

BAUSTOFF

Bundesverband Porenbetonindustrie e.V.

1.1 Idee und Entwicklung

Porenbeton gehört zur Gruppe der Leichtbetone. Seine Stärke liegt vor allem darin, dass er massive monolithische (einschalige) Konstruktionen ermöglicht, welche gleichzeitig die Anforderungen an Tragfähigkeit, Wärmeschutz, Feuchteschutz, Schallschutz und Brandschutz erfüllen. Die Rohdichte von Porenbeton liegt zwischen 300 und 1.000 kg/m³. Die Kombination von niedriger Rohdichte und hoher Festigkeit ist die besondere Eigenschaft von Porenbeton. Auf ergänzende Baustoffe, die sonst häufig für den Wärme-, Schall- oder Brandschutz erforderlich werden, kann bei Wandkonstruktionen aus Porenbeton weitgehend verzichtet werden – ein wesentlicher Vorteil sowohl für die Wirtschaftlichkeit als auch für eine sichere, fehlerfreie Bauausführung. Die Kombination vieler erwünschter Eigenschaften macht Porenbeton zu einem technisch und wirtschaftlich interessanten Material.

Die historische Entwicklung des Baustoffs Porenbeton begann gegen Ende des 19. Jahrhunderts. Ziel der Entwicklung war es, in großen Mengen und mit gleichbleibender Qualität künstliche Bausteine aus den natürlichen Rohstoffen Quarzsand und Kalk herzustellen. In ersten Versuchen kochte F. Zernikow im Jahr 1877 Kalk-Sand-Mörtel in hoch gespanntem Wasserdampf, wobei er jedoch nur geringe Festigkeiten des Produktes erzielte. In einer weiteren Entwicklungsstufe gelang es W. Michaelis, wasserarmen Kalk-Sand-Mörtel in hochgespanntem Wasserdampf in harten und festen Calciumsilikathydrat umzuwandeln. Für dieses Dampfdruck-Härtungsverfahren erhielt er im Jahr 1880 das Patent DRP 14195, die Grundlage für die Herstellung aller dampfgehärteten Baustoffe.

Im Jahr 1889 folgte die Erteilung eines Patentbeschlusses an E. Hoffmann, dem es gelungen war, das Aufblähen des Baustoffes vor der Erhärtung durch Porenbildung herbeizuführen. Er nutzte die Reaktion von verdünnter Salzsäure mit Kalksteinmehl, um Zement- und Gipsmörtel mit Luftporen herzustellen. Ein weiteres Patent wurde im Jahr 1914 an J. W. Aylsworth und F. A. Dyer für ein neues Verfahren erteilt, bei dem während der

Reaktion von Kalk mit Wasser und geringen Mengen von Metallpulver (0,1 bis 0,5 % Aluminiumpulver oder 2 bis 3 % Zinkpulver) gasförmiger Wasserstoff frei wird. Bei diesem Porosierungsverfahren bläht sich die Rohstoffmischung auf, Wasserstoff entweicht und wird durch Luft ersetzt.

Schwedische Wissenschaftler arbeiteten seit 1918 an der Entwicklung eines neuen Baustoffes, weil in Schweden infolge des ersten Weltkrieges eine teilweise dramatische Energieknappheit herrschte. Da das Land kaum über eigene Energieträger verfügte, verschärfte die Regierung die Anforderungen an die wärmetechnischen Eigenschaften von Baustoffen. Gewünscht waren Produkte mit hoher Wärmedämmung und geringem Herstellungs-Energieaufwand. Weitere gewünschte Eigenschaften waren, dass der Baustoff nicht verrotten, nicht brennbar und leicht bearbeitbar sein sollte. Die weitere Entwicklung des Porenbetons lässt sich wie folgt darstellen:

- 1923 gelingt dem Schweden Axel Eriksson erstmals die Herstellung von Porenbeton. Ein Jahr später erhält er das Patent für seine Erfindung.
- 1927 wendet Axel Eriksson ein Verfahren an, bei dem unter Zusatz eines Metallpulvers ein fein verteiltes, inniges Gemisch aus Kalk und Quarzsand angemacht wird. Durch die Kombination der anschließenden Porosierung mit der Dampfdruckhärtung legt er die Grundlagen für den modernen Porenbeton. In Anlehnung an dieses Verfahren wird 1933 auch ein Leichtstein aus Portlandzement und Quarzmehl entwickelt.
- 1929 beginnt in Schweden die industrielle Fertigung von Porenbetonzeugnissen. Anfang der 30er Jahre werden weitere Werke gebaut, um die Nachfrage nach Produkten aus Porenbeton zu decken.
- 1945 wird in Deutschland das Schneidverfahren mit straff gespannten Stahldrähten entwickelt, bei dem der standfeste Porenbetonblock äußerst maßgenau in kleinere Produkte aufgeteilt werden kann und Materialverluste minimiert werden können. Ebenso werden erstmalig großformatige und stahlbewehrte Bauteile hergestellt.

- 1958 werden erstmals bewehrte Dach- und Deckenplatten genormt (DIN 4223).
- 1959 erfolgt die Normung von Mauersteinen und Bauplatten (DIN 4165 und DIN 4166).
- 1960 wird mit der Entwicklung von Plansteinen Mauerwerk mit Dünnbettmörtel und geringem Fugenanteil ermöglicht.
- 1977 wird mit der „Nut-und-Feder“-Verbindung eine weitere Innovation im Mauerwerksbau eingeführt. Sie erleichtert das Bauen und beschleunigt den Rohbaufortschritt. Stoßfugen werden seitdem im Regelfall nicht mehr vermörtelt.
- 1983 werden Mauersteine aus Porenbeton mit Griffaschen versehen. Sie erleichtern die Handhabung und Verarbeitung von Plansteinen.
- 1987 führt die Entwicklung von Porenbeton-Planelementen zu einer weiteren Reduzierung der Arbeitszeitrichtwerte für Mauerwerk.
- 1994 stehen Flachstürze zur Verfügung, die aufgrund ihres geringen Gewichts von Hand und ohne Kran eingebaut werden können.
- 1996 erfolgt mit dem Planelement im Doppelpack ein weiterer Schritt zum kostenoptimierten Bauen.
- 2000 ermöglicht das „lange“ Planelement die Erstellung von 1,9 m² Mauerwerk mit nur einem Kranhub.
- 2004 werden raumgroße vorgefertigte Mauertafeln erstmals genormt (DIN 1053-4).
- 2007 erreichen Porenbeton-Plansteine eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,08 \text{ W}/(\text{mK})$.

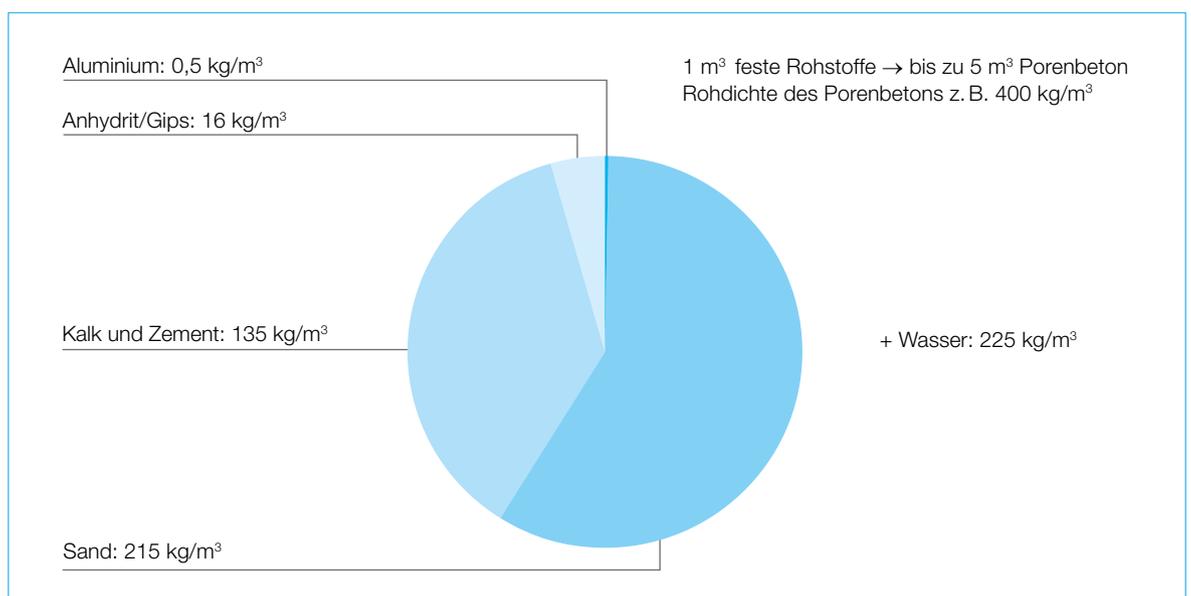
1.2 Herstellung

Produkte aus Porenbeton werden stationär in industriellen Verfahren hergestellt. Die Materialbasis von Porenbeton bilden die natürlichen Rohstoffe Quarzsand, Zement, Kalk und Wasser – sie sind nahezu unbegrenzt aus der Natur verfügbar. Als Treibmittel wird zur Porenbildung in geringen Mengen Aluminium (Recyclingprodukt) und bei bestimmten Rezepturen zusätzlich geringe Mengen Gips oder Anhydrit eingesetzt.

Aus einem Kubikmeter fester Rohstoffe können bis zu fünf Kubikmeter Porenbeton hergestellt werden, denn das Volumen des massiven Baustoffs besteht bis zu achtzig Prozent aus Luft – im Ergebnis also eine optimale Nutzung der Rohstoffressourcen. Durch den Einsatz regional abgebauter, mineralischer Rohstoffe mit kurzen Transportwegen, einen energieeffizienten Herstellungsprozess im Vergleich mit anderen Baustoffen sowie seine Langlebigkeit und Wertbeständigkeit leistet Porenbeton einen aktiven Beitrag zum nachhaltigen Bauen.

Der verwendete Sand ist ein natürlicher Rohstoff, der neben dem Hauptmineral Siliciumdioxid (SiO_2) natürliche Neben- und Spurenminerale enthält. Er ist ein wesentlicher Grundstoff für die hydrothermale Reaktion während der Dampfdruckhärtung. Sande, die z. B. Meersalz enthalten, können nicht bzw. erst nach einer Wäsche verarbeitet werden. Andere Beimischungen können besondere Rezepturen der Rohstoffmischung erforderlich machen. Vor der Verwendung wird der Sand in großen Mühlen zementfein oder zu Schlämmen gemahlen. Es können auch andere quarzhaltige Zuschlagsstoffe als Sand, z. B.

Abb. 1.1: Anteile der Rohstoffe bei der Herstellung von Porenbeton



Flugaschen, eingesetzt werden. Die wichtige Komponente für den Produktionsprozess und die Produktqualität ist der SiO_2 -Anteil.

Als Bindemittel wird gemahlener Branntkalk und Zement (Portlandzement oder auch andere Zementsorten) verwendet. Branntkalk wird durch Brennen von natürlichem Kalkstein, Zement vorwiegend aus Kalksteinmergel oder einem Gemisch aus Kalkstein und Ton hergestellt. Die natürlichen Rohstoffe werden gebrannt und anschließend gemahlen. Die Erstarrungszeit wird durch Zement und die Produkteigenschaften durch Anteile von Gips oder Anhydrit beeinflusst. Feines Pulver oder eine feinteilige Paste aus Aluminium wird mit Wasser zu einer Suspension gemischt und als Porosierungsmittel eingesetzt.

Durch Zusatz von Wasser erfolgt eine hydraulische Reaktion der Bindemittel. Außerdem ist Wasser zum Herstellen einer homogenen Suspension notwendig. Neben den Primärrohstoffen enthält die Mischung wiederverwendbaren gebrochenen und gemahlene Porenbeton aus der Produktion und sortenreines Recyclingmaterial von der Baustelle oder aus dem Rückbau. Da die Formgebung von Porenbetonprodukten während der Herstellung im nicht gehärteten Zustand erfolgt, können die anfallenden Porenbeton-schnittabfälle als Rückgutschlamm sofort wieder in den Prozess rückgeführt werden.

Die Grundstoffe werden dosiert, zu einer wässrigen Mischung verarbeitet und die Aluminium-Suspension zugegeben. Anschließend erfolgt das Einfüllen der Mischung in Stahlformen (Abb. 1.5). Dabei findet Schalöl als Trennmittel zwischen Form und Porenbeton-



Abb. 1.2: Rohstoffgewinnung Sand für die Herstellung von Porenbeton



Abb. 1.3: Rohstoffe für die Herstellung von Porenbeton

tonmasse Verwendung. Eingesetzt werden PAK-freie (PAK = polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) mineralische Öle unter Zusatz von langkettigen Additiven zur Viskositätserhöhung. Neben mineralischen Ölen finden auch natürliche Öle Anwendung.

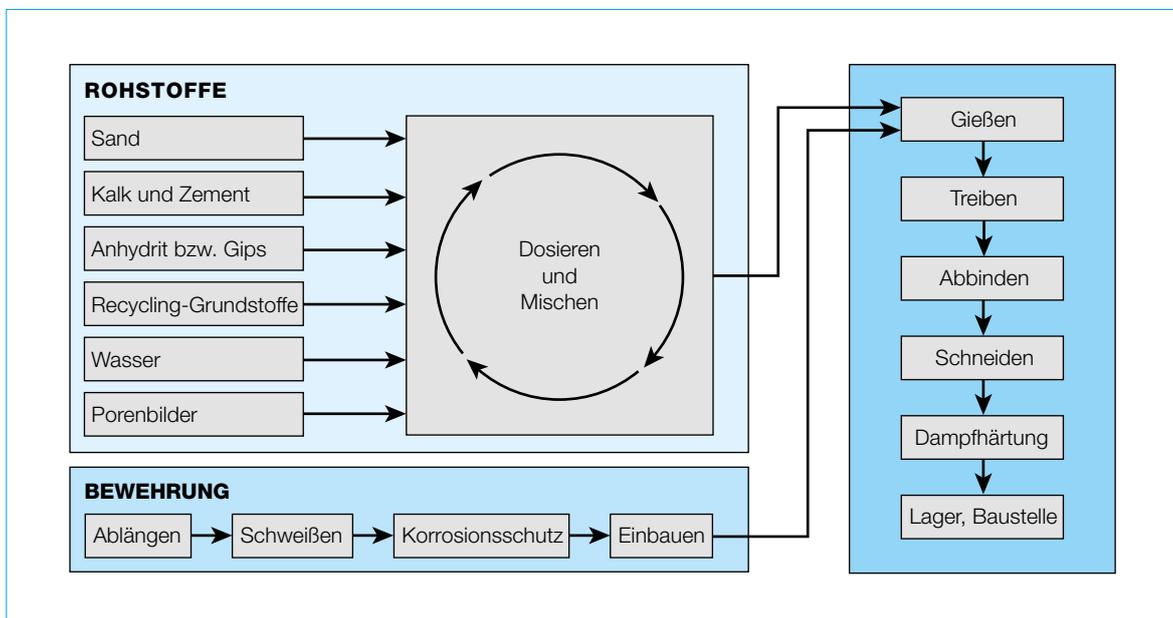


Abb. 1.4: Ablaufschema für die Herstellung von Porenbeton

Abb. 1.5: Einfüllen der Rohstoffmischung in Stahlformen



Für bewehrte Produkte wie Porenbeton-Flachstürze werden in einem vorgeschalteten Prozess Bewehrungsleitern hergestellt. Der Stahldraht wird von Rollen gezogen, gerichtet und abgelängt. Die Bewehrungsstäbe werden entsprechend den statischen Erfordernissen dimensioniert. Sie werden durch maschinelles Punktschweißen in Schweißautomaten zu Matten verbunden und ggf. zu Körben gebogen oder zusammengefügt.

Der Bewehrungsstahl wird gegen Korrosion geschützt, da Porenbeton im Vergleich zu Normalbeton einen niedrigeren pH-Wert besitzt und sich auf der Oberfläche des Stahls keine Passivschicht ausbildet. Hin-

zu kommt die Porosität, die das Eindringen von korrosionsfördernden Stoffen begünstigt. Der Korrosionsschutz wird üblicherweise in einem Tauchbad aufgebracht. In der Vergangenheit wurden vorwiegend stabile wässrige Dispersionen als organische Materialien (z. B. Bitumen oder organische Polymere mit einer Beimischung von Quarz zur Erhöhung der Haftung), aber auch anorganische Materialien (z. B. Zementschlämme mit Beimischungen zur Erhöhung der Dehnfähigkeit) eingesetzt. Aus Gründen des Umweltschutzes geht der Trend zu Wasserlacken oder Pulverbeschichtungen.

Die Bewehrungsleitern werden meistens vor dem Eingießen der Rohstoffmischung in die Formen eingebaut oder nach dem Gießen in die Masse getaucht und fixiert. Der Einbau wird äußerst exakt vorgenommen, weil der Inhalt einer Form später in mehrere Bauprodukte geschnitten wird.

Nach dem Eingießen der Masse in die Formen beginnen verschiedene chemische Reaktionen, von denen zunächst eine hervorzuheben ist: Das Aluminium reagiert mit Calciumhydroxid und Wasser (Abb. 1.6). Es entstehen Calciumaluminathydrat und Wasserstoffgas, welches die Rohstoffmischung bis zur erforderlichen Höhe in der Form auftreiben lässt. Das Gas entweicht während des ca. halb- bis einstündigen Treibvorgangs nach und nach rückstandsfrei in die

Abb. 1.6: Chemische Reaktion beim Treiben und bei der Luftporenbildung

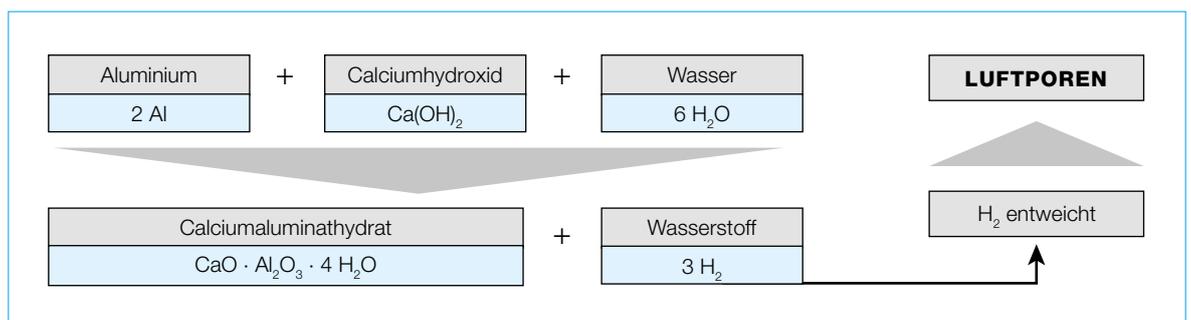


Abb. 1.7: Auftreiben der Rohmasse durch Porenbildung



Atmosphäre. In den Poren des entstehenden Baustoffs, die einen Durchmesser von 0,5 bis 1,5 mm aufweisen, wird das entweichende Wasserstoffgas durch Luft ersetzt. Kurz nach Ende des Treibens ist auch die Abbindereaktion soweit fortgeschritten, dass der Rohblock standfest ist (Abb. 1.8). Nach drei bis sechs Stunden wird er aus der Gießform entnommen.

Die standfesten Rohblöcke werden nach dem Entfernen der Gießformen mittels straff gespannter Stahldrähte präzise in die entsprechenden Formate geschnitten und profiliert. So entstehen als Ergebnis Porenbetonprodukte mit einer äußerst hohen Maßhaltigkeit und ebenen Oberflächen. Die beim Schneiden

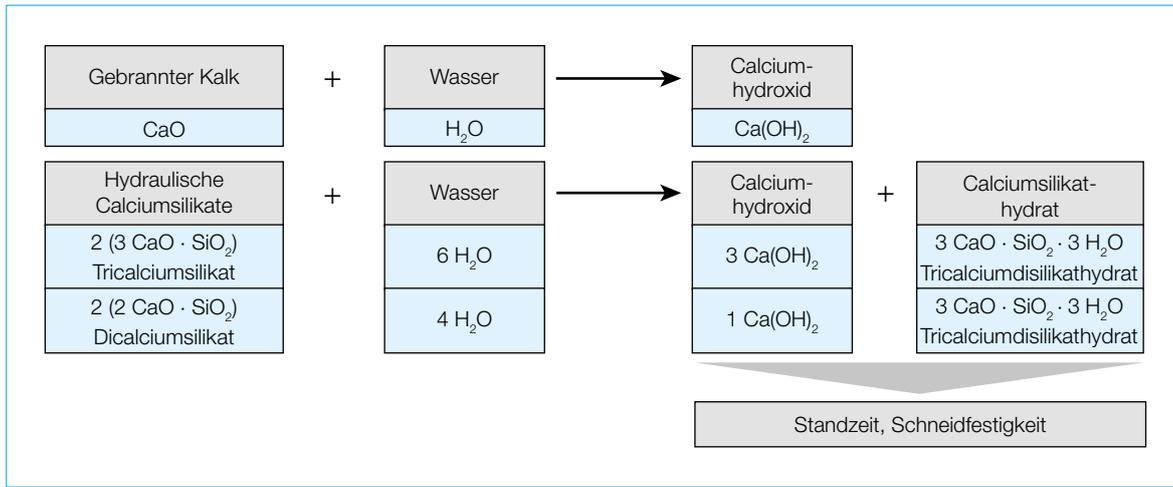


Abb. 1.8: Chemische Reaktion beim Abbinden

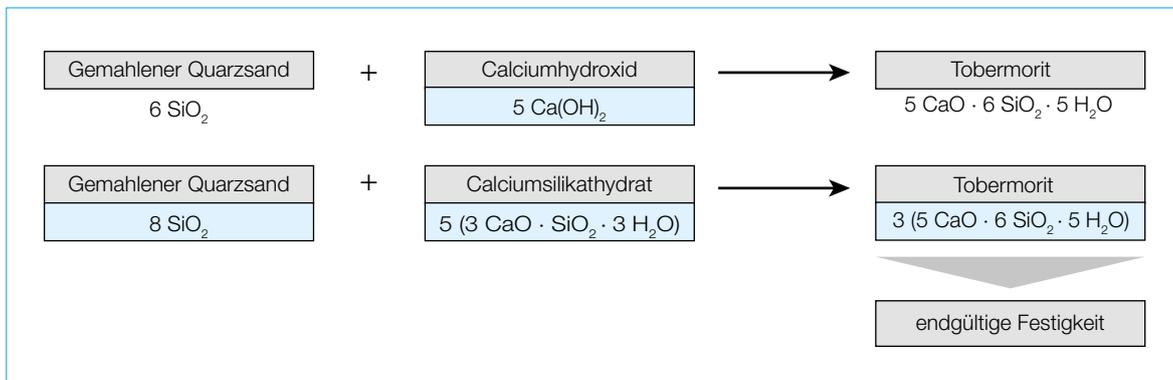


Abb. 1.9: Chemische Reaktion beim Härten

anfallenden Materialreste werden nach entsprechender Aufbereitung wieder der Rohstoffmischung zugeführt, wodurch die Porenbetonherstellung praktisch abfallfrei ist. Nach dem Schneiden folgt die Autoklavhärtung. Bei dieser Dampfdruckhärtung setzen sich das Siliciumdioxid (SiO₂) des Sandes und die Calciumoxid-Komponenten (CaO) des Zements und Kalks zu einem Calciumsilikathydrat um (Abb. 1.9). Dieser Vorgang läuft mit einer Temperatur von 170 bis 200 °C und einem Überdruck von 8 bis 11 bar über einen Zeitraum von 6 bis 10 Stunden ab. Die nun hoch druckfesten Porenbetonstege der geschlossenzelligen Porenstruktur (Abb. 1.10, Abb. 1.11) sind im Wesentlichen Calciumsilikathydrate, die dem in der Natur vorkommenden Mineral Tobermorit entsprechen.

Im Vergleich zu anderen Baustoffen ist das Verhältnis von Baustoffvolumen zu Rohstoffvolumen sehr gün-

stig. Oder anders ausgedrückt: Je nach Rohdichte entstehen aus 1 m³ fester Rohstoffe bis zu 5 m³ Porenbeton. So wird mit geringem Rohstoffeinsatz ein Produkt erzeugt, das geringes Gewicht, gute Wärmedämmeigenschaften und hohe Tragfähigkeit miteinander verbindet. Durch gezielte Einbindung der Luft als Wärmedämmstoff in die geschlossenzellige Struktur des Porenbetons wird die Wärmeleitfähigkeit des Produktes positiv beeinflusst. Unterschiedliche Rezepturen ergeben ein breites Spektrum an Rohdichten und Festigkeitseigenschaften.

Nach Abschluss des Herstellungsprozesses werden die Produkte auf Paletten von zweckmäßiger Größe gestapelt und mit einer wasserdichten Polyethylenfolie überzogen. Sie sind somit während des Transports und der Zwischenlagerung vor Beschädigungen und Witterungseinflüssen geschützt. Die Festigkeits- und

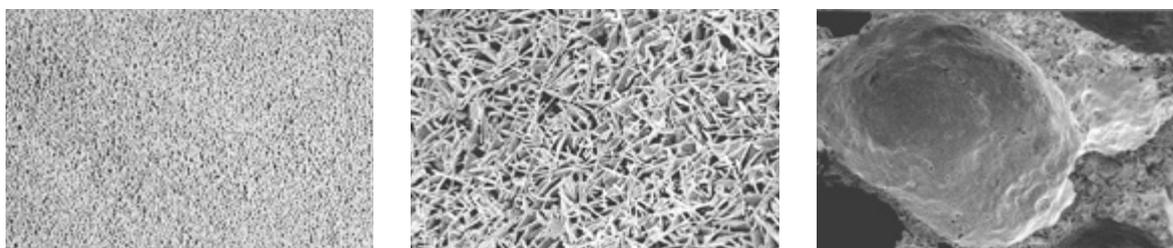


Abb. 1.10 (links): Geschlossenzellige Porenstruktur mit hoch druckfesten Porenbetonstege

Abb. 1.11 (Mitte und rechts): Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen der Porenstruktur

Abb. 1.12: Fertige Porenbetonsteine nach Dampfhärtung im Autoklaven



Rohdichteigenschaften von Porenbeton sind nach Abschluss des Herstellungsprozesses erreicht. Bei bestimmungsgemäßer Anwendung ist er unbegrenzt beständig. Auf Grundlage europäischer Regelungen zur Gütesicherung und zur Gewährleistung eines hohen Qualitätsstandards werden Porenbetonprodukte in werkseigenen Labors im Zuge der Eigenüberwachung regelmäßig überprüft. Geprüft werden u. a. Rohstoffqualität, Rohdichte, Druckfestigkeit, Schwinden, Korrosionsschutz des Bewehrungsstahls, Wärmeleitfähigkeit und die Maßhaltigkeit.

1.3 Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit

1.3.1 Ausgangssituation

Das Thema Nachhaltigkeit stellt heute eines der wichtigsten Leitbilder für die Zukunft dar. Nachhaltigkeit bedeutet, ökologische, ökonomische und soziale Gesichtspunkte gleichberechtigt zu berücksichtigen, um nachfolgenden Generationen eine intakte Umwelt mit gleichen Lebenschancen zu hinterlassen. Auch für den Gebäudesektor ist diese Aufgabe angesichts des Klimawandels und der knapper werdenden Ressourcen wichtig. Für die Wahrnehmung der Verantwortung gegenüber Umwelt und Gesellschaft sowie zur Sicherung der Wirtschaftlichkeit ist es erforderlich, Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Gebäuden, das heißt an ihre ökologische, ökonomische und soziale Qualität zu definieren.

Im Jahr 2001 wurde durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung der Leitfaden Nachhaltiges Bauen herausgegeben, der in der aktualisierten Fassung 2015 vorliegt [1.11]. Zusammen mit dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen

(BNB) wurde der Leitfaden verbindlich für Bauvorhaben der öffentlichen Hand eingeführt. Die Schutzziele des Bewertungssystems lassen sich mit den folgenden Indikatoren beschreiben:

Ökologische Qualität – Wirkungen auf die globale und lokale Umwelt

- Treibhauspotenzial (Global Warming Potential GWP) – Beschreibung des Beitrags von Emissionen zur Erwärmung der Luft
- Ozonschichtabbaupotenzial (Ozone Depletion Potential ODP) – Zerstörung der Ozonschicht
- Ozonbildungspotenzial (Photochemical Oxidant Creation Potential POCP) – bodennahe Ozonbildung
- Versauerungspotenzial (Acidification Potential AP) – Versauerung von Böden und Gewässern
- Überdüngungspotenzial (Eutrophication Potential EP) – Gewässer, Grundwasser und Böden
- Risiken für die lokale Umwelt – Reduzierung von Schadstoffen in Wasser, Boden, Luft bei der Verarbeitung auf der Baustelle oder durch Abwitterung in der Nutzungsphase
- Nachhaltige Materialgewinnung/Biodiversität – Schonung und Erhalt tropischer, subtropischer und borealer Waldregionen der Erde und damit verbunden der Erhalt der biologischen Vielfalt

Ökologische Qualität – Schonung natürlicher Ressourcen

- Primärenergiebedarf – Schonung begrenzter fossiler Energieträger, Erhöhung der Deckungsrate durch erneuerbare Energien
- Trinkwasserbedarf und Abfallaufkommen – Reduzierung der Umweltbelastung infolge Trinkwasseraufbereitung und Abwasserreinigung
- Flächeninanspruchnahme – Minimierung der zusätzlichen Bodenversiegelung und Maßnahmen zur Entsiegelung bereits versiegelter Flächen

Ökonomische Qualität

- Lebenszykluskosten (Baukosten, Betriebskosten, Kosten für Rückbau und Entsorgung)
- Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (Mittleinsatz, hohe Ressourcenproduktivität, Neubau und Sanierung)
- Wertstabilität (Verkehrs- und Marktwert über die Nutzungsdauer, Wertentwicklung)

Soziokulturelle Qualität

- Gesundheit, Behaglichkeit und Nutzerzufriedenheit (hygienisch unbedenkliche Innenraumqualität, Schadstoffemissionen aus Bauprodukten, thermischer Komfort im Sommer und Winter, visueller Komfort der Räume)
- Funktionalität (Barrierefreiheit, Flächeneffizienz, Umnutzungsfähigkeit, Fahrradkomfort, E-Mobilität)
- Sicherung der Gestaltungsqualität (gestalterische und städtebauliche Qualität, Kunst am Bau)
- Technische Qualität (Brandschutz, Schallschutz, Wärme- und Feuchteschutz, Reinigung und Instandhaltung, Bedienungs- und Instandhaltungsfreundlichkeit der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA), Rückbaufähigkeit des Gebäudes, Widerstandsfähigkeit gegen Naturgefahren)
- Prozessqualität (Projektvorbereitung, Integrale Planung, Komplexität und Optimierung der Planung, Ausschreibung und Vergabe, Voraussetzung für eine optimale Bewirtschaftung, Baustelle/Bauprozess, Qualität der Bauausführung)
- Standortmerkmale (Risiken am Mikrostandort, Verhältnisse am Mikrostandort, Quartiersmerkmale, Verkehrsanbindung, Nähe zu nutzungsrelevanten Einrichtungen, anliegende Medien/Erschließung)

Für die Bewertung des Gebäudes wird im Hinblick auf die Ökologie und Ökonomie ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren zugrunde gelegt. Die Qualitäten der Ökologie, der Ökonomie, des Sozialkulturellen sowie der technischen Qualität werden jeweils mit einem Anteil von 22,5 % und die Prozessqualität mit einem Anteil von 10 % berücksichtigt.

Lebenszyklusbetrachtung

Die Lebenszyklusbetrachtung gibt Aufschluss über die tatsächliche Qualität eines Gebäudes. Der Lebenszyklus eines Gebäudes setzt sich aus den Phasen Planung, Errichtung, Nutzung einschließlich Instandhaltung, Modernisierung sowie Rückbau, Verwertung und Entsorgung zusammen. Diese Lebensphasen eines Bauwerks müssen im Hinblick auf die unterschiedlichen Aspekte der Nachhaltigkeit analysiert und in ihrem Zusammenwirken optimiert werden.

1.3.2 Planung

Um die Aufwendungen und Wirkungen des Gebäudes über die gesamte Nutzungsdauer zu minimieren, kommt in der Planungsphase der ökonomischen und ökologischen Lebenszyklusbetrachtung (LCC – Life-

Cycle-Costing; LCA – Life-Cycle-Assessment) eine besondere Bedeutung zu.

Bei der ökonomischen Lebenszyklusanalyse werden die Investitionskosten nach DIN 276-1 [1.8] in Kostengruppen zusammengefasst sowie die Baunutzungskosten nach DIN 18960 [1.9] ermittelt. Die Energiekosten in der Betriebsphase können auf Grundlage des Energiebedarfs eines Gebäudes ermittelt werden. In Abhängigkeit vom Niveau des Wärmeschutzes eines Gebäudes inklusive der technischen Gebäudeausrüstung fallen 65 bis 80 % der Lebenszykluskosten als Baufolgekosten und nur 20 bis 35 % als Investitionskosten an.

Porenbeton weist als Massivbaustoff eine Wärmeleitfähigkeit ab 0,08 W/(mK) auf. Das bedeutet, dass mit hoch wärmedämmenden, monolithischen Außenwandkonstruktionen aus Porenbeton die Anforderungen der aktuell gültigen Energieeinsparverordnung (EnEV) ohne zusätzliche Dämmmaßnahmen erfüllt und sogar übertroffen werden, was zu Einsparungen beim Energiebedarf (Heizkosteneinsparung) während der Nutzungsphase führt. Dies gilt natürlich unter Berücksichtigung einer geeigneten Anlagentechnik entsprechend den Anforderungen der Energieeinsparverordnung.

Die technische und wirtschaftliche Lebens- und Nutzungsdauer eines Gebäudes hat bei der Lebenszyklusbetrachtung eine besondere Bedeutung. Diese hängt von der Lebensdauer der Bauteile, der Dauerhaftigkeit der Bauteileigenschaften, von der Ausführungsqualität, der konkreten Beanspruchung und den Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen ab.

Bauteile, die aus Porenbeton erstellt werden, erfüllen dauerhaft die an sie gestellten Anforderungen. Wandkonstruktionen aus Porenbetonsteinen erreichen eine sehr lange Lebensdauer und übersteigen die bei einer Lebenszyklusbetrachtung üblicherweise anzusetzenden Referenzzeiträume und Nutzungsdauern von 50 Jahren bei weitem. Sie weisen darüber hinaus einen niedrigen Instandhaltungsgrad auf, der sich z. B. bei monolithischen Außenwänden auf eine eventuelle Erneuerung des außenseitigen Putzes oder der farblichen Beschichtung begrenzt.

Die Basis der ökologischen Nachhaltigkeitsbetrachtung liefert die Methodik der Ökobilanzierung nach ISO 14040 und ISO 14044. Alle Prozesse im Lebenszyklus eines Produktes werden betrachtet, von der Rohstoffgewinnung über die Produktion der Materialien, die Fertigung des Produktes, die Nutzungsphase bis hin zu allen Prozessen am Ende des

Produktlebensweges. Ökobilanzen liefern detaillierte und transparente Daten über Bauprodukte und ihre Umweltwirkungen. Diese Daten bilden unter anderem die Basis für Umwelt-Produktdeklarationen, die wiederum ein wichtiger Baustein für die fundierte Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden sind. EPD ist die Kurzform für Umwelt-Produktdeklaration und steht für die englische Bezeichnung Environmental Product Declaration. Die in EPDs enthaltenen umfassenden und zugleich detaillierten Ökobilanzdaten und Informationen sind in einem einheitlichen Format auf wenigen Seiten übersichtlich zusammengefasst. Sie schaffen die Basis für die Beschreibung und Beurteilung von Bauwerken.

1.3.3 Errichtung

Rohstoffgewinnung

Porenbeton besteht überwiegend aus mineralischen Rohstoffen. Rohstoffe für die Kalk- und Zementherstellung sind ebenso wie Sand und Wasser in ausreichendem Maße vorhanden und werden umweltschonend abgebaut – das Gleichgewicht der Natur wird dabei auf keinen Fall beeinträchtigt. Obwohl die verwendeten Rohstoffe so gut wie unerschöpflich sind, wird darauf geachtet, sparsam mit ihnen umzugehen. Wie günstig der Rohstoffverbrauch ist, zeigt, dass aus 1 m³ Rohstoff ca. 5 m³ Porenbeton entstehen. Das in geringen Mengen als porenbildender Zusatz verwendete Aluminium ist größtenteils wiederverwertetes Material.

Der Sand wird meist in unmittelbarer Umgebung der Porenbetonwerke gewonnen. Dadurch werden die Transportwege und die daraus resultierenden Umweltbelastungen für den Hauptrohstoff auf ein Minimum reduziert. Alle weiteren Grundstoffe werden aus einem Umkreis von maximal 200 km zum Werk geliefert. Sie werden von autorisierten Herstellerbetrieben bezogen und unterliegen einer zertifizierten Qualitätsüberwachung.

Unter dem Aspekt „Gesundes Wohnen“ soll die mögliche Strahlenexposition durch natürliche Radionuklide und die Inhalation radioaktiver Edelgase auf ein unbedenkliches Maß eingeschränkt werden. Zum Schutz der Bevölkerung vor Strahlenexpositionen werden in Deutschland seit mehr als 20 Jahren Untersuchungen und Bewertungen der radioaktiven Stoffe in Baumaterialien durchgeführt. Das Bundesamt für Strahlenschutz hat in Natursteinen, Baumaterialien und mineralischen Reststoffen die Aktivitätskonzentrationen natürlicher Radionuklide bestimmt. Alle mineralischen Rohstoffe enthalten geringe Mengen

an Stoffen, die natürlich radioaktiv sind, vor allem die Isotope Radium-226 (Ra-226), Thorium-232 (Th-232) und Kalium-40 (K-40).

Durch in Deutschland verwendete Bauprodukte, die in harmonisierten europäischen Normen geregelt sind, wird keine erhöhte Strahlenexposition beim Aufenthalt in aus diesen Bauprodukten errichteten Bauwerken verursacht. Im Vergleich zu anderen Baustoffen enthalten dabei Porenbeton-Produkte nur sehr geringe Konzentrationen an radioaktiven Isotopen, die weit unter den empfohlenen Grenzwerten liegen [1.3].

Neben der natürlichen Radioaktivität der Baustoffe ist unter Umständen die Radonbelastung im Erdboden zu beachten. Radon ist ein natürlich vorkommendes Edelgas, das aus dem radioaktiven Zerfall von Radium entsteht. Es kann aus dem Untergrund in Gebäude eindringen und zur Innenraum-Luftbelastung führen. Angaben zur regionalen Radonbelastung in der Bodenluft, die von den geologischen Formationen abhängt, können der Radonkarte Deutschland entnommen werden [1.2].

Herstellung

Porenbetonsteine erweisen sich im Vergleich zu anderen Wandbaustoffen in ökologischer Hinsicht als besonders günstig bei der Herstellung. Der Energieverbrauch für die eigentliche Produktion von Porenbeton wird im Wesentlichen durch die Dampfdruck-erzeugung im Autoklaven bei 8 bis 12 bar und vergleichsweise niedrigen Temperaturen von 170 bis 200 °C über einen Zeitraum von 6 bis 10 Stunden bestimmt, um den Porenbeton in Abhängigkeit von der gewünschten Festigkeitsklasse zu härten.

Dabei ist Erdgas der vorwiegend genutzte Energieträger, wodurch die Emissionen der Abgase gering gehalten werden können. Die Energiebilanz kann durch Verwendung von regenerativen Energien verbessert werden. Durch Mehrfachnutzung des Wasserdampfes wird zusätzlich Energie eingespart. Auch das entstehende Kondensat wird wiederverwendet: Zusammen mit Frischwasser wird es für den Prozess genutzt und dem Rohstoffgemisch beigegeben. Durch eine konsequente Mehrfachnutzung des Betriebswassers wird es möglich, dass bei der Porenbetonproduktion keine Abwässer anfallen.

Die Porenbetonsteine werden anschließend auf Holzpaletten gestapelt und mit recyclebaren Folien aus Polyethylen (PE) überzogen. Die Verpackungseinheiten für Porenbetonprodukte werden für einen optimalen Transport ausgelegt.

Transport

Aufgrund des geringen Gewichtes von Porenbeton kann pro LKW mehr Mauerwerksmaterial transportiert werden als bei anderen Steinarten. Entladegeräte auf den LKWs reduzieren den Baustellentransport. Diese Geräte können bei kleinen Baustellen auch die Bereitstellung der Mauersteine bis in das zweite Geschoss übernehmen.

Verarbeitung

Bei der Verarbeitung von Wandbauprodukten aus Porenbeton gibt es viele Möglichkeiten der Rationalisierung, die das Verarbeiten erleichtern. Griffaschen erlauben das handliche, kräfte- und gesundheitschonende Vermauern von Porenbeton-Plansteinen. Die Ausbildung mit Nut-Feder-System machen eine Vermörtelung der Stoßfugen überflüssig. Porenbeton-Plansteine und -Planelemente mit einer bauüblichen Feuchte und einem Gewicht von mehr als 25 kg werden entsprechend den Anforderungen der Bau-Berufsgenossenschaft mit Versetzgeräten vermauert.

Bei der Erstellung einer Mauerwerkswand aus Porenbeton-Planelementen kann die Anzahl der erforderlichen Steine pro m² Wand gegenüber konventionellem Mauerwerk erheblich reduziert werden. Passstücke können auf der Baustelle leicht zugeschnitten werden. Für das nachträgliche Bearbeiten, z. B. das Anlegen von Schlitzern und Aussparungen, sind Fräsen mit Staubabsaugung zu verwenden. Somit können alle Anforderungen an den Arbeitsschutz beim Verarbeiten von Porenbetonprodukten erfüllt werden.

1.3.4 Nutzung

In der Nutzungsphase sind insbesondere die nachfolgenden Kriterien von besonderer Bedeutung (weitere können gebäude-/nutzungsspezifisch hinzukommen):

- Energieverbrauch (Heizenergiebedarf, Warmwasserversorgung, Kühlung, Lüftung)
- Behaglichkeit (thermische, hygrische und akustische Behaglichkeit)
- Gesundheit (Brandschutz, Vermeidung von Schimmelpilzbildung, Raumluftqualität)
- Instandhaltung

Energieverbrauch

Der Verbrauch von Primärenergie für Heizung, Trinkwarmwassererwärmung, Lüftung, Klimatisierung und Beleuchtung insbesondere unter Berücksichtigung erneuerbarer Energien ist im Rahmen eines gesamt-

heitlichen energetischen Bewertungskonzeptes zu begrenzen. Darüber hinaus ist es technisch möglich, Gebäude zu errichten, die einen noch geringeren Energiebedarf haben als nach der Energieeinsparverordnung (EnEV) vorgeschrieben ist. Hier sind im Zusammenhang mit energiesparenden Gebäuden z. B. das KfW-Effizienzhaus, Passivhaus oder Niedrigstenergiegebäude zu nennen. Dabei muss es das Ziel sein, durch passive baukonstruktive Maßnahmen den Energiebedarf so zu reduzieren, dass aufwendige Anlagentechnik auf das notwendige Maß reduziert werden kann. Nach dem Erneuerbare-Energie-Wärme-gesetz (EEWärmeG) ist ein Mindestwert an erneuerbarer Energie zur Deckung des Heizwärme- und Kühlbedarfs beim Neubau zu erfüllen (siehe Kapitel 5 „Wärme“).

Die Energieaufwendungen werden entsprechend der Energieeinsparverordnung für Wohngebäude und Nichtwohngebäude ermittelt. Mit seinen hervorragenden wärmeschutztechnischen Eigenschaften erweist sich Porenbeton als Baustoff, der den anspruchsvollen Klimaschutzziele gewachsen ist. Als Massivbaustoff bietet er eine Wärmeleitfähigkeit ab 0,08 W/(mK) in der Rohdichteklasse 0,35. Bereits eine 36,5 cm dicke einschalige, lediglich verputzte Außenwand besitzt einen U-Wert von 0,21 W/(m²K). Im Außenwandbereich können damit die Anforderungen der Energieeinsparverordnung mit monolithischen Wänden aus Porenbeton ohne zusätzliche Dämmmaßnahmen erfüllt werden. Das gilt unter der Voraussetzung, dass auch die Anlagentechnik den Anforderungen der aktuellen EnEV genügt.

Der homogene Wandaufbau erlaubt nahezu wärmebrückenfreie Konstruktionen. Eine verputzte einschalige Wand aus Porenbeton gilt ohne Zusatzmaßnahmen als luftdicht im Sinne der Energieeinsparverordnung. Auch für das Erstellen von KfW-Effizienzhäusern, Passivhäusern oder Niedrigstenergiegebäuden sind Wandbauprodukte aus Porenbeton aufgrund ihrer hervorragenden wärmeschutztechnischen Qualität bestens geeignet.

Beim Neubau ist in jedem Fall unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit zu prüfen, ob der Energiebedarf für die Warmwasserversorgung durch solarthermische Anlagen unterstützt werden kann.

Die gute Wärmespeicherfähigkeit von Porenbeton sorgt insbesondere beim sommerlichen Wärmeschutz für eine temperatenausgleichende Wirkung zwischen Außen- und Innentemperatur über die Mauerwerks-wände aus Porenbeton (siehe Kapitel 5 „Wärme“).

Behaglichkeit

Angemessene Behaglichkeit ist ein wichtiges Kriterium für ein gesundes Raumklima. Sie hängt u. a. von der Raumlufttemperatur und der Raumluftfeuchte ab (Abb. 1.13). Der geringe Wärmedurchgang durch Außenwände aus Porenbetonmauerwerk führt zu relativ hohen raumseitigen Oberflächentemperaturen der Außenbauteile, die wiederum eine größere thermische Behaglichkeit mit sich bringen (Abb. 1.14)

Durch Innen-Oberflächentemperaturen, die nur wenig unter denen der Lufttemperatur im Innenraum liegen, wird das von schlecht gedämmten Gebäuden her bekannte Gefühl der Zuglufterscheinungen in Außenwandnähe vermieden. Deshalb ist es möglich, die

Raumlufttemperatur in Räumen mit gut dämmenden Außenwänden, z. B. aus Porenbeton-Wandbauprodukten, um 1 oder 2 K zu senken, ohne dass dies als unangenehm empfunden wird.

Bei kurzzeitiger Erhöhung der Raumluftfeuchte, hervorgerufen z. B. durch Waschen oder Kochen, aber auch durch schwere körperliche Arbeit, kann der auf dem Porenbeton aufgebrachte Putz Feuchtigkeit absorbieren und bei Lüftung wieder an die Raumluft abgeben. Dies wirkt sich regulierend auf das Raumklima und die Behaglichkeit aus.

Die akustische Behaglichkeit hat eine große Bedeutung für die Gesundheit und das Wohlbefinden von Menschen und ist besonders wichtig im Wohnungsbau. Der Wohnraum dient dem Menschen zur Entspannung und zum Ausruhen und auch zur Abschirmung des privaten Bereiches gegenüber dem Nachbarn. Außenwandkonstruktionen und zweischalige Haustrennwände aus Porenbetonmauerwerk erreichen ohne zusätzliche Maßnahmen einen normgerechten Schallschutz (siehe Kapitel 7 „Schall“).

Gesundheit

Die konkreten Schutzziele des Brandschutzes sind durch die höchste Stufe des Gesundheitsschutzes definiert. Bauliche Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und instand zu halten, dass der Entstehung eines Brandes und der Ausbreitung von Feuer und Rauch (Brandausbreitung) vorgebeugt wird und bei einem Brand die Rettung von Menschen und Tieren sowie wirksame Löscharbeiten möglich sind. Porenbeton ist ein mineralischer Baustoff, der keine brennbaren Bestandteile enthält und somit gemäß DIN 4102-1 der höchsten Baustoffklasse A1 „nicht brennbar“ zugeordnet ist. Je nach konstruktiver Ausbildung der Wandkonstruktion ist Porenbeton für alle Feuerwiderstandsklassen optimal einsetzbar (siehe Kapitel 8 „Brand“).

Eine Gefährdung der Gesundheit durch Schimmelpilzbildung ist gegeben, wenn in den oberflächennahen Bereichen und der Raumluft über längere Zeit eine Luftfeuchtigkeit von mehr als 80 % relativer Feuchte vorliegt. Von daher kommt bei der Außenhülle eines Gebäudes den Wärmebrücken eine besondere Beachtung zu. Bei falscher Konstruktionswahl oder fehlerhafter Planung bzw. Ausführung der Konstruktionsdetails kann es zu Tauwasserausfall/Durchfeuchtung kommen und in der Folge können Schimmelpilzbefall und Bauschäden auftreten. Homogene Außenwände aus Porenbeton erlauben nahezu wärmebrückenfreie Konstruktionen, die diese negativen Folgen weitestgehend ausschließen.

Abb. 1.13: Behaglichkeit in Abhängigkeit von der Raumlufttemperatur und der relativen Raumluftfeuchte

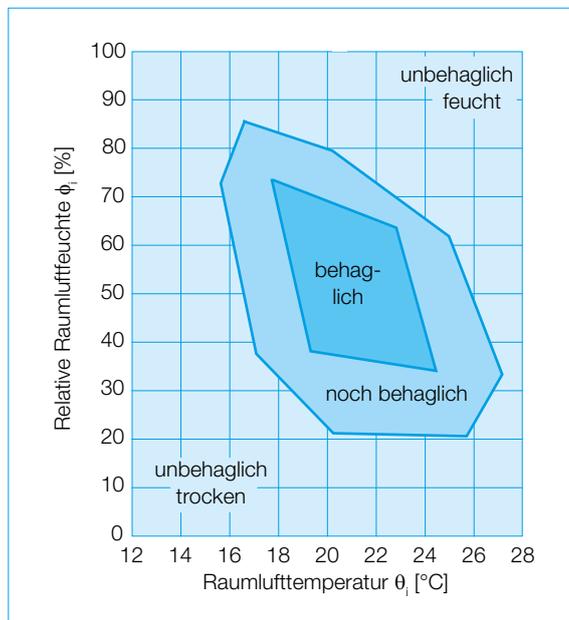
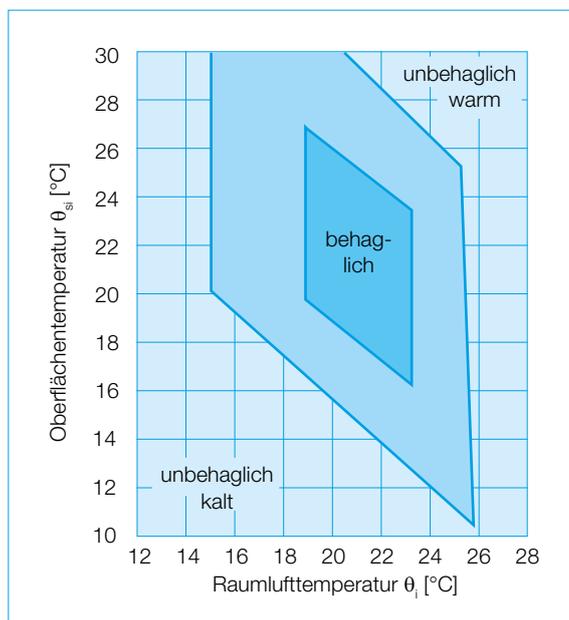


Abb. 1.14: Behaglichkeit in Abhängigkeit von der Raumlufttemperatur und der raumseitigen Oberflächentemperatur der Außenbauteile



Zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung ist aber genauso das richtige Nutzerverhalten mit ausreichendem Heizen und ordnungsgemäßem Lüften wichtig (siehe Kapitel 5 „Wärme“ und 6 „Feuchte“).

Im Sinne des Gesundheitsschutzes ist auch der Schadstoffgehalt als Kriterium für die Raumluftqualität wichtig. Die Gesamtschadstoffkonzentration in einem Raum ist u. a. abhängig vom Schadstoffausstoß der darin lebenden Menschen, der Einrichtungsgegenstände, der verwendeten Baumaterialien und deren Oberflächenschichten sowie der technischen Ausrüstung. Eine zu hohe Schadstoffkonzentration kann sich schädigend auf die Gesundheit der Menschen auswirken. Wirksamste Gegenmaßnahme ist eine regelmäßige Lüftung mehrmals am Tage.

Da Porenbeton im eingebauten Zustand weder staub- oder faserförmige noch gasförmige Schadstoffe an die Raumluft abgibt, leistet er eine optimale Voraussetzung für eine gute Raumluftqualität. Ebenso emittiert Porenbeton keine schädlichen Stoffe wie VOC (volatile organic compounds = flüchtige organische Substanzen). Auch im Falle eines Brandes gehen vom Porenbeton keine gesundheitlichen Risiken aus. Beim Brand entstehen keine toxischen Gase oder Dämpfe.

Instandhaltung

Aufgrund ihrer Robustheit und Langlebigkeit sind Wände aus Porenbetonmauerwerk instandhaltungsfrei. Lediglich auf Porenbetonwände aufgebrachte Putze, Beschichtungen oder Bekleidungen benötigen eine regelmäßige Inspektion und gegebenenfalls eine Wartung.

1.3.5 Rückbau, Recycling und Deponierung

Am Ende des Lebenszyklus eines Gebäudes steht der Rückbau mit den weiteren Prozessen Deponierung oder Recycling.

Deponierung

Die Entstehung von Abfällen ist im Sinne der Kreislaufwirtschaft soweit wie möglich zu vermeiden. Traditionell ist Baustellenabbruch Abfall und wird auf Deponien entsorgt. Erst in den letzten Jahren wird er verstärkt einer Wiederverwertung zugeführt. Dies geschieht im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes, das die Deponierung von Abfällen zur Verwertung untersagt. Sortenreiner Porenbeton aus der Produktion oder dem Rückbau können als Produktionsrohstoff der Herstellung oder anderen Verwertungswegen zugeführt werden.

In manchen Fällen ist es allerdings wirtschaftlich nicht sinnvoll, Porenbetonreste in die Herstellerwerke zurückzuführen. Mindermengen, große Transportentfernungen oder Vermischungen mit anderen Baustellenabfällen können hierfür die Ursache sein.

Abbruch und Rückbau von Gebäuden bzw. Bauteilen aus Porenbeton sind gesundheitlich unbedenklich. Der entstehende Staub enthält keine lungengängigen und schwer löslichen Fasern oder andere Schadstoffe. Die Staubbelastung bei Abbrucharbeiten bzw. bei der Zwischenlagerung von Bauschutt auf dem Abrissgelände kann durch Besprühen mit Wasser und somit durch wirksame Bindung des Staubes gemindert werden.

Obwohl die Porenbetonindustrie die Wiederverwertung von Altmaterial anstrebt, hat sie umfangreiche Untersuchungen durchführen lassen, um Aufschluss über das Verhalten dieses Baustoffes unter Deponiebedingungen zu erhalten. Sämtliche Untersuchungen belegen, dass Porenbeton problemlos auf Deponien der Deponieklasse 1 nach der Deponieverordnung abgelagert und nach dem Abfallschlüssel 17 01 01 entsprechend der Anlage zur Abfallverzeichnisverordnung entsorgt werden kann. Darüber hinaus ist Porenbeton gemäß der Entscheidung des Rates (2003/33/EG) [1.10] vom 19. Dezember 2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien der Deponieklasse „Nicht gefährliche Abfälle“ zuzuordnen.

Recycling und Wiederverwendung

Sortenreiner Porenbeton aus der Produktion oder dem Rückbau können als Produktionsrohstoff der Herstellung zugeführt werden. Seit vielen Jahren forscht die Porenbetonindustrie mit Kooperationspartnern an weiteren Verwertungswegen außerhalb der eigenen Herstellung. Beispielhaft seien hier die folgenden Verwertungsmöglichkeiten und Untersuchungen genannt:

- Sortenreine Porenbetonreste können zu Granulaten weiterverwertet werden und z. B. als Ölbinder, Trocken- und Wärmedämmschüttungen oder Katzenstreu Verwendung finden.
- Bioaktivierung von Porenbeton- und Kalksandstein-Recyclinggranulaten mit Methan oxidierenden Bakterien zur Reduktion von Methanausgasungen aus Hausmülldeponien – ein Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz – METHANOX II:
Mit dieser Arbeit wurde im Rahmen von Laboruntersuchungen und in situ auf der Blocklanddeponie in Bremen aufgezeigt, dass fein abgestufte Gemische

- aus Porenbeton- und Kalksandstein-Recyclinggranulaten als Deponieabdeckung geeignet sind. Dabei dienen diese gleichzeitig als Träger für Methan abbauende Mikroorganismen, die klimaschädliches Methan in das vergleichsweise „weniger schädliche“ CO₂ umwandeln. Dieses Projekt wurde in enger Zusammenarbeit der Forschungsvereinigungen Porenbetonindustrie e. V., Berlin und Kalksand e. V., Hannover, der Forschungsvereinigung Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen e. V., Bremen sowie dem Umweltbetrieb Bremen (Betreiber der Blocklanddeponie Bremen) durchgeführt. Das Forschungsvorhaben (AiF-Nummer: 16637 N) wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) gefördert [1.4].
- Verwertung und Behandlung von fein schluffigem Baggergut aus Gewässersedimenten durch Konditionierung mit Porenbetongranulat aus Produktionsresten:
Aufbauend auf einer Machbarkeitsstudie [1.5] wurde 2014 ein Referenzversuch zur Verwertung und Behandlung von fein schluffigem Baggergut aus Gewässersedimenten durch Konditionierung mit Porenbetongranulat aus Produktionsresten [1.6] erfolgreich durchgeführt. Ziel war es, durch die Behandlung des bei Nassbaggerungen anfallenden Baggergutes mit Porenbetongranulat ein bodenähnliches Substrat zu gewinnen, das sich beispielsweise als Rekultivierungsmaterial im Landschaftsbau einsetzen lässt.
 - Hochwertige Verwertungswege für Porenbetonbruch in Mörteln und Recycling-Leichtsteinen für Mauerwerk:
In den letzten 15 Jahren wurden von der Forschungsvereinigung für Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen e. V. (RWB) über verschiedenste Förderprogramme (AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF); Förderprogramm Angewandte Umweltforschung und aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung EFRE; Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU); Fördermittel der Hansestadt Bremen) in der MPA Bremen verschiedenste Forschungsvorhaben zur Verwendung von Porenbetonbruch aus dem Rückbau durchgeführt:
 - Verwendung von Porenbeton-Rezyklaten für Rezepturen von Werk trockenmörteln
 - Verwendung von Porenbeton-Rezyklaten für die Herstellung von Recycling-Leichtsteinen

Literatur

- [1.1] Leitfaden „Nachhaltiges Bauen“, Hrsg.: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), 2015
- [1.2] Bundesamt für Strahlenschutz: Radonkarte Deutschland <http://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/radon/boden/radon-karte.html>
- [1.3] Keller, G.; Muth, H.: Strahleneinwirkungen durch Radon in Wohnhäusern, Bauphysik Jahrgang 15 (1993), H. 5, S. 141-145
- [1.4] AiF-Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.: Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 16637 N: Bioaktivierung von Porenbeton- und Kalksandstein-Recyclinggranulaten mit Methan oxidierenden Bakterien zur Reduktion von Methan ausgasungen aus Hausmülldeponien – ein Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz – METHANOX II“, Januar 2015
- [1.5] Labor für Umweltschutz und Chemische Analytik LUS GmbH: Machbarkeitsstudie zur Verwertung von Porenbeton aus Abriss als Zuschlagstoff für aquatisches Baggergut zur Herstellung eines „Bodenverbessers“ für den Landschaftsbau, Magdeburg Mai 2012
- [1.6] Sachverständigenbüro Dr. H. Grahlert, Labor für Umweltschutz und Chemische Analytik LUS GmbH und Kooperation mit verschiedensten Behörden und Industriepartnern: Referenzversuch zur Verwertung und Behandlung von feinschluffigem Baggergut aus Gewässersedimenten durch Konditionierung mit Porenbetongranulat aus Produktionsresten, Magdeburg 2014
- [1.7] Hlawatsch, F.; Aycil, H. und Kropp, J: Hochwertige Verwertungswege für Porenbetonbruch in Mörteln und Leichtsteinen für Mauerwerk; Kongress der Forschungsvereinigung für Recycling und Wertstoffverwertung im Bauwesen e.V. (RWB), Bremen 2018
- [1.8] DIN 276-1:2008-12 – Kosten im Bauwesen – Teil 1: Hochbau
- [1.9] DIN 18960:2008-02 – Nutzungskosten im Hochbau
- [1.10] 2003/33/EG: Entscheidung des Rates vom 19. Dezember 2002 zur Festlegung von Kriterien und Verfahren für die Annahme von Abfällen auf Abfalldeponien gemäß Artikel 16 und Anhang II der Richtlinie 1999/31/EG

Bildnachweise

Abb. 1.2: © gsz-Fachpressebüro, Berlin

Abb. 1.3/Abb. 1.5/Abb. 1.7/Abb. 1.12: © C. Schlamann | blickfein photography

Abb. 1.10/Abb. 1.11: © Bundesverband Porenbetonindustrie e.V.

