

DIN CEN/TR 17310



ICS 91.100.30

**Karbonatisierung und CO₂-Aufnahme von Beton;
Deutsche Fassung CEN/TR 17310:2019**

Carbonation and CO₂ uptake in concrete;
German version CEN/TR 17310:2019

Carbonatation et absorption du CO₂ dans le béton;
Version allemande CEN/TR 17310:2019

Gesamtumfang 52 Seiten

DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (CEN/TR 17310:2019) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 104 „Beton und zugehörige Produkte“ erarbeitet, dessen Sekretariat von SN (Norwegen) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 005-07-02 AA „Betontechnik (SpA zu CEN/TC 104)“ im DIN Normenausschuss Bauwesen (NABau).

Technische Reporte sind nicht Bestandteil des Deutschen Normenwerkes.

Erfahrungen mit diesem Technischen Report sind erbeten:

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an nabau@din.de in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), 10772 Berlin.

Deutsche Fassung

Karbonatisierung und CO₂-Aufnahme von Beton

Carbonation and CO₂ uptake in concrete

Carbonatation et absorption du CO₂ dans le béton

Dieser Technische Bericht wurde vom CEN am 30. Dezember 2018 angenommen. Er wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 104 erstellt.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, der Republik Nordmazedonien, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	5
4 Karbonatisierung und Aufnahme von Kohlenstoffdioxid	5
4.1 Verbindungen, chemische Eigenschaften und Formeln	5
4.2 Karbonatisierung	6
4.2.1 Karbonatisierungsreaktionen	6
4.2.2 Prozess der Karbonatisierung	7
4.2.3 Karbonatisierungsgrad	8
4.2.4 Auswirkungen der Karbonatisierung auf die Struktur des Zementleims	11
4.2.5 Karbonatisierungsrate	11
4.2.6 Faktoren mit Einfluss auf die Karbonatisierungsrate	12
4.2.7 Karbonatisierungsrate von Beton mit Mischzementen oder Zusätzen	16
4.3 CO ₂ -Bindungsvermögen und Karbonatisierungsgrad von Beton	17
4.3.1 Allgemeines	17
4.3.2 Theoretisches Bindungsvermögen von Portlandzement	18
4.3.3 Normales Bindungsvermögen von Portlandzement	18
4.3.4 Normales Bindungsvermögen von Mischzementen	19
4.4 Karbonatisierung in verschiedenen Umgebungen	20
4.4.1 Allgemeines	20
4.4.2 Trockener, für Innenräume bestimmter Beton	21
4.4.3 Regen ausgesetzter Beton	21
4.4.4 Regengeschützter Beton	21
4.4.5 Nasser oder Unterwasserbeton	21
4.4.6 Ins Erdreich eingebetteter Beton	22
5 Praktische Erfahrungen bezüglich der CO ₂ -Aufnahme von Beton in den verschiedenen Lebensphasen	23
5.1 CO ₂ -Aufnahme in der Herstellungsphase (Modul A)	23
5.2 CO ₂ -Aufnahme in der Nutzungsphase (Modul B)	23
5.3 CO ₂ -Aufnahme in der Entsorgungsphase	31
5.3.1 CO ₂ -Aufnahme in der Lebensendphase – Abbruch, Zerkleinerung und Abfallbehandlung (Modul C1-C3)	31
5.3.2 CO ₂ -Aufnahme in der Lebensendphase – Deponielagerung (Modul C4)	34
5.4 CO ₂ -Aufnahme jenseits der Systemgrenze (Modul D)	35
6 Zahlenwerte für die „direkte Schätzung“ der CO ₂ -Aufnahme ganzer Tragwerke in der Nutzungsphase	36
6.1 Allgemeines	36
6.1.1 Allgemeines	36
6.1.2 CO ₂ -Aufnahme einer Rahmenbrücke	36
6.1.3 CO ₂ -Aufnahme eines Wohngebäudes	37
6.2 Durchschnittliche CO ₂ -Aufnahme nach Bauarten, Festigkeitsklassen und Exposition	38

7	Zusätzliche Informationen.....	40
7.1	Langfristige CO ₂ -Aufnahme über die Nutzungsdauer des Tragwerks hinaus.....	40
7.2	CO ₂ -Aufnahme von zerkleinertem Beton in neuen Anwendungen	40
8	Gesellschaftliche Perspektive – Karbonatisierung und CO ₂ -Aufnahme von Mörtel	40
9	Nationale Rechenmodelle und -verfahren	41
9.1	Allgemeines	41
9.2	Berechnung der Karbonatisierung von Beton in der Nutzungsphase (der schweizerische Ansatz).....	42
9.2.1	Allgemeines	42
9.2.2	Wasser/CaO	42
9.2.3	CO ₂ -Konzentration, relative Feuchte und CO ₂ -Puffervermögen	42
9.2.4	Ein einfacher Ansatz für die Beurteilung der CO ₂ -Aufnahme von Betonbauteilen	43
9.2.5	Verhältnis der CO ₂ -Aufnahme zur CO ₂ -Emission in Abhängigkeit von der Dicke des Betonelements.....	46
	Literaturhinweise.....	48

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (CEN/TR 17310:2019) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 104 „Beton und zugehörige Produkte“ erarbeitet, dessen Sekretariat von SN gehalten wird.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument gibt ausführliche Hinweise zur Karbonatisierung und Kohlenstoffdioxid(CO₂)-Aufnahme von Beton. Diese Hinweise ergänzen die in EN 16757, *Produktkategorieregeln für Beton und Betonelemente*, Anhang BB, angegebenen Hinweise.

Es werden typische Werte für die CO₂-Aufnahme einer Reihe von Tragwerken, die unterschiedlichen Umweltbedingungen ausgesetzt sind, dargestellt. Diese Werte können in die EPD für den gesamten Lebenszyklus entweder einer funktionellen Einheit, einer Tonne oder eines Kubikmeters (m³) Beton einbezogen werden, ohne detaillierte Kenntnisse über das zu errichtende Tragwerk haben zu müssen.

In allen anderen Teilen des Dokuments werden die Daten je m³ angegeben.

2 Normative Verweisungen

Es gibt keine normativen Verweisungen in diesem Dokument.

3 Begriffe

Es werden keine Begriffe in diesem Dokument angegeben.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>

4 Karbonatisierung und Aufnahme von Kohlenstoffdioxid

4.1 Verbindungen, chemische Eigenschaften und Formeln

4.1.1 Kohlenstoffdioxid: wird chemisch als CO₂ ausgedrückt und liegt in der Atmosphäre als Gas vor. Wird CO₂ in Wasser, H₂O, gelöst, so kann es Kohlensäure, H₂CO₃, bilden, die ihrerseits Karbonat-, CO₃²⁻, und Bikarbonat-, HCO₃⁻-Ionen freisetzen kann.

4.1.2 Calciumhydroxid: wird chemisch als Ca(OH)₂ ausgedrückt und häufig als Portlandit bezeichnet. Es handelt sich dabei um ein Produkt der Hydratation von Portlandzement und ist in Beton immer enthalten. Der Einfachheit halber bezeichnen Zementchemiker Calciumhydroxid häufig mit CH. Calciumhydroxid ist in Wasser nicht sehr gut löslich, es löst sich aber in die Ionen Ca₂⁺ und 2OH⁻ auf. Die Anwesenheit von Calciumhydroxid in Beton ist wesentlich für die Erhaltung seiner alkalischen Umgebung verantwortlich, die einen pH-Wert von etwa 12,5 hat. Etwa 25 % des erhärteten hydratisierten Zements sind Ca(OH)₂.

4.1.3 Calciumoxid: wird chemisch als CaO ausgedrückt. Portlandzement-Klinker enthält bei der Bestimmung mittels Oxidanalyse 61 % bis 67 % CaO, wobei üblicherweise ein Wert von 65 % angenommen wird. Nahezu das gesamte in Portlandzement enthaltene Calciumoxid liegt nicht als Calciumoxid, sondern als Bestandteil komplexer Verbindungen, wie z. B. Dicalciumsilicate, Tricalciumsilicate, Tricalciumaluminat und Tetracalciumaluminatferrit, vor. Glücklicherweise reicht es aus, zur Berechnung der möglichen Karbonatisierung den durch die Oxidanalyse erhaltenen Wert von 65 % CaO anzusetzen, ohne auf die komplexere Chemie eingehen zu müssen.

4.1.4 Calciumsilicathydrate und andere Hydratationsprodukte: Wenn Portlandzement mit Wasser reagiert, d. h. wenn er hydratisiert, dann bildet er Calciumhydroxid und einen größeren Anteil an komplexen Hydratationsprodukten, von denen der größte Teil aus Calcium und Siliciumdioxid (Kieselsäure) besteht. Die Hydratationsprodukte – von Betontechnikern als Gel beschrieben – werden als Calciumsilicathydrat und häufig mit der Abkürzung CSH bezeichnet. Für eine typische Zusammensetzung von erhärtetem hydratisiertem Zement wird von 50 % CSH, etwa 25 % Calciumhydroxid, 10 % Calciummonosulfoaluminat-AFm und 10 % Ettringit-AFt ausgegangen, was einen Rest von 5 % an unbestimmten Verbindungen bedeutet.

4.1.5 Calciumkarbonat: wird chemisch als CaCO_3 ausgedrückt und liegt in Beton in der Regel als Calcit vor.

4.2 Karbonatisierung

4.2.1 Karbonatisierungsreaktionen

Die Reaktion von Kohlenstoffdioxid mit Calciumhydroxid zu Calciumkarbonat, CaCO_3 , und Wasser, H_2O , wird als Karbonatisierung bezeichnet. Diese Reaktion kann mit folgender Formel ausgedrückt werden:



Diese Formel lässt vermuten, dass die Reaktion einfach die von gasförmigem Kohlenstoffdioxid mit festem Calciumhydroxid sei. Tatsächlich aber ist die Kinetik dieser Reaktion komplizierter, weil für die Zwischenstufen, bei denen Ionen von Karbonat, CO_3^{2-} , Bikarbonat, HCO_3^- , Calcium, Ca^{2+} , und Hydroxid, 2OH^- , miteinander in Wechselwirkung treten, Feuchtigkeit anwesend sein muss.

Neben der direkten Karbonatisierung von Calciumhydroxid, karbonatisieren auch Calciumsilicathydrate. Dabei handelt es sich um eine komplexe Reaktion, bei der CSH aus kurzen, durch Ionen von Calcium, Ca^{2+} , und Hydroxid, OH^- , zusammengehaltenen Siliciumdioxid-Ketten gebildet wird, in denen das Wasser mehr oder weniger fest gebunden ist. Der Aufbau von CSH lässt sich anhand von dessen Calcium-zu-Siliciumdioxid-Verhältnis, ausgedrückt als entweder CaO/SiO_2 oder Ca/Si , beschreiben, wobei der nicht karbonatisierte Wert etwa 1,85 beträgt. Da die Karbonatisierung den Ca^{2+} -Gehalt der Porenlösung verringert, wird dies durch Freisetzung von Ca^{2+} aus dem CSH ausgeglichen [6], und ihr Ca/Si -Verhältnis fällt auf etwa 0,85. Und weil das Ca/Si -Verhältnis auf unter 1 fällt und sich der pH-Wert auf etwa 10 verringert, wandelt sich das CSH in ein Kieselgel um, in dem jedoch immer auch ein gewisser Anteil von Calcium enthalten ist.

Bei der Karbonatisierung handelt es sich um die Neutralisierung der natürlichen Basizität von hydratisiertem Zement in Beton, bei der der pH-Wert von etwa 12,5 auf unter 9 und unter Umständen sogar auf 8 absinkt. Der pH-Wert von soeben freigelegten Betonoberflächen lässt sich durch Aufbringen eines Indikators beurteilen. Phenolphthalein ist hierfür besonders geeignet, weil es beim Aufsprühen auf Beton farblos bleibt, solange der pH-Wert unter 9 liegt, bei höheren pH-Werten aber einen Farbumschlag zu violett zeigt, wie in Bild 1 zu sehen ist. Bei dem in Bild 1 dargestellten Beton handelt es sich um einen qualitativ hochwertigen Beton, und es ist zu sehen, dass der pH-Wert mit Ausnahme der Außenhaut des Betons über 9 liegt.



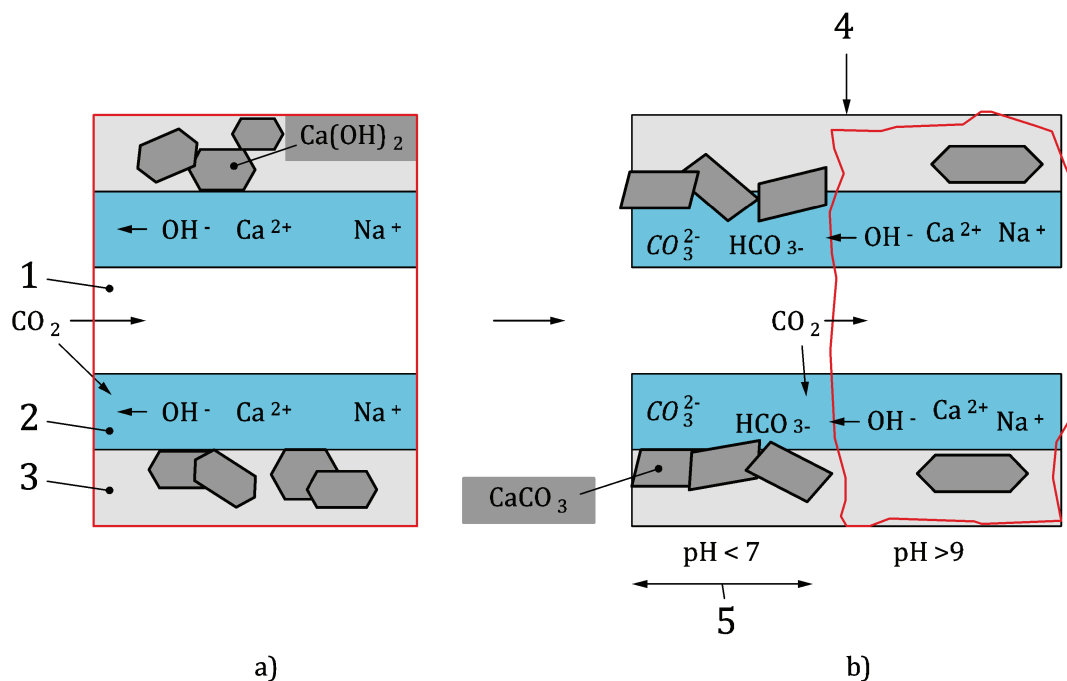
Bild 1 — Phenolphthalein-Indikator, aufgebracht auf eine soeben freigelegte Oberfläche eines qualitativ hochwertigen Betons

4.2.2 Prozess der Karbonatisierung

Die Karbonatisierung beginnt an der Oberfläche des Betons, weil diese dem in der Atmosphäre enthaltenen Kohlenstoffdioxidgas als erstes ausgesetzt ist. Karbonatisierung tritt auch da auf, wo der Beton mit Wasser in Berührung kommt, das lösliche Kohlenstoffverbindungen, wie z. B. Kohlensäure, Bikarbonat- und Karbonat-Ionen enthält. Die Karbonatisierung verläuft unter Wasser langsamer als an der Luft, weil die Ionen langsamer durch das Wasser diffundieren als das CO_2 -Gas durch Betonporen. Es finden dabei zwei Prozesse gleichzeitig statt:

- der Transport und die Lösung von beliebigen CO_2 -Gas- und löslichen Kohlenstoffverbindungen von der Oberfläche des Betons in das Material hinein;
- die Reaktion der löslichen Kohlenstoffverbindungen mit dem hydratisierten Zement zu Calciumkarbonat. Bei dem dabei ausgefallenen Calciumkarbonat handelt es sich in der Regel um Calcit, es kann aber auch Vaterit oder Aragonit sein.

Die Grenzlinie zwischen karbonatisiertem und nicht karbonatisiertem Beton wird als Karbonatisierungsfront bezeichnet, und die Karbonatisierungstiefe wird in der Regel als gleich dem Abstand des aufgrund der Anwendung von Phenolphthalein violett gefärbten Bereichs zur Betonoberfläche angesehen. In Bild 2 ist die Karbonatisierung durch Beton schematisch dargestellt.



a) nicht karbonatisierter Beton mit einer Luftpore, der Porenlösung und dem hydratisierten Zement

b) das Fortschreiten von CO_2 durch die Luftpore und die Porenlösung zur Karbonatisierung des Betons

Legende

- | | | | |
|---|----------------------|---|------------------------|
| 1 | Luft in der Pore | 4 | Karbonatisierungsfront |
| 2 | Porenlösung | 5 | Karbonatisierungstiefe |
| 3 | hydratisierte Phasen | | |

ANMERKUNG Die rote Linie zeigt die Grenze des Phenolphthalein-Farbumschlags.

Bild 2 — Fortschreiten der Karbonatisierung durch Beton

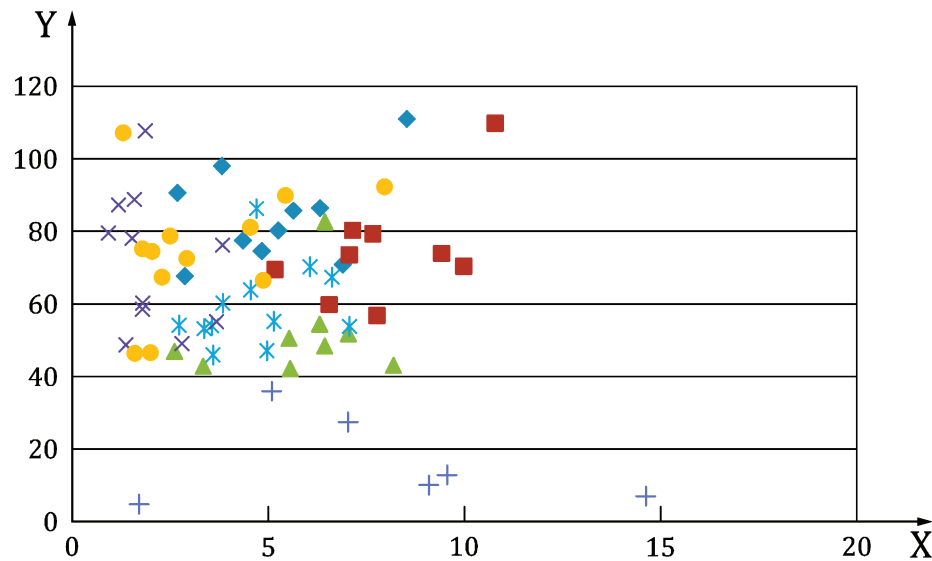
4.2.3 Karbonatisierungsgrad

Wichtig ist zu beachten, dass der Phenolphthalein-Farbumschlag Bereichen mit niedrigem pH-Wert entspricht, in denen das Calciumhydroxid und das CSH nur teilweise und nicht vollständig karbonatisiert ist. Der Karbonatisierungsgrad wird im Allgemeinen entweder als der prozentuale Anteil des im hydratisierten Zement des Betons enthaltenen reaktiven CaO , das in CaCO_3 umgewandelt wird, oder als das im Beton gebundene CO_2 im Verhältnis zu dem während der Calcinierung in der karbonatisierten Zone des Betons emittierten CO_2 (ohne Berücksichtigung des durch Brennstoff emittierten CO_2) definiert, wobei beides zum selben Ergebnis führt.

Dieser Zahlenwert unterscheidet sich vom prozentualen Anteil des in der gesamten funktionellen Einheit gebundenen CO_2 im Verhältnis zu dem durch Karbonatisierung emittierten CO_2 , wobei dieser prozentuale Anteil auch die nicht karbonatisierte Zone berücksichtigt.

In der Praxis lässt sich der Karbonatisierungsgrad nur durch komplizierte Verfahren, wie z. B. die thermogravimetrische Analyse (TG), bestimmen.

Es gibt keinen genau bestimmbareren Zusammenhang zwischen der mit Hilfe von Phenolphthalein bestimmten Karbonatisierungstiefe und dem Karbonatisierungsgrad, wenn dieser als prozentualer Anteil der CO_2 -Menge an den Calcinierungsemissionen ausgedrückt wird (Bild 3).



Legende

X	k (mm/Jahr ^{0,5})	+	Alte Proben
Y	Karbonatisierungsgrad (%)	■	Im Freien, geschützt - 0,6
◆	Im Freien, ungeschützt - 0,6	×	Im Freien, geschützt - 0,45
▲	In Innenräumen - 0,6	●	In Innenräumen - 0,45
*	Im Freien, geschützt - 0,45		

Bild 3 — Beziehung zwischen der Karbonatisierungsrate und dem Karbonatisierungsgrad für Beton in Innenräumen sowie geschützt und ungeschützt im Freien laut [13]

ANMERKUNG Aufgrund des geringen Klinkergehalts von CEM III ist der Karbonatisierungsgrad höher als 100 %, weil die Schlacke karbonatisiert. Dies ist auch bei anderen mineralischen Zusätzen der Fall. Der Karbonatisierungsgrad gilt nur in Bezug auf durch den Klinker hervorgerufene Emissionen.

Aufgrund mehrerer Auswertungen von Laborprüfungen, wie z. B. durch Parrot, 1987, ist bekannt, dass die Karbonisierungstiefe ihr Maximum bei einer relativen Feuchte von etwa 60 % erreicht. Bei geringerer relativer Feuchte ist die Fähigkeit des CO₂, sich zu lösen und zu reagieren, aufgrund der fehlenden Feuchtigkeit eingeschränkt, während bei höherer relativer Feuchte so viel Feuchtigkeit vorhanden ist, dass sie das Eindringen von CO₂-Gas durch das Betonporensystem verhindert. In Nordeuropa entspricht die relative Feuchte von Beton bei der Exposition an geschützten Stellen im Freien etwa 60 %, weswegen es nicht überrascht, dass die in Bild 3 dargestellten Messungen die Höchstwerte für die Karbonisierungstiefe und den Karbonatisierungsgrad bestätigen. Es wird davon ausgegangen, dass sich unter trockeneren Bedingungen in Innenräumen oder unter feuchteren Bedingungen im ungeschützten Zustand im Freien geringere Karbonisierungstiefen ergeben.

Die Tabellen 1 und 2 zeigen die semi-quantitative Röntgenbeugung eines aus einem Beton für Innenräume entnommenen Zementleims (Tabelle 1) und die eines aus einem Beton für den Einsatz im Freien entnommenen Zementleims (Tabelle 2) [4]. Die Messungen wurden, wie aus der Tabelle ersichtlich, in unterschiedlichen Tiefen durchgeführt, wobei die Ergebnisse insofern semi-quantitativ sind, als die Materialien durch das punktweise Zählen von Probenbereichen identifiziert wurden, ohne sie mit den tatsächlichen Anteilen im Beton abzugleichen. Die Karbonisierungstiefe wurde mit Hilfe eines Phenolphthalein-Indikators an einem gespaltenen Betonzylinder bestimmt, wobei die Karbonisierungstiefe bei dem für Innenräume vorgesehenen Beton 35 mm und bei dem für den Einsatz im Freien vorgesehenen Beton etwa 20 mm beträgt. In den Tabellen werden karbonatisierte Bereiche mit „Carb.“, an der Karbonisierungsfront befindliche Bereiche mit „Carb. front“ und Bereiche des Betons, für die angenommen wird, dass sich das Material in einer im Wesentlichen nicht karbonisierten Tiefe befindet, als „intact“ bezeichnet.

Tabelle 1 — Semi-quantitative Röntgenbeugung eines aus einem für Innenräume vorgesehenen Beton entnommenen Zementleims

Identifiziertes Material	(0 bis 5) mm Carb.	(5 bis 10) mm Carb.	(10 bis 15) mm Carb.	(15 bis 40) mm Carb. front	(40 bis 50) mm Intact
Alit	11	0	0	0	0
Alit + Belit	513	250	92	98	72
Portlandit, CH	0	291	1 037	1 794	2 115
Calcit	827	529	761	456	121
Quarz	3 707	4 125	4 309	2 234	1 335
Feldspat	1 010	1 310	1 289	865	828

Tabelle 2 — Semi-quantitative Röntgenbeugung eines aus einem für den Einsatz im Freien vorgesehenen Beton entnommenen Zementleims

Identifiziertes Material	(0 bis 7) mm Carb.	(7 bis 16) mm Carb.	(16 bis 25) mm Carb. front	(25 bis 50) mm Intact
Alit	0	0	0	0
Alit + Belit	59	66	121	123
Portlandit, CH	0	0	912	2 443
Calcit	2 382	2 919	1 179	0
Quarz	3 201	2 318	2 871	2 138
Feldspat	1 059	869	2 084	736

Als Materialien identifiziert wurden Alit, Alit + Belit, Portlandit, Calcit, Quarz und Feldspat. Alit und Alit + Belit sind Verbindungen, die in nicht hydratisiertem Portlandzement zu finden sind, in dem unabhängig vom Alter immer ein gewisser Anteil dieser Materialien enthalten ist, obgleich dieser mit der Zeit sinkt, sofern Wasser für die fortgesetzte Hydratation vorhanden ist. Portlandit und Calcit sind wie zuvor beschrieben, wobei eine vergleichsweise Verringerung des Anteils an Portlandit und ein Anstieg des Anteils an Calcit bedeuten, dass der Beton karbonatisiert. Quarz und Feldspat sind Minerale aus der Gesteinskörnung.

Aus Tabelle 1 ist ersichtlich, dass die durch das Phenolphthalein angezeigte karbonatisierte Zone signifikante Mengen sowohl an Portlandit als auch an nicht hydratisierten Zementkörnern enthält, wie durch die Anwesenheit von Alit und Alit+Belit belegt. In Beton, der für den Einsatz im Freien vorgesehen ist, befindet sich ein gewisser Anteil an nicht hydratisiertem Zement nahe der Oberfläche, das Portlandit wird dagegen an der Karbonatisierungsfront karbonatisiert.

Die Messungen zeigen an, dass der trockenere für Innenräume vorgesehene Beton einen wesentlich geringeren Karbonatisierungsgrad hat als der feuchtere für den Einsatz im Freien vorgesehene Beton.

Aus der weiter gefassten Forschung geht hervor, dass der Karbonatisierungsgrad bei für den Einsatz im Freien bestimmtem Beton, der im Allgemeinen eine geringere Karbonatisierungstiefe aufweist als der trockenere für Innenräume bestimmte Beton, mit etwa 75 % bis 90 % höher ist [2], [4], [7], [15].

4.2.4 Auswirkungen der Karbonatisierung auf die Struktur des Zementleims

Die Umwandlung von Portlandit in Calcit geht mit einer Volumenänderung von 11 % einher, die theoretische Volumenänderung bei der Umwandlung von CSH in Calcit ist jedoch weniger sicher und hängt vom Wassergehalt ab. Es ist bekannt, dass die Volumenänderungen keinen Einfluss auf die mechanische Stabilität der karbonatisierten Zone haben, diese bleibt stabil und hart. Risse werden durch die Karbonatisierung selten hervorgerufen, Mikrorisse dagegen können vorkommen. In der Regel füllt das ausgefällte Calcit einfach den im Kapillarsystem vorhandenen Platz aus und führt so zu einer örtlichen Verdichtung des Zementleims.

Im Allgemeinen hängen die Auswirkungen der Karbonatisierung auf die Porosität vom Ort bzw. den Orten und der Art und Weise der Calcitausfällung sowie von der Art des Zements ab. Da die Diffusion und der Transport in Zementleim hauptsächlich durch die Kapillarporen erfolgt, führt eine Ausfällung in diesen Poren zu einer Verringerung des Flusses.

Es liegen Belege dafür vor, dass mit Portland-Hüttenzement hergestellter Beton bei der Karbonatisierung ein größeres Porensystem entwickelt als mit reinem Portlandzement hergestellter Beton. Da der Schlackenzementleim weniger Calciumhydroxid und mehr CSH enthält, hat er Einfluss auf die Karbonatisierungsfront und erhöht in der Regel die Karbonatisierungsrate.

Ogleich die Karbonatisierung als recht einfach erscheinen kann, ist der Prozess in der Praxis ziemlich komplex, insofern als die Betonqualität, der Zementtyp und die Karbonatisierung Einfluss auf die Struktur haben und Strukturänderungen ihrerseits die Karbonatisierungsrate und den Karbonisierungsgrad beeinflussen.

4.2.5 Karbonatisierungsrate

Die Rate, mit der der Beton karbonatisiert, nimmt mit der Zeit ab. Der Grund dafür ist, dass es sich bei der Karbonatisierung um einen diffusiven Prozess handelt, das heißt, dass das Kohlenstoffdioxid mit dem Fortschreiten der Karbonatisierung einen weiteren Weg zurücklegen muss, um das Innere des Betons zu karbonatisieren. Hinzu kommt, dass die Ausfällung von Calcit die Durchlässigkeit des Betons verringern kann. Für die Praxis lässt sich dies mit dem folgenden Ausdruck beschreiben:

$$d_c = k\sqrt{t} \quad (2)$$

Dabei ist

d_c die Karbonatisierungstiefe;

k die Rate;

t die Zeit.

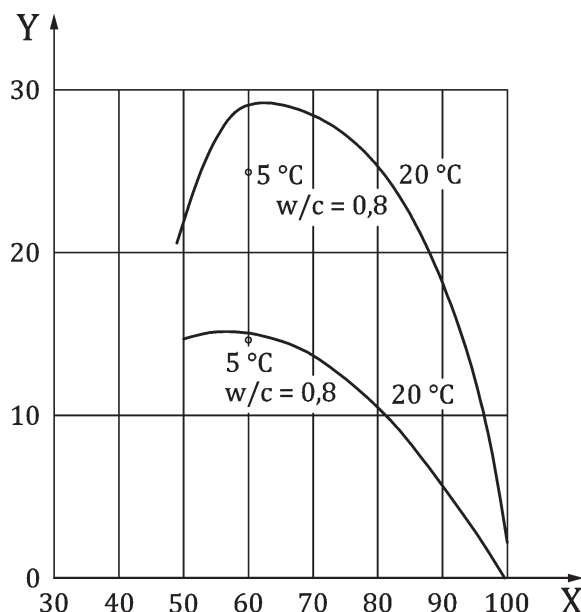
Die Karbonatisierungsrate k bezieht die Auswirkungen des Transports und der Reaktion mit ein und ermöglicht es, die Karbonatisierungstiefe zu jedem beliebigen Zeitpunkt zu berechnen. Für die Berechnung der Menge des im Beton gebundenen CO_2 werden andere Modelle benötigt, um dem Transport und der Reaktion gesondert Rechnung tragen zu können.

Auf die Karbonatisierungsrate haben viele Faktoren Einfluss. Neben der Menge des in der Atmosphäre enthaltenen CO_2 spielen auch die Größe, die geometrische Gestalt und die Verbindungen der Poren untereinander sowie der Zement- oder Bindemitteltyp, die relative Feuchte und weitere Faktoren eine Rolle.

4.2.6 Faktoren mit Einfluss auf die Karbonatisierungsrate

4.2.6.1 Feuchte und Temperatur

Ein sehr trockener Beton karbonatisiert nicht, weil für die Bildung von Ionen und deren spätere Reaktion mit Calciumhydroxid oder CSH und zur Bildung von Calcit Wasser erforderlich ist. Im Falle von normal trockenem Beton mit einer relativen Feuchte von etwa 50 % bis 85 % hängt die Karbonatisierungsrate im Wesentlichen von der Gasdiffusion ab, wobei der Antrieb in stehender Luft der Partialdruckunterschied zwischen der Oberfläche und dem Inneren des Betons ist. Danach löst sich das CO_2 -Gas im Porenwasser und wird an der Karbonatisierungsfront verbraucht. Bei feuchterem Beton mit einer relativen Feuchte von z. B. > 85 % wird die Karbonatisierungsrate durch die Diffusion von Ionen in der Porenlösung bestimmt, und diese erfolgt langsamer als die Permeation von CO_2 als Gas. Bild 4 zeigt den Einfluss der relativen Feuchte, des Wasser/Zement- bzw. (w/z)-Wertes (en: water/cement ratio (w/c)) und der Temperatur auf die Karbonatisierungstiefe nach sechzehn Jahren laut [5].



Legende

- X Relative Feuchte, in %
- Y Durchschnittliche Karbonatisierungstiefe $\bar{d}_x$, in mm

Bild 4 — Einfluss der relativen Feuchte, des w/z-Wertes und der Temperatur auf die Karbonatisierungstiefe nach sechzehn Jahren laut [5]

Aus Bild 4 geht hervor, dass die Hydratationsrate zwischen den relativen Feuchten 55 % und 80 % einen Spitzenwert erreicht.

Welche Auswirkungen die Temperatur auf die Karbonatisierung hat, ist – wahrscheinlich aufgrund der Wechselbeziehung mit der relativen Feuchte – unklar und wird in der Regel als in der Praxis vernachlässigbar angesehen [16].

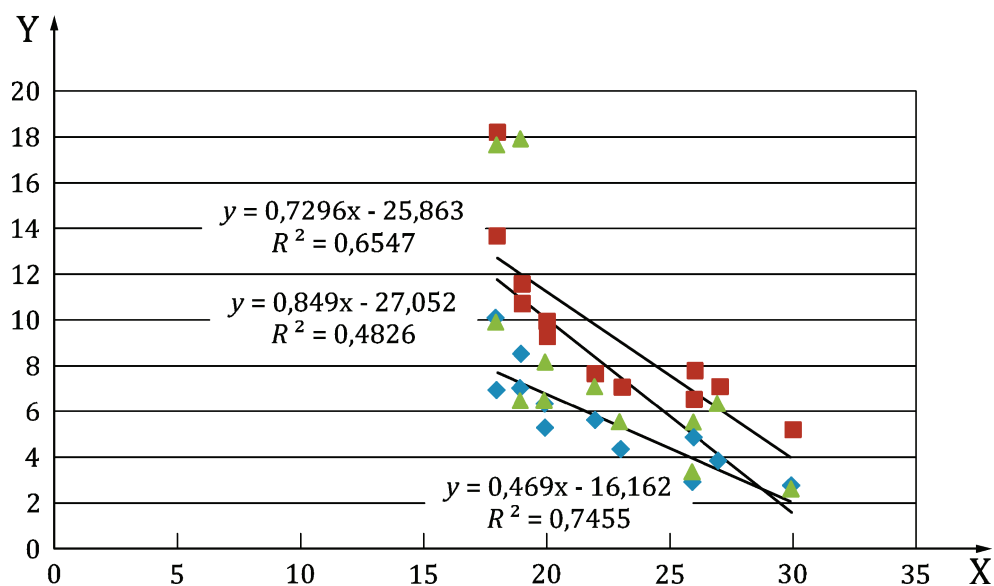
4.2.6.2 Bindemittelgehalt

Bei Betonen, die natürliche oder normale Gesteinskörnungen enthalten, erfolgt die CO_2 -Diffusion durch den Zementleim und nicht durch die Gesteinskörnung. Die Menge an Zement hat selbst keinen Einfluss auf die Karbonatisierungsrate, sofern der w/z-Wert konstant ist. Grund hierfür ist, dass der Fluss als das durch eine Flächeneinheit hindurchgehende Material gemessen wird, wobei eine Erhöhung des Zementgehalts einfach zu einer Vergrößerung der Gesamtfläche führt, die Durchflussmenge und somit die Karbonatisierung jedoch gleich bleiben. Um das Volumen an karbonatisiertem Leim schätzen zu können, muss die Menge des im Beton enthaltenen Zements bekannt sein.

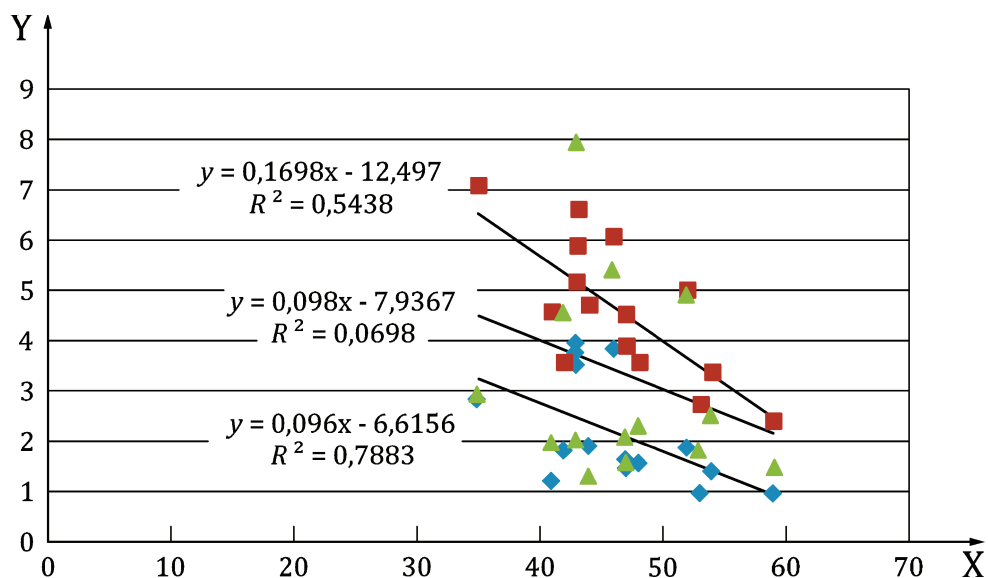
Die Auswirkungen der verschiedenen Zemente, CEM I und des Gehaltes auf die Karbonatisierungstiefe lassen sich mit Hilfe des in [34] dargestellten Diagramms schätzen, das die Auswirkungen auf die Karbonatisierungstiefe in Abhängigkeit von der Zeit für verschiedene für die Karbonatisierung zur Verfügung stehende Mengen an CaO zeigt. Es zeigt, dass die Variation der Karbonatisierungstiefe und des k -Wertes für normale Bereiche des Zementgehalts von z. B. $\pm 40 \text{ kg/m}^3$ für einen w/z-Wert von 0,50 mit einer Grenzabweichung von $\pm 10 \%$ geschätzt werden kann. Diese ist klein im Verhältnis zu der von der Festigkeit, dem w/z-Wert und der Exposition abhängigen Variation.

4.2.6.3 Betonfestigkeit

Beton mit einem niedrigeren w/z-Wert oder einem geringeren Wasser/Bindemittel-Verhältnis ist generell von größerer Festigkeit und Dauerhaftigkeit. Außerdem gilt, dass je länger ein Beton unter feuchten Bedingungen aushärten kann, desto höher ist der Hydratationsgrad und desto größer die Festigkeit. Der höhere Hydratationsgrad führt zu einer geringeren Durchlässigkeit für Flüssigkeiten und somit zu einer geringeren Karbonatisierungsrate in allen Umgebungen. Aufgrund all dessen ist die Festigkeit ein grober Anzeiger für den Widerstand gegen Karbonatisierung, wie in Bild 5 dargestellt.



a) $w/z = 0,6 - 300 \text{ kg/m}^3$ Bauwerk



b) $w/z = 0,45 - 400 \text{ kg/m}^3$ Bauwerk

Legende

X	Druckfestigkeit (MPa)	■	Geschützt
Y	$k \text{ (mm/Jahr}^{0,5})$	▲	In Innenräumen
		◆	Ungeschützt

Bild 5 — Beziehung zwischen der Festigkeit und der Karbonatisierungsrate für geschützte und ungeschützte Exposition und die Exposition in Innenräumen laut [13]