Sonderdruck aus:
Deutsches IngenieurBlatt – DiB Special 12/2006
„Dämmtechnik“, Seiten 12-15
© 2006 Schiele-Schön GmbH
Nr. 2207

DiB Special Dämmtechnik

DAS PLUS IM DEUTSCHEN INGENIEURBLATT

Leistungsfähigkeit von Polystyrol-Hartschaumstoffen

Lastabtragende Wärmedämmung

Für einen sicheren, umfassenden und wärmebrückenfreien Wärmeschutz in den lastabtragenden Bereichen der Gebäudehülle stehen leistungsfähige Wärmedämmstoffe zur Verfügung. Im folgenden Beitrag wird den Planern und Anwendern das Materialverhalten bei dauerhafter Lasteinwirkung aufgezeigt und es werden die für die Anwendung dieser Dämmstoffe als lastabtragende Wärmedämmung bei Dauerdruckbeanspruchung erforderlichen Kennwerte vorgestellt und erläutert.

Abb. 1: Lastabtragende Wärmedämmung im Gründungsbereich.

Bei ausreichend tragfähigem Baugrund werden Gebäude auf Streifen- und Einzelfundamenten oder auf biegesteifen Bodenplatten aus Stahlbeton gegründet. Über diese Bauteile wird die Last des Gebäudes in den Untergrund abgetragen. Am Beispiel von extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoffen (XPS), Marke Styrodur®, und den expandierten Polystyrol-Hartschaumstoffen, Marke Styropor®, wird gezeigt, wie durch langjährige Untersuchungen [1] und [2] abgesicherte Langzeitkennwerte über das Kriechverhalten dieser Baustoffe gewonnen wurden.

Druckfestigkeit von Wärmedämmstoffen

Das Verformungsverhalten von polymeren Hartschaumstoffen ist von der Größe der einwirkenden Spannung und vom zeitlichen Belastungsablauf abhängig. Bei der Auswahl von Wärmedämmstoffen für druckbeanspruchte Anwendungen muss deshalb klar sein, wie lange die Last in der Konstruktion auf die Baustoffe einwirkt:

- kurzzeitig, für einige Minuten während des Einbaus
- zeitlich begrenzt, für mehrere Stunden oder Wochen, z.B. durch ein parkendes Auto oder
- dauerhaft für die Lebensdauer eines Gebäudes, z.B. durch das Gewicht einer Wand oder des Gebäudes.

Wirkt bei Kurzzeitdruckbelastungen auf die Fläche A eines elastischen Körpers die Druckkraft F ein, so entsteht in diesem Körper die Druckspannung σ

$$\sigma = F / A \qquad (1)$$

Im elastischen Bereich des Materials führt die Krafteinwirkung zu einer Verformung:

$$\varepsilon = \Delta l / l \qquad (2)$$

Die Druckspannung ist der Verformung proportional:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \qquad (3)$$

Proportionalitätsfaktor ist der Elastizitätsmodul E des Materials. Über diesen Elastizitätsmodul kann im Elastizitätsbereich die jeweilige Verformung für jede Druckbeanspruchung angegeben werden:

$$\varepsilon = 1 / E \cdot \sigma \qquad (4)$$

Tabelle 1: Beispiele für die Ermittlung der Findley-Parameter m und b nach EN 1606 aus Langzeitdruckversuchen.

Produkt	Prüfspannung N/mm² oder MPa	m	b	Bestimmtheitsmaß r²
Styrodur 4000	0,08	0,0002051	0,237387	0,960
	0,12	0,0003566	0,215132	0,957
	0,16	0,0005007	0,210782	0,960
	0,20	0,0005945	0,229609	0,976
	0,24	0,0006808	0,244982	0,977
	0,28	0,0008063	0,284399	0,957
Styrodur 5000	0,18	0,0001508	0,252375	0,989
	0,27	0,0002232	0,251869	0,982
	0,36	0,0003774	0,248318	0,985
	0,45	0,0007544	0,243372	0,997
	0,64	0,0020550	0,312619	0,998

Polystyrol-Hartschaumstoffe zeigen je nach Elastizität des Schaumgefüges bei Druckbeanspruchung prinzipiell unterschiedliche Verformungsverhalten. Dies ist im Druckspannungs-Stauchungs-Diagramm (Abb. 2) schematisch dargestellt. Im linken Diagramm in Abb. 2 ist der Fall dargestellt, dass mit linear zunehmender Last, die zu zunehmender Druckspannung im Material führt, zunächst eine proportionale Zunahme der Verformung festzustellen ist. Vergrößert sich mit zunehmender Druckspannung auch die zunehmende Verformung, was im Diagramm als Rechtskrümmung der Kurve ersichtlich ist, kommt es im Druckspannungs-Stauchungs-Diagramm zur Ausbildung eines örtlichen Druckspannungs-Maximums (Abb. 2 links). Dies bedeutet, dass im Materialgefüge die schwächsten Zellen gebrochen sind. Dieses örtliche Maximum der Druckspannung wird als Druckfestigkeit σ_{dB} des Materials bezeichnet. Bei XPS ist dies meist bei Verformungen ε_{dB} zwischen 1 und 2% zu beobachten.

Bei sehr elastischem Material, z.B. EPS und bei XPS im unteren Rohdichtebereich, wird mit zunehmender Druckspannung eine kontinuierliche Zunahme der Verformung beobachtet. Dieses Materialverhalten ist in Abb. 2 rechts dargestellt. Weil für diese Produkte eine „Druckfestigkeit" als Beginn des Materialbruches nicht definiert werden kann, wird als höchst zulässige Druckspannung σ_{d10} der Wert qasi als „Druckfestigkeit" festgelegt, bei dem das Material im Vergleich zu seiner ursprünglichen Dick 10% verformt ist (ε_{d10}).

Bei weiterer Steigerung der Druckspannung nimmt bei Polystyrol-Hartschaumstoffen die Verformung in der in Abb. 3 dargestellten Form zu. Bei Belastungen außerhalb des Elastizitätsbereiches bis zum 10-fachen der Druckfestigkeit oder der Druckspannung bei 10% Stauchung treten Verformungen zwischen 80 und 90% der ursprünglichen Dicke auf. Die Druckfestigkeit oder Druckspannung bei 10% Stauchung wird nach EN 826 [3] ermittelt und gilt nur für kurzzeitige Belastungen. Hersteller von Wärmedämmstoffen geben nach den europäisch harmonisierten Produktnormen [4] folgendes Symbol für eine Druckspannung oder Druckfestigkeit zum Bespiel von x = 300 kPa, das entspricht 0,3 MPa oder 0,3 N/mm² an:

CS(10\Y) x , z.B. CS(10\Y)300

wobei CS für „compressive strength" oder „compressive stress" steht. Der in der Klammer stehende Werte „10" steht für 10% Stauchung und „Y" für „Bruch".

Vereinzelt werden in Produktbeschreibungen von Dämmstoffherstellern Druckfestigkeits- oder Druckspannungskennwerte bei 1%, 2% oder 5% Stauchung angegeben. Der Anwender muss bei solchen Angaben darauf achten, ob diese Werte ebenfalls nur für kurzzeitige Beanspruchungen gelten. Denn aus wärmeschutztechnischen Gründen werden Langzeitdruckfestigkeitswerte so bemessen, dass in der vorgesehenen Nutzungsdauer, im Wohnungsbau z.B. 50 Jahre, die Gesamtverformung des Dämmstoffes ebenfalls auf 2% begrenzt wird. Nach den europäisch harmonisierten Produktnormen [4] wird z.B. folgendes Symbol für die zulässige Dauerdruckspannung angegeben:

CC(i1/i2%/50) σ_c , z.B. CC(2/1,5/50) 130

Das bedeutet, dass bei einer zulässigen Dauerdruckspannung von σ_c = 130 kPa, das entspricht 0,13 MPa oder 0,13 N/mm², die gesamte Dickenverringerung des Dämmstoffes bei 50 Jahren Dauerdruckbeanspruchung max. i_1 = 2% beträgt, wobei der Kriechanteil i_2 = 1,5% beträgt. „CC" steht für Kriechverhalten „compressive creep".

Für den Planer und Dämmstoffanwender ist es unerlässlich, die Bedeutung dieser verschiedenen Kennwerte zu kennen, um die Leistungsfähigkeit des Materials zu beurteilen. Dies ist notwendig, um sichere und dauerhafte Baukonstruktionen gewährleisten zu können. Deshalb wird nachfolgend das Kriechverhalten von Polystyrol-Hartschaumstoffen und die experimentelle Ermittlung der zulässigen Dauerdruckspannungswerte erläutert.

Langzeitdruckfestigkeit und Kriechverhalten

Bei dauerhafter Lasteinwirkung weisen Polystyrol-Hartschaumstoffe ein nichtlinear-viskoelastisches Verhalten auf. Mit dem Aufbringen der Last stellt sich die oben beschriebene spontane, zur Last proportionale, elastische Verformung ein. Sie bleibt über die gesamte Zeit der Lasteinwirkung konstant und stellt sich bei Entlastung zurück. Diese spontane elastische Verformung wird mit der Zeit durch eine zunehmende viskoelastische Verformung überlagert, die als Kriechen bezeichnet wird. In Abb. 4 sind charakteristische Kriechkurven für drei verschiedene Belastungen schematisch dargestellt. Daraus sind sowohl die spontanen Verformungen, als auch die im Laufe der Zeit als Kriechen bezeichneten irreversiblen Verformungen ersichtlich.

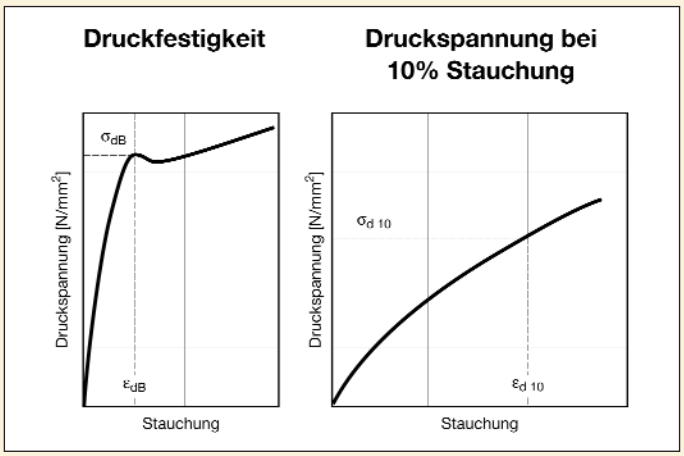

Abb. 2: Druckspannungs-Stauchungsverhalten einer Polystyrol-Hartschaum-Probe bei kurzzeitiger Lasteinwirkung.

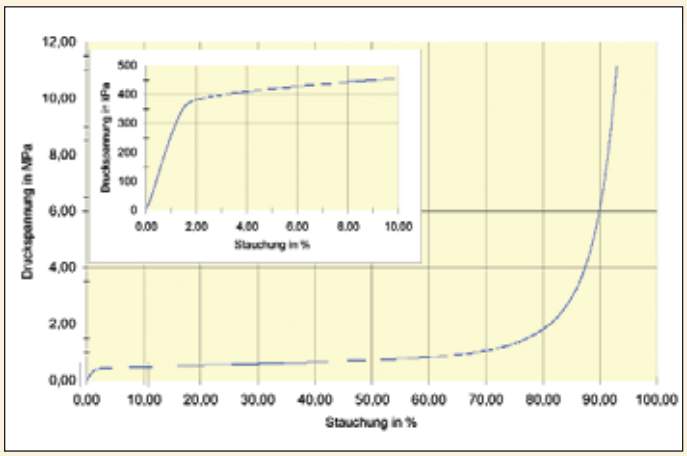

Abb. 3: Druckspannungs-Stauchungsverhalten einer Polystyrol-Hartschaum-Probe bei kurzzeitiger Lasteinwirkung.

Abbildung 5 zeigt einen Prüfstand zur Messung der Langzeitdruckfestigkeit von Hartschaumstoffen nach EN 1606 [5].

Die Beschreibung der Gesamtverformung (ε_t) bei langzeitiger Druckbelastung aus spontaner Verformung beim Aufbringen der Last (ε_0), sowie dem viskoelastischen und viskosen Kriechanteil [1] lautet nach Findley [5]:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_0 + m(\sigma) \cdot t^{b(\sigma)} \qquad (5)$$

wobei t die Belastungszeit und m und b von der Druckspannung (σ) abhängige Werkstoffparameter sind.

Der Spontananteil der Verformung ε_0 kann wie folgt berechnet werden:

$$\varepsilon_0 = E / \sigma \qquad (6)$$

mit dem Elastizitätsmodul E nach DIN EN 826 und der Druckspannung σ.

Durch Logarithmieren von Gleichung (5) erhält man eine lineare Beziehung:

$$\log(\varepsilon_t - \varepsilon_0) = \log m + b \log t \qquad (7)$$

aus der die als „Findley-Parameter" bezeichneten Materialkennwerte für das Kriechverhalten nach linearer Regression der Messwerte b als Steigung und m als Ordinatenabschnitt ermittelt werden können (Abb. 6). In Tabelle 1 sind einige Beispiele für die Findley-Parameter b und m angegeben. Aus den Messdaten der zeitabhängigen Stauchung bei verschiedenen Belastungsniveaus, wie z.B. in Abb. 7 angegeben, werden die Findley-Parameter b und m nach dem in DIN EN 1606 beschriebenen Verfahren als Funktionen der Spannung ermittelt. Charakteristische Beispiele solcher Findley-Auswertungen für Styrodur 4000 mit Nenndruckfestigkeit 0,5 N/mm² (das entspricht 500 kPa oder 0,5 MPa), Styrodur 5000 mit Nenndruckfestigkeit 0,7 N/mm² und Styropor mit einer Nenndruckfestigkeit von 0,3 N/mm², ergeben die in Tabelle 2 zusammengestellten Funktionen für die Findley-Parameter mit m = f (σ) und b = f (σ).

Derzeit liegen für XPS Messwerte für über 20 Jahre Messdauer vor und für EPS für über 10 Jahre Prüfdauer. Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass das lineare Verhalten in der doppellogarithmischen Darstellung der Stauchungswerte über der Zeit die Extrapolation des Materialverhaltens über eine Dekade erlaubt. Das bedeutet, dass für eine Extrapolationszeit von 50 Jahren eine Prüfzeit von 608 Tagen erforderlich ist.

Mit den aus den Langzeit-Druckfestigkeitsmessungen nach EN 1606 [5] ermittelten charakteristischen Funktionen für die Findley-Parameter können nach Gleichung (5) für beliebige Dauerdruckspannungen und für beliebig lange Belastungszeiten die jeweiligen Materialverformungen ε_t berechnet werden. In Tabelle 3 sind berechnete Beispiele für verschiedene Dauerdruckspannungen angegeben. Dabei sind sowohl die Spontanverformungen, als auch die Kriechverformungen bei 20, 50 und 75 Jahren Lasteinwirkungsdauer ausgewiesen. Die Spontanstauchung plus die Kriechverformung ergibt zusammen die gesamte Stauchung im Gebrauchszustand.

Wie aus Tabelle 3 ersichtlich, ist bei 50 Jahren Nutzungsdauer die Kriechverformung um ca. den Faktor 2 höher als die Spontandeformation unmittelbar nach dem Aufbringen der Last. Bei kürzerer Nutzungszeit kann die Dauerdruckspannung höher ausfallen, um einen Gesamtverformungsgrenzwert zu unterschreiten. Bei dem in Tabelle 3 angegebenen Material ist z.B. bei einer Dauerdruckspannung von 0,22 N/mm² (220 kPa) nach 20 Jahren die Verformung noch deutlich unter 2%. Um nach 50 Jahren Nutzungsdauer 2% zu unterschreiten, darf die Dauerdruckspannung jedoch nicht höher als 0,2 N/mm² (200 kPa) sein. Aus den Werten in Tabelle 3 ist jedoch auch ersichtlich, dass bei wesentlich längerer Nutzungsdauer als 50 Jahre die weitere Verformung marginal ist. Während die Gesamtverformung bei einer Dauerdruckbeanspruchung von 0,18 N/mm² (180 kPa) nach 50 Jahren 1,69% beträgt, nimmt sie in den weiteren 25 Jahren auf 1,80% zu. Bei einer 100 mm dicken XPS-Dämmplatte mit der Nenndruckfestigkeit 0,5 N/mm² (500 kPa) verringert sich die Plattendick im Laufe der ersten 50 Jahre um 1,89 mm und in den folgenden 25 Jahren um weitere 0,11 mm.

Zulässige Dauerdruckspannungen

Voraussetzung, dass ein Wärmedämmstoff in seiner Anwendung die Wärmeschutzanforderungen erfüllt, ist, dass seine Schichtdicke sich während der Anwendungszeit nicht nennenswert verändert. Deshalb wird aus wärmeschutztechnischen Gründen die Stauchung in der praktischen Anwendung, extrapoliert für 50 Jahre Nutzungsdauer, auf < 2 % begrenzt. In Tabelle 4 sind für einige XPS- (Styrodur) und EPS-Typen (Styropor) zulässige Dauerdruckspannungen für 50 Jahre Nutzungsdauer angegeben.

Bauaufsichtliche Zulassungen

Für die Anwendung unter lastabtragenden Gründungsplatten liegen bauaufsichtliche Zulassungen des DIBt vor, z.B. [6]. Danach dürfen Dämmplatten einlagig im Verband ohne

Abb. 5: Prüfstand für Zeitstandsdruckfestigkeitsmessungen an Hartschaumstoffen.

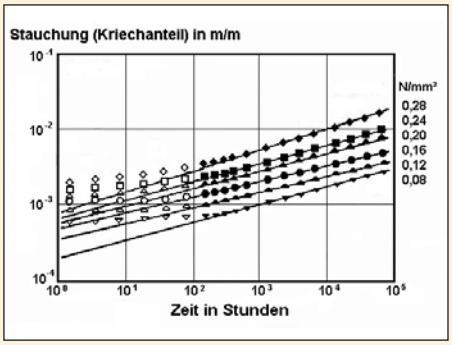

Abb. 6: Verformung eines XPS-Typs bei Dauerdruckbeanspruchung in Abhängigkeit von der Lasteinwirkungszeit bei verschiedenen Prüfspannungen in doppelt-logarithmischer Darstellung.

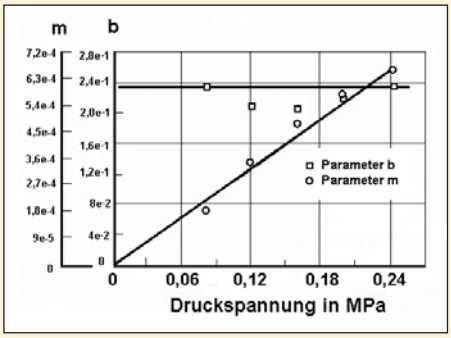

Abb. 7: Findley-Parameter b und m als Funktion der Druckspannung am Beispiel eines XPS-Typs.

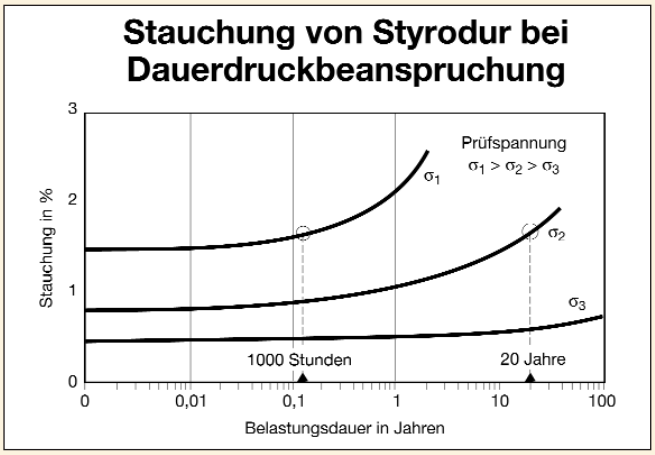

Abb. 4: Charakteristisches Verhalten von Polystyrol-Hartschaumstoff bei dauerhafter Lasteinwirkung.

Fotos und Grafiken: BASF AG

Tabelle 2: Beispiele für charakteristische Funktionen der Findley-Parameter m und b von zwei hochdruckfesten Styrodur-Typen.

Material-Typ	Nenndruck-festigkeit in kPa	Findley-Parameter $m = f(\sigma)$	Findley-Parameter $b = f(\sigma)$
XPS	500	$2{,}795 \cdot 10^{-6}\,\sigma + 1{,}6177 \cdot 10^{-12}\,\sigma^3$	$0{,}23359 + 2{,}1558 \cdot 10^{-5}\,\sigma$
XPS	700	$6{,}6 \cdot 10^{-7}\,\sigma + 8{,}73 \cdot 10^{-12}\,\sigma^3$	$0{,}3619 - 1{,}9 \cdot 10^{-4}\,\sigma$
EPS	300	$0{,}1519 \cdot 10^{-6}\,\sigma + 1{,}1553 \cdot 10^{-12}\,\sigma^3$	$0{,}34625 - 1{,}701 \cdot 10^{-4}\,\sigma$

Tabelle 3: Verformung von Styrodur 4000 CS bei verschiedenen Druckspannungen, Nenndruckfestigkeit 0,5 N/mm² bei dauerhafter Lasteinwirkung.

Dauer-druckspan-nung σ N/mm²	σ / E Spontan-stauchung in %	Kriechverformung $m(\sigma)\,t^{b(\sigma)}$ für Belastungsdauer T in Jahren 20	50	75	gesamte Stauchung im Gebrauchszustand in % ε (t) für Belastungsdauer T in Jahren 20	50	75
0,16	0,5	0,79	0,99	1,09	1,30	1,49	1,59
0,18	0,57	0,9	1,12	1,23	1,47	1,69	1,80
0,20	0,63	1,01	1,26	1,38	1,64	1,89	2,01
0,22	0,69	1,12	1,40	1,54	1,82	2,09	2,23

Kreuzstöße bis 120 mm Plattendicke verlegt werden. Es wird empfohlen, die Dämmplatten auf eine Sauberkeitsschicht (z.B. Magerbeton) oder auf eine eben abgezogene, stark verdichtete Kiessandschicht zu verlegen. Der Untergrund muss ausreichend eben sein, um ein vollflächiges Aufliegen der Platten zu gewährleisten. Außerdem sind nur statische Belastungen senkrecht zur Styrodur-Platten-Ebene zulässig, d.h. Schubbeanspruchung des Dämmstoffes ist nicht zulässig.

Gegebenenfalls muss der Wasserdampfdiffusionsstrom beachtet und eine dampfbremsende Schicht eingebaut werden.

Sicherheitstechnische Betrachtungen

Die Herleitung einer Dimensionierungskenngröße bei mechanischer Belastung basiert üblicherweise auf einem Grenzzustand, der entweder als Versagen durch Bruch oder Überschreiten eines bestimmten Verformungswertes definiert ist. Ein sicherer Zustand ist dadurch charakterisiert, dass ein genügend großer Abstand vom Grenzzustand eingehalten wird. Da bei Polystyrol-Hartschaumstoffen kein Bruchversagen auftritt, sondern sich nur eine zeit- und belastungsabhängige Verformung einstellt, wird als Grenzzustand ein Verformungswert festgelegt. Dieser Verformungswert ist nicht gleichbedeutend mit einem Versagenswert, er ist lediglich als Grenzzustand definiert.

Basierend auf Langzeiterfahrungen wird als Grenzwert für Polystyrol-Hartschaum eine Verformung ε_{zul} von 2 % im Gebrauchszustand und bis 10 % im Grenzzustand festgelegt.

Im Rahmen sicherheitstechnischer Betrachtungen wird eine Verformung im Grenzzustand $\varepsilon_{t\gamma}$ definiert und gefordert, dass $\varepsilon_{t\gamma} \leq \varepsilon_{zul}$ ist.

Für die statistische Nachweisgleichung werden nach [7] folgende Sicherheitsbeiwerte festgelegt:

$\gamma_S = 1{,}4$ Teilsicherheitsbeiwert für die Last

$\gamma_T = 1{,}0$ Teilsicherheitsbeiwert für die Nutzungsdauer bei ausreichend langer Prüfzeit für Extrapolation bis 50 Jahre

$\gamma_M = 1{,}3$ Teilsicherheitsbeiwert für materialspezifische und extrapolationsstatistische Unsicherheiten.

Dementsprechend lautet die Nachweisgleichung für den Grenzzustand wie folgt:

$$\varepsilon_{t\gamma} = \frac{\gamma_S \cdot \sigma}{E} + \gamma_M \cdot m(\gamma_S \cdot \sigma) \cdot (\gamma_T \cdot t)^{b(\gamma_S \cdot \sigma)} < \varepsilon_{zul} \qquad (8)$$

Wie aus Tabelle 5 ersichtlich ist, führt auch die Berücksichtigung von Sicherheitsbeiwerten zu keinen außergewöhnlichen „Grenzzustands-Verformungen".

Tabelle 4: Zulässige Dauerdruckspannungen für 50 Jahre Nutzungsdauer für einige XPS- (Styrodur) und EPS-Typen (Styropor).

Material-Typ	Nenndruckfestigkeit in kPa	zulässige Dauerdruckspannung* in kPa
XPS	300	130
XPS	500	180
XPS	700	250
EPS	150	50
EPS	200	70
EPS	300	100
EPS	400	120

Tabelle 5: Grenzverformung von Styrodur 4000 CS mit einer Nenndruckfestigkeit von 0,5 N/mm² unter Berücksichtigung von Teilsicherheitsbeiwerten für die Last sowie für materialspezifische und extrapolationstechnische Unsicherheiten bei verschiedenen Druckspannungen bei 20-, 50- und 75-jähriger Lasteinwirkungsdauer. Zum Vergleich sind die Werte ohne Sicherheitszuschläge (Gebrauchszustand) mit angegeben.

Dauer-druckspan-nung σ N/mm²	σ / E Spontanst auchung in %	Gesamte Stauchung im Gebrauchszustand in % ε (t) für Belastungsdauer T in Jahren 20	50	75	Stauchung im Grenzzustand in % ε_γ (t) mit Berücksichtigung von Sicherheitsbeiwerten für Belastungsdauer T in Jahren 20	50	75
0,16	0,5	1,30	1,49	1,59	2,20	2,56	2,75
0,18	0,57	1,47	1,69	1,80	2,49	2,91	3,13
0,20	0,63	1,64	1,89	2,01	2,80	3,27	3,52
0,22	0,69	1,82	2,09	2,23	3,12	3,65	3,92

Zusammenfassung

Werden Wärmedämmstoffe in Baukonstruktionen eingesetzt, in denen sie dauerhafter Lasteinwirkung ausgesetzt sind, dürfen für die Dimensionierung nicht die Kurzzeitdruckfestigkeiten herangezogen werden, sondern es müssen die Langzeitdruckfestigkeiten verwendet werden. Wie diese Kennwerte ermittelt werden, wird am Beispiel von Polystyrol-Hartschaumstoffen aufgezeigt. Für Extruderschaumstoff XPS (Beispiel Styrodur) und für expandierten PS-Hartschaumstoff EPS (Beispiel Styropor) werden für einige Materialtypen konkrete Kennwerte angegeben.

Literatur

[1] Krollmann,N.: Langzeitverhalten von extrudierten Polystyrol-Hartschaumstoffen bei konstanter und zyklisch wechselnder Druckbeanspruchung. Bauphysik 17 (1995) 1, S. 11-16.

[2] Krollmann,N.: Verhalten von EPS-Hartschaumstoffen unter langzeitiger Druckbeanspruchung. Bauphysik 28 (2006) 3, S. 184-191.

[3] DIN EN 826: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen. Bestimmung des Verhaltens bei Druckbeanspruchung. Beuth-Verlag, Berlin, Mai 1996.

[4] DIN EN 13162 bis 13171: Wärmedämmstoffe für Gebäude – Werkmäßig hergestellte Produkte. Beuth-Verlag, Berlin, Oktober 2001.

[5] DIN EN 1606: Wärmedämmstoffe für das Bauwesen. Bestimmung des Langzeit-Kriechverhaltens bei Druckbeanspruchung. Beuth-Verlag, Berlin, Januar 1997.

[6] Zulassungsbescheid Z-23.34-1325: Extrudergeschäumte Polystyrol-Hartschaumplatten Styrodur® 3035 CS, Styrodur 4000 CS und Styrodur® 5000 CS für die Anwendung als lastabtragende Wärmedämmung unter Gründungsplatten. Deutsches Institut für Bautechnik Berlin, den 20. Dezember 1999.

[7] Rackwitz, R.: Gutachterliche Stellungnahme zum Sicherheitskonzept für die Anwendung von Polystyrol-Extruderschaumstoff unter lastabtragenden Gründungsplatten. TU München. Institut für Tragwerksbau. 10.8.1998 und 1.2.1999.