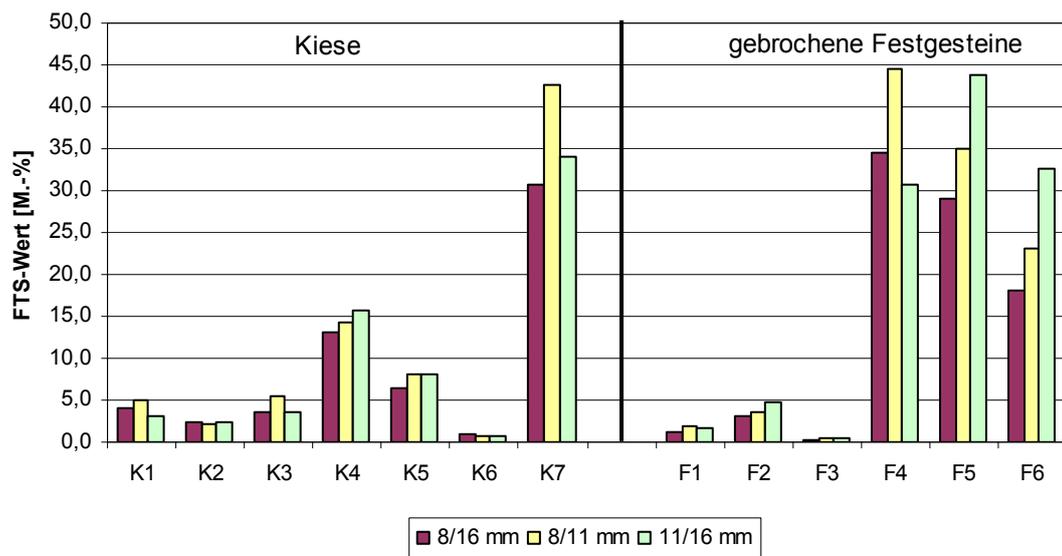


Abbildung AI-12 FTS-Werte der Kornklassen 8/16, 8/11 und 11/16 mm

Festigkeitsentwicklung beim Frost-Tau-Wechsel- bzw. Frost-Tausalz-Versuch					
Kiese			Festgesteine		
Kürzel	ΔSZ_{FTW} [-]	ΔSZ_{FTS} [-]	Kürzel	ΔSZ_{FTW} [-]	ΔSZ_{FTS} [-]
K1	1,4	1,3	F1	0,0	-0,1
K2	0,3	0,5	F2	1,2	1,3
K3	0,0	2,2	F3	0,3	0,7
K4	0,8	2,4	F4	0,3	1,2
K5	-1,5	1,1	F5	-1,0	0,7
K6	1,1	-2,3	F6	3,7	6,8
K7	1,9	5,3			

Tabelle AI-11: Auswertung bezüglich der Festigkeitsentwicklung beim FTW- bzw. FTS-Versuch (ΔSZ : SZ-Änderung)

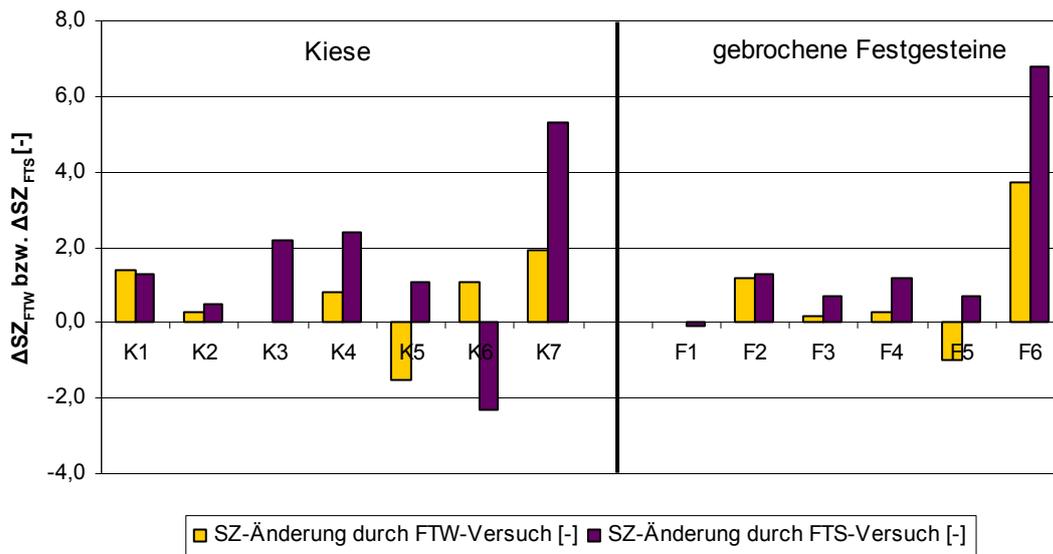


Abbildung AI-13: SZ-Änderungen beim FTW- bzw. FTS-Versuch (ΔSZ_{FTW} ; ΔSZ_{FTS})

Kürzel	MS-Verfahren		NS-Verfahren		FTW-Versuch		FTS-Versuch	
	10/14		10/14		8/16		8/16	
	KZ	MS-Wert	KZ	NS-Wert	KZ	FTW-Wert	KZ	FTS-Wert
K1	1,69	3,2	0,67	1,5	0,31	0,2	4,33	4,1
K2	2,88	7,1	0,45	0,9	1,07	0,3	3,19	2,4
K3	0,93	1,8	0,43	0,9	0,35	0,3	3,61	3,5
K4	9,13	12,8	2,27	4,6	0,83	0,5	13,99	13,2
K5	3,30	6,1	1,27	2,8	2,19	2,1	6,95	6,5
K6	2,21	5,8	0,34	0,8	0,63	0,3	1,34	0,9
K7	24,70	37,6	2,39	5,2	0,89	0,6	26,47	30,6

Tabelle AI-12a: Vergleichende Zusammenstellung der herkömmlichen Auswertung und der Auswertung durch Körnungsziffern (KZ) bei den verschiedenen Frost- bzw. Frost-Tausalz-Prüfverfahren für die Kiese

Kürzel	MS-Verfahren		NS-Verfahren		FTW-Versuch		FTS-Versuch	
	10/14		10/14		8/16		8/16	
	KZ	MS-Wert	KZ	NS-Wert	KZ	FTW-Wert	KZ	FTS-Wert
F1	2,41	4,6	1,13	1,8	1,07	0,6	1,59	1,2
F2	1,59	4,4	0,25	0,5	0,83	0,2	5,61	3,1
F3	0,60	1,4	0,18	0,4	0,66	0,2	0,87	0,3
F4	7,25	10,5	0,89	1,8	0,78	0,7	32,14	34,6
F5	6,43	9,7	1,99	4,6	2,34	1,0	29,37	29,1
F6	6,33	11,5	3,16	6,6	3,37	2,3	21,95	18,1

Tabelle AI-12b: Vergleichende Zusammenstellung der herkömmlichen Auswertung und der Auswertung durch Körnungsziffern (KZ) bei den verschiedenen Frost- bzw. Frost-Tausalz-Prüfverfahren für die gebrochenen Festgesteine

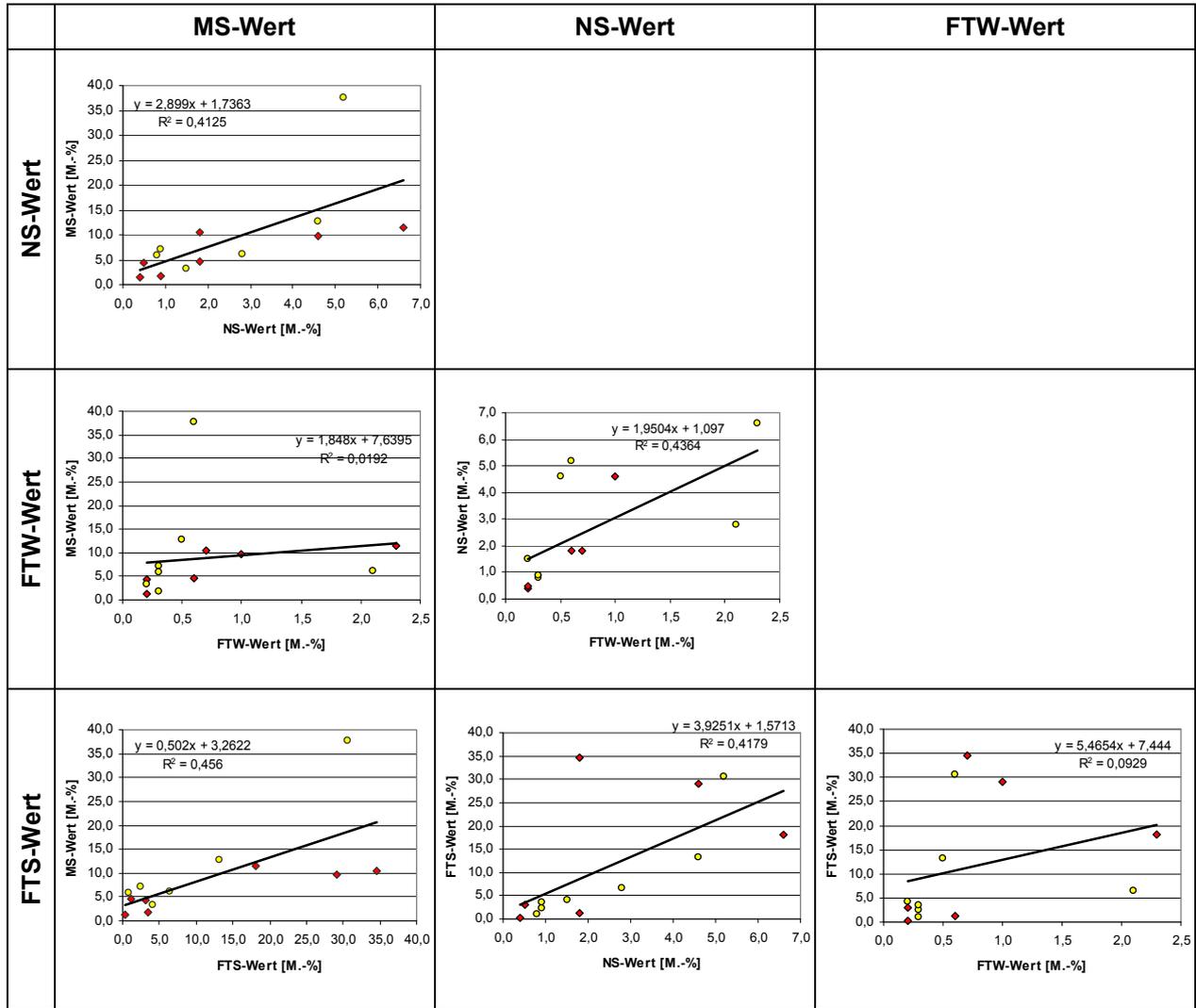


Abbildung A1-14: Korrelationen zwischen den Frostprüfverfahren bei der Kornklasse 8/16 mm (gelb: Kiese; rot: gebrochene Festgesteine)

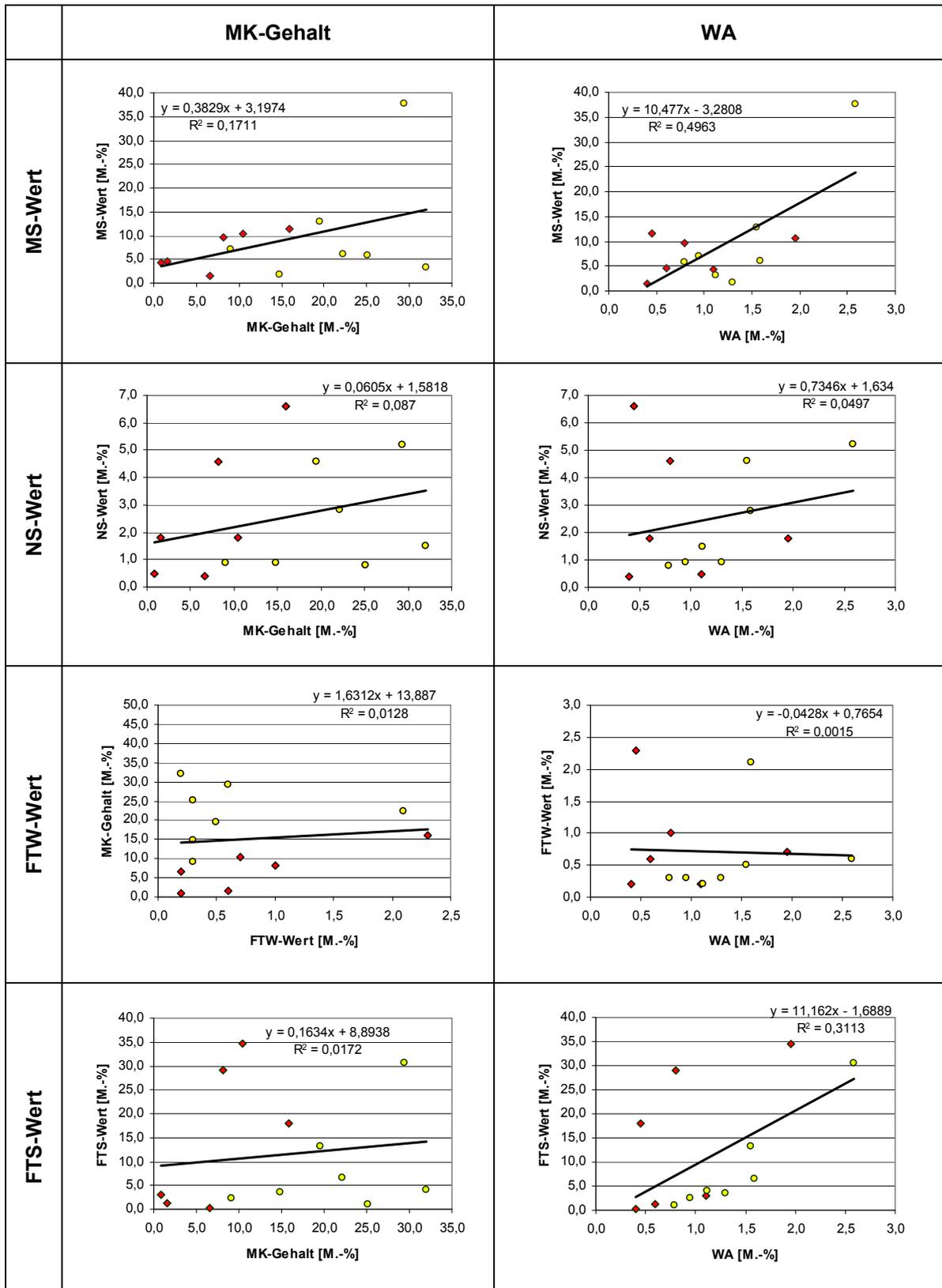


Abbildung A1-15: Korrelationen zwischen den Frostprüfverfahren bei der Kornklasse 8/16 mm und den „Hilfsgrößen“ (gelb: Kiese; rot: gebrochene Festgesteine)

Korrelation (R^2) der Prüfergebnisse		MS-Wert	NS-Wert	FTW-Wert	FTS-Wert	MK-Gehalt	WA
NS-Wert	Alle	0,41	1,00				
	Kiese	0,65	1,00				
	FG	0,64	1,00				
FTW-Wert	alle	0,02	0,44	1,00			
	Kiese	0,00	0,08	1,00			
	FG	0,60	0,91	1,00			
FTS-Wert	alle	0,46	0,42	0,09	1,00		
	Kiese	0,94	0,80	0,01	1,00		
	FG	0,75	0,25	0,17	1,00		
MK-Gehalt	alle	0,17	0,09	0,01	0,02	1,00	
	Kiese	0,13	0,12	0,00	0,16	1,00	
	FG	0,56	0,59	0,68	0,39	1,00	
WA	alle	0,50	0,05	0,00	0,31	0,21	1,00
	Kiese	0,77	0,76	0,09	0,91	0,13	1,00
	FG	0,14	0,07	0,06	0,37	0,00	1,00

$R^2 = 0,00 - 0,33$: kein Zusammenhang

$R^2 = 0,33 - 0,66$: mäßiger Zusammenhang

$R^2 = 0,66 - 1,00$: guter Zusammenhang

Tabelle AI-13: Korrelationen (Bestimmtheitsmaße) zwischen den angewandten Verfahren bei der Kornklasse 8/16 mm (FG: Festgesteine)

Korrelation (R^2) der Prüfergebnisse (Festgesteine)		MS-Wert	NS-Wert	FTW-Wert	FTS-Wert	MK-Gehalt	WA
NS-Wert	alle	0,64	1,00				
	Karbonate	0,22	1,00				
	Rest	0,36	1,00				
FTW-Wert	alle	0,60	0,91	1,00			
	Karbonate	0,65	0,82	1,00			
	Rest	0,30	1,00	1,00			
FTS-Wert	alle	0,75	0,25	0,17	1,00		
	Karbonate	0,49	0,92	0,98	1,00		
	Rest	0,50	0,02	0,04	1,00		
MK-Gehalt	alle	0,56	0,59	0,68	0,39	1,00	
	Karbonate	0,97	0,39	0,80	0,67	1,00	
	Rest	0,97	0,21	0,16	0,67	1,00	
WA	alle	0,14	0,07	0,06	0,37	0,00	1,00
	Karbonate	0,08	0,96	0,64	0,78	0,20	1,00
	Rest	0,46	0,03	0,06	1,00	0,63	1,00

$R^2 = 0,00 - 0,33$: kein Zusammenhang

$R^2 = 0,33 - 0,66$: mäßiger Zusammenhang

$R^2 = 0,66 - 1,00$: guter Zusammenhang

Tabelle AI-14: Korrelationen (Bestimmtheitsmaße) zwischen den angewandten Verfahren bei den gebrochenen Festgesteinen (Kornklasse 8/16 mm)

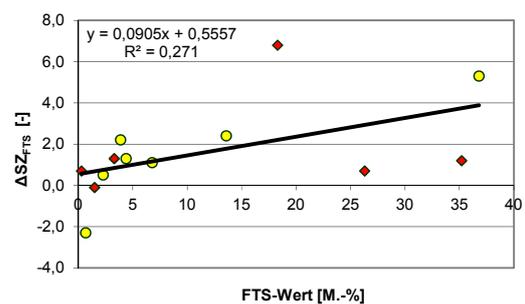
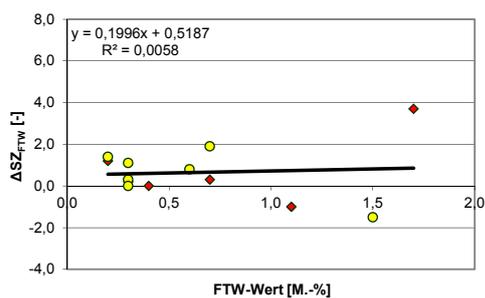


Abbildung AI-16: Korrelation zwischen FTW-Wert bzw. FTS-Wert und SZ-Änderung beim Frost-Tau-Wechsel-Verfahren (ΔSZ_{FTW}) bzw. beim Frost-Tausalz-Verfahren (ΔSZ_{FTS}) (gelb: Kiese; rot: gebrochene Festgesteine)

Korrelation (R^2) der Prüfergebnisse		SZ	FTW-Wert	ΔSZ_{FTW}	FTS-Wert	ΔSZ_{FTS}
FTW-Wert	alle	0,01	1,00			
	Kiese	0,00	1,00			
	FG	0,33	1,00			
ΔSZ_{FTW}	alle	0,01	0,01	1,00		
	Kiese	0,00	0,42	1,00		
	FG	0,01	0,28	1,00		
FTS-Wert	alle	0,03	0,20	0,02	1,00	
	Kiese	0,03	0,07	0,24	1,00	
	FG	0,89	0,32	0,01	1,00	
ΔSZ_{FTS}	alle	0,00	0,28	0,39	0,27	1,00
	Kiese	0,03	0,05	0,06	0,71	1,00
	FG	0,05	0,65	0,85	0,05	1,00

$R^2 = 0,00 - 0,33$: kein Zusammenhang
$R^2 = 0,33 - 0,66$: mäßiger Zusammenhang
$R^2 = 0,66 - 1,00$: guter Zusammenhang

Tabelle AI-15: Korrelationen (Bestimmtheitsmaße) zwischen den angewandten Verfahren bei der Kornklasse 8/12,5 mm (FG: Festgesteine)

Korrelation (R^2) der Prüfergebnisse (Festgesteine)		SZ	FTW-Wert	ΔSZ_{FTW}	FTS-Wert	ΔSZ_{FTS}
FTW-Wert	alle	0,33	1,00			
	Karbonate	0,94	1,00			
	Rest	0,23	1,00			
ΔSZ_{FTW}	alle	0,01	0,28	1,00		
	Karbonate	0,83	0,60	1,00		
	Rest	0,02	0,87	1,00		
FTS-Wert	alle	0,89	0,32	0,01	1,00	
	Karbonate	0,85	0,98	0,49	1,00	
	Rest	0,17	0,36	0,73	1,00	
ΔSZ_{FTS}	alle	0,05	0,65	0,85	0,05	1,00
	Karbonate	0,95	0,78	0,96	0,65	1,00
	Rest	0,31	0,99	0,81	0,28	1,00

$R^2 = 0,00 - 0,33$: kein Zusammenhang
$R^2 = 0,33 - 0,66$: mäßiger Zusammenhang
$R^2 = 0,66 - 1,00$: guter Zusammenhang

Tabelle AI-16: Korrelationen (Bestimmtheitsmaße) zwischen den angewandten Verfahren bei den gebrochenen Festgesteinen (Kornklasse 8/12,5 mm)

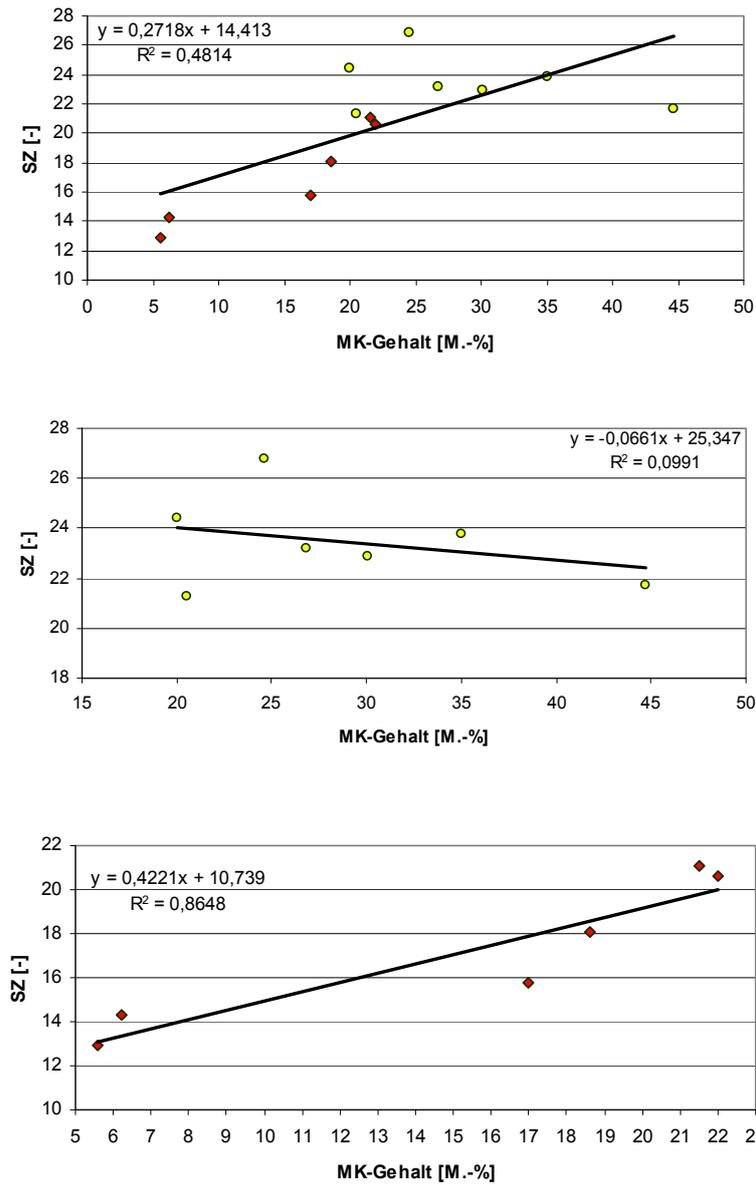


Abbildung A1-17: Zusammenhang zwischen den Schlagzertrümmerungswerten (SZ) und den MK-Gehalten (gelb: Kiese; rot: gebrochene Festgesteine)

Korrelationen zwischen FTW- und FTS-Werten	
Kornklasse	Bestimmtheitsmaß
8/16	0,09
8/12,5	0,20
4/8	0,37
16/32	0,13
8/11	0,31
11/16	0,41
16/22	0,12
22/32	0,19
Alle Kornklassen	0,16

Tabelle AI-17: Bestimmtheitsmaße aus der linearen Korrelation von FTW- und FTS-Versuch in Abhängigkeit von der Korngröße

Beton (Zementgehalt 320 kg/m ³ ; ohne Luftporenbildner)						
GK Kürzel	CEM	w/z	Rohdichte	Druckfestigkeit (28d)	Wasseraufnahme (28d)	Porigkeit (28d)
			[g/cm ³]	[N/mm ²]	[M.-%]	[V.-%]
K1	CEM I 32,5 R	0,50	2,38	53	6,5	12,5
	CEM III 42,5 N	0,50	2,36	54	6,3	-
K2	CEM I 32,5 R	0,50	2,38	58	-	-
K4	CEM I 32,5 R	0,50	2,37	51	-	-
	CEM III 42,5 N	0,50	2,37	50	-	-
	CEM I 32,5 R	0,55	2,37	38	6,6	14,4
K7	CEM I 32,5 R	0,50	2,35	55	7,5	15
	CEM III 42,5 N	0,50	2,33	55	7,4	14,2
	CEM I 32,5 R	0,55	2,34	52	7,3	14,6
F1	CEM I 32,5 R	0,50	2,61	54	-	-
F5	CEM I 32,5 R	0,50	2,43	53	5,7	12,2
	CEM I 32,5 R	0,55	2,41	46	6,6	12,7
F6	CEM I 32,5 R	0,50	2,43	50	5,3	11,2

Tabelle AI-18: Allgemeine Kennwerte der untersuchten XF3-Betone (ohne Luftporenbildner) [3]

Beton (Zementgehalt 320 kg/m ³ ; w/z = 0,50; mit Luftporenbildner)					
GK Kürzel	CEM	Rohdichte	Druckfestigkeit (28d)	Wasseraufnahme (28d)	Porigkeit (28d)
		[g/cm ³]	[N/mm ²]	[M.-%]	[V.-%]
K1	CEM I 32,5 R	2,31	46	7,1	-
	CEM III 42,5 N	2,30	45	7,8	-
K2	CEM I 32,5 R	2,31	47	-	-
K4	CEM I 32,5 R	2,32	40	-	-
	CEM III 42,5 N	2,29	44	-	-
K7	CEM I 32,5 R	2,28	46	8,7	17,3
	CEM III 42,5 N	2,27	44	8,8	16,2
F1	CEM I 32,5 R	2,53	44	-	-
F5	CEM I 32,5 R	2,34	42	7,2	-
F6	CEM I 32,5 R	2,37	41	-	-

Tabelle AI-19: Allgemeine Kennwerte der untersuchten XF4-Betone (mit Luftporenbildner) [3]

GK Kürzel	CIF-Verfahren		CIF-Verfahren		Plattenprüfverfahren
	28 FTW; geschalte Prüffläche		56 FTW; gesägte Prüffläche		56 FTW
	Abwitterung [g/m ²]	Relativer dyn. E-Modul [%]	Abwitterung [g/m ²]	Relativer dyn. E-Modul [%]	Abwitterung [g/m ²]
K1	130	93	186	86	36
K2	-	-	196	98	18
K4	-	-	342	86	116
K7	93	99	195	89	37
F1	-	-	192	71	3
F5	150	77	604	11	85
F6	-	-	380	33	70

Tabelle AI-20: Zusammenstellung der Ergebnisse der Frostuntersuchungen an XF3-Betonen (CEM I 32,5; w/z = 0,50; Zementgehalt = 320 kg/m³; ohne Luftporenbildner) [3]

GK Kürzel	CDF-Verfahren				Plattenprüf- verfahren
	28 FTW; geschalte Prüffläche		56 FTW; gesägte Prüffläche		56 FTW
	Abwitterung [g/m ²]	Relativer dyn. E-Modul [%]	Abwitterung [g/m ²]	Relativer dyn. E-Modul [%]	Abwitterung [g/m ²]
K1	326	97	569	93	116
K2	-	-	799	97	193
K4	579	95	1389	96	989
K7	1030	101	-	-	1076
F1	-	-	256	99	87
F5	692	97	2795	76	1846
F6	-	-	2226	96	400

Tabelle AI-21 : Zusammenstellung der Ergebnisse der Frost-Tausalz-Untersuchungen an XF4-Betonen (CEM I 32,5; w/z = 0,50; Zementgehalt = 320 kg/m³; mit Luftporenbildner) [3]

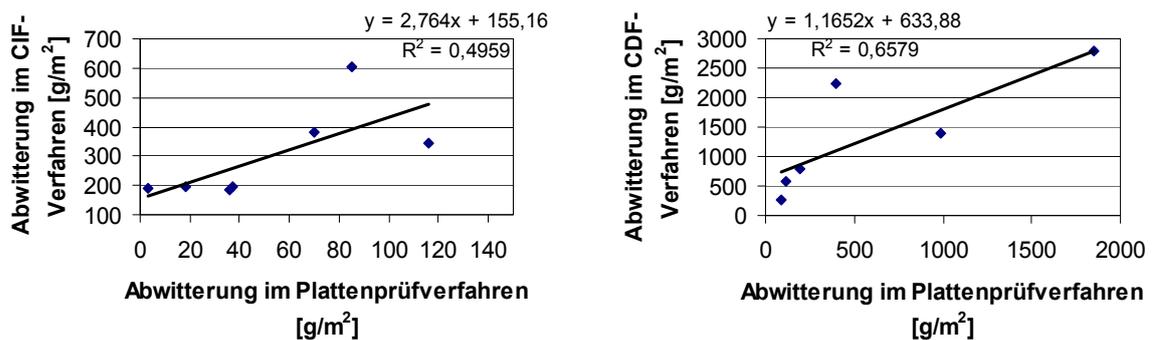


Abbildung AI-18: Korrelationen zwischen den verschiedenen Frost- bzw. Frost-Tausalz-Prüfverfahren am Beton bezüglich der bestimmten Abwitterungen (56 FTW, gesägte Prüffläche)

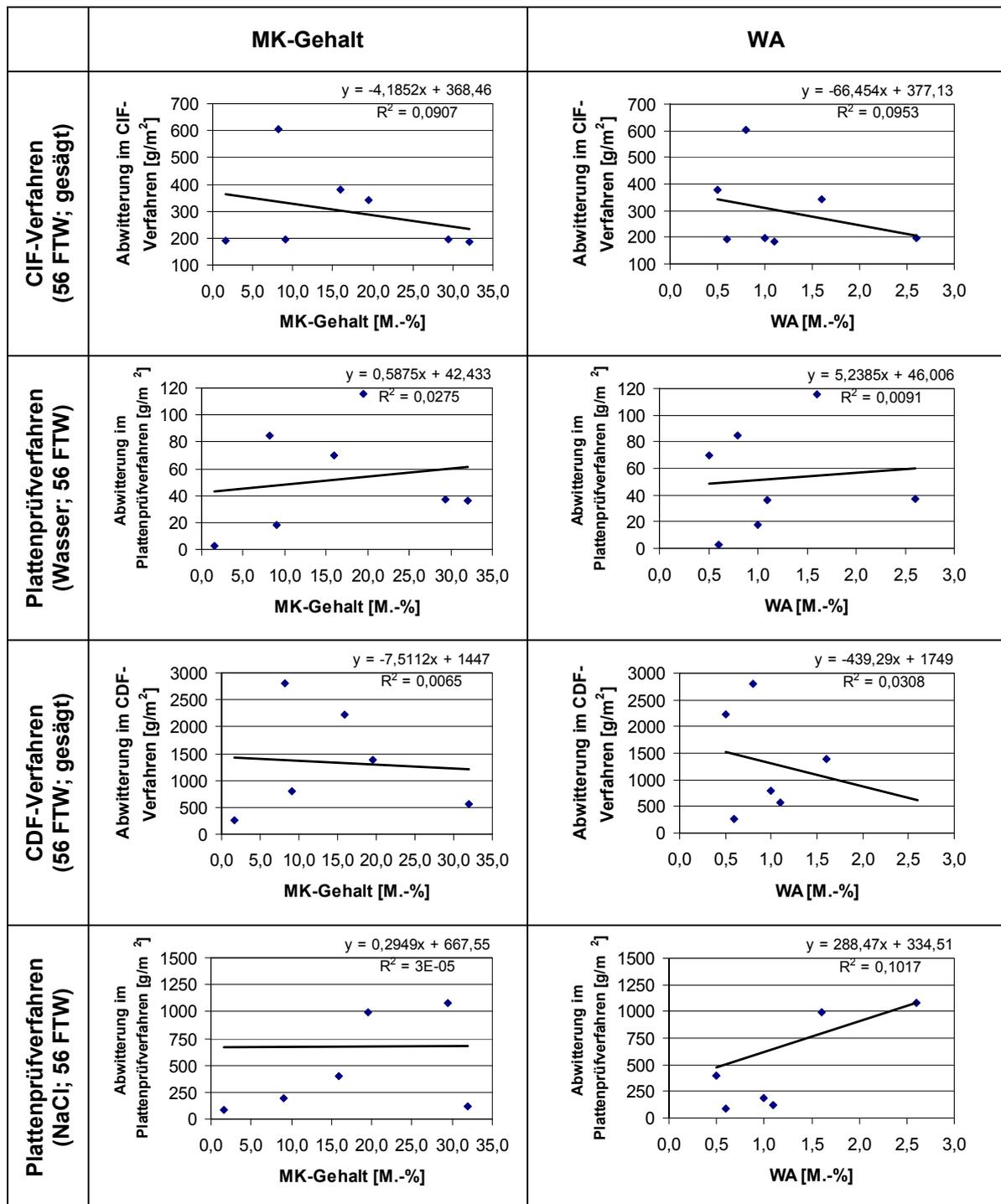


Abbildung AI-19: Korrelationen zwischen den Frostprüfverfahren am Beton und den „Hilfsgrößen“

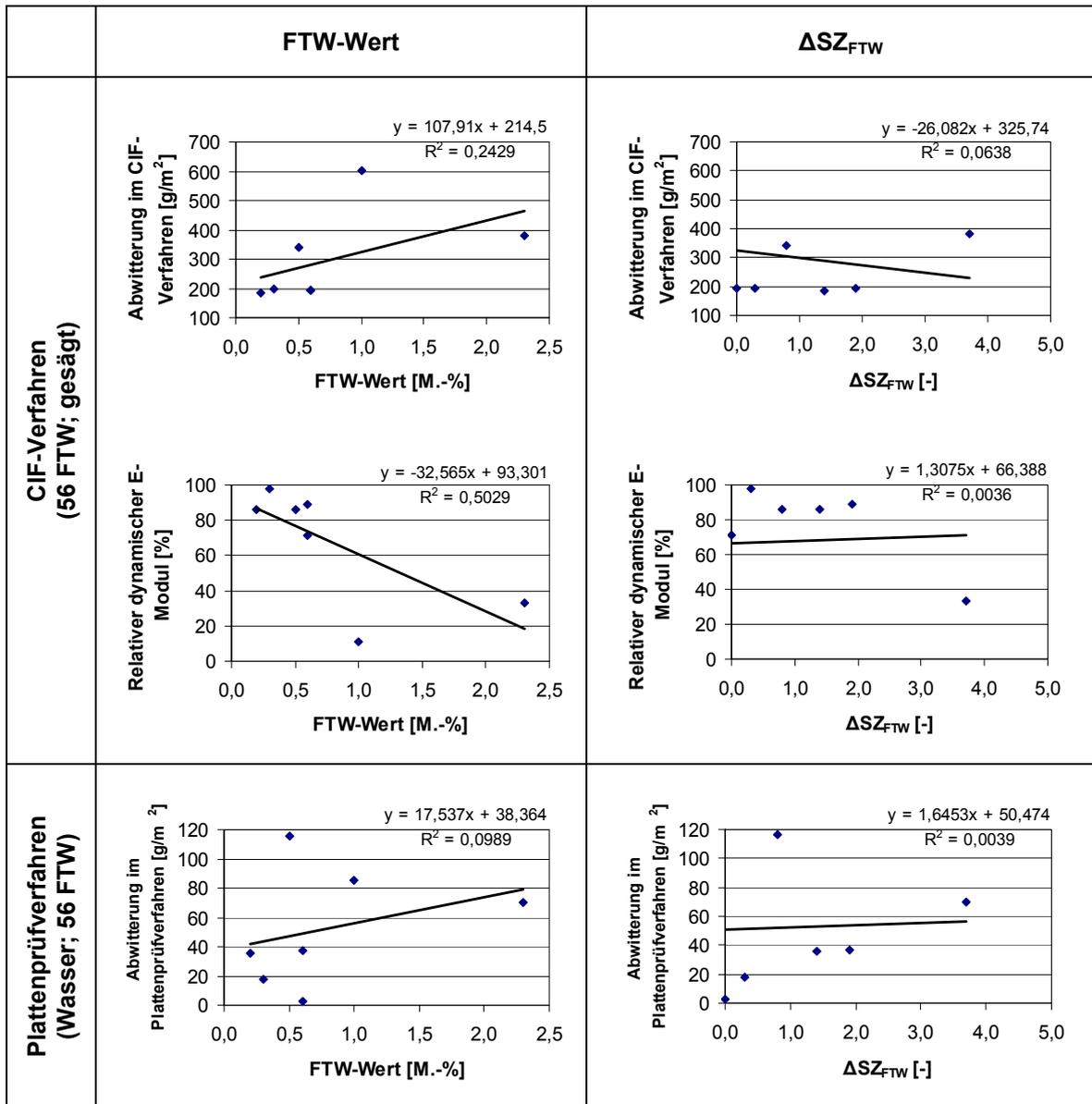


Abbildung AI-20: Korrelationen zwischen den Frostprüfverfahren am Beton und den Frostprüfverfahren an den Gesteinskörnungen (XF3)

Korrelation (R ²) der Prüfergebnisse	CIF (geschalte Fläche; 28 FTW)*		CIF (gesägte Fläche; 56 FTW)		Plattenprüfverfahren (56 FTW)
	Abwitterung [g/m ²]	Rel. dyn. E-Modul [%]	Abwitterung [g/m ²]	Rel. dyn. E-Modul [%]	Abwitterung [g/m ²]
WA	0,96	0,66	0,10	0,27	0,01
MK-Gehalt	0,49	0,87	0,09	0,14	0,03
FTW-Wert	0,12	0,49	0,24	0,50	0,10
ΔSZ _{FTW}	0,74	0,99	0,06	0,00	0,00

* Datengrundlage nur 3 Wertepaare

R ² = 0,00 - 0,33: kein Zusammenhang
R ² = 0,33 - 0,66: mäßiger Zusammenhang
R ² = 0,66 - 1,00: guter Zusammenhang

Tabelle AI-22 : Korrelationsbetrachtung Betonversuche XF3 (ohne Luftporenbildner) – Gesteinskörnungsuntersuchungen

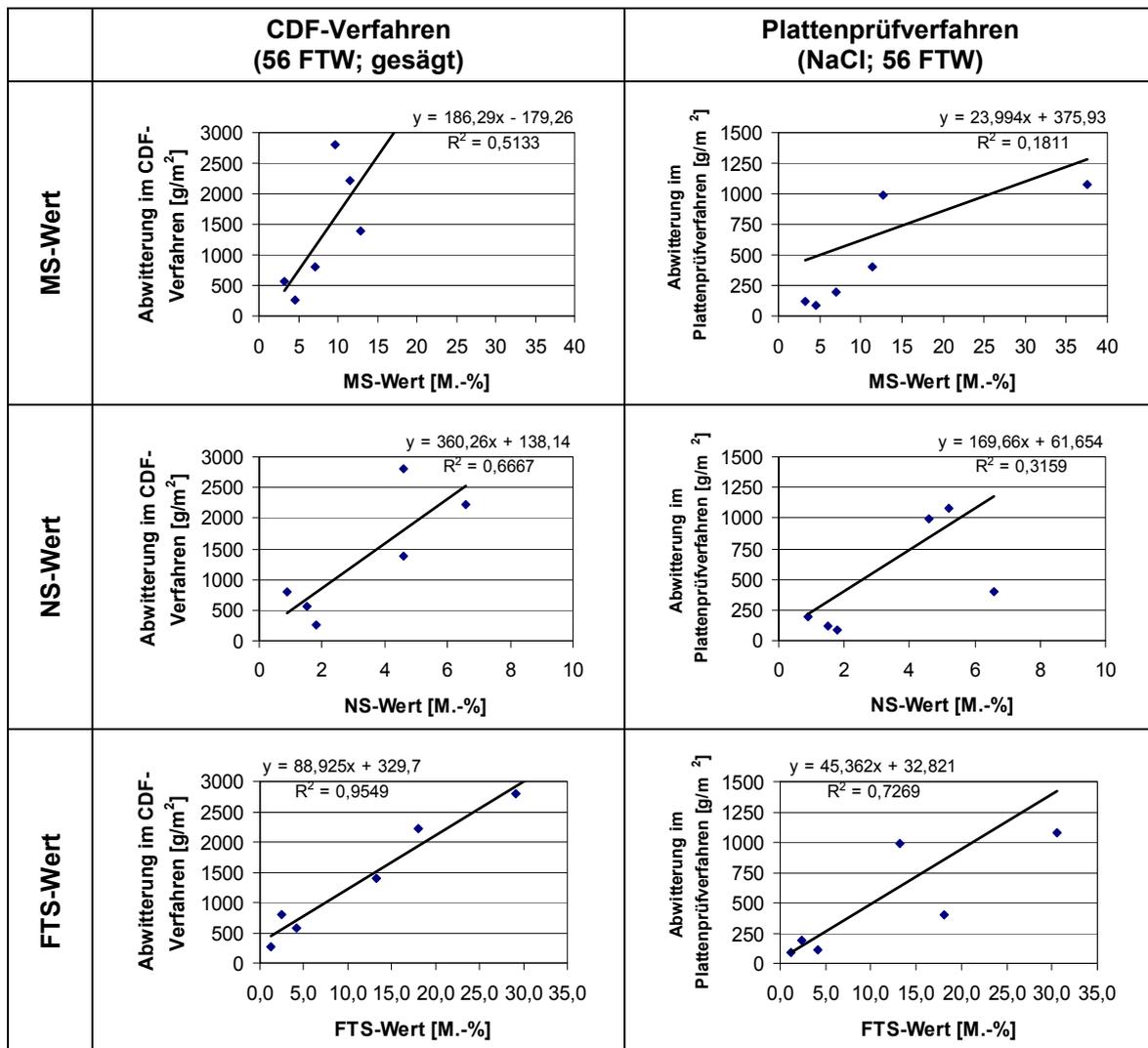


Abbildung AI-21: Korrelationen zwischen den Frost-Tausalz-Prüfverfahren am Beton und den Frost-Tausalz-Prüfverfahren an den Gesteinskörnungen (XF4) bezüglich der Abwitterungen

Korrelation (R²) der Prüfergebnisse	CDF (geschalte Fläche; 28 FTW)*		CDF (gesägte Fläche; 56 FTW)		Plattenprüfverfahren (56 FTW)
	Abwitterung [g/m²]	Rel. dyn. E-Modul [%]	Abwitterung [g/m²]	Rel. dyn. E-Modul [%]	Abwitterung [g/m²]
WA	0,55	0,49	0,03	0,01	0,10
MK-Gehalt	0,01	0,17	0,01	0,00	0,00
FTS-Wert	0,80	0,35	0,95	0,65	0,73
ΔSZ _{FTS}	0,60	0,56	0,23	0,03	0,01
MS-Wert	0,87	0,67	0,51	0,03	0,18
NS-Wert	0,73	0,08	0,67	0,08	0,32

* Datengrundlage nur 4 Wertepaare

$R^2 = 0,00 - 0,33$: kein Zusammenhang
$R^2 = 0,33 - 0,66$: mäßiger Zusammenhang
$R^2 = 0,66 - 1,00$: guter Zusammenhang

Tabelle AI-23: Korrelationsbetrachtung Betonversuche XF4 (mit Luftporenbildner) – Gesteinskörnungsuntersuchungen

GK Kürzel	CIF-Verfahren				CIF-Verfahren				Plattenprüf- verfahren	
	28 FTW; geschalte Prüffläche				56 FTW; gesägte Prüffläche				56 FTW	
	Abwitterung [g/m ²]		Relativer dyn. E- Modul [%]		Abwitterung [g/m ²]		Relativer dyn. E- Modul [%]		Abwitterung [g/m ²]	
	CEM I	CEM III	CEM I	CEM III	CEM I	CEM III	CEM I	CEM III	CEM I	CEM III
K1	130	603	93	95	186	250	86	76	36	16
K4	-	-	-	-	342	241	86	75	116	11
K7	93	-	99	-	195	250	89	99	37	14

Tabelle AI-24: Einfluss der Zementart an XF3-Betonen ($w/z = 0,50$; Zementgehalt 320 kg/m^3 ; ohne Luftporenbildner) [3]

GK Kürzel	CDF-Verfahren				CDF-Verfahren				Plattenprüf- verfahren	
	28 FTW; geschalte Prüffläche				56 FTW; gesägte Prüffläche				56 FTW	
	Abwitterung [g/m ²]		Relativer dyn. E- Modul [%]		Abwitterung [g/m ²]		Relativer dyn. E- Modul [%]		Abwitterung [g/m ²]	
	CEM I	CEM III	CEM I	CEM III	CEM I	CEM III	CEM I	CEM III	CEM I	CEM III
K1	326	1712	97	97	569	2308	93	90	116	508
K4	579	-	95	-	1389	2288	96	96	989	692
K7	1030	-	101	-	-	-	-	-	1076	2001

Tabelle AI-25: Einfluss der Zementart an XF4-Betonen ($w/z = 0,50$; Zementgehalt 320 kg/m^3 ; mit Luftporenbildner) [3]

GK Kürzel	CIF-Verfahren				CIF-Verfahren				Plattenprüf- verfahren	
	28 FTW; geschalte Prüffläche				56 FTW; gesägte Prüffläche				56 FTW	
	Abwitterung [g/m ²]		Relativer dyn. E- Modul [%]		Abwitterung [g/m ²]		Relativer dyn. E- Modul [%]		Abwitterung [g/m ²]	
	w/z = 0,50	w/z = 0,55	w/z = 0,50	w/z = 0,55	w/z = 0,50	w/z = 0,55	w/z = 0,50	w/z = 0,55	w/z = 0,50	w/z = 0,55
K4	-	175	-	69	342	567	86	58	116	39
K7	93	104	99	100	195	113	89	98	37	17
F5	150	130	77	71	604	842	11	-	85	80

Tabelle AI-26: Einfluss des Wasserzementwertes an XF3-Betonen (CEM I 32,5 R; Zementgehalt 320 kg/m^3 ; ohne Luftporenbildner) [3]

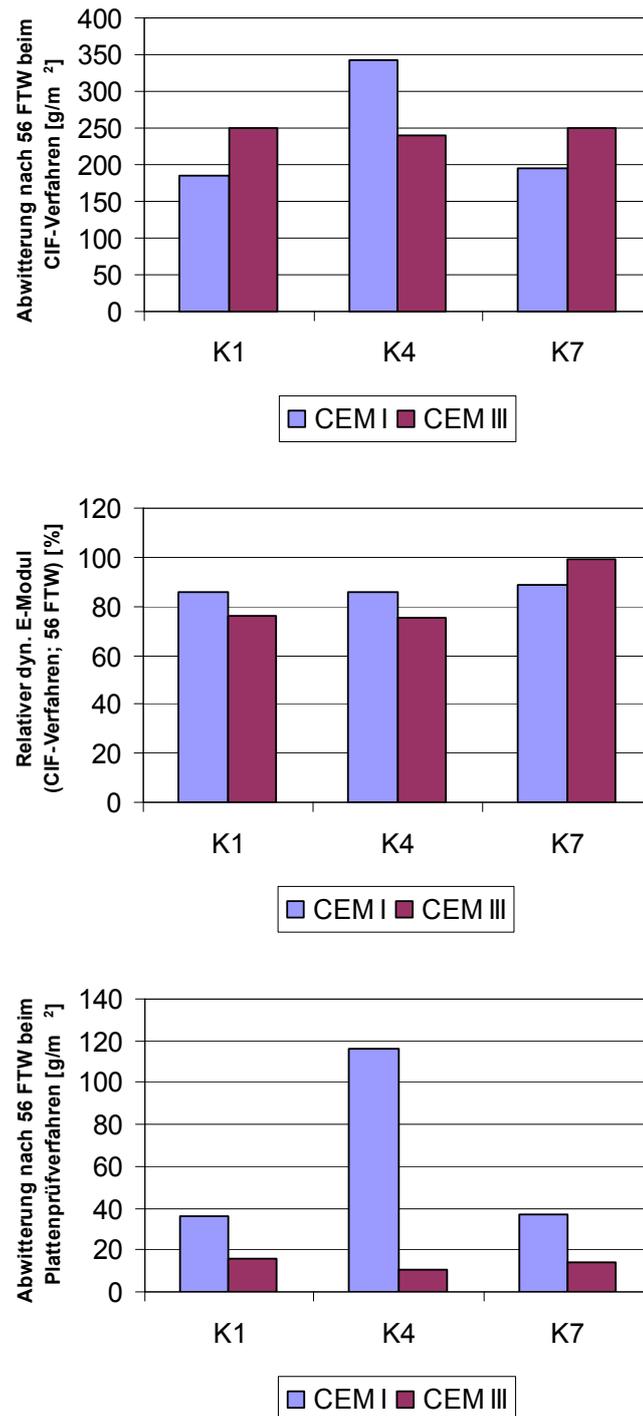


Abbildung AI-22: Einfluss der Zementart auf den Frostwiderstand von Betonen (CEM I: CEM 32,5 R; CEM III: CEM 42,5 N; w/z = 0,50; Zementgehalt = 320 kg/m³; ohne Luftporenbildner (XF3), gesägte Prüfflächen)

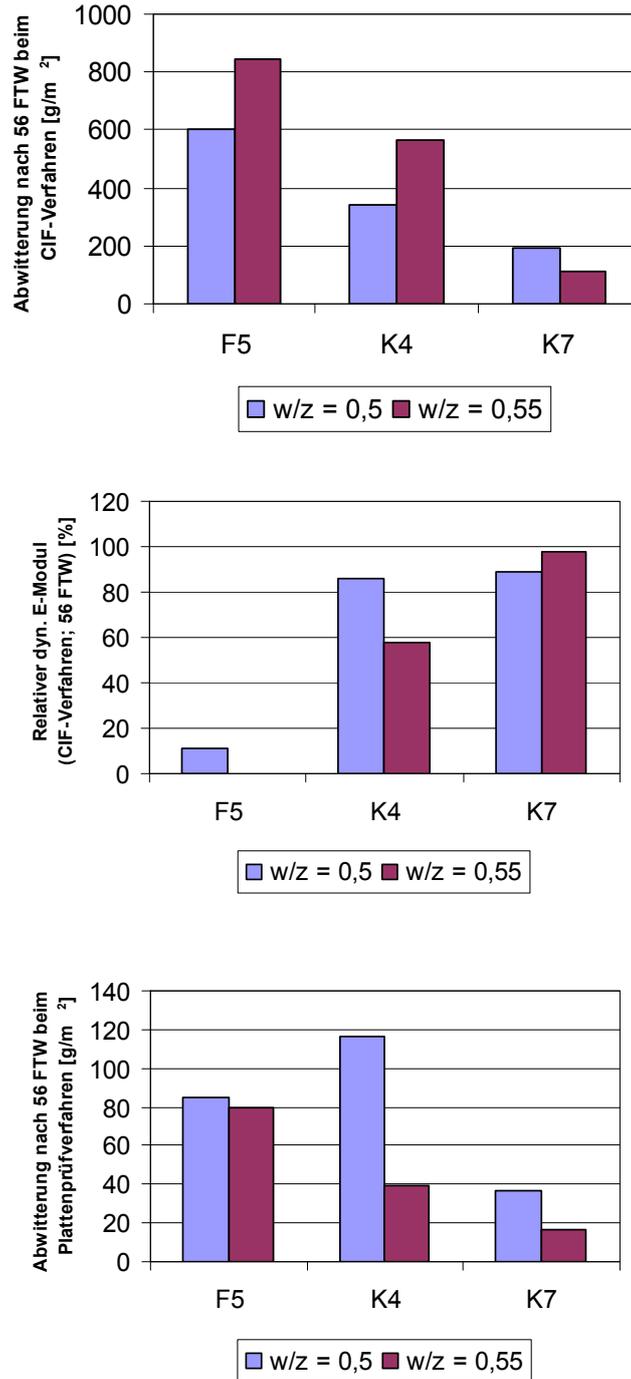


Abbildung AI-23 Einfluss des Wasserzementwertes auf den Frostwiderstand von Betonen (CEM 32,5 R; Zementgehalt = 320 kg/m³; ohne Luftporenbildner (XF3))

GK-Kürzel	CEM	w/z	Abwitterung	
			[g/m ²]	[cm ³ /m ²]
K1	CEM I 32,5 R	0,50	34	20
K4	CEM I 32,5 R	0,50	51	30
	CEM III 42,5 N	0,50	187	110
K7	CEM I 32,5 R	0,50	0	0
F5	CEM I 32,5 R	0,50	0	0
	CEM I 32,5 R	0,45	17	10
F6	CEM I 32,5 R	0,50	34	20

Tabelle AI-27: Zusammenstellung einiger Ergebnisse der Auslagerungsversuche nach zwei Jahren (XF4: mit Luftporenbildner) [4]

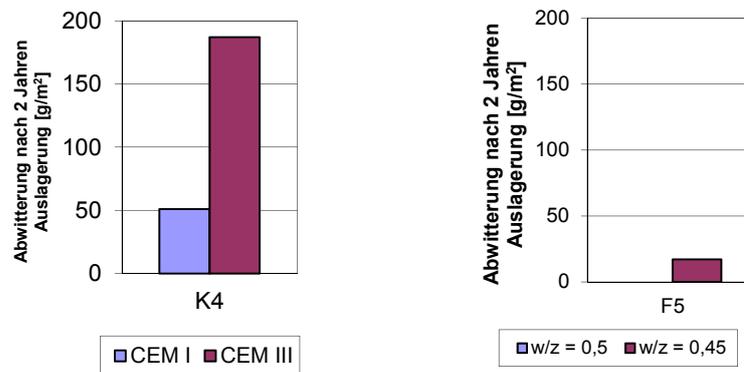


Abbildung AI-24: Einfluss von Zementart und Wasserzementwert auf den Frostwiderstand von Betonen (CEM I: CEM 32,5 R; CEM III: CEM 42,5 N)

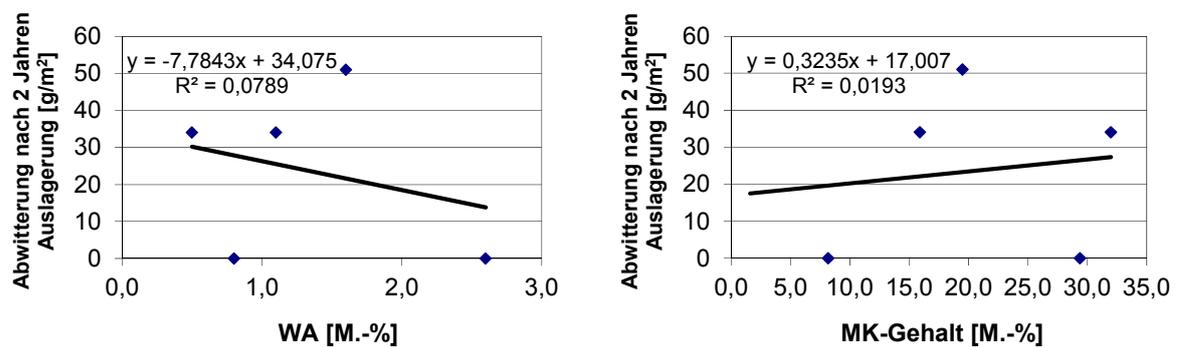


Abbildung AI-25: Korrelationen zwischen den Ergebnissen der Auslagerungsversuche und den „Hilfsgrößen“

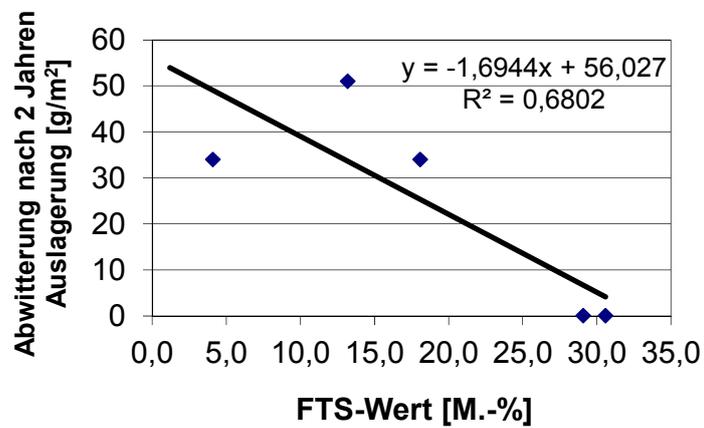
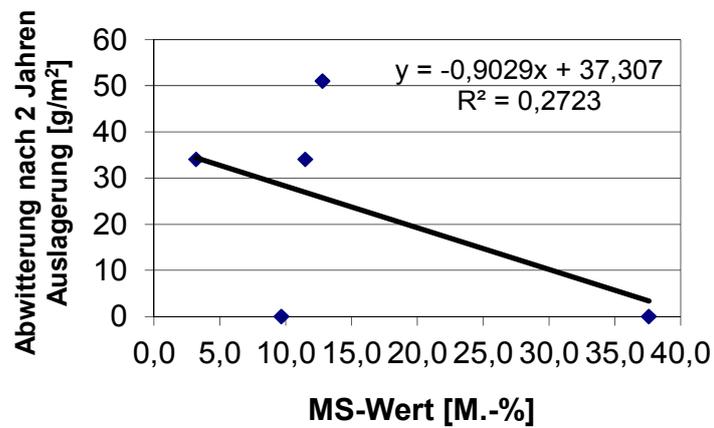
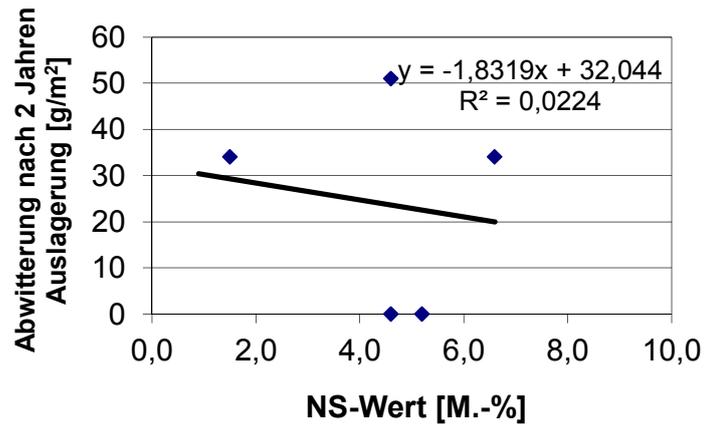


Abbildung AI-26: Korrelationen zwischen den Ergebnissen der Auslagerungsversuche und den Frost-Tausalz-Prüfverfahren an den Gesteinskörnungen (XF4)

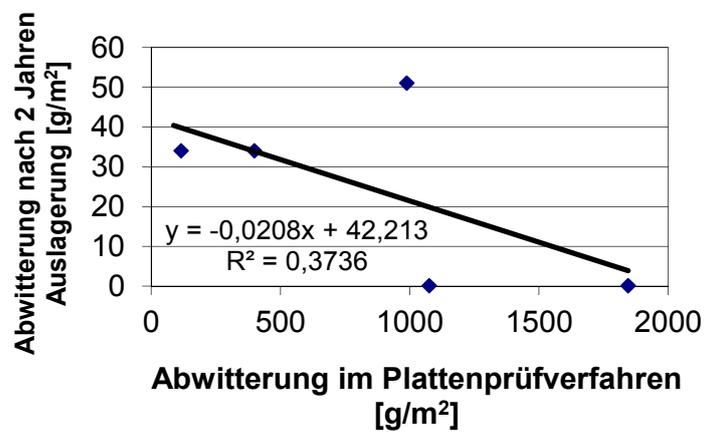
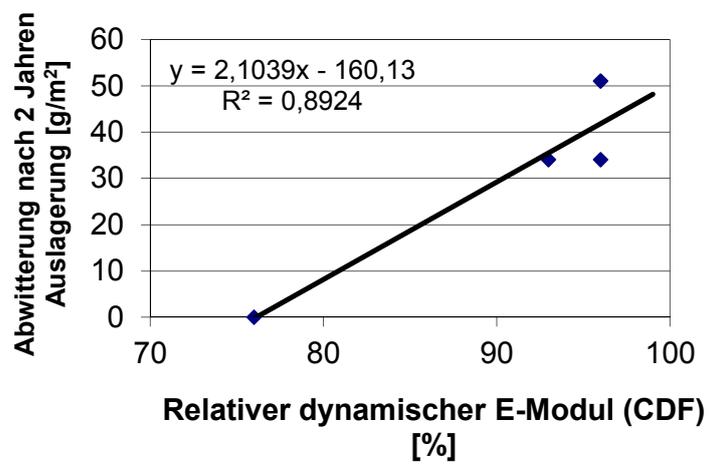
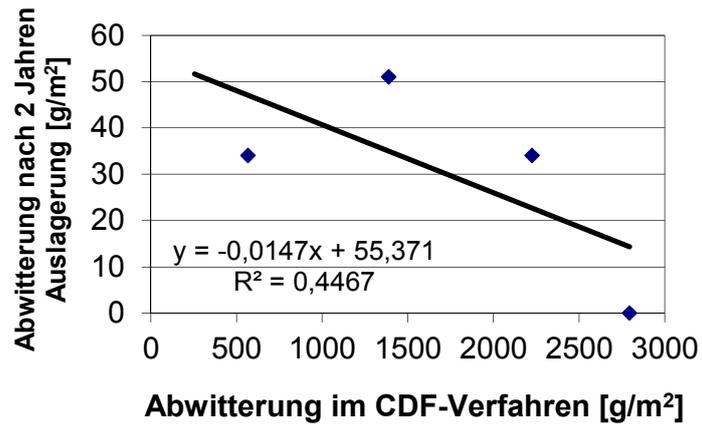


Abbildung AI-27: Korrelationen zwischen den Ergebnissen der Auslagerungsversuche und den Frost-Tausalz-Prüfverfahren am Beton (XF4)

Expositions- klasse	-	XF1	XF2			XF3		XF4		
Anwendungs- gebiet	DIN EN 12620, Anh. F	DIN 1045-2 ZTV-ING	ZTV- ING	DIN 1045-2		ZTV- ING	DIN 1045-2	ZTV- ING	DIN 1045-2	
Verfahren	WA	FTW	FTS	FTS	MS	FTW	FTW	FTS	FTS	MS
Anforderungs- wert	≤ 1	F ₄	≤ 8*	≤ 8	MS ₂₅	F ₂	F ₂	≤ 8	≤ 8	MS ₁₈
K1	1,1	0,2	4,1	4,1	3,2	0,2	0,2	4,1	4,1	3,2
K2	1,0	0,3	2,4	2,4	7,1	0,3	0,3	2,4	2,4	7,1
K3	1,3	0,3	3,5	3,5	1,8	0,3	0,3	3,5	3,5	1,8
K4	1,6	0,5	13,2	13,2	12,8	0,5	0,5	13,2	13,2	12,8
K5	1,6	2,1	6,5	6,5	6,1	2,1	2,1	6,5	6,5	6,1
K6	0,8	0,3	0,9	0,9	5,8	0,3	0,3	0,9	0,9	5,8
K7	2,6	0,6	30,6	30,6	37,6	0,6	0,6	30,6	30,6	37,6
F1	0,6	0,6	1,2	1,2	4,6	0,6	0,6	1,2	1,2	4,6
F2	1,1	0,2	3,1	3,1	4,4	0,2	0,2	3,1	3,1	4,4
F3	0,4	0,2	0,3	0,3	1,4	0,2	0,2	0,3	0,3	1,4
F4	2,0	0,7	34,6	34,6	10,5	0,7	0,7	34,6	34,6	10,5
F5	0,8	1,0	29,1	29,1	9,7	1,0	1,0	29,1	29,1	9,7
F6	0,5	2,3	18,1	18,1	11,5	2,3	2,3	18,1	18,1	11,5

* Bayern und Baden-Württemberg mit eigenen Anforderungen (≤ 25 M.-%)

Anmerkungen:

Das NS-Verfahren ist derzeit als Prüfverfahren zur Beurteilung des Verhaltens von Gesteinskörnungen bei Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung in Deutschland nicht zugelassen. Folglich existieren hierzu keine Anforderungen oder Kategorien.

Bei der Beurteilung von Gesteinskörnungen anhand von Anforderungswerten ist – unabhängig vom Prüfkriterium – stets darauf zu achten, dass die ermittelten Messwerte und die Anforderungswerte die gleiche Genauigkeit (d. h. Anzahl an Dezimalstellen) aufweisen. Kriterien, die gemäß Prüfvorschrift genauer anzugeben sind, sind für die Beurteilung dementsprechend zu runden (z. B. WA = 1,3 M.-% (wird abgerundet auf 1) entspricht der Anforderung ≤ 1 M.-%).

Tabelle AI-28: Beurteilung der Gesteinskörnungen anhand der existierenden Anforderungskriterien (grün: Anforderung erfüllt; rot: Anforderung nicht erfüllt)

GK Kürzel	CIF-Verfahren; geschalt 28 FTW	
	bei 28 FTW: rel. E _{dyn} ≥ 75 % [38]	nach 28 FTW Abw. < 1,0 kg/m ²
K1	93	0,13
K7	99	0,09
F5	77	0,15

Tabelle AI-29: Beurteilung der Gesteinskörnungen anhand der vorgeschlagenen Abnahmekriterien an das CIF-Verfahren (CEM 32,5 R; w/z = 0,50; Zementgehalt = 320 kg/m³; mit Luftporenbildner (XF3)) (grün: Anforderung erfüllt; rot: Anforderung nicht erfüllt) [3]

Anwendungsgebiet	ZTV-ING (XF2/XF4)			DIN 1045 (XF2/XF4)		
	FTS	PPV	CDF	FTS	MS	PPV
Anforderungswert	≤ 8	≤ 500	≤ 500	≤ 8	MS ₂₅	≤ 500
K4	13,2	989	579*	13,2	12,8	989
K7	30,6	1076	1030*	30,6	37,6	1076
F5	29,1	1846	692*	29,1	9,7	1846
F6	18,1	400	-	18,1	11,5	400

* Prüfung an geschalteten Prüfflächen (Beurteilung gemäß Kriterium für gesägte Prüfflächen)

Tabelle AI-30: Beurteilung der Gesteinskörnungen anhand der existierenden Anforderungskriterien an einen Betonversuch (CEM 32,5 R; w/z = 0,50; Zementgehalt = 320 kg/m³; mit Luftporenbildner (XF4)) (PPV: Plattenprüfverfahren mit 3%iger NaCl-Lösung; CDF: CDF-Verfahren) (grün: Anforderung erfüllt; rot: Anforderung nicht erfüllt) [3]

GK Kürzel	Plattenprüfverfahren (gesägte Prüffläche)	CDF-Verfahren (geschaltete Prüffläche)
	Abw. ≤ 1,0 kg/m ² nach 56 FTW [37]	Abw. ≤ 1,5 kg/m ² nach 28 FTW [38]
K1	0,1	0,3
K4	1,0	0,6
K7	1,1	1,0
F5	1,8	0,7

Tabelle AI-31: Beurteilung der Gesteinskörnungen anhand der vorgeschlagenen Abnahmekriterien bei den Betonversuchen (CEM 32,5 R; w/z = 0,50; Zementgehalt = 320 kg/m³; mit Luftporenbildner (XF4)) (grün: Anforderung erfüllt; rot: Anforderung nicht erfüllt) [3]

	Anteil der Körner (max. Amplitude im Zeitsignal < 1000 mV)	SZ _{5/8}	FTW-Wert	FTS-Wert	EKF-Index
Probe	[%]	[-]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
1	26,4	27,3	2,8	51,2	42,5
2	1,4	21,8	0,0	0,8	4,9
3	1,5	21,7	0,2	8,4	9,8
4	1,4	19,6	0,1	2,4	2,3
5	0,7	26,0	0,3	1,9	16,2
6	11,5	31,7	4,7	56,0	54,6
7	0,0	23,2	0,2	2,0	9,9
8	0,0	n.b.	0,1	0,2	5,1
9	0,0	19,5	0,4	13,9	9,8
10	0,8	26,4	0,2	0,5	10,0
11	0,8	22,2	0,7	13,8	15,2
12	0,0	23,1	0,1	2,0	7,8
13	2,8	35,8	3,2	6,5	55,8
14	0,0	21,8	0,1	0,2	3,5

Tabelle AII-1: Zusammenstellung der grundlegenden Ergebnisse für die Auswertung des Einzelkornversuches durch die akustische Resonanzanalyse (Auswertung des Zeitsignals)

	Korn 1	Korn 2	Korn 3	Korn 4	Korn 5	Korn 6	Korn 7	Korn 8	Korn 9	Korn 10	Gerät (hell) ¹⁾	Gerät (dampf) ²⁾
Frequenz	Pegel	Pegel	Pegel									
[Hz]	[mV]	[mV]	[mV]									
600,00	3,91	1,71	1,63	1,61	2,03	2,85	4,65	5,59	1,56	4,09	7,89	6,07
606,25	3,54	2,27	1,68	1,32	2,01	2,45	3,80	4,71	2,03	3,20	7,79	5,28
612,50	3,82	1,42	2,13	0,91	1,74	3,00	2,44	3,37	1,90	2,48	9,51	3,57
618,75	5,04	0,60	2,37	0,70	1,57	2,97	1,58	2,69	1,80	3,17	9,35	2,43
625,00	4,16	0,65	1,86	0,73	0,95	2,47	1,41	2,90	1,33	2,52	7,87	3,46
631,25	3,52	0,78	1,58	0,81	0,34	2,66	1,63	2,18	0,80	1,65	7,17	4,43
956,25	3,27	1,29	1,49	0,85	0,87	4,88	1,82	1,03	1,53	1,92	32,27	12,66
962,50	2,76	2,15	1,61	0,77	1,21	5,15	1,99	1,24	1,68	2,82	27,38	12,72
968,75	1,95	1,70	1,39	0,59	1,31	4,71	2,00	1,34	1,57	2,68	16,77	6,11
975,00	2,49	0,43	1,84	0,43	1,32	4,53	1,93	2,01	1,42	2,33	15,47	5,22
981,25	3,90	1,11	1,88	0,28	1,35	4,51	1,79	2,48	1,23	1,53	20,55	11,60
987,50	4,85	1,58	1,77	0,37	1,21	4,93	1,73	2,14	1,21	1,49	20,70	13,23
993,75	4,88	1,46	1,55	0,55	1,18	3,95	1,85	1,51	1,11	1,60	20,12	12,18
1000,00	4,09	1,71	1,23	0,62	1,12	3,66	2,05	1,24	0,92	1,64	23,18	13,18
1718,75	5,61	1,92	0,68	0,46	2,25	0,65	1,04	0,60	1,09	2,16	4,38	1,27
1725,00	5,32	3,02	1,17	0,69	3,17	1,59	0,76	0,79	2,65	4,07	5,92	3,51
1731,25	3,86	2,32	1,30	0,61	3,88	1,47	0,50	0,77	1,95	4,23	5,62	2,86
2550,00	0,95	4,97	0,13	2,88	2,71	1,45	1,82	1,05	0,43	1,14	23,90	2,14
2556,25	1,22	7,42	0,20	3,39	3,30	2,22	2,34	1,59	0,52	1,43	27,02	3,78
2562,50	1,49	9,19	0,28	3,67	3,71	2,01	2,85	1,78	0,55	1,60	26,84	5,12
2568,75	1,96	9,58	0,36	3,86	3,96	1,82	3,14	1,56	0,49	1,59	23,72	5,37
2575,00	2,58	9,03	0,39	4,00	3,86	1,87	3,12	1,27	0,44	1,55	19,92	4,62
2581,25	3,09	6,37	0,36	3,83	3,49	2,26	2,87	0,80	0,43	1,38	16,98	3,54
4712,50	4,02	3,69	0,48	1,12	2,44	1,28	4,44	1,08	0,46	1,66	42,21	5,03
4718,75	4,57	3,99	0,43	1,11	2,17	1,06	4,51	1,05	0,58	2,64	33,14	5,23
4725,00	5,11	4,19	0,51	1,03	2,08	1,04	4,43	1,58	0,75	4,03	22,34	4,31
4731,25	5,84	5,34	0,58	0,96	2,21	1,09	4,55	1,77	0,76	5,09	14,18	2,89
4737,50	7,05	5,68	1,01	0,84	2,57	1,94	4,70	1,86	0,55	5,31	11,91	1,56
4743,75	8,21	5,96	1,22	0,89	2,92	2,79	4,44	2,61	0,68	5,96	12,92	0,64
4750,00	8,23	4,30	1,41	0,89	3,11	2,57	3,80	3,17	0,63	5,31	13,17	1,75
4756,25	6,91	2,13	1,25	1,26	3,16	2,20	2,86	2,86	0,63	3,33	11,73	1,89
4762,50	5,17	1,68	1,12	1,52	3,01	2,07	1,71	2,08	0,51	1,57	10,18	1,14
5350,00	2,46	3,59	0,31	1,50	3,84	0,91	1,07	0,60	0,32	1,67	4,32	0,18
5356,25	3,02	5,38	0,46	1,59	4,43	1,28	1,35	0,75	0,68	2,64	4,22	0,33
5362,50	2,91	5,49	0,52	1,40	4,61	1,15	1,37	0,74	1,14	3,19	4,65	0,45
5368,75	2,25	4,11	0,68	0,97	4,40	0,86	1,32	1,00	1,15	3,27	4,08	0,36
5375,00	2,48	2,59	0,66	0,44	4,08	0,48	1,13	0,95	0,67	3,09	3,85	0,21
10725,00	3,21	5,55	0,16	1,04	1,20	0,23	2,88	0,60	1,29	0,32	13,76	0,52
10731,25	3,48	6,48	0,16	1,33	1,26	0,24	2,84	0,72	1,37	0,83	12,11	0,54
10737,50	3,14	5,27	0,13	1,35	1,29	0,24	2,23	0,45	1,37	0,98	11,58	0,33
23612,50	5,61	1,60	0,09	1,55	0,58	1,31	5,26	1,18	0,57	1,31	19,45	0,01
23618,75	10,29	5,00	0,66	2,37	0,56	5,12	8,20	1,51	3,73	3,05	32,42	0,01
23625,00	12,90	9,91	1,25	3,04	1,58	11,80	9,75	3,26	6,34	4,70	52,13	0,01
23631,25	10,37	12,18	0,76	2,67	1,13	8,37	8,60	8,49	3,22	4,40	85,28	0,01
23637,50	5,66	6,45	0,10	1,97	1,06	1,85	6,18	6,09	0,85	2,25	83,17	0,01
23643,75	3,85	2,45	0,02	1,38	0,82	1,42	4,22	1,49	0,75	0,26	71,34	0,01

1) Geräusch des Einzelkornprüfgerätes bei metallischem Prüfgut (Probekörperbehälter)

2) Geräusch des Einzelkornprüfgerätes bei dämpfendem Prüfgut (Stoff)

Tabelle AII-2: Exemplarischer Auszug aus den Ergebnissen aus der akustischen Resonanzanalyse

Probe	Photo	Petrographische Beschreibung
1		überwiegend Kalkstein, hellbeige, porös, feinkörnig, staubig, angerundet, wirkt "angewittert", braust stark & schmutzig
		untergeordnet Kalkstein, bräunlich grau, dicht, scharfkantig (tw. nicht ganz fertig, porös), braust stark
2		rel. homogen, Kalkstein, bräunlich grau, dicht, scharfkantig, weiße Kanten, braust stark, tw. löchrig
		geringer Anteil an zuckerkörniger, beiger Varietät
3		heterogen, Kalkstein, hell, bräunlich grau, scharfkantig, dicht, weiße Kanten
		Kalkstein, beige, scharfkantig, dicht
		Kalkstein, hellbeige, angerundet, staubig, tw. löchrig
4		rel. homogen, Kalkstein, dunkel bräunlich grau, glitzernd, unruhige Oberfläche, tw. löchrig, braust stark
5A		überwiegend Kalkstein, hellbeige, porös, feinkörnig, staubig, angerundet, wirkt "angewittert", braust stark & schmutzig
		untergeordnet Kalkstein, bräunlich grau, dicht, scharfkantig (tw. nicht ganz fertig, porös), braust stark

Probe	Photo	Petrographische Beschreibung
5B		<p>Kalkstein, hellbeige, porös, feinkörnig, staubig, angerundet, wirkt "angewittert", braust stark & schmutzig</p>
7		<p>Kalkstein, bräunlich grau, dicht, scharfkantig, glitzert, tw. löchrig, braust</p>
		<p>vereinzelt überwiegend Kalkstein, hellbeige, porös, feinkörnig, staubig, angerundet, wirkt "angewittert", braust stark & schmutzig</p>
8		<p>rel. homogen, Kalkstein frisch, bräunlich grau, dicht, scharfkantig, weiße Kanten, glitzert, braust</p>
9A		<p>heterogen, "bunt" (beige, schwarz, bräunlich grau) scheckig, rel. viele Kluffüllungen</p>
		<p>überwiegend Kalkstein, gescheckt (weiß-schwarz), körnig, glitzert, braust</p>
		<p>Dolomit beige, dicht, glitzert, braust schwach</p>
9B1		<p>rel. homogen, überwiegend Dolomit, beige, feinkörnig, glitzert, braust schwach</p>
		<p>untergeordnet Dolomit hellbeige, angerundet, zuckerkörnig, braust schwach</p>
		<p>rel. homogen, Kalkstein frisch, bräunlich grau, dicht, scharfkantig, weiße Kanten, glitzert, braust</p>

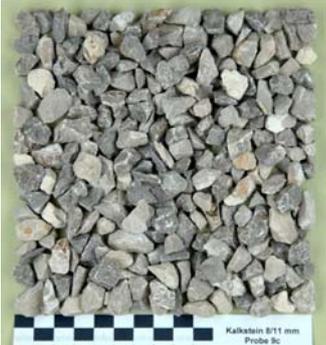
Probe	Photo	Petrographische Beschreibung
9B2		heterogen, "bunt" (beige, schwarz, bräunlich grau) scheckig, rel. viele Kluffüllungen
		überwiegend Kalkstein, gescheckt (weiß-schwarz), körnig, glitzert, braust
		Dolomit beige, dicht, glitzert, braust schwach
9C		rel. homogen, überwiegend Dolomit, beige, feinkörnig, glitzert, braust schwach
		Kalkstein, bräunlich dunkelgrau, dicht, weiße Kanten, tw. löchrig, braust
		Dolomit hellbeige, dicht, glitzert, braust schwach
10		Kalkstein, hellbeige, angerundet, porös, löchrig, schäumt schmutzig
		Dolomit, hellbeige, scharfkantig, dicht, braust schwach
11		rel. homogen, Kalkstein, dunkel bräunlich grau, scharfkantig, tw. angerundet, tw. löchrig, braust stark

Tabelle All-3: Petrographische Beschreibung der Proben aus dem Steinbruch A

	Siebdurchgänge				"Körnungsziffer"
	5,0 mm	8 mm	11,2 mm	16 mm	
Probe	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[-]
1	35,7	48,9	61,2	77,4	55,8
2	21,6	32,2	40,6	55,1	37,4
3	19,8	31,1	40,8	55,1	36,7
4	21,7	31,9	41,5	56,1	37,8
5a	24,4	35,8	47,3	63,9	42,8
5b	33,3	44,5	55,2	73,7	51,7
7	21,9	31,6	41,9	56,6	38,0
8	18,0	27,9	37,3	51,2	33,6
9A	19,6	28,0	36,4	50,8	33,7
9B1	31,6	48,4	64,0	83,3	56,8
9B2	33,8	53,3	70,2	86,4	60,9
9C	25,6	36,9	48,2	62,8	43,4
10	49,7	59,9	70,2	84,8	66,2
11	20,5	30,4	40,3	55,3	36,7

Tabelle AII-4: Korngrößenverteilung der Proben aus dem Steinbruch A nach der Aufbereitung (Siebdurchgänge und Körnungsziffer)

	5/8 mm					8/11 mm		
	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	WA	SZ _{5/8}	SI	FTW-Wert	FTS-Wert
Probe	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[M.-%]	[-]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
1	2,826	2,535	2,638	4,1	27,3	7,3	2,8	51,2
2	2,762	2,701	2,723	0,8	21,8	5,3	0,0	0,8
3	2,779	2,723	2,743	0,7	21,7	12,0	0,2	8,4
4	2,764	2,701	2,724	0,8	19,6	8,6	0,1	2,4
5A	2,823	2,623	2,694	2,7	26,0	5,1	0,3	1,9
5B	2,803	2,494	2,604	4,4	31,7	5,3	4,7	56,0
7	2,753	2,693	2,715	0,8	23,2	10,2	0,2	2,0
8	2,746	2,720	2,730	0,3	-	8,9	0,1	0,2
9A	2,746	2,678	2,703	0,9	19,5	8,2	0,4	13,9
9B1	2,851	2,716	2,763	1,7	26,4	2,6	0,2	0,5
9B2	2,839	2,734	2,771	1,4	22,2	7,6	0,7	13,8
9C	2,812	2,711	2,747	1,3	23,1	7,5	0,1	2,0
10	2,836	2,551	2,652	3,9	35,8	4,1	3,2	6,5
11	2,726	2,668	2,689	0,8	21,8	6,2	0,1	0,2

- ρ_a : scheinbare Rohdichte
 ρ_{rd} : Rohdichte auf ofentrockener Basis
 ρ_{ssd} : Rohdichte auf wassergesättigter und ofentrockener Basis
WA: Wasseraufnahme
SZ_{5/8}: Schlagzertrümmungswert an der Kornklasse 5/8 mm
SI: Kornformkennzahl
FTW-Wert: Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel
FTS-Wert: Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung

Tabelle AII-5: Gesteintechnische Kennwerte der Proben aus dem Steinbruch A

Probe	Anteil in M.-% (Bruchbilder)									EKF-Index
	1	2	3a	3b	4a	4b	5a	5b	6	
1	0	1	3	3	8	53	7	24	1	54
2	1	5	18	2	11	14	27	22	0	14
3	0	9	13	3	10	11	22	32	0	11
4	1	6	18	4	10	10	22	26	3	13
5A	0	4	11	4	8	18	11	43	1	19
5B	0	0	1	0	1	43	0	39	16	59
7	0	3	13	2	12	20	24	26	0	20
8	0	4	12	0	13	15	26	30	0	15
9A	0	4	19	0	16	18	18	25	0	18
9B1	1	5	28	0	10	14	22	20	0	14
9B2	2	4	16	0	12	17	25	22	2	19
9C	0	6	25	0	10	9	23	24	3	12
10	0	0	2	1	3	35	2	28	29	64
11	0	10	20	0	16	9	27	18	0	9

Tabelle AII-6: *Klassifizierung der Proben aus dem Steinbruch A nach dem Bruchverhalten im Einzelkornversuch*

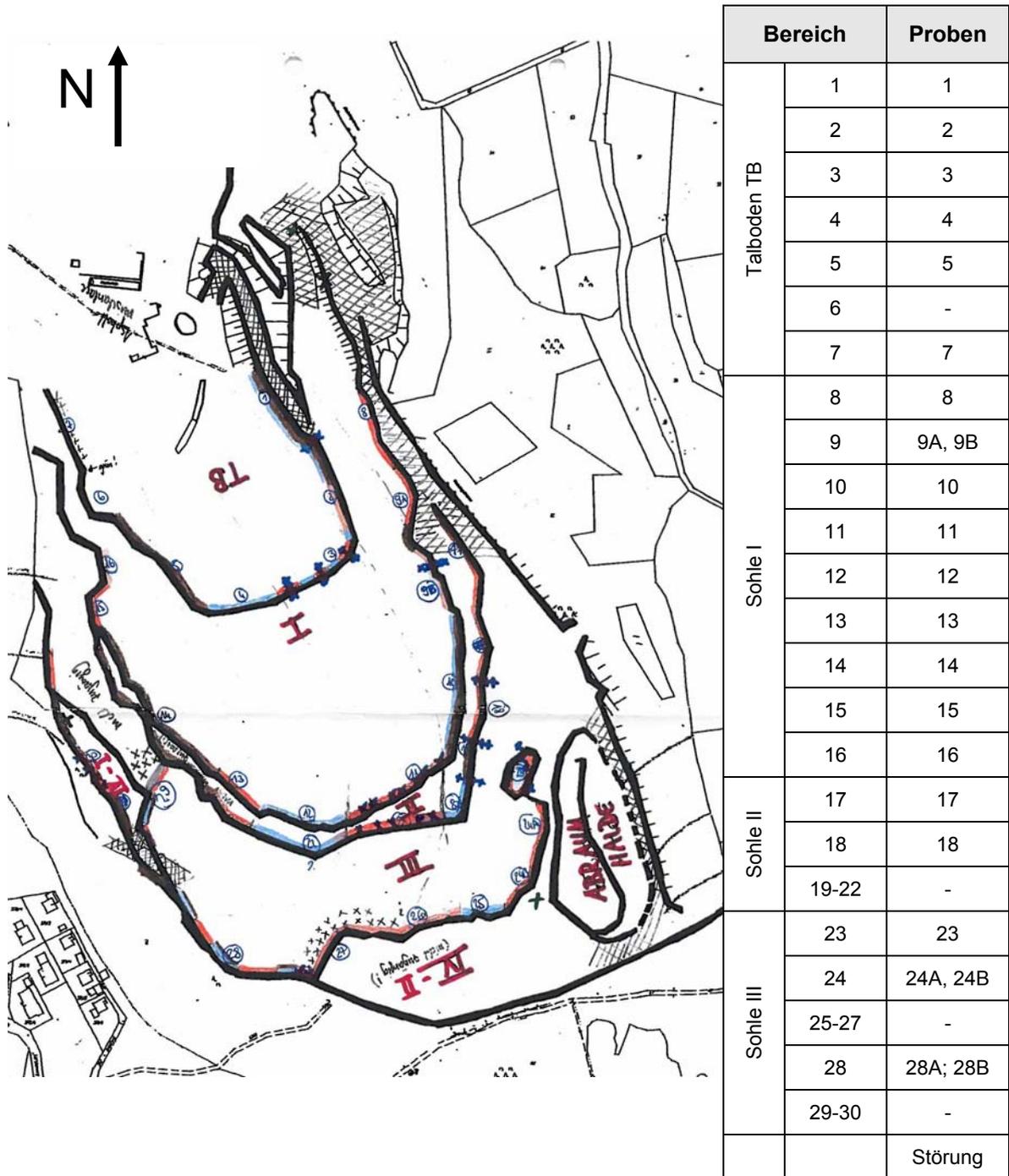
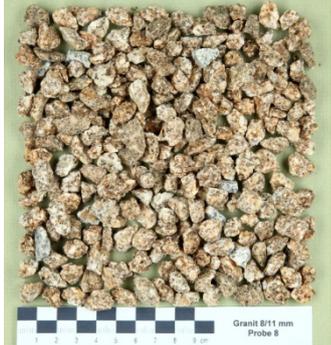
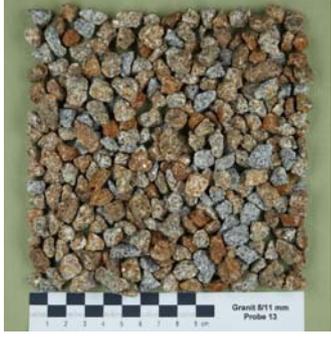
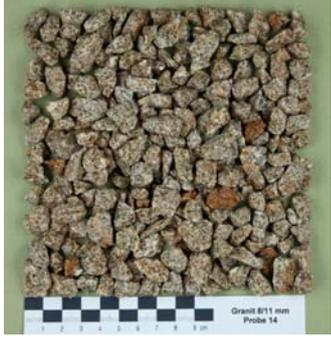
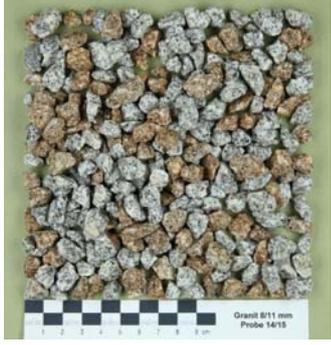
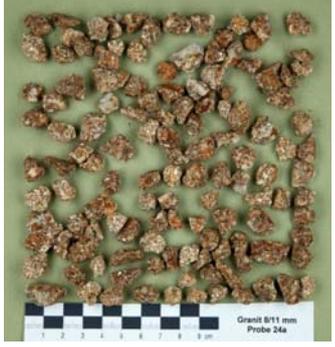


Tabelle AII-7: Grundriss Steinbruch B mit unterschiedenen Bereiche und Probenzuordnung

Probe	Photo	Petrographische Beschreibung
1		<p>Gemisch aus grauem und rotem Granit (tw. intensiv), mittelkörnig</p>
2		<p>überwiegend intensiv rot gefärbte grobkörnige Granite und untergeordnet schwach rot gefärbte grobkörnige Granite</p>
3		<p>weißer, frischer Granit, homogene Probe, mittelkörnig; Zweiglimmergranit, tw. mit Feldspatnestern</p>
4		<p>Gemisch aus grob- und mittelkörnigen grauen Graniten (überwiegend mittelkörnig), tw. grobe Feldspäte</p>
5		<p>Gemisch überwiegend aus grauen mittelkörnigen Graniten und leicht rötlichen, grobkörnigen Graniten; untergeordnet intensiv rot gefärbte, grobkörnige Granite</p>

Probe	Photo	Petrographische Beschreibung
7	 <p>Granit 8/11 mm Probe 7</p>	milchiger, weißer, feldspatreicher Granit, homogene Probe, relativ grobkörnig
8	 <p>Granit 8/11 mm Probe 8</p>	überwiegend grobkörniger (leicht bräunlich bis intensiv bräunlich) Granit, tw. mit großen Einsprenglingen, vereinzelt grau-weißer grobkörniger Granit
9A	 <p>Granit 8/11 mm Probe 9a</p>	Gemisch aus überwiegend leicht rötlichen bis intensiv roten, grobkörnigen Graniten, untergeordnet weiße, graue, grobkörnige Granite
9B	 <p>Granit 8/11 mm Probe 9b</p>	überwiegend grauer, mittelkörniger Granit, untergeordnet leicht rostiger bis intensiv rostiger mittelkörniger Granit (tw. mit großen Feldspäten, tw. mit Übergängen)
10	 <p>Granit 8/11 mm Probe 10</p>	graue, mittel- bis grobkörnige Granite, tw. große Feldspäte, homogene Probe

Probe	Photo	Petrographische Beschreibung
11		Gemisch aus weißem, rostig braunem, rotem, mittelkörnigem Granit
12		grauer, mittel- bis grobkörniger Granit, homogene Probe
13		Gemisch aus weißem bis intensiv rotem, mittelkörnigem Granit
14		überwiegend leicht bräunlicher, mittelkörniger Granit, tw. grobkörnig, tw. mit großen Feldspäten, untergeordnet stark rostig
15		Gemisch aus rötlichen und grauen, grobkörnigen Graniten

Probe	Photo	Petrographische Beschreibung
16		<p>Gemisch aus weißen (rel. wenig) bis intensiv rötlich gefärbten, mittel- bis grobkörnigen Graniten, tw. große Feldspäte, verschiedene Abstufungen</p>
17		<p>schwach bis intensiv rötlich gefärbte, überwiegend grobkörnige Granite</p>
18		<p>Gemisch aus leicht bis intensiv bräunlich gefärbten Graniten, meist mittel- bis grobkörnig; vereinzelt graue, grobkörnige Granite</p>
23		<p>überwiegend schwach bis leicht bräunliche, mittelkörnige Granite, tw. größere Einsprenglinge; untergeordnet graue, intensiv rostige Granite; 2 Quarzkörner</p>
24A		<p>überwiegend intensiv rötlicher, grobkörniger Granit</p>

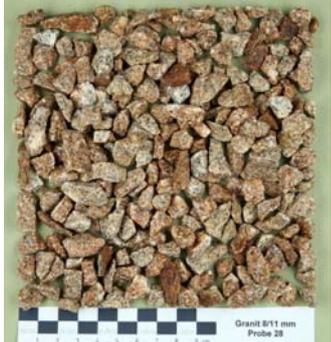
Probe	Photo	Petrographische Beschreibung
24B		überwiegend schwach bis leicht bräunliche, mittelkörnige Granite, tw. größere Einsprenglinge; untergeordnet stark rostige Granite
28A		Gemisch aus überwiegend intensiv rötlich gefärbten, mittel- bis grobkörnigen Graniten; untergeordnet schwach rötliche Granite
28B		überwiegend schwach rötliche, mittel- bis grobkörnige Granite; untergeordnet weiße/graue Granite (wirken alteriert)
Störung		grauer/beiger Granit, stark beansprucht; Feldspäte tw. zersetzt, tw. große Feldspäte

Tabelle All-8: Petrographische Beschreibung der Proben aus dem Steinbruch B

	5,0 mm	8 mm	11,2 mm	16 mm	"Körnungsziffer"
Probe	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[-]
1	38,8	49,4	59,7	72,7	55,1
2	36,8	48,1	58,8	75,7	54,9
3	23,5	32,9	42,4	58,4	39,3
4	24,1	32,7	42,1	59,9	39,7
5	27,6	36,9	46,7	67,2	44,6
7	25,2	33,8	43,7	63,6	41,5
8	35,6	47,9	58,3	73,6	53,9
9A	34,5	45,3	56,3	71,5	51,9
9B	27,4	36,6	46,4	66,5	44,2
10	26,5	35,9	45,9	63,3	42,9
11	39,4	51,0	61,6	79,9	58,0
12	30,1	39,3	49,2	67,8	46,6
13	35,9	48,0	58,8	75,3	54,5
14	28,5	37,5	47,7	66,5	45,1
15	24,6	33,2	41,1	52,5	37,9
16	31,0	41,3	53,6	74,7	50,1
17	64,8	77,7	85,3	92,7	80,1
18	50,3	61,6	70,2	81,8	66,0
23	48,1	59,9	71,1	86,0	66,3
24A	52,0	63,3	72,6	86,2	68,5
24B	41,9	52,8	65,1	85,7	61,4
28A	33,2	44,4	57,0	76,5	52,8
28B	30,8	39,8	49,0	63,8	45,9
Störung	56,7	71,8	84,9	94,4	77,0

Tabelle AII-9: Korngrößenverteilung der Proben aus dem Steinbruch B nach der Aufbereitung (Siebdurchgänge und Körnungsziffer)

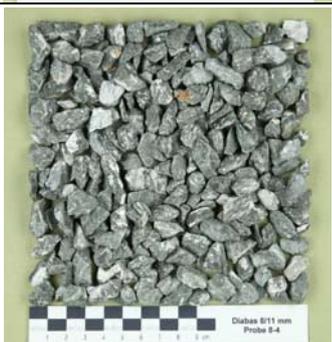
	5/8 mm					8/11 mm		
	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	WA	SZ _{5/8}	SI	FTW-Wert	FTS-Wert
Probe	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[M.-%]	[-]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
1	2,687	2,627	2,650	0,8	24,8	9,8	0,2	0,5
2	2,678	2,619	2,641	0,8	27,1	6,9	1,0	3,7
3	2,670	2,633	2,647	0,5	25,4	3,9	0,1	0,0
4	2,662	2,630	2,642	0,5	24,9	4,1	0,1	0,1
5	2,662	2,615	2,633	0,7	27,2	1,7	0,2	0,3
7	2,671	2,632	2,646	0,6	-	6,4	0,1	0,1
8	2,672	2,623	2,642	0,7	27,7	2,5	0,4	2,3
9A	2,684	2,593	2,627	1,3	27,2	2,1	0,9	4,8
9B	2,690	2,622	2,647	1,0	25,5	12,6	0,2	0,9
10	2,670	2,626	2,642	0,6	24,3	4,0	0,2	0,1
11	2,648	2,596	2,616	0,8	31,0	3,2	1,0	4,1
12	2,654	2,607	2,625	0,7	25,9	10,2	0,2	0,2
13	2,682	2,616	2,641	0,9	28,7	1,1	0,8	3,8
14	2,691	2,630	2,653	0,9	28,1	3,9	0,3	0,8
15	2,682	2,630	2,650	0,7	25,2	2,4	0,1	0,3
16	2,678	2,632	2,649	0,7	29,3	7,6	0,3	-
17	2,668	2,619	2,638	0,7	33,3	2,2	3,1	6,7
18	2,685	2,627	2,649	0,8	28,0	4,5	0,8	0,8
23	2,667	2,623	2,640	0,6	32,2	3,0	1,1	4,0
24A	2,674	2,637	2,651	0,5	-	3,0	3,1	19,9
24B	2,674	2,599	2,627	1,0	-	5,2	0,6	3,6
28A	2,653	2,611	2,627	0,6	-	14,6	-	0,3
28B	2,654	2,579	2,607	1,1	29,6	5,8	0,2	0,7
Stör.	2,579	2,530	2,549	0,7	-	0,0	13,6	30,5

- ρ_a : scheinbare Rohdichte
 ρ_{rd} : Rohdichte auf ofentrockener Basis
 ρ_{ssd} : Rohdichte auf wassergesättigter und ofentrockener Basis
WA: Wasseraufnahme
SZ_{5/8}: Schlagzertrümmerungswert an der Kornklasse 5/8 mm
SI: Kornformkennzahl
FTW-Wert: Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel
FTS-Wert: Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung

Tabelle AII-10: Gesteintechnische Kennwerte der Proben aus dem Steinbruch B

		Anteil in M.-% (Bruchbilder)									
Probe		1	2	3a	3b	4a	4b	5a	5b	6	EKF-Index
1	1-1	0	0	9	0	23	39	14	15	0	35
	1-2	0	0	16	0	6	28	28	23	0	
2	2-1	0	0	2	0	0	41	3	19	35	80
	2-2	0	0	0	0	0	53	0	0	47	
3	3-1	0	2	8	0	13	31	13	24	9	40
4	4-1	0	2	8	0	17	26	15	25	6	33
	4-2	0	0	21	0	0	36	0	43	0	
5	5-1	0	0	3	0	0	59	4	18	16	67
	5-2	0	0	0	0	6	48	0	37	9	
	5-3	0	0	21	0	0	47	32	0	0	
7	7-1	0	0	21	0	13	36	4	21	6	42
8	8-1	0	0	3	0	9	64	3	10	11	76
	8-2	0	0	0	0	0	100	0	0	0	
9A	9A-1	0	0	5	0	5	58	4	16	11	63
	9A-2	0	0	0	0	28	21	0	52	0	
9B	9B-1	0	5	9	0	17	39	2	24	4	44
	9B-2	0	4	19	0	3	46	6	22	0	
10	10-1	0	0	13	0	11	35	13	23	6	40
11	11-1	0	0	2	0	3	65	0	3	28	88
	11-2	0	0	0	0	0	53	14	13	19	
	11-3	0	0	0	0	0	74	0	0	26	
12	12-1	2	0	10	0	15	40	11	18	4	44
13	13-1	0	0	7	0	8	43	0	13	30	64
	13-2	0	0	15	0	21	35	0	24	5	
	13-3	0	0	12	0	12	59	0	9	9	
14	14-1	0	0	6	0	9	54	8	18	5	59
15	15-1	0	0	3	0	13	52	7	19	6	49
	15-2	0	0	9	0	21	37	19	14	0	
16	16-1	0	0	5	0	15	50	12	13	5	62
	16-2	0	0	8	0	0	70	0	14	8	
	16-3	0	0	7	0	0	78	0	15	0	
17	17-1	0	0	0	0	0	62	6	27	5	78
	17-2	0	0	0	0	0	70	0	0	30	
18	18-1	0	0	2	0	6	56	7	9	19	75
	18-2	0	0	0	0	32	68	0	0	0	
23	23-1	0	0	1	0	5	61	0	0	33	92
	23-2	0	0	0	0	0	100	0	0	0	
	23-3	0	0	0	0	0	42	58	0	0	
24A	24A-1	0	0	5	0	16	58	0	10	11	69
24B	24B-1	0	0	0	0	0	65	0	11	24	89
28A	28A-1	0	0	22	0	21	37	7	12	0	38
	28A-2	0	0	43	0	0	57	0	0	0	
28B	28B-1	0	0	5	0	13	47	11	16	8	57
	28B-2	0	0	0	0	0	85	0	15	0	
Störung	St.-1	0	0	0	0	0	87	0	0	13	100

Tabelle All-11: Klassifizierung der Proben aus dem Steinbruch B nach dem Bruchverhalten im Einzelkornversuch

Probe	Photo	Petrographische Beschreibung
8-1		grün, schiefrig, tw. harnischähnlich, milchig weiße und orange-beige Einsprenglinge, tw. verrostete Körner, alles rel. ähnlich (wirkt alt!)
8-2		grün, schiefrig, tw. harnischähnlich, nur selten Einsprenglinge, dicht (wirkt frischer), hoher Anteil an Quarzknuern (tw. GK vollständig aus Quarz)
8-3		grün, schiefrig, tw. harnischähnlich, nur selten Einsprenglinge, dicht (wirkt frischer), geringerer Anteil an Quarzknuern (tw. GK vollständig aus Quarz)
8-4		rel. homogen, grünlich grau, Schieferung nicht so ausgeprägt, viele milchig weiße Einsprenglinge/Einlagerungen/Beläge (carbonatfrei), vereinzelt rostig
8-5		rel. homogen, grünlich grau, schiefrig, milchig weiße kleine Einsprenglinge/Äderchen; vereinzelt auch orangene Einsprenglinge

Probe	Photo	Petrographische Beschreibung
8-6		heterogen, "bunt", v. a. grünlich, seidig glänzend, plattig, glatte Oberfläche
		violett, seidig glänzend, plattig, glatte Oberfläche
		"Quarzknuern"
		"verrostete Körner"
	grünlich grau, schiefrig, milchig weiße kleine Einsprenglinge/Äderchen; vereinzelt auch orangene	
8-7		heterogen; "rostig", v. a. stark verwittertes, rostiges Gestein, urspr. grün (glatt, schiefrig, plattig, harnischähnlich ↔ kaum schiefrig, kubischer, tw. körnig)
		beige, körnig, viele Spaltflächen, glitzert
8-8		homogen, grünlich grau, schiefrig, weiße Schlieren, feinkörnig, vereinzelt feine weiße Körner, eine Quarzknuern
8-9		heterogen, heller grün beige, wirkt staubig, mit milchig weißen und dunkelgrünen Körnern
		beige, mit milchig weißen und dunkelgrünen Körnern, schiefrig
		grün, schiefrig, rel. dicht ↔ grün, glatt, schiefrig, harnischähnlich
8-10		heterogen, "bunt", rötlich braun, dicht, meist nicht so ausgeprägt schiefrig, häufig nur roter Belag - Übergänge von rot zu grün
		"Quarzknuern", milchig, tw. leicht rose
		beige, zuckerkörnig, dicht mit weißen Körnern
		verschiedene grünliche Gesteine, z. B. staubig, mit milchigen Körnern; grün mit schwarzen Körnern; grün, dicht, schiefrig...

Probe	Photo	Petrographische Beschreibung
8 11		rel. homogen, grün, schiefrig, stark plattig, glatt, harnischähnlich, meist relativ dicht, unterschiedliche Grünfärbungen, tw. mit dunkelgrünen Einsprenglingen/Schlieren
8-12		rel. homogen, stark rostige Probe, alteriert, wellige Oberflächen, urspr. grün, stark verrostet, weiße kleine Einsprenglinge, nicht so ausgeprägt schiefrig, (bzgl. Kornform)
2		heterogen, verschiedene Grüngesteine, schiefrig
		hellbeige, rund, feinkörnig, mit kleinen Körnern
		verrostet Grüngesteine
4		heterogen, "bunt", reiner Quarz, weiß
		grüne, schiefrige Gesteine, dicht, sehr plattig, vereinzelt kleine Körner
		stark verwitterte, rostbraune/ockerbraune Grüngesteine
6		heterogen, "bunt", verschiedene schiefrige Grüngesteine
		violett, schiefrig, plattig,
		reiner Quarz
		dicht, beige, schiefrig, kubischer
		"Feldspatreich", grobkörnig, rötl. milchige Einsprenglinge

Tabelle AII-12: Petrographische Beschreibung der Proben aus dem Steinbruch C und Zuordnung zu den Bereichen im Steinbruch

	5 mm	8 mm	11 mm	16 mm	"Körnungsziffer"
Probe	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[-]
8-1	24,7	34,1	43,7	58,0	40,1
8-2	28,3	41,4	54,9	69,4	48,5
8-3	21,2	27,9	35,2	47,2	32,9
8-4	22,7	34,6	48,7	65,8	43,0
8-5	20,8	30,0	40,1	53,8	36,2
8-6	24,3	33,8	43,4	60,2	40,4
8-7	18,1	26,0	34,5	48,5	31,8
8-8	17,6	24,5	31,9	42,6	29,2
8-9	18,2	25,3	32,8	43,6	30,0
8-10	20,1	29,4	39,0	54,4	35,7
8-11	23,1	31,6	41,6	57,0	38,3
8-12	52,5	65,8	76,4	88,0	70,7
2	33,6	49,7	64,7	79,4	56,9
4	25,7	38,5	51,9	67,7	45,9
6	25,1	38,7	52,4	67,3	45,9

Tabelle AII-13: Korngrößenverteilung der Proben aus dem Steinbruch C nach der Aufbereitung (Siebdurchgänge und Körnungsziffer)

	5/8 mm					8/11 mm		
	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	WA	SZ _{5/8}	SI	FTW-Wert	FTS-Wert
Probe	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[M.-%]	[-]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
8-1	2,834	2,707	2,752	1,7	17,2	39,4	0,2	2,4
8-2	2,809	2,762	2,779	0,6	20,0	34,1	0,1	0,5
8-3	2,852	2,790	2,812	0,8	19,2	58,7	0,1	0,5
8-4	2,822	2,726	2,760	1,2	14,3	28,9	0,5	30,8
8-5	2,851	2,812	2,826	0,5	16,2	55,2	0,1	0,1
8-6	2,852	2,772	2,800	1,0	16,9	53,8	0,1	6,2
8-7	2,747	2,614	2,662	1,9	17,8	40,2	0,2	7,1
8-8	2,862	2,815	2,832	0,6	14,3	44,7	0,0	0,1
8-9	2,801	2,697	2,734	1,4	15,5	41,2	0,0	7,7
8-10	2,834	2,720	2,761	1,5	14,1	33,9	0,2	18,6
8-11	2,820	2,738	2,767	1,1	14,4	65,5	0,0	2,0
8-12	2,795	2,331	2,497	7,1	21,8	23,8	0,7	35,4
2	2,675	2,382	2,492	4,6	20,4	58,8	11,4	33,6
4	2,831	2,684	2,736	1,9	19,0	48,2	0,7	14,8
6	2,836	2,709	2,754	1,7	19,3	50,8	1,5	6,1

- ρ_a : scheinbare Rohdichte
 ρ_{rd} : Rohdichte auf ofentrockener Basis
 ρ_{ssd} : Rohdichte auf wassergesättigter und ofentrockener Basis
 WA: Wasseraufnahme
 SZ_{5/8}: Schlagzertrümmerungswert an der Kornklasse 5/8 mm
 SI: Kornformkennzahl
 FTW-Wert: Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel
 FTS-Wert: Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung

Tabelle AII-14: Gesteintechnische Kennwerte der Proben aus dem Steinbruch C

		Anteil in M.-% (Bruchbilder)									
Probe		1	2	3a	3b	4a	4b	5a	5b	6	EKF-Index
8-1	8-1-1	0	1	26	8	0	10	33	22	0	10
8-2	8-2-1	6	0	22	3	0	12	32	26	0	19
	8-2-2	0	0	0	24	0	31	0	46	0	
8-3	8-3-1	0	0	17	0	0	6	37	41	0	13
	8-3-2	0	0	0	6	0	58	0	35	0	
8-4	8-4-1	5	12	44	0	8	9	22	0	0	9
8-5	8-5-1	3	8	32	0	12	11	34	0	0	11
8-6	8-6-1	0	7	24	0	6	5	42	17	0	9
	8-6-2	0	0	0	0	0	0	100	0	0	
	8-6-3	0	0	13	0	0	56	0	31	0	
8-7	8-7-1	1	6	35	0	10	3	27	18	0	3
	8-7-2	11	0	26	0	0	0	0	63	0	
8-8	8-8-1	3	8	24	0	19	0	34	12	0	0
8-9	8-9-1	0	13	21	0	18	9	32	6	0	8
	8-9-2	0	13	0	0	0	0	0	84	3	
8-10	8-10-1	1	10	18	0	11	6	27	27	0	6
	8-10-2	6	0	34	0	0	7	53	0	0	
8-11	8-links-1	0	3	28	0	17	8	38	7	0	8
	8-links-2	6	0	34	0	14	12	23	11	0	
8-12	8-22-1	0	0	5	0	9	30	23	33	0	31
	8-22-2	0	0	0	0	40	37	23	0	0	
2	2-1	9	13	32	0	6	12	24	4	0	16
	2-2	0	19	0	0	0	0	33	48	0	
	2-3	0	0	0	0	0	0	0	24	76	
4	4-1	0	2	41	0	10	1	33	12	2	8
	4-2	0	0	16	0	0	0	64	20	0	
	4-2	0	6	0	0	0	36	0	58	0	
6	6-1	0	18	16	0	14	5	31	15	0	8
	6-2	0	0	32	0	0	0	68	0	0	
	6-3	0	0	23	0	0	0	77	0	0	
	6-4	0	0	44	0	0	0	56	0	0	
	6-5	0	0	19	0	0	29	32	20	0	

Tabelle AII-15: Klassifizierung der Proben aus dem Steinbruch C nach dem Bruchverhalten im Einzelkornversuch

Ö-NORM B 3304 (1. April 1981):
Betonzuschläge aus natürlichem Gestein
Begriffe, Anforderungen, Prüfungen, Lieferung und Güteüberwachung

Relevante Abschnitte für das Mürbkornverfahren:

2 Begriffsbestimmungen

2.17 Mürbkorn

Mürbkorn sind alle schiefrigen, angewitterten, rissigen, schlecht konglomeratisch verfestigten, absandenden Körner und freie Glimmerschüppchen, sowie alle Körner, die bei der Prüfung gemäß Abschnitt 4.8 als mürbe erkannt werden.

3 Anforderungen an Betonzuschläge

3.3 Festigkeit und Frostbeständigkeit

3.3.1 Allgemeines

Die Körner des Zuschlages müssen so fest sein, dass bei ihrer Anwendung im Sieblinienbereich AC die geforderte Betonfestigkeitsklasse erreicht werden kann.

Zuschlag für Beton mit hohem Frostwiderstand muss ausreichend frostbeständig sein.

3.3.2 Festigkeit

Als ausreichend fest gelten Zuschläge, die

- höchstens 5 % (Masse) Mürbkorn gemäß Abschnitt 4.8 enthalten, oder
- mehr als 5 % (Masse) Mürbkorn gemäß Abschnitt 4.8 enthalten, aber eine Betonprüfung gemäß Abschnitt 4.9 bestanden haben.

3.3.3 Frostbeständigkeit

Als ausreichend frostbeständig gelten Zuschläge, die

- höchstens 5 % (Masse) Mürbkorn gemäß Abschnitt 4.8 enthalten, oder
- mehr als 5 % (Masse) Mürbkorn gemäß Abschnitt 4.8 enthalten, aber eine Betonprüfung gemäß Abschnitt 4.10 bestanden haben.

3.3.4 Verwendungsklassen der Zuschläge

Verwendungsklasse I:

Zuschläge, die fest im Sinne von Abschnitt 3.3.2 und frostbeständig im Sinne von Abschnitt 3.3.3 sind.

Verwendungsklasse II:

Zuschläge, die fest im Sinne von Abschnitt 3.3.2, aber nicht frostbeständig im Sinne von Abschnitt 3.3.3 sind.

Verwendungsklasse III:

Zuschläge mit bis zu 20 % (Masse) Mürbkorn, ohne Nachweis der Festigkeit gemäß Abschnitt 3.3.2 und der Frostbeständigkeit gemäß Abschnitt 3.3.3.

4 Prüfungen

4.8 Mürbkorngehalt

- (1) Es ist jede Körnung des Lieferverzeichnisses zu prüfen und hierfür in die Kornklassen zu trennen.
- (2) Der Mürbkornanteil von Korngruppen und Kornklassen bis zu einem Größtkorn von 4 mm ist unter einem Mikroskop bei etwa 25facher Vergrößerung nach Augenschein, erforderlichenfalls unter Zuhilfenahme einer Nadel, an Teilproben von jeweils 1000 Körnern abzuschätzen.
- (3) Der Mürbkorngehalt von Korngruppen und Kornklassen mit einem Größtkorn über 4 mm ist anhand des Hammerversuches an Teilproben von mindestens 200 Körnern je Kornklasse zu beurteilen.

Körner, die nach 24stündiger Wasserlagerung einzeln auf einer harten Unterlage liegend unter einem Hammerschlag (Masse des Hammers 500 g bzw. 250 g bei der Kornklasse 4/8, Fallhöhe stets 30 cm) mit dumpfem Klang in viele Stücke zerfallen, gelten als mürbe Körner.

Körner, die beim gleichen Hammerschlag entweder gar nicht oder mit hellem Klang in wenige Stücke mit scharfkantigen Bruchflächen zerspringen, gelten als fest.

- (4) Der Mürbkorngehalt ist in % (Masse) anzugeben
 - für jede Korngruppe
 - für jedes Korngemisch für den Anteil kleiner als 4 mm und den Anteil über 4 mm.

4.9 Festigkeit

Bei einem Mürbkorngehalt gemäß Abschnitt 4.8 von mehr als 5 % ist anhand einer Betonprüfung zu beurteilen, ob in den Beton R (gemäß Ö-NORM B 4200 Teil 10) zugelassenen Festigkeitsklassen eine Beeinträchtigung der Betondruckfestigkeit ausgeschlossen werden kann.

Aus einer Betonmische (Ausbreitmaß 38 cm ± 2 cm, w/z = 0,60, Einheitszement PZ 375), für die eine Zuschlagprobe mit einer Kornverteilung nahe B 4 (für Korngruppen und Anteile von Korngemischen über 4 mm) verwendet wurde, sind 6 Probewürfel von 20 cm Kantenlänge gemäß Ö-NORM B 3303 herzustellen, zu lagern und nach 28 Tagen auf Druckfestigkeit zu prüfen. Die Festigkeit darf um höchstens 5 % unter der Festigkeit von Probekörpern liegen, die aus Beton sonst gleicher Zusammensetzung, jedoch mit einem Zuschlag hergestellt wurden, der zwar ähnlicher geologischer Herkunft ist, jedoch einen Mürbkorngehalt von weniger als 5 % aufweist.

4.10 Frostbeständigkeit

Bei Mürbkorngehalten gemäß Abschnitt 4.8 von mehr als 5 % ist anhand einer Betonprüfung zu beurteilen, ob mit diesem Zuschlag Frost-Tausalz-beständige Oberflächen herstellbar sind.

4.10.1 Korngruppen und Anteile von Korngemischen bis 4 mm

Aus einer Betonmische (Ausbreitmaß 38 cm ± 2 cm, w/z = 0,50, Einheitszement PZ 375, Luftgehalt gemäß Ö-NORM B 4200 Teil 10), für die ein Zuschlag der Kornzusammensetzung nahe der Sieblinie B verwendet wurde, werden 4 Stück Probepplatten mit den Mindestabmessungen 20 cm x 20 cm x 5 cm hergestellt und auf Frost-Tausalzbeständigkeit gemäß Ö-NORM B 3303 geprüft.

Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Abwitterung vom 25. bis zum 50. Frost höchstens 50 g/m² beträgt.

4.10.1 Korngruppen und Anteile von Korngemischen über 4 mm

Für die Kornklassen 4/8 und 8/16 sind je 2, für die Kornklassen 16/32 6 Stück Probepplatten mit den Mindestabmessungen 30 cm x 20 cm x 5 cm herzustellen. Teilproben der zu prüfenden Kornklasse werden in der Probekörperform so verteilt, dass der Boden mit einer ein-Korn-hohen Schicht bedeckt ist, und mit Beton gemäß Abschnitt 4.10.1, jedoch mit frostbeständigem Zuschlag, überdeckt. Nach dem Entformen werden die Probepplatten umgedreht, die Körner mit einer Drahtbürste freigelegt und gestrahlt und die Oberfläche auf Frost-Tausalzbeständigkeit gemäß Ö-NORM B 3303 geprüft.

Die Prüfung gilt als bestanden, wenn nach 50 Frost-Tau-Wechseln höchstens 2,5 % der Körner ganz oder teilweise zerfallen sind.

Anmerkung des Verfassers:

Gemäß Tabelle 6 (Güteüberwachung; Anforderungen, Prüfungen und deren Häufigkeit) war der Mürbkorngehalt im Rahmen der Güteüberwachung 1 x monatlich, mindestens jedoch alle 30.000 t durchzuführen.

Arbeitsanleitung

Bestimmung des Einzelkornfestigkeitsindex im Einzelkornversuch

Verfahren zur Qualitätskontrolle von groben Gesteinskörnungen

1. Zweck und Anwendungsbereich

Die einzelnen Körner einer groben Gesteinskörnung müssen so „fest bzw. frostbeständig“ sein, dass die im Technischen Regelwerk geforderte Qualitätseigenschaft erfüllt wird. Der Einzelkornversuch kann im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle dabei helfen, die Qualität von groben Gesteinskörnungen zu sichern und zu steuern. Hierfür gilt es den Einzelkornversuch am jeweiligen normierten Verfahren (v. a. Schlagversuch nach DIN EN 1097-6, Frost-Tau-Wechsel-Versuch nach DIN EN 1367-1 bzw. DIN EN 1367-6) zu kalibrieren und ein werkseigenes Anforderungskriterium mit dem dazugehörigen Bewertungsschlüssel zu schaffen.

Der Einzelkornversuch stellt eine Weiterentwicklung des subjektiven „Hammerschlag-Verfahrens“ zur Bestimmung des Mürbkornanteiles bei groben Gesteinskörnungen (4 bis 22,4 mm) nach der zurückgezogenen Ö-NORM B 3304 dar. Dieses Verfahren wurde sowohl im Hinblick auf die Durchführung, als auch auf die Auswertung weiterentwickelt und präzisiert. Die vorliegende Arbeitsanleitung beinhaltet die prinzipielle Versuchsdurchführung sowie verschiedene Beurteilungskriterien. Dabei werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie sich „qualitativ minderwertige“ Körner im Einzelkornversuch äußern können. Diese sind als Anregungen zu verstehen und es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit. Welches Kriterium letztlich zur Bewertung heranzuziehen ist, gilt es für jede Fragestellung eigens (durch vergleichende normierte Prüfungen) zu beurteilen. Der Massenanteil an „qualitativ minderwertigen“ Körnern wird als Einzelkornfestigkeitsindex (EKF-Index) bezeichnet.

2. Normative Verweisungen

DIN EN 932-1: „Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Probeverfahren“

DIN EN 932-2: „Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 2: Verfahren zur Einengung von Laboratoriumsproben“

DIN EN 932-5: „Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 5: Allgemeine Prüfeinrichtungen und Kalibrierung“

DIN EN 933-1: „Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren“

DIN EN 933-2: „Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 2: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Analysensiebe, Nennmaße der Sieböffnungen“

DIN EN 1097-2: „Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 2: Verfahren zur Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung“

DIN EN 1097-6: „Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme“

DIN EN 1367-1: „Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen – Widerstand von groben Gesteinskörnungen gegen Frost-Tau-Wechsel“

DIN EN 1367-6: „Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen – Widerstand von groben Gesteinskörnungen gegen Frost-Tausalz-Bearbeitung“

zurückgezogene Ö-NORM B 3304: „Betonzuschläge aus natürlichem Gestein – Begriffe, Anforderungen, Prüfungen, Lieferung und Güteüberwachung“

3. Begriffe

Für die Anwendung dieses Prüfverfahrens gelten die folgenden Definitionen:

Laboratoriumsprobe

Eingeengte Probe aus einer Sammelprobe, für die Untersuchung in einem Laboratorium bestimmt.

Teilprobe

Probe, die durch Probeneinengung erhalten wird.

Messprobe

Teilprobe, die als Ganzes in einer einzelnen Prüfung verwendet wird.

Massenkonstanz

Aufeinanderfolgende Wägungen nach dem Trocknen im zeitlichen Abstand von mindestens 1 h, die um nicht mehr als 0,1 % differieren.

4. Prinzip

An einer groben Gesteinskörnung wird mit einem Fallgewicht definierter Masse und Fallhöhe der Anteil an „qualitativ minderwertigen“ Körnern in Massenprozent bestimmt. Hierfür werden mindestens 200 Körner der zu untersuchenden Gesteinskörnung im Einzelkornprüfgerät einzeln zerschlagen.

5. Prüfeinrichtung

Wenn nicht anderweitig festgelegt, müssen die Prüfeinrichtungen den allgemeinen Anforderungen nach EN 932-5 entsprechen.

Analysesiebe nach DIN EN 933-2 mit den Nennöffnungsweiten: 22,4; 16,0; 11,2; 8,0; 5,6 bzw. 5,0; 4,0 mm.

Waage, mit der die zu wägende Masse auf 0,1 g genau bestimmt werden kann.

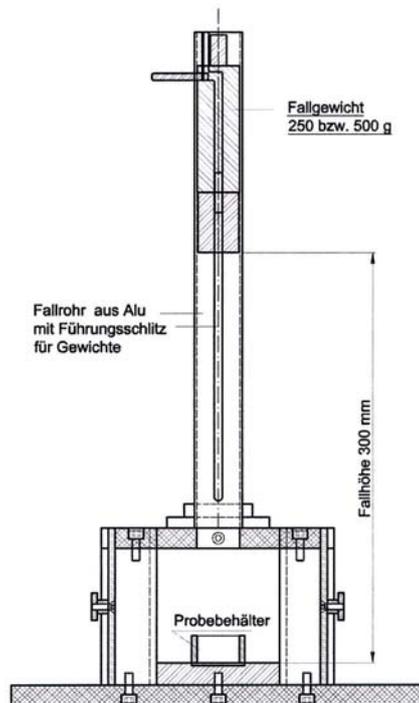
Wärmekammer mit Luftumwälzung zur Aufrechterhalten einer Temperatur von $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

Schalen

Tücher, aus Baumwolle, weich, saugfähig.

Einrichtung für die Einengung der Laboratoriumsprobe auf eine Messprobe nach DIN EN 932-2.

Einzelkornprüfgerät mit austauschbaren Fallgewichten ((500 ± 5) g bzw. (250 ± 2,5) g; Durchmesser (2,5 ± 0,1) cm), die aus einer Höhe von (30,0 ± 0,5) cm in den **Prüfgutzylinder/ Probebehälter** (Stahlzylinder mit dem Probenmaterial) fallen. Dabei sollte der Durchmesser des Prüfutzylinders nur wenig größer sein als der der Fallgewichte (vgl. nachfolgende Abbildungen, sowie Anhang B).



6. Vorbereitung der Probe

Die Proben sind nach DIN EN 932-1 zu entnehmen und nach DIN EN 932-2 zu einer Laboratoriumsprobe einzuengen.

Die Laboratoriumsprobe wird auf den Analysensieben 4,0; 5,0 bzw. 5,6; 8,0; 11,2; 16,0 und 22,4 mm abgesiebt, um die Prüfkornklasse 4/8; 5,0/8 bzw. 5,6/8; 8/11; 11/16; bzw. 16/22 mm zu erhalten. Die Prüfkornklasse ist gemäß DIN EN 933-1, Abschnitt 7.1 zu waschen und in der Wärmekammer bei (110 ± 5) °C bis zur Massenkonstanz zu trocknen. Die Prüfkornklasse ist anschließend auf Umgebungstemperatur abzukühlen.

Die Masse der Prüfkornklasse ist nach DIN EN 932-2 so einzuengen, dass eine Messprobe aus mindestens 200 Körnern entsteht. Die Masse der Messprobe M_0 (Einwaage) ist auf 0,1 g zu bestimmen.

Die Messprobe ist anschließend 24 h bei Raumtemperatur unter Leitungswasser zu lagern.

7. Versuchsdurchführung

Unmittelbar vor Versuchsbeginn ist die Messprobe mit einem Tuch abzutupfen. Anschließend wird jedes Korn der Messprobe im Einzelkornprüfgerät mit einem „herabfallenden“ Gewicht (Masse $(250 \pm 2,5)$ g bei den Prüfkornklasse 4/8, 5,0/8 und 5,6/8 mm; (500 ± 5) g bei den Prüfkornklassen 8/11,2, 11,2/16 und 16/22,4 mm) einzeln zerschlagen. Dabei wird das entsprechende Gewicht aus einer Fallhöhe von $(30,0 \pm 0,5)$ cm einmal auf jedes Korn fallengelassen und jedes Korn über das Bruchbild und/oder den Klang beurteilt.

Bei der Prüfung kann zwischen den folgenden Bruchbildern unterschieden werden:

- 1: Korn bleibt weitgehend unverändert (kein Bruch)
- 2: Korn bleibt weitgehend erhalten; kleine oberflächliche Absplitterungen
- 3a: Korn zerspringt in wenige gleich große Stücke; scharfkantige Bruchflächen; geringer Feinanteil
- 3b: Korn zerspringt in wenige gleich große Stücke; deutlicher Feinanteil
- 4a: Korn zerspringt in viele gleich große Bruchstücke; geringer Feinanteil
- 4b: Korn zerspringt in viele gleich große Bruchstücke; deutlicher Feinanteil
- 5a: Korn zerspringt unregelmäßig (Gemisch aus großen und kleinen Bruchstücken); geringer Feinanteil
- 5b: Korn zerspringt unregelmäßig (Gemisch aus großen und kleinen Bruchstücken); deutlicher Feinanteil
- 6: Korn zerfällt zu Mehl/sehr feiner Gesteinskörnung

Daneben ist der Klang beim „Hammerschlag“ zu berücksichtigen, welcher wichtige Hinweise auf die Qualität von Gesteinskörnern liefern kann. „Helle“ Klänge deuten in der Regel auf intakte Körner, „dumpfe“ Schläge auf „problematische“ Körner hin.

Um den Anteil an „qualitativ minderwertigen“ Körnern im Sinne dieser Arbeitsanleitung zu ermitteln ist lediglich zwischen „problematischen“ und „guten“ Körnern zu unterscheiden. Dabei gelten Körner in der Regel als problematisch, wenn sie die Bruchbilder 4b oder 6 aufweisen und/oder „dumpf“ klingen. Körner mit allen anderen Bruchbildern werden als „gute Körner im weiteren Sinne“ eingruppiert. Um „gute Körner im engeren Sinne“ handelt es sich bei Körnern mit den Bruchbildern 1, 2 oder 3a.

Demnach werden „problematische“ und „gute“ Körner – in Abhängigkeit vom Bruchverhalten und vom Klang beim Einzelkornversuch – voneinander getrennt. Anschließend sind die „problematischen“ und die „guten“ Körner in der Wärmekammer bei (110 ± 5) °C bis zur Massenkonstanz zu trocknen und auf Umgebungstemperatur abzukühlen. Danach erfolgt die getrennte Wägung beider Teilmassen (Masse der „problematischen“ Körner: M_m ; Masse der „guten“ Körner: M_g) auf 0,1 g. Weicht die Summe beider Teilmassen ($M_m + M_g$) um mehr als 1,0 M.-% von der Einwaage (M_0) ab, so ist die Prüfung zu wiederholen.

8. Auswertung

Der Massenanteil an „qualitativ minderwertigen“ Körnern (Einzelkornfestigkeitsindex: EKF-Index) berechnet sich nach der folgenden Gleichung:

$$\text{EKF-Index} = 100 \cdot M_m / (M_m + M_g)$$

Dabei ist:

EKF-Index = Anteil an „qualitativ minderwertigen“ Körnern, in Massenprozent [M.-%]

M_m = Masse der „problematischen“ Körner, in Gramm [g]

M_g = Masse der „guten“ Körner, in Gramm [g]

Der Anteil an „qualitativ minderwertigen“ Körnern (EKF-Index) ist in Massenprozent [M.-%] auf die nächste ganze Zahl gerundet anzugeben.

9. Prüfbericht

Der Prüfbericht muss bestätigen, dass der EKF-Index in Übereinstimmung mit dieser Arbeitsanleitung durchgeführt wurde. Daneben muss er die folgenden Angaben enthalten:

- a) Name des Laboratoriums;
- b) Bezeichnung und Herkunft der Probe;
- c) Gesteinskörnung aus der die Messprobe gewonnen wurde;
- d) Geprüfte Kornklasse(n) und der/die dazugehörigen ganzzahligen EKF-Indizes in Massenprozent [M.-%]

Anhang A

Einzelkornversuch als Hilfsmittel zur Qualitätssicherung bzw. -steuerung im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle (WPK)

Der Einzelkornversuch ist in vielen Fällen als Hilfsmittel zur Qualitätssicherung bzw. -steuerung im Rahmen der Werkseigenen Produktionskontrolle geeignet. Hierfür muss im Vorfeld der Einzelkornversuch an der jeweils qualitätssteuernden normierten Prüfung (v. a. Schlagversuch nach DIN EN 1097-6, Frost-Tau-Wechsel-Versuch nach DIN EN 1367-1 bzw. DIN EN 1367-6) kalibriert werden. Dabei gilt es herauszufinden, welche Gesteinskörner die Qualität mindern und wie sich diese im Einzelkornversuch äußern. Gibt es beim Einzelkornversuch einen geeigneten Bewertungsparameter, so gilt es hierfür einen werkseigenen Anforderungsschlüssel festzulegen.

Präzisierungen:

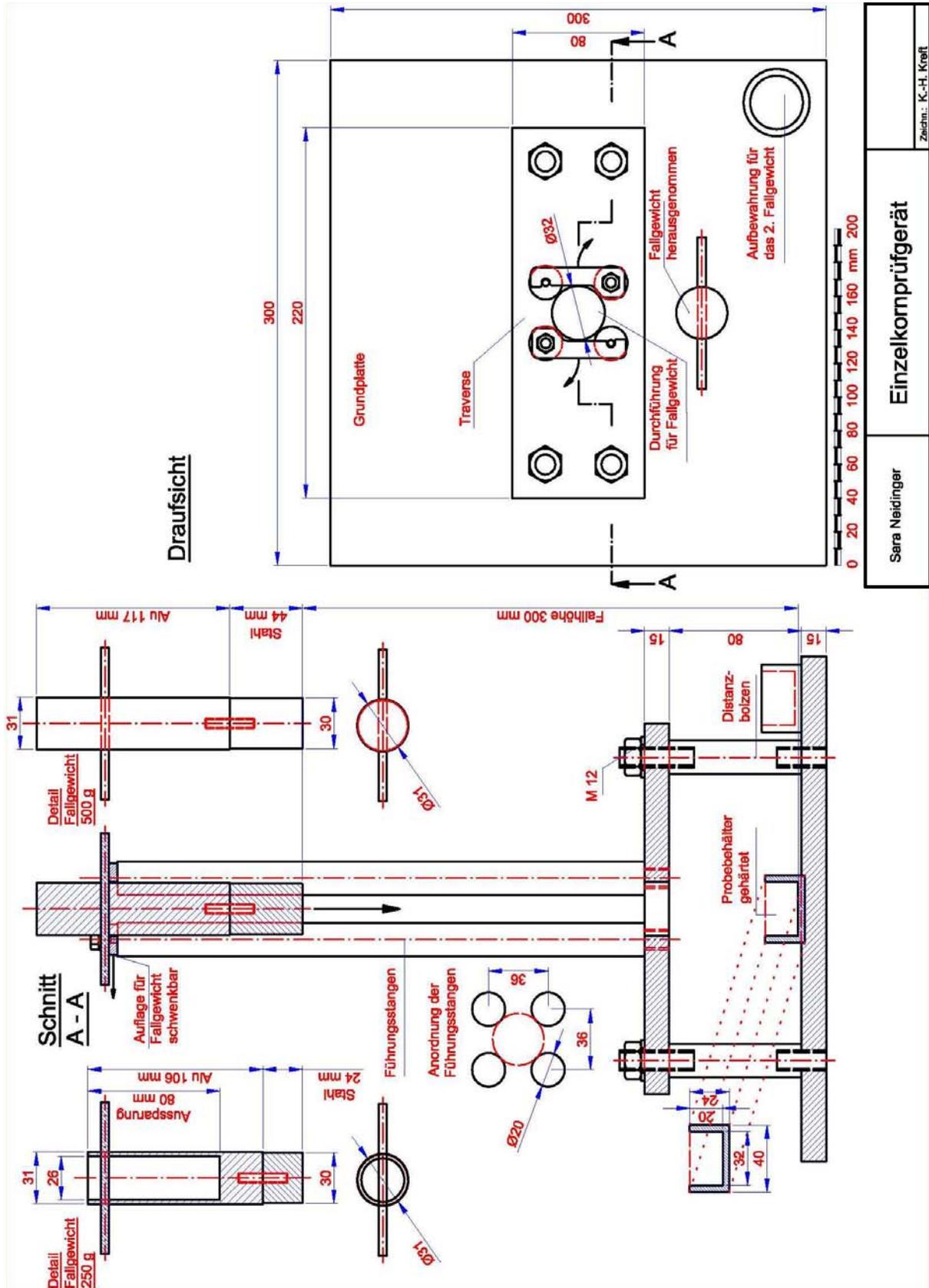
Zu 6: Vorbereitung der Probe

Sofern sich dies bei der Kalibrierung am normierten Verfahren als möglich herausgestellt hat, kann der Einzelkornversuch im Rahmen der WPK alternativ auch an ungewaschenen, trockenen Proben durchgeführt werden. Da in diesem Fall die zeitaufwändigen Wassersättigungs- und Trocknungsvorgänge entfallen, verringert sich die Versuchsdauer beträchtlich, so dass das Ergebnis schnell vorliegt, was eine zeitnahe Reaktion durch den Produzenten ermöglicht. Um die Ergebnisse der WPK miteinander vergleichen zu können, müssen aber stets die gleichen Rahmenbedingungen eingehalten werden.

Zu 7: Versuchsdurchführung

Es gilt beim Einzelkornversuch ein Beurteilungskriterium zu finden, welches mit der qualitätssteuernden Eigenschaft des Materials korreliert. Dabei kann es sich beispielsweise um ein bestimmtes Bruchverhalten oder um einen charakteristischen Klang handeln (vgl. Kapitel 7). Daneben besteht die Möglichkeit nicht jedes Korn einzeln hinsichtlich seiner Qualität zu beurteilen und einer Klasse zuzuordnen, sondern die gesamte beanspruchte und wieder vereinigte Probe zu charakterisieren. Im Hinblick auf die Korngrößenverteilung und damit den Zertrümmerungsgrad könnte hierfür eine Körnungsziffer wie beim Schlagversuch oder ein definierter Siebdurchgang wie beim Los Angeles-Verfahren ein aussagekräftiges Maß sein.

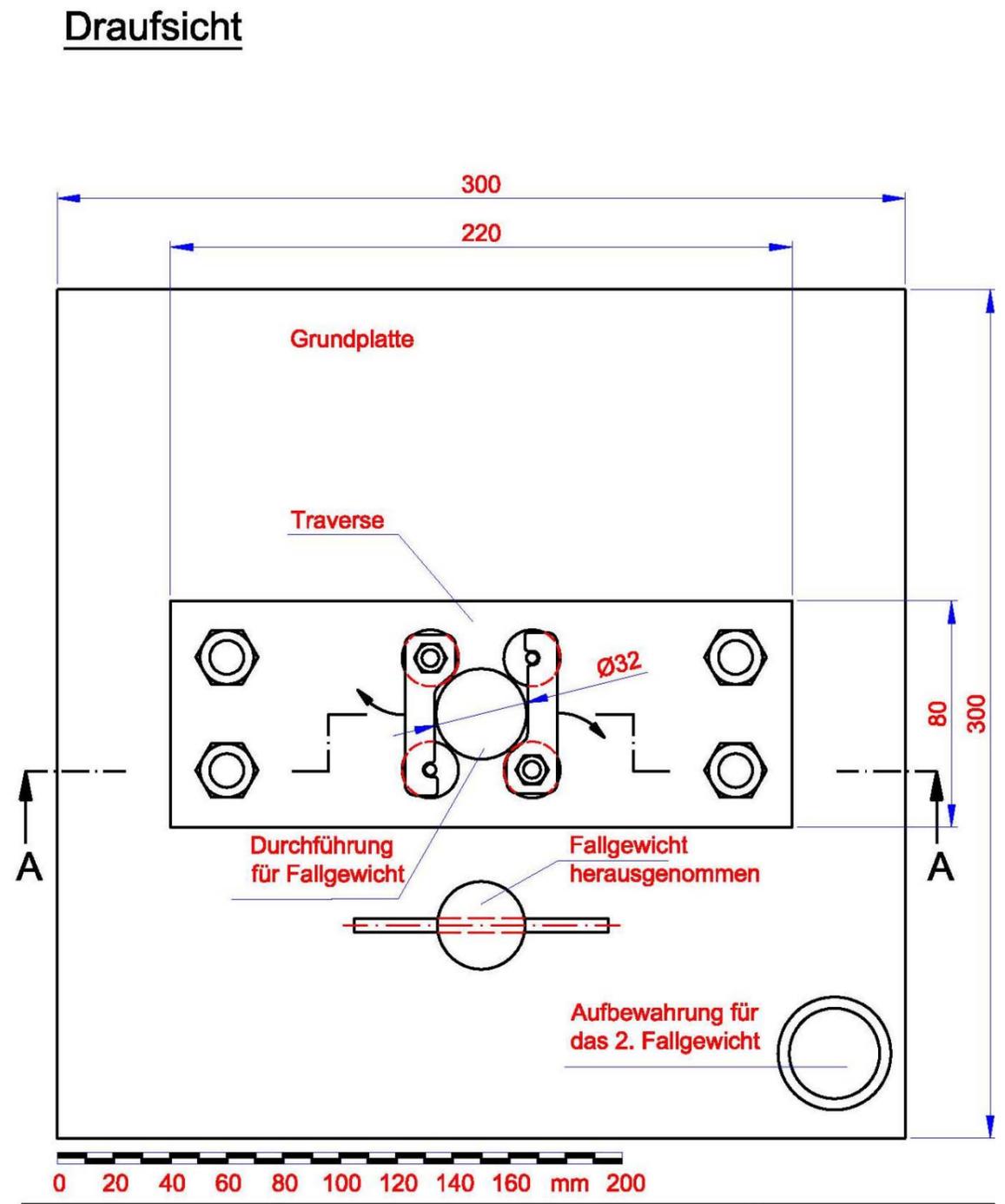
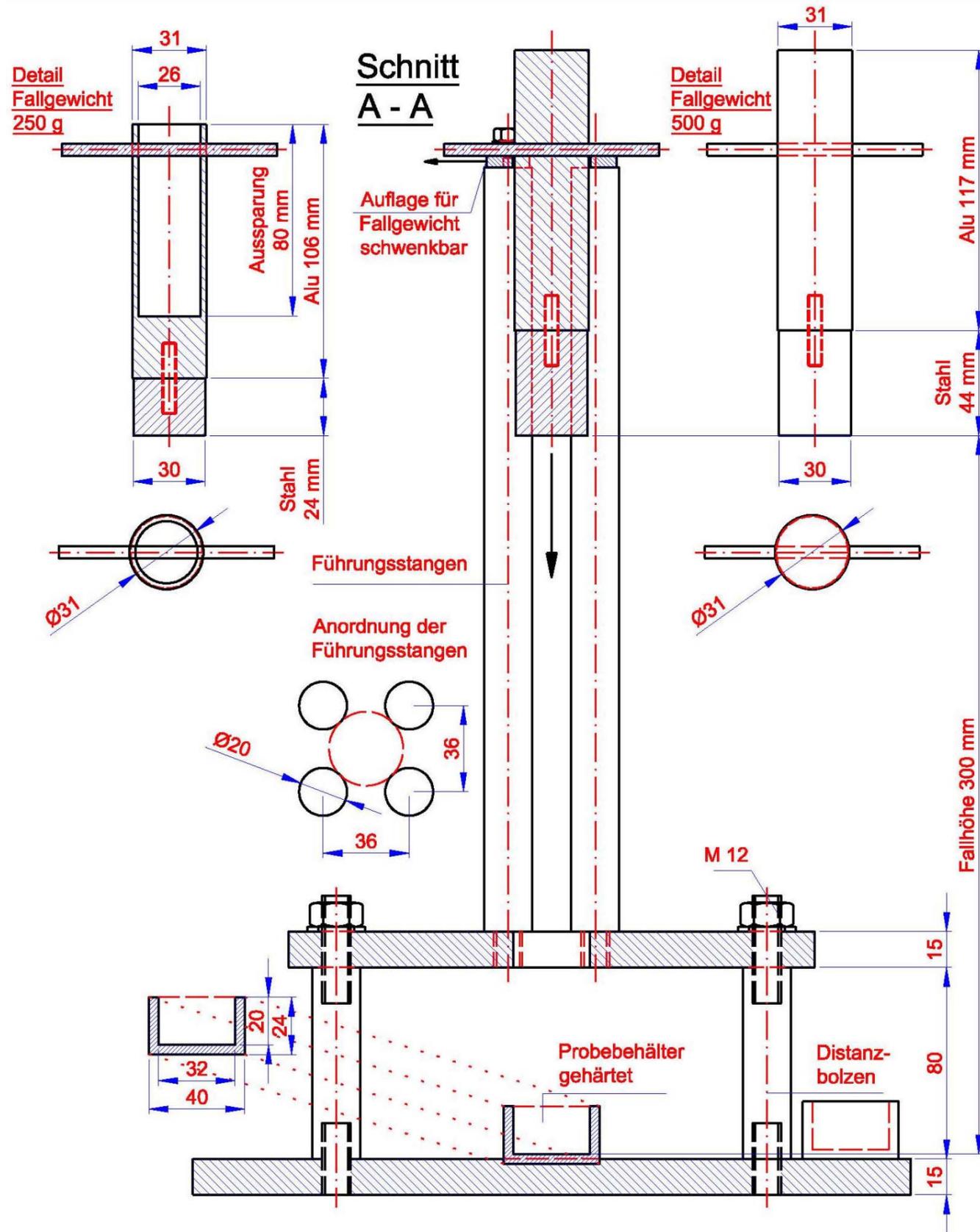
Anhang B



Sara Neidinger

Einzelkomprüfgerät

Zeichn.: K.-H. Kreft



Sara Neidinger	Einzelkornprüfgerät	Anhang V zur Dissertation Zeichn.: K.-H. Kreft
----------------	----------------------------	------------------------------------------------------