

**LOW LEVEL EARTHQUAKE TESTING OF THE HDR:
COMPARISONS OF CALCULATIONS AND
MEASUREMENTS FOR THE REACTOR BUILDING**

**(Erdbebenuntersuchungen an der HDR-Anlage bei niederer Anregung;
Vergleich Messung-Rechnung f.d. Reaktorgebäude)**

P. JEHLICKA, L. MALCHER

*Kernforschungszentrum Karlsruhe, PHDR,
Postfach 3640, D-7500 Karlsruhe 1, Germany*

H. STEINHILBER

Battelle-Institute e.V., Postfach 90 01 60, D-6000 Frankfurt 90, Germany

Natural and forced vibratory behavior of the decommissioned nuclear plant (HDR, Kahl) was determined using shaker and explosive excitation, which was provided by buried charges to 10 kg placed 10 to 25 metres from the building. Analytical investigations to determine the vibratory behavior of the building were performed without knowledge of the test results by several sources, using different building and soil models and various programming and calculational systems.

The comparison of analytically and experimentally determined eigenfrequencies and mode shapes of the soil dependent modes of rocking, vertical translation and torsion showed that the models incorporating soil springs simulated the vibrational behavior better than the coupled FE models. Moreover the springs calculated using the Half Space Theory could hardly be differentiated from those of the FE models despite very inhomogeneous soil properties at the site. The correct torsional spring was not estimated by either model.

The models used for the building were beam models (40 to 300 degrees of freedom) and shell models (1.000 to 10.000 dof). Comparing the measured and calculated results of the structural modes of the beam models indicated a basic systematic variation caused by coupling the inner and outer concrete structure rigidly in the vicinity of the foundation, over-estimating the frequency of the first out-of-phase bending mode. In one case using the more costly and time consuming FE model, an almost perfect agreement between measured and calculated results was obtained, whereas in two others, correlations were made only with difficulty. It appears that the ability to handle and apply a given model should not be underestimated in its effect on the eventual results.

Intercomparisons of the calculations showed, that the vibratory behavior of the building and corresponding loading of the plant equipment can be determined virtually as well, for the type of excitation considered here, with a beam model on soil springs as with a fine mesh FE model.

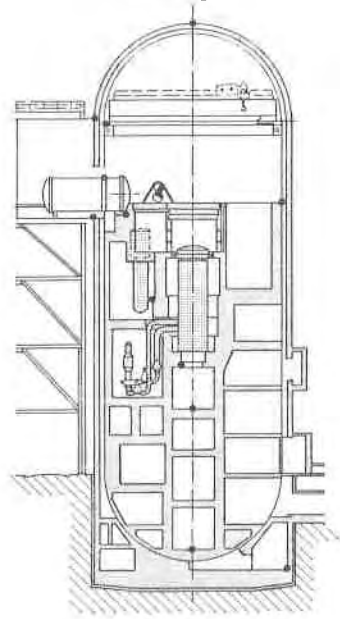
1. Untersuchungsprogramm

Im Rahmen des HDR-Sicherheitsprogramms werden an der HDR-(Heißdampfreaktor)-Anlage Erdbebenuntersuchungen durchgeführt. Das Ziel dieser Erdbebenuntersuchungen ist, die zur erdbebensicheren Auslegung von Kernkraftwerken verwendeten strukturdynamischen Rechenverfahren zu verifizieren. Dazu wurde ein Untersuchungsprogramm festgelegt /1/, das Vorausberechnungen des Schwingungsverhaltens, die Durchführung von experimentellen Schwingungsuntersuchungen mit verschiedenartiger und verschieden hoher Anregung und die Durchführung von Nachrechnungen der Versuche vorsieht.

Bisher wurde der erste Teil dieses Programms, die Untersuchungen auf niedrigerer Anregungsstufe, abgeschlossen. Nach Vorausberechnungen, die der Festlegung des Meßprogramms und der Gewährleistung der Anlagensicherheit dienen, wurde in 14 Shakerversuchen mit insgesamt 50 Versuchsläufen das Reaktorgebäude angeregt /2/. Die verwendeten Shaker hatten Unwuchten zwischen 0.5 und 179 kgm und waren auf eine Maximalkraft von $4 \cdot 10^4$ N ausgelegt. Zusätzlich fand eine Serie von 10 Sprengversuchen mit im Boden verdämmten Ladungen statt. Die Ladungen betragen dabei zwischen 1 und 10 kg in 35 m Entfernung von der Gebäudemitte. Die Versuche dienten zur Bestimmung von Eigenschwingungsformen, Eigenfrequenzen und Dämpfungswerten für das Reaktorgebäude, sowie zur Bereitstellung von Meßwerten der Schwingungsantwort bei Fremdanregung zum Vergleich mit Rechenergebnissen.

Im untersuchten Frequenzbereich bis 30 Hz ließen sich bei den Shakerversuchen 15 Eigenformen des Reaktorgebäudes in Wechselwirkung mit dem Boden identifizieren. Tabelle II gibt eine Charakterisierung dieser Schwingungsformen. Bei den Sprengversuchen wurden diese Ergebnisse der Shakerversuche bestätigt und darüber hinaus eindeutig die 1. Vertikalschwingungsform identifiziert.

Bei den zugehörigen theoretischen Untersuchungen lag das Schwergewicht auf der Erfassung des Einflusses unterschiedlicher Modellabbildungen, Rechenverfahren, Rand- und Kopplungsbedingungen im Hinblick auf die Zuordnung unterschiedlicher Modelle zu ihrem optimalen Aussagebereich /3/. Um eine systematische Untersuchung zu ermöglichen, wurden insgesamt 10 verschiedene Einzeluntersuchungen von Industriefirmen, Hochschulinstituten, Gutachtern und Ingenieurbüros ohne Kenntnis der Versuchsergebnisse durchgeführt. Tabelle I enthält Angaben über die verwendeten Modellabbildungen, Programmsysteme und Rechenverfahren. Die Modelle 1 bis 10 betreffen das Reaktorgebäude und den Boden, sowie



Reaktorgebäude (Schnitt $0^\circ \div 180^\circ$)

die Boden-Bauwerk-Wechselwirkung. Für Modell 1 bis 3 ist der Untersuchungsschwerpunkt die Modellabbildung des Bodens. Mit gleichem oder vergleichbar relativ einfachem Bauwerksmodell sollen mit verschiedenen Bodenmodellen Aussagen über den Anwendungsbereich jedes dieser Modelle gewonnen werden. Für Modell 4 bis 10 ist der Untersuchungsschwerpunkt die Leistungsfähigkeit der Bauwerksmodelle, wobei aber durchaus auch Vergleiche mit den Modellen 1 bis 3 beabsichtigt sind. Die Skala der verschiedenen Aufgaben reicht von der Erstellung eines fein diskretisierten Balkenmodells auf Bodenfedern (4/5) über verschiedene Stufen von FE-Modellen (6/7) zum nach dem derzeitigen Wissensstand feinsten Modell 8. Aus diesem feinen Modell wurden dann durch eine mathematische Reduktion der Freiheitsgrade Modelle entwickelt (9, 10), die den durch ingenieurmäßige Idealisierung entstandenen Modellen 6 bzw. 4 entsprechen.

2. Untersuchungsergebnisse

Das gemessene Schwingungsverhalten des Gebäudes auf dem Boden wurde von den meisten Gebäudemodellen nur bedingt richtig wiedergegeben. Tabelle II gibt eine Zusammenfassung der Rechen- und Meßergebnisse für das Eigenschwingungsverhalten. Die Tabelle enthält außer den durch Shakerversuche ermittelten Schwingungsformen (Kennung A - Q) die bei den Sprengversuchen identifizierte erste Vertikalmode V und die mit großer Sicherheit im Frequenzbereich liegenden, experimentell nicht identifizierten globalen Formen der Translation X bzw. Z in den horizontalen Richtungen mit gleichphasiger Biegung der Innen- und Außenstruktur, die 1. gegenphasige Torsionsschwingung T und die Längsdehnungsschwingung Y.

Betrachtet man den Frequenzbereich unter 5 Hz, so fällt auf, daß die größte Schwankungsbreite der Rechenergebnisse bei den komplizierten FE-Modellen 6 bis 8 auftritt, während die einfacheren Modelle 1,3 und 4/5 einander vergleichbare Werte liefern. Hier zeigt sich, daß die Handhabbarkeit und Überschaubarkeit eines Rechenmodells ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Modellabbildung sein muß.

Die wesentlich durch die Bodeneigenschaften beeinflussten gemessenen Schwingungsformen sind die Kippschwingungen A/B, die Vertikalschwingung V und die gleichphasige Torsionsschwingung G. Beim Vergleich der Bodenmodelle untereinander läßt sich sagen, daß die nach Formeln der Halbraumtheorie ermittelten Bodenfedern (Modelle 1 und 4) keine erheblichen Nachteile gegenüber den aus FE-Modellen gewonnenen (Modelle 3 und 7) zeigen. Die Kippfeder wurde durch die FE-Rechenmodelle mit Berücksichtigung der Einbettung (3,7) besser bestimmt, die Vertikalfeder durch die Halbraumtheorie ohne Berücksichtigung der Einbettung (1,4). Die Torsionsfeder wurde durch keine der beiden Methoden richtig eingeschätzt. Die wesentlich durch die Gebäudeeigenschaften beeinflussten Schwingungsformen sind die gegenphasige 1. Biegung C/E und die höheren Biegeformen H-Q. Wie der Vergleich der Eigenfrequenzen der Modelle 1 - 5 mit den Meßergebnissen zeigt, liegt eine Schwäche der Balken-

modelle in der starren Kopplung zwischen Innen- und Außenstruktur im Bereich der Fundamentplatte. Das führt vor allem für die gegenphasigen 1. Biegeformen C und E zu höheren Frequenzen. Das Schalenmodell 7 erfaßt diese gekoppelte Schwingungsform besser.

Im übrigen zeigt aber ein Vergleich der Ergebnisse für das Balkenmodell 4 mit denen des Schalenmodells 7, daß die Unterschiede in der Leistungsfähigkeit zur Erfassung globaler Schwingungsformen nicht schwerwiegend sind. Erst bei den Schwingungen der Stahlkuppel und den höheren Eigenschwingungsformen im Bereich über 15 Hz ist die Leistungsgrenze eines guten Balkenmodells erreicht.

Die Vereinfachung des Modells 8 durch statische Kondensation zu den Modellen 9 und 10 gibt im Frequenzbereich unter 5 Hz in Eigenform und -frequenz gut mit dem Ausgangsmodell übereinstimmende Ergebnisse, wobei jedoch das aufwendige Rechenmodell 8 Ergebnisse lieferte, die kaum den Meßergebnissen zugeordnet werden konnten.

Vor Beginn der Rechnungen bei Fremdanregung wurden einige Modelle im Rahmen der vorgesehenen Modellabbildung modifiziert. So wurde z.B. bei Modell 1,2 und 4/5 die Einbettung nachträglich berücksichtigt. Hierdurch ergab sich eine Annäherung der Eigenfrequenzen an die gemessenen Werte.

Bild 1 zeigt Ergebnisse der Rechnungen mit den Modellen 3 (Balkenmodell) und 7 (Schalenmodell) bei Shakeranregung für einen Referenzpunkt im Gebäude jeweils im Vergleich zu den Meßwerten. Die Art der Darstellung (Verschiebungen bei konstanter Kraftamplitude) läßt nur die Resonanzüberhöhungen bei ca. 1,5 Hz (Kippschwingung) und bei ca. 2,6 Hz (gegenphasige Biegung) deutlich erkennen. Die Rechenergebnisse zeigen das Verhalten, das nach den Ergebnissen der Eigenschwingungsberechnungen und den durchgeführten Modifikationen zu erwarten war. Im Frequenzbereich von 6 bis 10 Hz liegen jedoch die errechneten Verschiebungsamplituden bei fast allen Modellen unter den gemessenen Werten. Eine Ursache dafür sind die großen Unterschiede zwischen dem gemessenen und dem berechneten Torsionsschwingungsverhalten sowohl in Eigenfrequenz wie in Eigenform und Dämpfung. Eine weitere Ursache kann sein, daß die Abstrahlungsdämpfung der Translationsschwingungen X und Z geringer ist als angenommen wurde. Parameterrechnungen mit Modell 7 haben gezeigt, daß eine Reduzierung der Dämpfung dieser Moden von 25 bzw. 35 % auf 3 % eine bessere Übereinstimmung von Meß- und Rechenergebnissen zwischen 6 und 7 Hz ergab. Hier ist jedoch anzumerken, daß die bei der Fremdanregungsrechnung verwendeten Schwingungsformen aus der Eigenwertgleichung des Systems ohne Berücksichtigung der Dämpfung ermittelt wurden, so daß als dritte mögliche Ursache für Abweichungen rechnerisch unzureichend erfaßte Schwingungsformen bei starker Abstrahlungsdämpfung in Frage kommen.

Die Klärung dieser offenen Fragen kann erst bei den zukünftigen Versuchen mit wesentlich höherer Shakeranregung durch gezielte Suche nach den Translationsmoden und Bestimmung der zugehörigen Dämpfungswerte erfolgen.

Bild 2 zeigt gerechnete Beschleunigungszeitverläufe bei Sprenganregung für die Modelle 4 und 7 im Vergleich zu den Meßwerten. Bemerkenswert ist dabei die gute gegenseitige Übereinstimmung der Zeitverläufe bei zwei unabhängigen Rechnungen mit

- unterschiedlichen Rechenmodellen:
 - Balkenmodell 4 und Schalenmodell 7.
- unterschiedlichen Rechenverfahren:
 - Direkte Integration bei 4 und THMA bei 7.
- unterschiedlicher Verwendung der Anregungsdaten:
 - Geführte Bewegung des Fundaments bei 4 und über Transfermatrizen aus Fundamentwerten errechnete Bodenbewegungen bei 7.

Die mit Modell 4 und 7 berechneten Zeitverläufe unterscheiden sich von den Meßwerten dadurch, daß einzelne Beschleunigungsspitzen zu Beginn des Zeitablaufs nicht voll erfaßt sind und daß die dominierende Frequenz die der Kipp-schwingung bei 1,5 Hz ist, während bei den Versuchen eindeutig die gegenphasige Biegung bei ca. 2,6 Hz am stärksten angeregt wurde. Die Ursache dafür ist mit großer Sicherheit eine direkte Kippanregung des Fundaments bei den Sprengversuchen. Bei den vorliegenden geometrischen Verhältnissen und Bodenparametern regen die Rayleigh-Wellen Kippbewegungen im Bereich von 2 bis 4 Hz besonders stark an. Bei den Rechnungen wurden aber nur die Translationsbewegungen bei der Anregung berücksichtigt.

Ähnlich ist es im Frequenzbereich der Torsionsschwingung bei 8 Hz. Es scheint, daß durch die bei der Sprengung schräg auf den Verdichtungsbe-reich unter dem HDR auflaufenden Wellen eine direkte Torsionsanregung statt-fand. Das zeigen besonders deutlich die aus den Meßwerten ermittelten Be-schleunigungsresponsespektren. Ein solches Spektrum ist in Bild 3 im Ver-gleich zu den Rechenergebnissen mit Modell 7 dargestellt. Im Bereich der ge-genphasigen Biegung (ca. 2,6 Hz) und der 2. Biegeschwingungen (ca. 12 Hz) liegen die Rechenwerte um etwa 30 % zu niedrig, wahrscheinlich wegen der Kippanregung. Im Bereich von 6 bis 9 Hz liefert die Rechnung sogar nur etwa die Hälfte der nach den Messungen sich ergebenden Werte, zum einen bei 8 Hz wegen der Torsionsanregung, zum anderen bei ca. 6 Hz aus den bei der Shaker-anregung diskutierten Gründen.

Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse für alle Modelle wird in /4/ gegeben, doch haben schon die hier dargestellten Beispiele deutlich gemacht, daß mit einem Balkenmodell auf Bodenfedern weitgehend gleichwertige Ergebnisse erzielt werden können wie mit einem feinen und auf-wendigen FE-Modell, zumindest, was das Schwingungsverhalten des Gebäudes und damit die Belastung der Anlagen bei den verwendeten Anregungsarten betrifft.

Literatur:

- /1/ HDR-Sicherheitsprogramm, Gesamtprogramm, Kernforschungszentrum Karlsruhe - PHDR (1976)
- /2/ Forced Vibration Tests at the Heißdampfreaktor (HDR) Using Structural Vibrators and Explosives, Vol. I, II, Applied Nucleonics Comp., Inc., Los Angeles, Report 1083-3 (1976)
- /3/ Erstellung der Detailspezifikation für das Einzelvorhaben "Erdbebenuntersuchungen" des HDR-Sicherheitsprogramms, Battelle-Institut e.V., Frankfurt (1975)
- /4/ Vergleich von Meß- und Rechenergebnissen der Erdbebenuntersuchungen auf niederer Anregungsstufe, A: Gesamtübersicht, Kernforschungszentrum Karlsruhe, PHDR-Bericht 4-78 (1978)

Tabelle I: Modellabbildung von Reaktorgebäude und Boden

Mod. Nr.	Modell-Beschreibung	Zahl der Freiheitsgrade	Rechenprogramm-system	Rechenverfahren bei Fremdanreg. rechnung	Bemerkungen
1	Balkenmodell (grob diskretisiert), Bodenfedern nach Whitman	138	SAP IV	THMA	Parameterstudien Boden: Federn nach Whitman und Newmark
2	Balkenmodell wie 1, gekoppelt an 3D-FE-Bodenmodell	1846	SAP IV	THMA	Parameterstudien Boden: 2D-FE-Modelle mit verschied. Diskretisierung u. Randbedingungen (208; 378 Freiheitsgrade)
3	Balkenmodell (grob diskretisiert), Frequenzabhängige Feder- u. Dämpfer aus zylindersymmetrischem Bodenmodell mit halb-finiten Elementen	RGE: 42 Boden: 426	UETF BAUBOW	FFT	Modifikation vor Rechnung bei Fremdanreg., Koppelfeeder zwischen Innen- u. Außenstruktur bestimmt aus FE-Modell im Fundamentbereich
4	Balkenmodell (fein diskretisiert), Bodenfedern n. Whitman	234	DEA/MESY	Direkte Integration (THA)	
5	wie Modell 4	234	DEA	THMA	
6	Schalmodell der Außenstruktur, Räuml. Balkenmodell der Innenstruktur. Frequenzabhängige Feder- u. Dämpfungselemente aus zylindersymm. Bodenmodell mit halb-finiten Elementen	ca. 950	SAP IV	THMA	Ergebnisse in Tab. 10 mit Bodenfedern nach IABCO. Vor Rechnung bei Fremdanr. Parameteridentifik. u. Modellmodifikat.
7	FE-Modell (fein diskretisiert), Schalen-, Platten-, Volumenelemente, Bodenfedern aus statischem FE-Bodenmodell unter Berücksichtigung der Randschieblichkeit	2996	ASKA	THMA	Vergleichsrechnungen mit SAP IV-Balkenmodell
8	FE-Modell (sehr fein diskretisiert), Schalen-, Platten-, Volumenelemente, 3D-FE-Bodenmodell angekoppelt; Substrukturtechnik mit teilweiser statischer Kondensation	9508 ↓ 2460	ASKA	-	Nur für Eigenwertanalyse verwendet
9	FE-Modell, aus 8 durch statische Kondensation gewonnen	285	ASKA	THMA	
10	Bodenmodell (grob diskretisiert), aus 9 durch weitere statische Kondensation gewonnen	66	ASKA	-	Nur für Eigenwertanalyse verwendet

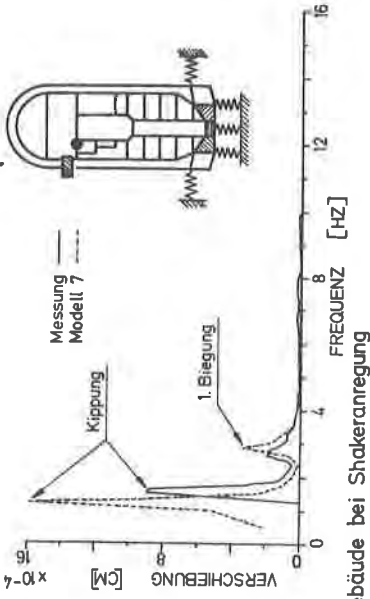
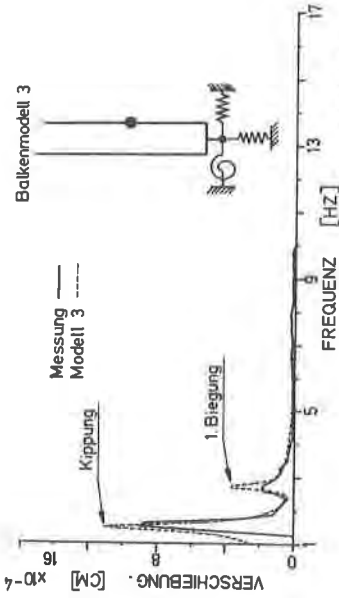
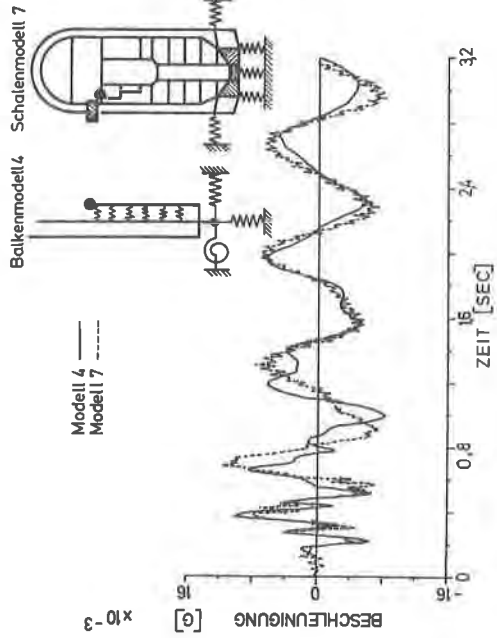
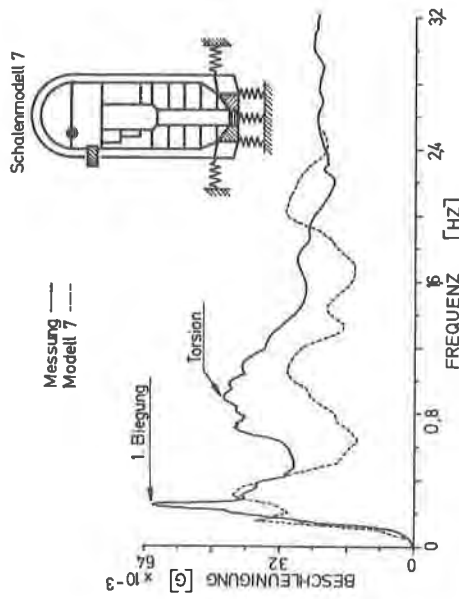


Bild 1



Beschleunigung im Reaktorgebäude bei Sprenganregung

Bild 2



Responsenspektrum im Reaktorgebäude bei Sprenganregung

Bild 3

Tabelle II: Eigenfrequenzen des Reaktorgebäudes und der Gebäudemodelle

Eigenschwingungsformen		Eigenfrequenzen [Hz]									
		Modell Nr.									
Charakterisierung	Mode	Test	1	2	3	4,5	6	7	8	9	10
Kippschwingung	x-Richtung	1,52	1,12	1,06	1,18	1,02	0,63	1,24	(2,07)	(2,07)	(2,11)
	z-Richtung	1,57				1,03	0,69	1,26	(2,15)	(2,15)	(2,20)
1. Biegung gegenphasig	x-Richtung	2,63	(3,95)	4,23	3,78	3,67	1,81	2,76	(3,59)	(3,75)	(3,81)
	z-Richtung	2,81				3,69	1,83	2,49	(4,16)	(4,35)	(4,45)
Vertikalschwingung	V	3,35	3,26	2,07	*	3,27	2,66	4,30	4,02	4,13	4,20
	1. Torsionsschwingung in Phase	8,16				(3,97)	1,55	4,33			
Translation und 1. Bieugung in Phase	X	-	5,22	(1,86)	5,8	5,16	3,02	6,14	s. C	s. C	s. C
	Z	-				3,19	3,04	6,18	s. E	s. E	s. E
1. Torsionsschwingung gegenphasig	T	-	*	*	*	(7,28)	6,04	7,98			(8,75)
	1. Längsdehnungsschwingung	Y	15,02			14,78		11,10			
2. Biegung gegenphasig	H	12,25	14,74		12,5	13,22		12,31		14,04	13,35
	I	12,60				13,34		12,46		14,79	15,86
2. Biegung in Phase	J	13,88	(18,46)			14,07		13,49		13,24	(14,51)
	K	14,60				14,10		13,91		13,74	14,98
Stahlkuppelbiegung	L	15,25	(25,7)		16,3	16,36		15,14			
	M	15,25				16,36		15,50			
Kranbahnschwingung	N	20,0						19,53			
	O	20,0						20,28		19,79	
Höhere Biegung	P	24,5				(24,54)					
	Q	29,0				(24,92)					

- nicht identifiziert
 * im Modell nicht enthalten
 () nicht sicher identifizierte Form