

**BAM** Bundesanstalt  
für Materialforschung  
und -prüfung, Berlin

## **Forschungsbericht 176**

### **Iterative Dekonvolution der seismischen Basiserregung für den Zeitraum**

von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees  
Dr.-Ing. Götz Magiera



Berlin 1990



## Aufgaben der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung ist als Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministers für Wirtschaft das technisch-wissenschaftliche Staatsinstitut der Bundesrepublik Deutschland für Werkstoffwissenschaften, Materialprüfung und Chemische Sicherheitstechnik. Dieser Komplex stellt in allen Industrieländern einen technologischen Schlüsselbereich dar, da Materialien als Konstruktions- und Funktionswerkstoffe die Grundlage der gesamten Technik bilden. Die Materialforschung, die zuverlässige, normgerechte und neutrale Prüfung sowie die sicherheitstechnische Beurteilung von Werkstoffen, Bauteilen und Konstruktionen sind wesentliche Voraussetzungen für eine leistungs- und wettbewerbsfähige Wirtschaft im Hinblick auf die Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit technischer Produkte, Umweltschutzanforderungen und die Notwendigkeit der sparsamen Verwendung von Rohstoffen und Energie.

Die Ursprünge der BAM reichen bis in das Jahr 1870 zurück, in dem durch Erlaß des damaligen Preußischen Ministeriums für Handel, Gewerbe und öffentliche Arbeiten die Gründung einer Mechanisch-Technischen Versuchsanstalt bei der Gewerbeakademie beschlossen wurde. 1895 erfolgte die Angliederung der im Jahre 1875 eingerichteten Prüfungsstation für Baumaterialien als neue Abteilung der Versuchsanstalt. Im Jahre 1904 kam es darüber hinaus zur Zusammenlegung mit der 1877 errichteten Chemisch-Technischen Versuchsanstalt zum Königlichen Materialprüfungsamt. Dessen erster Direktor, Adolf Martens (1850—1914), trat u. a. als Entdecker des nach ihm benannten Martensitgefüges von Stahl und als Mitbegründer sowie Vorsitzender (1896—1913) des „Deutschen Verbandes für die Materialprüfungen der Technik“ hervor. Das Königliche Materialprüfungsamt, das im Jahre 1907 eine selbständige Behörde geworden war, wurde nach dem Ersten Weltkrieg dem Preußischen Ministerium für Wissenschaft, Kunst und Volksbildung unterstellt. Es bestand als Staatliches Materialprüfungsamt (MPA) — bei ständiger Erweiterung seiner Aufgabenbereiche und Angliederung anderer Institutionen, wie z. B. der Reichs-Röntgenstelle — bis 1945.

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde dem MPA die im Jahre 1889 errichtete Chemisch-Technische Reichsanstalt (CTR) angeschlossen. Diese vereinigten Institutionen erhielten im Jahre 1954 den Status einer Bundesanstalt im Geschäftsbereich des Bundesministers für Wirtschaft, die seit 1956 den Namen „Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)“ trägt und ab 1. 1. 1987 „Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)“ heißt.

Die Aufgaben der BAM wurden durch einen Erlaß des Bundesministers für Wirtschaft vom 1. September 1964 letztmalig festgelegt. Danach hat die Bundesanstalt die Aufgabe, Werkstoff- und Materialforschung entsprechend ihrer Zweckbestimmung zu betreiben und die Materialprüfung sowie die Chemische Sicherheitstechnik stetig weiter zu entwickeln. Die Ergebnisse ihrer und fremder wissenschaftlicher Arbeiten hat die Bundesanstalt zu sammeln, zu ordnen und der Allgemeinheit zugänglich und nutzbar zu machen. Für das Land Berlin hat die Bundesanstalt die Aufgaben eines staatlichen Materialprüfungsamtes. Auf Antrag steht die BAM Industriefirmen, Wirtschaftsverbänden, Verbrauchereinrichtungen sowie privaten Antragstellern zur Verfügung. Außerdem berät sie Bundesministerien und unterstützt Verwaltungsbehörden sowie Gerichte. Mit Institutionen ähnlicher Zielsetzung des In- und Auslandes, insbesondere den nationalen Schwesterinstituten, arbeitet die BAM eng zusammen. Daneben ist sie in die technische Zusammenarbeit mit verschiedenen Entwicklungsländern eingebunden. Die Mitarbeiter der Bundesanstalt wirken in zahlrei-

chen Fachgremien, gesetzgebenden Körperschaften und normensetzenden Institutionen an der Aufstellung von technischen Regeln und Sicherheitsbestimmungen mit und vertreten die Bundesrepublik Deutschland in internationalen und supranationalen Einrichtungen.

Aufgrund des Gesetzes über explosionsgefährliche Stoffe, des Gesetzes über die internationale Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße, des Waffengesetzes sowie einer Reihe weiterer gesetzlicher Regelungen und Verordnungen hat die Bundesanstalt den Status einer Bundesoberbehörde. Damit erhalten die in diesem Zusammenhang erteilten Zulassungen, Richtlinien und Auflagen bundesweit gesetzlichen Charakter. Im Rahmen der genannten Gesetze obliegen der BAM u. a. die Prüfung von Stoffen und Konstruktionen für die Zulassung explosionsgefährlicher Stoffe und Sprengzubehör, die Zulassung der Bauart von Verpackungen und die Genehmigung der Beförderung von gefährlichen Gütern ohne Schutzbehälter. Ferner läßt die Bundesanstalt Raketenmunition und Geschosse mit pyrotechnischer Wirkung im zivilen Bereich zu und prüft die Vielzahl weiterer Produkte und Gegenstände im öffentlichen Interesse.

Mit nahezu 1.200 Mitarbeitern, darunter etwa 300 Wissenschaftlern unterschiedlicher naturwissenschaftlicher und technischer Fachrichtungen, befaßt sich die BAM in mehr als 100 Laboratorien damit, die chemischen, physikalischen und technologischen Eigenschaften von Werkstoffen zu bestimmen und Zusammenhänge zwischen Stoffkennwerten und Materialverhalten beim praktischen Einsatz aufzuklären. Dadurch werden Rohstoffe und Werte erhalten, Schäden vermindert und Unfälle verhütet. Das Arbeitsgebiet schließt alle technischen Materialien ein: Metalle, anorganische nichtmetallische Stoffe, insbesondere Baustoffe und keramische Werkstoffe, organische Stoffe wie Kautschuk, Kunststoffe, Textilien, Leder, Papier, Holz, aber auch Verbundwerkstoffe, technische Fluide und Gase sowie feste, flüssige und gasförmige explosionsfähige Stoffe. Für die Untersuchung von Materialien unter den verschiedensten Beanspruchungen, z. B. mechanischer, thermischer, tribologischer, chemischer, korrosiver oder biologischer Art, werden unterschiedlichste Meß-, Prüf- und Analysetechniken einschließlich zerstörungsfreier Prüfverfahren und Computertechniken eingesetzt. Durch Forschung und Entwicklung, Prüfung und Untersuchung sowie Beratung und Information dient die BAM dem Ziel, die Leistungsfähigkeit der Wirtschaft zu fördern, die technisch-wissenschaftlichen Erkenntnisse zu erweitern sowie die Lebensbedingungen zu sichern und zu verbessern.

Die Arbeitsergebnisse der BAM werden — soweit sie nicht vertraulicher Natur sind — in eigenen Publikationsreihen veröffentlicht:

- den „BAM-ZULASSUNGEN“, die jährlich mit 4 Ausgaben erscheinen und in denen die amtlichen Zulassungen der BAM veröffentlicht werden;
- dem Jahresbericht, der die Arbeitsschwerpunkte und die wichtigsten Erträge des jeweils vorausgegangenen Jahres ausführlich dokumentiert;
- den Forschungsberichten, die in unregelmäßiger Folge die Resultate wichtiger BAM-Forschungsvorhaben präsentieren.

Für weitere Information steht gerne BAM — 7.1 „Information und Öffentlichkeitsarbeit“, Tel.: 030 / 8104 7100, zur Verfügung.

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

# **Forschungsbericht 176**

## **Iterative Dekonvolution der seismischen Basiserregung für den Zeitraum**

von Dr.-Ing. Wolfgang Matthees  
Dr.-Ing. Götz Magiera

94 Seiten, 56 Abbildungen, 1 Tabelle

Herausgegeben von der  
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)  
Unter den Eichen 87, 1000 Berlin 45  
Telefon (030) 8104-1      Telex 183 261 bamb d  
Telefax (030) 8 112 029      Teletex 2 627-308 372=bamb

Copyright © 1990 by Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven

Verlag und Vertrieb:  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, 2850 Bremerhaven 1  
Telefon (0471) 46093-95



## Kurzfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Ermittlung einer seismischen Basiserregung aus der Oberflächenbeschleunigung einer Bodenschicht. Dieser als Dekonvolution bezeichnete Vorgang ist die Umkehrung der mit dynamischen Rechenverfahren möglichen Berechnung einer Strukturantwort aus einer Basiserregung, der Boden wird hier Struktur genannt. Als Basis wird im Boden der Übergang vom Lockergestein zum darunterliegenden Fels bezeichnet. Während eine Dekonvolution für im Frequenzraum definierte Strukturmodelle direkt als algebraisches Problem erfolgen kann, ist für im Zeitraum definierte Strukturmodelle keine direkte Lösung möglich. Deshalb wird ein iteratives Verfahren vorgeschlagen, durch welches der Basisbeschleunigungsverlauf hybrid mittels Zeitraum-Frequenzraum-Transformationen zu ermitteln ist.

Die so ermittelte Basiserregung dient der anschließenden Berechnung von Boden-Bauwerk-Wechselwirkungsproblemen, die durch das Ankoppeln einer Baustruktur an die Bodenschicht entstehen. Zur Vermeidung von Reflektionen des durch die dynamische Wechselwirkung entstehenden Wellenfeldes sind bereits bei der Dekonvolution an den Diskretisierungsrändern geeignete Randbedingungen vorhanden.

## Summary

This report deals with the analysis for a seismic base excitation related to a free-field time-history of the surface of a soil layer. This process called deconvolution is the inversion of calculating the structural soil-response due to a base excitation using common purpose structural analysis codes. The transition from soil to the underlying rock is called base of the structural soil-system. While the deconvolution for a structural system defined in the frequency domain is solved directly as algebraic problem, there exists no direct solution for structural systems defined in the time domain. Therefore an iterative procedure is proposed calculating the base time-history by means of hybrid time-frequency-domain transforms.

The actual intent of calculating the base excitation is the subsequent analysis of soil-structure interaction problems when coupling a building to the soil-system. In order to avoid reflections of the wave-field coming from the dynamic interaction source specific boundary conditions for the discretized soil-system are to be applied already for the deconvolution.

## Schlagworte

Strukturdynamik, Dekonvolution, seismische Erregung, Boden-Bauwerk-Wechselwirkung, Methode der Finiten Elemente, Fouriertransformation, viskose Randdämpfer



## Inhaltsverzeichnis

	Seite
<b>1. Problemstellung</b>	7
<b>2. Definition der Bewegungsgleichung bei seismischer Anregung</b>	8
<b>3. Iterative Dekonvolution für die Basiserregung</b>	14
<b>4. Beispiele</b>	17
4.1. Berechnung des rotationssymmetrischen Elementmodells	17
4.1.1 Ergebnisse bei Diskretisierung einer tiefen Bodenschicht	21
4.1.2 Ergebnisse bei Diskretisierung einer flachen Bodenschicht	24
4.1.3 Ergebnisse bei Diskretisierung einer tiefen Bodensäule	26
4.2 Berechnung des Schubalkenmodells	27
<b>5. Zusammenfassung und Ausblick</b>	31
<b>Literatur</b>	33
<b>Anhang: Abbildungen</b>	35
<b>Tabelle</b>	90





## 1. Problemstellung

Die meisten einschlägigen Programme zur Berechnung und Bemessung erdbebenbeanspruchter Strukturen unter Berücksichtigung des Einflusses der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung sind in relativen Koordinaten für eine vorgeschriebene Basiserregung im Zeitraum formuliert. Die Basiserregung ist somit ausschließlich an den unteren Randfesseln des Gesamtsystems vorgegeben, dessen Begrenzung durch den Übergang des anstehenden Lockergesteins zum darunterliegenden Felsgestein bzw. zu einer sehr viel steiferen Sedimentschicht definiert ist. In der Praxis verzichtet man meist auf die rechentechnisch aufwendigere multiple Basiserregung, durch welche z.B. auch Wellendurchgangsprobleme (die Fundamentlänge ist groß im Vergleich zur Wellenlänge) erfaßt werden können, und beschränkt sich auf eine gleichförmige Basiserregung. Hieraus könnte andererseits auch eine multiple Freifeldanregung durch etwaige Inhomogenitäten des Bodens oder Einbettungseffekte für die Berechnung von Gesamtmodellen, in denen sowohl das Bauwerk als auch der erforderliche Bodenbereich diskretisiert sind, folgen.

Im Hinblick auf eine eindeutige Vergleichbarkeit von Boden-Bauwerk-Wechselwirkungseffekten bei unterschiedlichen Bodendiskretisierungen gleicher Standortverhältnisse muß für die betrachteten Systeme eine identische Freifeldanregung (an der Oberfläche) vorliegen, die Basiserregung des Rechenmodells ist dem zuzuordnen. Dieser Vorgang der Ermittlung der zugehörigen Basiserregung heißt Dekonvolution. Eine Dekonvolution kann bei Berechnungen im Frequenzraum durch die Anwendung der Übertragungsfunktion als algebraisches Problem direkt erfolgen.

Für die Dekonvolution im Zeitraum existiert keine eindeutige Lösung. Vorliegend wird ein Verfahren vorgeschlagen, in dem durch Transformation in den Frequenzraum die Basiserregung iterativ im Zeitraum mittels der jeweils aktualisierten Übertragungsfunktion des Bodens so optimiert wird, daß die ermittelte Freifelderregung die vorgegebene Sollfunktion erfüllt.

Berechnungen von Boden-Bauwerk-Wechselwirkungsproblemen, für die der Boden durch einen umfassenden Bodenbereich diskretisiert ist, gestalten sich numerisch sehr aufwendig und sind in der Praxis zu vermeiden. Deshalb sind Diskretisierungen solcher Bodenbereiche nur in Einzelfällen sinnvoll, wie beispielsweise zur Genauigkeitsüberprüfung von vereinfachenden mechanischen Modellen /3/.

## 2. Definition der Bewegungsgleichung bei seismischer Anregung

Die allgemeine Bewegungsgleichung eines diskretisierten Strukturmodells

$$[M](\ddot{v}) + [C](\dot{v}) + [K](v) = (P)$$

gliedert sich für eine Bodenschicht zur Freifeldberechnung /1/, /2/, /3/ unter seismischer Basiserregung in

$$\begin{bmatrix} [M_{bb}] & [M_{bi}] \\ [M_{ib}] & [M_{ii}] & [M_{iu}] \\ & & [M_{ui}] & [M_{uu}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\ddot{v}_b) \\ (\ddot{v}_i) \\ (\ddot{v}_u) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{bb}] & [C_{bi}] \\ [C_{ib}] & [C_{ii}] & [C_{iu}] \\ & & [C_{ui}] & [C_{uu}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{v}_b) \\ (\dot{v}_i) \\ (\dot{v}_u) \end{pmatrix} + \\ + \begin{bmatrix} [K_{bb}] & [K_{bi}] \\ [K_{ib}] & [K_{ii}] & [K_{iu}] \\ & & [K_{ui}] & [K_{uu}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_b) \\ (v_i) \\ (v_u) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (0) \\ (0) \\ (R_u) \end{pmatrix}$$

$(v_b)$ ,  $(v_i)$  sind die gesuchte Bewegungsgröße in totalen Koordinaten,  $(v_u)$  ist die Basiserregung des Systems längs des Randes u, die Größen  $[M_{iu}]$ ,  $[C_{iu}]$  und  $[K_{iu}]$  sind die Koppelungsglieder zwischen Basis u und inneren Bodenpunkten i (s. Abb. 1).  $(R_u)$  repräsentiert die Auflagerkraft des Systems.  $(v_i)$  ist die Bewegungsgröße der inneren Punkte und  $(v_b)$  entspricht einer Anordnung von Bewegungsgrößen an der Oberfläche des freien Feldes.

Während die untere Teilgleichung nur der Ermittlung der Auflagerkräfte  $(R_u)$  dient, folgt aus den beiden oberen Teilgleichungen nach Umordnung die Freifeldberechnung:

$$\begin{bmatrix} [M_{bb}] & [M_{bi}] \\ [M_{ib}] & [M_{ii}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\ddot{v}_b) \\ (\ddot{v}_i) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{bb}] & [C_{bi}] \\ [C_{ib}] & [C_{ii}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{v}_b) \\ (\dot{v}_i) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{bb}] & [K_{bi}] \\ [K_{ib}] & [K_{ii}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_b) \\ (v_i) \end{pmatrix} = \\ = \begin{pmatrix} (0) \\ - [M_{iu}](\ddot{v}_u) - [C_{iu}](\dot{v}_u) - [K_{iu}](v_u) \end{pmatrix} \quad (1)$$

(1) ist das allgemeine Gleichungssystem der Ermittlung einer Freifeldbeschleunigung  $(\ddot{v}_b)$  an der Oberfläche, hervorgerufen durch eine Basiserregung  $(\ddot{v}_u)$ ;  $(\ddot{v}_u)$  kann in allgemeiner Form ungleichförmig sein, d. h. eine multiple Anregung bewirken. Die Schreibweise der rechten Seite von (1), die sich auf eine äußere Belastung derjenigen inneren Bodenpunkte i beschränkt, die den Randpunkten u benachbart sind, ver-



deutlich das Phänomen der Wellenfortpflanzung: Die numerische Integration ergibt für die totale Bewegungsgröße ( $\ddot{v}_b$ ) bzw. ( $v_b$ ) an der Oberfläche bis zum Eintreffen der von der Basis her vertikal propagierenden Schubwelle nur vernachlässigbar kleine Ordinaten. Erst nach einer Integrationsdauer  $t_s = i \cdot \Delta t$  ( $\Delta t$  ist die Integrations-schrittweite) setzt die Antwort der Oberflächenpunkte ein, wenn  $t_s = T/v_s$  der Quotient aus Schichttiefe  $T$  und Schwerwellengeschwindigkeit  $v_s = \sqrt{G/\rho}$  ist.

(1) erfordert zur Vorgabe der rechten Seite die Ermittlung der Basisverschiebungen ( $v_u$ ) aus den für den Standort festzulegenden Basisbeschleunigungen ( $\ddot{v}_u$ ). Im Falle der Punktmassendefinition (lumped mass):  $[M_{i_u}] = [0]$  reduziert sich die rechte Seite im wesentlichen auf den Anteil  $-[K_{i_u}](v_u)$ .

Die zur Basiserregung relativen Bewegungsgrößen ( $\ddot{v}^r$ ) bzw. ( $v^r$ ) folgen indirekt bei Annahme gleichförmiger Basiserregung aus der Differenz der totalen Erregung und der Basiserregung:

$$(\ddot{v}^r) = (\ddot{v}) - (\ddot{v}_u) \quad (2a)$$

$$(v^r) = (v) - (v_u) \quad (2b)$$

wobei  $(\ddot{v}^r) = \begin{pmatrix} (\ddot{v}_b^r) \\ (\ddot{v}_i^r) \end{pmatrix}$ ,  $(\ddot{v}) = \begin{pmatrix} (\ddot{v}_b) \\ (\ddot{v}_i) \end{pmatrix}$ ,  $(\ddot{v}_u) = \begin{pmatrix} (1) \\ (1) \end{pmatrix} \ddot{v}_u$

$\ddot{v}_u$  ist hier der in allen Punkten  $u$  identische Basisbeschleunigungsverlauf. Alle an der Oberfläche liegenden Punkte haben bereits nach dem ersten Integrationsschritt mit (2a), (2b) relative, von Null verschiedene Bewegungsordinaten.

Eine alternative Schreibweise zu (1), die zur direkten Ermittlung der relativen Bewegungsgrößen bei beliebig multipler Basiserregung ( $\ddot{v}_u$ ) führt, folgt aus der Trennung der totalen Größe ( $v$ ) in einen dynamischen Anteil ( $v^d$ ) und einen quasistatischen Anteil ( $v^s$ ):

$$(\ddot{v}) = (\ddot{v}^d) + (\ddot{v}^s) \quad (2c)$$

$$(v) = (v^d) + (v^s) \quad (2d)$$

wobei  $(\ddot{v}) = \begin{pmatrix} (\ddot{v}_b) \\ (\ddot{v}_i) \end{pmatrix}$ ,  $-(\ddot{v}^d) = \begin{pmatrix} (\ddot{v}_b^d) \\ (\ddot{v}_i^d) \end{pmatrix}$ ,  $(\ddot{v}^s) = \begin{pmatrix} (\ddot{v}_b^s) \\ (\ddot{v}_i^s) \end{pmatrix}$

Mit den Bezeichnungen

$$[M] = \begin{bmatrix} [M_{bb}] & [M_{bi}] \\ [M_{ib}] & [M_{ii}] \end{bmatrix}, \quad [C] = \begin{bmatrix} [C_{bb}] & [C_{bi}] \\ [C_{ib}] & [C_{ii}] \end{bmatrix}, \quad [K] = \begin{bmatrix} [K_{bb}] & [K_{bi}] \\ [K_{ib}] & [K_{ii}] \end{bmatrix}$$

und (2c), (2d) läßt sich (1) überführen:

$$[M](\ddot{v}^d) + [C](\dot{v}^d) + [K](v^d) = -\{[M][r_{iu}] + [M_{iu}]\}(\ddot{v}_u) - \{[C][r_{iu}] + [C_{iu}]\}(\dot{v}_u) \quad (3a)$$

Die Einflußmatrix  $[r_{iu}]$  ergibt sich aus der Forderung:

$$[K](v^s) + [K_{iu}](v_u) = (0)$$

zu

$$[r_{iu}] = - [K]^{-1} [K_{iu}]$$

mit dem quasistatischen Anteil:

$$(v^s) = [r_{iu}](v_u) \quad (4)$$

Gleichung (3a) ist eine allgemein anwendbare Differentialgleichung für mehrfache (multiple) oder einfache (gleichförmige) Basiserregung und lautet in getrennter Schreibweise für die einzelnen Bereiche des Systems Bodenschicht (System I in Abb. 1), wenn der Belastungsanteil aus Dämpfung im Falle der steifigkeitsabhängigen und massenabhängigen Rayleigh-Dämpfung vernachlässigt wird /1/:

$$\begin{bmatrix} [M_{bb}] & [M_{bi}] \\ [M_{ib}] & [M_{ii}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\ddot{v}_b^d) \\ (\ddot{v}_i^d) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{bb}] & [C_{bi}] \\ [C_{ib}] & [C_{ii}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{v}_b^d) \\ (\dot{v}_i^d) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [K_{bb}] & [K_{bi}] \\ [K_{ib}] & [K_{ii}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_b^d) \\ (v_i^d) \end{pmatrix} = - \left\{ \begin{bmatrix} [M_{bb}] & [M_{bi}] \\ [M_{ib}] & [M_{ii}] \end{bmatrix} [r_{iu}] + \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [M_{iu}] \end{bmatrix} \right\} (\ddot{v}_u) \quad (3b)$$

Hier kennzeichnet der Index b die Punkte, an denen das Bauwerk anzukoppeln ist, und die Einflußmatrix  $[r_{iu}]$  lautet:

$$[r_{iu}] = - \begin{bmatrix} [K_{bb}] & [K_{bi}] \\ [K_{ib}] & [K_{ii}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [0] \\ [K_{iu}] \end{bmatrix} \quad (5)$$

Die Einflußmatrix für das Gesamtsystem, welches neben dem Boden auch noch die Baustruktur enthält, ergibt sich entsprechend:

$$[r_{i_u}] = - \begin{bmatrix} [K_{s_s}] & [K_{s_f}] \\ [K_{f_s}] & [K_{f_f}] + [K_{b_b}] & [K_{b_i}] \\ & [K_{i_b}] & [K_{i_i}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ [K_{i_u}] \end{bmatrix} \quad (6)$$

Die einschlägigen Mehrzweckcomputerprogramme vereinfachen die Bewegungsgleichung durch die Annahme identischer Fußpunkterregung  $v_u$ , wodurch Einheitsdeformationszustände entstehen:

$$(1^{s,i})v_u = [r_{i_u}](1^u)v_u \quad (7)$$

Mit (6) und (7) lautet die Bewegungsgleichung für das Gesamtsystem mit Baustruktur:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [M_{s_s}] & [M_{s_f}] \\ [M_{f_s}] & [M_{f_f}] + [M_{b_b}] & [M_{b_i}] \\ & [M_{i_b}] & [M_{i_i}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\ddot{v}_s^d) \\ (\ddot{v}_{fb}^d) \\ (\ddot{v}_i^d) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{s_s}] & [C_{s_f}] \\ [C_{f_s}] & [C_{f_f}] + [C_{b_b}] & [C_{b_i}] \\ & [C_{i_b}] & [C_{i_i}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{v}_s^d) \\ (\dot{v}_{fb}^d) \\ (\dot{v}_i^d) \end{pmatrix} + \\ & + \begin{bmatrix} [K_{s_s}] & [K_{s_f}] \\ [K_{f_s}] & [K_{f_f}] + [K_{b_b}] & [K_{b_i}] \\ & [K_{i_b}] & [K_{i_i}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (v_s^d) \\ (v_{fb}^d) \\ (v_i^d) \end{pmatrix} = \\ & - \left\{ \begin{bmatrix} [M_{s_s}] & [M_{s_f}] \\ [M_{f_s}] & [M_{f_f}] + [M_{b_b}] & [M_{b_i}] \\ & [M_{i_b}] & [M_{i_i}] \end{bmatrix} (1^{s,i}) + \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ [M_{i_u}] \end{bmatrix} (1^u) \right\} \ddot{v}_u \quad (8) \end{aligned}$$

Hierbei bedeuten die Indizes s die Zugehörigkeit zur Struktur, f der strukturseitige Anteil zum Kopplungspunkt und b der bodenseitige Anteil zum Kopplungspunkt.  $(1^{s,i})$  und  $(1^u)$  sind die teilbesetzten Einheitsvektoren für vertikale oder horizontale Erregung im Bereich von Struktur s und Boden i und an der Basis u.  $(1^{s,i})$  und  $(1^u)$  haben gemäß (5), (6) umgekehrte Vorzeichen, während die Einheitszustände bei Anwendung eines Makroelements für den Bodenbereich /3/ identische Vorzeichen haben. Gleichung (8) ist die Bewegungsgleichung der üblicherweise in der Praxis verwendeten Programme, die von einer gleichförmigen Basiserregung ausgehen und auf der rechten Seite im Gegensatz zu (1) nur den Beschleunigungsterm benötigen. Während in (1) direkt die totalen Bewegungsgrößen ermittelt werden, folgt aus (3b) bzw. (8) ein dynamischer Anteil. Für die totalen Bewegungsgrößen, also auch für die



Werte, die an der Freifeldoberfläche zu registrieren sind, ist deshalb hier eine Überlagerung mit den zugehörigen quasistatischen Anteilen erforderlich.

Vergleichsrechnungen haben gezeigt, daß (1) und (3b) bzw. (8) für  $t > t_s = i \cdot \Delta t$  zu nahezu identischen Lösungen führen, nur im Einschwingzustand  $t < t_s$  werden nach (3b) bzw. (8) in allen Strukturbereichen von Null verschiedene, totale Bewegungsgrößen ermittelt; das Phänomen der Wellenfortpflanzung ist für diesen Zeitbereich nicht transparent. Dieses Verhalten ist vergleichbar zu analytischen Lösungen bei harmonischer Erregung, wenn der partikuläre Anteil fehlt. Die Untersuchungen haben jedoch gezeigt, daß der kurze Einschwingzeitbereich in Anbetracht zur gesamten Integrationsdauer keinen Einfluß auf das vorgeschlagene Verfahren der iterativen Dekonvolution hat. Im Falle der Punktmassendefinition folgt aus (1) infolge des allein übrigbleibenden Belastungsterms  $- [K_{i u}](v_u)$  ( $(v_u)$  ist durch zweifache Integration aus  $(\ddot{v}_u)$  zu ermitteln) ein etwas ausgerundeterer Bewegungsverlauf als aus (8).

Die Alternative zur Berechnung der Zeitabhängigen im Koordinatensystem für die Basiserregung am Felsübergang mit der Bewegungsgröße  $(v)$  ist die direkte Ermittlung der Boden-Bauwerk-Wechselwirkung aus der Freifelderregung an der Oberfläche /1/ mit der Bewegungsgröße  $(u)$ :

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} [M_{s s}] & [M_{s f}] \\ [M_{f s}] & [M_{f f}] + [M_{b b}] & [M_{b i}] \\ & [M_{i b}] & [M_{i i}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\ddot{u}_s^d) \\ (\ddot{u}_{f b}^d) \\ (\ddot{u}_i^d) \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} [C_{s s}] & [C_{s f}] \\ [C_{f s}] & [C_{f f}] + [C_{b b}] & [C_{b i}] \\ & [C_{i b}] & [C_{i i}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (\dot{u}_s^d) \\ (\dot{u}_{f b}^d) \\ (\dot{u}_i^d) \end{pmatrix} + \\
 & + \begin{bmatrix} [K_{s s}] & [K_{s f}] \\ [K_{f s}] & [K_{f f}] + [K_{b b}] & [K_{b i}] \\ & [K_{i b}] & [K_{i i}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} (u_s^d) \\ (u_{f b}^d) \\ (u_i^d) \end{pmatrix} = \\
 & - \left\{ \begin{bmatrix} [M_{s s}] & [M_{s f}] \\ [M_{f s}] & [M_{f f}] + [M_{b b}] & [M_{b i}] \\ & [M_{i b}] & [M_{i i}] \end{bmatrix} [r_{s f}] + \begin{bmatrix} [M_{s f}] \\ [M_{f f}] \\ [0] \end{bmatrix} \right\} (\ddot{v}_{f b})^F \quad (9)
 \end{aligned}$$

Hierbei ist  $(u)$  der Lösungsanteil, der zusätzlich zur Freifeldlösung, die durch das Fehlen von Baustrukturen keine Wechselwirkung beinhaltet, durch das Ankoppeln des Bauwerkes entsteht (mit  $(u^d)$  als dessen dynamischer Anteil):

$$(u) = (v) - (v)^F \quad (10)$$

(v) ist gemäß (1), (2) der Lösungsvektor in totalen Koordinaten, und der Freifeldanteil (v)<sup>F</sup> lautet:

$$(v)^F = \begin{pmatrix} (0) \\ (v_{fb})^F \\ (v_i)^F \end{pmatrix}$$

Der Erregungsvektor ( $\ddot{v}_{fb}$ )<sup>F</sup> markiert die Erregung des Schnitttrandes zwischen Boden und Bauwerk, der funktionale Verlauf von ( $\ddot{v}_{fb}$ )<sup>F</sup> ist identisch mit der Freifelderregung. Eine Einflußmatrix [r<sub>sf</sub>] folgt aus der Trennung der Bewegungsgleichung in einen dynamischen Anteil und in eine quasistatische Lösung:

$$(u) = (u^d) + (u^s) \quad (11)$$

aus

$$[K](u^s) + \begin{bmatrix} [K_{sf}] \\ [K_{ff}] \\ [0] \end{bmatrix} (v_{fb}) = 0 \quad (12)$$

zu

$$[r_{sf}] = - \begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sf}] \\ [K_{fs}] & [K_{ff}] + [K_{bb}] & [K_{bi}] \\ & [K_{ib}] & [K_{ii}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} [K_{sf}] \\ [K_{ff}] \\ [0] \end{bmatrix} \quad (13)$$

Auf die Anwendung von (9) mit direkter Erregung an der Freifeldoberfläche wird hier weiter verzichtet, weil einerseits alle einschlägigen Rechencodes die Bedingung einer gleichförmigen Basiserregung haben, und weil andererseits am finiten Elementraster auch eine Korrelation zwischen den einzelnen Erregungspunkten des Vektors ( $\ddot{v}_{fb}$ )<sup>F</sup> notwendig wäre, wenn z.B. Einbettungsprobleme mit multipler Anregung zu lösen sind. Für diese Probleme führt die Anwendung im Basiserregungskoordinatensystem zu einer genauen Lösung, zumal sich im Falle der Freifelderregung die erforderlich werdende Korrelation bei Anwendung einer eindimensionalen, vertikalen analytischen oder diskreten Dekonvolution nur als grobe Näherung erwiesen hat.

Vorliegend wird eine Dekonvolutionsrechnung nach (3b) für das System Bodenschicht (Abb. 1, System I) vorgenommen, eine iterative Dekonvolution für die Basiserregung gemäß (1) ist ebenfalls möglich. Die für das System Bodenschicht ermittelte Basiserregung kann anschließend als Basiserregung am System Boden und Baustruktur (8) angebracht werden, um das Boden-Bauwerk-Wechselwirkungsproblem am Gesamtsystem (Abb. 1, System II) zu lösen.

### 3. Iterative Dekonvolution für die Basiserregung

Die Definition der Übertragungsfunktion im Frequenzraum ist:

$$\overline{\text{TF}} = \overline{\dot{V}} \text{ (OUTPUT)} / \overline{\dot{V}} \text{ (INPUT)} \quad ,$$

wenn der Überstrich eine Größe im Frequenzraum bezeichnet, also gemäß Abb. 1

$$\overline{\text{TF}} = \overline{\dot{V}}_b / \overline{\dot{V}}_u \quad (14)$$

wobei  $\overline{\dot{V}}_b$  bzw.  $\overline{\dot{V}}_u$  die Fouriertransformierten der Zeitverläufe sind. Es gilt:

$$\overline{\dot{V}}_b(\omega_n) = \Delta t \sum_{m=0}^{N-1} \dot{V}_b(t_m) e^{-2\pi i n m / N}; \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{DFT-Analyse}) \quad (15a)$$

$$\dot{V}_b(t_m) = \frac{\Delta \omega}{2\pi} \sum_{n=0}^{N-1} \overline{\dot{V}}_b(\omega_n) e^{2\pi i n m / N}; \quad m = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{DFT-Synthese}) \quad (15b)$$

bei diskreter Fouriertransformation (DFT), wobei

$$\dot{V}_b(t_m) = \text{Re } \dot{V}_b(t_m)$$

vorausgesetzt wird.

Unter der Annahme, daß bei ausreichend genauer Bodendiskretisierung (der linke und der rechte Rand des Bodenausschnittes müssen ausreichend weit vom Bereich der Boden-Bauwerkkopplung  $b$  entfernt sein) alle Knoten  $b$  eine gleichphasige, näherungsweise gleichförmige Freifelderregung erfahren, wird die iterative Dekonvolution an einem stellvertretenden Freiheitsgrad des Vektors ( $\dot{V}_{fb}$ ) also an  $\dot{V}_b = \dot{V}_{fb}$  vorgenommen, siehe System I in Abb. 1.

Die bei der Dekonvolution auftretenden Probleme folgen aus der Frequenzabhängigkeit der zu ermittelnden Basiserregung  $\dot{V}_u$  selbst. Damit ein bestimmter Frequenzgehalt für  $\dot{V}_b$  ermittelt werden kann, muß ein entsprechender Frequenzgehalt für  $\dot{V}_u$  vorgegeben werden, wobei  $\dot{V}_u$  mit zunehmender Tiefe und mit zunehmender Bodendämpfung zu höheren Frequenzgehalten tendiert. Bei der Diskretisierung ist diese Forderung gegebenenfalls dadurch zu berücksichtigen, daß im Bereich der Basiser-



regung am Rand u eine feinere Netzweite zu wählen ist. Die hier ermittelte Übertragungsfunktion ist also direkt abhängig von der gesuchten Eingabe  $\ddot{v}_u$ , die aber auch wiederum mit der spezifische Freifelderregung  $\ddot{v}_b$  gekoppelt ist. So zeigt die Übertragungsfunktion die Eigenfrequenzen des Bodens einerseits sehr genau an, die Ordinaten der Verstärkung bleiben aber andererseits auch bei fehlender Dämpfung endlich.

Die Iterationsvorschrift lautet, wenn der Index j den Iterationszyklus markiert:

$$\begin{array}{l}
 j = 1 \\
 \begin{array}{l}
 \ddot{v}_{u,j} \xrightarrow{\text{Zeitintegration}} \ddot{v}_{b,j} \xrightarrow{\text{FFT-A}} \bar{\ddot{v}}_{b,j} \\
 \overline{\text{TF}}_j = \bar{\ddot{v}}_{b,j} / \bar{\ddot{v}}_{u,j} \\
 \bar{\ddot{v}}_{u,j+1} = \bar{\ddot{v}}_{b,soll} / \overline{\text{TF}}_j \xrightarrow{\text{FFT-S}} \ddot{v}_{u,j+1}
 \end{array} \\
 j = j + 1
 \end{array} \quad (16)$$

FFT-A und FFT-S sind Analyse und Synthese mittels schneller Fouriertransformation (Fast Fourier Transform). Konvergenz wird erreicht wenn,  $\overline{\text{TF}}_j \approx \overline{\text{TF}}_{j+1}$ , bzw.  $\ddot{v}_{b,j} \approx \ddot{v}_{b,soll}$ .  $\ddot{v}_{b,soll}$  ist die vorgegebene Freifelderregung. Die Iteration wird vorteilhaft mit  $\ddot{v}_{u,1} = \ddot{v}_{b,soll}$  bzw. mit der analytischen Basiserregung  $\ddot{v}_{u,1} = \ddot{v}_{u,analytisch}$  gestartet,  $\ddot{v}_{u,j+1}$  ist die modifizierte Basiserregung.

Zur Bewertung der in den jeweiligen Iterationsstufen erreichten Genauigkeit, wird zwischen  $\ddot{v}_{b,soll}$  und  $\ddot{v}_{b,j}$  im Zeitraum eine Fehlerabschätzung nach der Gaußschen Fehlerquadratmethode vorgenommen. Hierbei wird die Wurzel über die Summe der Differenzquadrate  $(\ddot{v}_{b,soll} - \ddot{v}_{b,j})^2$  der einzelnen Zeitschritte auf einen durch Summation absoluter Sollordinaten gebildeten Mittelwert bezogen.

Die hier vorgeschlagene Lösungsstrategie der iterativen Verbesserung einer Lösung im Zeitraum durch numerische Korrektur im Frequenzraum findet ihr mathematisches Pendant in der Berechnung nichtlinearer Probleme im Frequenzraum durch numerische Korrektur im Zeitraum /4/.

Die Iteration wird am Freifeldsystem entsprechend System I in Abb. 1 durchgeführt. Die ermittelte Basiserregung  $\ddot{v}_u$  erzeugt dann in allen Koppelpunkten an der Oberfläche, an welchen später beispielsweise die

Baukonstruktion angebunden wird, die vorgegebene Freifelderregung  $\ddot{v}_b$ . Nach Anbringen der Baustruktur an der Oberfläche, es können auch Kopplungspunkte an Einbettungen vorliegen, erfolgt mit dem in Abb. 1 als System II schematisierten Modell die eigentliche Wechselwirkungsberechnung.

## 4. Beispiele

### 4.1 Berechnung des rotationssymmetrischen Elementmodells

Abb. 2 zeigt einen Überblick einiger zur Berechnung von Boden-Bauwerk-Wechselwirkungsproblemen benutzten Diskretisierungen, wobei bei der Berechnung von weitgehend rotationssymmetrischen Kernkraftwerksgebäuden symmetrische Codes Anwendung finden /6/. Die Berechnungen werden mit dem Code ASHSD /7/ durchgeführt, wobei das in Abb. 1 als System I bezeichnete Bodenschema durch die in Modell  $M_5$  und  $M_6$  der in Abb. 2 enthaltenen Bodendiskretisierungen ersetzt wird.

Die Freifelderregung wird durch ein normiertes TAFT-Erdbeben vorgegeben, vgl. Abb. 3. Die Fouriertransformierte dieser Erregung zeigt, daß die wesentliche Erregung nur bis ca. 12 Hz stattfindet. Das verwendete TAFT-Erdbeben entspricht in der Mittelung relativ genau dem KTA Spektrum /8/, wenn eine Einhängung bei ca.  $0.20 \text{ m/s}^2$  vorgenommen wird. Das Response Spektrum des TAFT-Erdbebens ohne Dämpfung ist Abb. 4 zu entnehmen. Es werden 2 unterschiedliche Böden bei ausschließlich horizontaler Erregung untersucht:

- Boden 1 (steifer Boden)

Schubmodul  $G = 1200 \text{ MN/m}^2$ , Dichte  $\rho = .0019 \text{ MNS}^2/\text{m}^4$

$\nu = 0.40$  (Poisson Zahl)

Bodendämpfung  $\beta = c/c_{kr} = 0 \%$  oder  $7 \%$

- Boden 2 (weicher Boden)

$G = 400 \text{ MN/m}^2$ ,  $\rho = .0019 \text{ MNS}^2/\text{m}^4$

$\nu = 0.40$

Bodendämpfung  $\beta = 0 \%$  oder  $7 \%$

Die Lage der unteren Randbedingungen des diskretisierten Modells ist entweder standortabhängig der Übergang zum steiferen Bereich (z.B. Fels), oder ist, wenn diese Grenze nicht vorliegt, durch ausreichend tief angeordnete Ränder vorzugeben. Der starre Rand muß dann so tief gesetzt werden, daß er keinen signifikanten Einfluß (z.B. durch Reflexion) auf die von der Oberfläche ausgehende Boden-Bauwerk-Wechselwirkung hat. Deshalb wird vorliegend der Einfluß der Tiefe auf die Dekonvolution durch unterschiedlich aufwendige Diskretisierungen gemäß Abb. 2 für Modell  $M_5$  und Modell  $M_6$  untersucht. Modell  $M_5$  und  $M_6$  verfügen für die iterative Dekonvolution nicht über die im Bild enthaltenen Bauwerkstrukturen; die Kernkraftwerkskonstruktionen sind lediglich deshalb dargestellt, um zu zeigen, daß sich die Freifelddiskretisie-

rung auf die (für die spätere Wechselwirkungsberechnung anzubringende) Baustruktur beziehen muß.

Die Lage der seitlichen Punkte ist so zu wählen, daß ihre Ränder, die von den Systemknoten  $b$  ausgehenden Wechselwirkungseffekte (z.B. durch Reflektion) nicht signifikant beeinflussen. Der Einfluß der Seiten auf den Iterationsverlauf der Dekonvolution wird an den Modellen  $M_5$  und  $M_6$  untersucht.

Die Elementhöhen sind so gewählt, daß sie einem Fünftel der Wellenlänge einer oberen Frequenz von ca. 20 Hz entsprechen, eine Forderung, die den begrenzten Frequenzgehalt einer seismischen Erregung erfüllt.

Um den unteren und seitlichen Randeinfluß auf die Wechselwirkung weiter zu reduzieren, können an den Rändern geeignete Randbedingungen eingeführt werden, die Reflektionen vermeiden. Das können entweder konsistente frequenzabhängige Randelemente oder konstante viskose Randdämpfer sein, die bei ausreichend großem Bodenausschnitt eine Konvergenz auf die genaue Lösung ermöglichen /3/. Konsistente Randelemente erfordern aufgrund der vorzunehmenden Eigenwertanalyse lineares Systemverhalten /10/.

Für horizontale Erdbebenerregung, auf die sich die vorliegenden Berechnungen beschränken, hat es sich als sinnvoll erwiesen, die seitlichen Ränder zur Simulation der Kompatibilität mit dem außerhalb des Rechenmodells seitlich liegenden Boden vertikal starr zu lassen. Für freie Ränder werden vorliegend viskose Randdämpfer /10/ eingeführt, die Übersicht der möglichen Randbedingungen BC ist Tabelle I zu entnehmen. Die Randbedingung  $BC = 1$  enthält keine Randdämpfer, während  $BC = 2$ ,  $BC = 3$  und  $BC = 4$  an den Seiten des Bodenausschnittes horizontale Dämpfer haben. Die Randbedingung  $BC = 3$  unterdrückt zusätzlich die Reflektion vertikal schwingender Wellen vom unteren Rand her.  $BC = 4$  ist eine in ihrer mechanischen Bedeutung irreguläre Randbedingung, da sie keine Einleitung der Erregung von der Basis her erlaubt. Sofern sie angewendet werden soll, wäre die iterative Dekonvolution am (das Bauwerk enthaltenden) Gesamtsystem für einen Oberflächenpunkt ausreichend weit sowohl von den Koppelpunkten  $b$  als auch von den seitlichen Rändern entfernt, vorzunehmen. Die Prozedur muß aber nicht immer, wie sich gezeigt hat, konvergieren. Sinnvoller ist die Anwendung von  $BC = 4$  am Makroelement /3/. Die für die spätere Wechselwirkungsberechnung erforderlichen Randbedingungen mit viskosen Dämpfern beein-

flussen das Übertragungsverhalten eines Bodenausschnittes numerisch erheblich, was an den Übertragungsfunktionen deutlich wird.

Für die beiden Böden werden jeweils zwei Tiefen untersucht:

. flache Bodenschicht (gemäß Modell  $M_5$ )

$T = 6 \cdot 10.0 = 60.0$ m	Bodentiefe für $G = 1200$ MN/m <sup>2</sup>
$R = 91.4$ m	Außenradius der Bodenschicht,
$T = 6 \cdot 5.0 = 30.0$ m	Bodentiefe für $G = 400$ MN/m <sup>2</sup>
$R = 91.4$ m	Außenradius der Bodenschicht.

. tiefe Bodenschicht (gemäß Modell  $M_6$ )

$T = 20 \cdot 10.0 = 200.0$ m	Bodentiefe für $G = 1200$ MN/m <sup>2</sup>
$R = 151.4$ m	Außenradius der Bodenschicht,
$T = 20 \cdot 5.0 = 100.0$ m	Bodentiefe für $G = 400$ MN/m <sup>2</sup>
$R = 151.4$ m	Außenradius der Bodenschicht.

Für die explizite Zeitintegration /7/ wird die Integrationsschrittweite  $\Delta t = 0.01$  s als ausreichend genau vorgegeben, die obere Grenzfrequenz für die Fouriertransformierten beträgt dann 50 Hz. Mit ansteigender Tiefe und zunehmender Bodensteifigkeit werden höhere Frequenzen verstärkt angeregt, so daß eine Verkleinerung der Schrittweite eine Genauigkeitssteigerung mit sich bringen kann.

Da eine Fourieranalyse Periodizität voraussetzt, erfährt der Zeitbereich nach dem Ende der Schwingung und dem Beginn ihrer Wiederkehrperiode große Bedeutung, er wird Ruhezone genannt. Das diskretisierte TAFT-Erdbeben hat eine Gesamtdauer von 18 s. Weil für die schnelle Fouriertransformation eine Stützstellenanzahl der Basis zwei ( $2^n$ ) gefordert wird, kann beispielsweise für  $n = 11$  ( $2^n = 2048$ ) die Periode 2.48 s nach dem Ende der Erregungsfunktion (248 trailing zeros) beginnen. Eine zu klein gewählte Ruhezone kann besonders bei tiefen und steifen Bodensituationen, wenn also in der Basiserregung auch höhere Frequenzen angesprochen werden, zu Konvergenzschwierigkeiten bei der Iteration führen. Der Grund ist in diesem Fall der relativ abrupte Abbruch der an der Oberfläche ermittelten Erregung  $\ddot{v}_b$  im Hinblick auf die Erzeugung ihrer Fouriertransformierten  $\ddot{v}_b$ ; anzustreben ist das geeignete Ausschwingen von  $\ddot{v}_b$ . Abb. 5, Abb. 6 und Abb. 7 zeigen das Iterationsverhalten eines ungedämpften Bodens (Bodentiefe = 100.0 m,  $G = 400$  MN/m<sup>2</sup>, Randbedingung BC = 1,  $n = 11$ ). Die in den einzelnen Abbildungen jeweils gezeigten 7 Diagramme sind wie folgt zu lesen:

1.  $\dot{V}_{b, s_{011}}$  : Zeitverlauf der Freifeldsollfunktion (nominal)
5.  $|\overline{\dot{V}}_{b, s_{011}}|$  : absolute Fouriertransformierte von 1.
2.  $\dot{V}_{b, j}$  : Zeitverlauf der im Zyklus j ermittelten Freifeldfunktion
6.  $|\overline{\dot{V}}_{b, j}|$  : absolute Fouriertransformierte von 2.
3.  $|\overline{TF}_j|$  : absolute Verstärkungsfunktion im Zyklus j
4.  $\dot{V}_{u, j+1}$  : Zeitverlauf der für den Zyklus j + 1 verbesserten Basiseingabe
7.  $|\overline{\dot{V}}_{u, j+1}|$  : absolute Fouriertransformierte von 4.

Mit der Bezeichnung YMAX werden die Ordinaten der einzelnen Teildia-gramme skaliert. Der jeweilige Gaußfehler  $F_G$  der iterativ ermittelten Freifeldantwort wird für den Zeitbereich der Sollerregung (hier:  $0 < t \leq 18$  s) bestimmt, Nachschwingen für  $t > 18$  s wird nicht bewertet.

Die Iterationen erfolgen, sofern nicht anders markiert, für einen Ra- dius von  $R = 31.4$  m, welches dem Außenradius einer an den Punkten b anzubringenden Kernkraftwerkstruktur entspricht.

Die durch Transformation der Basiserregung und deren berechneten Frei- feldantwort in den Frequenzraum ermittelten Übertragungsfunktionen sind belastungsabhängig, die Ordinaten an den Eigenwerten variieren gemäß dem Frequenzgehalt der in jeder Iterationsstufe verbesserten Basiserregung. Die Art von Zeitintegration und Verbesserung im Fre- quenzraum bewirkt, daß die Imaginärteile der zu modifizierenden Basis- erregung und der dazugehörenden Freifeldantwort im Zeitraum den Wert Null haben, ihre Imaginärteile im Frequenzraum sind dagegen ungleich Null, so daß auch für die Übertragungsfunktion der Imaginärteil un- gleich Null ist. Die vorgenommene diskrete Ermittlung der Übertra- gungsfunktion bewirkt, daß auch bei fehlender Dämpfung endliche Ordi- naten ermittelt werden. Es wird vorliegend die absolute Übertragungs- funktion dargestellt, die an der Abzisse Null die Ordinate Eins hat.

Das Bild der belastungsabhängigen Übertragungsfunktion kann wesentlich durch das Abbruchprozedere für die Zeitfunktionen beeinflußt werden, welches durch die Größen N, NT, NE beschrieben wird:

N =  $2^n$ : Anzahl der Stützstellen für die schnelle Fouriertransfor- mation.

NT: Anzahl der Stützstellen für die Zeitintegration.

NE: Anzahl der Stützstellen der Erregungssollfunktion, hier NE = 1800.



Die Sollerregung des TAFT-Erdbebens klingt bei 18 s aus, hat also für  $t > 18$  s keine Ordinate mehr. Die physikalische Interpretation wäre, daß die zugehörige Basiserregung schon einige Zeit vorher beendet ist. Anders verhält sich jedoch das Abbruchverhalten für eine stationäre Schwingung, welche durch die Fouriertransformation gekennzeichnet ist. In diesem Fall bewirkt das Abbrechen der nichtbeendeten Freifeldschwingung eine Frequenzstörung, die sich in der Übertragungsfunktion durch willkürlich erscheinende Spitzenausschläge im oberen Frequenzbereich manifestiert. Diese Abbruchspitzen können reduziert werden, wenn eine Integrationsdauer  $t > 18$  s zugrundegelegt wird. Die numerische Interpretation ist, daß eine Freifeldschwingung mit einer Ordinate Null für  $t > 18$  s nur aus einer modifizierten Basiserregung mit einer Ordinate ungleich Null für  $t > 18$  s folgen kann.

#### 4.1.1 Ergebnisse bei Diskretisierung einer tiefen Bodenschicht

Der Abbrucheinfluß ohne Dämpfung bei  $NT = 1800$  wird für den tiefen, weichen Boden in Abb. 5, Abb. 6 und Abb. 7 für den 1., den 2. und den 8. Iterationszyklus sichtbar. Für die jeweilige Übertragungsfunktion folgt hieraus zwar eine Dominanz der ersten Eigenfrequenz der Zyklen  $j > 1$ , in den oberen Frequenzen bis 50 Hz ergeben sich jedoch von Zyklus zu Zyklus wechselnde Spitzenausschläge. In dieser Form beeinträchtigen die Spitzenausschläge die Konvergenz für die Freifeldantwort, in höheren Iterationszyklen kann beispielsweise der Gaußfehler alternieren, ohne ein eindeutiges Minimum anzunehmen. So erscheint im 8. Zyklus (s. Abb. 7) sogar in der Fouriertransformierten der ermittelten Freifeldfunktion ein im vorhergehenden Zyklus nicht vorhandener Spitzenausschlag.

Während die Abbruchspitzen für Abb. 5, Abb. 6 und Abb. 7 bei  $N/NT = 2048/1800$  ( $n = 11$ ) besonders ausgeprägt sind und schlechte Konvergenz mit einem relativ hohen, nicht zu verbessernden Gaußfehler bewirken, wird im weiteren  $N/NT = 8192/3600$  ( $n = 13$ ) vorgegeben. Für den tiefen, steifen Boden zeigt Abb. 8, daß bei fehlender Dämpfung auch in diesem Falle der Abbruch bei  $t = 36$  s weiter zu den willkürlichen Spitzenausschlägen führt. Noch im zweiten Iterationszyklus hat die Freifeldantwort  $\ddot{v}_{b,j=2}$  bei  $t = 36$  s erhebliche Ordinaten (s. Abb. 12), wodurch der Fehler durch den Abbruch weiter hoch bleibt. Die hieraus ermittelte modifizierte Basiseingabe läßt im Zeitbereich über die Gesamtdauer eine deutliche Verschiebung der Ruhelage erkennen, hervorgerufen durch das Maximum an der ersten Stützfrequenz im

Frequenzraum. Erst für den siebenten Zyklus (s. Abb. 16) werden die Ordinaten der Freifeldantwort für  $t > 18$  s klein, und damit weist auch die zugehörige Verstärkungsfunktion ein plausibles Frequenzverhalten auf, deren Ordinaten dann näherungsweise an den Eigenfrequenzen das Verhältnis  $1, 1/3, 1/5, \dots$  haben. Der dazugehörige Gaußfehler für die Freifeldantwort hat den Wert 15 %. Es hat sich gezeigt, daß das Verhältnis  $N/NT$  nur einen marginalen Einfluß auf die Konvergenz hat, sofern die Ruhezone ( $N - NE$ ) ausreichend groß dimensioniert ist. So folgt für  $N/NT = 4096/3600$  im Vergleich zu  $N/NT = 8192/3600$  keine wesentliche Verschlechterung. Durch einen ausreichenden Abstand ( $N - NE$ ) kann die Konvergenz optimiert werden. Um die Spitzenausschläge bei höheren Frequenzen in den Verstärkungsfunktionen zu reduzieren, ist eine angemessene Abklingzone ( $NT - NE$ ) vorzugeben.

Durch eine Dämpfung wird das Nachschwingverhalten des Systems nachhaltig beeinflußt. Bei ausreichend hoher Dämpfung erfolgt bei einer angemessenen, Differenz ( $NT - NE$ ) kein abrupter Abbruch mehr, die willkürlichen Spitzenausschläge reduzieren sich. Die numerische Interpretation ist, daß wegen des Abklingens der Freifeldantwort keine wesentlich über eine Dauer von 18 s hinausgehende Basiserregung erforderlich ist.

Eine mögliche Dämpfung entsteht durch das Einführen viskoser Randdämpfer. Es werden hier - gemäß der ausschließlich betrachteten horizontalen Erregung - nur horizontale seitliche und vertikale untere Dämpfer, d. h.  $BC = 3$  (s. Tabelle I) angekoppelt. Für den sonst gleichen Boden zeigen Abb. 9 und Abb. 13 ein verbessertes Konvergenzverhalten, der Gaußfehler im 2. Zyklus ist 6.4 %. Charakteristisch für das Anbringen viskoser Randdämpfer ist deren Einfluß auf die Verstärkungsfunktion. Zunächst reduzieren sich deren Ordinaten gegenüber dem ungedämpften System. Weiter ändern sich die gedämpft ermittelten Eigenwerte einschließlich deren Amplitudenverhältnisse. Die Randdämpfer verzerren also einerseits das bekannte Bild für das Konvergenzverhalten einer Bodenschicht von ihrer Basis her, woraus auch eine deutliche Modifizierung der iterierten Basiserregung folgt. Andererseits sind viskose Randdämpfer geeignet, die Reflektion der - durch das Quellenproblem /2/ Boden-Bauwerk-Wechselwirkung in der anschließenden Berechnung des aus Boden und Bauwerk gebildeten Gesamtsystems - in den Koppelpunkten  $b$  induzierten Erregung auszuschalten und somit ein von Randbedingungen weitgehend unabhängiges Modell ermöglichen. Durch die reduzierten Amplituden der Verstärkungsfunktion erscheinen bei viskosen Randdämpfern die willkürlichen Spitzenausschläge, die nicht immer

vollständig auszuschalten sind, auch in höheren Iterationszyklen. Sie erfahren jedoch gegenüber vollständig ungedämpften Systemen absolut ebenfalls eine Reduktion; sie treten für  $BC = 3$  nur deshalb so deutlich hervor, weil ihre Größenordnung unverändert im Vergleich zu den stark abgeminderten Ordinaten an den Eigenfrequenzen ist.

Die Annahme ungedämpfter Bodenschichten ist unrealistisch und kann nur dazu dienen, die Zuverlässigkeit des Iterationsverfahrens konservativ zu überprüfen. Eine minimale Bodendämpfung in situ ist immer vorhanden. Abb. 10 und Abb. 14 zeigen den Iterationsverlauf für die ersten beiden Zyklen bei  $\beta = 7$  % Dämpfung. Auch für diese Art der Dämpfung verbessert sich die Konvergenz, d. h. der Gaußfehler beträgt schon im 2. Zyklus nur 1.4 %. Die Amplituden der Verstärkungsfunktion werden ebenso wie durch die Randdämpfer reduziert, jedoch bleiben hier die Eigenwerte und die dazugehörigen Amplitudenverhältnisse wegen der gleichmäßigen und nicht punktuell vorliegenden Dämpfung weitgehend unbeeinflusst.

Viskose Randdämpfer bei 7 % Systemdämpfung führen ebenfalls zu einer schnellen Konvergenz, s. Abb. 11 und Abb. 15. Es hat sich gezeigt, daß die in den oberen Frequenzen der Verstärkungsfunktionen auftretenden willkürlichen Spitzenausschläge, die im Vergleich zu den an den Eigenfrequenzen vorhandenen Ordinaten relativ groß sein können, hier keinen wesentlichen Einfluß auf das Iterationsverhalten haben. Trotz vorhandener großer willkürlicher Spitzenausschläge, die auch aus einem kleinen  $N/NT$  Verhältnis bzw. einer kleinen  $(NT - NE)$  Differenz folgen können, ist der Gaußfehler sehr klein, d. h. die gewünschte Übereinstimmung außerordentlich hoch; im 2. Iterationszyklus beträgt der Gaußfehler 2.2 %.

Der Iterationsverlauf für einen tiefen, weichen Boden ist Abb. 17 bis Abb. 26 zu entnehmen. Die Eigenwerte ändern sich gegenüber dem steiferen Boden nur wenig, da gleichzeitig die Tiefe der Bodenschicht halbiert wird. Hier vermindert sich die Konvergenz etwa um den Faktor 2, wie der Vergleich für die entsprechenden Zyklen mit dem steifen Boden zeigt. Die Frequenzanalyse der modifizierten Basiseingabe tendiert in einen engbandigeren Bereich, in dem einige wenige Frequenzen maßgeblich in Erscheinung treten. Ein abweichender Verlauf ergibt sich für die modifizierte Basiserregung am gedämpften System mit viskosen Randdämpfern. Abb. 24 zeigt, daß  $\ddot{v}_{u,3}$  auch noch für  $t > 18$  s den Verlauf einer schwach gedämpften Schwingung hat, um an der Oberfläche für  $t > 18$  s die Freifeldantwort zu tilgen. Der abrupte Integrationsab-

bruch bei  $t = 36$  s erzeugt an der Oberfläche einen Spitzenausschlag. Bei vollständig ungedämpftem System ist die Konvergenz wieder gering, der Gaußfehler von 6.5 % im 7. Zyklus ist vergleichbar mit dem des tiefen, steifen Bodens. Abb. 25 weist in diesem Falle eine Verstärkungsfunktion aus, bei der die Ordinate der 2. Eigenfrequenz maßgeblich ist, sich also anders als in den bisher betrachteten Systemen, in denen die erste Eigenfrequenz dominiert, verhält.

#### 4.1.2 Ergebnisse bei Diskretisierung einer flachen Bodenschicht

Abb. 27 bis Abb. 42 zeigen das Iterationsverhalten eines flachen Bodens mit den gleichen Schubmoduli. Generell konvergieren flache Böden schneller als tiefe Böden; schon der 2. Zyklus ergibt für alle betrachteten Systeme einen Gaußfehler kleiner als 6 %, wobei die Gaußfehlerbetrachtung ein äußerst scharfes Kriterium ist. Der frequenzverstärkende bzw. abschwächende Einfluß einer flachen Bodenschicht ist begrenzt. So stimmt schon die jeweils erste verbesserte Basiseingabe (jeweils das 4. bzw. 7. Teilbild einer Abbildung) - aus der im 2. Zyklus ein kleiner Gaußfehler resultiert - sehr genau mit der im 2. Zyklus ermittelten Basiseingabe überein. Ferner ist die Ähnlichkeit aller im 2. Zyklus für einen Boden gleicher Steifigkeit ermittelten Basiserregungen untereinander, also bei unterschiedlichen Bodendämpfungen und unterschiedlichen Randbedingungen sehr groß. Diese Ähnlichkeit gilt sowohl für die Darstellung im Zeitraum als auch im Frequenzraum. Der erste Eigenwert ist bei der Dekonvolution flacher Böden immer dominant, wie die Verstärkungsfunktionen zeigen. Auch aus unterschiedlichen Randbedingungen folgt keine große Änderung der Eigenwerte. Die verbesserte Basiseingaben beinhalten vom 2. Zyklus ab - anders als bei tiefen Böden - immer dieselbe Frequenz von 1.18 Hz für die Maximalordinate. Der Grund liegt darin, daß die Sollerregung bei derselben Frequenz ein Maximum hat.

Tendenziell läßt sich auch für die Dekonvolution flacher Böden eine Verstärkung bei höheren Frequenzen, das sind hier Frequenzen zwischen 8 Hz und 20 Hz, feststellen, wenn Bodendämpfung oder viskose Randdämpfer vorhanden sind. Wie bei tiefen Böden machen sich auch bei flachen Böden durch das Iterationsverfahren bedingte Spitzenausschläge in der Übertragungsfunktion bei vorhandener Bodendämpfung und Randdämpfern in höheren Frequenzen, das sind hier Frequenzen zwischen 18 Hz und 50 Hz, bemerkbar. So können diese Spitzenausschläge in der Iterationsfolge sogar anwachsen, vgl. z. B. Abb. 30 mit Abb. 34. Diese Spitzenaus-

schläge haben aber keinen Einfluß auf die Iteration, wie durch die Änderung der Gaußfehler in aufeinanderfolgenden Iterationszyklen deutlich wird.

Flache Böden benötigen bei fehlender Dämpfung kein Nachschwingen der Basiserregung über den Endzeitpunkt der Sollerregung hinaus, um die Freifelderregung über diesen Zeitpunkt hinaus zu Null zu machen. Lediglich im 2. Zyklus des flachen, steifen Bodens tritt, s. Abb. 31, bei  $t = 36$  s ein geringer Spitzenausschlag auf.

Ein Vergleich eines tiefen und eines flachen Bodens gleichen Schubmoduls zeigt, daß die Verstärkungsfunktion des tiefen Bodens kleinere Eigenfrequenzen hat, und daß ihre höheren Eigenfrequenzen stärker ausgeprägt sind, vgl. Abb. 16 mit Abb. 31. Die Dekonvolution des tiefen Bodens verschiebt sich in den höheren Frequenzbereich; so liegen die Frequenzen der Maximalausschläge für die modifizierte Basiseingabe über den entsprechenden Frequenzen der Sollfunktion, also auch der Oberflächenanregung, vgl. Abb. 23 mit Abb. 41. Die Spitzenordinaten der modifizierten Basiserregung im Zeit- und Frequenzraum sind für die tiefen Böden meistens größer als für die entsprechenden flachen Böden. Die Übertragungsfunktionen der tiefen Böden haben teilweise höhere, die Konvergenz nicht beeinflussende Spitzenausschläge im Frequenzbereich zwischen 20 Hz und 50 Hz als die der flachen Böden. Gleichwohl konvergiert die Dekonvolution flacher Böden besonders bei ungedämpften Systemen besser.

Aus einer Vergrößerung des Schubmoduls für gleich hohe Bodenschichten folgt, daß in der Übertragungsfunktion der erste Eigenwert des steiferen Bodens größer, die entsprechende Ordinate aber kleiner wird. Die modifizierte Basiserregung tendiert im Frequenzraum zu höheren Frequenzen. Die numerische Interpretation dafür liegt in der Frequenzverschiebung der Übertragungsfunktion in den höheren Frequenzbereich, Maxima der Basiserregung können dort entstehen, wo zwischen den verschobenen Maxima der Übertragungsfunktion deren ebenfalls frequenzaufrwärts verschobenen Minima liegen. Minima der modifizierten Basiserregung ergeben sich dort, wo bedingt durch die Quotientenbildung (16) die Eigenwerte der Übertragungsfunktion liegen. Verallgemeinert ausgesprochen kann mit steigender Bodendämpfung, mit wachsender Schichttiefe und mit wachsendem Schubmodul eine Frequenzverschiebung für die Dekonvolution in Richtung höherer Frequenzen eintreten.



Parametrische Berechnungen zeigen, daß

- eine Variation des Radius des für die Iteration gewählten Freifeldknotens keinen Einfluß auf die Konvergenz hat,
- eine Variation des Außenradius der nach Abb. 1 seitlich begrenzten Bodenschicht keinen Einfluß auf die Konvergenz hat.

Die zu vergleichenden Fouriertransformierten zeigen hierbei zwar quantitative Unterschiede, die Konvergenz des Gaußfehlers ist aber vergleichbar. Bei viskosen Randdämpfern ergibt sich folgender Einfluß auf die Konvergenz:

- Systeme mit kleinen Außenradien konvergieren schneller als Systeme mit großen Außenradien.
- Die Konvergenz von Systemen mit viskosen Randdämpfern ist besser als die Konvergenz von Systemen ohne Randdämpfer.

Eine gleichförmige Basiserregung erzeugt eine in sich phasengleiche Freifeldantwort, beispielsweise bewegen sich die im Bereich des halben Außenradius liegenden Systempunkte annähernd identisch. So haben im Fall des tiefen, steifen mit 7 % gedämpften Bodens alle Freifeldpunkte im Bereich  $r \leq 60$  m für den 2. Zyklus einen Gaußfehler kleiner 2 %.

#### 4.1.3 Ergebnisse bei Diskretisierung einer tiefen Bodensäule

Eine extreme Verkleinerung des Außenradius und eine Diskretisierung einer einzigen Bodensäule bewirkt eine stärkere Betonung der ersten Eigenfrequenz in den Verstärkungsfunktionen, wie Abb. 43 für eine Bodensäule ohne Dämpfung im 8. Zyklus zeigt. Im Vergleich zur Schicht mit 151.0 m Außenradius (s. Abb. 25) ist hier der erste Eigenwert dominant, der Gaußfehler ist mit 45% größer. Trotzdem liegt für das System mit einer Säule gegenüber dem größeren System keine wesentlich niedrige Stabilität vor, denn bei Einführung einer Dämpfung von 1 % (Einhängung der Rayleigh Dämpfung bei  $\nu_1 = 0.8$  Hz,  $\nu_2 = 30$  Hz) wird wie in Abb. 25 im 8. Zyklus des Systems Säule der zweite Eigenwert dominant. Ferner bewirkt die Vorgabe von 1 % Dämpfung eine deutliche Verbesserung des Gaußfehlers, vgl. Abb. 43 mit Abb. 44.

Ein Weglassen der vertikalen, seitlichen Auflager bewirkt eine Verstärkung der höheren Eigenfrequenzen in der Übertragungsfunktion und in der modifizierten Basiserregung, wie aus Abb. 45 für das System Bodensäule sichtbar wird; der Gaußfehlervergleich weist auf eine verbesserte Konvergenz hin.



In den bisherigen Abbildungen ist das System Bodenschicht durch Volumenelemente nach der Finite Element Methode ( also durch Elemente, in denen durch die konstitutiven Gleichungen alle Freiheitsgrade miteinander gekoppelt sind ) und durch die Anordnung starrer, vertikaler Randbedingungen an den Seiten ( zur Simulation der Kompatibilität mit den im diskretisierten Modell nicht enthaltenen seitlichen Bereichen ) berechnet /7/; die Dämpfung wird nach Rayleigh für die hier benutzte direkte Integration formuliert.

#### 4.2 Berechnung des Schubalkenmodells

Die nun folgenden Berechnungen werden mit einem Schubalkencode durchgeführt, der nur Scherwellenfortpflanzung berücksichtigt, also keine Kopplung von horizontalen mit vertikalen Freiheitsgraden erlaubt /9/. Deshalb entfällt auch die Notwendigkeit der Anordnung seitlicher Randbedingungen für diese eindimensionale Wellenausbreitung. Es liegen nur horizontale Freiheitsgrade vor. Ein weiterer Unterschied folgt aus dem für das Schubalkenmodell verwendeten modalen Integrationsverfahren, sofern nicht alle Eigenformen überlagert werden. Daher ergibt sich die Möglichkeit einer Modifizierung der Dämpfung, wenn wie vorliegend jeder zur Überlagerung kommende Modus - abweichend von der Rayleigh Dämpfung bei zwei Einhängewerten - mit einem identischen Dämpfungsfaktor beaufschlagt wird. Die der klassischen Modalanalyse vergleichbare Dämpfungsmatrix wird dann durch Reihenbildung für Masse- und Steifigkeitsmatrix gebildet /1/. (Für eindimensionale Schubalken existieren auch Rekursivformeln zur direkten Dekonvolution der Basiserregung /13/.) Bei fehlender Dämpfung konvergiert das Schubalkenmodell schwächer als die Finite Element Modelle. Während die ersten Zyklen beider Verfahren quantitativ noch gleichwertig sind, weichen bereits die 2. Zyklen ab.

Die Konvergenz ist weiter abhängig von einer zu wählenden Grenzfrequenz  $f_m$ , oberhalb welcher keine zugehörigen Eigenformen mehr zur Überlagerung herangezogen werden. Der Sinn für die Vorgabe einer Grenzfrequenz ist ein beabsichtigtes Ausblenden höherer Frequenzanteile, um etwaige Abbruchspitzen in den höheren Frequenzbereichen zu reduzieren. Abb. 46 bzw. Abb. 47 zeigen den 8. Iterationszyklus ohne eine Dämpfung für den im weiteren ausschließlich betrachteten tiefen, weichen Schubalken mit einer Grenzfrequenz von 30 Hz bzw. von 10 Hz. Während bei einer Grenzfrequenz von 30 Hz deutlich die höheren Frequenzen überwiegen, was zu einem höheren Gaußfehler führt - wobei die

ermittelte Freifeldanregung zwischen  $18 \text{ s} < t < 36 \text{ s}$  beliebig veränderlich ist und eine größtenteils nur durch schmale Spitzen charakterisierte Fouriertransformierte hat - wird bei der kleineren Grenzfrequenz von 10 Hz der Einfluß der höheren Frequenzen entsprechend gemindert, der Gaußfehler wird kleiner. In diesem Fall vermindert sich auch die Freifeldanregung zwischen  $18 \text{ s} < t < 36 \text{ s}$ , die Fouriertransformierte entspricht bis auf zwei Spitzenausschläge in ihrer Form weitgehend der Sollvorgabe. Die Spitzen der Fouriertransformierten korrespondieren mit den Eigenwerten der Verstärkungsfunktion. Durch die fehlende Dämpfung erscheinen auch höhere Eigenformen gemessen an ihrer Ordinate gleichwertig in der Verstärkungsfunktion, das gilt besonders im Falle der kleineren Grenzfrequenz.

Die Eigenfrequenzen der iterativ ermittelten Übertragungsfunktion und einer summarischen Übertragungsfunktion, welche für den Schubalken nun jeweils im Teilbild 6 dargestellt wird, korrespondieren miteinander. Die summarische Übertragungsfunktion lautet /9/:

$$|TF|_{\text{summ.}} = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n \frac{d_i (\omega_i^2 (\omega_i^2 - \omega^2) + 4 \beta_i^2 \omega_i^2 \omega^2)}{(\omega_i^2 - \omega^2)^2 + 4 \beta_i^2 \omega_i^2 \omega^2} \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^n \frac{d_i 2 \beta_i \omega_i \omega^3}{(\omega_i^2 - \omega^2)^2 + 4 \beta_i^2 \omega_i^2 \omega^2} \right)^2} \quad (17)$$

wobei  $d_i$  der statische Beteiligungsfaktor an der Oberfläche,  $\omega_i$  die Kreiseigenfrequenz und  $\beta_i$  das Dämpfungsmaß des Modus  $i$  bei  $n$  überlagerten Moden bedeuten.

Parameteruntersuchungen haben gezeigt, daß steifere Schubalken schlechter konvergieren. Die Wahl einer Grenzfrequenz hat sich in allen Fällen als vorteilhaft für die Iteration und die Darstellung der Übertragungsfunktionen erwiesen. Für die vorliegend betrachtete Standortsituation und für die gegebene Sollerregung ist eine Grenzfrequenz von  $f_m = 10 \text{ Hz}$  geeignet.

Den Einfluß einer geringen Dämpfung zeigen Abb. 48 bis Abb. 51. Bei 1 % Dämpfung kann für beide Grenzfrequenzen eine durch teilweises Alternieren des Gaußfehlers gekennzeichnete Konvergenz festgestellt werden. In der Verstärkungsfunktion wird der erste Eigenwert maßge-

bend; während die Summe (17) für beide Grenzfrequenzen etwa gleiche Ordinaten aufweist, dominiert bei einer Grenzfrequenz von 30 Hz der erste Eigenwert das spektrale Verhalten der iterativ ermittelten Verstärkungsfunktion. Die ermittelte Freifelderregung klingt weitgehend bis  $t = 36$  s aus. Die modifizierte Basiserregung hat im Vergleich zur Berechnung ohne Dämpfung ein breitbandigeres Frequenzspektrum. Im Gegensatz zu der Grenzfrequenz 30 Hz folgt für die modifizierte Basiserregung bei der Grenzfrequenz 10 Hz eine hochfrequentere Anregung.

Mit ansteigender Dämpfung erlangen diese höheren Frequenzen der Basiserregung für die kleinere Grenzfrequenz an Bedeutung, wie der Vergleich von Abb. 52 mit Abb. 53 bei 7 % Dämpfung zeigt. Höhere Dämpfung bedeutet auch eine verstärkte Breitbandanregung, der Gaußfehler ist für beide Grenzfrequenzen schon im 2. Zyklus kleiner als 3 %, im Freifeld existiert kein Nachschwingen. Die Übertragungsfunktionen des Schubalkens stimmen bei 7 % mit der des Finite Element Modells überein, vgl. Abb. 52 und Abb. 53 mit Abb. 23.

Der Einfluß einer Variation der Iterationsparameter  $N$  und  $NT$  auf das Ergebnis zeigt der Vergleich von Abb. 49, Abb. 54, Abb. 55 und Abb. 56 für den jeweils 8. Iterationszyklus bei 1 % Dämpfung. Kleine Gaußfehler sind  $N/NT = 8192/3600$  (Abb. 49) und  $N/NT = 4096/1800$  (Abb. 55) zuzuordnen, während die zugehörigen Verstärkungsfunktionen durch die Differenz ( $NT - NE$ ) geprägt werden ( $NE = 1800$ ). Je kleiner ( $NT - NE$ ), desto größer sind die Spitzenaussschläge in den höheren Frequenzen (s. Abb. 55), wodurch ein Alternieren des Gaußfehlers entstehen kann. Eine noch realistischere Verstärkungsfunktion vermittelt Abb. 54 für  $(NT - NE) = 1800$  bei  $N/NT = 4096/3600$ ; hier werden auch höhere Eigenfrequenzen angesprochen und der ermittelte Oberflächenzeitverlauf schwingt für  $t > 18$  s nicht aus. Bei  $NT = 1800$  existiert kein Nachschwingen, die Verstärkungsfunktionen werden von den höheren Frequenzen dominiert. Dann können auch Abweichungen in der Fouriertransformierten des ermittelten Freifeldzeitverlaufes für höhere Frequenzen auftreten, s. Abb. 56 für  $N = 2048$ .

Bei  $\beta = 1$  % Dämpfung ist für die iterativ ermittelten Verstärkungsfunktionen trotz kleinen Gaußfehlers keine Konvergenz auf eine Maximalordinate für den ersten Eigenwert festzustellen, ihre Ordinaten übersteigen in jedem Fall weit die Ordinaten einer analytischen Übertragungsfunktion, wenn hier die Zähigkeit  $\eta$  auf die erste Eigenfrequenz  $\omega_1$  bezogen wird ( $\eta = 2 \beta G/\omega_1$ ). Aber schon bei 7 % Dämpfung

liegen die ermittelten Spitzenordinaten für die erste Eigenfrequenz des tiefen, weichen Bodens dicht beieinander:

- $|\overline{\text{TF}}(\omega_1)| = 8.8$  (Bodenschicht analytisch),
- $|\overline{\text{TF}}(\omega_1)| = 9.0$  (Bodenschicht bei Rotationssymmetrie /7/, s. Abb. 23),
- $|\overline{\text{TF}}(\omega_1)| = 9.0$  (Schubbalken, iterative Übertragungsfunktion /9/, s. Abb. 52, Abb. 53),
- $|\overline{\text{TF}}(\omega_1)| = 9.1$  (summarische Übertragungsfunktion bei  $f_m = 10$  Hz /9/, s. Abb. 53),
- $|\overline{\text{TF}}(\omega_1)| = 9.2$  (summarische Übertragungsfunktion bei  $f_m = 30$  Hz /9/, s. Abb. 52),
- $|\overline{\text{TF}}(\omega_1)| = 10.9$  (Bodenschicht bei zweidimensionaler Elementierung /11/).

Die Ordinate an der zweiten Eigenfrequenz ist für die analytische Verstärkungsfunktion am wenigsten ausgeprägt.

## 5. Zusammenfassung und Ausblick

Je nach gewünschtem Genauigkeitsgrad und in Abhängigkeit von der jeweiligen Aufgabenstellung existieren unterschiedliche Methoden zur Berechnung von Boden-Bauwerk-Wechselwirkungsproblemen. Ein sehr genaues, aber auch sehr aufwendiges Verfahren besteht in der Diskretisierung von Boden und Bauwerk in ein gemeinsames Strukturmodell unter Berücksichtigung der geeigneten Randbedingungen für den auszuwählenden Bodenausschnitt. Die daraus resultierenden Bewegungsgleichungen können im Zeitraum oder im Frequenzraum definiert sein.

Die Lösung für die unbekanntes Verschiebungsgrößen wird in den einschlägigen Rechenodes auf eine Basiserregung bezogen; als Basis dient entweder der Übergang vom Lockergestein zum Fels, oder es ist in ausreichender Tiefe eine Grenze mit geeigneten, d. h. wenig reflektierenden Randbedingungen einzuführen.

Im Hinblick auf eine eindeutige Vergleichbarkeit von Boden-Bauwerk-Wechselwirkungseffekten beispielsweise für unterschiedliche Bodendiskretisierungen eines Standortes oder gleicher Oberflächenerregung unterschiedlicher Standorte muß für das betrachtete System eine identische Freifeldanregung an der Oberfläche vorliegen, die Basiserregung des Rechenmodells ist dem zuzuordnen. Dieser Vorgang der Ermittlung der Basiserregung aus dem Oberflächenzeitverlauf heißt Dekonvolution. Für die Dekonvolution im Zeitraum existiert keine direkte Lösung.

Vorliegend wird deshalb ein iteratives Verfahren vorgeschlagen, in dem durch hybride Transformationen in den Frequenzraum die Basiserregung so ermittelt wird, daß der daraus resultierende Oberflächenzeitverlauf die vorgegebene Sollfunktion beliebig genau erfüllt. An den Rändern des Bodenausschnittes werden zur Begrenzung von Reflektionen aus Wechselwirkungseffekten viskoser Dämpfer definiert. Die in den einzelnen Iterationsstufen ausgewiesenen Übertragungsfunktionen der Bodenschicht variieren in Abhängigkeit vom Frequenzgehalt der jeweiligen Basiserregung.

Wenn abweichend von der bislang vorausgesetzten Linearität nichtlineare Wellenfortpflanzungsprobleme vorliegen, führen nur Verfahren, bei denen diese betroffenen Bereiche diskretisiert werden, zu einer Lösung. Je nach gewünschtem Genauigkeitsgrad gibt es für im Frequenzraum definierte Strukturmodelle eine Näherungslösung nach dem Verfahren der äquivalenten Linearität /11/ oder eine iterative Lösung mit hybriden

Zeitraum-Frequenzraum-Transformationen /4/, /5/. Nichtlineares Materialverhalten wird hierbei nach dem Verfahren der initialen Dehnung erfaßt; die dabei erzielte Lösungsgenauigkeit entspricht der dem Verfahren der initialen Dehnung üblicherweise zugeordneten Konvergenzeigenschaft /12/.

Für im Zeitraum definierte nichtlineare Strukturmodelle läßt sich im Falle der identischen Basiserregung das iterative Dekonvolutionsverfahren in entsprechender Weise verwenden, aus den zeitlich veränderlichen Materialeigenschaften folgt lediglich eine verminderte Konvergenz. Multiple Basiserregung erfordert dagegen einen weitaus höheren Lösungsaufwand bei Nichtlinearität, der dann, wie der Vergleich von (3b) mit (9) zeigt, dem für im Freifelderregungskoodinatensystem entstehenden Aufwand entspricht.

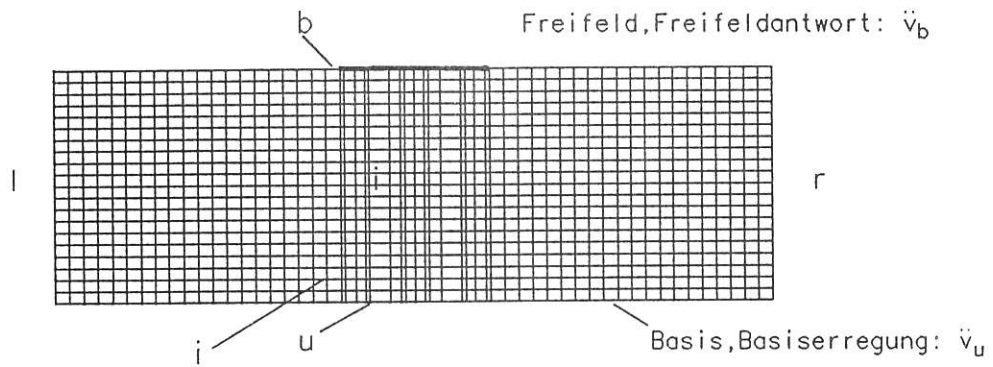


## Literatur

- / 1/ R. W. Clough, J. Penzien  
Dynamic of Structures  
McGraw-Hill, 1975
- / 2/ J. P. Wolf  
Dynamic Soil-Structure Interaction  
Prentice-Hall Inc., 1985
- / 3/ W. Matthees  
Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel  
der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-  
Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten  
Forschungsbericht Nr. 160 der Bundesanstalt für Materialfor-  
schung und -prüfung (BAM), 1989
- / 4/ W. Matthees  
A strategy for the solution of soil dynamic problems involving  
plasticity by transform  
Int. J. for Numerical Methods in Engineering Vol. 18,  
S. 1601-1611, 1982
- / 5/ J. P. Wolf  
Nonlinear Soil-Structure-Interaction Analysis based on Hybrid  
Frequency-Time Domain Formulation  
Proceedings of the 8th European Conference on Earthquake  
Engineering, Lissabon, 1986
- / 6/ F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, M. Weber  
Zum Einfluß von Dämpfung und Materialnichtlinearität am Bei-  
spiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Kernkraft-  
werken  
4. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Erdbeben-Inge-  
nieurwesen und Baudynamik, BAM Berlin, 1987  
DGEB-Publikation Nr. 2
- / 7/ ASHSD2: Dynamic Stress Analysis of Axisymmetric Structures  
under Arbitrary Loading  
Berkeley, 1975
- / 8/ KTA 2201 'Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Ein-  
wirkungen'
- / 9/ A. J. Hagmann, R. V. Whitman  
Comparison of methods for analyzing soil deposits during earth-  
quakes  
Research Report No. R69-29, MIT, 1969
- /10/ BMFT RS 308: Methodenuntersuchungen zur erdbebensicheren Ausle-  
gung von Kernkraftwerken, 1979
- /11/ FLUSH: A computer program for approximate 3-D analysis of  
soil-structure interaction problems, by J. Lysmer, T. Udaka,  
C.-F. Tsai, H. B. Seed, Berkeley, 1975
- /12/ W. Matthees  
Tangent Modulus Method Versus Initial Strain Method  
Proceedings of the 7th international Seminar on Computational  
Aspects of the Finite Element Method (CAFEM) S. 289-328, 1983  
in Conjunction with the 7th international Conference on  
Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-7), Chicago,  
1983

/13/ S. B. Sterling  
Site consistent Rock Motion  
J. of the Power Division, P02, S. 365-376, 1973

SYSTEM I



SYSTEM II

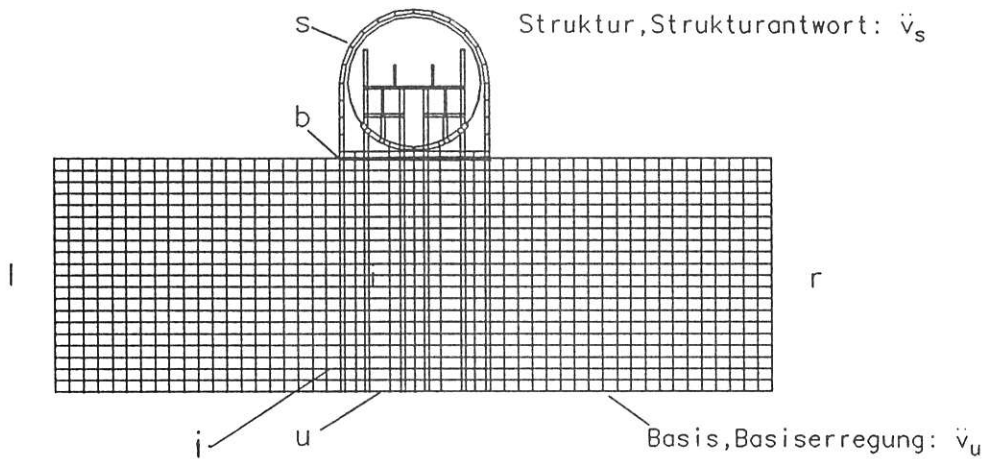


Abb.: 01 Diskretisierung eines Bodenausschnittes

3-D-Code		Rotationssymmetrischer Code	
Klassisches Halbraum Analogon	FEM Analogon	FEM Analogon	FEM Standort Diskretisierung
<b>M<sub>1</sub></b>	<b>M<sub>2</sub></b>	<b>M<sub>4</sub></b>	<b>M<sub>5</sub></b>
<b>M<sub>3</sub></b>			<b>M<sub>6</sub></b>
<p>DOF Anzahl der Freiheitsgrade NP Anzahl der Knotenpunkte</p>			
22 NP 57 DOF	36 NP 198 DOF	119 NP 338 DOF	206 NP 567 DOF
	800 NP 4000 DOF		710 NP 2023 DOF

Abb.: 02 Diskrete Strukturmodelle zur Darstellung der BODEN-BAUWERK-Wechselwirkung

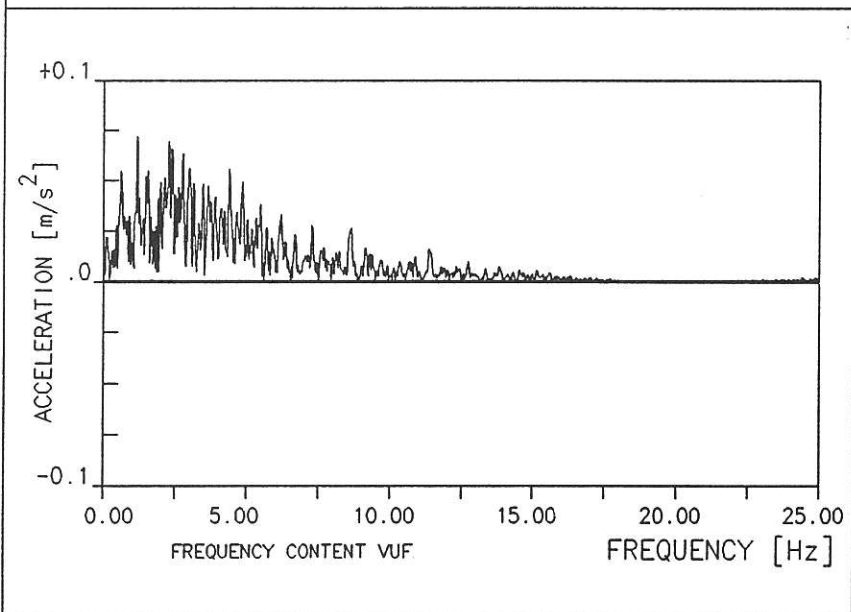
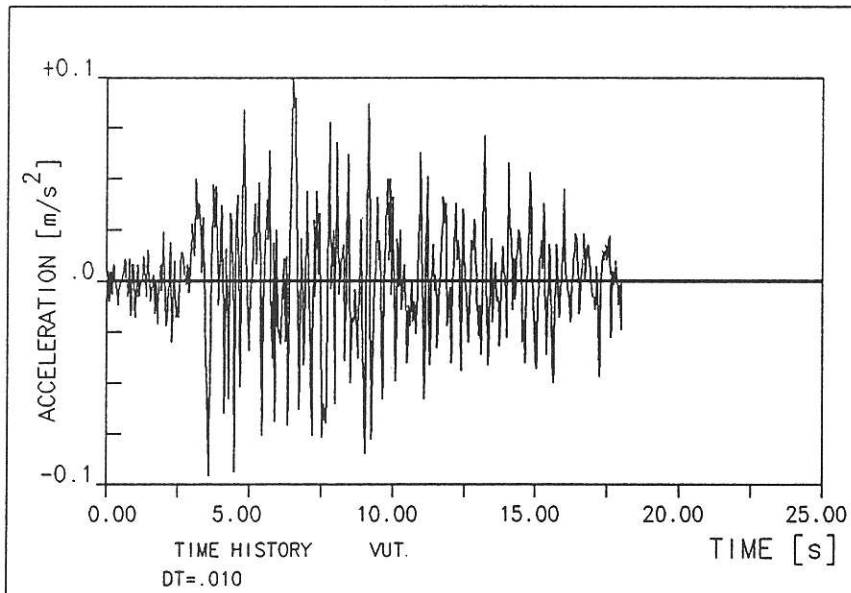


Abb.: 03 Das TAFT N69W Erdbeben, 21. Juli 1952  
 a) Erregung-Zeitverlauf  
 b) Betrag-Fourierspektrum

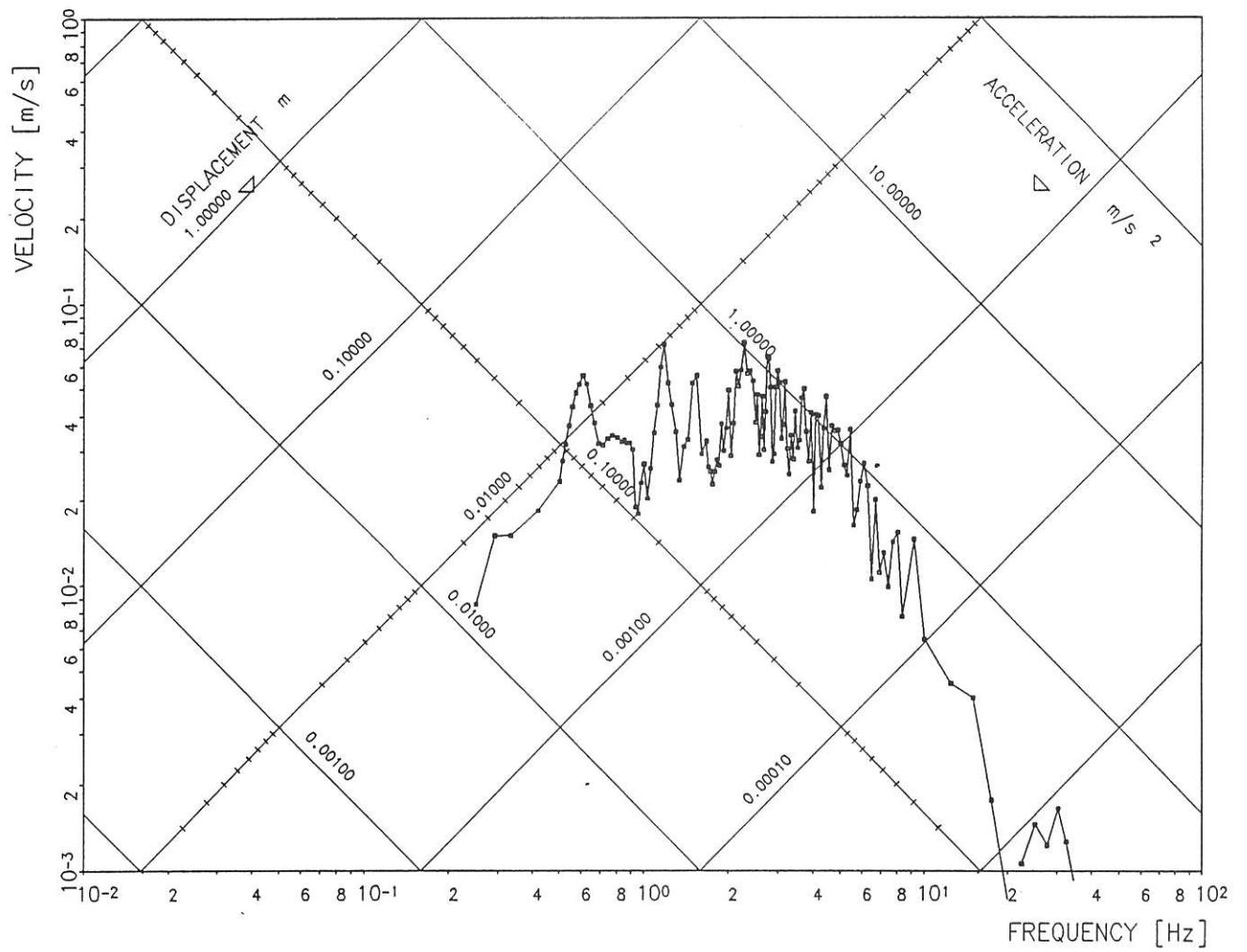


Abb.: 04 RESPONSE SPEKTRUM TAFT-Erdbeben

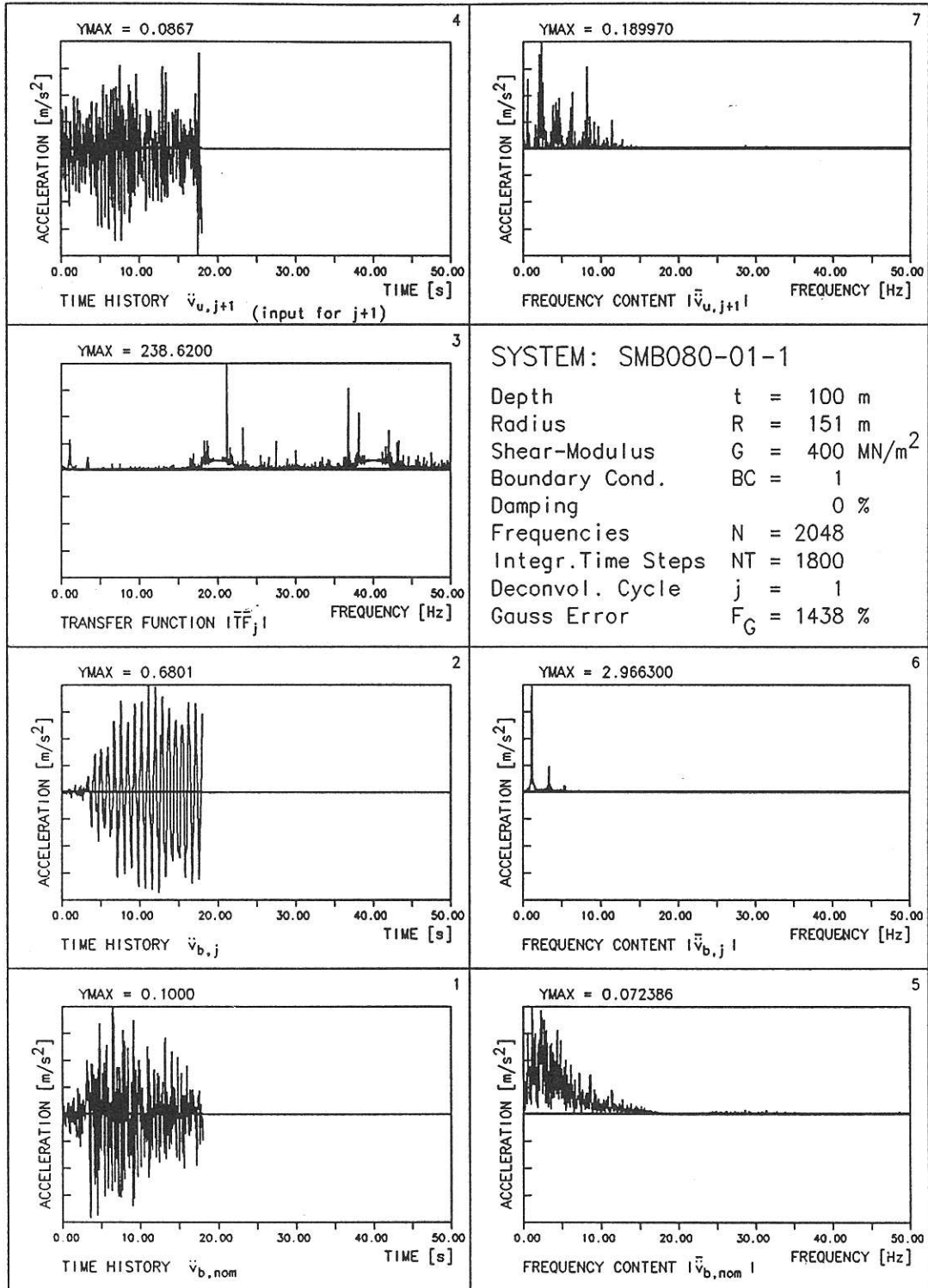


Abb.: 05 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden ohne Daempfung; Zyklus=1



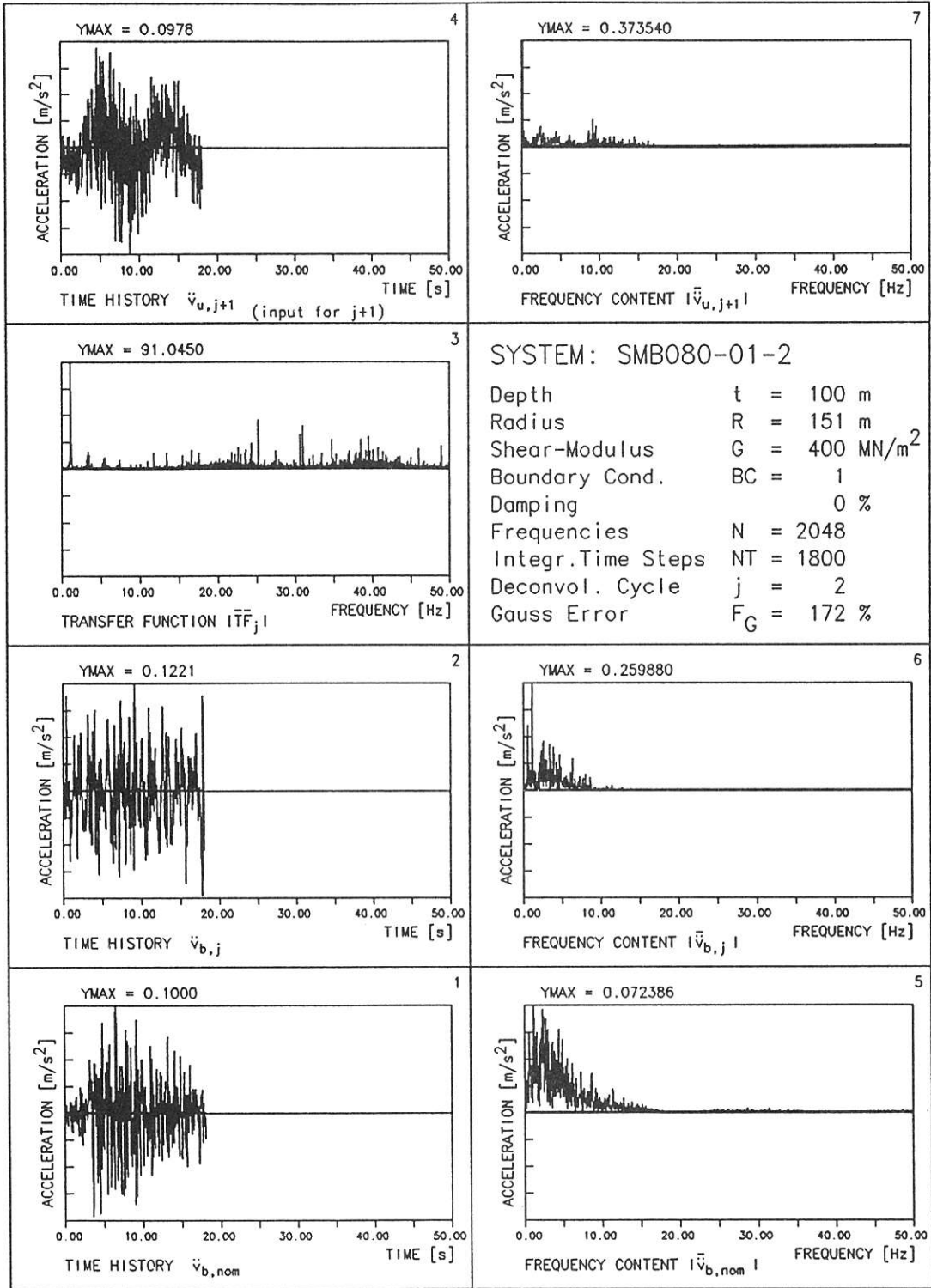


Abb.: 06 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden ohne Daempfung; Zyklus=2

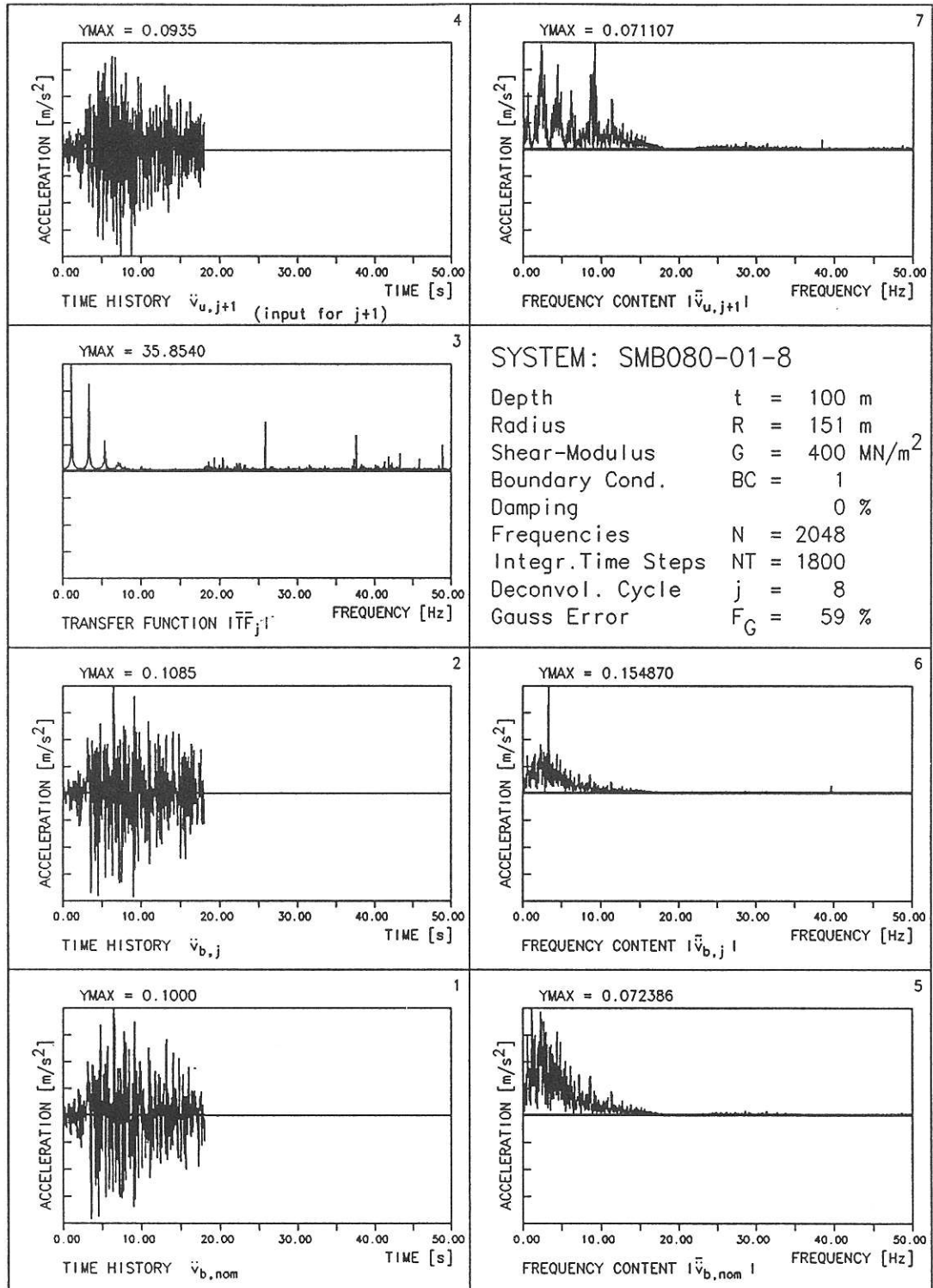


Abb.: 07 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden ohne Daempfung; Zyklus=8

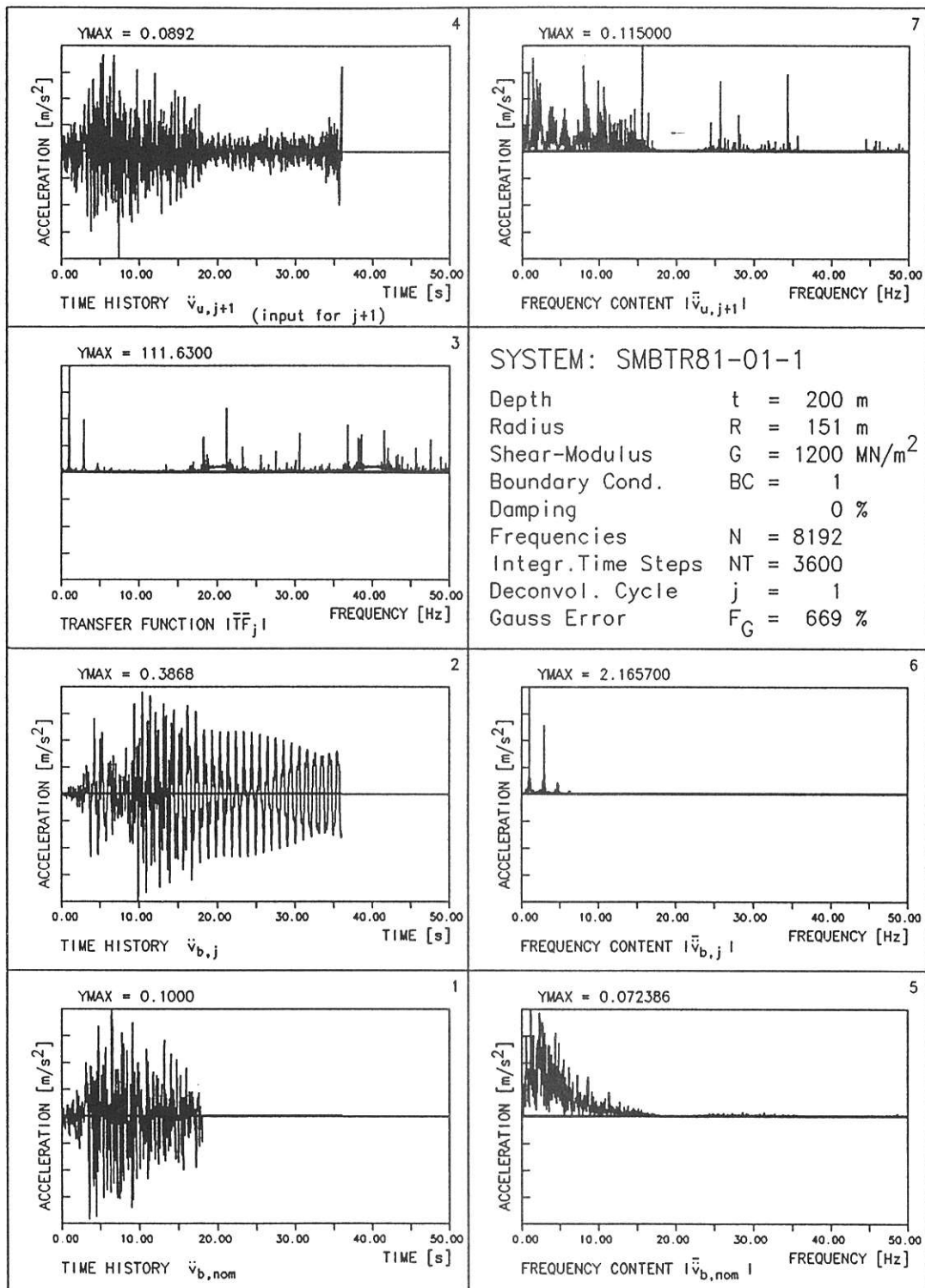


Abb.: 08 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, steifer Boden ohne Daempfung; Zyklus=1

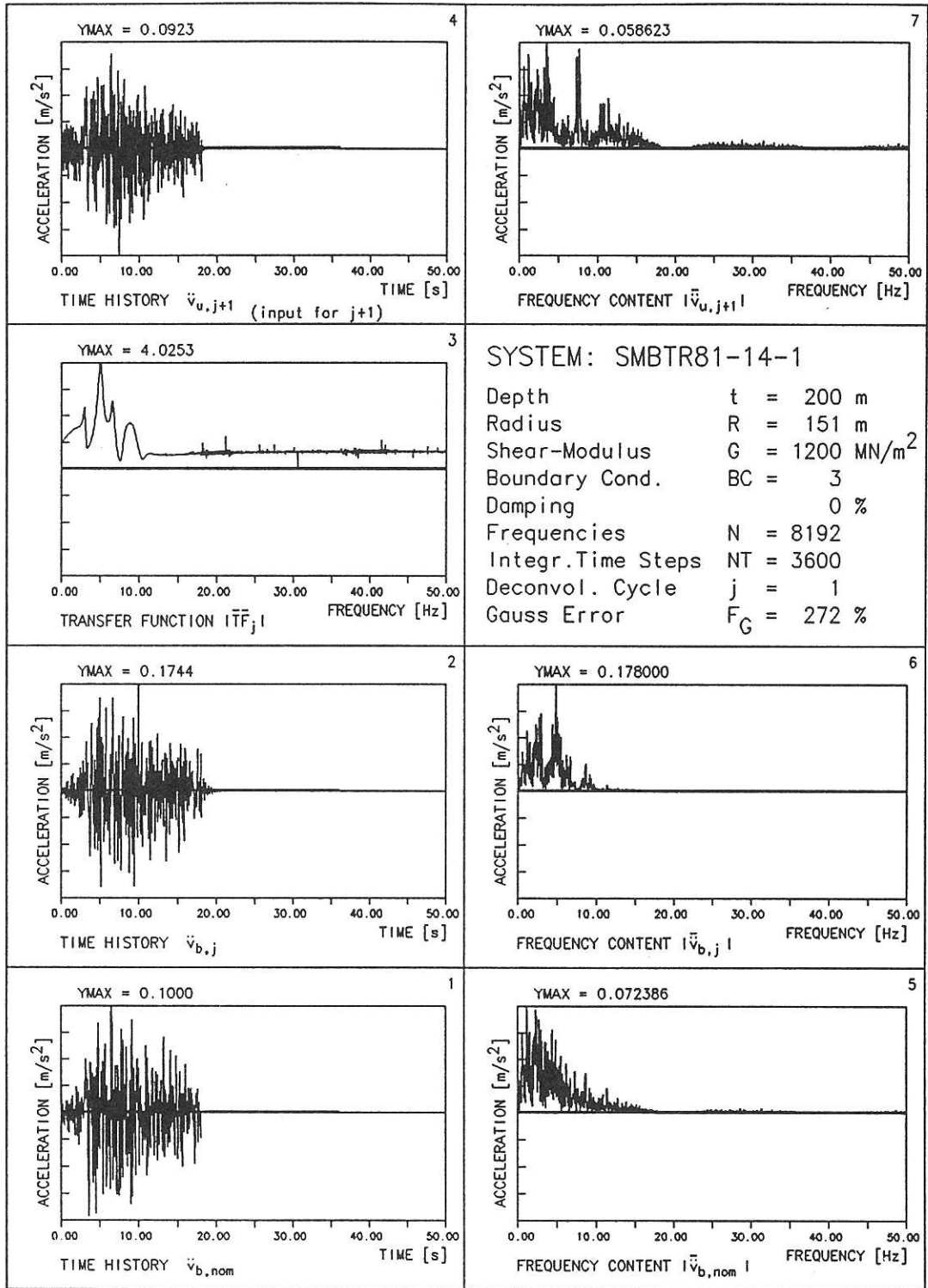


Abb.: 09 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, steifer Boden ohne Daempfung; Zyklus=1

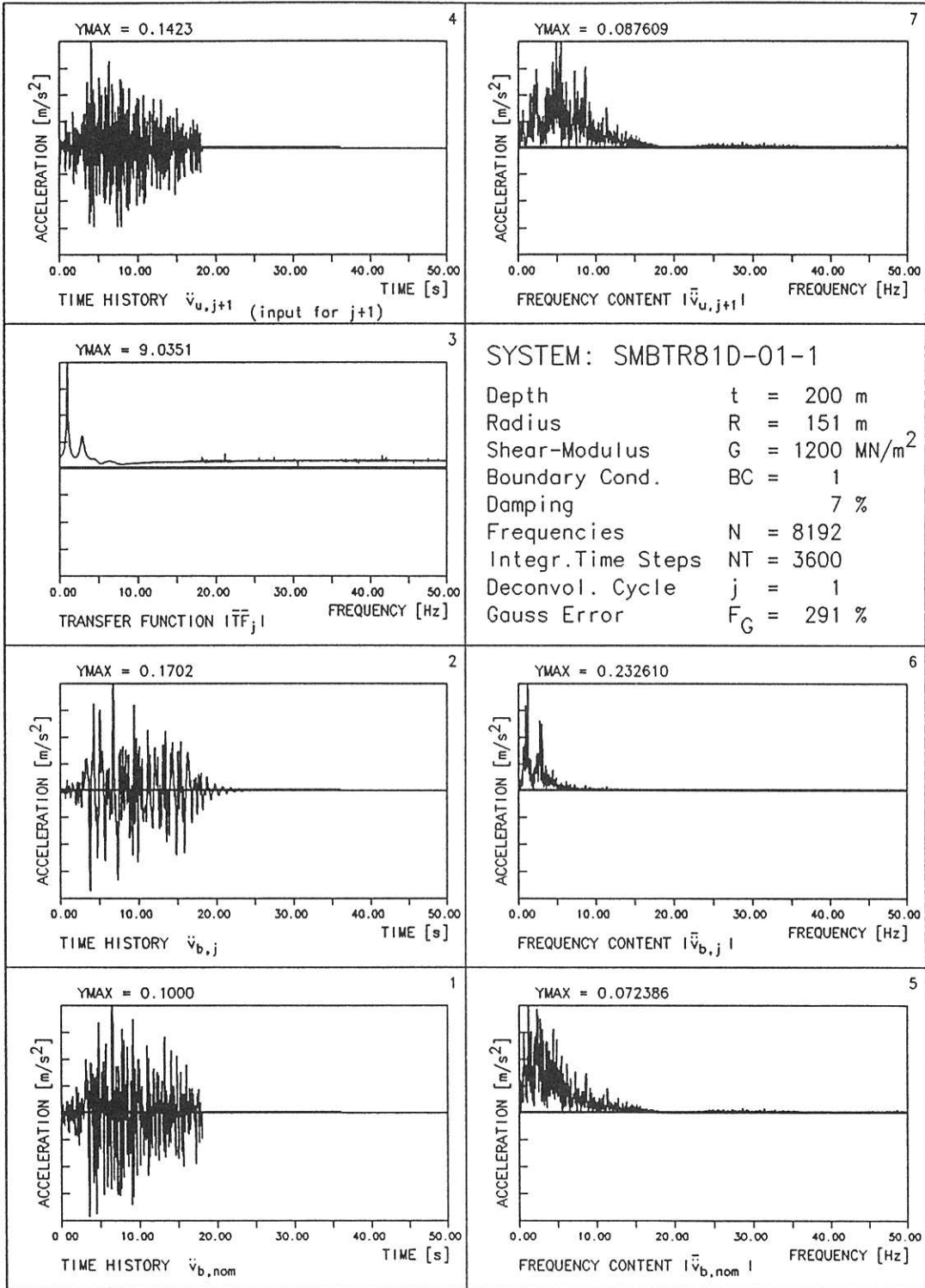


Abb.: 10 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, steifer Boden mit Daempfung; Zyklus=1

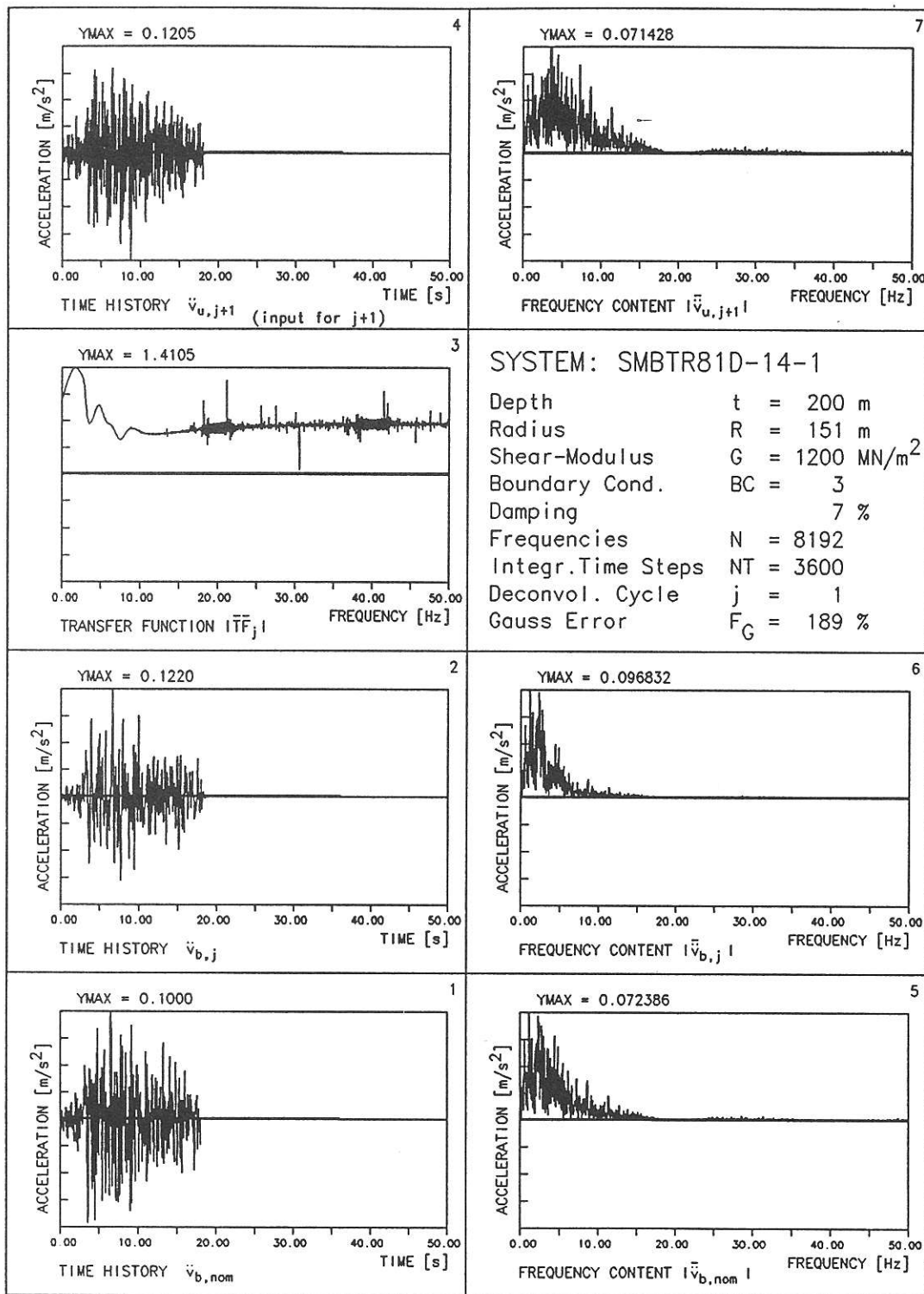


Abb.: 11 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, steifer Boden mit Daempfung; Zyklus=1



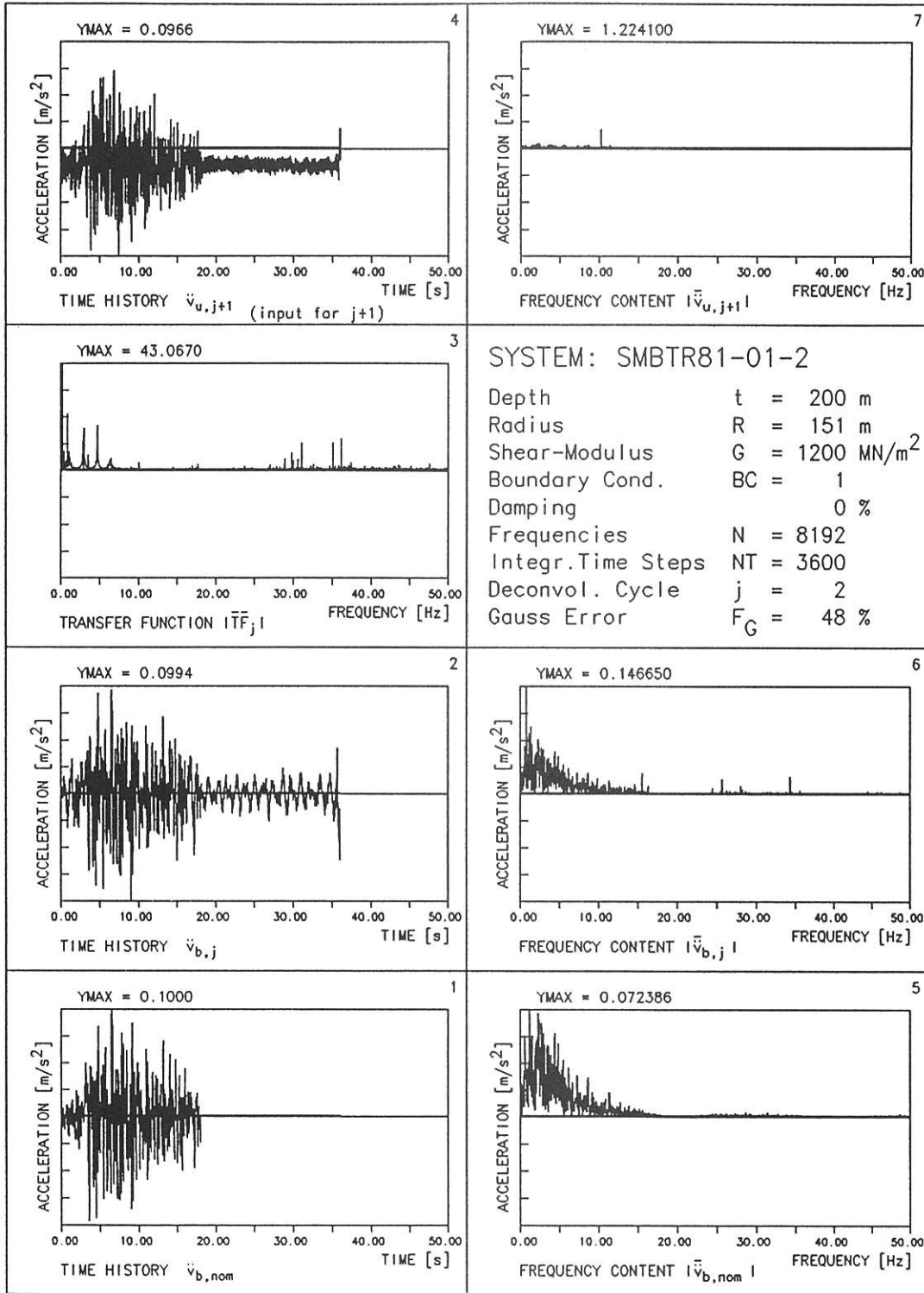


Abb.: 12 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, steifer Boden ohne Daempfung; Zyklus=2

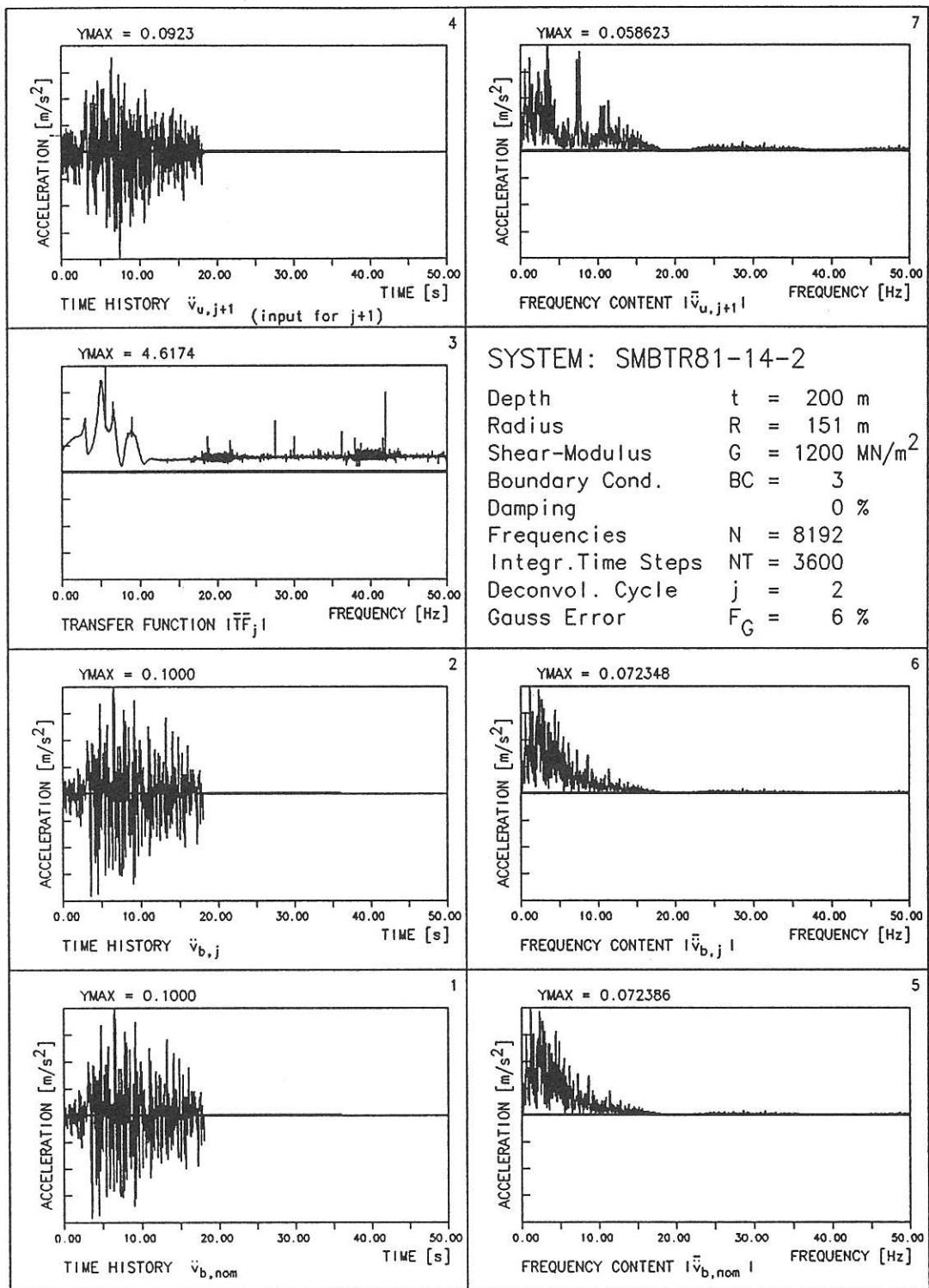


Abb.: 13 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, steifer Boden ohne Daempfung; Zyklus=2

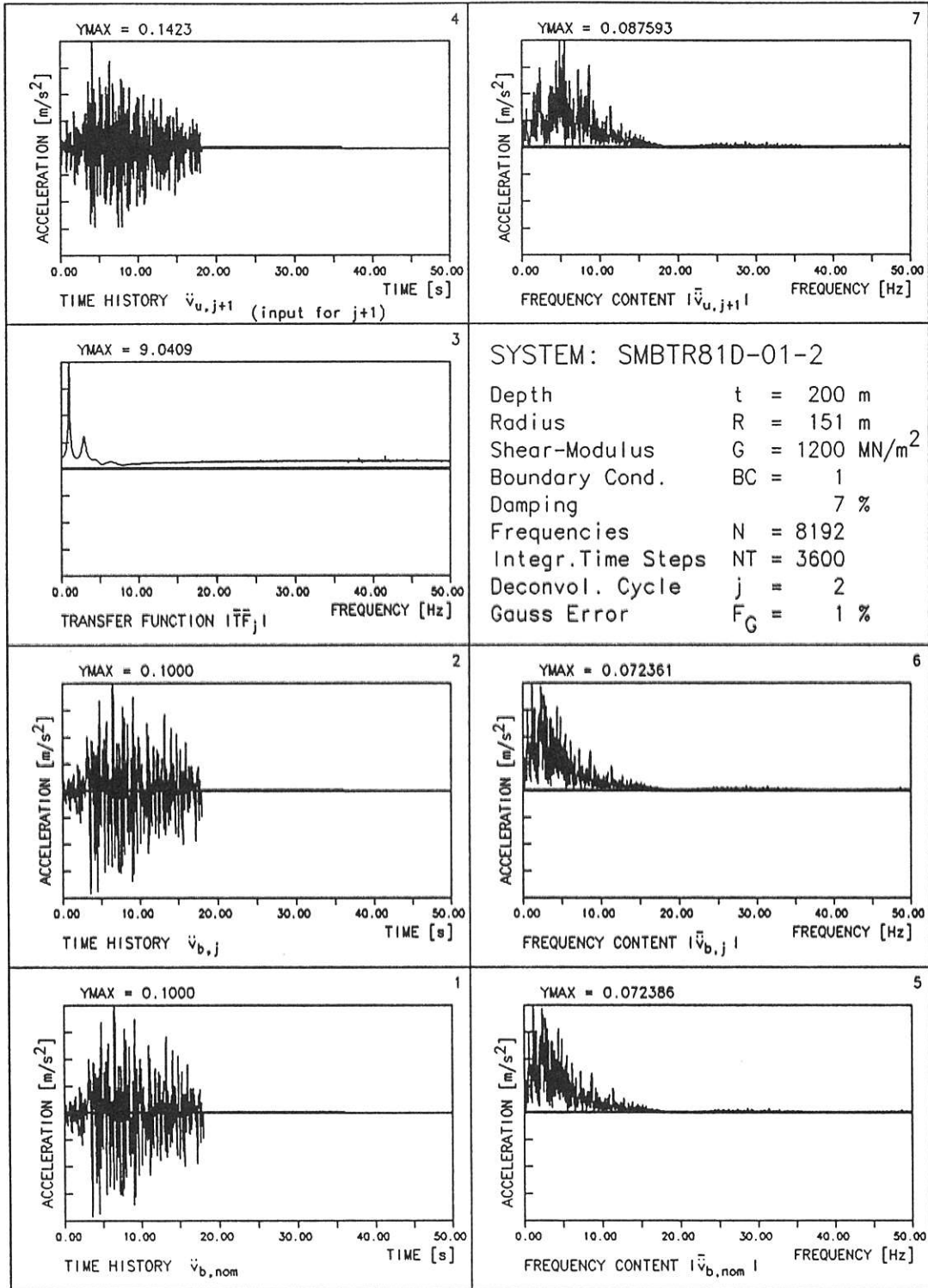


Abb.: 14 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, steifer Boden mit Daempfung; Zyklus=2

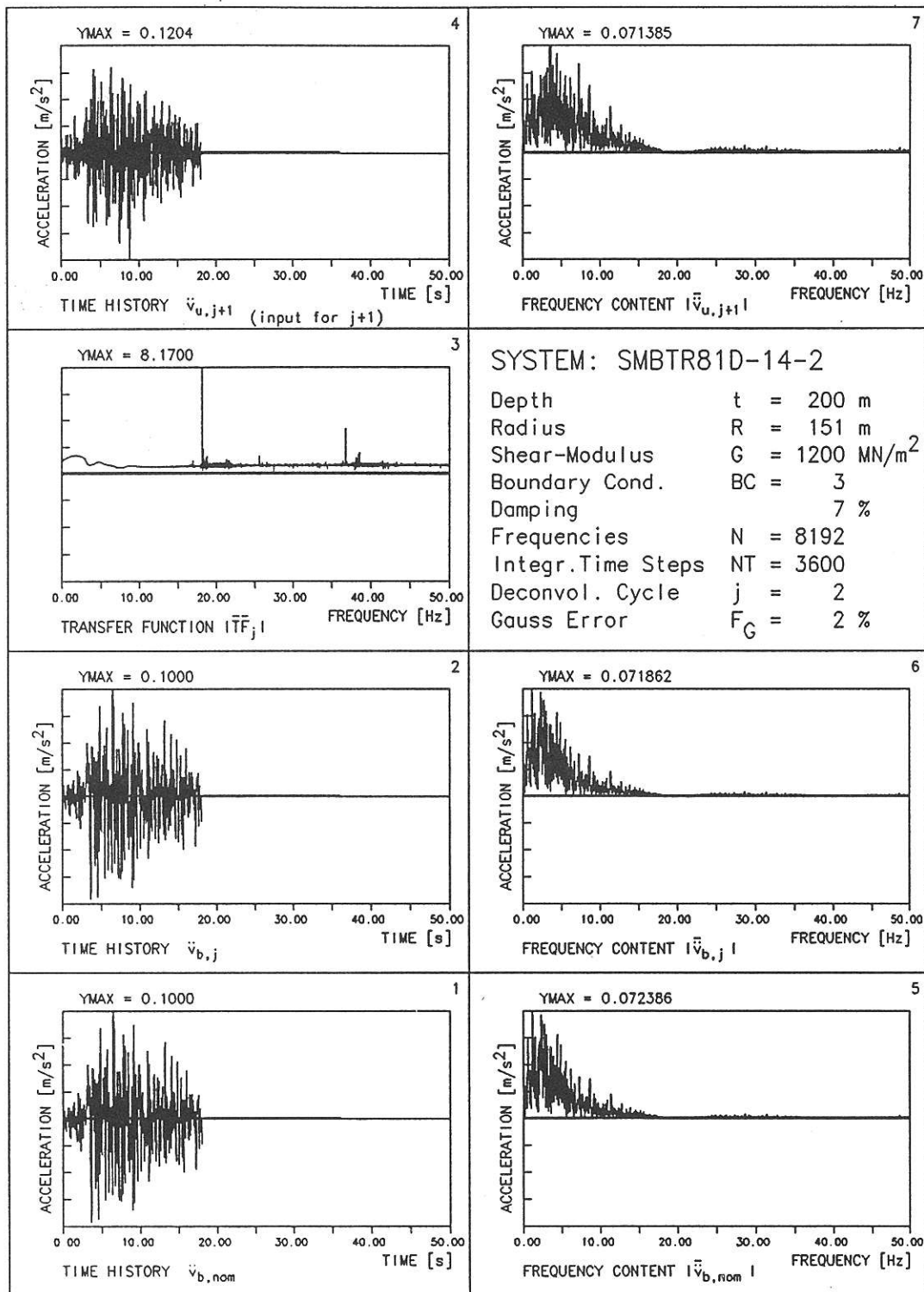


Abb.: 15 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, steifer Boden mit Daempfung; Zyklus=2

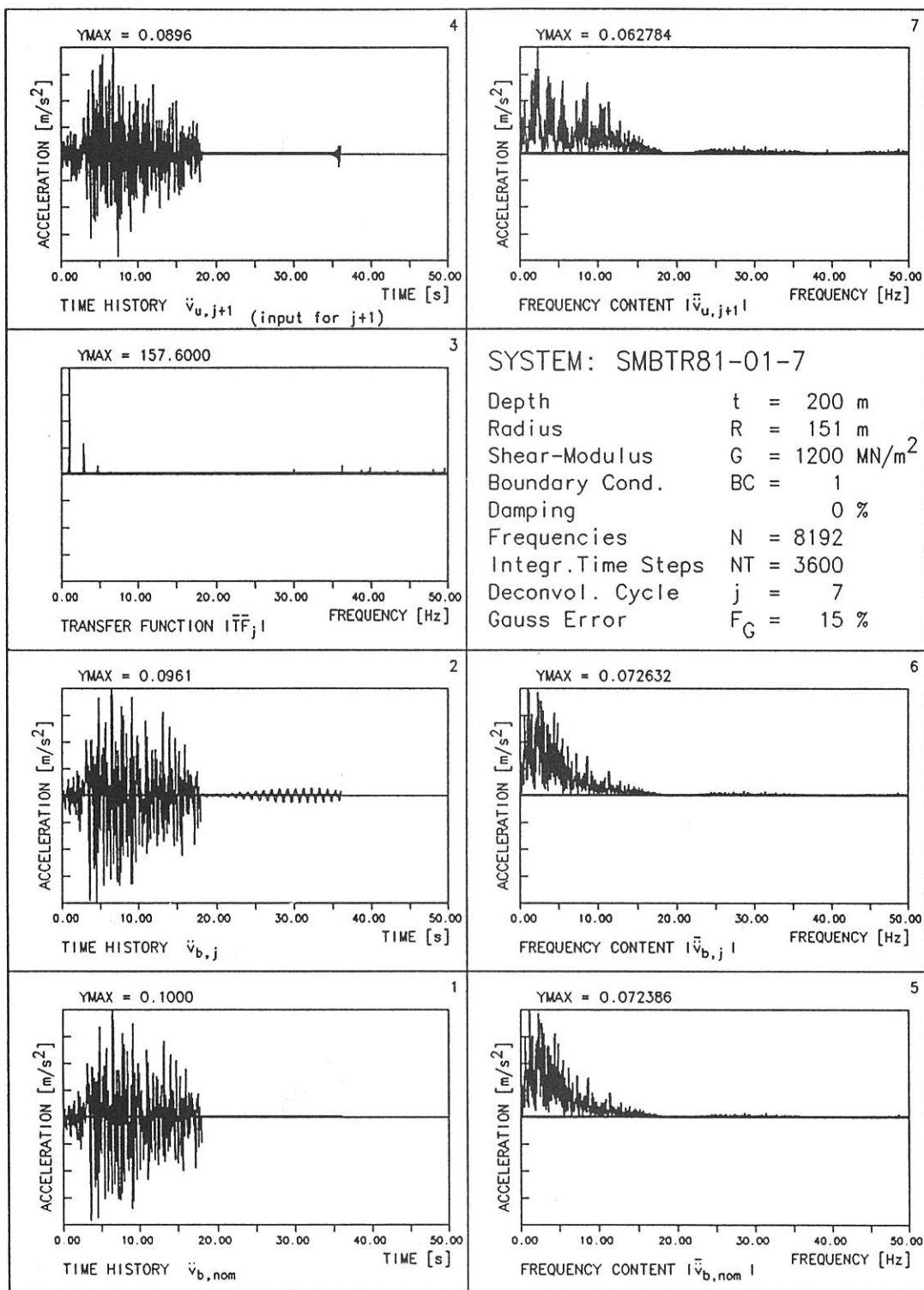


Abb.: 16 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, steifer Boden ohne Daempfung; Zyklus=7

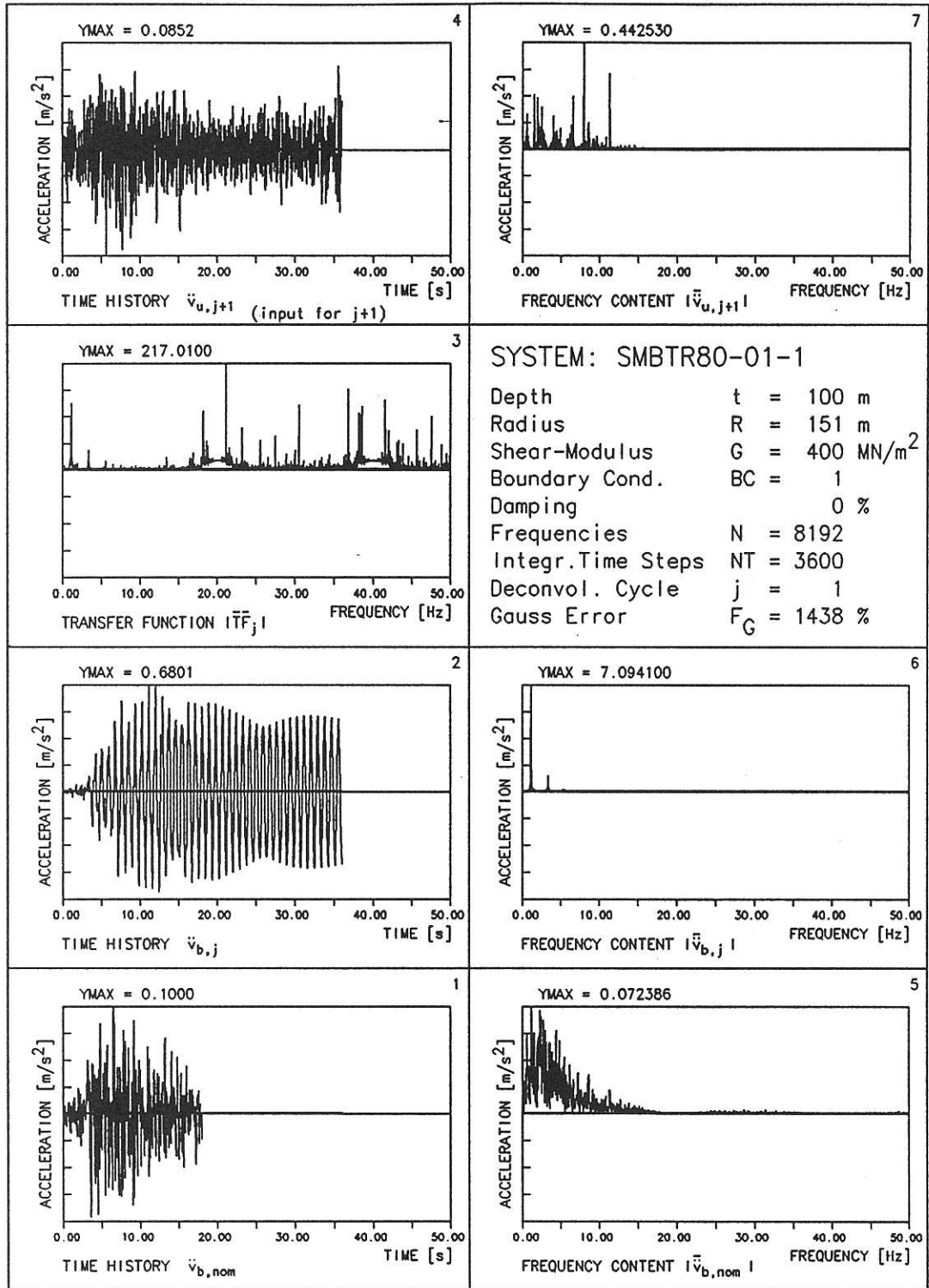


Abb.: 17 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden ohne Daempfung; Zyklus=1



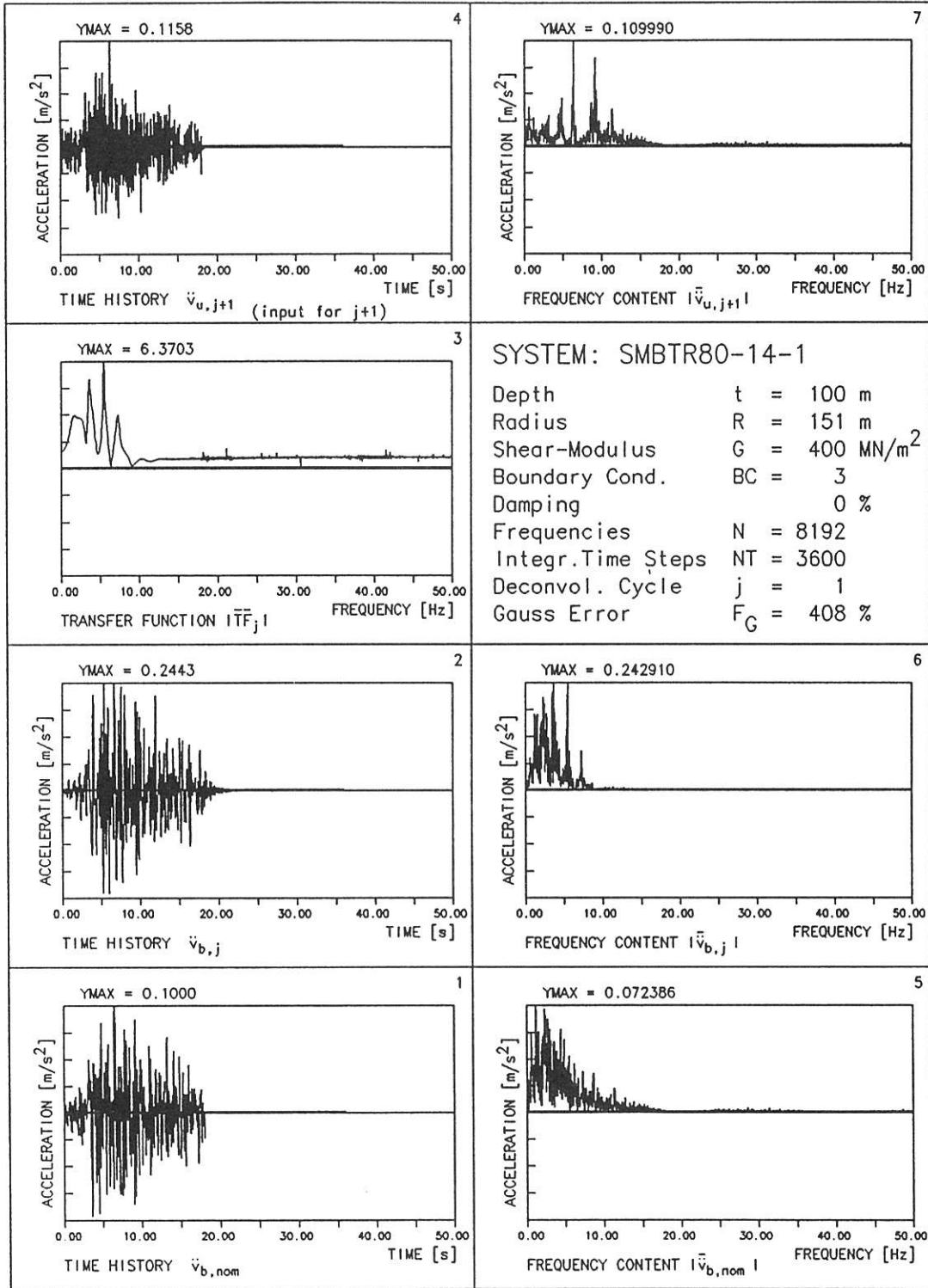


Abb.: 18 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden ohne Daempfung; Zyklus=1

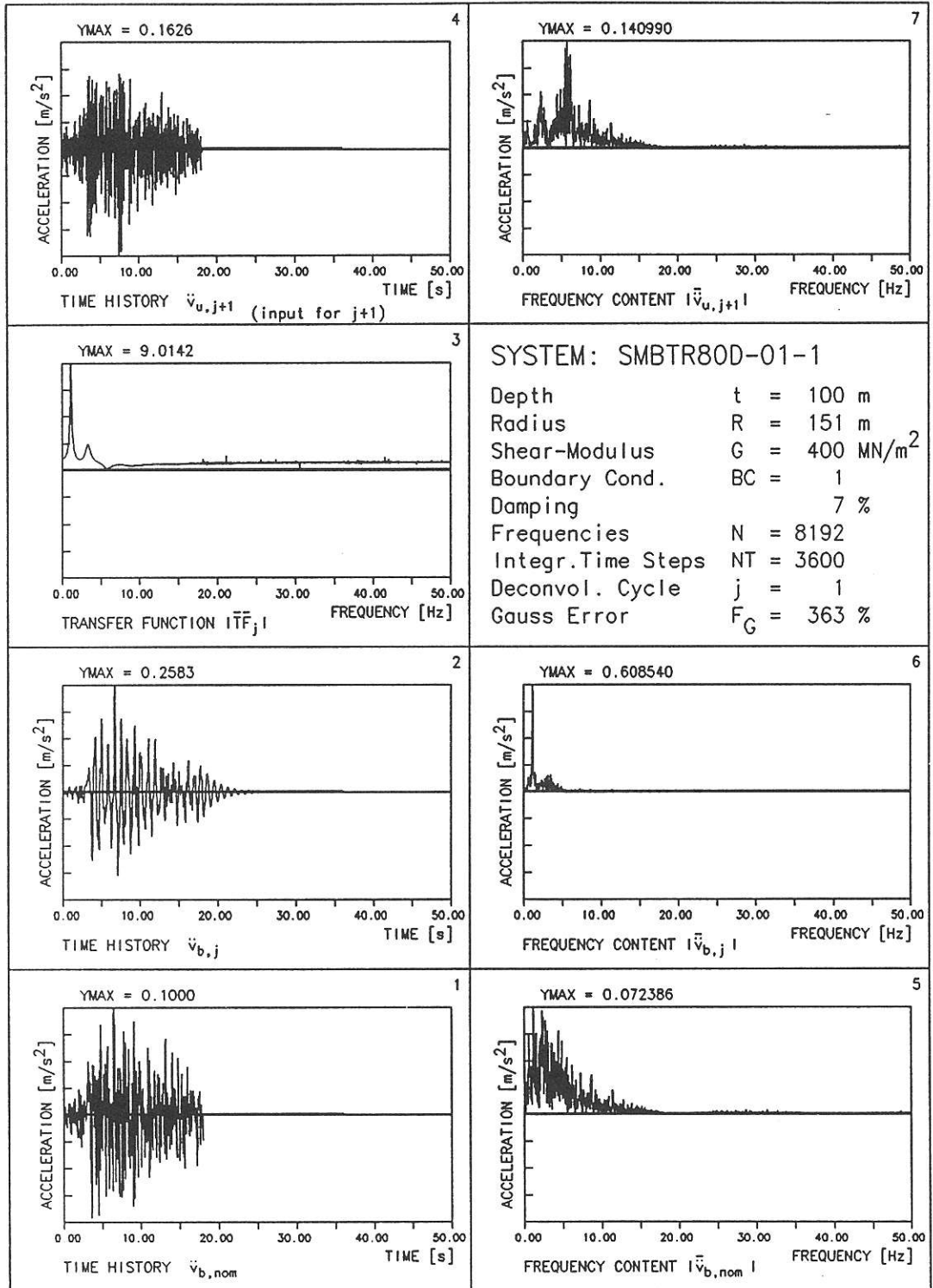


Abb.: 19 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=1

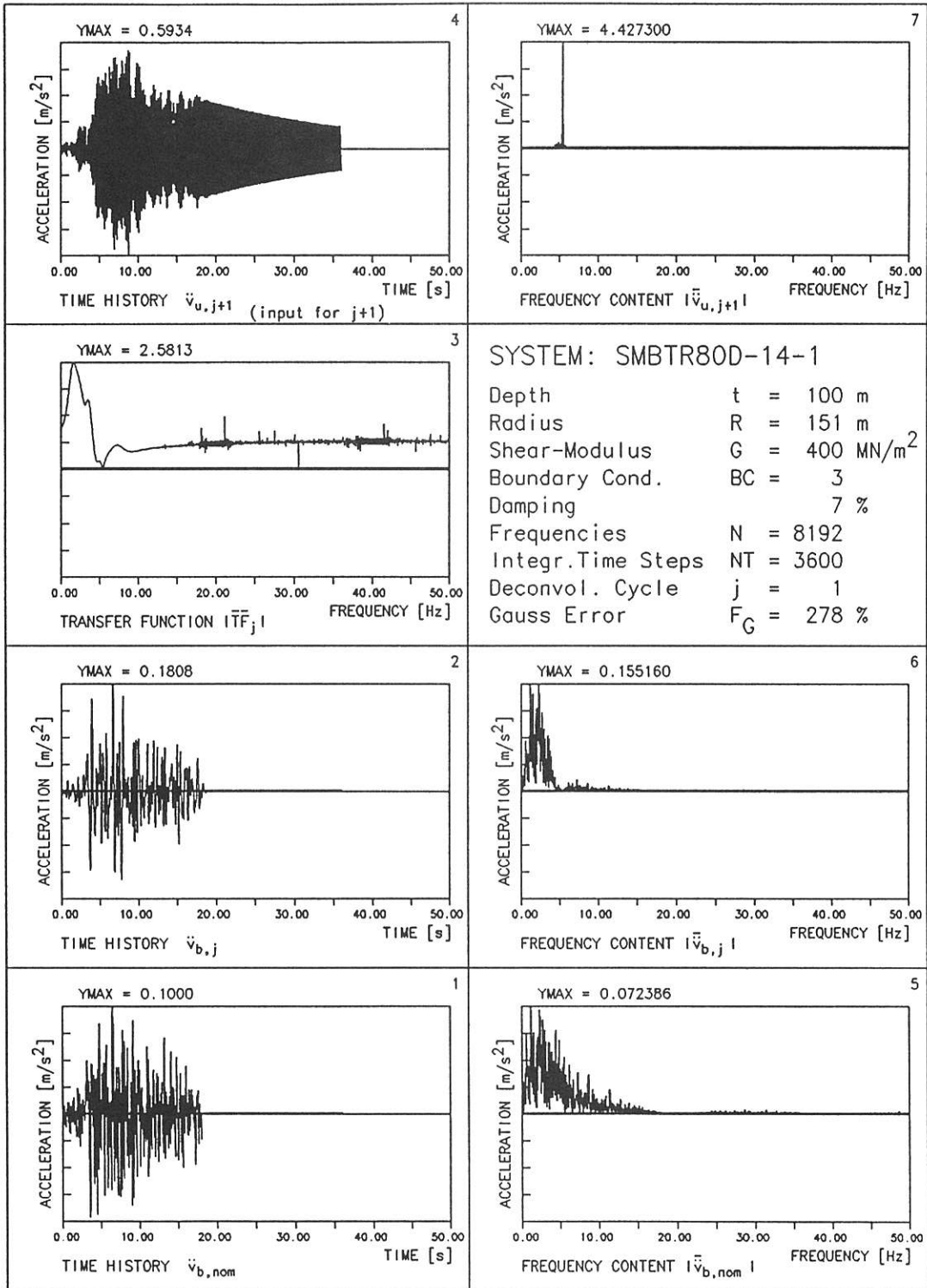


Abb.: 20 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=1

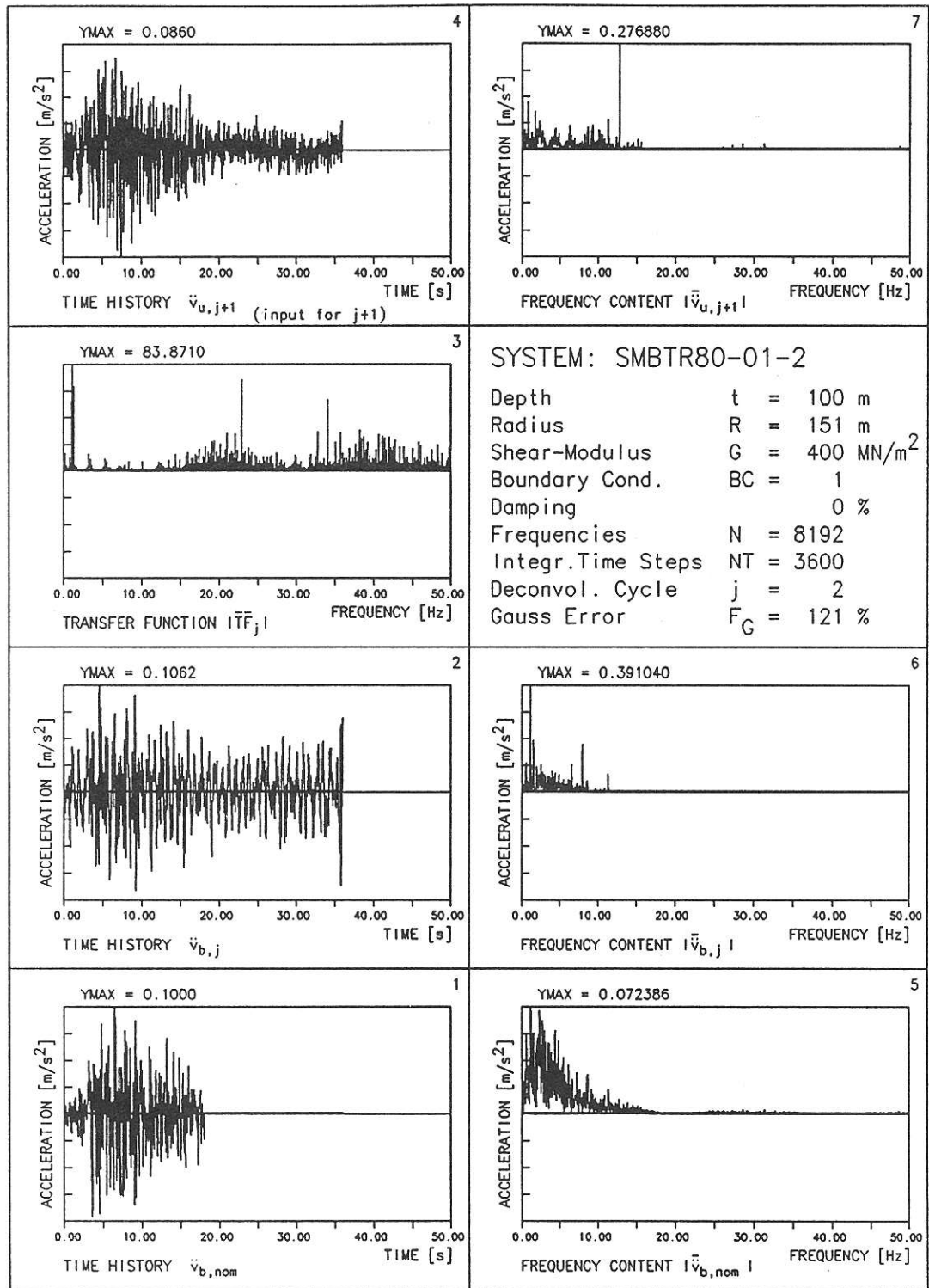


Abb.: 21 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden ohne Daempfung; Zyklus=2

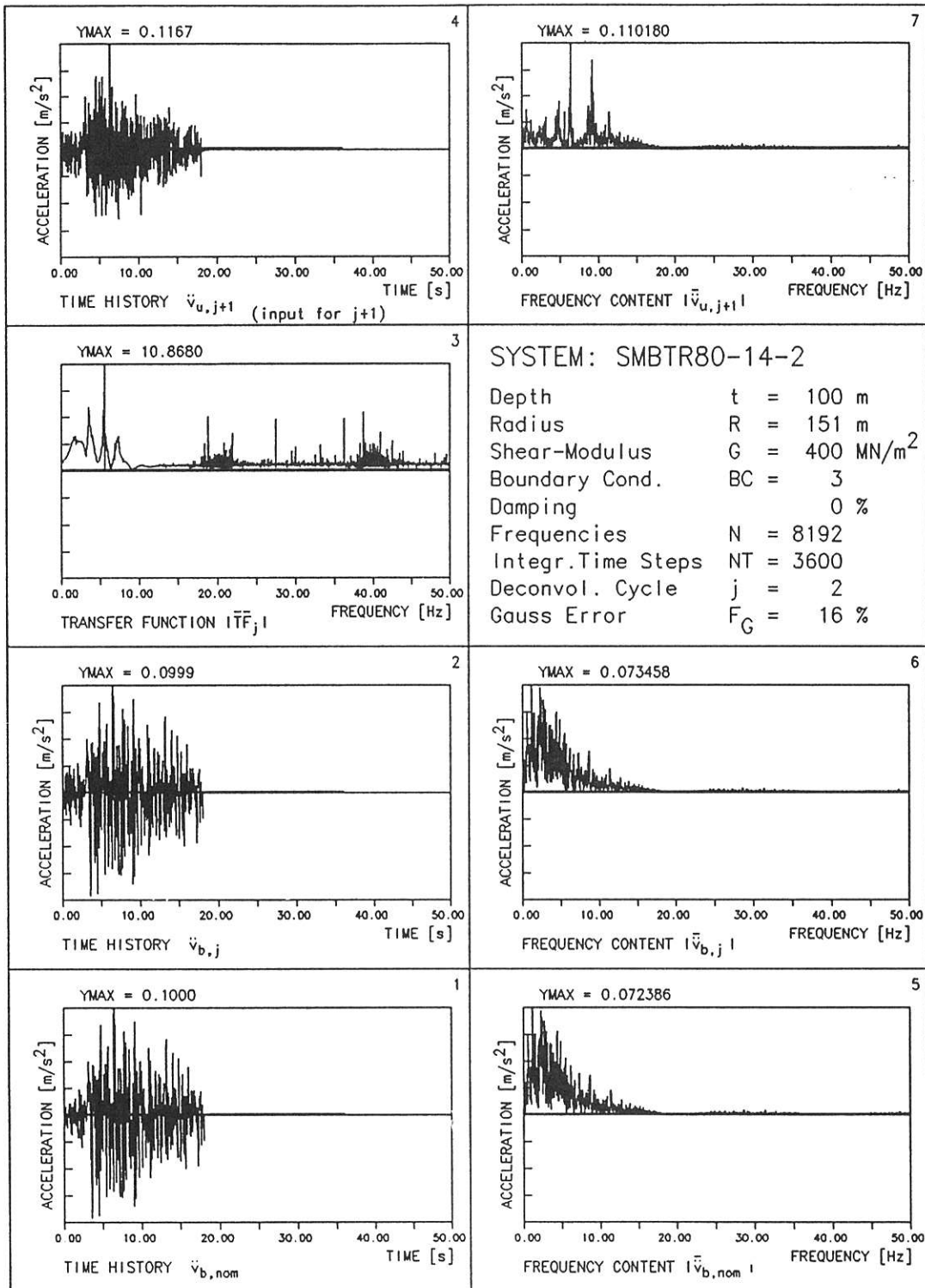


Abb.: 22 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden ohne Daempfung; Zyklus=2

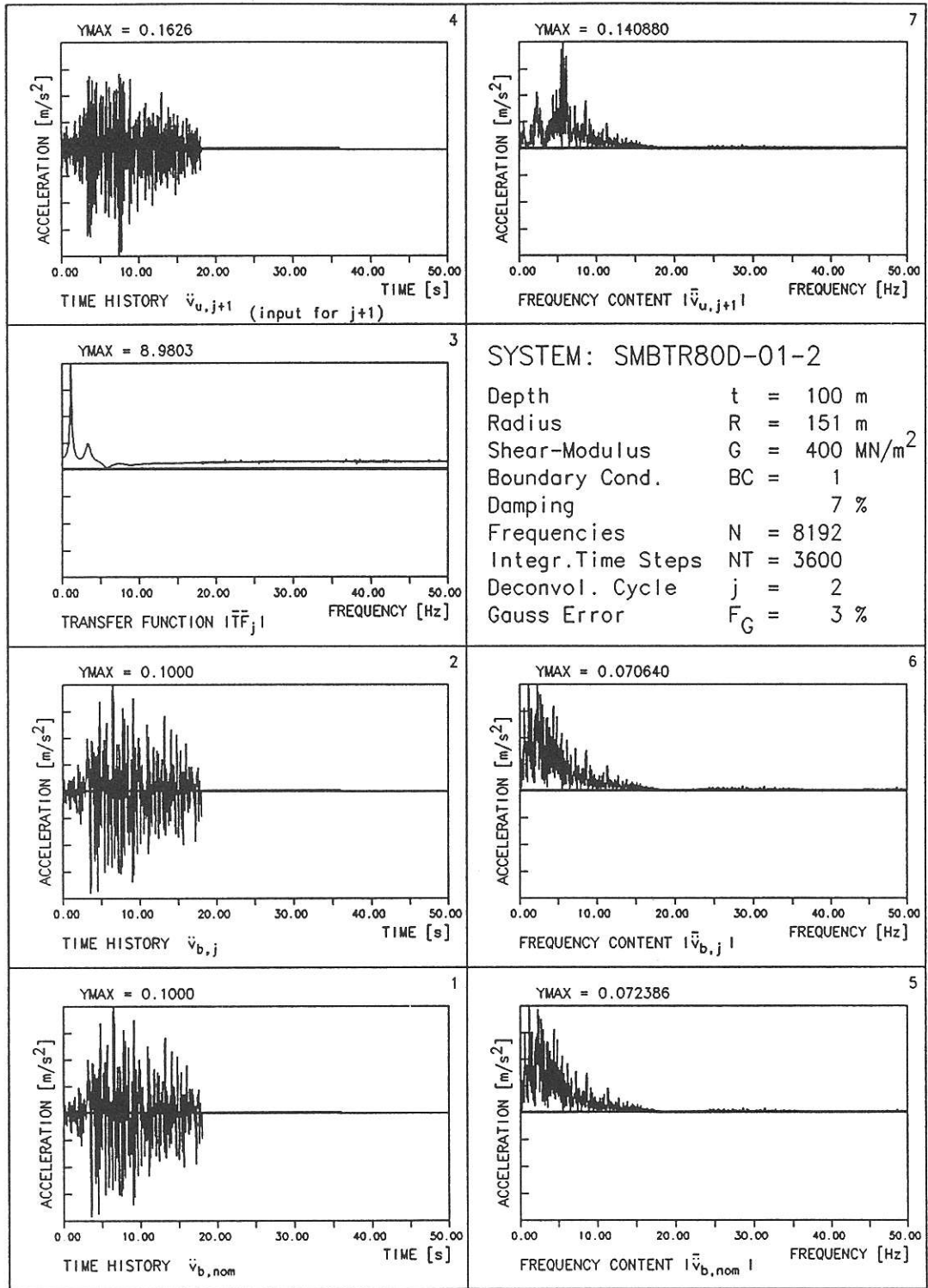


Abb.: 23 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=2



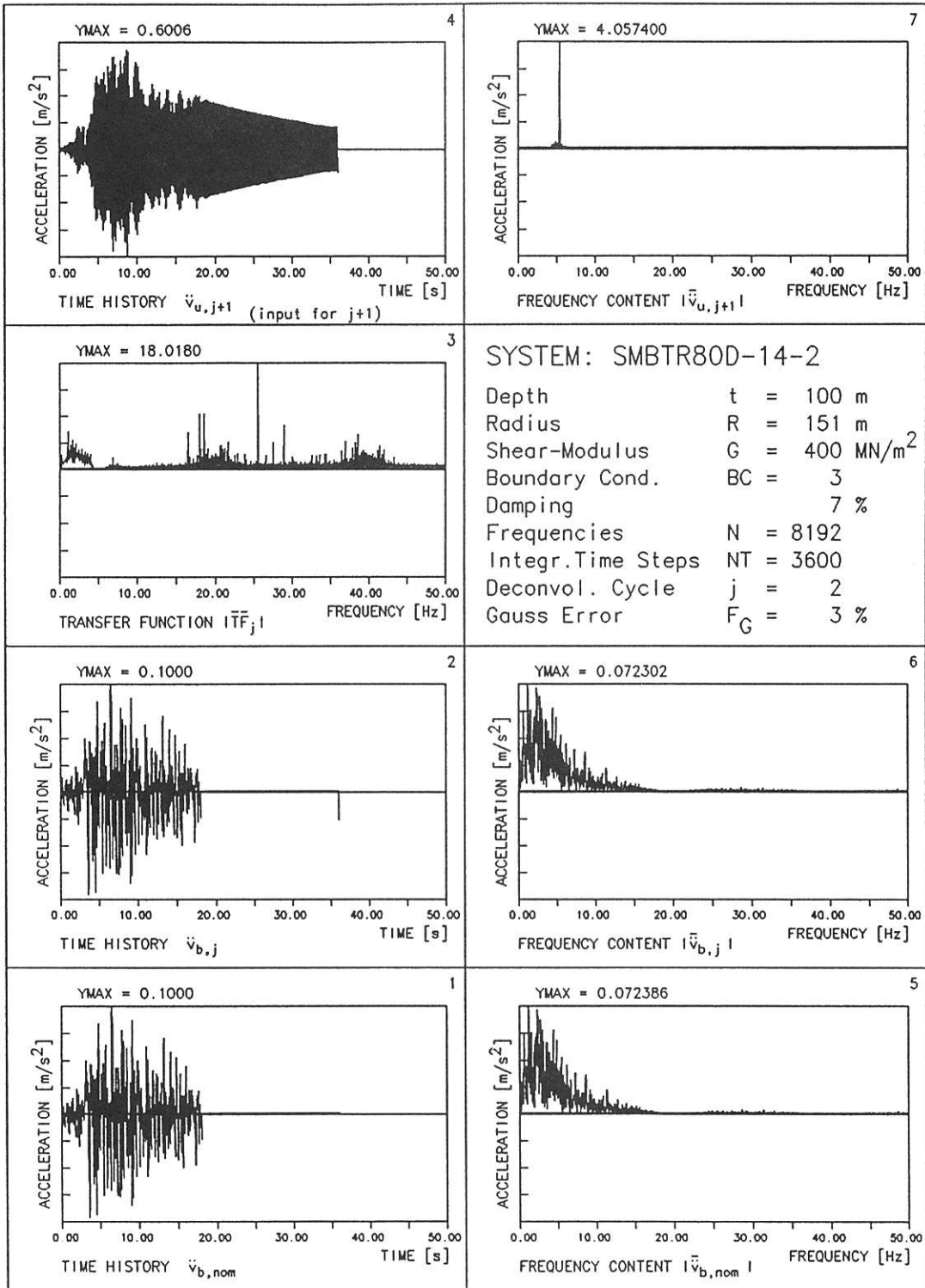


Abb.: 24 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=2

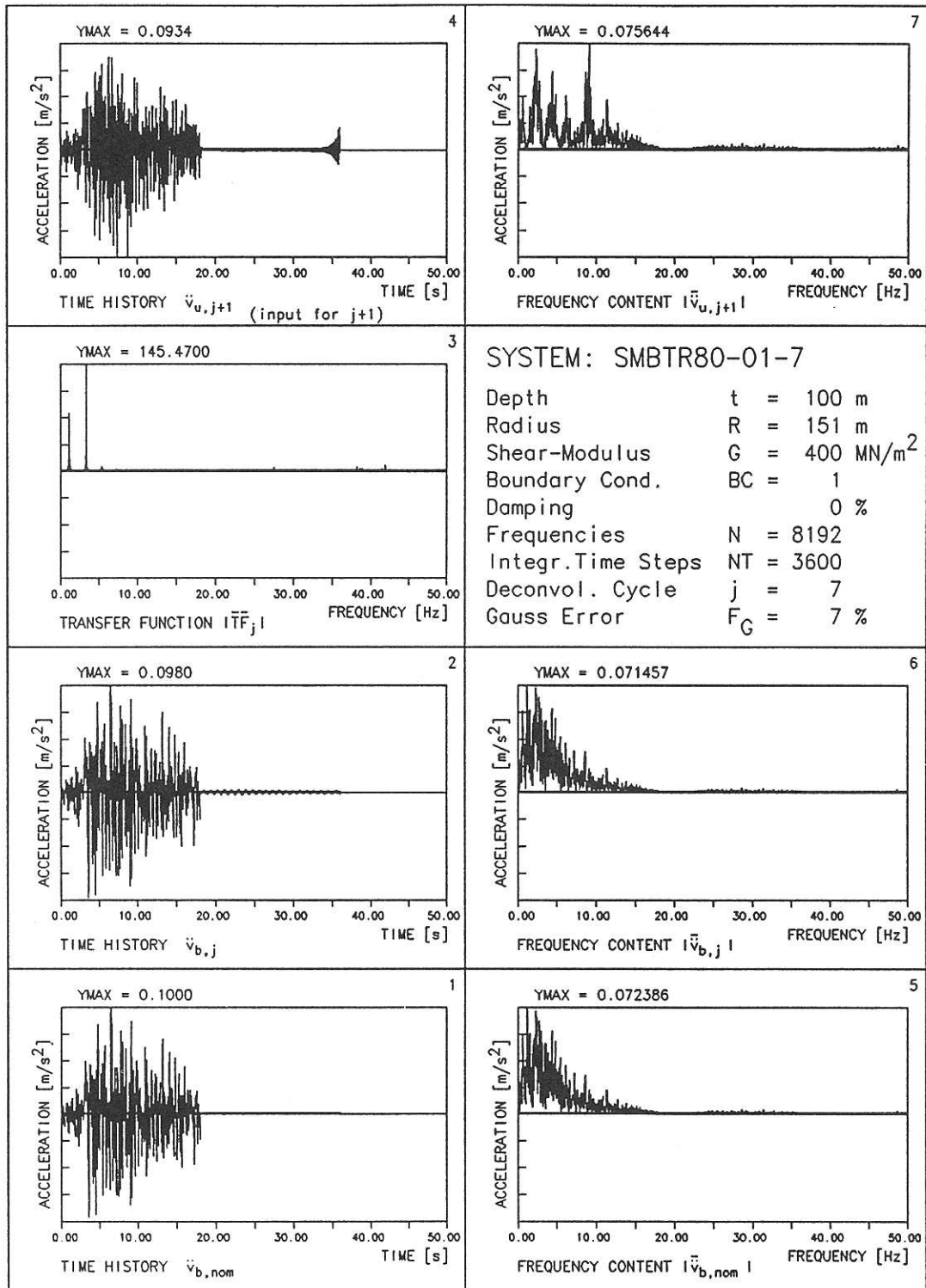


Abb.: 25 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden ohne Daempfung; Zyklus=7

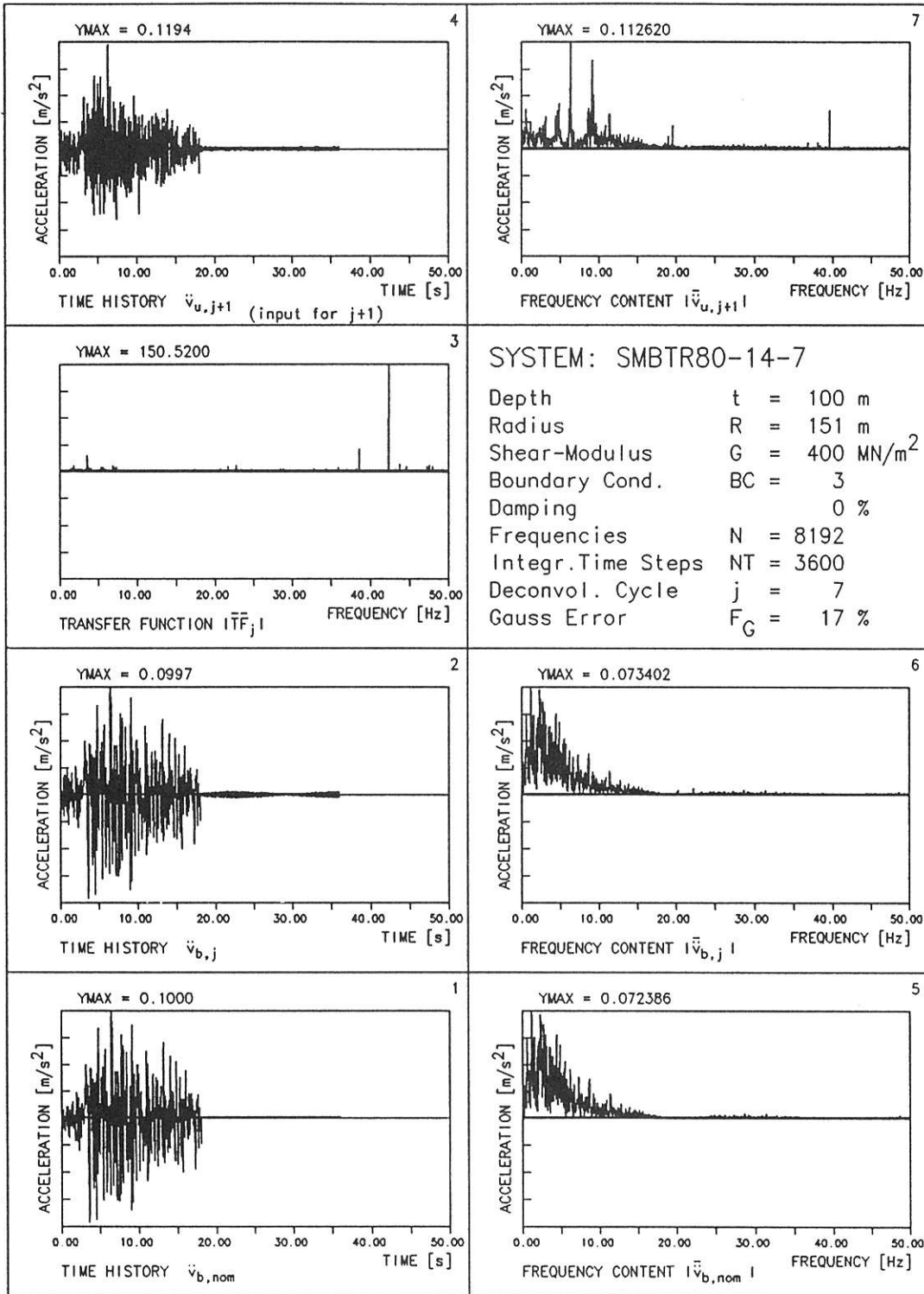


Abb.: 26 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden ohne Daempfung; Zyklus=7

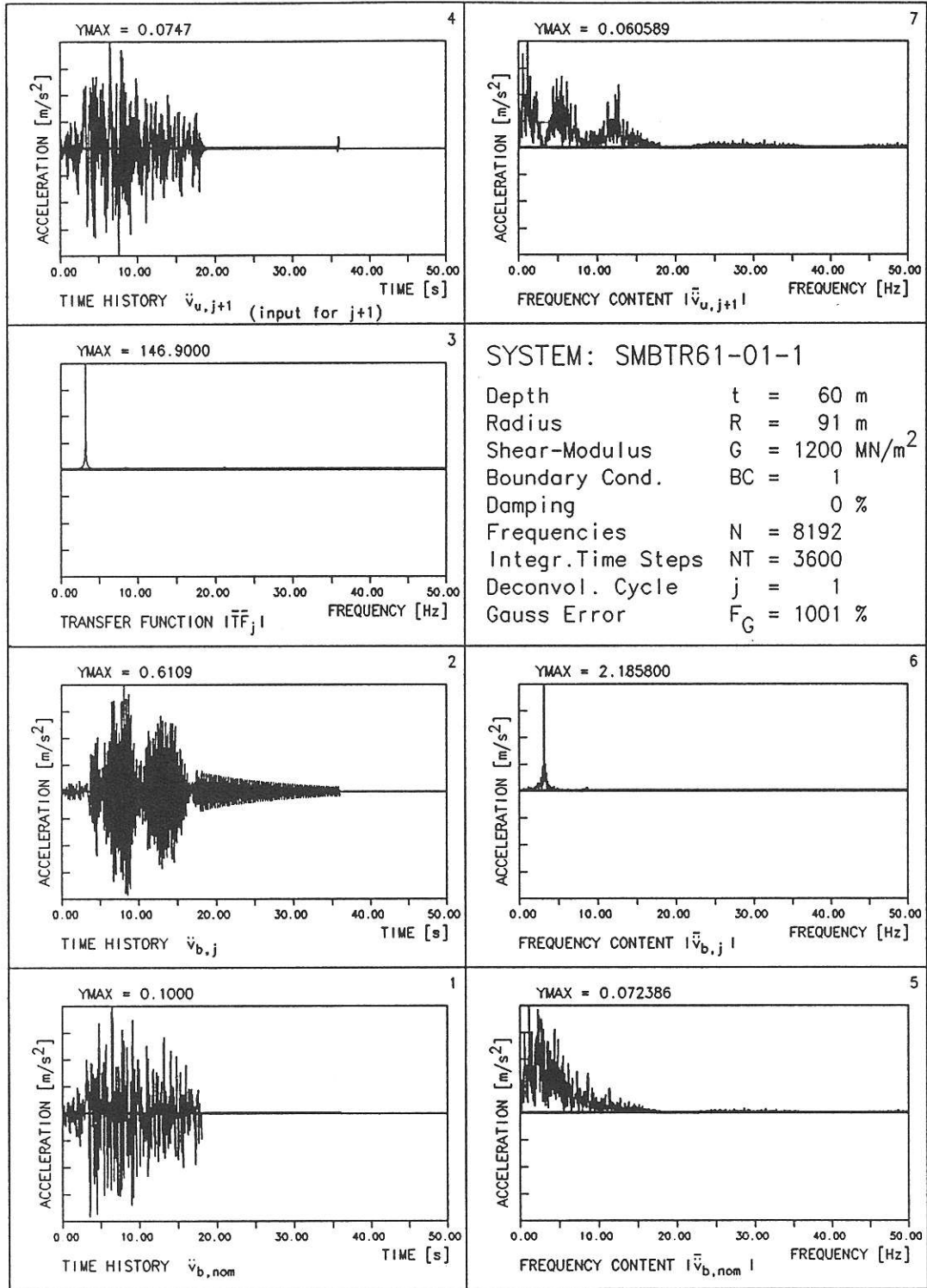


Abb.: 27 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher,steifer Boden ohne Daempfung; Zyklus=1

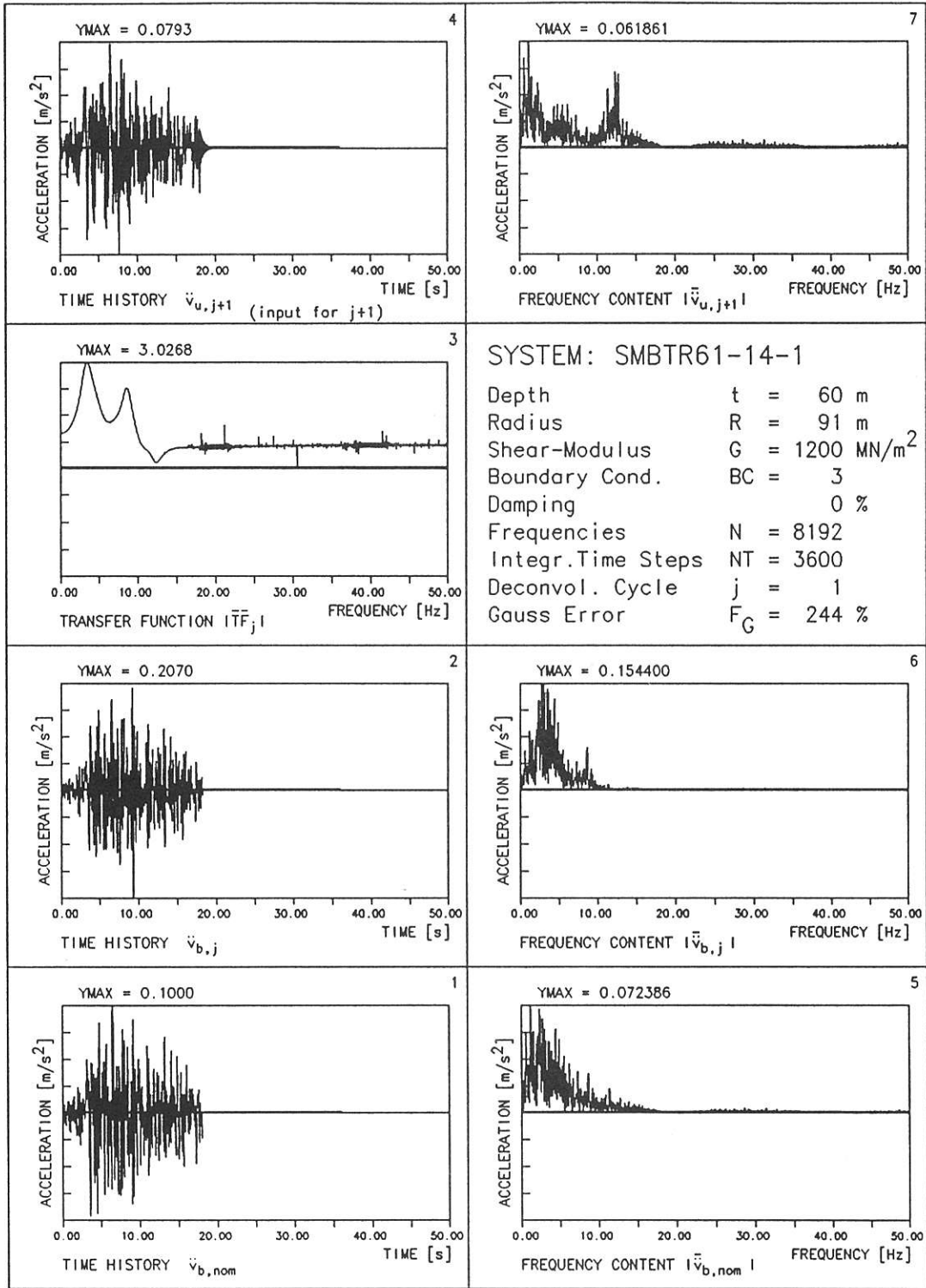


Abb.: 28 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher,steifer Boden ohne Daempfung; Zyklus=1

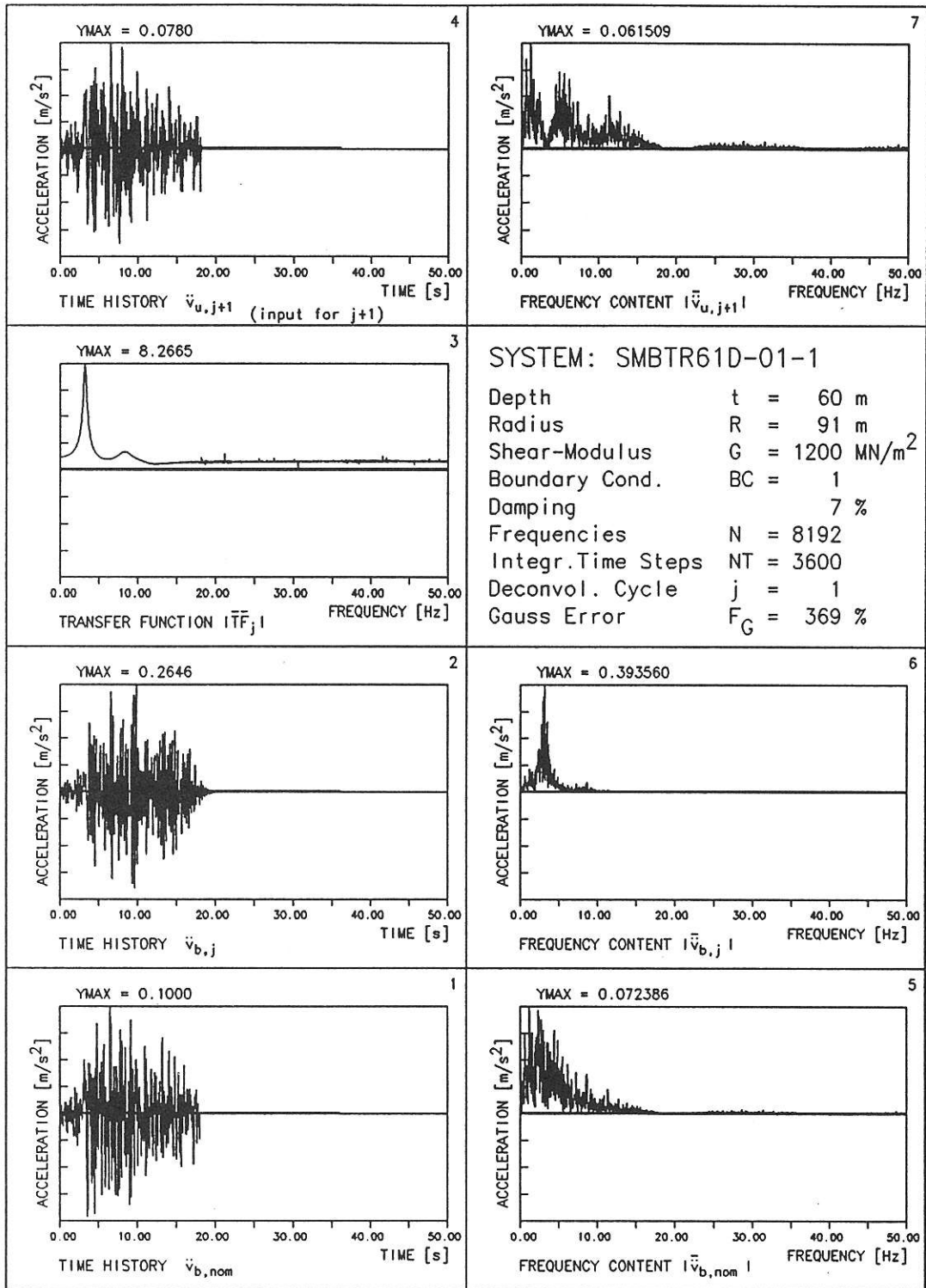


Abb.: 29 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher, steifer Boden mit Daempfung; Zyklus=1



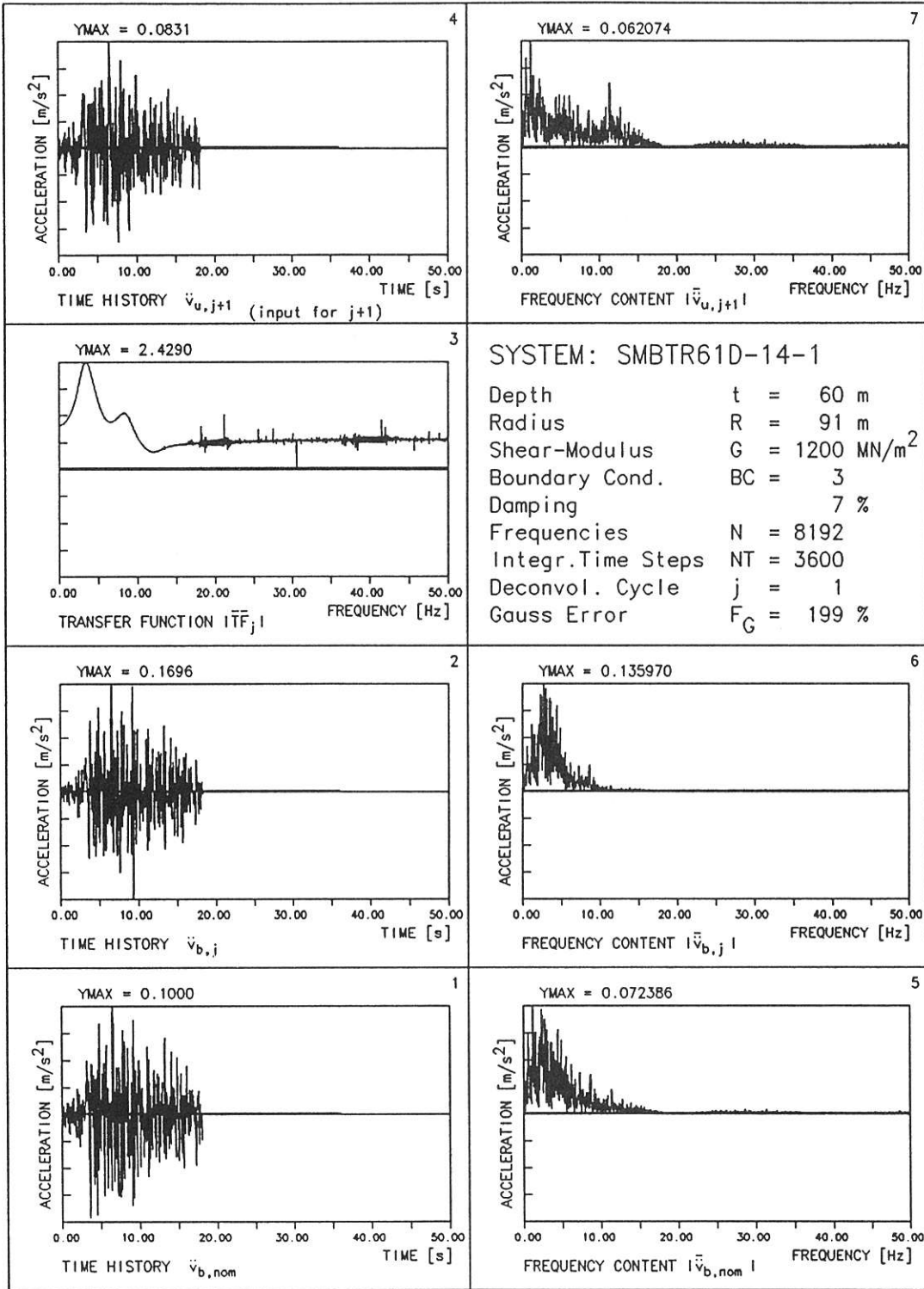


Abb.: 30 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher,steifer Boden mit Daempfung; Zyklus=1

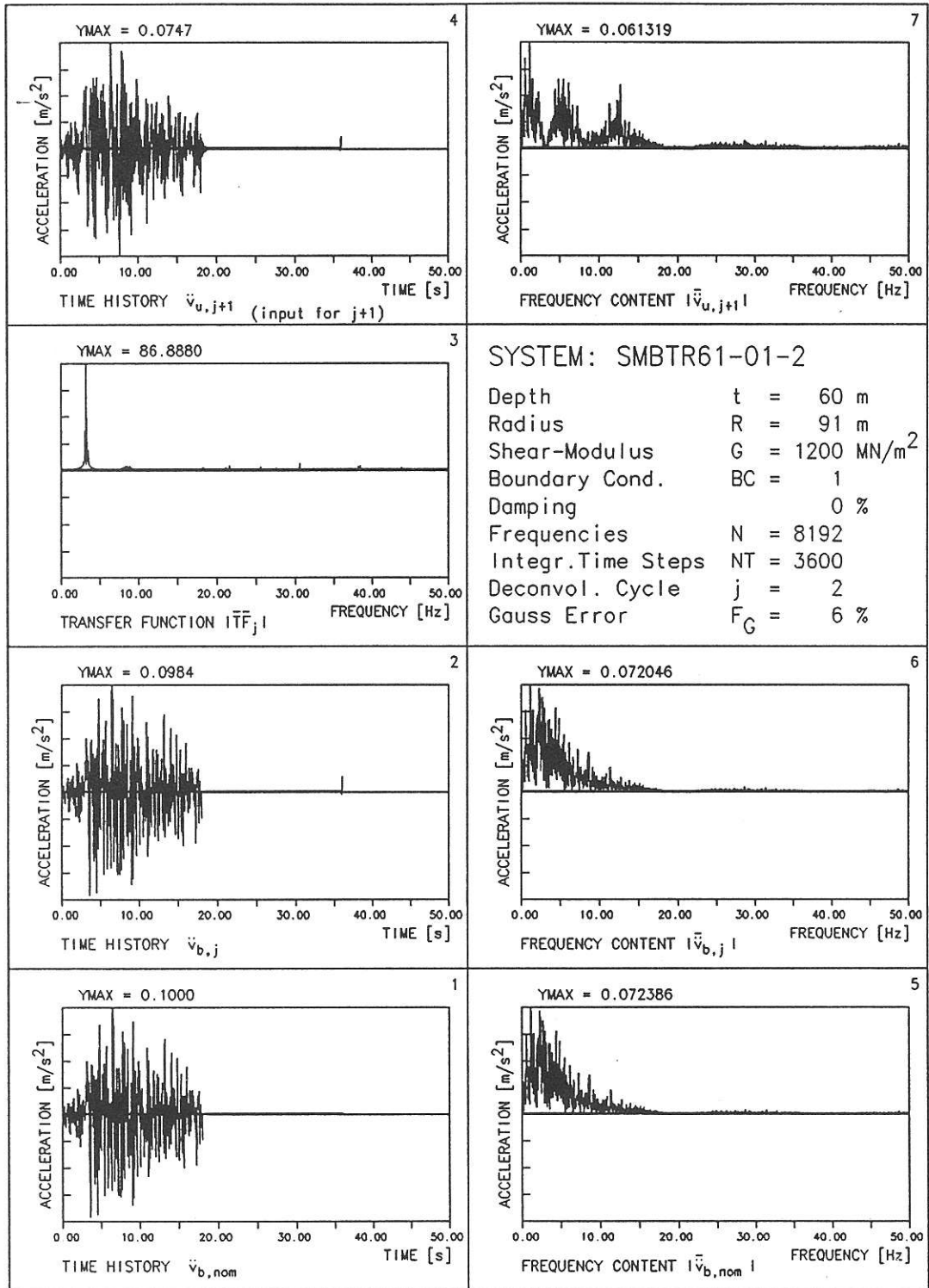


Abb.: 31 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher,steifer Boden ohne Daempfung; Zyklus=2

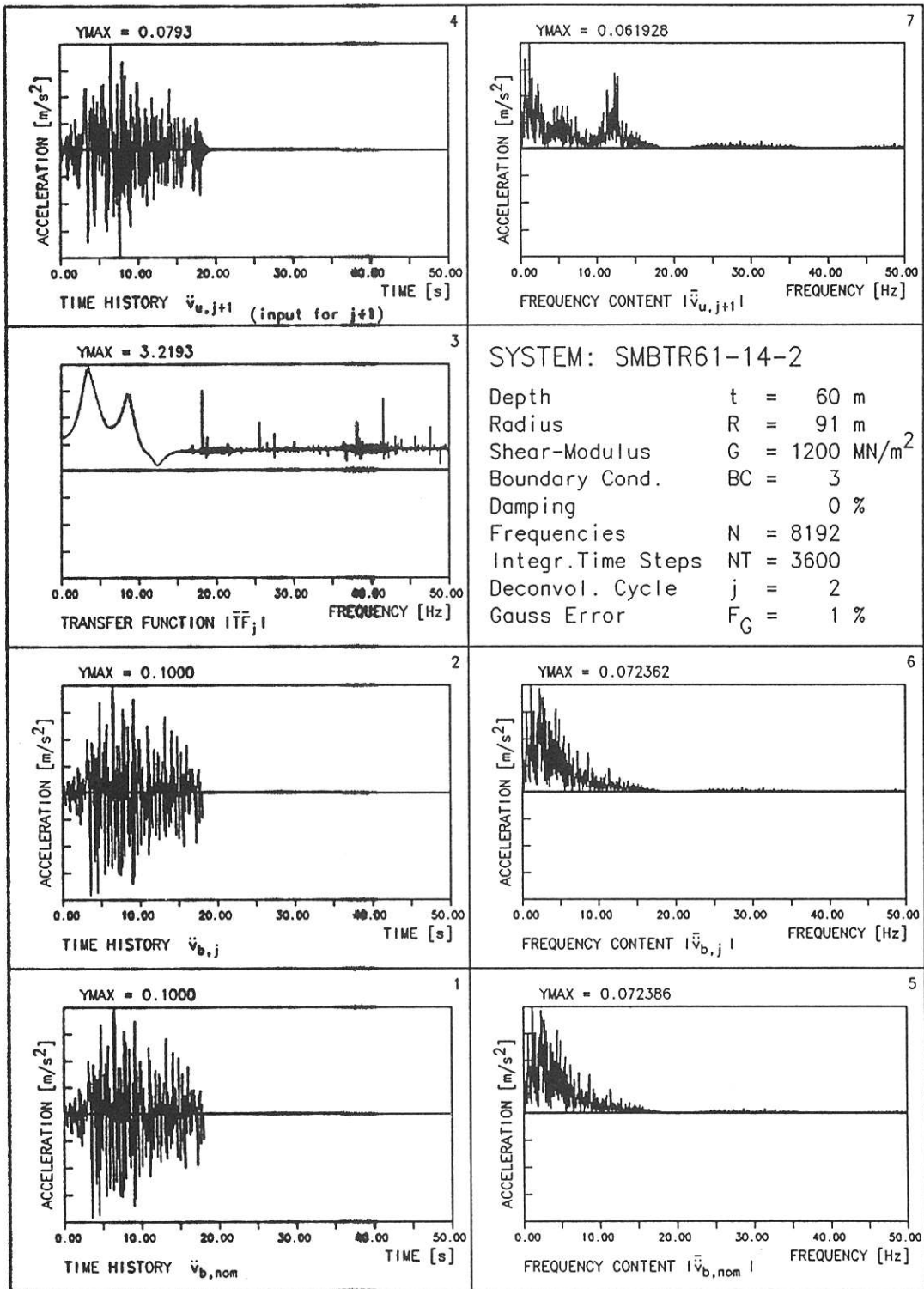


Abb.: 32 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher, steifer Boden ohne Daempfung; Zyklus=2

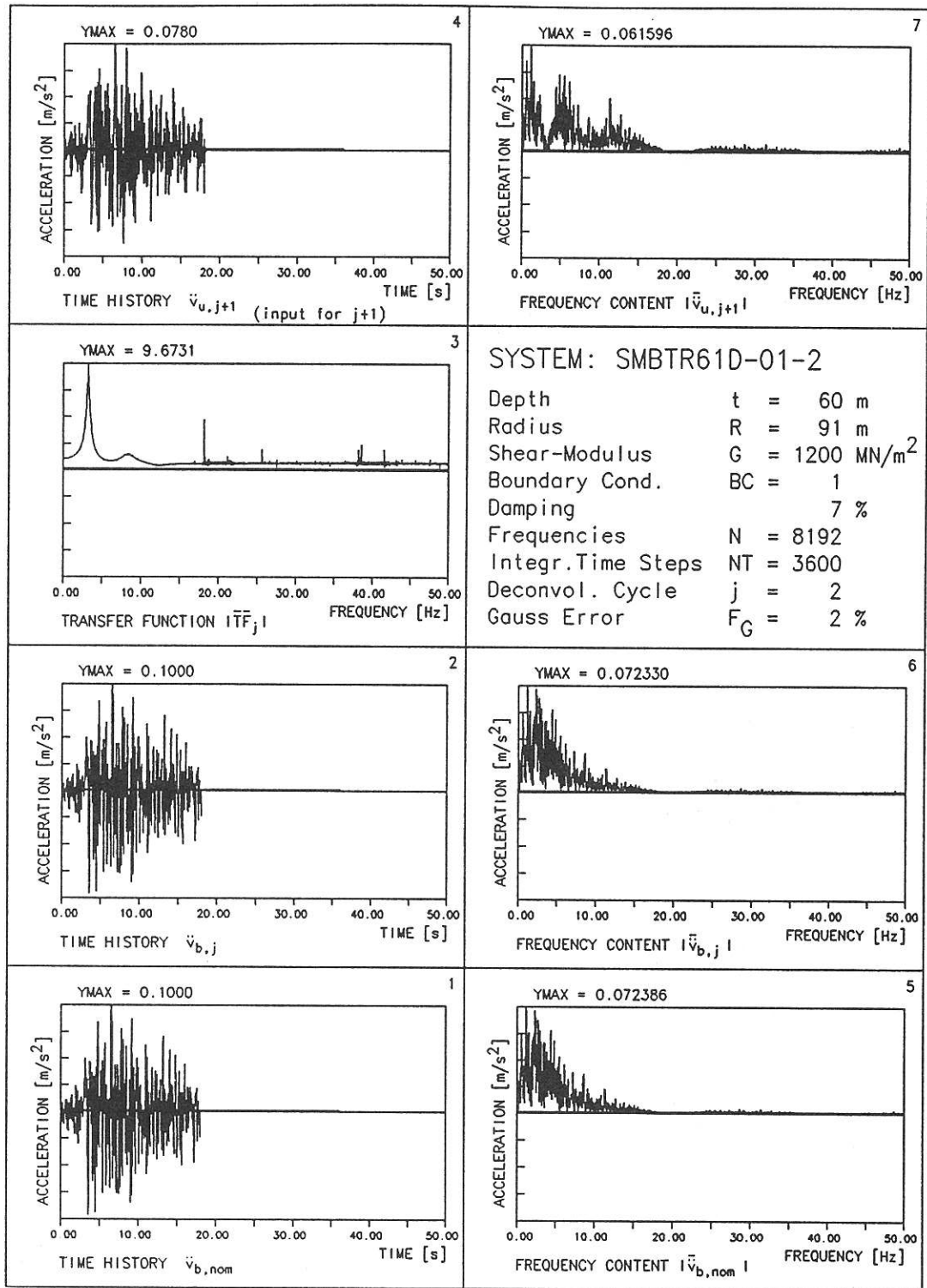


Abb.: 33 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher,steifer Boden mit Daempfung; Zyklus=2

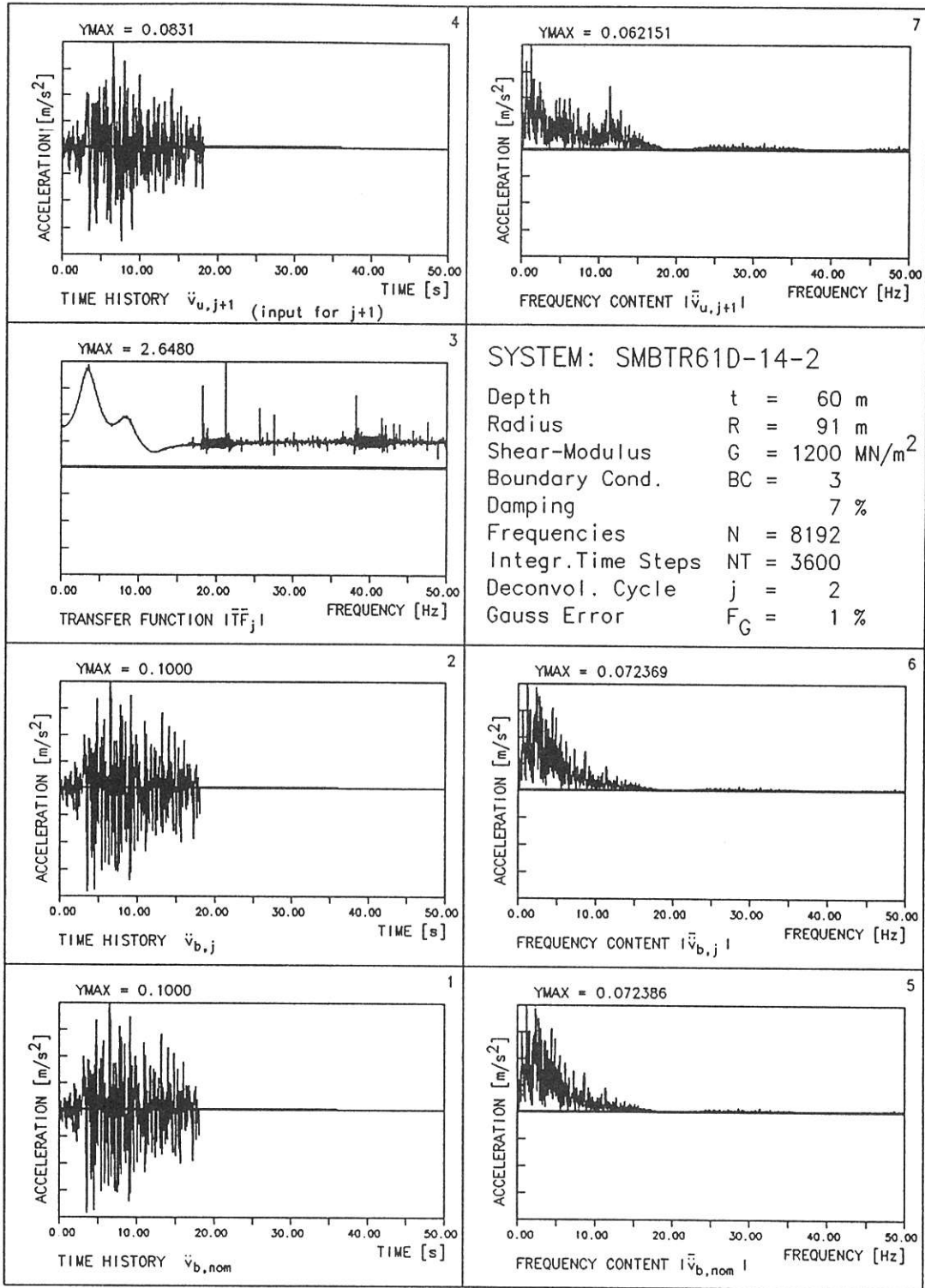


Abb.: 34 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher,steifer Boden mit Daempfung; Zyklus=2

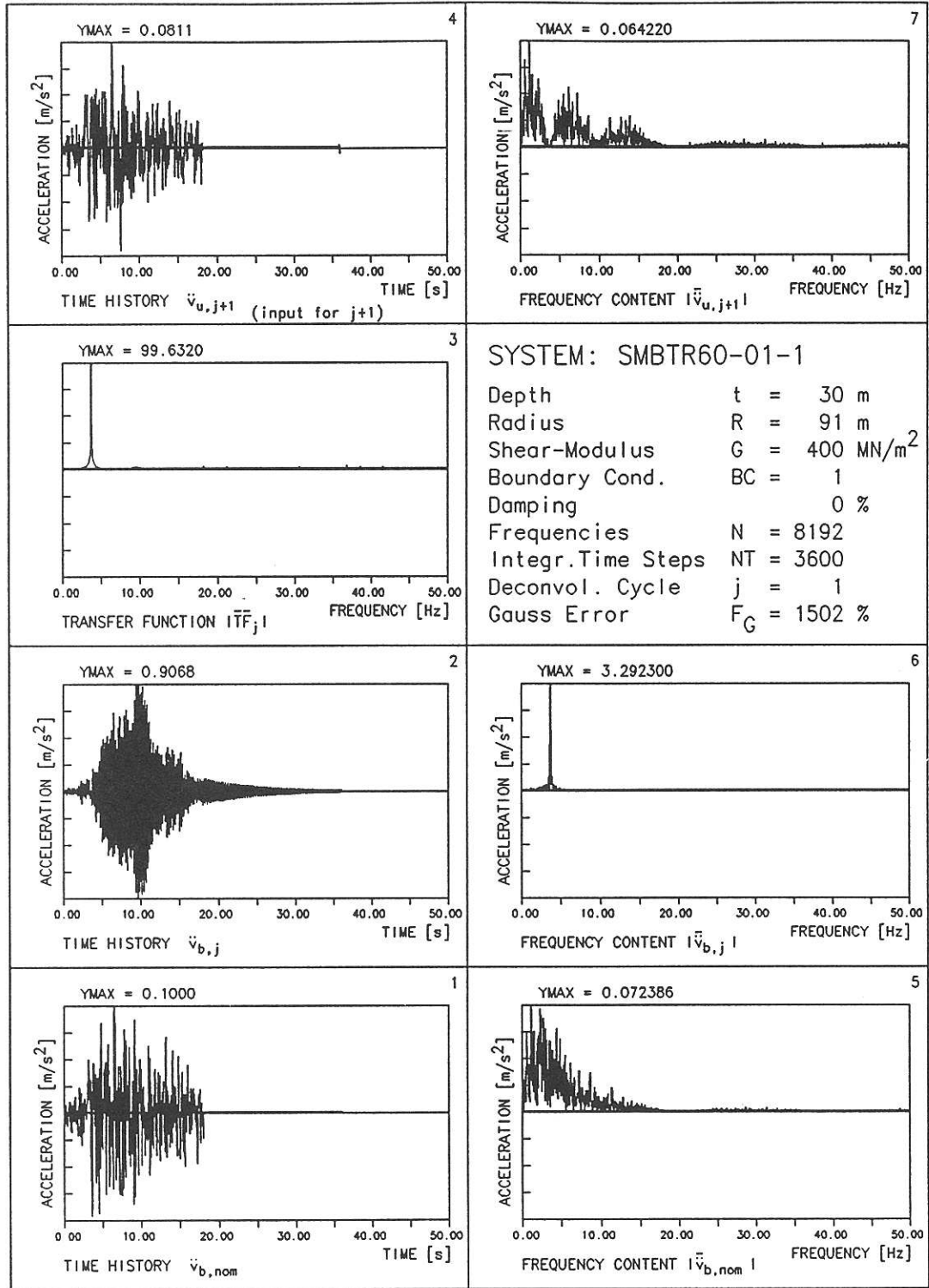


Abb.: 35 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher,weicher Boden ohne Daempfung; Zyklus=1

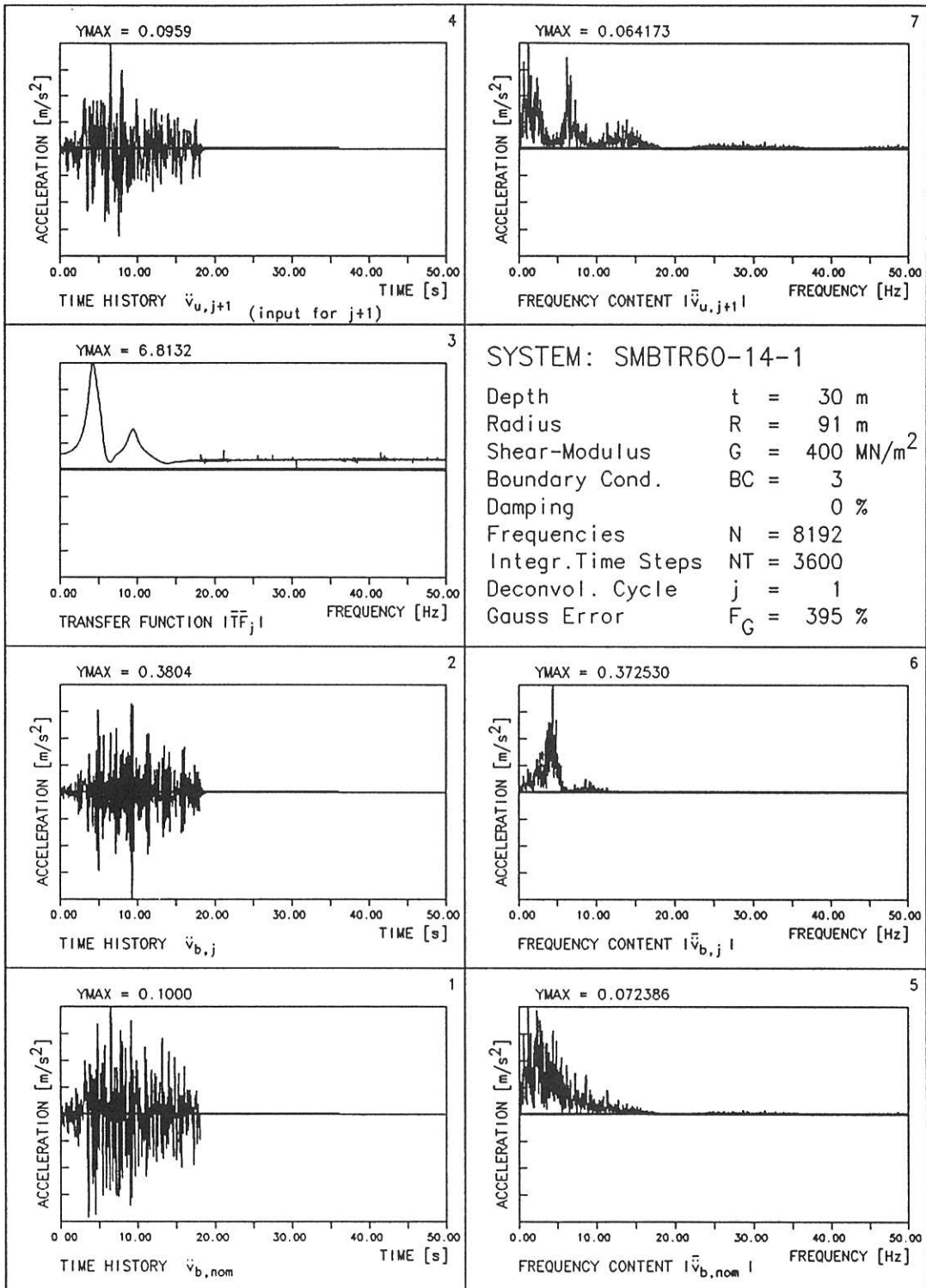


Abb.: 36 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher,weicher Boden ohne Daempfung; Zyklus=1



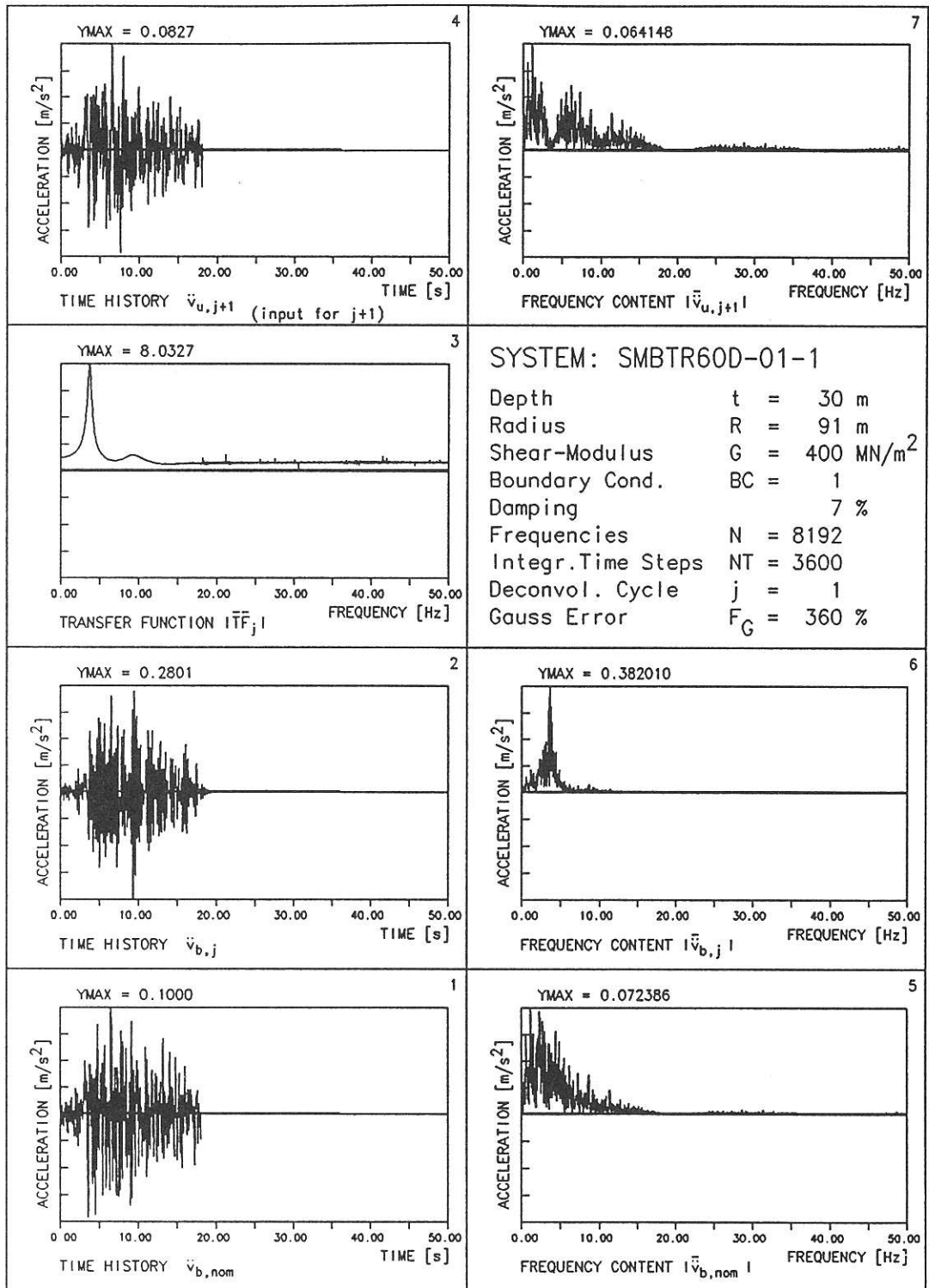


Abb.: 37 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher,weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=1

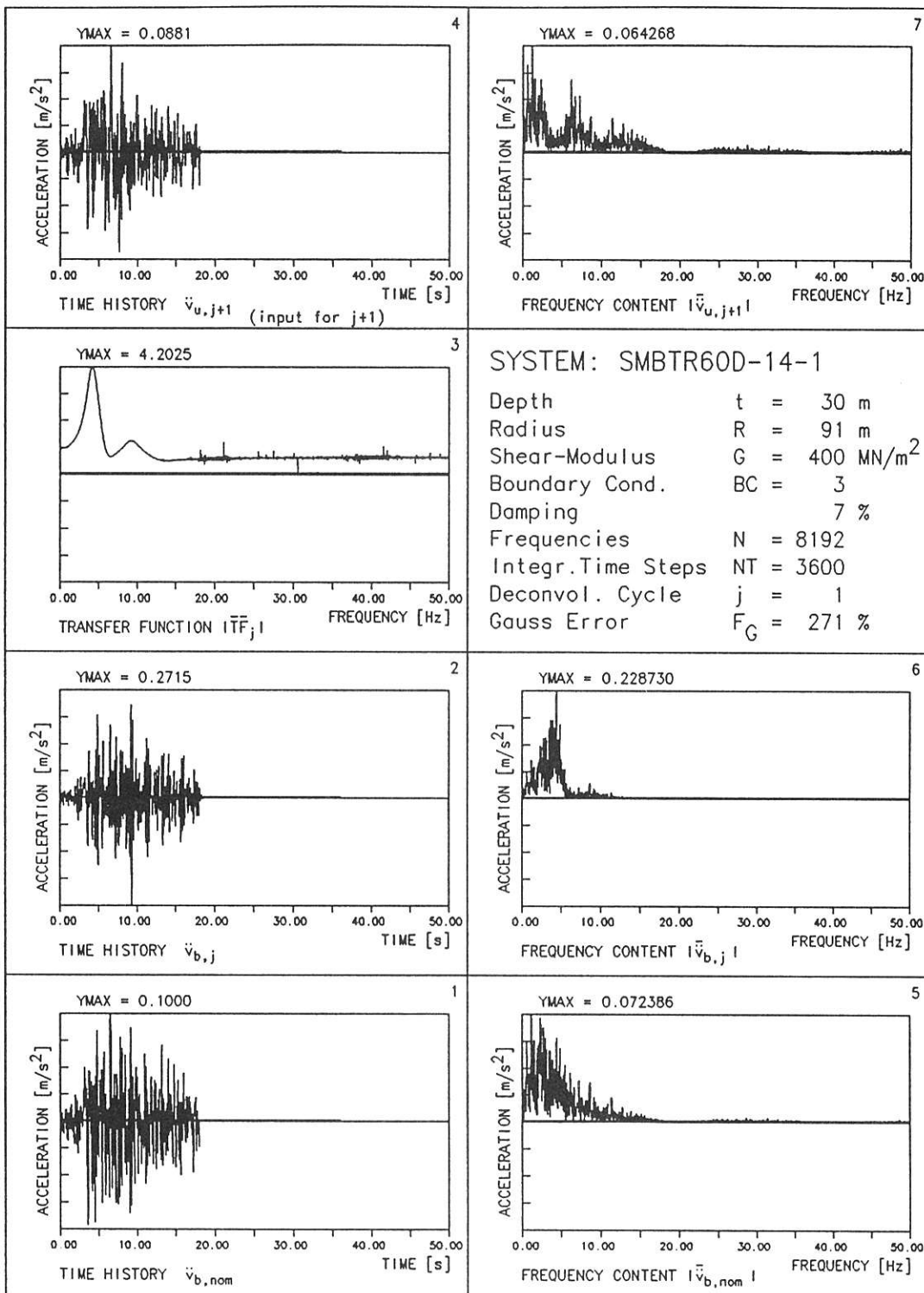


Abb.: 38 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher,weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=1

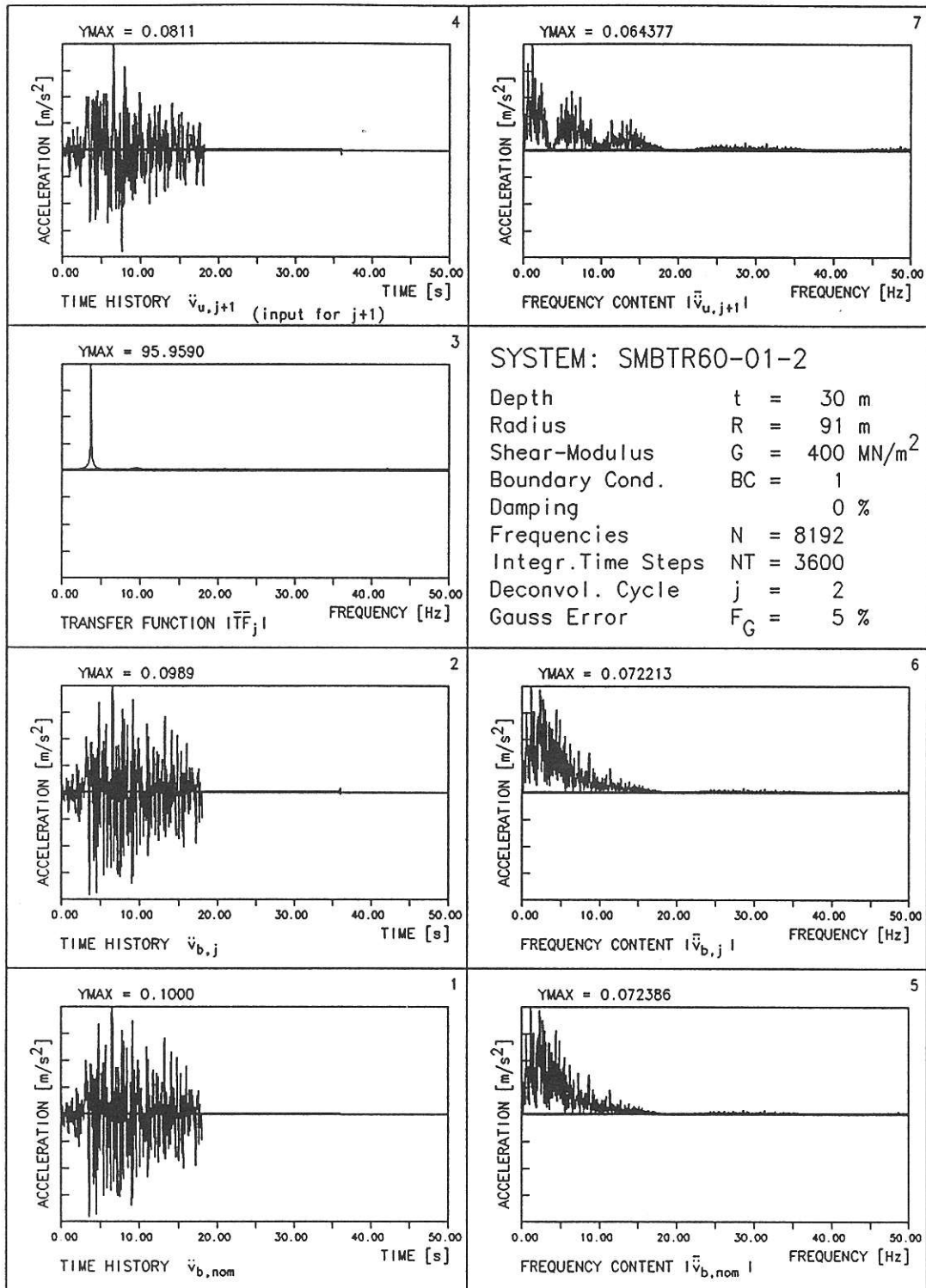


Abb.: 39 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher,weicher Boden ohne Daempfung; Zyklus=2

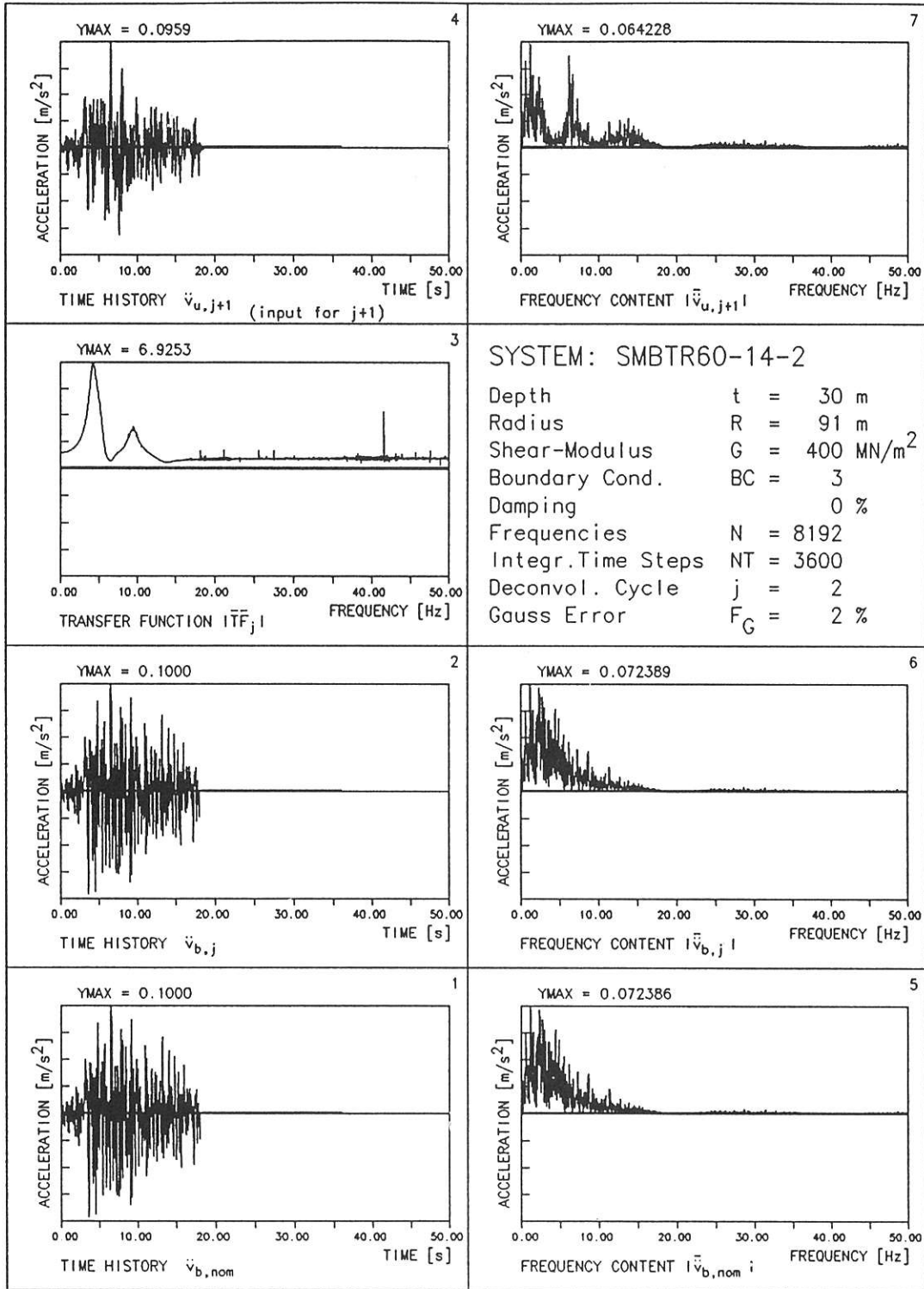


Abb.: 40 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher,weicher Boden ohne Daempfung; Zyklus=2

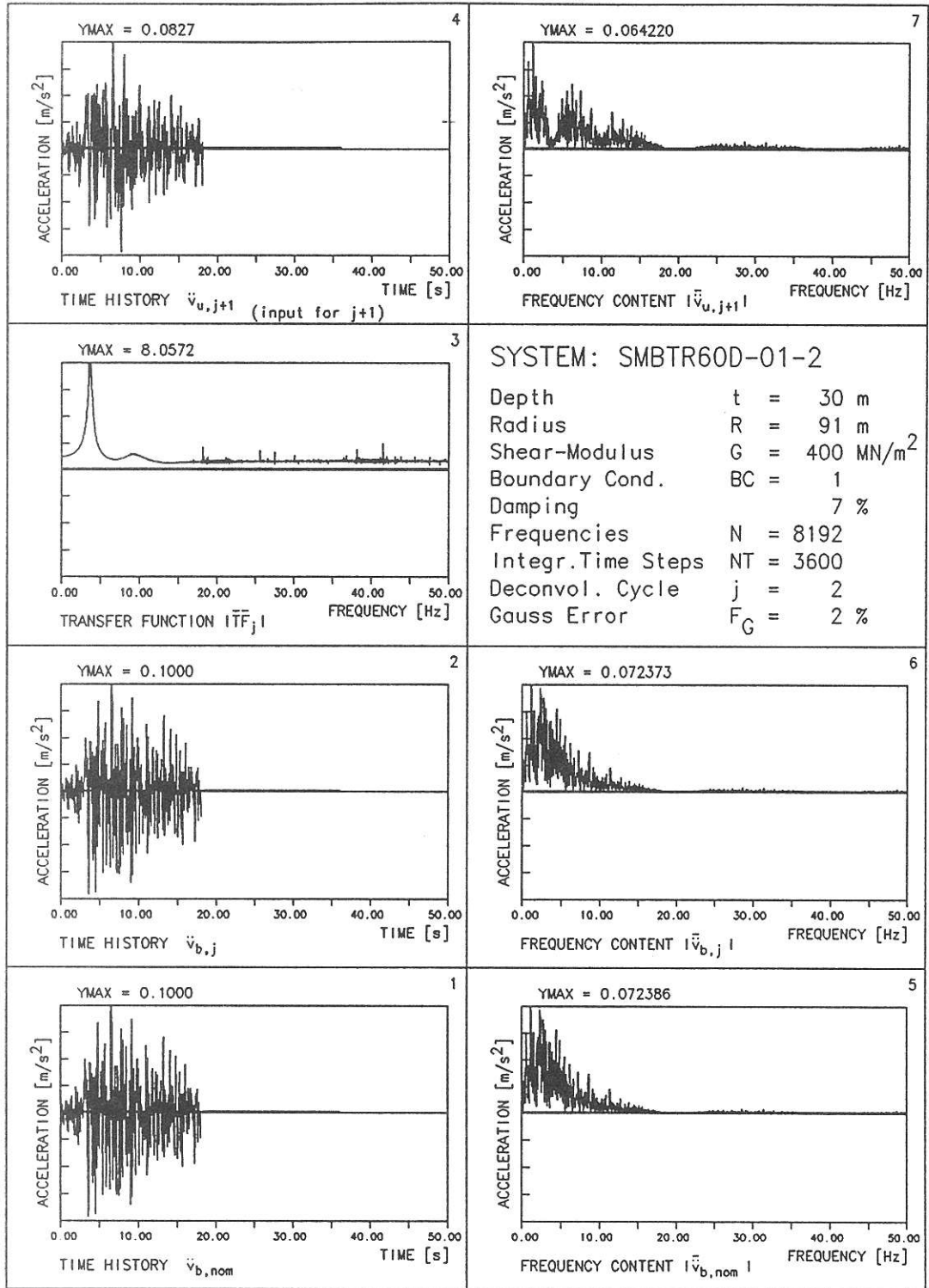


Abb.: 41 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher,weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=2

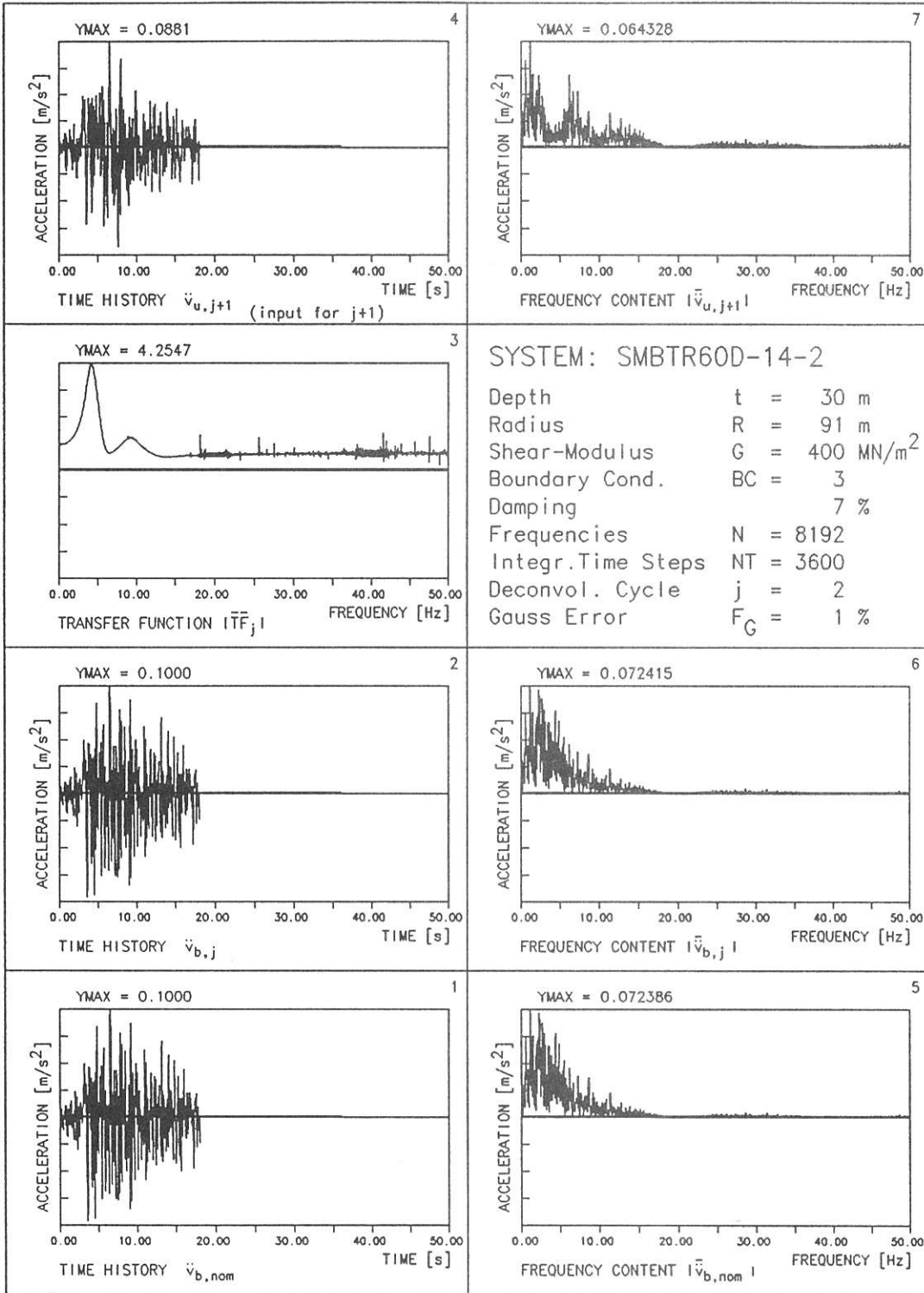


Abb.: 42 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems flacher,weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=2

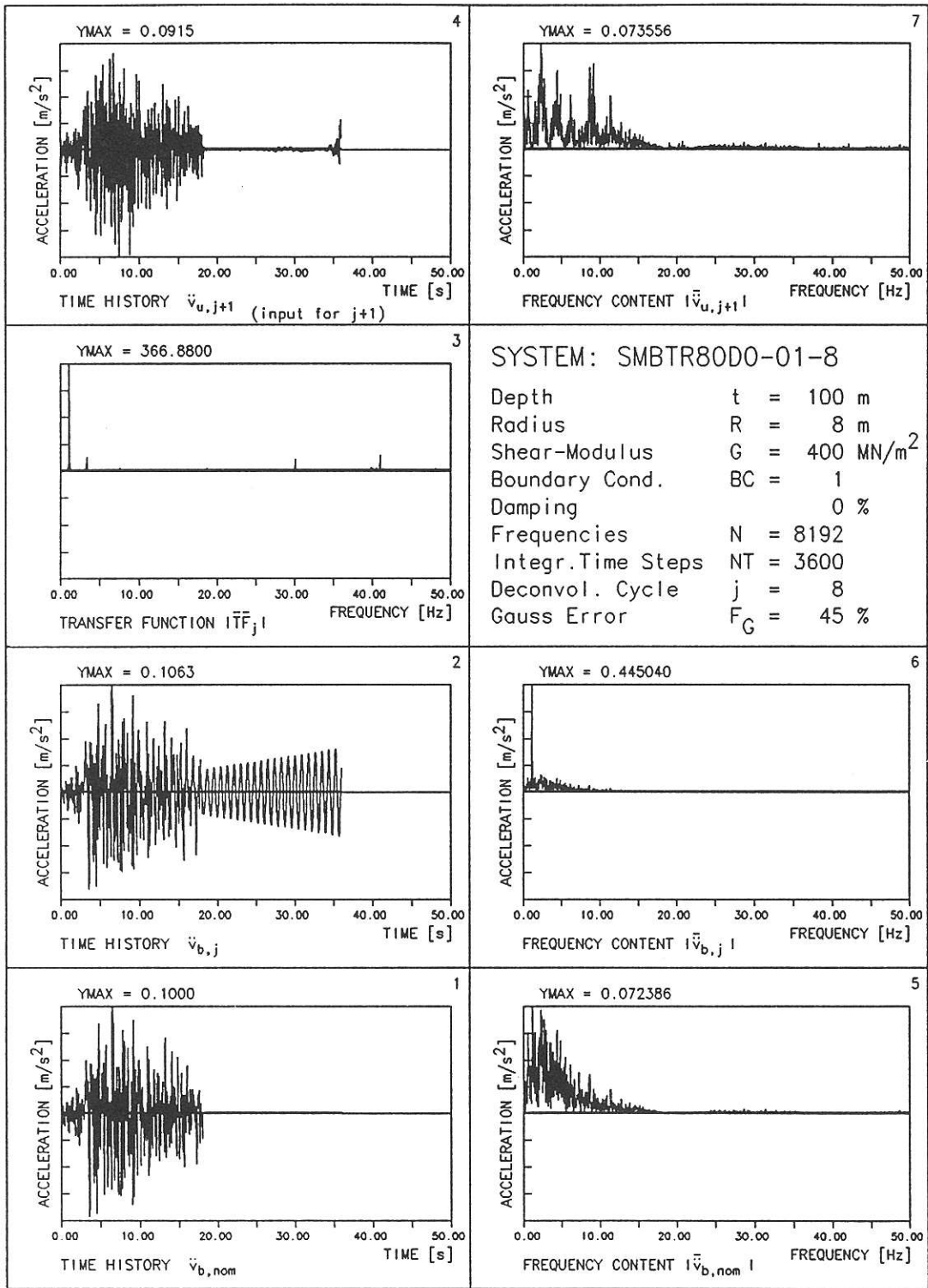


Abb.: 43 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefe, weiche Bodensaule o. Daempfung; Zykl.=8



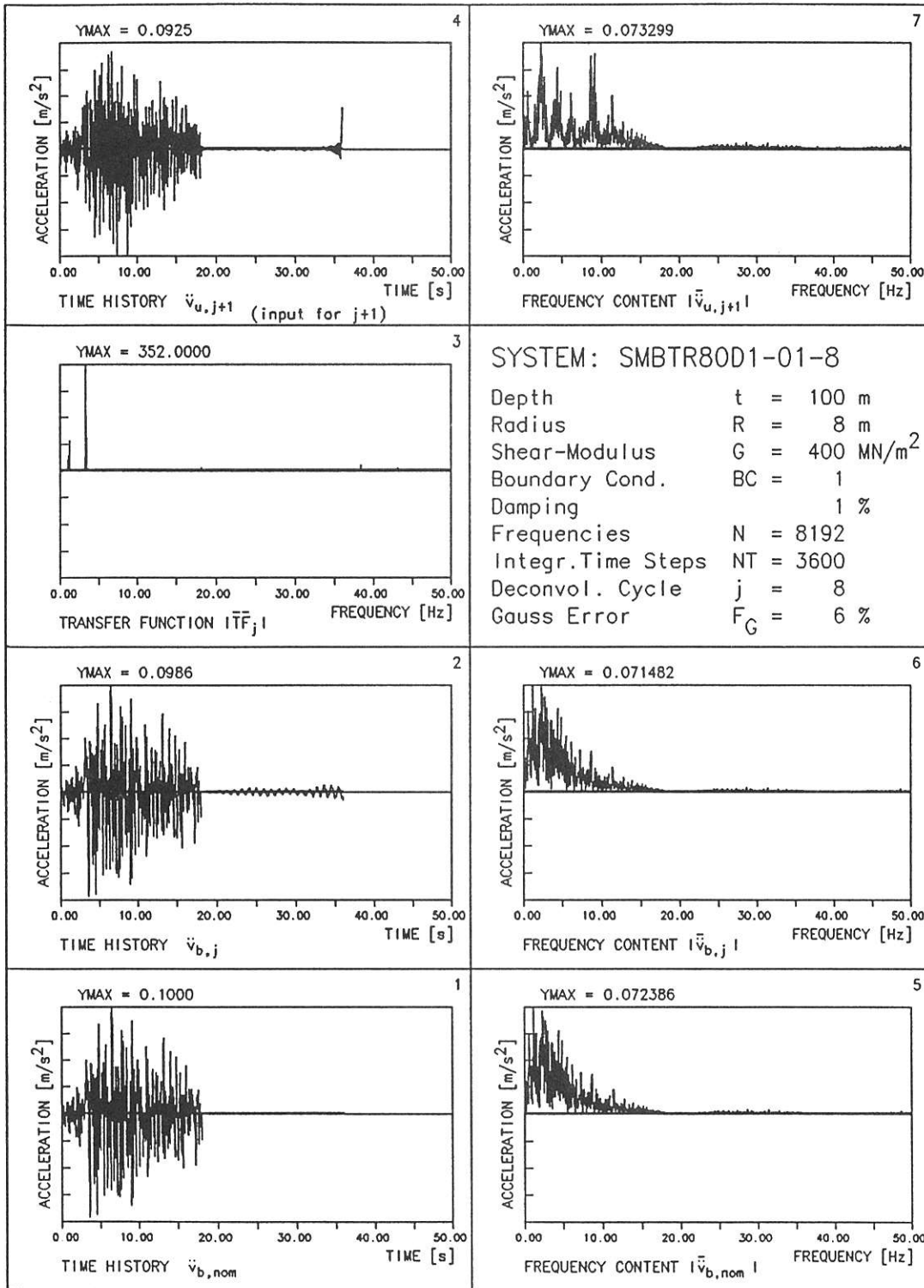


Abb.: 44 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefe, weiche Bodensaule m. Daempfung; Zykl.=8

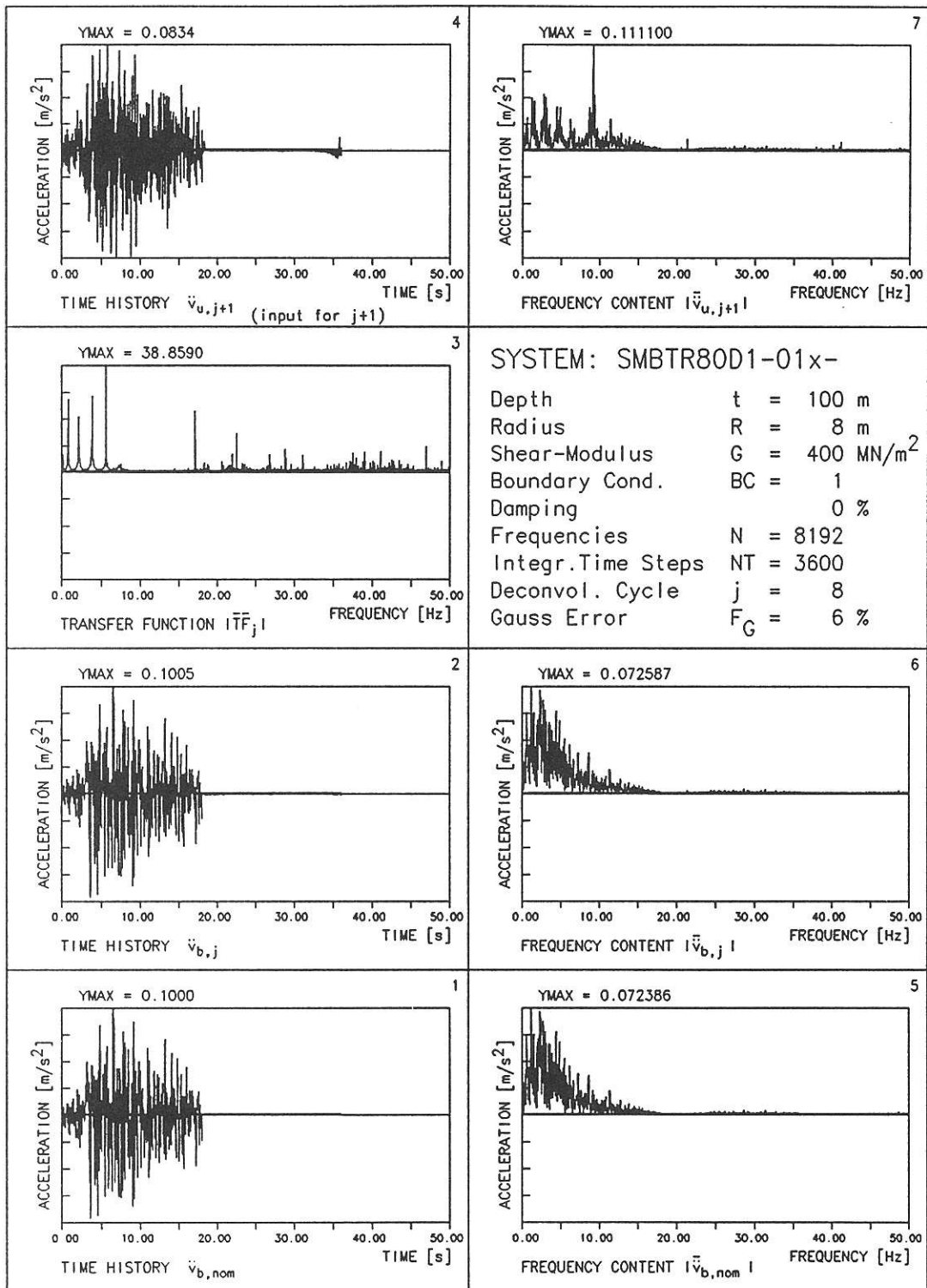


Abb.: 45 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefe, weiche Bodensaule m.Daempfung; Zykl.=8 (ohne seitl. Auflager)

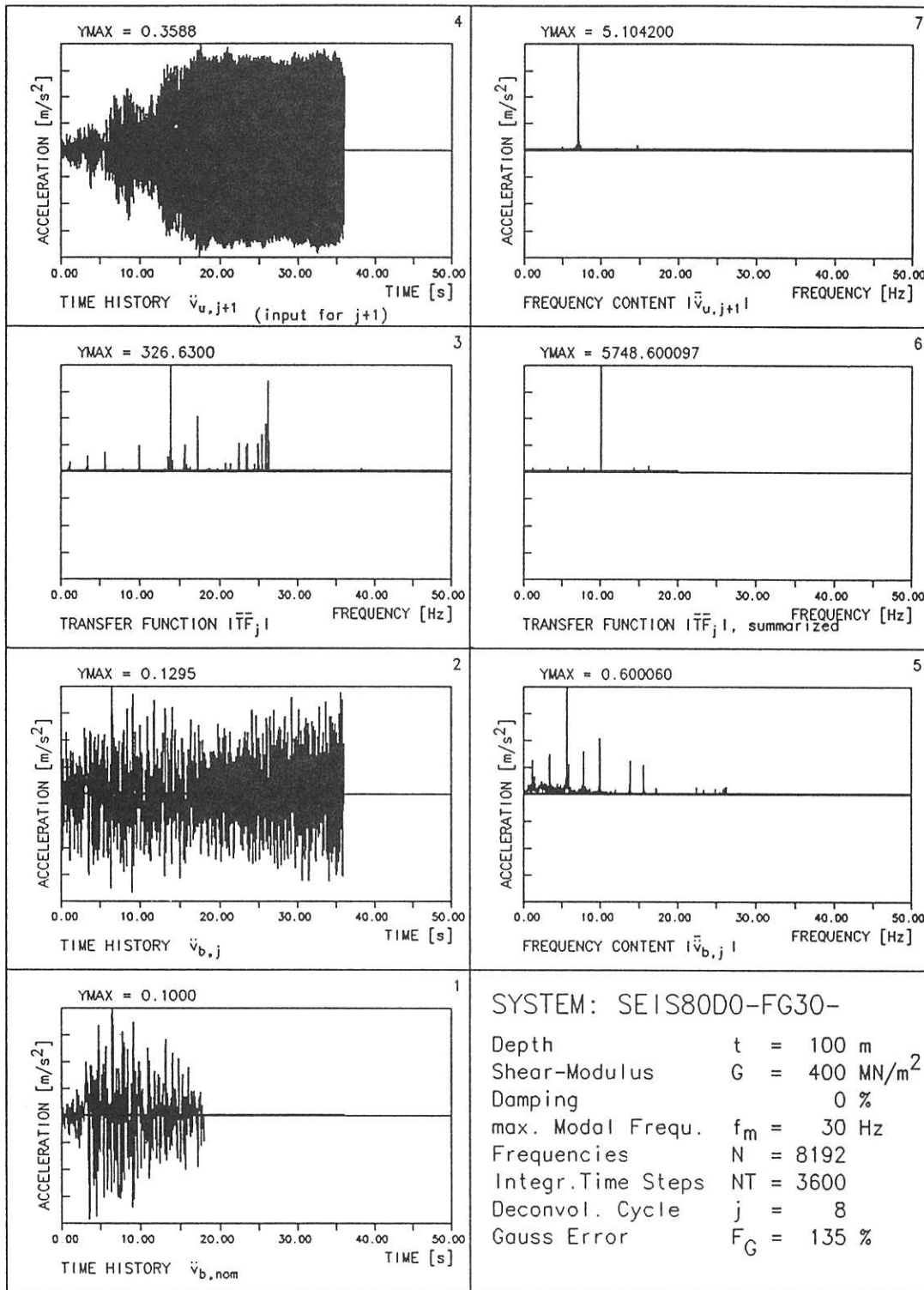


Abb.: 46 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden ohne Daempfung; Zyklus=8 MODELL: Schubballen

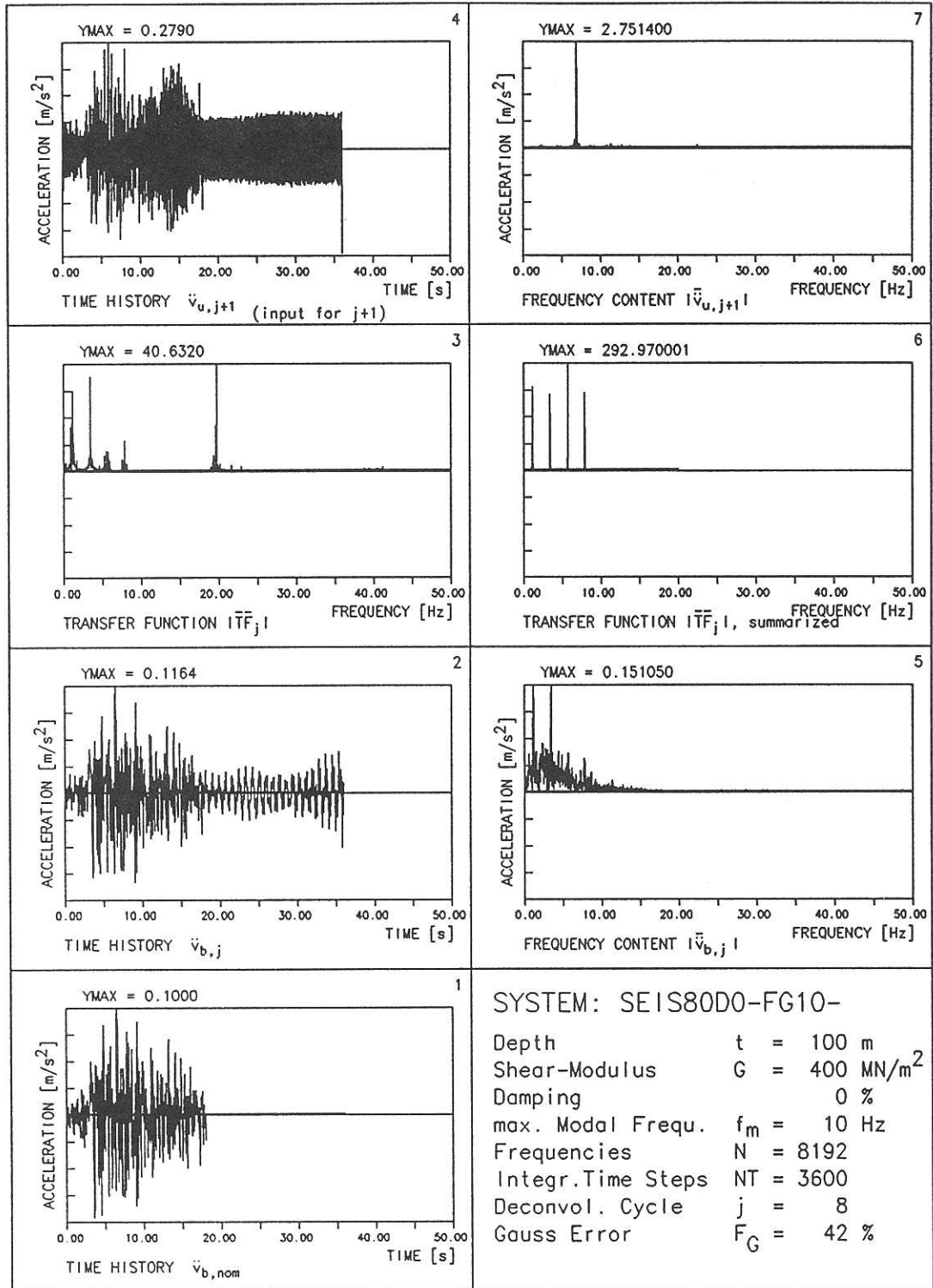


Abb.: 47 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden ohne Daempfung; Zyklus=8  
MODELL: Schubalken

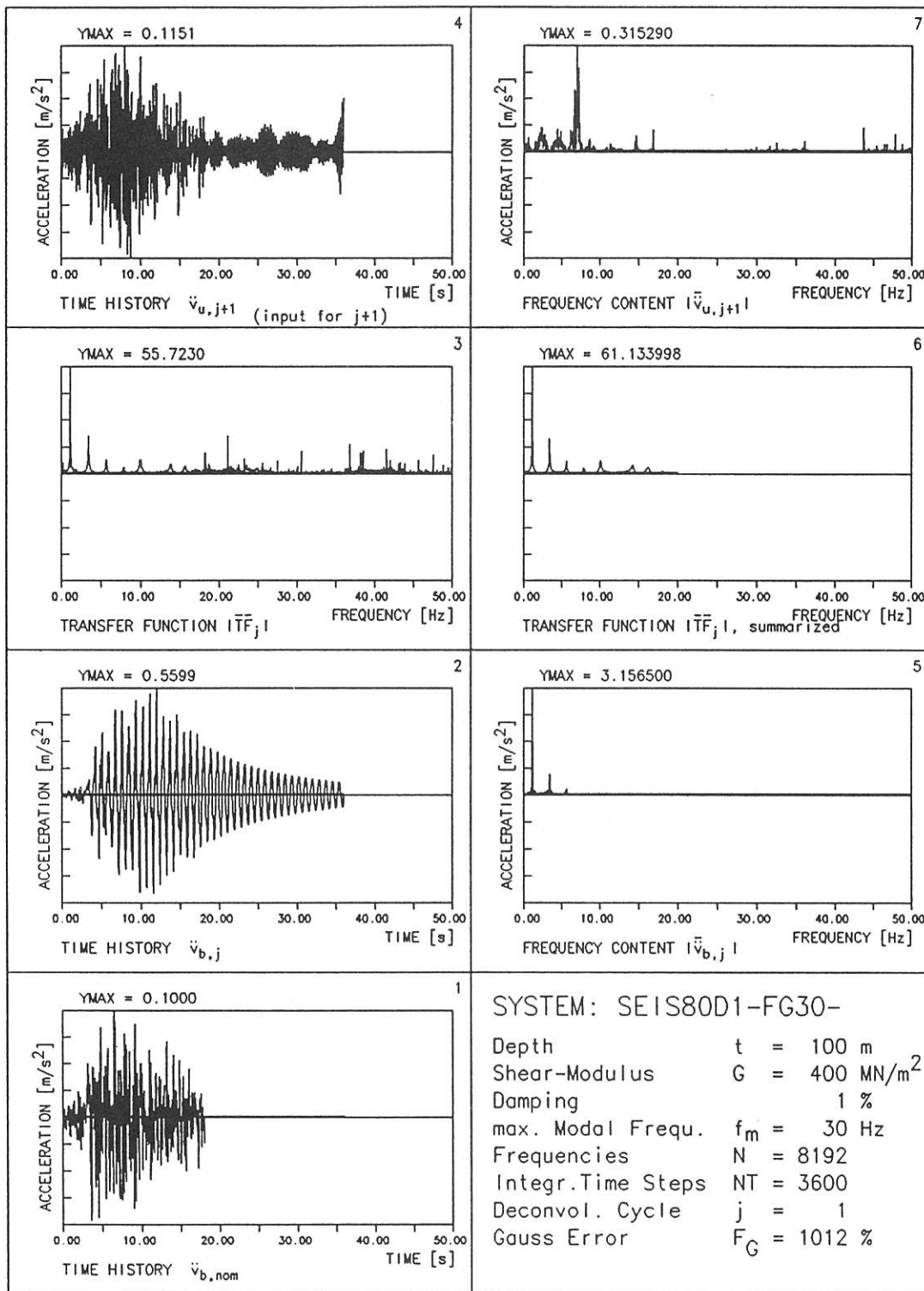


Abb.: 48 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=1  
MODELL: Schubballen

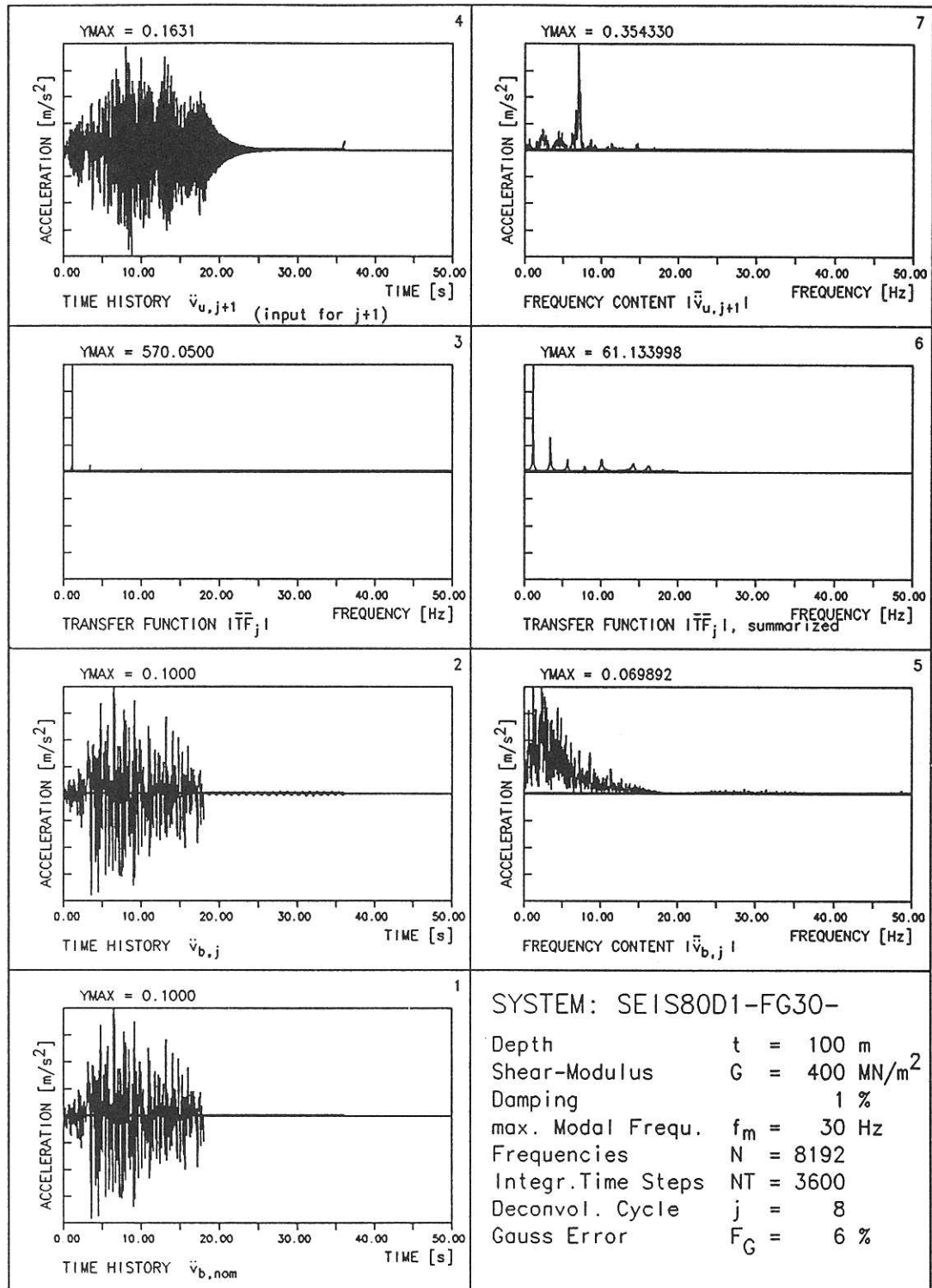


Abb.: 49 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=8  
MODELL: Schubballen

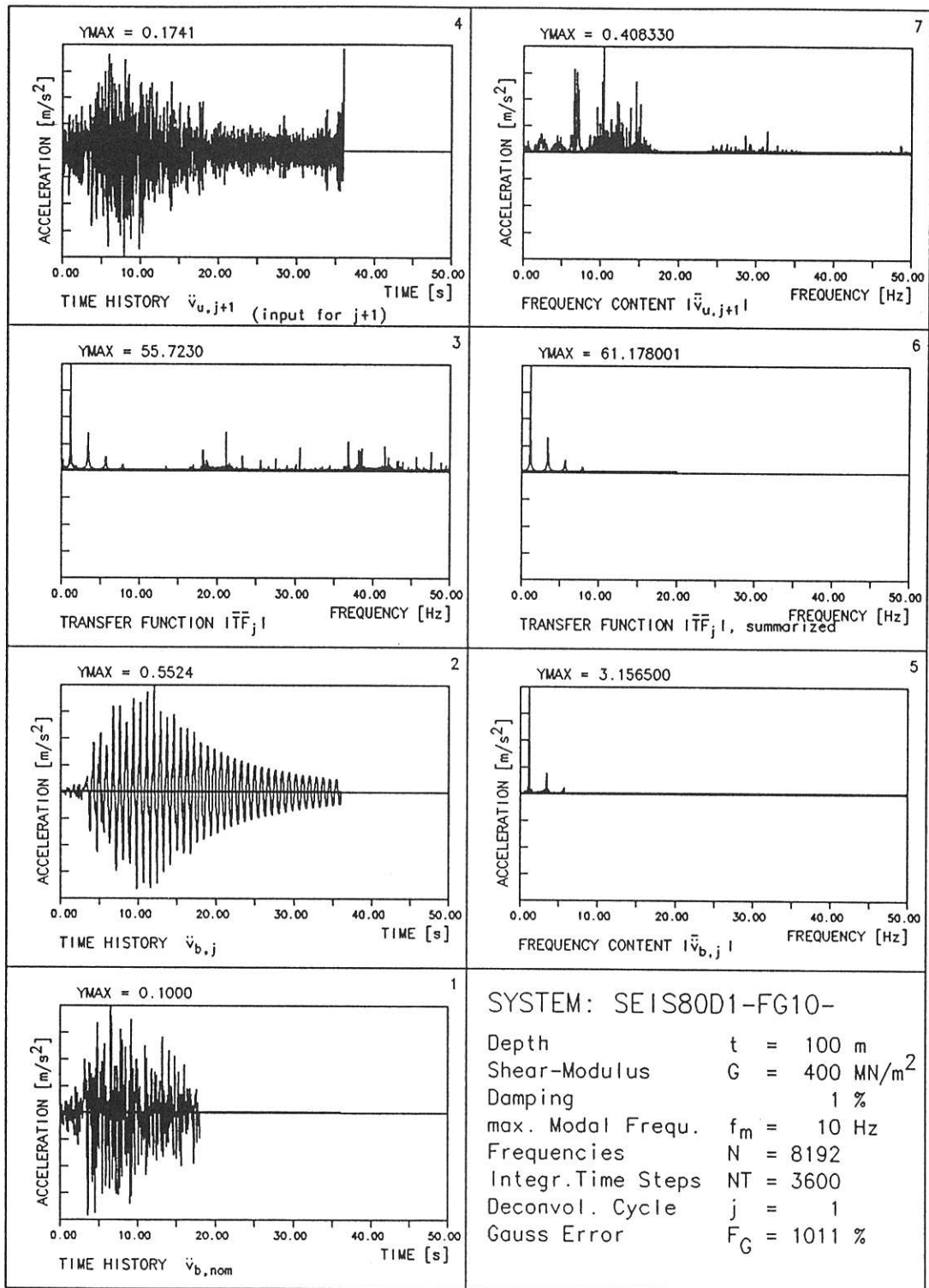


Abb.: 50 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=1  
MODELL: Schubballen



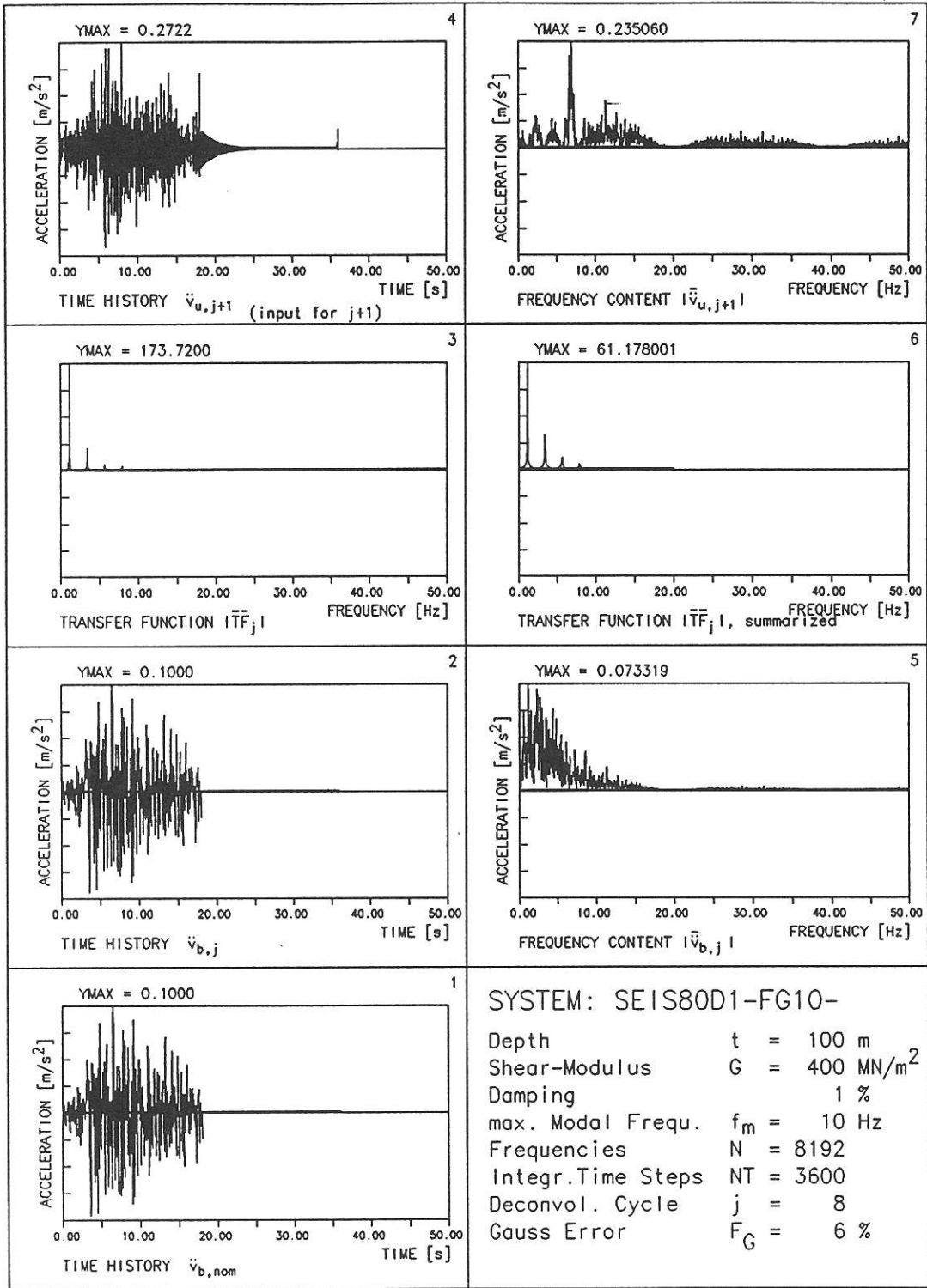


Abb.: 51 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=8 MODELL: Schubballen

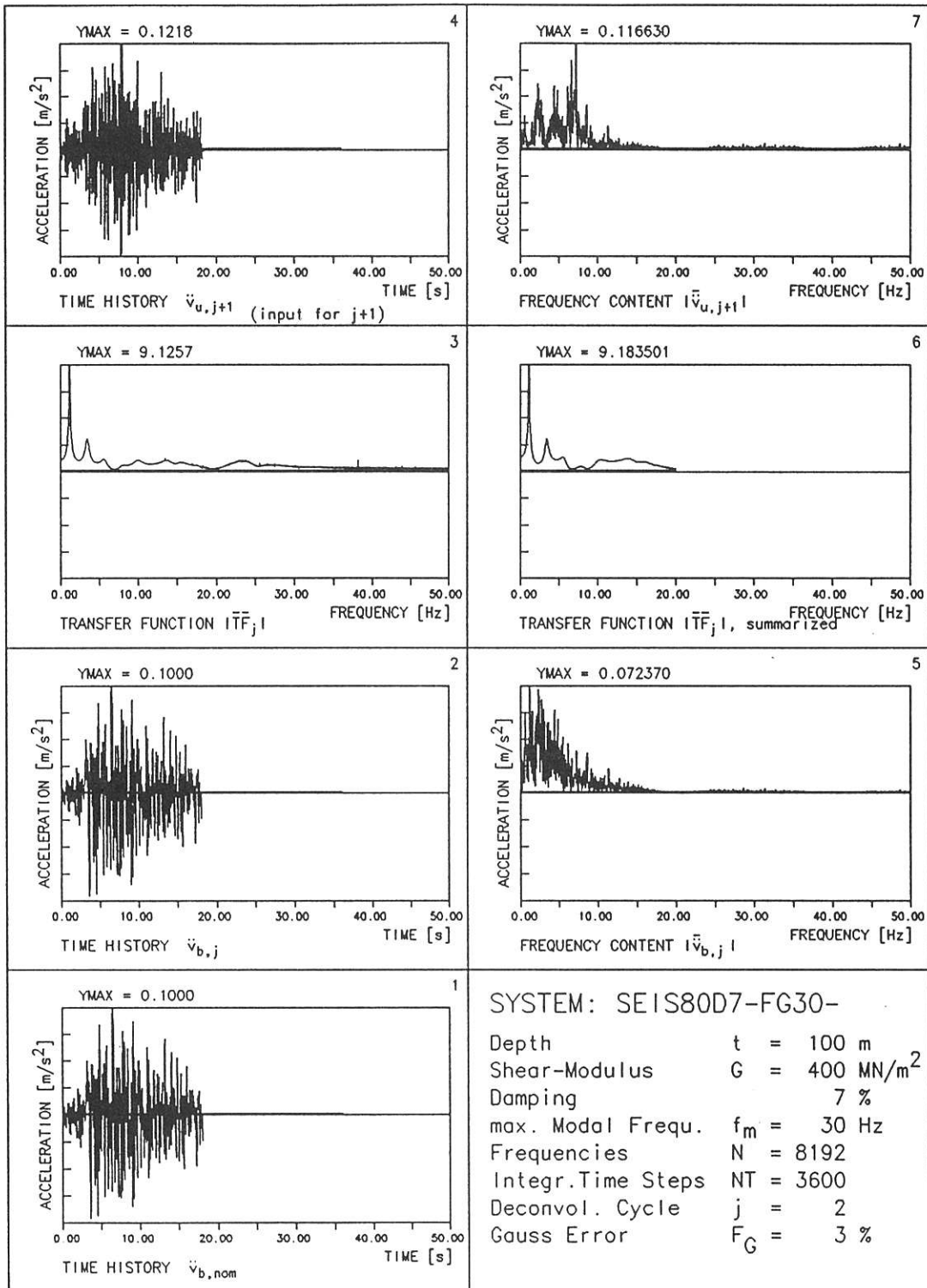


Abb.: 52 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=2 MODELL: Schubballen

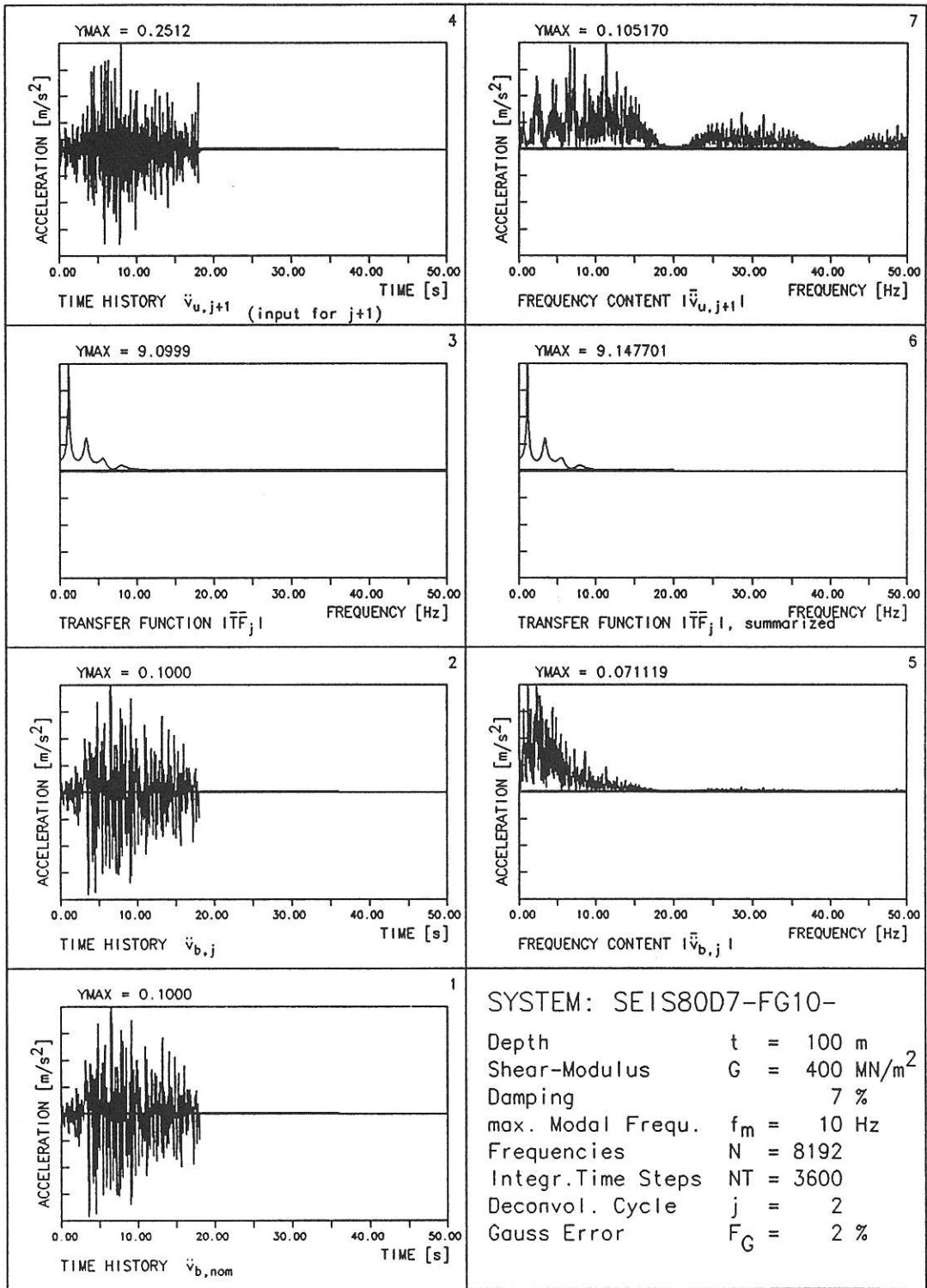


Abb.: 53 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=2 MODELL: Schubballen

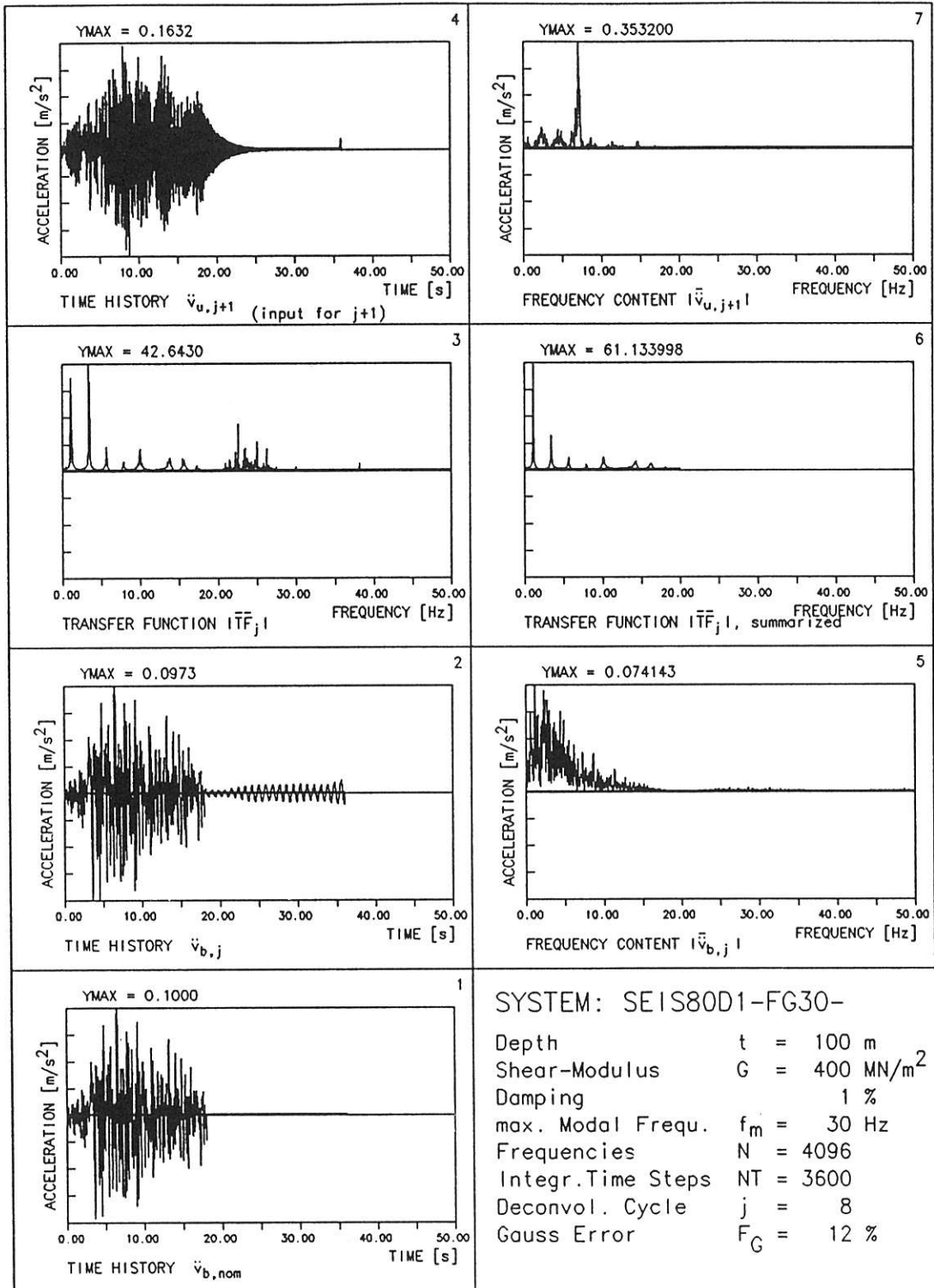


Abb.: 54 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=8  
MODELL: Schubballen

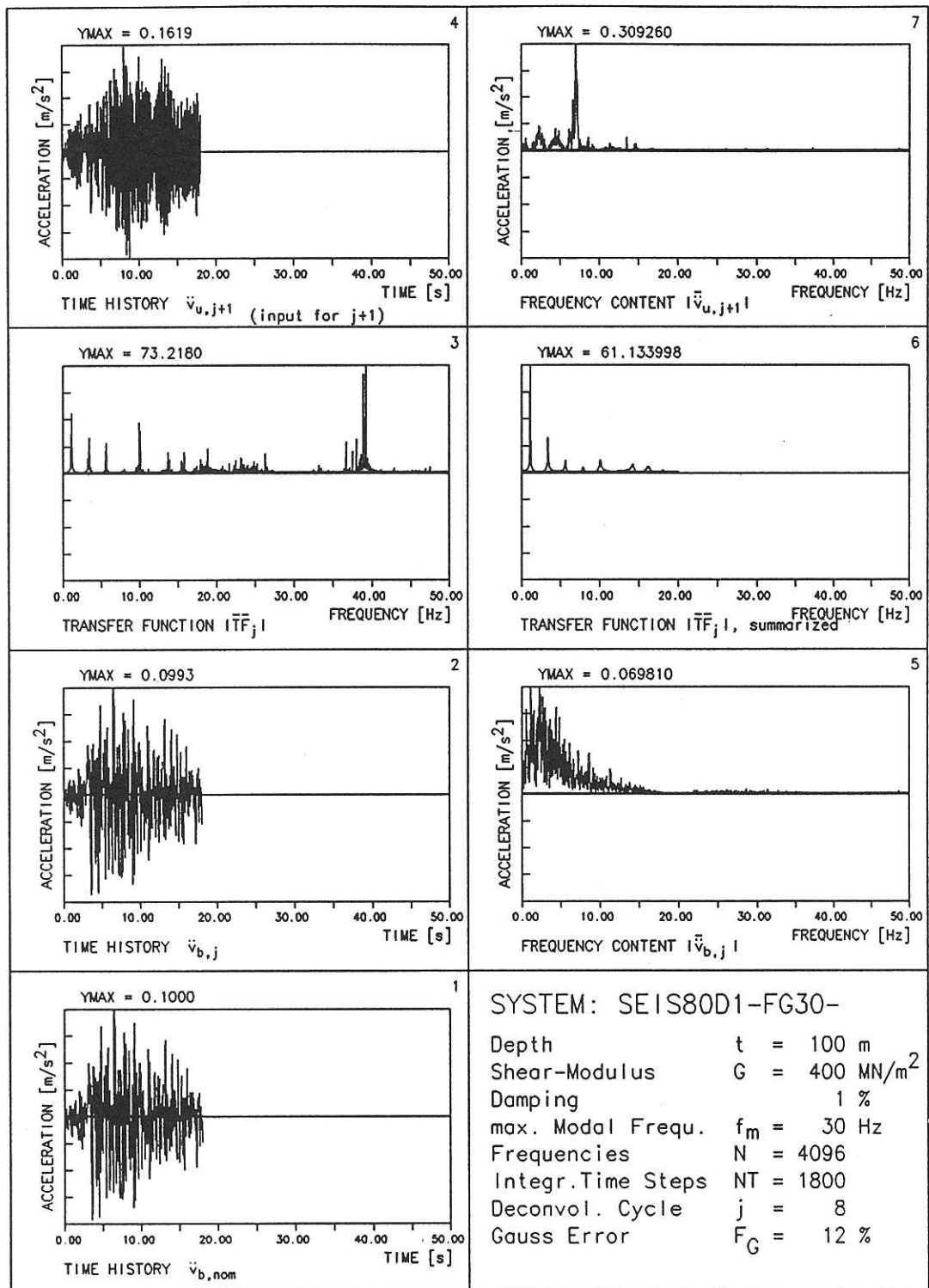


Abb.: 55 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=8 MODELL: Schubballen

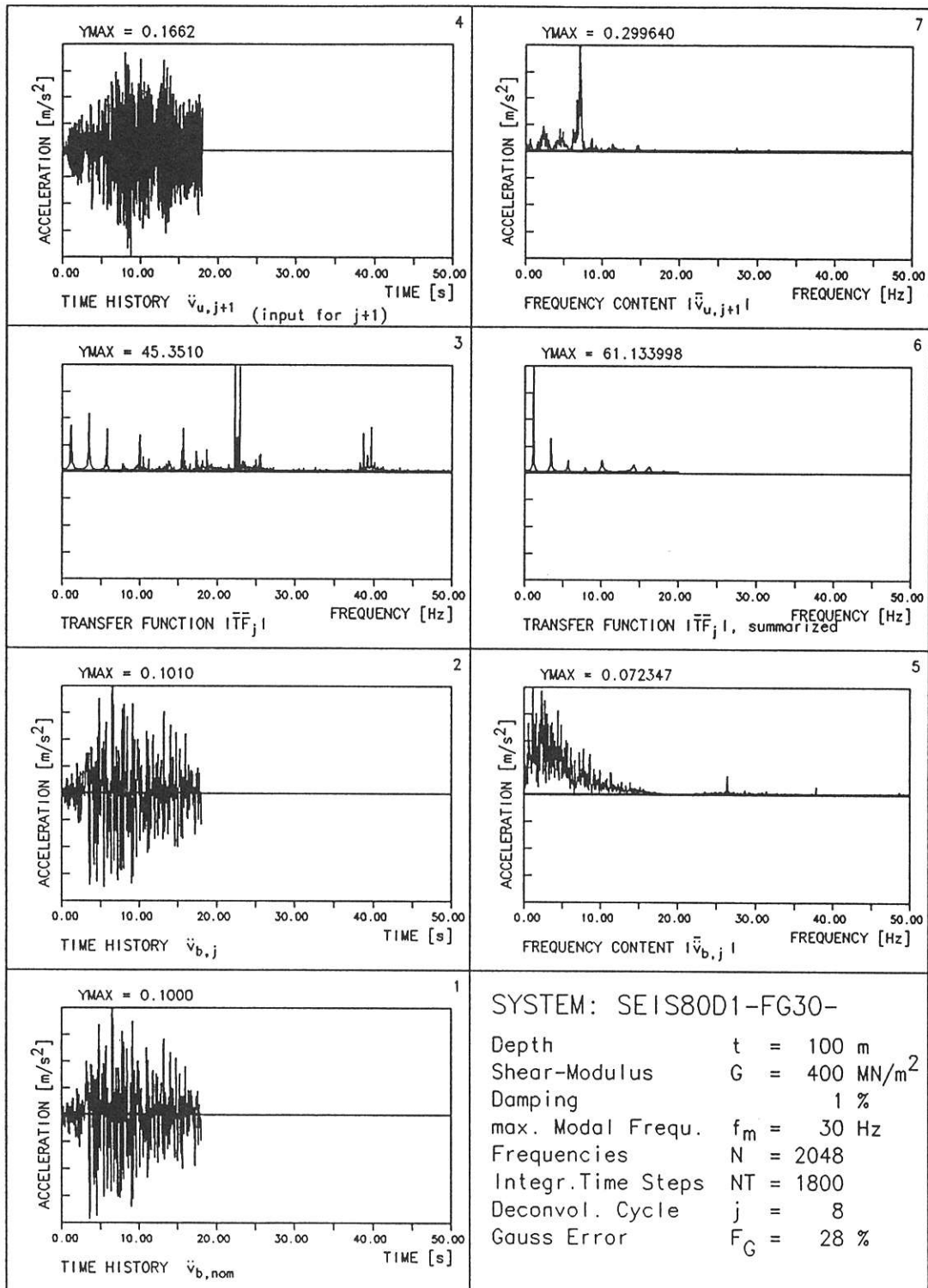


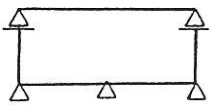
Abb.: 56 ZEITVERLAUF und FREQUENZANALYSE von Input und Output sowie UEBERTRAGUNGSFUNKTION des Systems tiefer, weicher Boden mit Daempfung; Zyklus=8  
MODELL: Schubballen

Tabelle

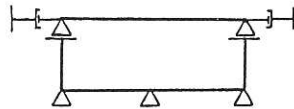
Tabelle I Übersicht möglicher Randbedingung für einen gegebenen Bodenausschnitt

BEZEICHNUNG DER RANDBEDINGUNGEN FÜR DIE BODENAUFLAGERUNG

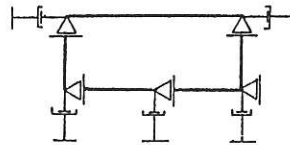
BC=1



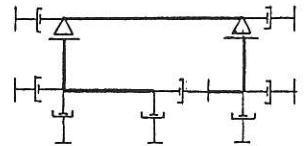
BC=2



BC=3



BC=4





## Bisher erschienene Forschungsberichte der BAM

Nr. 1/1968

**Forschung und Entwicklung in der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM)**

Rechenschaftsbericht für den Bundesminister für Bildung und Wissenschaft

Nr. 2/1970 (vergriffen)

G. Andreae

**Zum Problem des Feuchtigkeitschutzes von Dehnungsmeßstreifen und Halbleitergebern**

Nr. 3/1970

J. Ziebs

**Über das mechanische Verhalten von Aluminium-Stahl-Freileitungsseilen als Beispiel für Verbundbauteile**

Nr. 4/1970 (vergriffen)

A. Burmester

**Formbeständigkeit von Holz gegenüber Feuchtigkeit – Grundlagen und Vergütungsverfahren**

Nr. 5/1971

N. Steiner

**Die Bedeutung der Netzstellenart und der Netzwerkkettendichte für die Beschreibung der elastischen Eigenschaften und des Abbaus von elastomeren Netzwerken**

Nr. 6/1971

P. Schneider

**Zur Problematik der Prüfung und Beurteilung des Luftschallschutzes von Bauelementen bei unterschiedlichen Einbaubedingungen**

Nr. 7/1971

H.-J. Petrowitz

**Chromatographie und chemische Konstitution – Untersuchungen über den Einfluß der Struktur organischer Verbindungen auf das Verhalten bei der Dünnschicht-Chromatographie**

Nr. 8/1971

H. Veith

**Zum Spannungs-Drehungs-Verhalten von Baustählen bei Wechselbeanspruchung**

Nr. 9/1971

K.-H. Möller

**Untersuchung über die sichernde Wirkung poröser Massen in Acetylenflaschen**

Nr. 10/1972

D. Aurich, E. Martin

**Untersuchungen über die Korngrößenbestimmung mit Ultraschall zur Entwicklung einer für die Praxis geeigneten zerstörungsfreien Meßmethode**

Nr. 11/1972

H.-J. Krause

**Beitrag zur Kenntnis der Schnittriefenbildung und Schnittgütereigenschaften beim Brennschneiden**

Nr. 12/1972

H. Feuerberg

**Über Veränderungen von Nylon-6-Fasern beim Texturieren**

Nr. 13/1972

**K.-H. Habig, K. Kirschke, W.-W. Maennig, H. Tischer**  
**Festkörpergleitreibung und Verschleiß von Eisen, Kobalt, Kupfer, Silber, Magnesium und Aluminium in einem Sauerstoff-Stickstoff-Gemisch zwischen  $760$  und  $2 \cdot 10^{-7}$  Torr**

Nr. 14/1972

E. Fischer

**Untersuchungen zur Amplitudenabhängigkeit der Ultraschalldämpfung in Metallen bei 20 kHz**

Nr. 15/1972

H. Pohl

**Studie und Probleme der chemischen Edelmetall-Analyse**

Nr. 16/1972

E. Knublauch

**Über Ausführung und Assagefähigkeit des Normbrandversuches nach DIN 4102, Blatt 2, im Hinblick auf die Nachbildung natürlicher Schadensfeuer**

Nr. 17/1972

P. Reimers

**Aktivierungsanalyse mit schnellen Neutronen, Photonen und geladenen Teilchen**

Nr. 18/1973

W. Struck

**Das Spröbruchverhalten des Baustahles R St 37-2 N in geschweißten Konstruktionen, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 19/1973

K. Kaffanke, H. Czichos

**Die Bestimmung von Grenzflächentemperaturen bei tribologischen Vorgängen**

Nr. 20/1973

R. Rudolphi

**Brandrisiko elektrischer Leitungen und Installationen in Wänden**

Nr. 21/1973

D. Klaffke, W. Maennig

**Die kontinuumsmechanische Erfassung des zeitlichen Ablaufs der elastisch-plastischen Dehnungen bei der Zerrüttung**

Nr. 22/1973

R. Rudolphi, E. Knublauch

**Untersuchungen für ein Prüfverfahren zur Bemessung der Brandschutzbekleidung von Stahlstützen**

Nr. 23/1973

W. Ruske

**Reichs- und preußische Landesanstalten in Berlin Ihre Entstehung und Entwicklung als außeruniversitäre Forschungsanstalten und Beratungsorgane der politischen Instanzen**

Nr. 24/1973

J. Stanke, E. Klement, R. Rudolphi

**Das Brandverhalten von Holzstützen unter Druckbeanspruchung**

Nr. 25/1973

E. Knublauch

**Über das Brandgeschehen vor der Fassade eines brennenden Gebäudes unter besonderer Berücksichtigung der Feuerbeanspruchung von Außenstützen**

Nr. 26/1974

P. Jost, P. Reimers, P. Weise

**Der Elektronen-Linearbeschleuniger der BAM – Eigenschaften und erste Anwendungen**

Nr. 27/1974

H. Wüstenberg

**Untersuchungen zum Schallfeld von Winkelprüfköpfen für die Materialprüfung mit Ultraschall**

Nr. 28/1974

H. Heinrich

**Zum Ablauf von Gasexplosionen in mit Rohrleitungen verbundenen Behältern**

Nr. 29/1974

P. Schneider

**Theorie der dissipativen Luftschalldämmung bei einem idealisotropen porösen Material mit starrem Skelet für senkrechten, schrägen und allseitigen Schallfall**

Nr. 30/1974 (vergriffen)

H. Czichos, G. Salomon

**The Application of Systems Thinking and Systems Analysis to Tribology**

Nr. 31/1975

G. Fuhrmann

**Untersuchungen zur Klärung des Verhaltens thermoplastischer Kunststoffe bei Wechseldehnungsbeanspruchung**

Nr. 32/1975

R. Rudolphi, B. Böttcher

**Ein thermo-elektrisches Netzwerkverfahren zur Berechnung stationärer Temperatur- und Wärmestromverteilungen mit Anwendungsbeispielen**

Nr. 33/1975

A. Wagner, G. Kieper, R. Rudolphi

**Die Bestimmung der Temperaturleitfähigkeit von Baustoffen mit Hilfe eines nichtstationären Meßverfahrens**

Nr. 34/1976 (vergriffen)

H.-J. Deppe

**Untersuchungen zur Vergütung von Holzwerkstoff Nr. 35/1976**

E. Limberger

**Der Widerstand von Platten, die als Beplankungsmaterial leichter Wände verwendet werden, gegenüber dem Aufprall harter Körper – Vorschlag für ein Prüfverfahren –**

Nr. 36/1976 (vergriffen)

J. Hundt

**Wärme- und Feuchtigkeitsleitung in Beton unter Einwirkung eines Temperaturgefälles**

Nr. 37/1976

W. Struck

**Die stoßartige Beanspruchung leichter, nichttragender Bauteile durch einen mit der Schulter gegenprallenden Menschen – Vorschlag für ein Prüfverfahren –**

Nr. 38/1976

K.-H. Habig

**Verschleißuntersuchungen an gas-, bad- und ionisiertem Stahl 42 CrMo 4**

Nr. 39/1976

K. Kirschke, G. Kempf

**Untersuchung der viskoelastischen Eigenschaften von Flüssigkeiten (mit nicht-Newtonschem Fließverhalten) insbesondere bei höherer Scherbeanspruchung**

Nr. 40/1976

H. Hantsche

**Zum Untergrundabzug bei energiedispersiven Spektren nach verschiedenen Verfahren**

Nr. 41/1976

B. Böttcher

**Optische Eigenschaften cholesterinischer Flüssigkeiten**

Nr. 42/1976

S. Dietlen

**Ermittlung der Mindestzündenergie brennbarer Gase in Mischung mit Luft**

Nr. 43/1976

W. Struck

**Das Spröbruchverhalten geschweißter Bauteile aus Stahl mit zäh-sprödem Übergang im Bruchverhalten, dargestellt mit Hilfe der Methode des Temperaturvergleiches**

Nr. 44/1976

W. Matthees

**Berechnung von räumlichen, linear elastischen Systemen, die aus finiten Stab- und Balkenelementen zusammengesetzt sind, unter Verwendung des Programms „Stab-Werk“**

Nr. 45/1976

W. Paatsch

**Untersuchung des Elektrodenverhaltens im Vakuum aufgedampfter Metallschichten**

Nr. 46/1977 (vergriffen)

G. Schickert, H. Winkler

**Versuchsergebnisse zur Festigkeit und Verformung von Beton bei mehraxialer Druckbeanspruchung**  
**Results of Test Concerning Strength and Strain of Concrete Subjected to Multiaxial Compressive Stresses**

Nr. 47/1977

A. Plank

**Bautechnische Einflüsse auf die Tragfähigkeit von Kunststoffdübeln für Fassadenbekleidungen**

Nr. 48/1977

U. Holzlöhner

**Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last, angewendet auf die Fundamente einer geplanten Schnellbahn**

Nr. 49/1977

G. Wittig

**Untersuchungen zur Anwendung von Mikrowellen in der zerstörungsfreien Prüfung**

Nr. 50/1978 (vergriffen)

N. Czaika, N. Mayer, C. Amberg, G. Magiera, G. Andreae, W. Markowski

**Zur Meßtechnik für die Sicherheitsbeurteilung und -überwachung von Spannbeton-Reaktordruckbehältern**

Nr. 51/1978

J. Sickfeld

**Auswirkung von chemischen und physikalisch-technologischen Einflußfaktoren auf das Beständigkeitsverhalten von Oberflächenbeschichtungen auf der Basis von Reaktionsbeschichtungstoffen**

Nr. 52/1978

A. Tomov

**Zum Einfluß der Gleitgeschwindigkeit auf das tribologische Verhalten von Werkstoffen hoher Härte bei reiner Festkörperreibung**

Nr. 53/1978

R.-G. Rohrmann, R. Rudolphi

**Bemessung und Optimierung beheizbarer Straßen- und Brückenbeläge**

Nr. 54/1978

H. Sander

**Magnetisches Verhalten dünner Eisenschichten bei mechanischer Wechselbeanspruchung**

Nr. 55/1978

D. Klaffke

**Beobachtung und Orientierungsbestimmung der Oberflächenkristallite polykristalliner 99,999 % Al-Proben bei Biegewechselbeanspruchung**

Nr. 56/1979

W. Brünner, C. Langlie

**Stabilität von Sandwichbauteilern**

Nr. 57/1979

M. Stadthaus

**Untersuchungen an Prüfmitteln für die Magnetpul-**

verprüfung  
**Investigations on Inspection-Media for Magnetic-Particle-Testing**  
Nr. 58/1979  
W. Struck  
Ermittlung des Bauteilwiderstandes aus Versuchsergebnissen bei vereinbartem Sicherheitsniveau  
Nr. 59/1979  
G. Plauk  
Ermittlung der Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken mit der Methode der Finiten Elemente unter besonderer Berücksichtigung des Verbundes zwischen Beton und Stahl  
Nr. 60/1979  
H. Spreckelmeyer, R. Helms, J. Ziebs  
Untersuchungen zur Erfassung der Kaltformbarkeit von Feinblechen beim Strecken  
Nr. 61/1979  
K. Richter  
Beschreibung von Problemen der höheren Farbmetrik mit Hilfe des Gegenfarbenseystems  
Nr. 62/1979  
W. Gerisch, G. Becker  
Geomagnetobiologisch bedingter Zusammenhang zwischen der Fraßaktivität von Termiten und der Zahl der Sterbefälle  
Nr. 63/1979  
E. Behrend, J. Ludwig  
Untersuchungen an Stopfbuchsen von Ventilen und Schiebern für Gase  
Nr. 64/1980  
W. Rücker  
Ermittlung der Schwingungserregung beim Betrieb schienengebundener Fahrzeuge in Tunneln sowie Untersuchung des Einflusses einzelner Parameter auf die Ausbreitung von Erschütterungen im Tunnel und dessen Umgebung  
Nr. 65/1980  
P. Schmidt, D. Aurich, R. Helms, H. Veith, J. Ziebs  
Untersuchungen über den Einfluß des Spannungszustandes auf bruchmechanische Kennwerte  
Nr. 66/1980  
M. Hattwig  
Auswirkung von Druckentlastungsvorgängen auf die Umgebung  
Nr. 67/1980  
W. Matthees  
Beitrag zur dynamischen Analyse von vorgespannten und vorbelasteten Feder-Masse-Systemen mit veränderlicher Gliederung unter stoßartiger Beanspruchung  
Nr. 68/1980  
D. Petersohn  
Oberflächenmeßverfahren unter besonderer Berücksichtigung der Stereometrie.  
Entwicklung eines volleuzentrischen Präzisionsgoniometers  
Nr. 69/1980  
F. Buchhardt, P. Brandl  
Untersuchungen zur Integrität des Liners von Reaktorsicherheitsbehältern (Containments) in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise  
Nr. 70/1980 (vergriffen)  
G. Schickert  
Schwellenwerte beim Betondruckversuch  
Nr. 71/1980  
W. Matthees, C. Magiera  
Untersuchungen über durch den Boden gekoppelte dynamische Wechselwirkungen benachbarter Kernkraftwerksbauten großer Masse unter seismischen Einwirkungen  
Nr. 72/1980  
R. Rudolphi  
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen am Beispiel von Stahl- und Holzstützen  
Nr. 73/1980  
P. Wegener  
Vergleichende Untersuchungen zum Tragverhalten von Klemmkupplungen für Stahlrohrgerüste nach bestehenden deutschen Prüfverfahren und geplanten europäischen bzw. internationalen Prüfnormen  
Nr. 74/1980  
R. Rudolphi, R. Müller  
ALGOL-Computerprogramm zur Berechnung zweidimensionaler instationärer Temperaturverteilungen mit Anwendungen aus dem Brand- und Wärmeschutz  
Nr. 75/1980  
H.-J. Heinrich  
Beitrag zur Kenntnis des zeitlichen und örtlichen Druckverlaufs bei der plötzlichen Entlastung unter Druck stehender Behälter und Behälterkombinationen

Nr. 76/1980  
D. Klaffke, W.-W. Maennig  
Deformationsverhalten von Rein- und Reinstaluminium sowie Cu 99,9 und St 37 bei Biegewechselbeanspruchung im Rasterelektronenmikroskop  
Nr. 77/1981  
M. Gierloff, M. Maulzsch  
Untersuchung des Verhaltens von Lagerzementen  
Nr. 78/1981  
W. Rücker  
Dynamische Wechselwirkung eines Schienen-Schwellensystems mit dem Untergrund  
Nr. 79/1981  
V. Neumann  
Ein Beitrag zur Untersuchung der wasserstoffbeeinflussten Kaltbiegung höherfester niedriglegierter Feinkornbaustähle mit dem Implantversuch  
Nr. 80/1981  
A. Plank, W. Struck, M. Tzschätzsch  
Ursachen des Teileinsturzes der Kongreßhalle in Berlin-Tiergarten  
Nr. 81/1981  
J. Schmidt  
Graphisch-rechnerisches Verfahren zum Erfassen der Zündhäufigkeit zündbarer Stoffe; Anwendung auf Datenmaterial aus dem Bereich der Statistik  
Nr. 82/1982  
R. Helms, H.-J. Kühn, S. Ledworuski  
Zur werkstoffmechanischen Beurteilung des Kerbschlagbiegeversuches  
Assessment of the mechanical behaviour of materials in the notched bar impact test  
Nr. 83/1982  
H. Czichos, P. Feinle  
Tribologisches Verhalten von thermoplastischen Kunststoffen  
- Kontaktdeformation, Reibung und Verschleiß, Oberflächenuntersuchungen -  
Nr. 84/1982  
R. Müller, R. Rudolphi  
Übertragbarkeit der Ergebnisse von Brandprüfungen im Kleinprüfstand (Vergleichsversuche)  
Nr. 85/ISBN 3-88314-231-X/1982  
H. Czichos  
Technische Materialforschung und -prüfung  
- Entwicklungstendenzen und Rahmenvorschläge für ein EG-Programm „Basic Technological Research“ - Materials Research and Testing  
- Development Trends and Outline Proposals for a Community Programme “Basic Technological Research” -  
Nr. 86/ISBN 3-88314-232-8/1982  
K. Niesel, P. Schimelwitz  
Zur quantitativen Kennzeichnung des Verwitterungsverhaltens von Naturwerksteinen anhand ihrer Gefügemerkmale  
Nr. 87/ISBN 3-88314-240-9/1982  
B. Isecke, W. Stichel  
Einfluß baupraktischer Umgebungsbedingungen auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen vor dem Injizieren  
Nr. 88/ISBN 3-88314-254-9/1983  
A. Erhard  
Untersuchungen zur Ausbreitung von Longitudinalwellen an Oberflächen bei der Materialprüfung mit Ultraschall  
Nr. 89/ISBN 3-88314-263-8/1983  
D. Conrad, S. Dietlen  
Untersuchungen zur Zerfallsfähigkeit von Distickstoffoxid  
Nr. 90/ISBN 3-88314-264-6/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members  
Nr. 91/ISBN 3-88314-265-4/1983  
M. Weber  
Dreidimensionale Analyse von unbewehrtem Beton mit nichtlinear-elastischem Materialgesetz  
Nr. 92/ISBN 3-88314-266-2/1983  
L. Auersch  
Ausbreitung von Erschütterungen durch den Boden  
Nr. 93/ISBN 3-88314-283-2/1983  
P. Studt  
Unterdrückung stick-slip-induzierter Kurvengeräusche schienengebundener Fahrzeuge durch eine physikalisch-chemische Oberflächenbehandlung der Schienen

Nr. 94/ISBN 3-88314-284-0/1983  
Xian-Quan Dong  
Untersuchungen der Störerschwingungen beim Kerbschlagbiegeversuch und deren Abschwächungen  
Nr. 95/ISBN 3-88314-289-1/1983  
M. Römer  
Über die Fokussierung des Schallfeldes von Ultraschall-Prüfköpfen mit Fresnelschen Zonenplatten  
Nr. 96/ISBN 3-88314-296-4/1983  
H. Eifler  
Verbundverhalten zwischen Beton und geripptem Betonstahl sowie sein Einfluß auf inelastische Verformungen biegebeanspruchter Stahlbetonbalken  
Nr. 97/ISBN 3-88314-297-2/1983  
G. Fuhrmann, W. Schwarz  
Typische Bruchflächenbildung thermoplastischer Kunststoffe nach wechselnder mechanischer Beanspruchung  
Nr. 98/ISBN 3-88314-312-X/1983  
E. Schnabel  
Bestimmung des elastischen Verhaltens von Maschinenwaren  
- Stretch- und Erholungsvermögen -  
Nr. 99/ISBN 3-88314-317-0/1983  
K. Brandes, E. Limberger, J. Herter  
Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen  
Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members  
Nr. 100/ISBN 3-88314-298-0/1984  
G. Klamrowski, P. Neustupny  
Untersuchungen zur Prüfung von Beton auf Frostwiderstand  
Nr. 101/ISBN 3-88314-327-8/1984  
P. Reimers, J. Goebels, H. Heidt, P. Weise, K. Wilding  
Röntgen- und Gammastrahlen Computer-Tomographie  
Nr. 102/ISBN 3-88314-335-9/1984  
G. Magiera  
Weiterentwicklung des hydraulischen Kompensationsverfahrens zur Druckspannungsmessung in Beton  
Nr. 103/ISBN 3-88314-328-6/1984  
D. Schnitger  
Radiographie mit Elektronen aus Metallverstärkerfolien  
Nr. 104/ISBN 3-88314-339-1/1984  
M. Gierloff  
Beeinflussung von Betoneigenschaften durch Zusatz von Kunststoffdispersionen  
Nr. 105/ISBN 3-88314-345-6/1984  
B. Schulz-Forberg  
Beitrag zum Bremsverhalten energieumwandelnder Aufsetzpuffer in Aufzugsanlagen  
Nr. 106/ISBN 3-88314-360-X/1984  
J. Lehnert  
Setzung von Fundamenten infolge dynamischer Last  
Nr. 107/ISBN 3-88314-361-8/1984  
W. Stichel, J. Ehreke  
Korrosion von Stahlradiatoren  
Nr. 108/ISBN 3-88314-363-4/1984  
L. Auersch  
Durch Bodenerschütterungen angeregte Gebäudeschwingungen - Ergebnisse von Modellrechnungen  
Nr. 109/ISBN 3-88314-381-2/1985  
M. Omar  
Zur Wirkung der Schrumpfbehinderung auf den Schweißspannungszustand und das Sprüchverhalten von unterpulvergeschweißten Blechen aus St E 460 N  
Nr. 110/ISBN 3-88314-382-0/1985  
H. Walde, B. Kropp  
Wasserstoff als Energieträger  
Nr. 111/ISBN 3-88314-383-9/1985  
K. Ziegler  
Über den Einfluß der Initiierung auf die detonative Umsetzung von AnDEX-Sprengstoffen unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Gesichtspunkte  
Nr. 112/ISBN 3-88314-409-6/1985  
W. Lützw  
Zeitstandverhalten und strukturelle Veränderungen von vielfach wiederverarbeiteten Polyethylenen  
Nr. 113/ISBN 3-88314-410-X/1985  
R. Helms, H. Henke, G. Oelrich, T. Saito  
Untersuchungen zum Frequenzeinfluß auf die Schwingungskorrosion von Offshore-Konstruktionen  
Nr. 114/ISBN 3-88314-419-3/1985  
P. Rose, P. Raabe, W. Daum, A. Szameit

Neue Verfahren für die Prüfung von Reaktorkomponenten mittels Röntgen- und Gammastrahlen

Nr. 115/ISBN 3-88314-420-7/1985

K. Richter

**Farbempfindungsmerkmal Elementaruntton und Buntheitsabstände als Funktion von Farbart und Leuchtdichte von In- und Umfeld**

Nr. 116/ISBN 3-88314-460-6/1985

F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi, A. Wagner

**Theoretische Ermittlung des Wärmedurchgangskoeffizienten von Fensterkonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Rahmenproblematik**

Nr. 117/ISBN 3-88314-468-1/1985

H. Czichos, G. Sievers

**Materials Technologies and Techno-Economic Development**

**A Study for the German Foundation for International Development (Deutsche Stiftung für Internationale Entwicklung)**

Nr. 118/ISBN 3-88314-469-X/1985

H. Treumann, H. Andre, E. Blossfeld, N. Pfeil, M.-M. Zindler

**Brand- und Explosionsgefahren explosionsgefährlicher Stoffe bei Herstellung und Lagerung. Modellversuche mit pyrotechnischen Sätzen und Gegenständen**

Nr. 119/ISBN 3-88314-472-X/1985

J. Herter, K. Brandes, E. Limberger

**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**

**Versuche an Stahlbetonplatten, Teil I**

**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**

**Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part I**

Nr. 120/ISBN 3-88314-514-9/1986

A. Hecht

**Zerstörungsfreie Korngrößenbestimmung an austenitischen Feinblechen mit Hilfe der Ultraschallrückstreuung**

Nr. 121/ISBN 3-88314-530-0/1986

P. Feinle, K.-H. Habig

**Versagenskriterien von Stahlgleitpaarungen unter Mischreibungsbedingungen: Einflüsse von Stahlsammensetzung und Wärmebehandlung**

Nr. 122/ISBN 3-88314-521-1/1986

J. Mischke

**Entsorgung kerntechnischer Anlagen**

Sonderkolloquium der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) am 10.12.1985 mit Beiträgen von B. Schulz-Förber, K.E. Wieser und B. Droste

Nr. 123/ISBN 3-88314-531-9/1986

D. Rennoch

**Physikalisch-chemische Analyse sowie toxische Beurteilung der beim thermischen Zerfall organisch-chemischer Baustoffe entstehenden Brandgase**

Nr. 124/ISBN 3-88314-538-6/1986

H.-M. Thomas

**Zur Anwendung des Impuls-Wirbelstromverfahrens in der zerstörungsfreien Materialprüfung**

Nr. 125/ISBN 3-88314-540-8/1986 (vergriffen)

B. Droste, U. Probst

**Untersuchungen zur Wirksamkeit der Brandschutzisolierung von Flüssiggas-Lagertanks**

Nr. 126/ISBN 3-88314-547-5/1986

W. Stichel

**Korrosion und Korrosionsschutz von Metallen in Schwimmhallen**

Nr. 127/ISBN 3-88314-564-5/1986 (vergriffen)

E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner

**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**

**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**

**Versuche an Stahlbetonbalken, Teil I**

**Tests on Reinforced Concrete Beams, Part I**

Nr. 128/ISBN 3-88314-568-8/1986 (vergriffen)

E. Limberger, K. Brandes, J. Herter, K. Berner

**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**

**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**

**Versuche an Stahlbetonbalken, Teil II**

**Tests on Reinforced Concrete Beams, Part II**

Nr. 129/ISBN 3-88314-569-6/1980 (vergriffen)

K. Brandes, E. Limberger, J. Herter, K. Berner

**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**

**Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load**

**Zugversuche an Betonstahl mit erhöhter Dehngeschwindigkeit**

**Reinforcing Steel Tension Tests with high strain rates**

Nr. 130/ISBN 3-88314-570-X/1986

W. Struck

**Einfache Abschätzung der Durchbiegung und der Energieaufnahme von Trägern aus duktilem Material bei Belastung durch eine Einzelkraft**

Nr. 131/ISBN 3-88314-585-8/1986

E. Limberger, K. Brandes, J. Herter

**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**

**Kinetic Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Members under Impact Load**

**Versuche an Stahlbetonplatten, Teil II**

**Tests on Reinforced Concrete Slabs, Part II**

Nr. 132/ISBN 3-88314-595-5/1987

Chr. Herold, F.-U. Vogdt

**Ermittlung der Ursachen von Schäden an bituminösen Dachabdichtungen unter besonderer Berücksichtigung klimatischer Beanspruchungen**

Nr. 133/ISBN 3-88314-609-9/1987 (vergriffen)

M. Woydt, K.-H. Habig

**Technisch-physikalische Grundlagen zum tribologischen Verhalten keramischer Werkstoffe**

Nr. 134/ISBN 3-88314-615-3/1987

G. Andreae, G. Niessen

**Über den Kernstrahlungseinfluß auf Dehnungsmeßstreifen**

Nr. 135/ISBN 3-88314-618-8/1987

J. Ludwig, W.-D. Mischke, A. Ulrich

**Untersuchungen über das Verhalten von Tankcontainern für unter Druck verflüssigte Gase bei Fallbeanspruchungen**

Nr. 136/ISBN 3-88314-636-6/1987

H.-J. Deppe, K. Schmidt

**Untersuchung zur Beurteilung von Brettschichtverleimungen für den Holzbau**

Nr. 137/ISBN 3-88314-637-4/1987

D. Aurich

**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer Versagenskonzepte auf der Grundlage von Forschungsergebnissen auf dem Gebiete der Komponentensicherheit**

Nr. 138/ISBN 3-88314-635-8/1987

M. Dogunke, F. Buchhardt

**Zur geowissenschaftlichen Einordnung des Gebietes der Bundesrepublik Deutschland und einer sicheren Auslegung technischer Systeme gegen den Lastfall Erdbeben.**

Nr. 139/ISBN 3-88314-658-7/1987

J. Olschewski, S.-P. Scholz

**Numerische Untersuchung zum Verhalten des Hochtemperaturwerkstoffes Nimonic PE 16 unter monotoner und zyklischer Belastung bei Verwendung verschiedener plastischer und viskoplastischer Materialmodelle**

Nr. 140/ISBN 3-88314-643-9/1987

K. Brandes, E. Limberger, J. Herter

**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**

**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**

Nr. 141/ISBN 3-88314-694-3/1987

F. Buchhardt, W. Matthees, G. Magiera, F. Mathiak

**Zum Einfluß des Sicherheits- und Auslegungserdbebens auf die Bemessung von Kernkraftwerken**

Nr. 142/ISBN 3-88314-695-1/1987

H. Treumann, G. Krüger, N. Pfeil, S. von Zahn-Ullmann

**Sicherheitstechnische Kenndaten und Gefahrzahlen binärer Mischungen aus oxidierenden und verbrennlichen Substanzen**

Nr. 143/ISBN 3-88314-701-X/1987

K. Brandes, E. Limberger, J. Herter

**Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen**

**Kinetic Load Bearing Capacity of Impulsively Loaded Reinforced Concrete Members**

**Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen bei Stoßbelastung**

**Experimental and numerical Investigations concerning Load Bearing Behaviour of Reinforced Concrete Members under Impact Load**

Nr. 144/ISBN 3-88314-702-8/1987

F. Buchhardt, G. Magiera, W. Matthees, M. Weber, J. Altes

**Nichtlineare dynamische Berechnungen zum Penetrationsverhalten des AVR-Reaktorgebäudes**

Nr. 145/ISBN 3-88314-711-7/1987

U. Holzlhöner

**Untersuchung selbstähnlicher Systeme zur Bestimmung von Materialeigenschaften von Reibungsböden**

Nr. 146/ISBN 3-88314-714-1/1987

W. Schön, M. Mallon

**Untersuchungen zur Wirksamkeit von Wasserberieselungseinrichtungen als Brandschutzmaßnahme für Flüssiggas-Lagertanks**

Nr. 147/ISBN 3-88314-720-6/1987

H.-D. Kleinschrodt

**Lösung dynamischer Biege- und Torsionsprobleme von Stabsystemen aus dünnwandigen elastischen Stäben mit offenem Querschnitt mittels frequenzabhängiger Ansatzfunktionen**

Nr. 148/ISBN 3-88314-774-5/1988

W. Müller

**Theoretische Untersuchung von Variationsprinzipien für elastoplastisches Materialverhalten sowie Entwicklung und numerische Erprobung von Finite-Element-Verfahren für den ebenen Spannungszustand**

Nr. 149/ISBN 3-88314-775-3/1988

U. Holzlhöner

**Bestimmung baugrunderdynamischer Kenngrößen aus der Untersuchung von Bodenproben**

Nr. 150/ISBN 3-88314-776-1/1988

M. Weber

**VG3D Zeichenprogramm für Vektorgraphische Darstellung dreidimensionaler Strukturen**

Nr. 151/ISBN 3-88314-785-0/1988

L. Auersch-Saworski

**Wechselwirkung starrer und flexibler Strukturen mit dem Baugrund insbesondere bei Anregung durch Bodenerschütterungen**

Nr. 152/ISBN 3-88314-796-6/1988

G. Plauk, G. Kretschmann, R.-G. Rohrmann

**Untersuchung des baulichen Zustandes und der Tragfähigkeit vorgespannter Riegel von Verkehrszeichenbrücken der Berliner Stadtautobahn**

Nr. 153/ISBN 3-88314-797-4/1988

H. Sander, W.-W. Maennig

**Magnetisches Verhalten von Eisenproben bei mechanischer Wechselbeanspruchung**

Nr. 154/ISBN 3-88314-822-9/1988

K. Breitkreutz, R. Utteck, K. Haedecke

**Druckgesinterte Stähle als zertifiziertes Referenzmaterial für die Spektrometrie**

Nr. 155/ISBN 3-88314-825-3/1988

L. Auersch

**Zur Entstehung und Ausbreitung von Schienenverkehrerschütterungen: Theoretische Untersuchungen und Messung am Hochgeschwindigkeitszug Intercity Experimental**

Nr. 156/ISBN 3-88314-887-3/1989

G. Klamrowski, P. Neustupny, H.-J. Deppe, K. Schmidt, J. Hundt

**Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Faserzementen**

Nr. 157/ISBN 3-88314-888-1/1989

E. Limberger, K. Brandes

**Versuche zum Verhalten von Stahlbetonbalken mit Übergreifungsstößen der Zugbewehrung unter stoßartiger Belastung**

Nr. 158/ISBN 3-88314-889-X/1989

R. Wäsche, K.-H. Habig

**Physikalisch-chemische Grundlagen der Feststoffschmierung - Literaturübersicht -**

Nr. 159/ISBN 3-88314-890-3/1989

R. Müller, R. Rudolphi

**Berechnung des Wärmedurchlaßwiderstandes und der Temperaturverteilung im Querschnitt von Haus-schornsteinen nach DIN 18160 Teil 6**

Nr. 160/ISBN 3-88314-917-9/1989

W. Matthees

**Entwicklung eines Makroelementes durch Kondensation am Beispiel der Lastfälle Flugzeugabsturz und Erdbeben bei Boden-Bauwerk-Wechselwirkung mit biegeweichen Fundamenten**

Nr. 161/ISBN 3-88314-920-9/1989

G. Mellmann, M. Maultzsch

**Untersuchung zur Ermittlung der Biegefestigkeit von Flachglas für bauliche Anlagen**

Nr. 162/ISBN 3-88314-921-7/1989

W. Brünner

**Untersuchungen zur Tragfähigkeit großer Glasscheiben**

Nr. 163/ISBN 3-88314-922-5/1989

W. Brünner, G. Mellmann, W. Struck

**Biegefestigkeit und Tragfähigkeit von Scheiben aus Flachglas für bauliche Anlagen**

Nr. 164/ISBN 3-88314-934-9/1989

R. Helms, B. Jaenicke, H. Wolter, C.-P. Bork

**Zur Schwingfestigkeit großer geschweißter Stahlträger**

- Nr. 165/ISBN 3-88314-935-7/1989  
P. Göbel, L. Meckel, W. Schiller  
**Untersuchung zur Erarbeitung von Kennwerten bei  
Einrichtungsmaterialien (Holzwerkstoffen, Möbeln  
und Textilien) hinsichtlich der Formaldehyd-  
Emission.**  
**Teil B: Textilien**
- Nr. 166/ISBN 3-88314-936-5/1989  
K. Breitzkreutz  
**Modelle für Stereologische Analysen**
- Nr. 167/ISBN 3-88314-937-3/1989  
A. Mitakidis, W. Rücker  
**Erschütterungsausbreitung im elastischen Halbraum  
bei transienten Belastungsvorgängen**
- Nr. 168/ISBN 3-88314-958-6/1990  
F.-J. Kasper, R. Müller, R. Rudolphi  
**Numerische Untersuchung geometriebedingter Wär-  
mebrücken (Winkel und Ecken) unter Einsatz hoch-  
auflösender Farbgraphik bei Berücksichtigung der  
Tauwasserproblematik und des Mindestluftwechsels**
- Nr. 169/ISBN 3-88314-959-4/1990  
Chr. Kohl, W. Rücker  
**Integration der Untergrundynamik in das Programm-  
system MEDYNA, dargestellt am Beispiel des Intercity  
Experimental (ICE)**
- Nr. 170/ISBN 3-88314-960-8/1990  
P. Studt, W. Kerner, Tin Win  
**Untersuchung der mikrobiologischen Schädigung  
wassergemischter Kühlschmierstoffe mit dem Ziel  
der Verbesserung der Arbeitshygiene, der Minderung  
der Geruchsbelastung und der Menge zu entsorgen-  
der Emulsionen**
- Nr. 171/ISBN 3-88314-997-7/1990  
F. Buchhardt  
**Ein Operator zur Koppelung beliebig benachbarter dy-  
namischer Systeme am Beispiel der Boden-Bauwerk-  
Wechselwirkung**
- Nr. 172/ISBN 3-88314-998-5/1990  
J. Vielhaber, G. Plauk  
**Grenztragfähigkeit großer Verbundprofilstützen**
- Nr. 173/ISBN 3-88314-999-3/1990  
B. Droste, J. Ludwig, B. Schulz-Forberg  
**Höherwertige Transporttechnik und ihre Konsequen-  
zen für die Beförderung gefährlicher Güter**
- Nr. 174/ISBN 3-89429-021-8/1990  
D. Aurich  
**Analyse und Weiterentwicklung bruchmechanischer  
Versagenkonzepte**
- Nr. 175/ISBN 3-89429-022-6/1990  
W. Brocks, D. Klingbeil, J. Olschewski  
**Lösung der HRR-Feld-Gleichungen der elastisch-  
plastischen Bruchmechanik**
- Nr. 176/ISBN 3-89429-035-6/1990  
W. Matthees, G. Magiera  
**Iterative Dekonvolution der seismischen Basis-  
erregung für den Zeitraum**



**Bundesanstalt  
für Materialforschung  
und -prüfung (BAM)**

**Federal Institute  
for Materials  
Research and Testing**

**Institut Fédéral pour la  
Recherche et l'Essai des  
Materiaux**

Unter den Eichen 87  
D-1000 Berlin 45

Telefon (030) 8104-1  
Telex 183 261 bamb d  
Telegramme BAM BERLIN

Telefax (030) 8 112 029  
Teletex 2627-308 372=bamb

- **Berichte**
- **Gutachten**
- **Zulassungen**
- **Zertifikate**
- **Tagungspapiere**
- **Prüfungszeugnisse**
- **Prüfstellenanerkennungen**

