

Frost- und Tausalzbeständiger Beton

Einleitung

Frost- und Tausalzbeständiger Beton ist gegenüber einem Frostangriff mit und ohne Taumittel widerstandsfähig. Frost- und Tausalzeinwirkungen (FT) führen bei qualitativ ungenügenden Betonen innerhalb weniger Jahre zu Schäden, welche die Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit des Bauwerkes signifikant beeinträchtigen.

Verschiedene Faktoren, wie die Betonzusammensetzung, die Betonverarbeitung und die Expositionsbedingungen bestimmen die Frosttausalzbeständigkeit eines Betonbauteils. Weitere Informationen zu Schäden durch Frostangriff mit und ohne Tausalz werden unter [Frost- Tausalzangriff](#) gegeben.

Normative Anforderungen

Ausschreibung

In den Normen SIA 262 und SN EN 206-1 wird eine Klassifizierung aufgrund der Belastungsart – mit und ohne Taumittel – und der Intensität der Frosteinwirkung infolge unterschiedlicher Feuchtigkeitsgehalten – mässig und hoch – in entsprechende Expositionsklassen XF (Freezing) vorgenommen. Dabei steigt mit der Taumittleinwirkung und dem zunehmenden Feuchtigkeitsgehalt der Angriffsgrad der Expositionsklassen XF1 nach XF4 an.

Für die Ausschreibung üblicher Betonsorten sind in der Norm SN EN 206-1 die Tiefbaubetone T1 bis T4 definiert, welche den Betonsorten D bis G entsprechen. Für die Betonsorten D und F ist als zusätzliche Anforderung für die Expositionsklasse XF2 ein mittlerer und für die Betonsorten E und G für die Expositionsklasse XF4 ein hoher Frost-Tausalzwiderstand (FT) festgelegt. Für die Expositionsklasse XF1 sind keine zusätzlichen Anforderungen bezüglich Frost-Tausalzwiderstand festgelegt. Die Betonsorte D deckt auch die Anforderungen der Expositionsklasse XF3 ab (Tab. 6.2.1).

Anforderungen	Bezeichnung			
	Sorte D (T1)	Sorte E (T2)	Sorte F (T3)	Sorte G (T4)
Expositionsklasse (CH)	XC4 XD1 XF2 (XF3)	XC4 XD1 XF4	XC4 XD3 XF2	XC4 XD3 XF4
maximaler w/z-Wert [-]	0.50	0.50	0.45	0.45
Mindestzementgehalt [kg/m ³]	300	300	320	320
FT-Widerstand	mittel	hoch	mittel	hoch
weitere Anforderungen	Anforderungen an die Gesteinskörnung SN EN 12620			

Tab. 6.2.1: Anforderungen an die Betonzusammensetzung für die Betonsorten gemäss der Norm SN EN 206-1 mit einem Grösstkorn der Gesteinskörnung von 32 mm.

Die Anforderungen an die Betonzusammensetzung für die üblichen Betonsorten sind in Tabelle 6.2.1 aufgeführt.

Die Beurteilung der Frostbeständigkeit von Gesteinskörnungen erfolgt in der Schweiz anhand der petrographischen Analyse nach der Norm SN 670115 mit einer Bestimmung von ungeeigneten Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel. Die Anforderungen für die zulässige Höchstmenge an ungeeigneten Anteilen in Gesteinskörnungen sind in Tabelle 1.3.3 unter [Anforderungen an Gesteinskörnungen](#) aufgeführt.

Beim k-Wert sind die speziellen Regelungen insbesondere bei den Expositionsklassen XF2 und XF4 für die Kombination von Zementen mit Hydrolith F200 zu beachten (siehe [K-wert-konzept](#)).

Ein bewährtes Mittel zur Erhöhung des Frost-Tausalzwiderstandes von Beton ist die Einführung von künstlichen Mikroluftporen in den Beton. Der erforderliche Luftgehalt für Beton mit mittlerem und hohem Frost-Tausalzwiderstand wird vom Hersteller des Betons festgelegt. Der Mindestwert für den Luftgehalt ist dem Verwender des Betons auf Nachfrage mitzuteilen. Es ist zu beachten, dass für Betondecken für Verkehrsflächen

gemäss Norm SN 640 461b ein Beton mit $D_{max} = 32$ mm ein Luftgehalt von mindestens 3.0 Vol.-% an der Einbaustelle vorgeschrieben ist. Für Beton mit $D_{max} = 16$ mm beträgt der Luftporengehalt mind. 3.5 Vol.-% (siehe Beton für [Verkehrsflächen](#)).

Nachweis

Zur Beurteilung des Frost-Tausalz widerstandes ist als Referenzprüfverfahren die Prüfung gemäss der Norm SIA 262/1, Anhang C festgelegt. Die Prüfung ist zur Beurteilung des Frost-Tausalz widerstandes von Betonen mit einem Luftgehalt grösser 2 Vol.-%, d. h. für sogenannte Luftporenbetone, geeignet. Für Betone mit einem Luftgehalt < 2 Vol.-% sind sehr starke Streuungen in der Ablösemenge festzustellen. Daher ist für Betone mit geringen Luftgehalten, wie beispielsweise hochfeste Betone oder Faserbetone, diese Prüfung nicht bzw. nur bedingt geeignet (Abb. 6.2.1). Andere Prüfverfahren mit entsprechenden Grenzwerten können vom Projektverfasser definiert werden. Mit der TFB-Methode kann auch die Beurteilung der inneren Schädigung des Betons infolge eines Frost-Tausalzangriffs beurteilt werden. Alle aufgeführten Betone in Abbildung 6.2.1 – auch jene mit einem Luftgehalt ≤ 2 Vol.-% – haben die Anforderungen der TFB-Methode erfüllt.

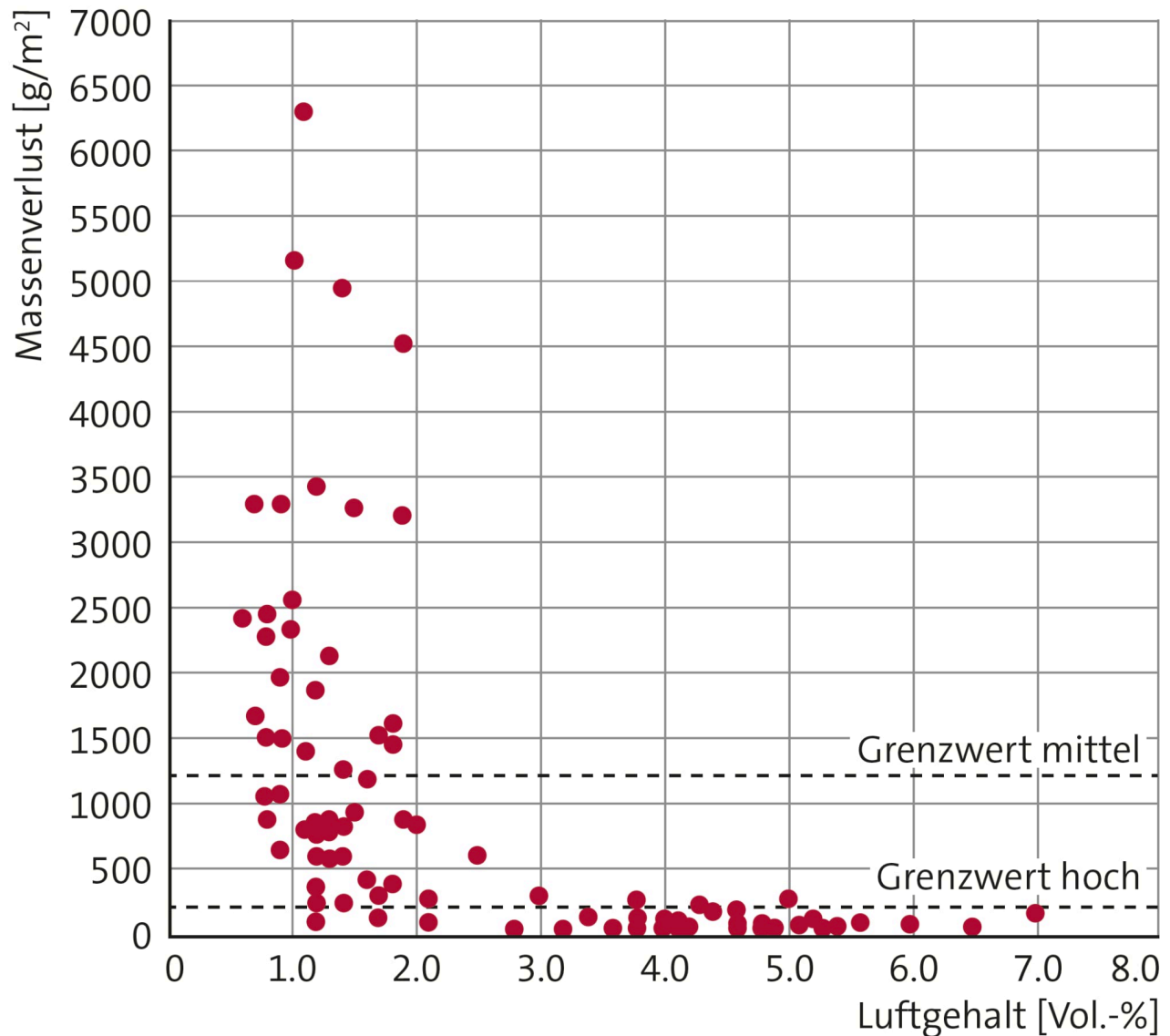


Abb. 6.2.1: Masseverlust bei Frost-Tausalzversuchen gemäss SIA 262/1, Anhang C, an normkonform hergestellten Betonen mit unterschiedlichen Luftgehalten. Grenzwerte für einen hohen und einen mittleren Frost-Tausalz-Widerstand siehe Tab. 6.2.2.

Der Frost-Tausalzwiderstand eines Luftporenbetons muss bei der Erstprüfung nachgewiesen und im Laufe der Herstellung überprüft werden. Bei der Verwendung eines Luftporenmittels ist es sinnvoll, dessen Wirkung anhand des Luftgehaltes des Frischbetons (Luftgehalt nach SN EN 12350-7, siehe Luftgehalt) und/oder des Festbetons (Porenkennwerte gemäss der Norm SIA 262/1, Prüfung K) zu überprüfen.

Die Norm SN 640 464 „Betondecken: Prüfmethode zum Bestimmen des Frost- und Frosttaumittelwiderstandes“ beschreibt ein zweistufiges Verfahren, das unter

der Bezeichnung BE I „diagnostische Bestimmung der Frost- Tausalzbeständigkeit“ mittels Porenkennwerte und BE II „physikalische Prüfung des Frost-Tausalzwiderstandes“ schon seit 1977 in der Schweiz durchgeführt wird.

Für Spritzbeton nach Norm SN EN 14487-1: „Spritzbeton – Teil 1: Begriffe, Festlegungen und Konformität“ werden das SIA-Verfahren als Referenzmethode und die Methoden BE I und BE II als zusätzliche bzw. alternative Prüfverfahren definiert.

Die Prüfung des Frost-Tausalzwiderstandes nach BE I stellt dabei ein indirektes Prüfverfahren dar, welches die Gefügemerkmale und die Porenkennwerte eines Betons berücksichtigt. In Tabelle 6.2.2 sind die wichtigsten direkten physikalischen Prüfungen des Frost-Tausalzwiderstandes zusammengestellt.

Eine Korrelation zwischen den Prüfverfahren besteht nicht, da mit unterschiedlichen Prüfbedingungen – Prüffläche, Prüfmedium/Sättigung, Temperaturzyklen und Prüfkriterien – gearbeitet wird.

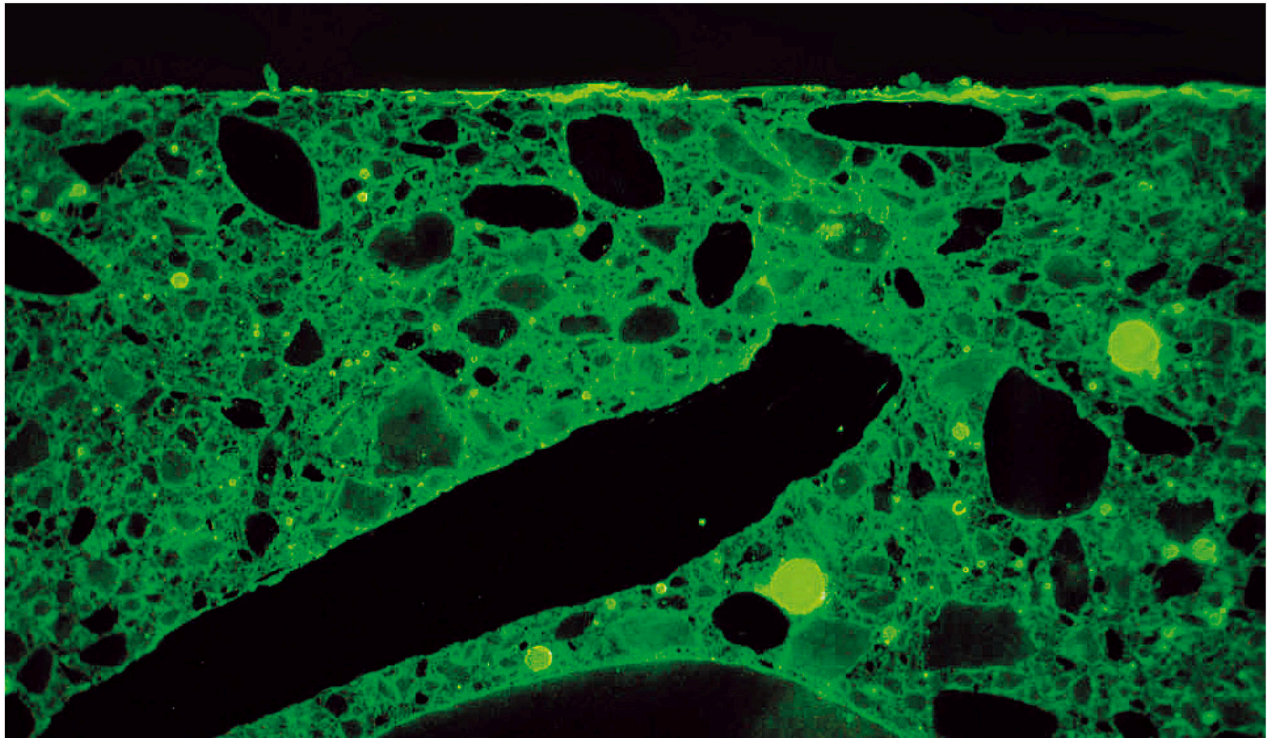
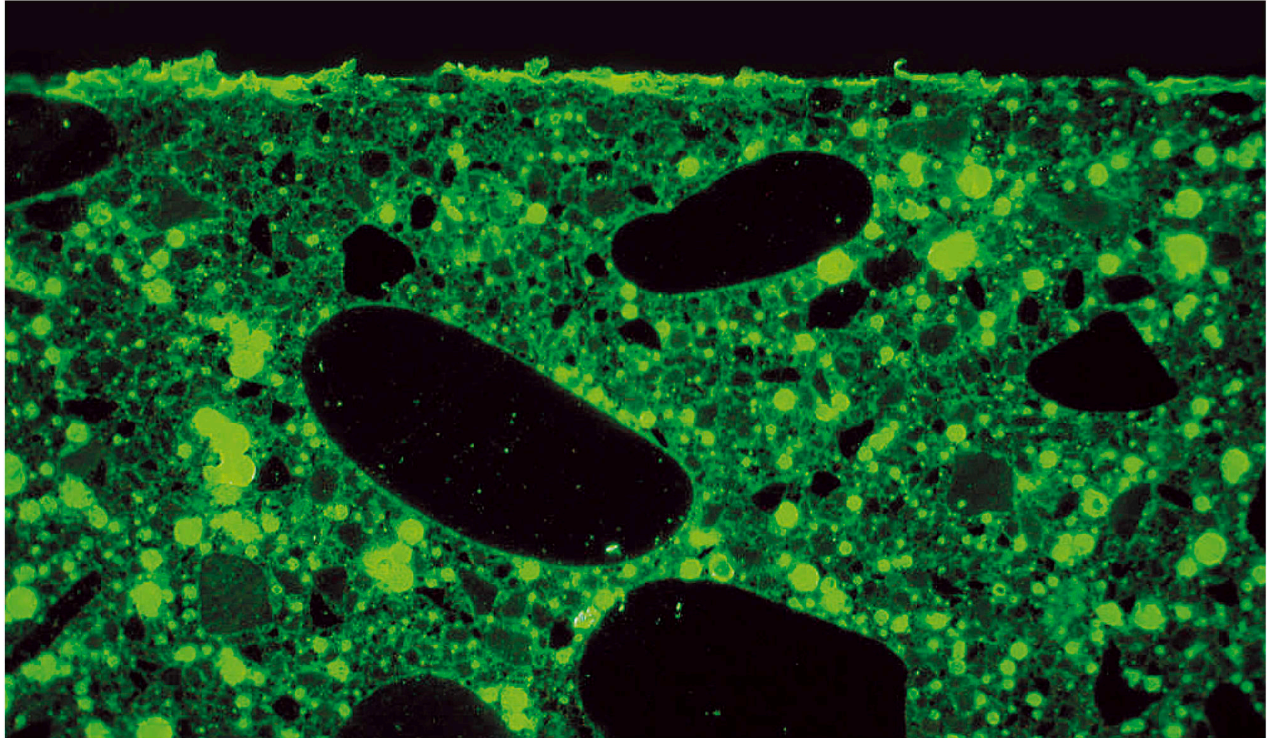
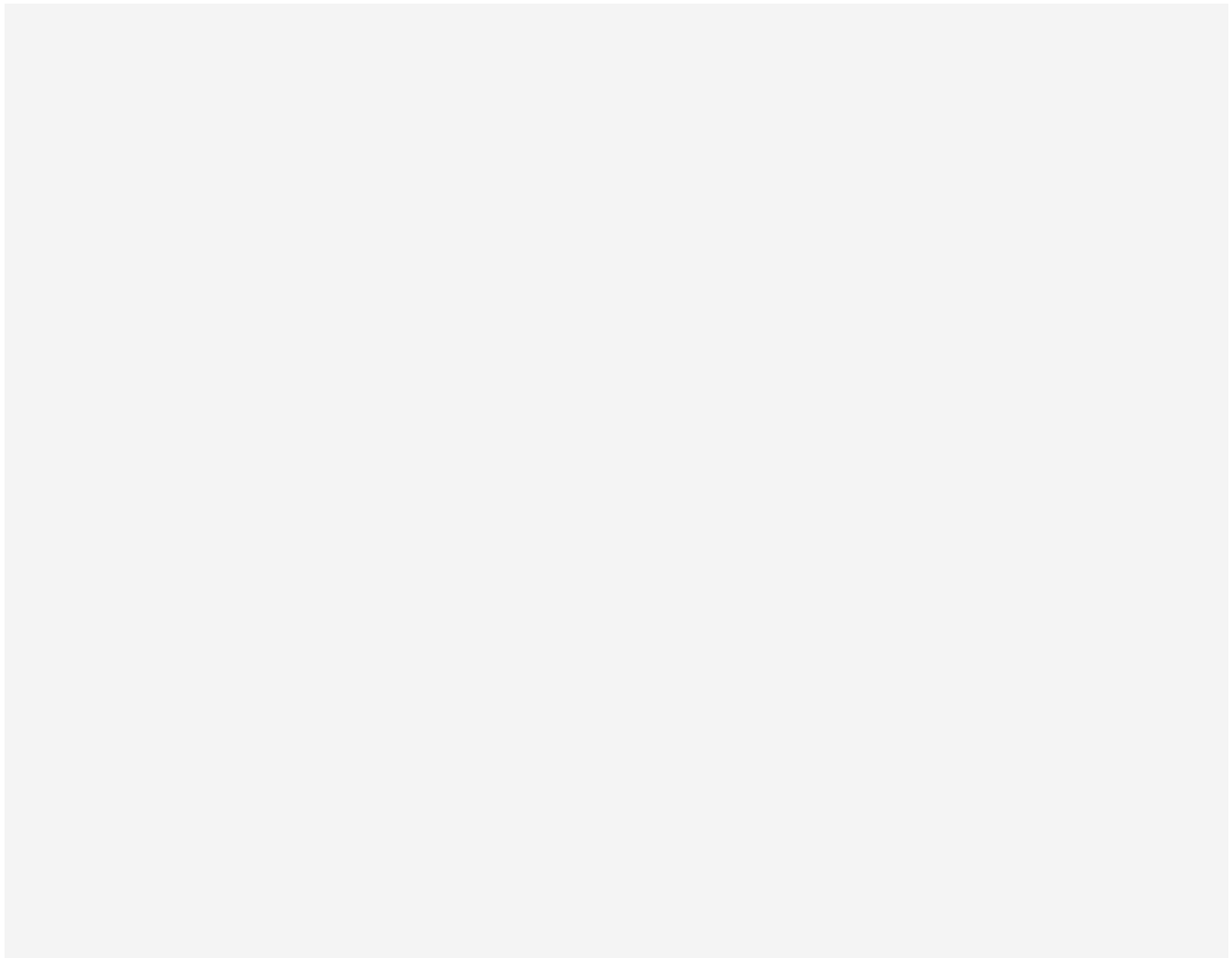


Abb. 6.2.2: Mikroskopische Anschliffaufnahme im UV-Licht: Beton mit (oben) und ohne (unten) künstlich eingeführten Luftporen (Vergrößerung ca. 5x).

Die Bestimmung der Wirksamkeit der Luftporen am Festbeton wird mittels einer mikroskopischen Bildanalyse nach SN EN 480-11 (Abstandsfaktor L, Luftgehalt A300, Gesamtluftgehalt A) durchgeführt. Dazu werden aus Festbetonproben Anschliffe hergestellt. Beispiele mit und ohne künstlich eingeführte Luftporen im Beton sind in Abbildung 6.2.2 dargestellt.

Der Abstandsfaktor (L), welcher anhand eines rechnerischen Modelles die grösste Entfernung eines beliebigen Punktes innerhalb des Zementsteines vom Rand der nächsten Luftpore angibt, ist eine wichtige Kenngrösse (Abb. 6.2.3). Er stellt somit den längsten Weg dar, den das Wasser in den Kapillaren bis zum Rand der nächsten Luftpore beim Ausweichen zurücklegen muss. Je kürzer der Weg ist, desto günstiger ist dies für den Frost-Tausalzwiderstand des Betons. Der Abstandsfaktor sollte nicht grösser als 0.20 mm sein. Der Gehalt an Mikroluftporen mit einem Durchmesser $< 300 \mu\text{m}$ (A300), sollte für einen frost-tausalzbeständigen Beton grösser als 1.5 Vol.-% sein.



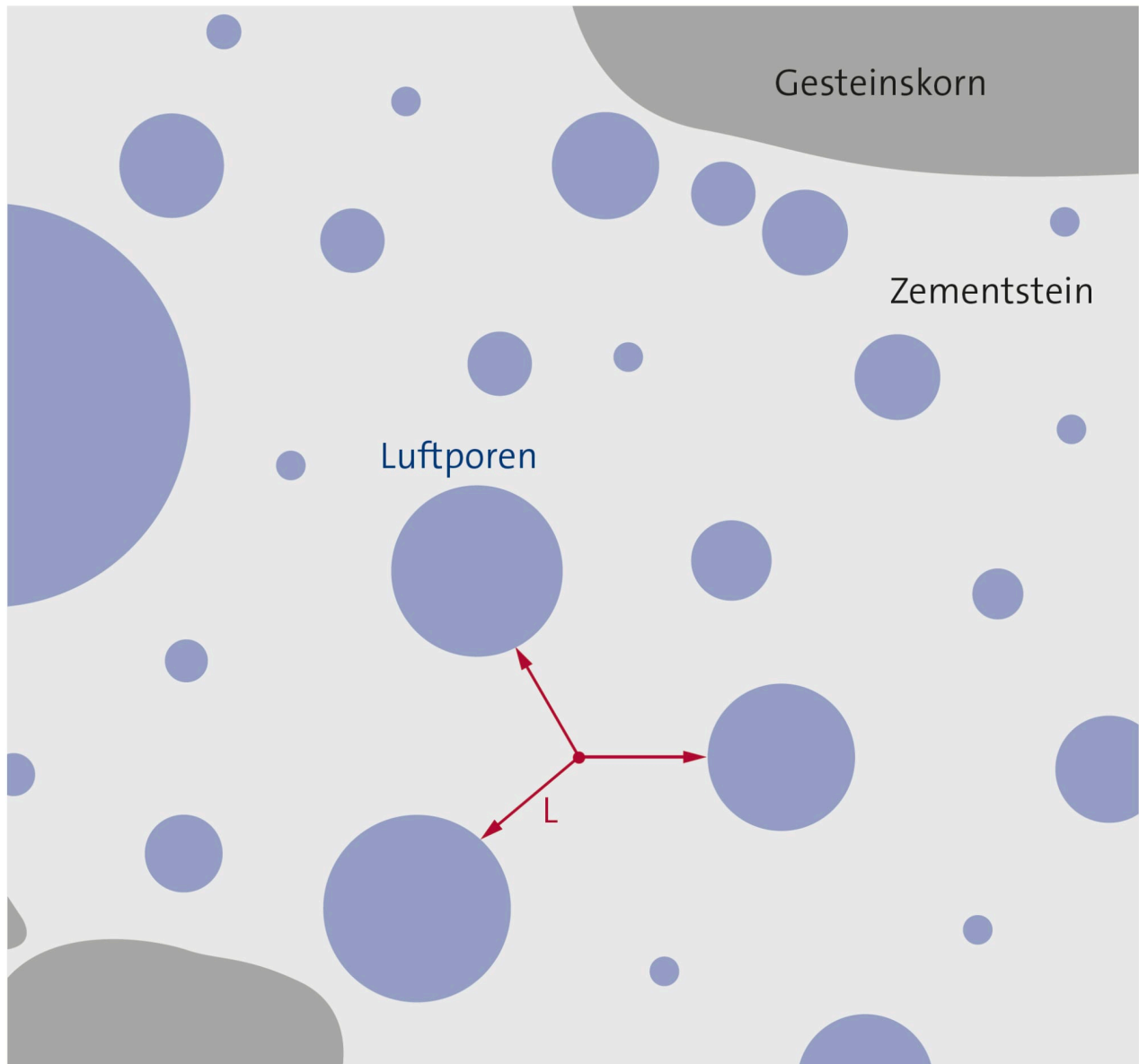


Abb. 6.2.3: Schematische Darstellung der Luftporenverteilung im Zementstein (L = Abstandsfaktor).

Prüfverfahren	SIA 262/1, Anhang C	TFB-Methode	BE II
Prüfserie	3 Platten l ≥ 145 mm und h = 50 ± 5 mm oder 4 Bohrkerne d ≥ 95 mm und h = 50 ± 5 mm	2 Bohrkerne h = 70 und 90 mm; d = 50 mm	6 Prismen l 30 × 30 × 60 mm
Prüffläche	geschalt, seitlich	vollflächig	vollflächig
Prüfmedium/Sättigung	einseitige Beaufschlagung mit 3%iger NaCl-Lösung	nach Wasserdruckimprägnierung Lagerung in 35%iger CaCl ₂ -Lösung	allseitig eingetaucht in CaCl ₂ -Lösung mit 33° Baumé-Dichte bei -20 °C
T _{min} / T _{max}	-15 °C / +15 °C	-25 °C / +20 °C	-20 °C / +20 °C
Abkühl-/ Auftaugeschwindigkeit	90 ± 5 min von +15 °C auf -15 °C ≅ 20 K/h 60 ± 5 min von -15 °C auf +15 °C ≅ 30 K/h	120 min bei -25 °C in Salzlösung 60 min bei +20 °C im Wasserbad	19 min bei -20 °C in Salzlösung 9 min auf +20 °C im Wasserbad
Prüfbeginn	nach 28 Tagen	nach 28 Tagen	nach 28 Tagen
Dauer/ Anzahl Zyklen	12 Stunden/ 28 Frost-Tau-Zyklen	3 Stunden/ 10 Frost-Tau-Zyklen	24 ± 3 Stunden/ 400 Frost-Tau-Zyklen
Prüfkriterium	Oberflächenschädigung ermittelt durch Abwitterung der Prüffläche (Masseverlust)	Gefügeschäden durch Mikroskopie	Widerstandsfaktor aus E-Modulabfall und Längenänderung nach n Frost-Tausalz-Zyklen
Beurteilung FT-Beständigkeit	Grenzwert (Mittelwert) Prüfungsart Labor mittel: Δm ₂₈ 1200 g/m ² hoch: Δm ₂₈ 200 oder Δm ₂₈ ≤ 600 g/m ² und Δm ₂₈ ≤ (Δm ₆ + Δm ₁₄)	Qualitativ, nach Art/Anzahl der Gefügeschäden: schlecht ungenügend genügend gut hoch	Widerstandsfaktor tief: WFT-L < 50 % mittel: WFT-L = 50–80 % hoch: WFT-L > 80 %
Bewertung des Prüfverfahrens	Die Schärfe der Prüfverfahren nimmt in folgender Reihenfolge zu: SIA 262/1, Anhang C – Methode TFB – BE II		

Tab. 6.2.2: Überblick der wichtigsten direkten physikalischen Prüfverfahren zum Frost-Tausalz widerstand von Beton.

Betontechnologie

Zement

Alle für die Expositionsklasse XF jeweils zugelassenen Zemente nach der Norm SN EN 206-1 können für die Herstellung eines frost-tausalzbeständigen Betons eingesetzt werden. Es wird empfohlen, bei Zementen mit langsamer Festigkeitsentwicklung den Beginn der Frost- Tausalzprüfung in Absprache mit dem Projektverfasser auf einen späteren Zeitpunkt als 28 Tage festzulegen.

Zugabewasser

Für Luftporenbetone sollte Restwasser nicht verwendet werden, da die Feinststoffe und Restmengen verschiedener Zusatzmittel die Bildung der künstlichen Luftporen behindern können.

Gesteinskörnung

Verschmutzte Gesteinskörner wie auch ein zu hoher Gehalt an Mehlkorn- und Feinstsand können den Frost Tausalz widerstand beeinträchtigen. Die Kornzusammensetzung sollte so gewählt werden, dass es weder zum Bluten des Betons noch zu Feinmörtelanreicherungen im oberflächennahen Bereich kommt.

Auch in einer geeigneten Gesteinskörnung können vereinzelte ungeeignete Gesteinskörner enthalten sein (bis 5 M.-%), die, falls sie sich direkt an der bewitterten Betonoberfläche befinden und einer Frosteinwirkung ausgesetzt sind, zu kraterförmigen Abplatzungen, den sogenannten pop-outs, führen. Die kraterförmigen Abplatzungen entstehen infolge der Volumenvergrößerung der gefrorenen Gesteinskörnern (siehe [Frost- Tausalzangriff](#)).

Zusatzmittel

Mit Hilfe von Luftporenbildner werden künstlich kleine, fein verteilte, kugelförmige Mikroluftporen in den Beton eingeführt (siehe auch Zusatzmittel). Die positive Wirkung dieser eingeführten Luftporen ist vor allem darauf zurückzuführen, dass dem gefrierenden Wasser im Beton Expansionsraum zur Verfügung gestellt wird. Das Kapillarporensystem des Zementsteins wird unterbrochen und damit die Wasseraufnahme des Betons verringert. Die Wirksamkeit dieser Massnahme hängt wesentlich von Gehalt, Grösse und der Verteilung der Luftporen ab. Der Gesamtluftgehalt sollte zwischen 3–5 Vol.-% liegen. Beim Mischungsentwurf ist zu berücksichtigen, dass die Luftporen zu einer Verringerung der Betondruckfestigkeit führen. Bei hüttensandhaltigen Zementen (z. B. CEM III/A) kann die Luftporenbildung im Beton mit Luftporenbildnern erschwert sein.

Die Herstellung und Verarbeitung von Beton mit künstlichen Luftporen ist sehr anspruchsvoll und wird von vielen Faktoren beeinflusst. Beispielhaft wird in Tabelle 6.2.3 der Einfluss der Gesteinskörnung auf den Luftgehalt im Frischbeton dargestellt. Andere Einflüsse sind in Tabelle 6.2.4 aufgeführt.

Gesteinskörnung		Einfluss auf Luftporenbildung
Korndurchmesser ≤ 0.125 mm		hemmt
Kornform	rund	fördert
	gebrochen	hemmt

Tab. 6.2.3: Einfluss der Gesteinskörnung auf den Luftporengehalt im Frischbeton.

Faustregel

Jedes Volumenprozent Luftporen führt zu einem Druckfestigkeitsverlust von 3 bis 5 N/mm².

1 Volumenprozent zusätzlich eingeführter Luftporen ermöglicht eine Wassereinsparung von etwa 5 Litern je m³ Frischbeton und erzielt im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit die gleiche Wirkung wie etwa 10 bis 15 kg Mehlkorn.

Bei Betonen mit hohen Dosierungen von Fließmitteln sowie in Verbindung mit Schwindreduktionsmitteln kann der Luftporeneintrag erschwert sein. Der Luftgehalt sollte unmittelbar am Ort des Einbaus auf der Baustelle nach dem Pumpen bestimmt werden.

Zusatzstoffe

Die Wirksamkeit von Luftporenbildnern kann durch die Verwendung von Zusatzstoffen, z. B. Flugasche oder Hüttensand, vermindert werden. Bei der Verwendung von Flugaschen mit einem erhöhten Glühverlust können die Luftporenbildner nicht ihre volle Wirkung entfalten. Hüttensand kann aufgrund seiner Struktur (Oberfläche, Rauigkeit) die eingebrachten Luftporen teilweise wieder zerstören.

w/z-Wert

Der Frost-Tausalz widerstand wird mit zunehmendem w/z-Wert verringert. Der w/z-Wert für einen Beton mit mittlerem Frost-Tausalz widerstand sollte nicht grösser als 0.50 und für einen Beton mit hohem Frost-Tausalz widerstand nicht grösser als 0.45 sein (Tab. 6.2.1).

Falls auf den Einsatz eines Luftporenbildners verzichtet wird, sind auch noch tiefere w/z-Werte um 0.40 anzustreben, um einen ausreichend hohen Frost-Tausalz widerstand zu erreichen

Konsistenz

Erdfeuchte Betone mit einem w/z-Wert < 0.40 können auch ohne künstliche Luftporen einen ausreichend hohen Frost-Tausalz widerstand aufweisen, wenn ein grosses Volumen an Verdichtungs-poren den Expansionsraum für das gefrorene Wasser bildet.

Die Bildung und Stabilität der Luftporen ist abhängig von der gewählten Konsistenz. Je weicher der Luftporenbeton ist, desto schwieriger ist das Einbringen von Luftporen.

Mischen – Transport – Verdichtung

Von der Herstellung bis zur Verdichtung sind bei Luftporenbetonen eine Reihe von Einflussgrössen zu berücksichtigen (siehe Tabelle 6.2.4).

Vor der Entleerung eines Fahrmischers auf der Baustelle sollte Luftporenbeton nochmals mindestens 5 Minuten durchgemischt werden.

Nachbehandlung

Die Nachbehandlung wird in Norm SIA 262 durch die Nachbehandlungsklassen (NBK) 1 bis 4 beschrieben (siehe [Nachbehandlung](#)). Es wird empfohlen, für Betone der Expositionsklassen XF2 und XF3 erhöhte Anforderungen (NBK 3) und für Betone der Expositionsklasse XF4 hohe Anforderungen (NBK 4) zu wählen.

Einflussgrösse	Wirkung
Mischzeit	45 Sekunden: ungenügende Luftporenbildung 90 Sekunden: optimale Luftporenbildung > 120 Sekunden: Zerstörung der Luftporen
Mischintensität	hoch: fördert die Luftbildung
Transportzeit	lang: reduziert den Luftgehalt
Pumpen	kann den Luftgehalt signifikant verändern
Temperatur	höhere Frischbetontemperatur: hemmt die Luftporenbildung
Verdichtungsart	Innenrüttler: zerstören teilweise die Luftporen
Verdichtungsdauer	lang: reduziert den Luftgehalt

Tab. 6.2.4: Einflussgrössen aus Mischen, Transport und Verdichtung und deren Auswirkungen auf Luftporenbetone.

Hinweise für das Planen von Frost- und Tausalzbeständigem Beton

Taumittel

Das häufigste in der Schweiz eingesetzte Taumittel ist Natriumchlorid (NaCl). Daneben werden im Strassenwinterdienst Calciumchlorid (CaCl₂) und Magnesiumchlorid (MgCl₂) und deren Mischungen eingesetzt. Auf Flughäfen werden keine chloridhaltigen Taumittel verwendet. Hier kommen vor allem Harnstoff, Glykole, Alkohole und Acetate zum Einsatz. Je nach Art des Taumittels ist der Beanspruchungsgrad des Betons höher und es können schädigende Nebenwirkungen, wie z. B. AAR oder Chloridkorrosion, im Beton auftreten (siehe [Chlorwiderstand](#) und [AAR-beständiger Beton](#)).



Abb. 6.2.4: Streufahrzeug im Winterdienst.

Zusätzliche Massnahmen

Zusätzliche Massnahmen haben das Ziel, die Durchfeuchtung und den Chlorideintrag zu verringern oder vollständig zu verhindern. Je nach Intensität des Angriffs können die folgenden Massnahmen einzeln oder in Kombination eingesetzt werden:

- Einbau eines Drainage- und/oder Abdichtungssystems
- Entwässerung von horizontalen Bauteilen durch ausreichendes Gefälle $\geq 1.5\%$ (siehe [Wasserdichter Beton](#))
- Vermeidung der Rissbildung bzw. Begrenzung der Rissbreiten
- Aufbringen eines Oberflächenschutzsystems z. B. Hydrophobierung

Prüfverfahren

Es gibt eine Vielzahl von Frost-Tausalz-Prüfungen in der Schweiz. Laborprüfverfahren sollen im Zeitraffer den Frost-Tausalzwiderstand eines Baustoffes über dessen Nutzungsdauer abbilden. Die zeitliche Verkürzung im Labor bedingt, dass die Prüfbedingungen im Labor gegenüber den Verhältnissen in der Praxis i. d. R.

deutlich verschärft wird. So werden in der Prüfung sehr hohe Feuchtigkeitsgehalte, bis über die vollständige kapillare Sättigung, im Prüfkörper erzeugt, die im Bauwerk praktisch nicht erreicht werden. Dies sollte bei der Interpretation der Ergebnisse und bei der Wahl des Frost-Tausalz- Prüfverfahrens berücksichtigt werden.

