

# Die neue Empfehlung Nr. 27 „Bestimmung der Zerfallsneigung von Gesteinen im kombinierten Befeuchtungs-Trocknungs-Verfahren mit Kristallisationsversuch“ des AK 3.3 „Versuchstechnik Fels“ – Zielsetzung, Einordnung, Anwendung

Dr. M. Nickmann, Technische Universität, München  
Dipl.-Ing. T. Baumgärtel, Ingérop Deutschland GmbH, München  
Dr. R.J. Plinninger, Dr. Plinninger Geotechnik, Bernried

*In der geotechnik 02/2025 hat der Arbeitskreis 3.3 „Versuchstechnik Fels“ der DGGT die Empfehlung Nr. 27 mit dem Titel „Bestimmung der Zerfallsneigung von Gesteinen im kombinierten Befeuchtungs-Trocknungs-Verfahren mit Kristallisationsversuch“ veröffentlicht (Nickmann, et al. 2025). Zielsetzung des Verfahrens ist die Klassifizierung von Festgesteinen (Fels) hinsichtlich deren Eigenschaft, auf Änderungen des Wassergehalts und/oder der Temperatur mit Festigkeitsreduzierung bis hin zum Zerfall zu reagieren. Diese Kenntnis ist für zahlreiche bautechnische Fragestellungen relevant. Das in der E27 beschriebene Verfahren ergänzt und erweitert die Versuchsverfahren der 24-stündigen Wasserlagerung nach DIN EN ISO 14689 und des Siebtrommelversuchs nach DGGT-Empfehlung Nr. 20 (Herzel 2002). Im vorliegenden Beitrag soll die Untersuchungsprozedur vorgestellt und auf Unterschiede und Vorteile gegenüber den eingeführten Verfahren eingegangen werden.*

## 1 Einleitung

In der geotechnik 02/2025 hat der Arbeitskreis 3.3 „Versuchstechnik Fels“ der DGGT e.V. seine Empfehlung Nr. 27 mit dem Titel „Bestimmung der Zerfallsneigung von Gesteinen im kombinierten Befeuchtungs-Trocknungs-Verfahren mit Kristallisationsversuch“ veröffentlicht (Nickmann et al. 2025). In der Empfehlung wird ein Klassifizierungsversuch für veränderlich feste Gesteine aufgegriffen, der Ende der 2000er-Jahre an der TU München entwickelt wurde (Nickmann 2009) und seither weite Anwendung in der Baupraxis gefunden hat.

Die Empfehlung wurde in Zusammenarbeit mit dem Arbeitskreis 5.1.5 der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. bearbeitet, der dieses Verfahren bereits 2021 in seinem „Merkblatt über veränderlich feste Gesteine als Erdbaustoff“ verankert hat (FGSV 2021).

## 2 Auswirkung der Zerfallsneigung von Gesteinen im Bauen

Festgesteine, die Zerfallsneigung zeigen, werden in der Ingenieurgeologie und Geotechnik als veränderlich feste Gesteine bezeichnet. Werden diese Ge-

steine freigelegt, führen Änderungen des Spannungszustands, des Wassergehalts oder Kristallisationsdrücke zu einer deutlichen Reaktion, die von einer Festigkeitsreduzierung und langsamem Zerfall in Jahren bis Jahrzehnten bis hin zur unmittelbaren Desintegration reichen kann (Abb. 2-1). Entscheidend ist, dass diese Veränderungen innerhalb einer Zeitspanne stattfinden, die im Bauen relevant ist.



Abbildung 2-1: Tonmergelstein als Beispiel eines veränderlich festen Gesteins mit hoher Zerfallsneigung (Foto: Nickmann 2000).

Die Zerfallsneigung von Gesteinen hat sich in jüngerer Zeit bei zahlreichen Bauprojekten als wichtiger Parameter erwiesen. Ist ein Gestein nicht beständig,



muss dies bei vielen geotechnischen und bautechnischen Fragestellungen berücksichtigt werden, z.B. beim Lösen, Laden und Fördern, beim Einbauen und Verdichten, bei der Beurteilung der kurzfristigen und langfristigen Standsicherheit oder bei der Verwendbarkeit als Baustoff. Wird die Veränderlichkeit eines Gesteins nicht beachtet oder falsch (zu positiv oder zu negativ) eingeschätzt, führt dies zu vielfältigen Problemen: Durch die falsche Wahl der Lösemethode oder der Lösewerkzeuge kommt es zu einer verminderten Leistungsfähigkeit im Baubetrieb, die zeitliche Verzögerungen und Kostensteigerungen/Nachforderungen mit sich bringt. Ein teilweise mit veränderlich festen Gesteinen verbundenes Verklebungspotential kann diese Probleme verstärken. Andererseits kann eine zu pessimistische Einschätzung zu unnötigem Aufwand führen. Eine deutliche Zerfallsneigung führt außerdem zu Einschränkungen bei der Verwendbarkeit oder Deponierbarkeit des gelösten Materials und letztendlich zu einer eingeschränkten Qualität des Bauwerks.

Bei Bauprojekten ist der Zerfall von gelöstem oder freigelegtem Gestein i.d.R. unerwünscht, in der Rohstoffindustrie wird er z.B. genutzt, um eine Gesteinskörnung zu „säubern“, indem diese über den Winter gelagert wird, um Mürbkorn zu zerstören. Auch die Ziegelindustrie nutzt den Zerfall, um Tonsteine natürlich zu zerkleinern, ehe sie der Aufbereitung zugeführt werden. Auch hier ist die richtige Prognose der Zerfallsneigung ein entscheidender Faktor.

Außerdem sind veränderlich feste Gesteine oft wenig fest und ihre felsmechanischen Kennwerte zeigen eine starke Abhängigkeit vom Wassergehalt, so dass bei Probenahme, Transport, Herstellung der Probekörper und Prüfung derartiger Gesteine besondere Maßnahmen getroffen werden müssen, um realistische Kennwerte zu ermitteln (Plinninger et al. 2011).

### 3 Zielsetzung der Empfehlung E27

In der Baupraxis zeigt sich immer wieder, dass bereits das Erkennen einer Zerfallsneigung veränderlich fester Gesteine oft ein Problem darstellt, da diesem Parameter nur eine untergeordnete Bedeutung beigemessen wird. Eine Klassifikation der Zerfallsneigung wird häufig nicht vorgenommen, obwohl sehr unterschiedliche Gesteine mit variierenden Zerfallsverläufen und -intensitäten in diese Gesteinsgruppe fallen. Grund dafür ist das weitgehende Fehlen geeigneter und genormter Versuchsverfahren.

#### 3.1 Stand der Normung

Für die Untersuchung der Veränderlichkeit von Festgesteinen existieren bisher in der heutigen Normenlandschaft nur wenige Verfahren, die in den nachfolgenden Absätzen 3.1.1 und 3.1.2 umrissen werden sollen.

#### 3.1.1 Wasserlagerungsversuch

Der einzige DIN-genormte Versuch ist die Ermittlung der Veränderlichkeit in Luft oder unter Wasserbedeckung, der in der DIN EN ISO 14689 (2018) in Kap. 5.5 und 5.6 enthalten ist. Während die Untersuchung an Luft ein einmaliges Austrocknen eines Gesteins umfasst, wird ein Probekörper beim sog. „Wasserlagerungsversuch“ für 24 h in Wasser gelegt und seine Reaktion beobachtet. Die Versuchspraxis zeigt jedoch, dass viele Ton-Schluff-Steine erst nach einer vorhergehenden (Teil-)trocknung zerfallen und daher im DIN-Verfahren nicht als veränderlich (fest) erkannt werden. Damit ist der Versuch ausschließlich dafür geeignet, die Sofortreaktion eines Gesteins bei Wasserkontakt zu ermitteln.

#### 3.1.2 Siebtrommelversuch

Ein weiteres Verfahren zur Ermittlung der Zerfallsbeständigkeit bietet der Siebtrommelversuch, der in der E20 des AK 3.3 der DGGT (Herzel 2002) beschrieben ist. Hierbei erfährt das Gestein durch die Rotation in einer Trommel eine mechanische Beanspruchung, kombiniert mit einer Beanspruchung durch Trocknung und Befeuchtung sowie Temperatureinwirkung (mehrere Zyklen mit Trocknung bei 105 °C). Damit simuliert der Versuch eine sehr spezielle Beanspruchung, die in der Praxis am ehesten im Zusammenhang mit maschineller Gesteinsbearbeitung (z.B. TVM-Vortrieb) auftritt. Zudem hat das Verfahren den Nachteil einer vorhergehenden Probentrocknung, durch die die Sofortreaktion des frischen Gesteins nicht erfasst werden kann.

### 3.2 Normungslücke und Ziele der E27

Die genannten Verfahren zeigen, dass eine Lücke in der Untersuchung veränderlich fester Gesteine besteht, wenn das Verhalten eines Gesteins bei **einfacher Freilegung**, z.B. in einer Böschung oder auf einer Halde ermittelt werden soll. Die hier wirkenden Beanspruchungen entstehen durch Wasserzufuhr beim Lösen, Wechsel von Austrocknung an der Luft und Wiederbefeuchtung durch Regen sowie beim Gefrieren durch Frostsprengung. Für die meisten Fragestellungen ist zudem das Verhalten des **frischen, bergfeuchten Gesteins** entscheidend. Neben der **Sofortreaktion** sind meistens auch die **mittelfristige und die langfristige Zerfallsneigung** relevant.

Diese Lücke soll das im Folgenden vorgestellte, neue Verfahren schließen. Ziel ist eine Klassifizierung von Festgesteinen (Fels) hinsichtlich deren Eigenschaft, auf Änderungen des Wassergehalts und/oder der Temperatur mit Festigkeitsreduzierung bis hin zum Zerfall zu reagieren. Damit soll die Prognose von Intensität und Geschwindigkeit des Zerfalls ermöglicht werden.



## 4 Durchführung des kombinierten Befeuchtungs-Trocknungs-Verfahrens mit Kristallisationsversuch (BTV-K)

### 4.1 Prinzip

Beim kombinierten Befeuchtungs-Trocknungs-Verfahren mit Kristallisationsversuch (BTV-K) handelt es sich um ein mehrstufiges Verfahren (Abb. 4-1). Zunächst wird das Gestein einem Befeuchtungs-Trocknungs-Verfahren unterzogen, das aus drei Zyklen

besteht. Reagiert das Gestein hierbei mit Zerfall oder Aufweichen, ist der Versuch beendet und das Gestein ist als veränderlich fest einzustufen. Zeigt sich keine Reaktion, wird nachfolgend ein Kristallisationsversuch mit Glaubersalzlösung durchgeführt, der über zehn Zyklen läuft. Zerfällt das Gestein hierbei, wird es ebenfalls zu den veränderlich festen Gesteinen gestellt. Übersteht es auch diese deutlich stärkere Beanspruchung, ist es als dauerhaft fest zu bezeichnen. So können insgesamt sechs Veränderlichkeitsklassen (VK0 bis VK5) unterschieden werden.

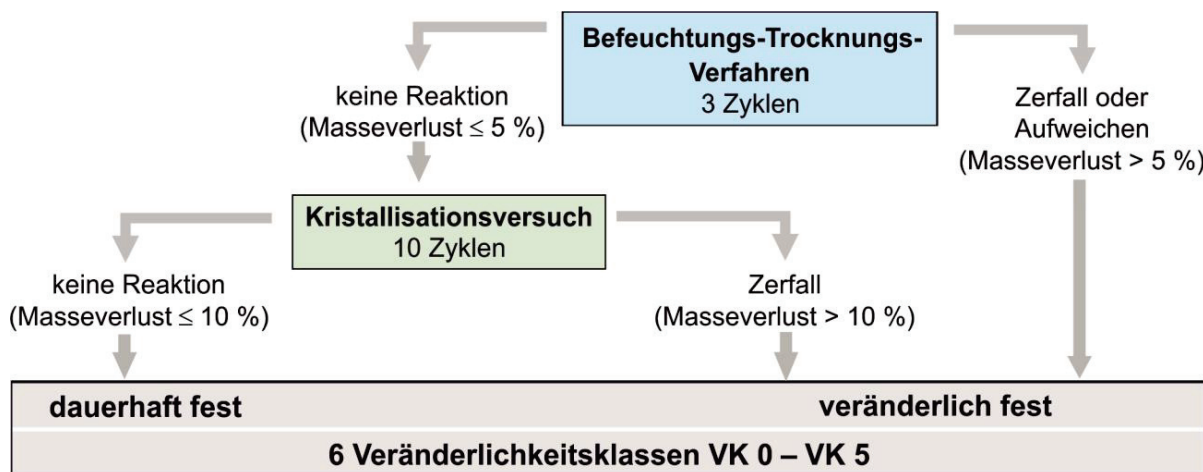


Abbildung 4-1: Ablauf des kombinierten Befeuchtungs-Trocknungs-Verfahrens mit Kristallisationsversuch (nach Nickmann et al. 2025).

### 4.2 Probenart und -vorbereitung

Der Versuch wird an Handstücken mit einer Masse von ca. 800 g durchgeführt, die möglichst gedungen sein sollten und schonend z.B. aus Bohrkernen oder Haufwerksproben gewonnen werden können.

Da der Versuch das Zerfallsverhalten des frischen, anstehenden Gesteins erfassen soll, ist es wichtig, den natürlichen Wassergehalt zu erhalten. Eine Wassergehaltsänderung kann zu einem stark abweichenden Versuchsergebnis führen. Daher ist ein Austrocknen und/oder Befeuchten bei Probengewinnung, Transport und Formatierung zu verhindern, z.B. durch ein passendes Bohrverfahren, eine luftdichte Verpackung oder Versiegelung der Proben (Plinninger et al. 2011).

### 4.3 Durchführung

#### 1. Schritt: Befeuchtungsversuch

Der erste Schritt des Verfahrens ist ein Befeuchtungsversuch, bei dem der Probekörper in einer Schale mit Deionat bedeckt wird. Hierbei wird zunächst die Sofortreaktion beobachtet und beschrieben, nach einer Befeuchtungsdauer von 24 h werden die Zerfallsprodukte des Probekörpers beschrieben.

Bis hierher entspricht das Verfahren weitgehend der Wasserlagerung nach DIN EN ISO 14689 (2018).

Ergänzend wird anschließend mittels schonender Nasssiebung in Anlehnung an DIN EN ISO 17892-4 (2017) die Korngrößenverteilung der entstandenen Zerfallsaggregate bestimmt. Nach der Trocknung der Siebrückstände im Trockenschrank bei  $60 \pm 5^\circ\text{C}$  werden sowohl die einzelnen Fraktionen als auch das größte verbleibende Stück  $m_{BT1}$  gewogen. Danach werden alle Siebfraktionen eines Probekörpers wieder zu einer Gesamtprobe vereinigt.

#### 2. Schritt: Befeuchtungs-Trocknungs-Wechsel

Dieses Vorgehen aus Befeuchtung und Trocknung wird noch zweimal wiederholt, so dass insgesamt drei Befeuchtungs-Trocknungs-Zyklen durchgeführt werden. Hierbei werden wiederum die Masse des größten verbleibenden Stückes (Messwerte  $m_{BT2}$ ,  $m_{BT3}$ ) sowie die Siebrückstände dokumentiert (Abb. 4-2). Da jeweils die gesamte Probe weiterverwendet wird, zeigen die Zerfallsprodukte jedes Zyklus bzw. deren Summenkurven die zunehmende Zerkleinerung der Ausgangsprobe. Der jeweils entstandene Feinkornanteil kann z.B. Hinweise auf ein mögliches Verklebungspotential liefern.



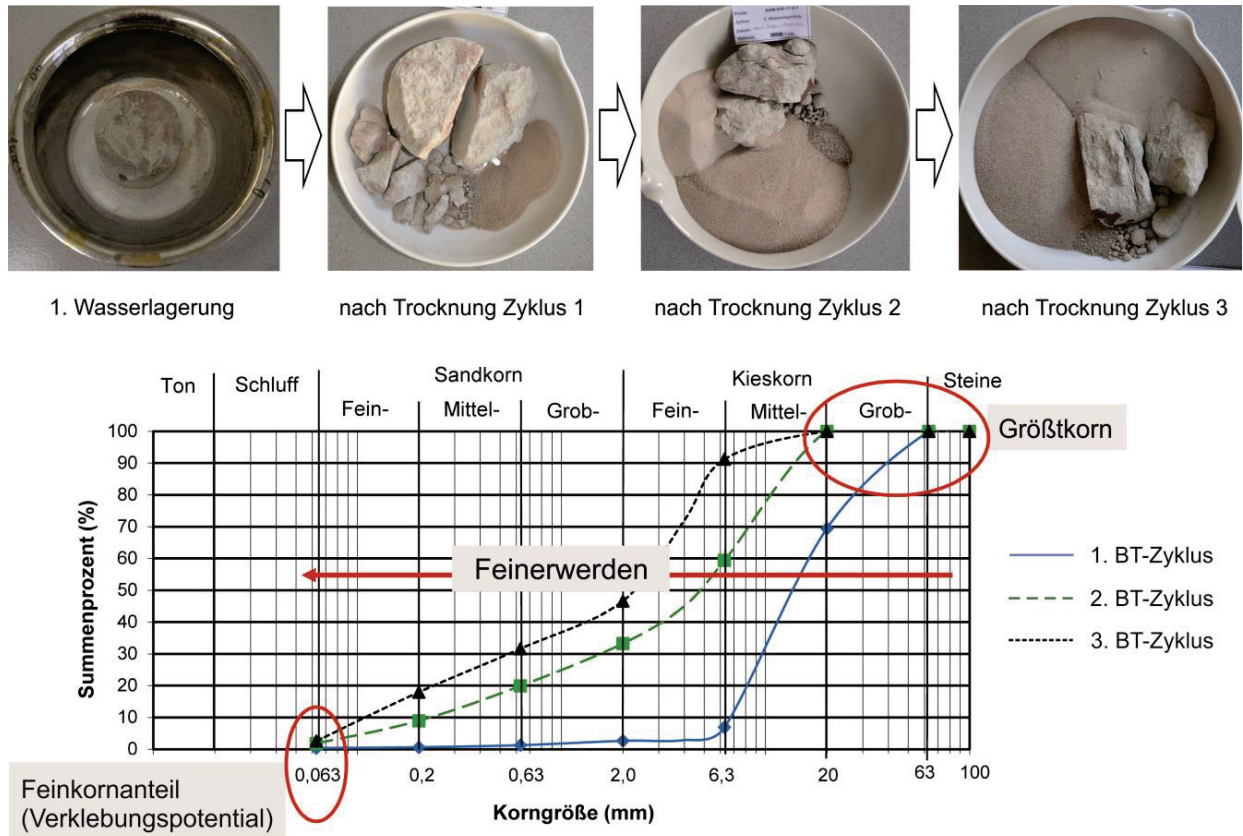


Abbildung 4-2: Dokumentation des Befeuchtungs-Trocknungs-Verfahrens und graphische Darstellung der Zyklen.

### 3. Schritt: Kristallisationsversuch

Zeigt der Probekörper nach drei Befeuchtungs-Trocknungs-Zyklen keine nennenswerte Veränderung (d. h. Masseverlust  $\leq 5\%$ ) wird er nachfolgend einem Kristallisationsversuch in Anlehnung an DIN EN 12370 (2020) unterzogen. Hierbei wird die Probe für 16 Stunden in eine gesättigte Glaubersalzlösung

( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \times 10 \text{ H}_2\text{O}$ ) getaucht, so dass ihre Poren mit der Lösung gefüllt werden. Danach wird sie im Trockenschrank bei  $105 \pm 5^\circ\text{C}$  für eine Dauer von 6 h getrocknet, wobei das Glaubersalz zu wasserfreiem Natriumsulfat umgewandelt wird. Während der anschließenden Abkühlzeit von 2 h nimmt das Salz Wasser aus der Luft auf, was mit einer Volumenvergrößerung bis zu 25 % einhergeht. Dadurch wird ein großer Kristallisationsdruck auf das Korngerüst ausgeübt.

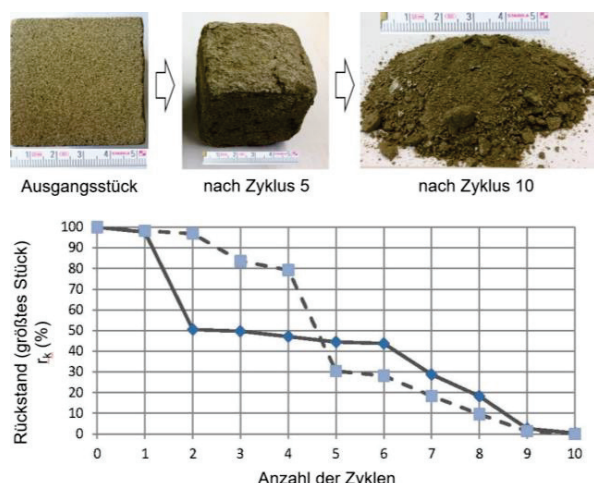


Abbildung 4-3: Beispiel für den Zerfall eines Sandsteins im Kristallisationsversuch. Die Fotos zeigen Zyklus 5 und 10. Das Diagramm zeigt den Zerfall in den jeweiligen Zyklen.

Insgesamt sind zehn Versuchszyklen durchzuführen, wobei immer das größte verbleibende Stück weiterverwendet wird. Dessen Masse wird über die Anzahl der Zyklen aufgetragen und zeigt das Zerfallsverhalten des Probekörpers an (Abb. 4-3).

### 4.4 Auswertung und Klassifizierung

Die Auswertung des gesamten Verfahrens führt die Ergebnisse der drei Teilschritte zusammen.

Für jeden Befeuchtungs-Trocknungs-Zyklus  $n$  ( $n = 1 \dots 3$ ) wird der Massenanteil  $R_{BTn}$  (%) des größten verbleibenden Stücks gemäß Gl. 1 aus der Trockenmasse  $m_{BTn}$  (g) und der Ausgangstrockenmasse  $m_{d0}$  (g) des Probekörpers bestimmt:

$$R_{BTn} = \frac{m_{BTn}}{m_{d0}} \cdot 100 \quad (1)$$



Der nach Durchführung des Kristallisationsversuchs verbleibende Massenanteil  $R_{K10}$  (%) wird gemäß Gl. 2 aus der Trockenmasse  $m_{KW}$  (g) des Probekörpers nach Abschluss des Kristallisationsversuchs und der Trockenmasse  $m_{BT3}$  (g) des Probekörpers vor Beginn des Kristallisationsversuchs bestimmt:

$$R_{K10} = \frac{m_{KW}}{m_{BT3}} \cdot 100 \quad (2)$$

Aus den Versuchsergebnissen wird der Veränderlichkeitsindex  $I_V$  (%) gemäß Gl. 3 berechnet:

$$I_V = R_{BT1} + R_{BT3} + R_{K10} \quad (3)$$

Die Klassifizierung der Zerfallsneigung erfolgt anhand des Veränderlichkeitsindex  $I_V$ . Nach Nickmann et al. (2025) werden sechs Veränderlichkeitsklassen VK 0 bis VK 5 definiert (Tabelle 4-1). VK 1 bis VK 5 bezeichnen veränderlich feste Gesteine unterschiedlicher Zerfallsneigung. Gesteine, bei denen der Probekörper während des gesamten Verfahrens keinen nennenswerten Masseverlust ( $I_V \geq 285$  %) zeigt, sind als dauerhaft fest zu klassifizieren (VK 0).

*Tabelle 4-1: Klassifizierung der Zerfallsneigung VK mit Hilfe des Veränderlichkeitsindex  $I_V$  (nach Nickmann et al. 2025).*

VK	Veränderlichkeitsindex $I_V$ (%)	Zerfallsneigung
VK 0	285 – 300	nicht veränderlich (dauerhaft fest)
VK 1	190 - < 285	gering veränderlich
VK 2	145 - < 190	langsam veränderlich
VK 3	90 - < 145	mäßig schnell veränderlich
VK 4	25 – < 90	schnell und stark veränderlich
VK 5	< 25	unmittelbar und sehr stark veränderlich

## 5 Vergleich und Einordnung

Gegenüber dem einmaligen **Wasserlagerungsversuch** nach DIN EN ISO 14689 erlaubt das Verfahren somit neben der Ermittlung der Sofortreaktion auch eine Beurteilung von Gesteinen, die erst nach vorhergehender Trocknung zerfallen oder die eine mittel- bis langfristige Zerfallsneigung aufweisen.

Vergleicht man das neue Verfahren der E27 mit dem **Siebtrommelversuch**, so arbeiten beide Versuche in mehreren Zyklen und enthalten eine Klassifikation in sechs Klassen. Daher wurde in mehreren Studien (Kroll 2021, Götz 2021, Noflatscher 2021) untersucht, ob beide Versuche für ein Gestein zum gleichen Ergebnis führen, also ein Zusammenhang zwi-

schen dem Veränderlichkeitsindex  $I_V$  und dem Zerfallsbeständigkeitsindex  $I_{d2}$  aus dem Siebtrommelversuch besteht. Die Ergebnisse stellt das Diagramm in Abb. 5-1 zusammen.

Nur die beständigen Gesteine und die extrem veränderlichen Gesteine reagieren in beiden Versuchen ähnlich und führen zu einer vergleichbaren Klassifizierung. Alle anderen Gesteine liegen nicht auf der Ausgleichsgeraden. Dies liegt an mehreren Gründen, die für die verschiedenen Gesteinsarten identifiziert wurden:

- Viele **Sandsteine** zeigen im Siebtrommelversuch nur eine sehr geringe Reaktion, während sie im BTV-K als eindeutig veränderlich fest klassifiziert werden. Erst die hohen Sprengdrücke der Salzkristallisation brechen die Kornbindungen auf und zeigen die Veränderlichkeit dieser Gesteine. Eine Empfindlichkeit gegenüber extremen Witterungsbedingungen kann also nur im BTV-K erfasst werden, während der Siebtrommelversuch hier eine zu optimistische Einschätzung abgeben würde.
- Auch **Mergelsteine** zeigen im Siebtrommelversuch eine deutlich größere Beständigkeit als im BTV-K. Diese Gesteine zerbrechen zwar in der Siebtrommel, die Bruchstücke sind jedoch zu groß, um durch die Maschen des Siebgewebes zu fallen. Damit erhöhen sie den Zerfallsbeständigkeitsindex fälschlicherweise. Im BTV-K geht nur das größte Stück in den Index ein und liefert eine realistische Einstufung.
- Bei **Tonmergelsteinen** ist dieser Effekt im Siebtrommelversuch zwar ebenfalls vorhanden, allerdings werden diese Gesteine oft schon bei der Trocknung vor dem Versuch geschwächt (Rissbildung). Inwieweit sich beide Fehler ausgleichen, ist nicht zu sagen. Im BTV-K dagegen zeigt besonders diese Gesteinsgruppe im frischen Zustand kaum eine Reaktion, sondern zerfällt erst nach der Trocknung, was dem Verhalten in der Praxis entspricht.
- Dagegen zeigen **sehr schwach gebundene Sandsteine und stark verwitterte Granite** v.a. im Siebtrommelversuch eine starke Reaktion. Im BTV-K dagegen sind sie in VK 1 zu klassifizieren, obwohl die Proben bereits mit der Hand zerbrochen oder zerdrückt werden können. Dies ist auf den hohen Porenanteil mit großen Poren zurückzuführen, durch den Wasserdrücke keine Reaktion verursachen. Erst die Salzkristallisation füllt die Poren sukzessive und führt zur Sprengung. Der BTV-K stuft diese Gesteine als zu beständig ein.

Fazit der Vergleichsuntersuchungen ist also, dass sich bei den meisten untersuchten Gesteinen kein direkter Zusammenhang zwischen beiden Verfahren nachweisen lässt. Beide Indices können also nicht einfach ineinander umgerechnet werden.

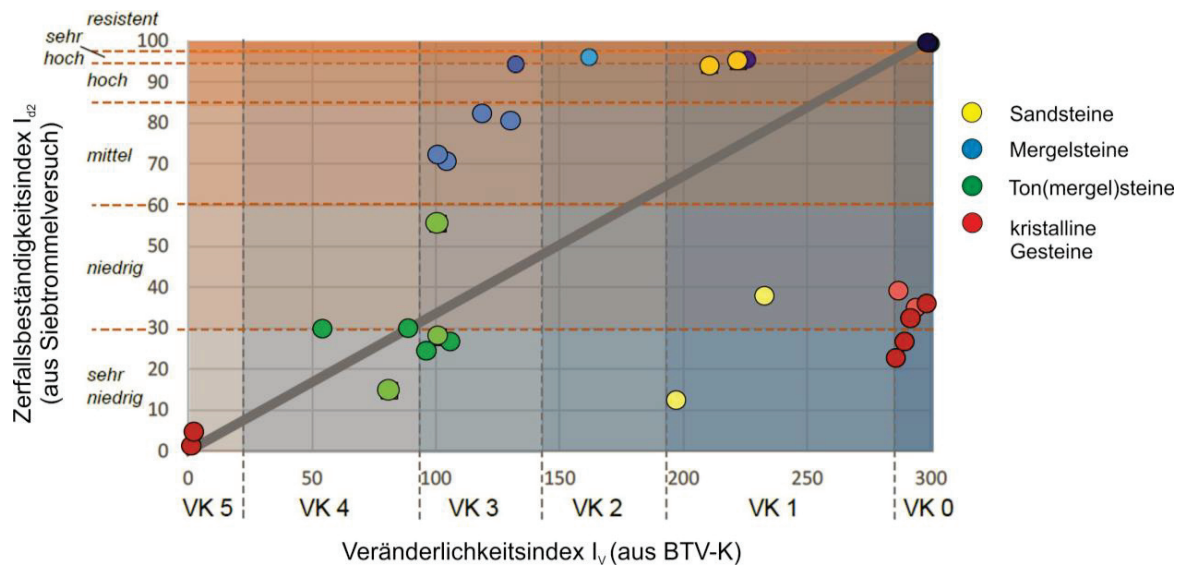


Abbildung 5-1: Vergleich des Veränderlichkeitsindex  $I_V$  mit dem Zerfallsbeständigkeitsindex  $I_{d2}$  (nach Kroll 2021, ergänzt durch Daten von Götz 2021 und Noflatscher 2021).

## 6 Zusammenfassung und Bewertung

Das kombinierte Befeuchtungs-Trocknungs-Verfahren mit Kristallisationsversuch gemäß der neuen DGGT-Empfehlung Nr. 27 stellt ein zusätzliches und bewährtes Versuchsverfahren zur Verfügung, die Veränderlichkeit von Gesteinen zu bestimmen und zu klassifizieren. Es ermöglicht sowohl die Ermittlung des Sofortverhaltens, als auch der mittel- und langfristigen Zerfallsneigung. Der Versuch bedient sich laborüblicher Hilfsmittel und stellt keine besonderen Anforderungen an die Laborausstattung.

Anders als im Siebtrommelversuch der DGGT-Empfehlung Nr. 20 erfolgt keine zusätzliche mechanische Einwirkung auf die Probe, daher simuliert das Verfahren andere Rahmenbedingungen und führt zu anderen Ergebnissen. Das Verfahren nach DGGT-Empfehlung Nr. 27 deckt damit eine Lücke ab, die bisher in der Beurteilung veränderlich fester Gesteine bestand und ergänzt somit die bisher üblichen Verfahren.

### Literaturverzeichnis

- DIN EN 12370 (2020-05): *Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung des Widerstandes gegen Kristallisation von Salzen*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 14689 (2018): *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 17892-4 (2017): *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung*. Berlin: Beuth.

FGSV (2021): *Merkblatt über veränderlich feste Gesteine als Erdbaustoff*. Arbeitsgruppe Erd- und Grundbau.

Götz, P. (2021): *Methoden zur Untersuchung von veränderlich festen Gesteinen – Vergleich des Veränderlichkeits- und des Siebtrommelversuchs*. Bachelorarbeit, TU München (unveröff.).

Herzel, P. (2002): *Empfehlung Nr. 20 des Arbeitskreises 3.3 - Versuchstechnik Fels der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik – Zerfallsbeständigkeit von Gestein – Siebtrommelversuch*. Bautechnik 79/2.

Kroll, I. (2021): *Vergleich und Bewertung von Versuchen zur Ermittlung und Klassifizierung der Veränderlichkeit*. Bachelorarbeit, TU München (unveröff.).

Nickmann, M. (2009): *Abgrenzung und Klassifikation veränderlich fester Gesteine unter ingenieurgeologischen Aspekten*. Münchner Geologische Hefte, B, H. 12, München.

Nickmann, M., Baumgärtel, T. & Plinninger, R. (2025): *Empfehlung Nr. 27 des Arbeitskreises 3.3 - Versuchstechnik Fels der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik – Bestimmung der Zerfallsneigung von Gesteinen im kombinierten Befeuchtungs-Trocknungs-Verfahren mit Kristallisationsversuch*. Geotechnik 2/25.

Noflatscher, V. (2021): *Die Linzer Sande und ihre ingenieurgeologischen und geotechnischen Eigenschaften*. Masterarbeit, TU München (unveröff.).

Plinninger, R., Spaun, G. & Nickmann, M. (2011): *Geotechnische Aspekte der Beprobung und Untersuchung veränderlich fester Gesteine*. In: VOGT, C. (Hrsg.): TAE 8 Kolloquium - Bauen in Boden und Fels; Ostfildern.