

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
INSTITUT FÜR BAUKONSTRUKTION UND BAUSTOFFE
LEHRSTUHL FÜR BAUSTOFFKUNDE UND WERKSTOFFPRÜFUNG UND
PRÜFAMT FÜR BITUMINÖSE BAUSTOFFE UND KUNSTSTOFFE

Dir.: Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Schießl

Baumbachstraße 7, D-81245 München - Telefon 089/289-27060 - Telefax 089/289-27064
E-Mail: bsi@baustoffe.bauwesen.tu-muenchen.de

VERÖFFENTLICHUNG

Nr.: ZKG 2

Spannungen und Verformungen in Calciumsulfat-Fließestrichen

Auftraggeber: IGE und WTM

Projektleitung: Prof. Dr.-Ing. P. Schießl

Sachbearbeiter: Dipl.-Ing. K.-H. Wiegrink

Diese Veröffentlichung umfaßt 24 Seiten

München, April 2004
Wk/Wk

Der Untersuchungsbericht darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Eine gekürzte oder eine auszugsweise Vervielfältigung sowie eine Veröffentlichung in Druckschriften sind nur mit vorheriger schriftlicher Genehmigung des Prüfamtes zulässig.

1 Einleitung

Estriche unterschiedlichster Bauart werden heutzutage in nahezu jedem Bauprojekt verlegt. Die verschiedenen Estricharten und –konstruktionen bieten dabei eine kaum überschaubare Anzahl von Lösungsmöglichkeiten für nahezu jede Nutzung an. Trotz der Weiterentwicklung der Estrichtechnologie bei Herstellern und Verarbeitern, oder vielleicht auch gerade wegen der immer spezielleren Anwendungsmöglichkeiten kommt es in der Praxis immer wieder zu Schäden und Mängeln.

Schäden können dabei durch eine mangelhafte Planung, Ausführung oder ungeeignete Wahl der Baustoffe entstehen. Verschärfend kommt hinzu, dass es sich nicht um ein bauaufsichtlich relevantes Bauteil handelt. Das Sicherheitsdenken also dem Planer und dem Ausführenden häufig nach „Gutdünken“ überlassen wird.

Zunehmende Bedeutung gewinnt bei den Schadensursachen das Verformungsverhalten der Estriche (Schwinden, Aufschüsseln). Dies ist sowohl durch die Beschleunigung in der Bauausführung als auch durch den Drang zu immer preiswerteren, d.h. dünneren Estrichen zu suchen.

In einem Forschungsvorhaben wurden durch den Industrieverband Estrichstoffe im Bundesverband der Gips- und Gipsbauplattenindustrie E.V. und dem Industrieverband Werk trockenmörtel e.V. zahlreiche Fließestriche untersucht /3, 4/. An einem repräsentativen Fließestrich wurde das Verformungsverhalten detaillierter untersucht und rechnerisch simuliert. In diesem Beitrag werden das Verformungsverhalten und die Rissbildung bei Calciumsulfat-Estrichen infolge Austrocknung und Temperaturänderungen dargestellt,

2 Verformungen

2.1 Temperaturverformung

Temperaturänderungen führen bei gegebener Verformungsmöglichkeit zu Längenänderungen der Proben. Zur Charakterisierung der Temperaturverformungen wird im Allgemeinen der Wärmedehnkoeffizient α_T verwendet, Gleichung (1).

$$\varepsilon_T = \alpha_T \cdot \Delta T \tag{1}$$

ε_T : Temperaturdehnung [-]
 α_T : Wärmedehnkoeffizient [1/K]
 ΔT : Temperaturunterschied [K]

Die chemische Zusammensetzung des Gipses hat kaum Einfluss auf den Wärmedehnkoeffizienten von. Vielmehr ist die Art der verwendeten Zuschläge maßgebend. Während Kalkstein einen geringen α_T -Wert von $5,7 \cdot 10^{-6}$ [1/K] hat /14/, weisen quarzhaltige Zuschläge α_T -Werte bis zu $11 \cdot 10^{-6}$ [1/K] auf /14, 15/. Der Einfluss ist jedoch nicht so stark wie beim Beton, da der Vol.-Anteil der Zuschläge nur rd. 50-60 Vol.-% ausmacht (gegenüber 70 Vol.-% bei Beton). Nach Weigler /16 / hängt der Einfluss zudem von der Korngröße ab. Nur grobe Zuschläge > 4 mm beeinflussen den Wärmedehnkoeffizienten wesentlich.

Die ermittelten Wärmedehnkoeffizienten sind in Tabelle 1 für 2 Temperaturbereiche angegeben. Der Wärmedehnkoeffizient war im Bereich zwischen 50 und $(-10)^\circ\text{C}$ konstant und lag mit $1,1 \cdot 10^{-5}$ [1/K] im Bereich üblicher mineralischer Baustoffe.

2.2 Trocknungsschwinden

2.2.1 Allgemeines

Unter Trocknungsschwinden und Quellen werden Längen- bzw. Volumenänderungen von Baustoffen verstanden, die sich infolge einer messbaren Änderung des Wassergehaltes einstellen.

Während das Schwindverhalten von Zement bzw. Beton intensiv untersucht worden ist, liegen zum Schwindverhalten von CSF bisher nur wenige Untersuchungen vor. Nach Wesche /10/ schwinden Sulfatbindemittel nicht bzw. nur sehr wenig, weshalb Anhydrit(fließ)estrichflächen im Gegensatz zu Zementestrichen über große Flächen hinweg ohne Fugen hergestellt werden können /11/.

Müller stellte bei der Prüfung nach DIN 4208 im Klima $20^\circ\text{C} / 65\% \text{ r.F.}$ geringe Schwindwerte zwischen 0,04 und 0,09 mm/m gemessen. Bei Lagerung in Schwindrinnen, bei denen die Längsverformung nicht behindert wurde, stellten sich nach einer 7-tägigen Vorlagerung im Klima $20^\circ\text{C} / 65\% \text{ r.F.}$ bei einer anschließenden Lagerung in rd. 22 % r.F. Schwindmaße von rd. 0,25 mm/m ein /12/.

Um die Spannungen und Verformungen infolge Schwinden von CSF ermitteln zu können, wurden weitere Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Folgenden kurz dargestellt.

2.2.2 Längsschwinden an Flachprismen

Zur Messung des Längsschwindens wurden Flachprismen mit den Abmessungen 10·40·160 (mm) verwendet. Die geringen Abmessungen stellen sicher, dass sich über die Probekörperdicke vernachlässigbar kleine Feuchtegradienten ausbilden. Somit kann die freie, auch von Eigenspannungen nahezu unbehinderte Dehnung gemessen werden. Die Proben wurden zunächst für 5 d im Klima 20°C / 99 % r.F. vorgelagert, um eine gewisse Hydratation zu ermöglichen und dann in Eksikkatoren in unterschiedliche Klimate eingelagert.

Die Schwindverformungen über die Zeit sind in Bild 1 für die verschiedenen Lagerungsbedingungen dargestellt. Erwartungsgemäß zeigen alle Flachprismen während der 5-tägigen Vorlagerung ein geringes Quellen. Im weiteren Verlauf nehmen die Dehnungen der Flachprismen zunächst weiter zu. Anschließend sind die Geschwindigkeit und der Betrag des Schwindens umso größer, je trockener das Klima ist. Die Flachprismen im Klima 20°C / 65 % r.F. weisen unmittelbar nach der Umlagerung ein deutliches Schwinden auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Flachprismen in einer Klimakammer gelagert wurden und daher schneller trockneten als die restlichen Flachprismen, die in Eksikkatoren gelagert wurden, in denen die Trocknungsgeschwindigkeit zum einen wegen der fehlenden Ventilation und zum anderen wegen des anfänglich noch nicht konstanten Klimas deutlich geringer ist.

In Bild 2 sind die Schwindverformungen über die Restfeuchte aufgetragen. Neben den Versuchen, die auch in Bild 1 dargestellt sind, sind weitere Versuchsergebnisse mit unterschiedlicher Vorlagerung angegeben. Dabei wurde das Endschwindmaß der jeweiligen Klimate den jeweiligen Ausgleichsfeuchten entsprechend der Sorptionsisotherme zugeordnet. Hierdurch werden geringe unvermeidliche Unterschiede im Anfangsfeuchtegehalt ausgeglichen.

Es wird deutlich, dass alle Proben (auch die in 20°C / 65 % r.F. gelagerten) einen ähnlichen Zusammenhang zwischen Masseverlust und Feuchtedehnung aufweisen. Dieser ist in der Trendlinie dargestellt. Dabei wird angenommen, dass das anfängliche Quellen ein zeitabhängiger Vorgang ist, der daher in der Feuchte-Dehnbeziehung nicht berücksichtigt wird.

Auffallend ist der nichtlineare Verlauf der Feuchte-Dehnbeziehung. Bis zu einem Masseverlust von rd. 4 M.-% entstehen kaum Schwindverformungen, da im Kapillarwasserbereich zwar grobe Poren geleert werden, diese aber keinen wesentlichen Anteil am Schwinden haben. Erst das Austrocknen der Mikroporen führt zu Schwindverformungen /13/.

2.2.3 Längsschwinden in der Schwindrinne

Bei der verwendeten Schwindrinne handelt es sich um eine Stahlschalung der Abmessungen 40·60·1000 (mm). Die Schalung ist mit einer Folie ausgeschlagen. Eine Querseite der Schwindrinne ist fest. An einen gebogenen Metallstift verbindet sich der Estrich bei der Festigkeitsbildung. Die andere Seite ist frei beweglich und dort werden über Messuhren die Längenänderungen erfasst. Die Messung der Längenänderungen wird unmittelbar nach dem Befüllen der Schwindrinne gestartet und automatisch aufgezeichnet. Während der Versuchsdauer trocknet der CSF unmittelbar nach dem Einfüllen nur über die Oberseite aus. Die Schwindrinne lagerte in einem klimatisierten Raum mit einem konstanten Laborklima von 20°C / 65 % r. F.. Die Ergebnisse der Längenänderungsmessungen in der Schwindrinne sind in Bild 3 dargestellt. Da der CSF zunächst noch plastisch ist, wurde der Wert nach 8 h als Nullpunkt für die Schwindmessung gewählt.

Bis zum 4. Tag nehmen die Dehnungen infolge Quellen stetig zu. Ungefähr ab dem 7. Tag entstehen die ersten Schwindverformungen, die asymptotisch gegen einen Endwert verlaufen. Im Alter von rd. 55 d haben die Schwindverformungen den Endwert erreicht. Das Schwindmaß als Differenz zwischen max. Quellmaß nach 5 d und Endwert beträgt rd. 0,14 mm/m und entspricht damit den unter Abschnitt 2.2.2 festgestellten Schwindmaßen für die Flachprismen bei 5-tägiger Vorlagerung in 20°C / 95 % r.F..

2.2.4 Aufschüsseln von Estrichplatten

Estrich trocknen nur nach oben hin aus, da die auf der Unterseite vorhandene Folie das Austrocknen nahezu vollständig behindert. Hierdurch stellt sich ein Feuchtegradient über die Estrichdicke ein. An der Oberseite ist der Estrich schon trocken und auf der Unterseite noch feucht. Entsprechend der Feuchte-Dehnbeziehung in Bild 2 stellt sich ein Schwindgradient über die Estrichdicke ein. Dieser Gradient ist direkt kaum messbar. Allerdings führen die linear veränderlichen Anteile des Schwindgradienten zu einem leicht messbaren Aufschüsseln (s. Bild 4).

Zur Ermittlung des Aufschüsselns infolge einseitiger Austrocknung nach oben wurde eine Estrichplatte von 100·100 cm² mit einer Dicke von 40 mm hergestellt. Die Estrichplatte lagerte auf einer rd. 40 mm dicken Trittschalldämmung. Der Versuchsaufbau und die Anordnung der Messstellen ist in Bild 5 dargestellt.

Der Estrich wurde über einer mit einer Folie abgedeckten Dämmschicht aufgebracht und durch leichtes Stochern entlüftet. Nach 24 h wurden die Seitenschalungen entfernt und die Seitenflächen wurden mit einer wasser- und

dampfdichten Abdichtung versehen. Anschließend wurden in der Mitte und in den vier Ecken der Estrichplatte mit induktiven Wegaufnehmern die vertikalen Verformungen erfasst.

Die gemessenen vertikalen Verformungen der Estrichplatte in Abhängigkeit von der Zeit sind in Bild 6 dargestellt.

Die Estrichplatte zeigte zunächst ein Absenken im Eckbereich (rd. 0,2 mm) und eine damit verbundene geringe Aufwölbung in der Mitte. Aufgrund der geringen Steifigkeit der Trittschalldämmung wird diese kaum behindert. Im Alter von rd. 8 d beginnt eine entgegengesetzte Bewegung, das Aufschüsseln. Die maximale vertikale Verformung im Eckbereich beträgt rd. 0,3 mm im Alter von rd. 22 d, das Stichmaß ergibt sich zu rd. 0,5 mm. Anschließend geht das maximale Aufschüsseln zurück. Der CSF erreicht nach rd. 70 d den Beharrungszustand. Dabei weist er die nach 8 d gemessene Verwölbung wieder auf, sie ist augenscheinlich nicht reversibel. Eine Erklärung für die anfängliche leichte Verwölbung konnte noch nicht gefunden werden. Möglicherweise führt die Verdunstung in der oberflächennahen Schicht zu einer höheren Konzentration von CASO_4 und damit zu einem etwas größeren anfänglichen Quellen.

Für die rechnerische Abschätzung von Schwindverformungen infolge ungleichmäßigen Austrocknens ist sie aber unbedeutend. Daher wurde der Bereich bis zum ersten Wendepunkt nicht berücksichtigt und nur das weitere reversible Aufschüsseln betrachtet. Der zeitliche Verlauf des reversiblen Aufschüsseln ist ebenfalls in Bild 6 dargestellt.

Der Maximalwert des reversiblen Aufschüsseln von 0,7 mm entspricht einem linearen Dehnungsgradienten über die Estrichdicke von rd. 0,1 ‰ /7/.

3 Spannungen in Estrichen

3.1 Allgemeines

Zwang- und Eigenspannungen entstehen, wenn Verformungen behindert werden. Die Behinderung kann dabei durch das Bauteil selbst (Eigenspannungen) oder durch äußere lastunabhängige Lagerkräfte (Zwangsspannungen) entstehen. CSF sind in der Regel von außen verformungsbehindert, z.B. durch den Untergrund, durch aufgehende Bauteile oder ihr Eigengewicht. Die Spannungen infolge äußere Verformungsbehinderung sind dabei umso größer, je vollständiger die Verformungsbehinderung ist.

Dieser Zusammenhang ist in Bild 4 schematisch für eine vollständige Behinderung der Verformung dargestellt. Der Dehnungsgradient wird also vollständig entsprechend dem E-Modul in Spannung umgesetzt. Dabei ist es unerheblich, ob die Dehnungen infolge Temperatur oder Schwinden entstanden sind. Die resultierende Zugspannung kann dabei in drei Spannungsanteile zerlegt werden.

3.2 Eigenspannungen

Neben der äußeren Verformungsbehinderung entstehen bei nichtlinearen Dehnungsgradienten innere Verformungsbehinderungen. Damit der Querschnitt nach der Bernoulli-Hypothese eben bleibt, werden in den Fasern, die sich verkürzen wollen, Zugeigenspannungen und in den restlichen Teilen Druckeigenspannungen aktiviert, um einen ebenen Verzerrungszustand zu ermöglichen, s. Bild 4.

Die Eigenspannungen stehen per definitionem mit sich im Kräfte- und Momentengleichgewicht und erzeugen daher keine äußeren Verformungen und damit auch keine Lagerkräfte. Dies bedeutet aber nicht, dass es nicht auch zu Rissen kommen kann. Bei großen Schwindgradienten können z.B. bei Zementestrichen Krackelleerrisse an der Oberfläche auftreten, da die Verformungen der Randzone fast vollständig durch den noch feuchten Kern behindert sind, s. Bild 4.

3.3 Zentrische Spannungen infolge Reibung zum Untergrund

Werden über den Querschnitt konstante Dehnungsänderungen, wird also eine Längsverformung behindert, so entstehen zentrische Zug- bzw. Druckspannungen, s. Bild 4.

Bei CSF werden die konstanten Dehnungsänderungen durch die Reibung zum Untergrund behindert. Vorausgesetzt, die Konstruktion ist im Randbereich zu aufgehenden Bauteilen frei verformbar und der Untergrund weist einen konstanten Reibungswiderstand auf, so ergibt sich die in Bild 7 dargestellte Spannungsverteilung. Dabei ist zu beachten, dass für die vollständige Aktivierung der Reibkraft keine großen Verschiebungen erforderlich sind. Die geringen Schwindmaße der CSF oder die üblichen Temperaturänderungen bei Heizestrichen reichen hierfür aus.

Die Normalspannungen im CSF nehmen linear mit dem Abstand vom freien Rand zu. Sie erreichen das Maximum im Ruhepunkt der Platte bei $a = l/2$. Wie aus Gleichung (2) zu erkennen, sind die Spannungen unabhängig von der Dicke, da

das Eigengewicht und die Reibkraft zwar linear mit der Dicke zunehmen, aber der aufzunehmende Querschnitt ebenfalls linear zunimmt.

$$\sigma = \mu \cdot a \cdot g \cdot \left(\rho + \frac{p}{d}\right) \cdot 10^{-6} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2)$$

σ : Spannung [N/mm²]

μ : Reibbeiwert [-]

a : Abstand [m]

ρ : Dichte [kg/m³]

g : Erdbeschleunigung, 9,81 [m/s²]

p : Auflast, flächig verteilt [kg/m²]

d : Dicke [m]

Dabei wurde ein konstanter Reibbeiwert μ angenommen, der unabhängig von der Verschiebung ist. Bei realen Untergründen weist der Reibbeiwert ein Maximum bei sehr kleinen Verschiebungen auf, die sog. Haftreibung μ_H . Mit zunehmender Verschiebung nimmt der Reibbeiwert ab. Bei wiederholten Verschiebungen kann sich der Reibbeiwert μ_G deutlich reduzieren.

Reibbeiwerte von CSF sind in der Literatur nicht angegeben. Anhaltswerte für den Reibbeiwert von Betonplatten sind in Tabelle 2 angegeben. Für Estriche auf Trennlage können diese Verwendung finden. Bei schwimmenden Estrichen ist die Reibung weiter verringert, da sich Gleitebenen sowohl zwischen Estrich, Folie und Dämmschicht ausbilden können. Evtl. vorhandene Unebenheiten in der Rohdecke werden durch die weiche Dämmschicht abgedeckt. Durch die ausgeprägten plastischen Eigenschaften können lokale Schubspannungen in der Dämmschicht abgebaut werden. Ein „Verhaken“ des Estrichs in Unebenheiten der Rohbetondecke ist hierdurch kaum möglich.

In Bild 8 ist die maximale Normalspannung in Plattenmitte in Abhängigkeit der Estrichplattenlänge für verschiedene Reibbeiwerte und zusätzlich vorhandene gleichmäßig verteilte Verkehrslasten von 150 kg/m² bzw. 300 kg/m² nach DIN 18560 dargestellt. Zum Vergleich ist die zentrische Zugfestigkeit eines CSF, s. Tabelle 3 und eines ZE 20 angegeben.

Bei Estrichen auf Trennlagen ($\mu=1,0$) kann leicht die Erfordernis von Fugen in Estrichfeldern abgelesen werden. Bei schwimmenden CSF-Estrichen ($\mu=0,4$) stellen sich auch bei erhöhten Auflasten (500 kg/m²) nur geringe Zugspannungen ein, die weit unter der zentrischen Zugfestigkeit (3,2 N/mm²) der CSF liegen. Allerdings muss bedacht werden, dass diese Zugspannungen den Biegezugspannungen infolge Schüsseln (Abschnitt 3.4) überlagert werden müssen.

3.4 Biegespannungen infolge Schüsseln

Über den Querschnitt linear veränderliche Dehnungen führen zu einer Verkrümmung der Estrichplatte. Hierdurch ergibt sich die in Bild 9 oben dargestellte Verformungsfigur. Die Größe des Aufschüsselns für den zweidimensionalen Fall, der dem Aufschüsselns am freien Rand einer freien Estrichfläche entspricht, ergibt sich nach Gleichung (3). Die rechnerische Größe des Aufschüsselns am freien Rand beträgt damit für einen linearen Dehnungsgradienten von 0,1 ‰ über die Querschnittshöhe bei einem 4 m langen und 4 cm dicken Estrichbalken 5 mm.

$$f_z = \frac{\Delta\varepsilon}{d} \cdot \frac{l^2}{8} \quad (3)$$

f_z : Aufschüsselns am freien Rand ohne Eigengewicht [mm]

$\Delta\varepsilon$: Dehnungsgradient über die Höhe [mm/m]

l : Länge [m]

d : Höhe [m]

Dieser Verformung entgegen wirkt bei realen Estrichen das Eigengewicht des Estrichs, wodurch sich in der zweidimensionalen Betrachtung die folgenden Verformungsbilder in Abhängigkeit der Plattenlänge einstellen, s. Bild 9.

Die resultierende Aufschüsselung am freien Rand unter Berücksichtigung des Eigengewichtes ist natürlich deutlich kleiner. Für drei Dehnungsgradienten von 0,05, 0,1 und 0,2 ‰ sind die Werte in Bild 10 dargestellt. Für das zuvor genannte Beispiel beträgt das Aufschüsselns statt der 5 mm nur noch rd. 0,5 mm.

Ab einer gewissen Länge, der sog. kritischen Länge ist die Krümmung durch die Rückverformung aus Eigengewicht wieder vollständig rückgängig gemacht und die Platte liegt im mittleren Bereich vollständig auf dem Untergrund auf. Die linear veränderlichen Verformungsanteile sind dann im mittleren unverformten Bereich vollständig in Biegespannungen umgewandelt. Ist die Platte kürzer als die so genannte kritische Plattenlänge, l_{krit} , so kann die Estrichplatte sich auch im Zentrum teilweise verkrümmen und die Spannungen sind somit reduziert. Bei der einfachen Betrachtung eines Kragarmmodells ergeben sich die Biegelinie und der Verlauf des Momentes aus dem konstanten Verformungsbestreben des Estrichs, das einem Wölbmoment M_w entspricht und dem Biegemoment aus Eigengewicht des Kragarms M_B . Wenn $M_B = M_w$, so ist die Verkrümmung vollständig rückgängig gemacht und der Estrich liegt auf dem Untergrund auf. Da eine weitere Biegeverformung infolge Eigengewicht durch den Untergrund verhindert wird, ist M_w somit das maximal mögliche Moment. Damit ergeben sich die folgenden Beziehungen:

$$M_w = \frac{E \cdot \Delta\varepsilon \cdot b \cdot d^2}{12} \quad (4)$$

$$M_B = \frac{q \cdot l^2}{2} = \frac{d \cdot \rho \cdot g \cdot b \cdot l^2}{2} \quad (5)$$

$$M_B = M_w \hat{=} \frac{E \cdot \Delta \varepsilon \cdot b \cdot d^2}{12} = \frac{d \cdot \rho \cdot g \cdot b \cdot l^2}{2} \quad (6)$$

Die kritische Länge von Estrichplatten wird im mittleren Bereich also dann erreicht, wenn die Krümmungen der Estrichplatte infolge Dehnungsgradient und Eigengewicht gleich sind, und lässt sich für den zweidimensionalen Fall nach Gleichung (7) abschätzen /9/.

$$\frac{1}{R_{\Delta \varepsilon}} = \frac{\Delta \varepsilon}{h} = \frac{1}{R_{g(l_{krit})}} = \frac{q \cdot l_{krit}^2}{8 \cdot EI} \quad \Rightarrow \quad l_{krit} = 0,8165 \cdot h \cdot \sqrt{\frac{\Delta \varepsilon \cdot E}{\gamma \cdot h}} \quad (7)$$

Bei den Wölbspannungen kann damit unterschieden werden zwischen der ungestörten Biegespannung ($l > l_{krit}$) bei vollständiger Verformungsbehinderung, die im mittleren Bereich konstant über die Länge ist und der reduzierten Biegespannung ($l < l_{krit}$) im Randbereich. Hier ist die Spannung am Rand der Estrichplatte Null und nimmt zur Mitte hin zu, bis die ungestörte Biegespannung erreicht wird. Die Spannungsverteilung entspricht dabei der Spannung eines Kragarms infolge Eigengewicht.

Diese Tatsache führt dazu, dass ab einer bestimmten Länge, der kritischen Länge, das max. Aufschüsseln auftritt und eine weitere Vergrößerung der Plattenlänge das Aufschüsseln nicht weiter verstärkt. Ebenfalls werden ab dieser Grenzlänge die maximalen Biegespannungen im Zentrum der Estrichplatte erzeugt, die bei einer weiteren Vergrößerung der Plattenlänge nicht weiter anwachsen, sondern konstant bleiben.

Die bei der Trocknung von CSF entstehenden Aufschüsselungen entsprechen nach Abschnitt 2.2.4 einem linearen Dehnungsgradient über die Estrichdicke von rd. 0,1 ‰ /7/.

In Bild 10 sind die maximalen Biegezugspannungen in Plattenmitte und das Aufschüsseln am freien Rand in Abhängigkeit von der Länge der Estrichflächen dargestellt, die sich für einen Dehnungsgradienten von 0,1 ‰. Es wird deutlich, dass die kritische Länge rd. 3 m beträgt. Spannungen und Verformungen erreichen also bereits bei einer Plattenlänge von rd. 3 m den maximalen Wert. Eine Vergrößerung der Estrichfläche führt zu keinen größeren Biegezugspannungen oder Aufschüsselungen. Die Biegezugspannung beträgt jedoch maximal nur 1,44 N/mm² und liegt damit weit unter der vorhandenen Biegezugfestigkeit von 6,1 N/mm².

3.5 Spannungen bei Heizstrichen

3.5.1 Heizstriche mit einem Heizkreis

Heizstriche aus CSF können analog zu den bisher behandelten CSF behandelt werden. Die Temperaturerhöhung auf maximal 40°C ändert die mechanischen Eigenschaften des CSF nicht. Das Schwindmaß wird weiter erhöht, da während des Aufheizens die relative Feuchte im Porenraum weiter absinkt [17, 7].

Während des Aufheizens kann sich im CSF ein Temperaturgradient über die Höhe einstellen. Auf der Unterseite des Estrichs stellen sich im Bereich der Heizschlangen größere Temperaturen ein als auf der Oberseite des CSF. 10°C Temperaturdifferenz entsprechen dabei einem Dehnungsgradienten von 0,1 ‰ wie er beim Schüsseln infolge Schwinden gewählt wurde. Die Biegezugspannungen können somit analog ermittelt werden.

Bei gleichmäßiger Erwärmung oder Abkühlung der gesamten Estrichfläche entstehen nur geringe Spannungen. Die Erwärmung oder Abkühlung führt zu einer Ausdehnung oder Verkürzung der gesamten Estrichplatte. Spannungen entstehen nur durch Reibung zum Untergrund. Da bei Heizstrichen auf der Unterseite immer eine Dämmschicht vorhanden sein muss, ist die Reibung nach Abschnitt 3.3 für übliche Abmessungen praktisch zu vernachlässigen.

3.5.2 Heizstriche mit unterschiedlichen Heizkreisen

Heizstriche können aus unterschiedlich beheizten Teilflächen bestehen, die nicht durch Fugen voneinander getrennt sind.

Im Bild 11 ist auf der linken Seite die Temperaturverteilung und auf der rechten Seite die Spannungsverteilung in einem Estrich dargestellt. Die Verformungen des Estrichs sind überhöht dargestellt.

In diesem Fall wird die um 15°C erwärmte Teilfläche in ihrer Ausdehnung durch die kühlere Fläche behindert. Dies führt dazu, dass im Übergangsbereich auf der warmen Seite die Ausdehnung behindert und somit Druckspannungen von rd. 1,4 N/mm² entstehen. Die kühlere Seite wird durch die Ausdehnung der wärmeren Seite gedehnt und erhält somit Zugspannungen von rd. 1,6 N/mm².

Auch auf der Außenseite der warmen Fläche werden die Ausdehnungen behindert, so dass hier sogar noch höhere Zugspannungen von rd. 2,1 N/mm² entstehen.

Die maximale Zugspannung liegt bei üblichen Temperaturunterschieden somit zwar unterhalb der Zugfestigkeit des CSF. Bei großen Temperaturunterschieden kann es insbesondere im Bereich von Querschnittsschwächungen durch Folienfalten oder Heizrohre zur Überschreitung der Zugfestigkeit und somit zur Rissbildung kommen.

3.6 Geometrieinfluss

In den vorherigen Abschnitten wurde gezeigt, dass bei der Trocknung von CSF nur geringe Verformungen und dementsprechend geringe Biegezug- und Zugspannungen entstehen, die auch bei größeren Abmessungen weit unter der Biegezug- bzw. Zugfestigkeit der CSF liegen.

In der Praxis treten dennoch in offenen Raumgeometrien im Bereich der einspringenden Ecken immer wieder Risse auf.

Offene Raumgeometrien entstehen durch Aussparungen, die am Rand der Fläche, oder innerhalb der Fläche, z.B. Aufzugsschächte, angeordnet sein können, s. Bild 12.

Die CSF sind planmäßig von den aufgehenden Bauteilen durch einen weich-elastischen Randstreifen getrennt, wodurch die horizontale Behinderung durch die aufgehenden Bauteile praktisch vernachlässigt werden kann. Bislang wird die Ansicht vertreten, dass derartige Risse nur auf horizontale Zwängungen durch die aufgehenden Bauteile zurückgeführt werden können, deren Ursache in einer mangelhaften Ausführung der Randstreifen zu suchen ist. Hierdurch können große, über die Höhe konstante Zugspannungen in die Platte eingeleitet werden. Diese führen bei größeren Plattenabmessungen zwangsläufig zu Rissen /13/. Allerdings ist zu bedenken, dass bei den L-Räumen ein Aufschwinden auf den Rand bei gleichmäßiger Reibung nicht möglich ist, da der Schwerpunkt der Fläche außerhalb der einspringenden Ecke liegt. Die inneren Plattenränder bewegen sich infolge des Schwindvorgangs von den aufgehenden Bauteilen „weg“, so dass eine Rissbildung dementsprechend nicht möglich wäre. Im Folgenden wird daher die Spannungsentwicklung im Bereich der einspringenden Ecke während der Austrocknung genauer betrachtet.

In Bild 13 ist der Grundriss einer $8 \cdot 8 \text{ m}^2$ großen Estrichfläche mit einer $4 \cdot 4 \text{ m}^2$ großen Aussparung dargestellt. Der Estrich weist eine Dicke von 40 mm auf. Dargestellt sind im oberen Bereich die Hauptzugspannungen auf der Oberseite infolge eines linearen Dehnungsgradienten von 0,1 ‰ über die Dicke

Die Biegezugspannungen betragen an den freien Ecken der Estrichfläche Null und nehmen zur Mitte hin infolge des Eigengewichtes zu. Ab einem gewissen Randabstand, l_{krit} erreichen die Biegezugspannungen ihren maximalen Wert und bleiben danach konstant, da die Verformungen vollständig durch das Eigengewicht zurückgeformt sind und die Platte wieder „flach“ auf dem Untergrund aufliegt

Im Bereich der Ecke kommt es jedoch zu einer Spannungserhöhung über die maximale Biegezugspannung in Plattenmitte hinaus. Ursächlich für die

Spannungserhöhung sind die Unverträglichkeiten der freien Verformungen der benachbarten Teilbereiche im Eckbereich. In Bild 13 ist die Verformung entlang des eingezeichneten Schnitts dargestellt. Das Biegemoment in der Estrichfläche und damit die Biegezugspannung sind dabei proportional zur Krümmung der Verformungsfigur.

Im mittleren Teil liegt die Estrichplatte flach auf der Dämmung auf. Die Wölbverformung ist vollständig durch das Eigengewicht behindert. Zum freien Rand hin nimmt die Verformung ab der kritischen Länge zu. Im Bereich der einspringenden Ecke nehmen die Verformungen jedoch von beiden Seiten zu. Die Verformungsfigur muss aber stetig sein und darf keinen Knick aufweisen. Daher muss im Bereich der einspringenden Ecke eine „Rückkrümmung“ entstehen. Diese „Rückkrümmung“ erzeugt die zusätzlichen Biegezugspannungen auf der Oberseite des Estrichs, d.h. über den vollen Biegezwang in Plattenmitte hinaus (Bild 13).

Die Spannungserhöhung im Eckbereich wird von der Ausrundung der Ecke beeinflusst. Bei sehr großen Radien ist die Rückbiegung auf einer größeren Länge im Eckbereich verteilt, so dass die zusätzliche Rückkrümmung und mithin auch die Biegezugspannung geringer sind als bei sehr kleinen Radien. Bei sehr kleinen Radien entsteht eine Spannungskonzentration, die fast eine Singularität darstellt. Theoretisch ergibt sich in einer „scharfen“ Ecke ohne jede Ausrundung eine unendlich hohe Spannung, wenn linear elastisches Materialverhalten zugrunde gelegt wird. Tatsächlich werden die hohen Spannungen im CSF durch die nichtlineare Spannungs-Dehnungsbeziehung und evtl. Mikrorissbildung abgebaut. Hierdurch wird die Spannung umgelagert. Um die Singularität zu umgehen kann die Spannungserhöhung in der Ecke unter der Annahme eines Rundungsradius berechnet werden. Bei einem Rundungsradius von 100 mm weisen die Spannungsgradienten für den in Bild 14 dargestellten Fall in Richtung des Eckabstandes a (Bild 14) einen Gradienten von rd. $0,5 \text{ N/mm}^2/\text{cm}$ auf. Dieser liegt damit unterhalb der Größenordnung der Spannungsgradienten in der Biegezugprüfung ($3 \text{ N/mm}^2/\text{cm}$), so dass die Annahme linear-elastischen Materialverhaltens gerechtfertigt ist. Die Spannungserhöhung im Eckbereich beträgt für diesen Fall rd. 240%.

Die Spannungen im Bereich der einspringenden Ecke sind durch das Verformungsbestreben „verursacht“ und somit proportional zum freien Aufschüsseln und zur Biegezugspannung in Plattenmitte.

Bei CSF entstehen unter üblichen Klimabedingungen nur geringe Dehnungsgradienten, die Biegezugspannungen in Plattenmitte von rd. $1,5 \text{ N/mm}^2$ erzeugen. Im Bereich einer einspringenden Ecke ergeben sich damit Biegezugspannungen von rd. $3,6 \text{ N/mm}^2$, die unterhalb der Biegezugfestigkeit liegen.

Bei extremen Trocknungen oder durch zusätzlich überlagerte Temperaturgradienten können jedoch auch bei CSF so große Gradienten entstehen, dass eine Rissbildung im Bereich der einspringenden Ecke unvermeidlich ist. Häufig wird der Estrich im Bereich der einspringenden Ecke zudem durch Folienfalten weiter geschwächt.

4 Zusammenfassung

Schwimmend verlegte Estriche weisen immer wieder Risse oder Aufschüsselungen auf. Diese Mängel sind häufig auf die einseitige Austrocknung der Estriche zurück zu führen. Während die Oberfläche schon trocknet und somit schwindet ist die Unterseite des Estrichs noch feucht. Hierdurch entsteht ein Dehnungsgradient über die Höhe, der zu Aufschüsselungen und Längsverformungen führt.

Bei der Trocknung von CSF entstehen im Vergleich zum Zementestrich nur geringe Biegezug- und Längszugspannungen. Hierdurch können CSF im Gegensatz zu herkömmlichen Zementestrichen weitgehend fugenlos erstellt werden.

Dennoch treten im Bereich von einspringenden Ecken häufiger Risse auf. Bislang wurde die Rissbildung auf horizontale Zwangsspannungen infolge mangelhafter Randstreifen an den aufgehenden Bauteilen zurückgeführt. Demgegenüber konnte bei Geometrien mit einspringenden Ecken rechnerisch eine erhebliche Spannungserhöhung im Eckbereich festgestellt werden, die auf die geometrischen Unverträglichkeiten im Eckbereich zurückzuführen sind. Unter ungünstigen Umständen können auch bei CSF mit einspringenden Ecken die Spannungen im Eckbereich die Biegezugfestigkeit erreichen und zu Rissen führen. Bei anderen Estricharten, die stark schüsseln ist eine Rissbildung unvermeidlich.

Die rechnerischen Untersuchungen der Spannungen und Verformungen belegen, dass CSF ein geeigneter Baustoff für die fugenlose Bauweise ist. Geometrien mit einspringenden Ecken können aber unabhängig von Ausführungsfehlern zu Rissen führen. Hier ist besondere Sorgfalt anzuwenden.

5 Literatur

- 1 IndustrieGruppeEstrichstoffe im Bundesverband der Gips- und Gipsbauplattenindustrie e.V., Birkenweg 13, 64295 Darmstadt
- 2 Industrieverband Werk trockenmörtel e.V., Düsseldorfer Str. 50, 47051 Duisburg
- 3 Institut für Bauforschung Aachen, ibac: Bestimmung mechanischer und feuchtetechnischer Kennwerte von Estrichen auf Calciumsulfatbasis, Prüfung der Estriche E2, E3-2, E4, E5 und E6; Prüfbericht A 3058/1
- 4 Institut für Bauforschung Aachen, ibac: Feuchtetechnische Kennwerte, Verformungs- und Austrocknungsverhalten von Fließestrichen auf Calciumsulfatbasis; Prüfbericht A 3228/1, noch nicht veröffentlicht
- 5 Wiegrink, K.-H.; Schießl, P.: Austrocknungsverhalten von Calciumsulfat-Fließestrichen, noch nicht veröffentlicht
- 6 Springenschmid, R.: Die Ermittlung der Spannungen infolge von Schwinden und Hydratationswärme im Beton, Beton- und Stahlbetonbau 79 (1984), Heft 10, S. 263-269
- 7 Wiegrink, K.-H.: Modellierung des Austrocknungsverhaltens von Calciumsulfat-Fließestrichen und der resultierenden Spannungen und Verformungen, Dissertation, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung der TU München, 2002
- 8 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): Richtlinie für Betonbau beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen, Entwurf Juli 1995
- 9 Eisenmann, J.; Leykauf, G.: Bau von Verkehrsflächen, Betonkalender Teil II, 1978. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, 1978
- 10 Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Bd. 2: Beton, Mauerwerk. 3. Aufl. Wiesbaden: Bauverlag, 1993
- 11 Altmann, H.-D.; Lindel, U.: Besonderheiten des Anhydrit-Fließestrichs: Pumpfähiger Estrich will nachbehandelt sein. In: Bauzeitung 47 (1993), Nr. 5, S. 58-59
- 12 Müller, Chr.; Schießl, P.: Mechanische und feuchtetechnische Kennwerte sowie Schwindverhalten von Calciumsulfatestrichen, ZKG International. 52, S. 240-251 (1999)
- 13 Schießl, P.; Wiegrink, K.-H.: Calciumsulfat-Fließestriche, Verformungen und Spannungen, 2. Fachgutachter-Tagung 28.4.99, Nürnberg, IndustrieGruppe Estrichstoffe im Bundesverband der Gips- und Gipsbauplattenindustrie e.V.
- 14 Dettling, H.: Die Wärmedehnung des Zementsteins, der Gesteine und der Betone, Dissertation, TU Stuttgart, 1961
- 15 Nolting, H.: Zur Frage der Entwicklung lastunabhängiger Verformungen und Wärmedehnzahlen junger Betone, Dissertation, Universität Hannover, 1989
- 16 Weigler, H.; Karl, S.: Beton, Arten – Herstellung – Eigenschaften. Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau. Hrsg. H. Kupfer. Berlin, Verlag Ernst & Sohn, 1989

- 17 Institut für Bauforschung Aachen, ibac: Feuchtetechnische Kennwerte, Verformungs- und Austrocknungsverhalten von Fließestrichen auf Calciumsulfatbasis; Prüfbericht A 3228/1, noch nicht veröffentlicht
- 18
- 19

6 Tabellenanhang

Tabelle 1: Wärmedehnkoeffizient (Bezug 20°C)

Temperaturbereich	
20 - 50°C	20 - (-10)°C
[1/K]	
1,1·10 ⁻⁵	1,1·10 ⁻⁵

Tabelle 2: Anhaltswerte für Reibungsbeiwerte zwischen Bauwerk und Baugrund /8/

Untergrund	Gleitschicht	erste Verschiebung		wiederholte Verschiebung	
		min	max	min	max
1	2	3	4	5	6
Mineralgemisch (Kies)	keine	1,4	2,1	1,3	1,5
Sandbett	keine	0,9	1,1	0,6	0,8
Unterbeton	2 Lagen PE-Folie	0,6	1,0	0,3	0,75
Unterbeton	Teflon beschichtete Folie	0,2	0,5	0,2	0,3

Tabelle 3: Zeitliche Entwicklung der mechanischen Eigenschaften (Mittelwerte)

Kennwert		Alter					
		1d	3d	7d	14d	28d	56d
β_D		12,7	12,8	18,1	22,5	22,8	22,9
β_{BZ}		2,7	2,5	4,6	6,1	6,1	6,1
E_{dyn}	N/mm ²	22.300	22.900	22.700	23.200	23.500	22.500
E_{stat}						23.000	
β_Z					3,2		
ε_Z	mm/m					0,095	

7 Bildanhang

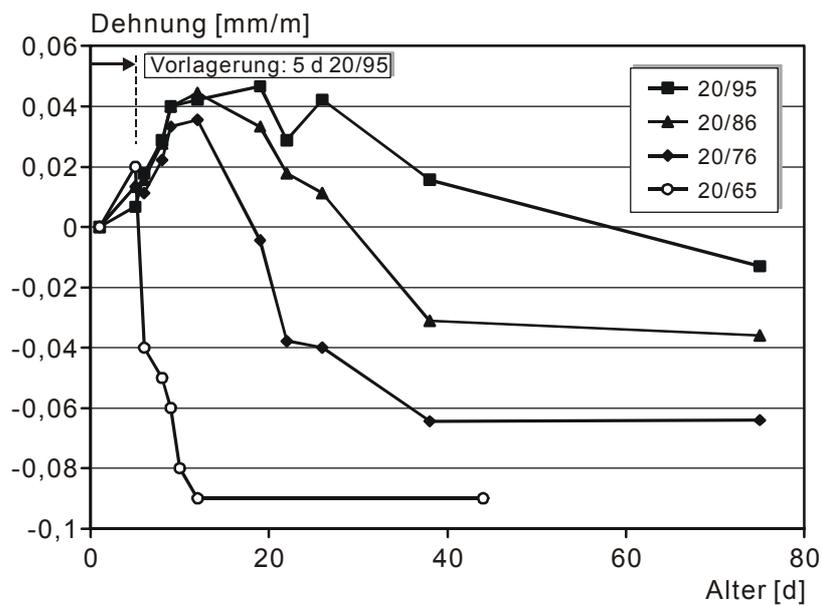


Bild 1: Schwindverformungen von Flachprismen in unterschiedlichen Klimaten, Vorlagerung 5 d bei 20°C / 99 % r.F., anschließend in Exsikkatoren, 20°C / 65 % r.F. in Klimakammer

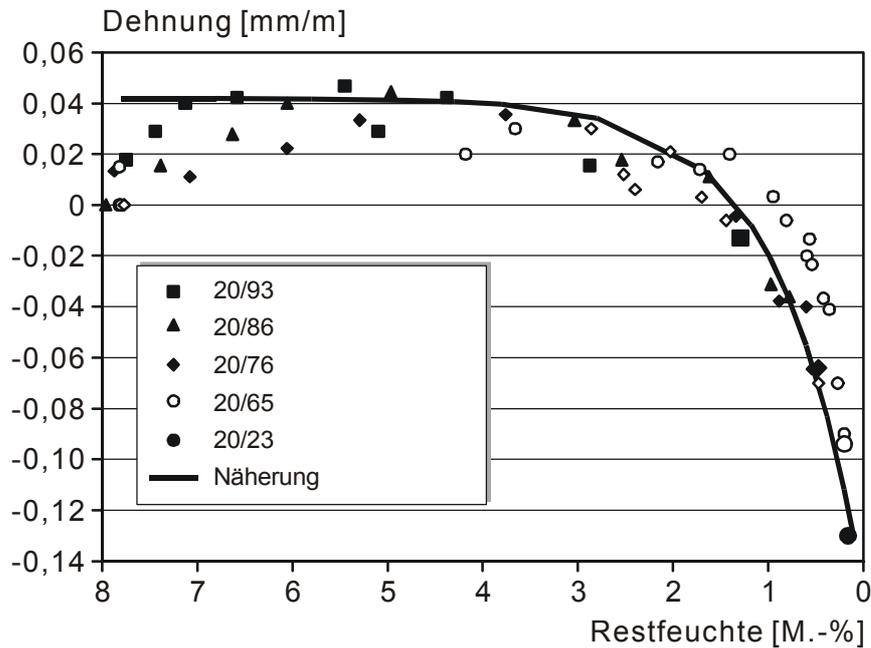


Bild 2: Schwindverformungen von Flachprismen in Abhängigkeit von der Restfeuchte in unterschiedlichen Klimaten, Vorlagerung 5 d bei 20°C / 99 % r.F. bzw. 1 d bei 20°C / 95 % r.F. + 5 d bei 20°C / 86 % r.F.; anschließend in Eksikkatoren, 20°C / 65 % r.F. in Klimakammer, Große Symbole sind die Endschwindmaße im jeweiligen Klima

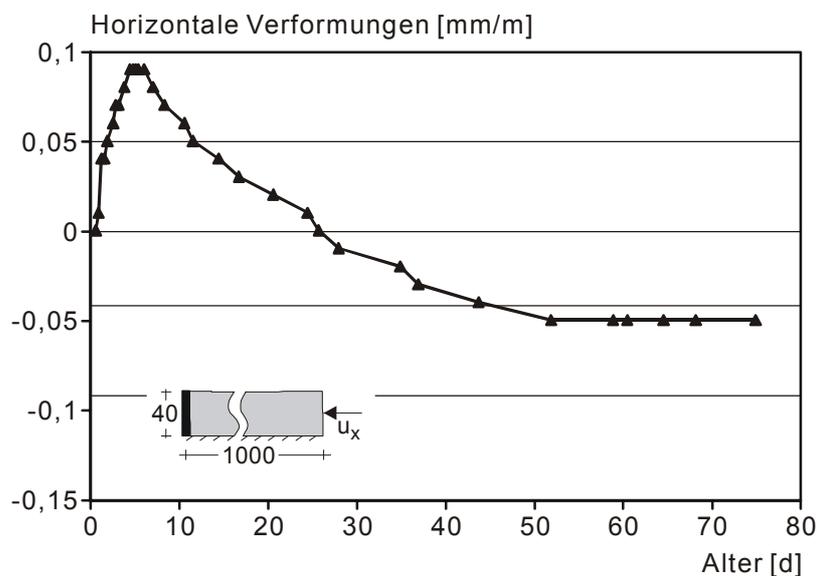


Bild 3: Schwindrinne - Längenänderungen in Abhängigkeit von der Zeit /12/

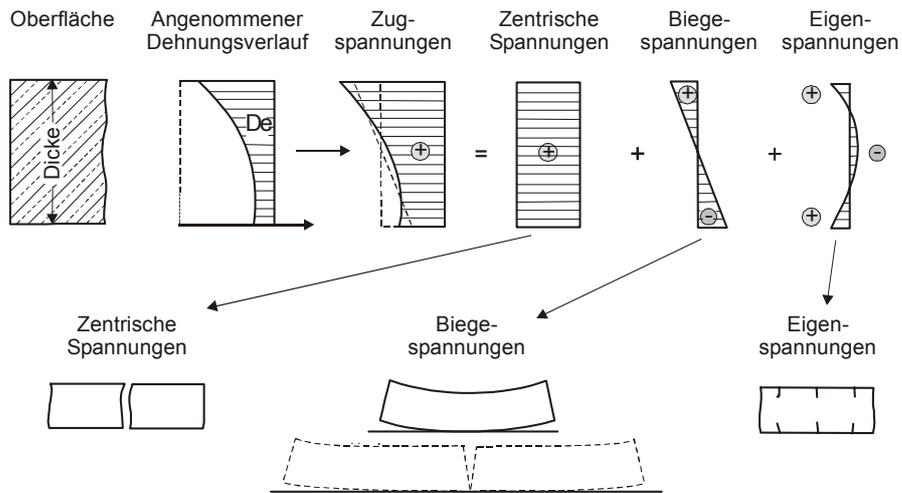


Bild 4: Unterteilung der Spannungen bei der Austrocknung eines Estrichs von oben und vollständiger Behinderung der Verformung, nach /6/

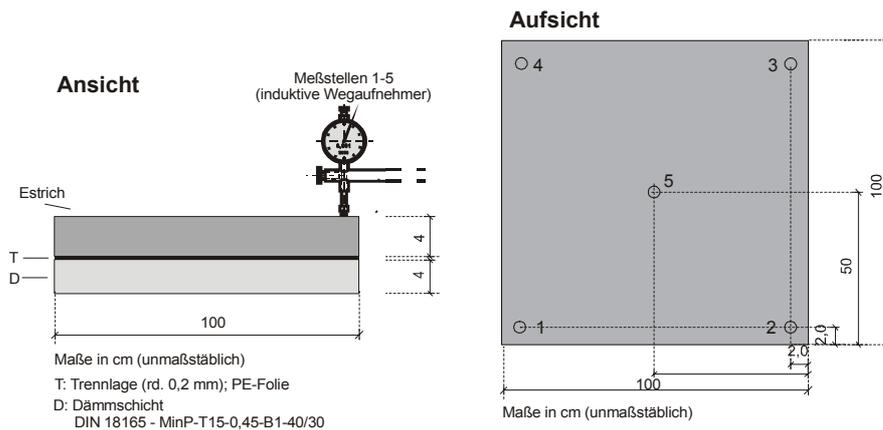


Bild 5: Versuchsaufbau Estrichplatte zur Messung der zeitabhängigen vertikalen Verformungen

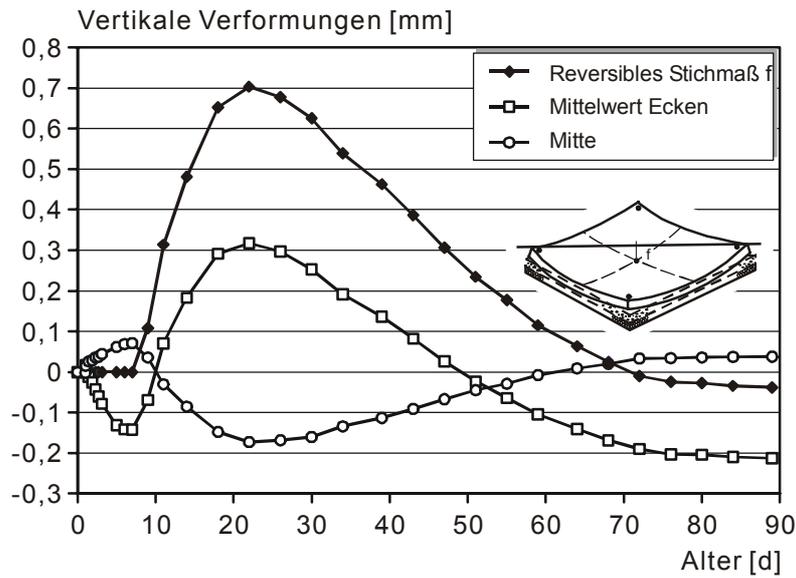


Bild 6: Gemessene zeitabhängige vertikale Verformungen des CSF und berechnete reversible Anteile des Aufschüsselns an einer Estrichkleinfläche 1000·1000·40 (mm) auf Trittschalldämmung, Austrocknung in 20°C / 65 % r.F. bei üblicher Ventilation

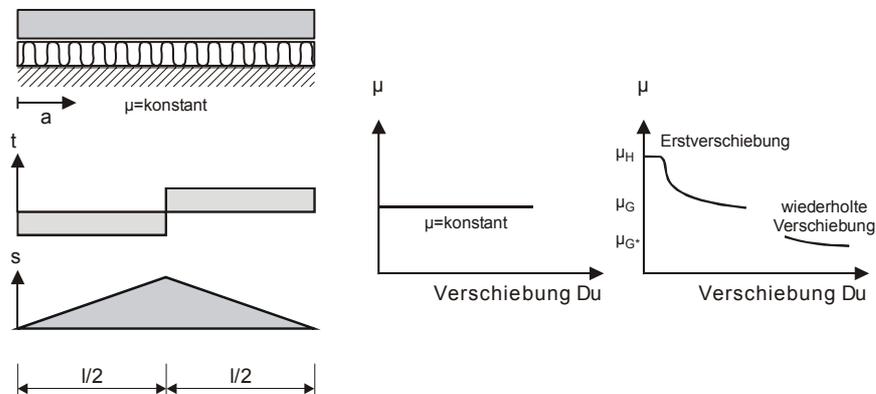


Bild 7: Spannungen in CSF bei gleichmäßiger Verkürzung unter der Annahme eines konstanten Reibbeiwertes (links). Realer Reibbeiwert (rechts)

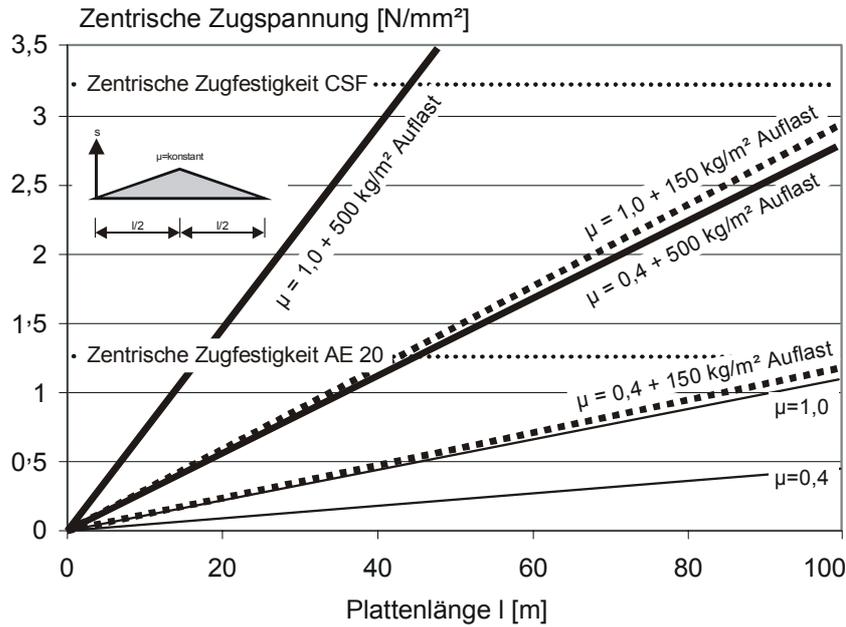


Bild 8: Maximale Normalspannung in Plattenmitte in Abhängigkeit des Abstandes zum freien Rand für verschiedene Reibbeiwerte, μ und für gleichmäßig verteilte Lasten, Estrichdicke 40 mm

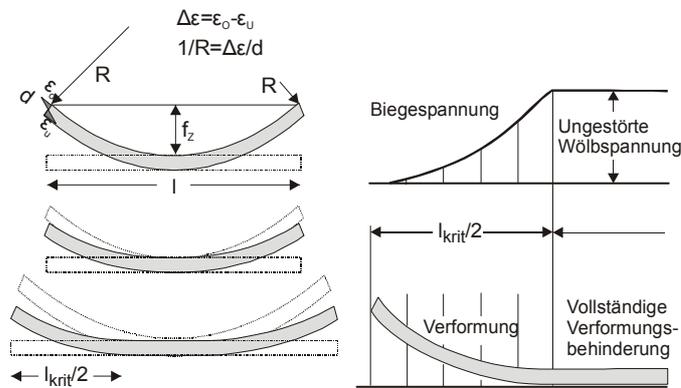


Bild 9: Verformungsfigur eines Estrichs infolge eines linearen Dehnungsgradienten, z.B. Schwinden, ohne Eigengewicht und unter der Berücksichtigung von Eigengewicht

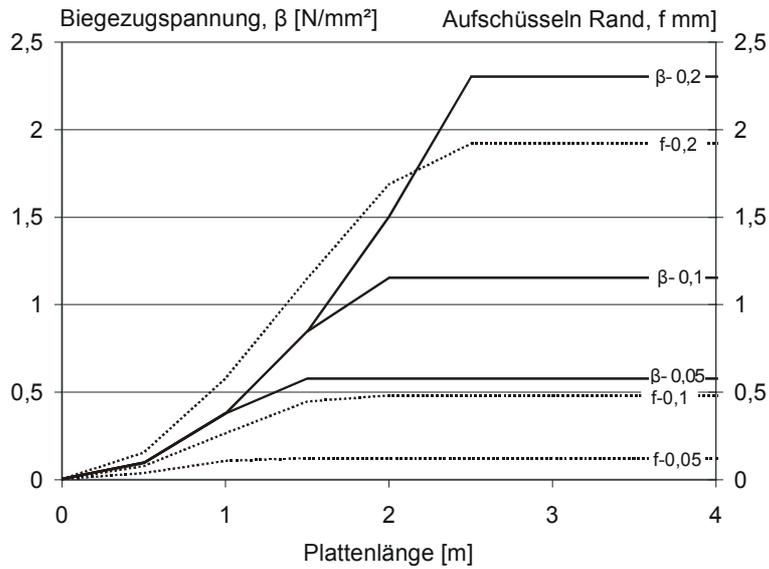


Bild 10: Biegezugspannungen, β und Verformungen, f am freien Rand einer Estrichfläche bei einem linearen Dehnungsgradienten von 0,05, 0,1 bzw. 0,2 ‰ über die Estrichdicke in Abhängigkeit von der Länge der Estrichfläche

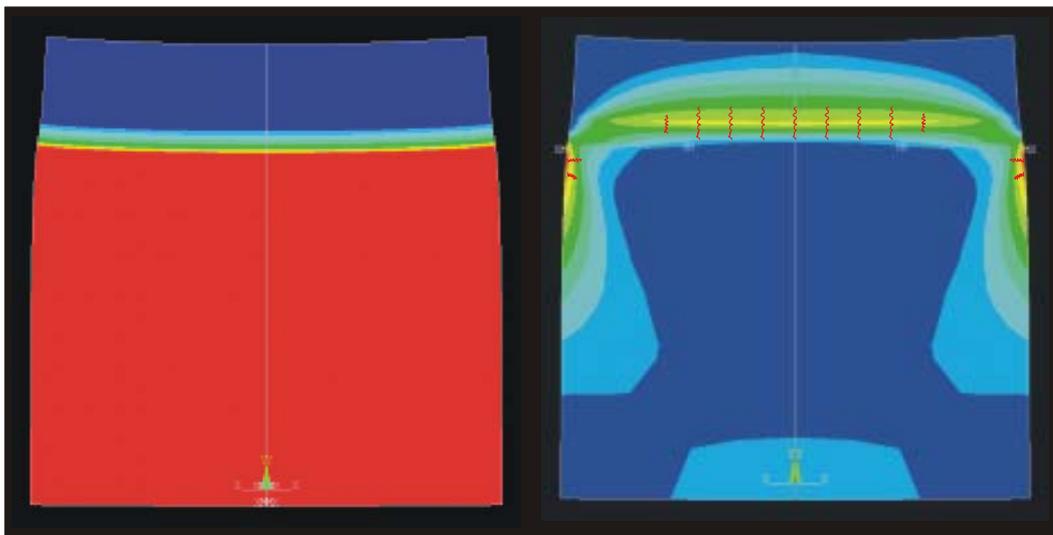
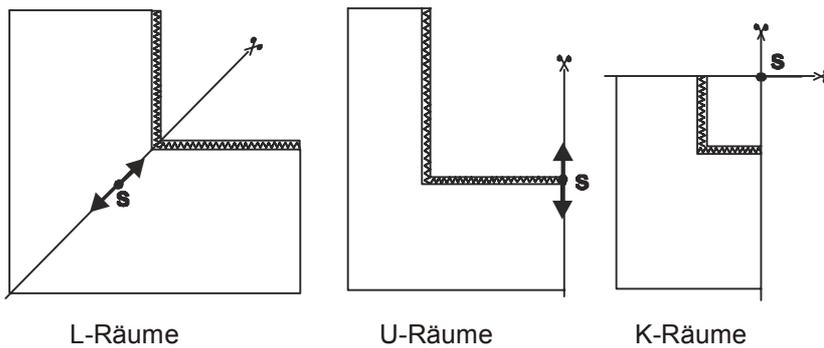


Bild 11: Typische Spannungsverteilung in einem Heizestrich infolge ungleichmäßiger Erwärmung der Teilflächen.
Im linken Bild ist die Temperaturverteilung dargestellt (rot $\sim +15K$)
Im rechten Bild ist die Spannungsverteilung dargestellt (rot $\sim 2,1$ N/mm², gelb $\sim 1,6$ N/mm²), Eine mögliche Rissbildung ist in roten Linien dargestellt.



L-Räume

U-Räume

K-Räume

Bild 12 Offene Raumgeometrien, S bezeichnet die Lage des Schwerpunktes der Estrichfläche.

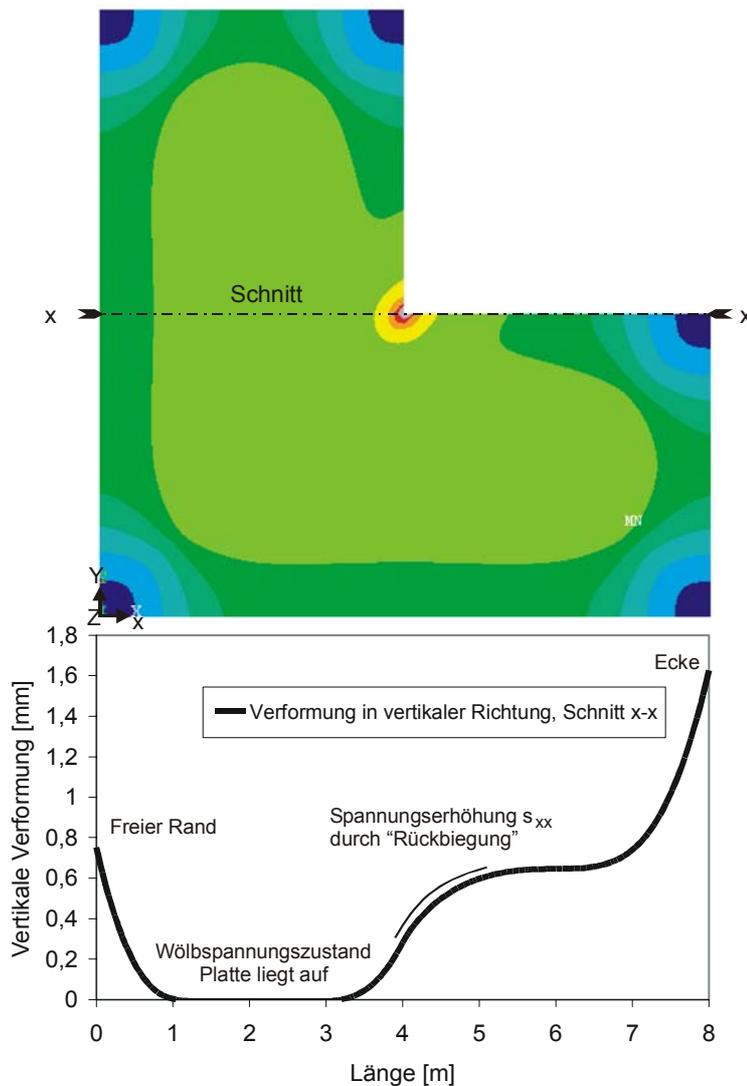


Bild 13: Oben: Biegezugspannungen auf der Oberseite eines Estrichs. Im Bereich der einspringenden Ecke kommt es zu einer Spannungserhöhung
 Unten: Querschnitt durch den Eckbereich zeigt Aufschüsseln (u_z) und die zusätzliche Krümmung, die die erhöhte Biegespannungen im Eckbereich erzeugt

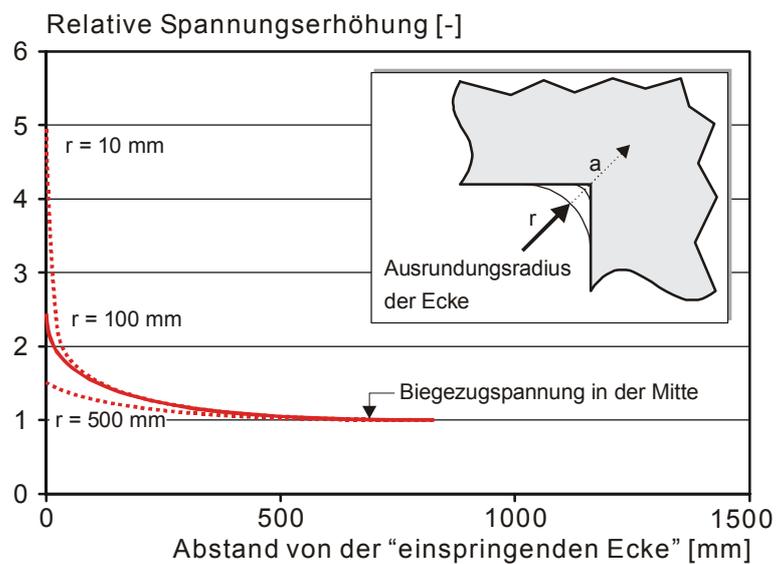


Bild 14: Spannungserhöhung im Eckbereich in Abhängigkeit vom Ausrundungsradius der Aussparung am Beispiel einer 60 mm dicken Platte bei einem linearen Dehnungsgradienten über die Dicke von 0,1 ‰