

# (Öko-)Technologische Leitprinzipien der Lehmarchitektur – 2. Teil

Nachdem wir uns im letzten baumagazin (6/2009) den historischen Aspekten des Lehmbaus widmeten, steht in diesem zweiten Teil vor allem eine aktuelle Forschungsarbeit im Mittelpunkt, die durch eine wissenschaftliche Abhandlung nachweisbar und belegbar die Ermittlung eines Teilsicherheitsbeiwertes für das Baumaterial Lehm herleitet. Ein abschließender dritter Teil wird in der nächsten Ausgabe das Thema „Erdbebensichere Sanierung bzw. Erneuerung von Lehmgebäuden“ beleuchten.

## AUTOREN:

*Ao. Univ.-Prof. Baurat h.c. DDr. Elmer Bölsckey*

*DI Andreas Rischaneck*

Lehm – ein „Urgestein- Verwitterungsprodukt“ – ist einer der ältesten (Natur-)Baustoffe, dessen Werkstoffeigenschaften (Bindekraft, Plastizität, Korngrößen-Verteilung usw.) von vielen verschiedenen Merkmalen abhängig ist.

Lehmvorkommen bzw. Lehmarten können je nach Entstehungsart bzw. Fundort der Lehmagerstätten (infolge

der langen Verwitterungsprozesse) regional und örtlich sehr verschiedenartig sein und werden in folgende unterschiedliche Kategorien eingeteilt [8], [17] (siehe Tabelle 1).

Von den Hauptbestandteilen des Lehmmaterials (Ton, Schluff 0,002 bis 0,06 mm, Sand 0,06 bis 2 mm Korngröße und Kies >2 mm) ist für die Bindigkeit der Tonsubstanz als „Bindemittel“ verantwortlich, der die restlichen „sandigen“ Bestandteile zusammen klebt bzw. zusammenhält. Als Gegengewicht bilden die Sandkörner eine Art Mineralgerüst.

Die Bindekraft eines (Bau-)Lehms ist von Art und Anteil der Tonminerale abhängig. Als weitere Unterteilung (nach ihrer Bindekraft) spricht man von einem „mageren“ Lehm, wenn dieser arm an Tonanteilen ist und von einem „fetten“ Lehm, wenn er einen erhöhten Tonanteil aufweist (siehe Tabelle 2).

**TABELLE 2** Bindekraft

	[g/cm <sup>2</sup> ]
<b>SEHR MAGER</b>	50 - 80
<b>MAGER</b>	> 80 - 110
<b>FAST FETT</b>	>110 - 200
<b>FETT</b>	>200 - 280
<b>SEHR FETT</b>	>280 - 360
<b>TON</b>	>360

**Tabelle 2: Einteilung der (Bau-)Lehme nach der Bindekraft.**

Eine einfache rasch ausführbare und trotzdem ganz verlässliche (Vor-)Prüfmethode zur Bestimmung/Abschätzung der Bindekraft ist die vereinfachte Ermittlung der „Reißlänge“ (Bild 2) nach [12]:

Tonminerale sind in der Regel hexagonale kristalline Plättchen mit charakteristischer, schichtartiger Kristallstruktur (z. B. Kaolinit, Montmorillonit).

**TABELLE 1** Lehmarten nach Entstehungsart

<b>BERGLEHM ODER GEHÄNGELEHM</b>	Lagert auf den Gesteinen, aus denen er durch Verwitterung entstanden ist, oder an den Hängen darunter. Das Mineralgerüst besteht vorwiegend aus kantigen Gesteinstrümmern verschiedener Körnung.
<b>GESCHIEBELEHM</b>	Ist ein durch Gletscher verlagertes Lehm. Das Mineralgerüst besteht aus runden Körnungen.
<b>MERGL</b>	Ist ein kalkhaltiger Geschiebelehm.
<b>SCHWEMMLEHM</b>	Ist durch Wasserläufe aus den früheren Lagerstätten abgeschlämmt und im ruhigen Wasser wieder abgesetzt worden. Schwemtlehm ist gelegentlich mit schwachen Linsen aus Sand, Kies oder Geröll durchsetzt. Humusbeimengungen sind möglich.
<b>LÖSSLEHM</b>	Ist auf Löss durch Auswaschung des Kalkgehalts entstanden. Der Löss ist ein windverfrachteter kalk- und tonhaltiger Feinsand. Lösslehm hat ein sehr feinkörniges Mineralgerüst und oft einen geringen Tongehalt.

**Tabelle 1: In Mitteleuropa übliche Einteilung der unterschiedlichen Lehmarten nach der Entstehungsart.**



Ein Lehmhaus aus Quito (Hauptstadt von Ecuador), Architekten: Acosta und Guayasamin; Technik: Stampflehm, Lehmsteinbau und Nasslehmfüllung mit Holzskelettkonstruktion.

nit, Illit), bestehend aus einem Kern, der entweder durch das Silizium oder durch das Aluminium gebildet wird. Allgemein kann man sagen, dass Tonminerale Kationen besitzen, die auf Grund von ihrer Art und der Anzahl entscheidenden Einfluss auf die Bindekraft des Lehms hat. Je dünner die Plättchen sind, umso größer ist auch die spezifische Oberfläche, was wiederum eine Vergrößerung des Vermögens von einem Kationenaustausch bewirkt. Dieses „Vermögen“ gibt auch den entscheidenden Ausschlag für die Festigkeitseigenschaften des Lehms.

**Zusammensetzung des Lehms**

Die Beschreibung der Zusammensetzung

des Lehms erfolgt durch die Kornverteilungskurve (Körnungslinie bzw. Sieblinie). Dabei wird der Anteil des Kornes bezogen auf die Gesamtmasse des Lehms in Prozent angegeben und die Korngröße auf einer logarithmischen Skala aufgetragen.

Die Ermittlung der Zusammensetzung des Lehms erfolgt für Körner größer 0,063 mm mit Hilfe der Siebung und für die Bestandteile mit einem Durchmesser kleiner als 0,063mm mittels Sedimentation (Schlamm-analyse). Die genaue Beschreibung für das Verfahren der Bestimmung der Kornverteilungskurve für eine Bodenprobe ist in der Önorm B 4412 bzw. Önormen ISO/TS 17892-4, Vornorm (Geotechnische Erkundung und Untersuchung-Laborversuch) festgelegt.

Die Kornverteilungskurve ist schon ein erster Hinweis für den Charakter des Lehms und bildet so eine erste mögliche Entscheidungshilfe für welche Lehm-bauweise sich die jeweilige Bodenprobe eignet.

Als anschauliche Beurteilungs-Kenngröße einer (Bau-)Lehmprobe wird die „Reißlänge“ einer mit der Hand aus dem feuchten (Nass-)Lehmmaterial stabförmig mit ca. 3 cm Durchmesser geformten und aufgehängten bzw. mit der Hand am Ende gehaltenen, dicken

„Lehmfaser“ (Lehmstrang) geprüft bzw. definiert: Die Zusammensetzung des Lehmmaterials ist dann optimal wenn die – infolge Eigenlast/Eigengewicht – abgerissene Lehmstange (mindestens) 15 – 20 cm lang werden kann.

Durch das Hinzugeben von Sand beziehungsweise von Tonmineralen, kann jedoch der Charakter der jeweiligen Kornverteilungskurve entscheidend beeinflusst werden. Das Zugabe von Sand wird in der Fachsprache als „Magern“ bezeichnet und das Zugabe von Tonmineralien als „Auf fetten“ des Lehms. Für Lehm-bauzwecke genügt im Allgemeinen eine Siebstufung von 0,06 – 0,25 – 1,0 – 2,0 mm (siehe Bild 3).

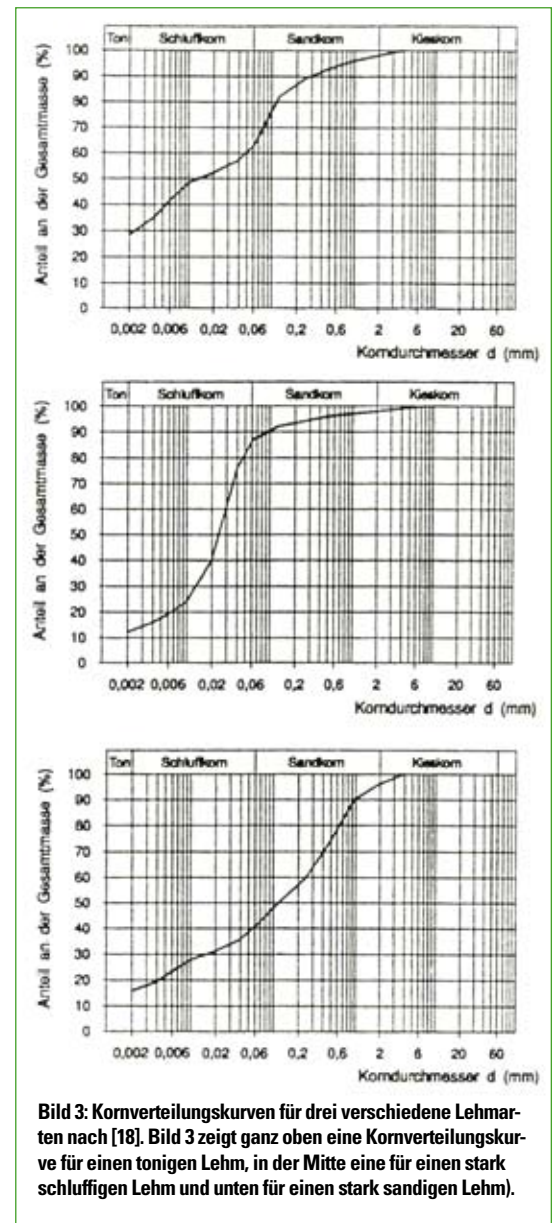


Bild 3: Kornverteilungskurven für drei verschiedene Lehmarten nach [18]. Bild 3 zeigt ganz oben eine Kornverteilungskurve für einen tonigen Lehm, in der Mitte eine für einen stark sandigen Lehm und unten für einen stark schluffigen Lehm.



Bild 2: Vereinfachte (Hand-)Prüfmethode der Bindekraft nach Prof. Minke [18], [12] mit der einfachen Bestimmung der „Reißlänge“ an einen feuchten Lehmstrang.

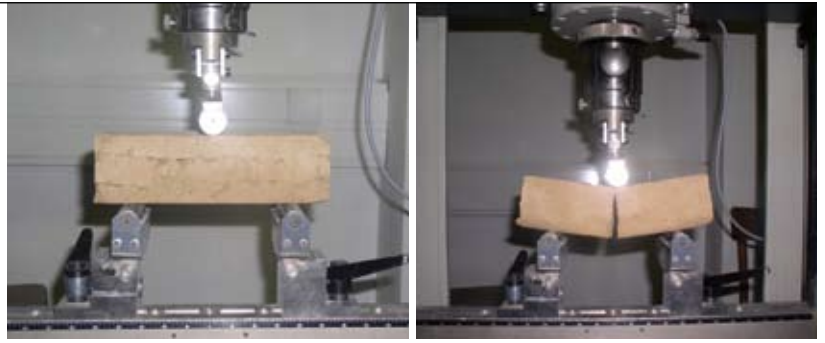
Neben der genormten Ermittlung der Kornverteilungskurve (nach Önorm B 4412) sei noch darauf hingewiesen, dass es im Lehm- und Ziegelbau auch eine Reihe einfacher Tests („Handprüfverfahren“ z. B. von Prof. Minke [18] oder Volhard gibt, die es erlauben rasch eine Abschätzung der Kornverteilung des vorhandenen Lehmes zu erhalten. Zu diesen zählen unter anderem folgende Methoden: Geruchstest, Beißttest, Reibe- und Waschtest, Schneidetest, Kugelfalltest, Konsistenztest, Kohäsionstest („Bändchentest“), Salzsäuretest. Genauere Beschreibungen befinden sich dazu in der einschlägigen Fachliteratur [17], [18] und [12] (Bild 2).

### Festigkeitseigenschaften des Lehms als Baumaterial

Um Lehm- und Ziegelbaustoffe im Bauwesen nicht nur architektonisch-gestalterisch, sondern auch statisch-konstruktiv und bauphysikalisch einwandfrei (d. h. dem aktuellen Stand der Technik entsprechend) einsetzen bzw. berechnen/dimensionieren zu können, muss man vorher die relevanten Materialeigenschaften (charakteristischen Festigkeitskenngrößen) durch statistisch auswertbare Laborversuche bestimmen.

Obwohl die grundlegenden, „tendenziellen“ Materialeigenschaften in jedem Lehmvorkommen gleich sein sollten, ergaben sich bei Lehm je nach Fundgrube (sogar manchmal innerhalb einer Lehmfundstelle) Unterschiede. Zur Präzisierung der (Lehm- und Ziegel-) Bemessungswerte bei einem konkreten Lehm- und Ziegelbauvorhaben sollten baustoffspezifische Druckfestigkeitsprüfungen [17] und [18] und Handprüfverfahren – Eignungsversuche (z. B. Bild 2) ausgeführt werden.

Die umfangreichen Laborversuche zur Bestimmung der charakteristischen Festigkeitskenngrößen des Baustoffes Lehm an der TU Wien wurden im Werkstofflabor des Institutes für Hochbau und Technologie, Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie und Brandsicherheit durchgeführt. Baulehm-Material wurde von der Firma Claytec („Claytec“, Sorte 10.001, gemahlener, zur Herstellung von Lehm- und Ziegelbaustoffen geeigneter „industriell aufbereiteter“ Lehm mit ei-



**Bild 4:** Prüfung eines Probekörpers auf Biegezug (Versuchsreihe 3, Abmessungen des Probekörpers: 26 x 12 x 8cm).

ner Körnung vom 0,0 – 5 mm, dessen Bindekraft laut Herstellerangaben bei 50 – 80 g/cm<sup>2</sup> liegt) zur Verfügung gestellt.

Im Rahmen der Laborversuche wurde der Lehm zuerst ohne „das Untermischen“ von jeglichen Zuschlägen bzw. Zusätzen, sondern nur durch Zugabe von Wasser aufbereitet. Nur für die 3. Versuchsreihe „praxisnaher Lehmziegel“ musste die Kornverteilungskurve durch die Zugabe von Zuschlägen optimiert werden, um Rissbildungen zu vermeiden. Ziel der Untersuchungen war es herauszufinden, welche Parameter wesentlich relevant sind, um die charakteristischen Festigkeitswerte (Biegezug- und Druckfestigkeit) zu optimieren.

Zur Ermittlung der Druck- und Biegezugfestigkeit wurde auf die Önorm EN 1015-11: „Prüfverfahren für Mauer- und Mörtel, Teil 11: Bestimmung der Biege- und Druckfestigkeit von erhärtetem Mörtel“ zurückgegriffen. Aus dieser Norm wurden die wesentlichen Rahmenbedingungen für die Versuche übernommen und für den Lehm- und Ziegelbau modifiziert/adaptiert. Dies gilt auch für die Dimensionen des Probekörpers, die mit den Abmessungen von 16 x 4 x 4 cm hergestellt wurden (Versuchsreihe 1 und 2). Nur für die „praxisnahe“ Versuchsreihe 3 wurden die Probekörper mit den Abmessungen von 26 x 12 x 8 cm gefertigt.

Nach Ablauf der Versuche (insgesamt wurden 220 Biegezug- und 416 Druckversuche (!) durchgeführt) hat sich gezeigt, dass durch die optimale Wahl der Lehmaufbereitung und dessen Verarbeitung bzw. Einbau in die Schalung man ein starkes signifikantes Verbesserungspotential des Lehmes abrufen kann.

Bei der Vermischung von Lehm mit Wasser kann eine unterschiedliche Rührdauer einen gewissen Verbesserungseffekt hervorrufen. Es zeigte sich, dass durch längeres Rühren die Druckfestigkeit um bis zu 10 % gesteigert werden konnte. (Wobei die Werte der Biegezugfestigkeit fast ident geblieben sind).

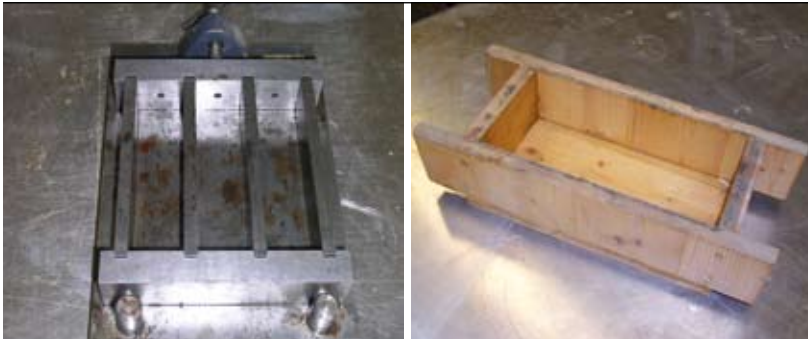
Noch bessere Ergebnisse erzielte man durch das „Mauken“ (Ruhenlassen) des Lehm- und Ziegelmaterials bzw. der aufbereiteten Lehm- und Ziegelmischung. Dies gilt für die Druck- und die Biegezugfestigkeit. Durch das „Mauken“ konnte die Druckfestigkeit um bis zu 30 % erhöht werden, ohne eine Reduktion der Biegezugfestigkeit hinnehmen zu müssen. Dabei zeigte sich auch, dass dies unabhängig von der gewählten Rührdauer ist.

In der Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Versuchsreihe 2 für die Druck- und Biegezugfestigkeit abgebildet [17].

Mit den gewonnenen Festigkeitswerten aus den Laborversuchen konnte ein Teilsicherheitsbeiwert für das



**Bild 5:** Prüfung eines Probekörpers auf Druck: links nach dem Einbau in die Prüfmaschine, rechts der zerstörte Probekörper nach dem Druckversuch.



**Bild 6:** Verwendete Probekörperformen (links für die Versuchsreihe 1 und 2, rechts für die Versuchsreihe 3).

semiprobabilistische, Eurocode-nahe Sicherheitskonzept bestimmt werden (siehe Bild 9).

Das Sicherheitskonzept wird gegenwärtig mit Hilfe des probabilistischen Modells auf Grundlage von Wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden und statistischen Auswertungen beschrieben und löste damit das „alte“ deterministische Modell [13] ab. Dabei wird die Versagenswahrscheinlichkeit (unter Berücksichtigung der Streuungen von Lasten und Werkstoffigenschaften) bzw. Zuverlässigkeit von Baukonstruktionen/Baustrukturen berechnet. Diese kann mit unterschiedlicher Genauigkeit ermittelt werden. Man unterscheidet drei Ebenen: Ebene III „das exakte Verfahren“, Ebene II „das probabilistische Näherungsverfahren“ und Ebene I „die semi-probabilistische Methode“.

**Zusammenfassung und Ausblick**

Die Teilsicherheitsbeiwerte für Baustoffe werden heute üblicherweise (Eurocode-konform) nach Ebene I also nach dem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept kalibriert. Dabei wird ein Sicherheitsindex  $\beta$  in Abhängigkeit von einer definierten Schadensklasse und einem Bezugszeitraum festgelegt, über den man mit Hilfe ei-

ner Wahrscheinlichkeitsverteilung den Teilsicherheitsbeiwert ermitteln kann. In dieser Arbeit werden als Wahrscheinlichkeitsverteilungen die Normalverteilung und die Lognormalverteilung verwendet und ausgewertet.

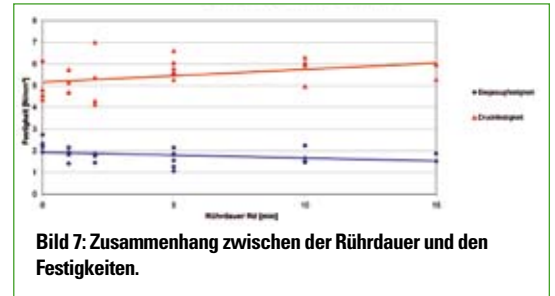
Auf Basis der gewonnenen Mittelwerte und Standardabweichungen aus den Laboruntersuchungen und unter der Anwendung der semi-probabilistischen Methode kann nun mit (statistischen Auswertungsmethoden) ein Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchbarkeit bestimmt werden. Der Sicherheitsindex  $\beta$  wurde nach kritischer Diskussion der angestrebten Nutzung und Lebenserwartung für ein Lehmbauwerk mit 3,80 festgelegt (Schadensklasse: CC2; Bezugszeitraum: 50 Jahre).

Die vorgestellte Forschungsarbeit [17] ist einer der ersten Beiträge, die durch eine wissenschaftliche Abhandlung nachweisbar und belegbar die Ermittlung eines Teilsicherheitsbeiwertes für das Baumaterial Lehm herleitet. Für den in den Laboruntersuchungen verwendeten („industriell aufbereiteten“ Lehm-)Baustoff der Firma Claytec konnte ein Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M = 2,10$  abgeleitet werden.

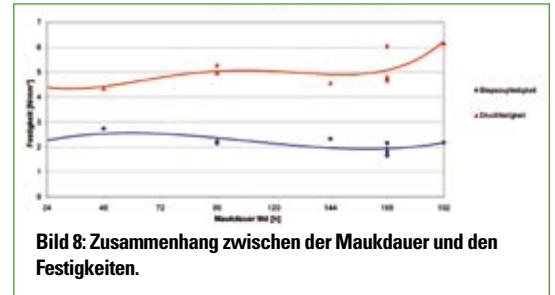
Die statistisch gesicherten (Versuchs-)

TABELLE 3		Charakteristische Festigkeit	
	Mittelwert	Standardabweichung	
<b>BIEGEZUGFESTIGKEIT</b>	1,60 N/mm <sup>2</sup>	0,35 N/mm <sup>2</sup>	
<b>DRUCKFESTIGKEIT</b>	5,00 N/mm <sup>2</sup>	1,16 N/mm <sup>2</sup>	

**Tabelle 3:** Charakteristische Festigkeitswerte für die Druck- und Biegezugfestigkeit (Versuchsreihe 2).



**Bild 7:** Zusammenhang zwischen der Rührdauer und den Festigkeiten.

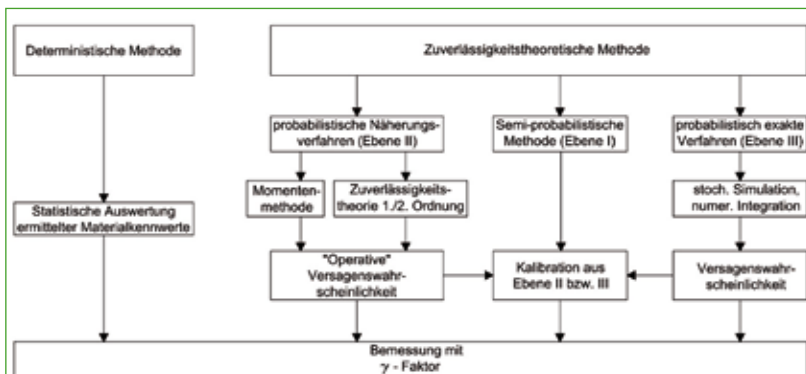


**Bild 8:** Zusammenhang zwischen der Maukdauer und den Festigkeiten.

Ergebnisse haben aufgezeigt, dass durch die optimale Wahl der Lehmaufbereitung und dessen Verarbeitung ein relativ starkes, signifikantes Verbesserungspotenzial des (Bau-)Lehmes „mobilisiert“ werden kann. Die besten Ergebnisse (bis zu 30 % höhere Werte sowohl für die Druck- als auch für die Biegezugfestigkeit) wurden durch das sog. „Mauken“ (d. h. durch das „Ruhelassen“ bzw. bestimmter Zeit feucht lagern) einer aufbereiteten Lehmmischung erreicht.

**LITERATUR**

[13] Kurrer, K.-E.: Geschichte der Baustatik, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG Berlin Korrigierter Nachdruck, 2003  
 [14] Schulz, J.-U.: Überlegungen zum Standsicherheitsnachweis im Lehmbau  
 www.modernerlehmbau.com/deutsch/editorial/lr\_d65.htm  
 [15] Pech, A.; Kolbitsch, A.; Zäh, F.: Tragwerke (Baukonstruktionen, Band 2, Hrsg.: A. Pech) Springer – Verlag / Wien 2007  
 [16] ENV 1996 Eurocode 6: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Tragwerken aus Mauerwerk, Wien: Österreichisches Normungsinstitut 1995  
 [17] Rischaneck, A.: Sicherheitskonzept für den Lehmsteinbau (Dissertation eingereicht an der TU-Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen), Wien 2010  
 [18] Minke, G.: Das neue Lehm-Handbuch, 5. Auflage, Stautfen bei Freiburg: Ökobuch Verlag 2001



**Bild 9:** Überblick über die Sicherheitskonzepte: links das deterministische Modell (verwendet im 20. Jahrhundert) und rechts die probabilistischen Modelle (Grundlage für die aktuell verwendeten Eurocodes).