

Auswirkungen der Geländetopographie auf Bemessungs-Antwortspektren am Beispiel eines Standortes in Norddeutschland

Jürgen R. Kopera

BIS, Seerosenstr. 10B, 30916 Isernhagen/Hannover

Willi Sarfeld

SRD-Berlin, Danckelmannstr. 52a, 14059 Berlin, srd@berlin.de

Bernhard Faust

iff Berlin, Pichelsdorfer Str. 81, 13595 Berlin, iff@bln.de

ZUSAMMENFASSUNG: Das dynamische Verhalten des Untergrundes unter seismischer Belastung wird am Beispiel des Standortes des Forschungsreaktors FRG-1 der GKSS bei Geesthacht unter Verwendung neuerer numerischer Methoden analysiert. Im besonderen wird untersucht, welchen Einfluß die topographischen Gegebenheiten auf die Übertragungsfunktion des Untergrundes und das Bemessungs-Antwortspektrum haben.

Dazu wird ein zweidimensionales Modell nach der Finite-Element-Methode (FE), gekoppelt mit der Randelementmethode erstellt und mit vertikal propagierenden SV-Wellen angeregt. Den topographischen Effekten überlagert sich der Einfluß der geologischen Schichtung. Für die Beurteilung der Topographieeffekte ist es daher erforderlich, an den ausgewählten Aufpunkten des zweidimensionalen Modells, korrespondierende eindimensionale Modelle des Untergrundes zu erstellen.

Um den Einfluß der standortspezifischen Oberflächentopographie (OT) auf eine seismische Anregung zu quantifizieren wird der Spektralquotient gebildet, der als das Verhältnis der Ergebnisse von zwei- zu eindimensionaler Analyse definiert wird. Die Spektralquotienten der Übertragungsfunktionen an 14 Aufpunkten der Geländeoberfläche zeigen, daß der Einfluß der Topographie frequenz- und ortsabhängig ist. Für den Standort des FRG-1 ergeben sich aus der Topographie bis zu 20% Verstärkung innerhalb schmaler Frequenzbänder. Den maximalen Beitrag erhält man am Ende des Geländeanstiegs bei 50 m über NN. Die spektrale Überhöhung beträgt dort ca. 35%.

Die Spektralquotienten der berechneten Antwortspektren zeigen ähnliche Effekte wie die Spektralquotienten der Übertragungsfunktionen. Für den Ort des FRG-1 beträgt der Anteil der OT am Antwortspektrum frequenzabhängig ca. 15%.

Zusammenfassend kann festgestellt werden: Ein Einfluß der OT auf den Durchgang seismischer Wellen am Standort GKSS ist vorhanden und sowohl von der Frequenz als auch von der Lage auf dem Geländeanstieg abhängig. Letzteres bestimmt, ob es sich dabei um eine Verstärkung oder um eine Abschwächung handelt. Auswirkungen auf das Bemessungs-Antwortspektrum bleiben gering.

1. EINLEITUNG

Der Einfluß von Oberflächentopographie auf die seismische Bodenbewegung ist bekannt und kann im ungünstigen Fall erheblich zu deren Verstärkung beitragen (u.a. Sanchez-Sesma, 1987). In der folgenden Untersuchung wird die Wirkung der standortspezifischen Oberflächentopographie am Beispiel des Standortes GKSS bei Geesthacht auf den Einfall seismischer Wellen numerisch analysiert. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Quantifizierung des Einflusses der Oberflächentopographie auf das Bemessungs-Antwortspektrum am Standort des Reaktorgebäudes.

Der Forschungsreaktor FRG-1 der GKSS bei Geesthacht, südöstlich von Hamburg, befindet sich im oberen Bereich des Geländeanstiegs eines Geestrückens. Die Oberflächentopographie steigt hier von Elbniveau (ca. 0 m NN) auf 50 m über NN in nördliche Richtung an (Bild 1). Das Reaktorgebäude steht auf einem Plateau, das in den Hang hineingetrieben wurde, auf einem Niveau von ca. 40 m NN.

Die oberflächennahe Untergrundstruktur des Standortes ist aus mehreren Bohrungen bekannt, die im Rahmen der Baugrunduntersuchung abgeteuft worden waren. Es wird im folgenden von einem ebenen Schichtenmodell des Untergrundes nach Christensen et al. (1997) ausgegangen (s. Tab 1). Die seismischen Geschwindigkeiten dieses Modells stammen aus VSP (*vertical seismic profiling*) Messungen einer nahe des Reaktorgebäudes abgeteuften Bohrung. Ingenieurgeologische Untersuchungen haben gezeigt, daß von einem weitgehend homogenen Aufbau des Standortuntergrundes im Untersuchungsgebiet ausgegangen werden kann (Christensen, 1997), was die Annahme eines vereinfachten Untergrundmodells mit ebener Schichtung rechtfertigt (Bild 2 und 3).

Die Geländetopographie zum Aufbau eines zweidimensionalen Untergrundmodells wurde der Topographischen Karte TK 2528 (1:25 000) bzw. den entsprechenden Deutschen Grundkarten (Tespe und Grünhof-Tesperhude) DGK 1:5 000, entnommen.

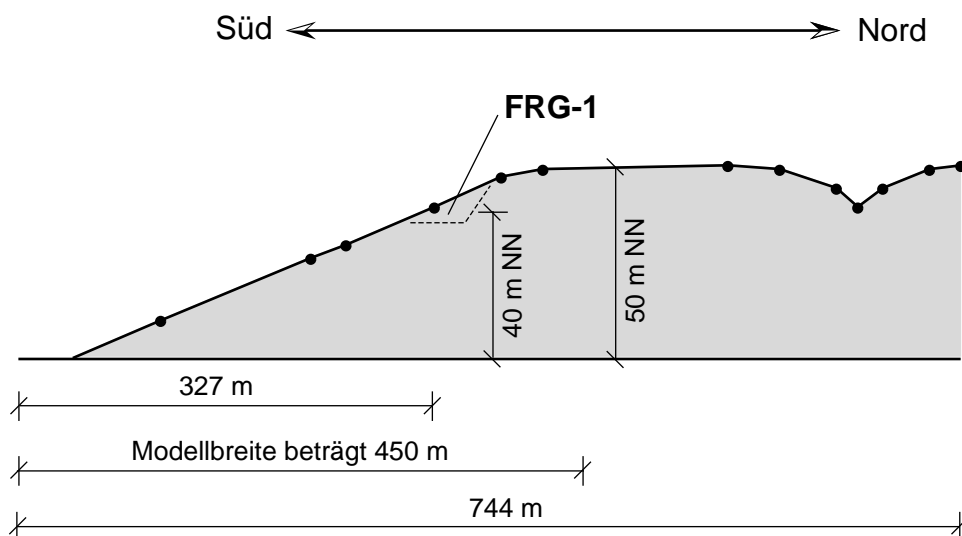


Bild 1: Digitalisiertes topographisches Modell 3-fach überhöht: Nord-Süd-Schnitt am Standort GKSS bei Geesthacht.

Nr	Höhe [m NN]	Mächtigkeit [m]	v_s [m/s]	v_p [m/s]	ν	ρ [t/m ³]	Q_s	D
6	23 m bis 50 m	27	315	575	0.286	1.8	7	0.071
5	17 m bis 23 m	6	355	630	0.267	1.9	7	0.071
4	12 m bis 17 m	5	360	850	0.391	1.9	10	0.050
3	5 m bis 12 m	7	360	1500	0.469	1.9	10	0.050
2	-50 m bis -5 m	55	375	1520	0.468	2.0	15	0.033
1	-120 m bis -50 m	70	500	1550	0.442	2.0	17	0.030
0	$-\infty$ bis -120 m	∞	800	2000	0.405	2.1	17	0.030

Hierbei sind v_s die Schwerwellengeschwindigkeit, v_p die Kompressionswellengeschwindigkeit, ν die Querkontraktionszahl, ρ die Dichte, und Q_s der seismische Qualitätsfaktor für Scherwellen, aus dem sich das Dämpfungsmaß $D = 1/2Q_s$ ergibt. Da die VSP Messungen nur ab 40 m über NN vorlagen, wurden die Stoffdaten über 40 m NN extrapoliert.

Tabelle 1: Materialkenngrößen des Schichtenmodells am Standort GKSS bei Geesthacht (aus Christensen et al., 1997)

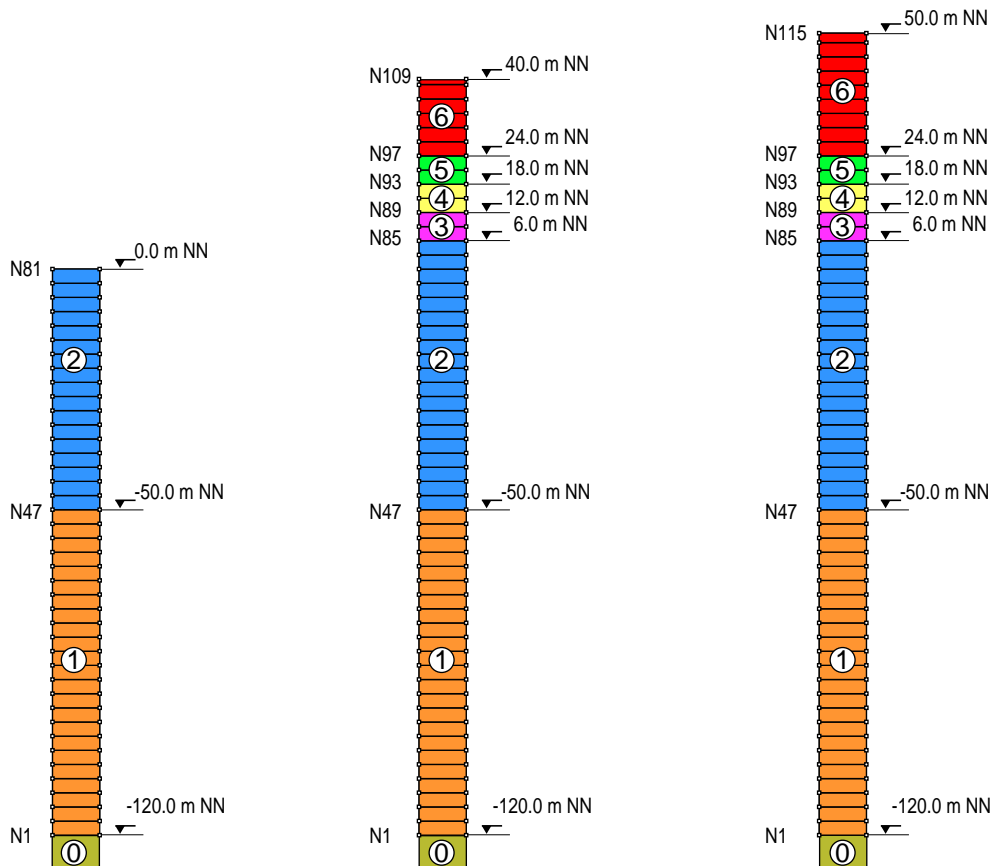


Bild 2: Eindimensionale FE-Modelle für die Höhenniveaus: 0, 40 und 50 m NN

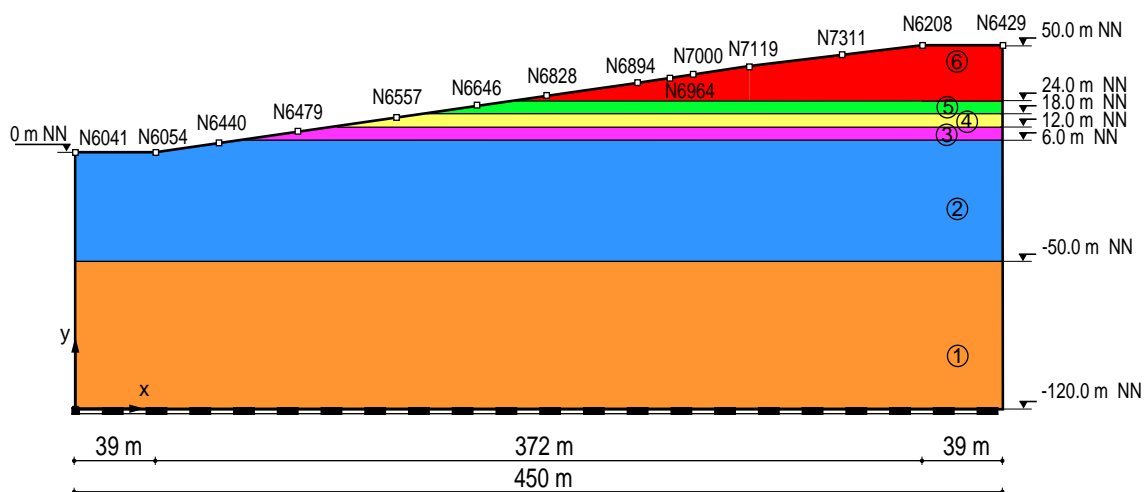


Bild 3: Lage der analysierten Knoten im zweidimensionalen FE-Modell

2. VORGEHENSWEISE

Zur Bearbeitung der Problemstellung wurde das Programmsystem DYBAST-3D eingesetzt (Sarfeld, 1994; Savidis & Sarfeld, 1980). Es können hiermit sowohl die zu analysierenden Topographieeffekte als auch die standortspezifischen Bodenprofile berücksichtigt werden. Darüber hinaus wird durch den Einsatz der Randelementtechnik in DYBAST-3D gewährleistet, daß eine konsistente Wellenausbreitung entsteht und keine Reflexionen an den Rändern der diskreten Modelle auftreten können.

Für die Durchführung der Untersuchung wurden folgende Arbeitsschritte ausgeführt:

Übertragungseigenschaften des Standortuntergrundes

- Berechnung der komplexen Übertragungsfunktion für ein horizontal geschichtetes eindimensionales Untergrundmodell ohne Oberflächentopographie (OT)
- Berechnung der komplexen Übertragungsfunktion des Gesamtsystems für ein horizontal geschichtetes zweidimensionales Untergrundmodell unter Berücksichtigung der OT entlang des Geländeschnittes
- Quantifizierung des Einflusses der OT auf die Übertragungseigenschaften des Standortuntergrundes durch Spektralquotienten

Bestimmung des Einflusses der OT auf das Bemessungs-Antwortspektrum

- Berechnung eines synthetischen Erdbebenzeitverlaufs aus dem Bemessungs-Antwortspektrum des Standortes GKSS nach Leydecker et al. (1998)
- Berechnung einer Basisanregung durch Dekonvolution (1D) des synthetischen Erdbebenzeitverlaufs von der Oberfläche des horizontal geschichteten Untergrundmodells am Standort bis in eine Tiefe von -120 m NN
- Konvolution (2D) der Basisanregung für das Gesamtsystem und Berechnung eines Freifeld-Antwortspektrums am Standort des FRG-1 mit Berücksichtigung der standortspezifischen Oberflächentopographie

- Quantifizierung des Einflusses der Oberflächentopographie auf das Bemessungs-Antwortspektrum durch Spektralquotienten

Die Analyse wurde für 14 ausgewählte Aufpunkte in 12 Höhenniveaus entlang des Geländeprofils am Standort durchgeführt (Bild 3).

3. ÜBERTRAGUNGSFUNKTIONEN 1D-UNTERGRUNDMODELLE

Eindimensionale Modelle des Untergrundes (Bild 2) berücksichtigen eine ebene geologische Schichtung, lassen aber weder eine Topographie des Geländes (Oberflächentopographie) noch eine Topographie der Schichten im Untergrund zu. Sie implizieren also eine ebene, unendlich weit ausgedehnte Schichtenfolge unter dem Aufpunkt („Meßpunkt“).

Es werden zunächst die Fälle „starrer“ und „elastischer“ homogener Halbraum (Schicht 0 in Tab. 1) unterhalb des Schichtpaketes unterschieden. Bild 4 zeigt die Beträge der zugehörigen Übertragungsfunktionen. Der starre Halbraum wirkt als „idealer“ Reflektor, es bilden sich somit starke Resonanzen innerhalb der Deckschicht über dem Halbraum aus. Im Gegensatz dazu werden die Resonanzen bei einem elastischen Halbraum als Folge der Energieemission in den Halbraum stark gedämpft. Die Variante „starrer“ Halbraum wird als unrealistischer Fall für den Standort nicht weiter verfolgt.

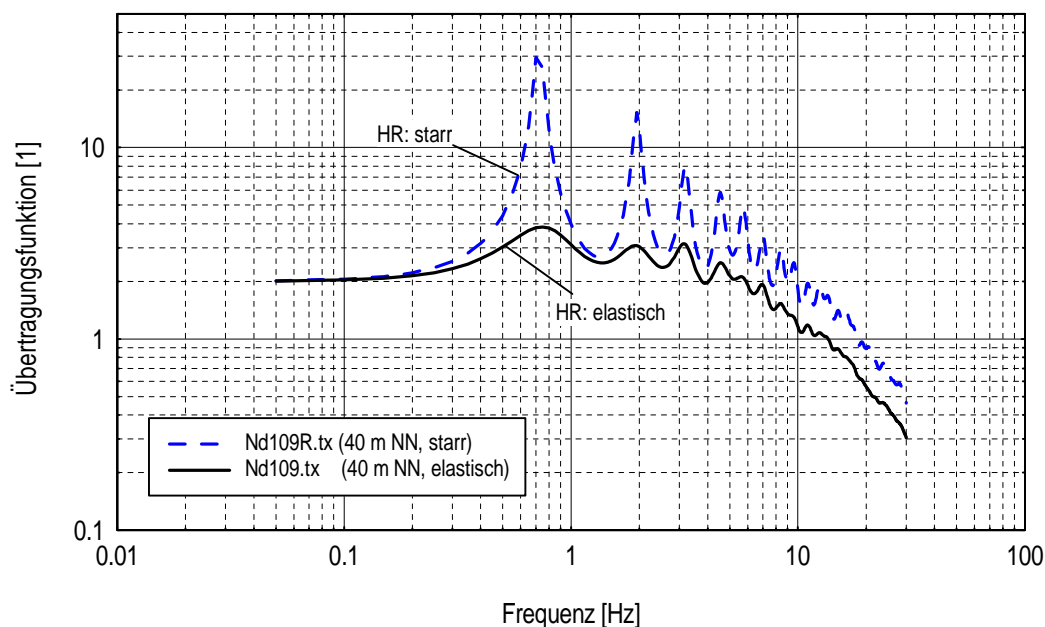


Bild 4: Übertragungsfunktion des 1D-Modells für das Höhenniveau 40 m NN für starren und elastischen (viskosen) homogenen Halbraum (HR).

4. EINFLUSS DER TOPOGRAPHIE AUF DAS ÜBERTRAGUNGSVERHALTEN

Um Effekte der Oberflächentopographie auf das Übertragungsverhalten der Untergrundstruktur am Standort GKSS zu quantifizieren, werden die Übertragungsfunktionen des zweidimensionalen Modells auf die der eindimensionalen Modelle bezogen. In Bild 5

und 6 sind die Beträge der Übertragungsfunktionen und die daraus gebildeten Spektralquotienten $Q(f)$ für Modelle mit elastischem Halbraum für zwei ausgewählte Knoten dargestellt.

In der Übertragungsfunktion des 2D-Modells ist zusätzlich zu der Information über die elastischen Materialparameter und der Schichtmächtigkeit die Information der Geometrie der Oberflächentopographie enthalten. In dem 1D-Modell eines äquivalenten Knotens (gleiches Höhenniveau) fehlt diese Information. Durch Spektrendivision wird somit der Anteil der ebenen Schichtung (1D-Modell) in der Übertragungsfunktion des 2D-Modells entfernt.

Der Spektralquotient $Q(f)$ stellt die Wirkung der Oberflächentopographie auf eine vertikal einfallende ebene Scherwelle (SV-Welle) dar. $Q(f)$ kann damit als standortspezifische Übertragungsfunktion der Oberflächentopographie bezeichnet werden.

Während der Spektralquotient am Fußpunkt (Kn. 6054, $x = 39$ m, $y = 0$ m NN) des Geländeanstiegs für alle Frequenzen eine Abschwächung gegenüber dem 1D-Modell mit ebener Schichtung um bis zu 20% zeigt (Bild 5), ist im Bereich des Reaktorgebäudes bei etwa 40 m NN ein Verstärkungseffekt von bis zu 20% bei ca. 1.2 Hz zu beobachten, um dann bei höheren Frequenzen in schmalen Frequenzbereichen zwischen $\pm 20\%$ um den Faktor 1 zu schwanken (Bild 6). Die größte Verstärkung zeigt der Aufpunkt am Gipfel des Hanges (Kn. 6208, $x = 411$ m, $y = 50$ m NN) mit ca. 35%, bei etwa 1 Hz.

Generell zeigt der Spektralquotient für die ausgewählten Knoten folgende Merkmale:

- Eine frequenzabhängige Verstärkung durch OT, die zunimmt je höher man sich auf dem Geländeanstieg befindet.
- ausgeprägte Maxima nahe der Frequenz 1 Hz
- Wechsel dieser Maxima von „negativer“ Verstärkung ($Q(f) < 1$) zu „positiver“ Verstärkung ($Q(f) > 1$) und ein Anwachsen der Maxima mit steigender Geländehöhe
- Die Maxima zeigen eine Abnahme ihrer Frequenz mit der Geländehöhe, ähnlich wie die Grundmoden der Übertragungsfunktionen.

Deutlich werden diese Merkmale in Bild 7, in der die Spektralquotienten von drei verschiedenen Höhenniveaus zusammen dargestellt sind.

5. EINFLUSS AUF DAS BEMESSUNGS-ANTWORTSPEKTRUM

Im folgenden wird untersucht, wie sich die Oberflächentopographie auf das Bemessungs-Antwortspektrum des Standortes auswirkt. Die Vorgehensweise ist in der Prinzip-Skizze in Bild 8 veranschaulicht und wird nun näher erläutert.

Für alle 14 analysierten Knoten erfolgt die Anregung an der Modellbasis mit jeweils identischer Zeitfunktion $a_b(t)$. Diese Basisanregung ist ein künstlicher Zeitverlauf, der aus dem Bemessungs-Antwortspektrum nach der Methode von Gasparini & Vanmarcke (1976) generiert und anschließend durch Dekonvolution von der Geländeoberfläche bei +40 m NN (Reaktorgebäude) auf die Modellbasis bei -120 m NN zurückgerechnet wurde (Bilder 9 bis 11).

Die Quantifizierung der Topographieeffekte bezüglich der Antwortspektren erfolgt ebenfalls nach der Methode der Spektrendivision, wie sie im Kap. 4 für die Übertragungsfunktionen definiert wurde. Für einen zu untersuchenden Knoten an der Oberfläche im FE-Modell wird das Freifeld-Antwortspektrum aus dem zweidimensionalen Untergrundmodell sowie für einen äquivalenten Knoten im eindimensionalen Modell

berechnet. Beide Spektren werden anschließend dividiert. Infolge der Spektren-Division (2D/1D-Modell) wird der Anteil, der ausschließlich auf der ebenen Schichtung beruht, im Antwortspektrum näherungsweise eliminiert. Wegen der nicht-linearen Beziehung zwischen Antwortspektrum und anregendem Beschleunigungs-Zeitverlauf, müssen die Spektralquotienten $Q_A(f_i)$ der Antwortspektren von denen der Übertragungsfunktionen abweichen.

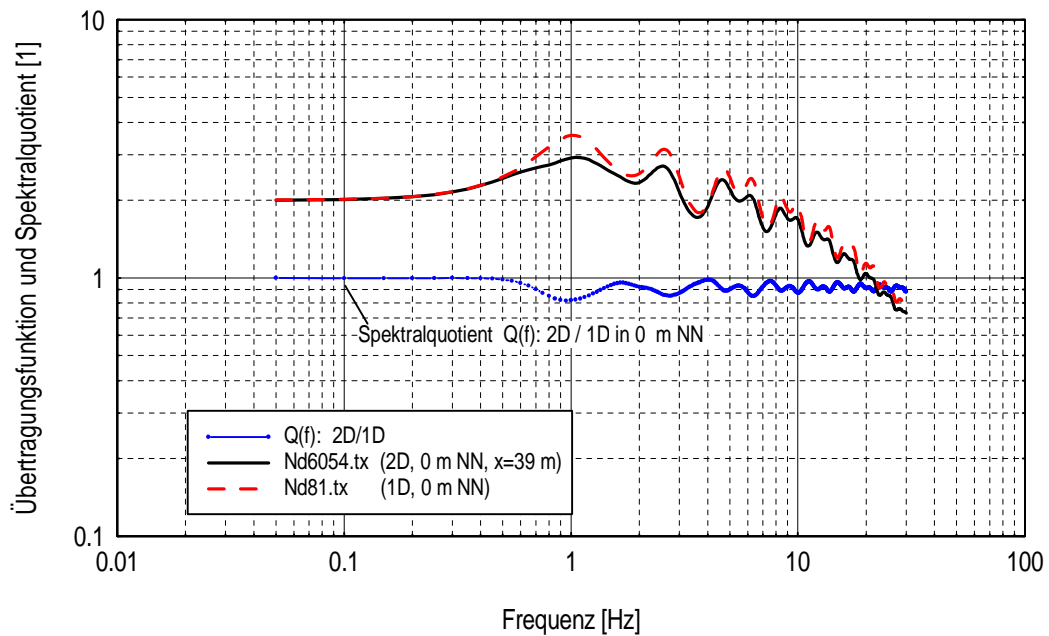


Bild 5: Betrag der Übertragungsfunktionen von 1D- und 2D-Modell und Spektralquotient $Q(f)$ bei $x = 39$ m und $y = 0.0$ m NN (Knoten 6054)

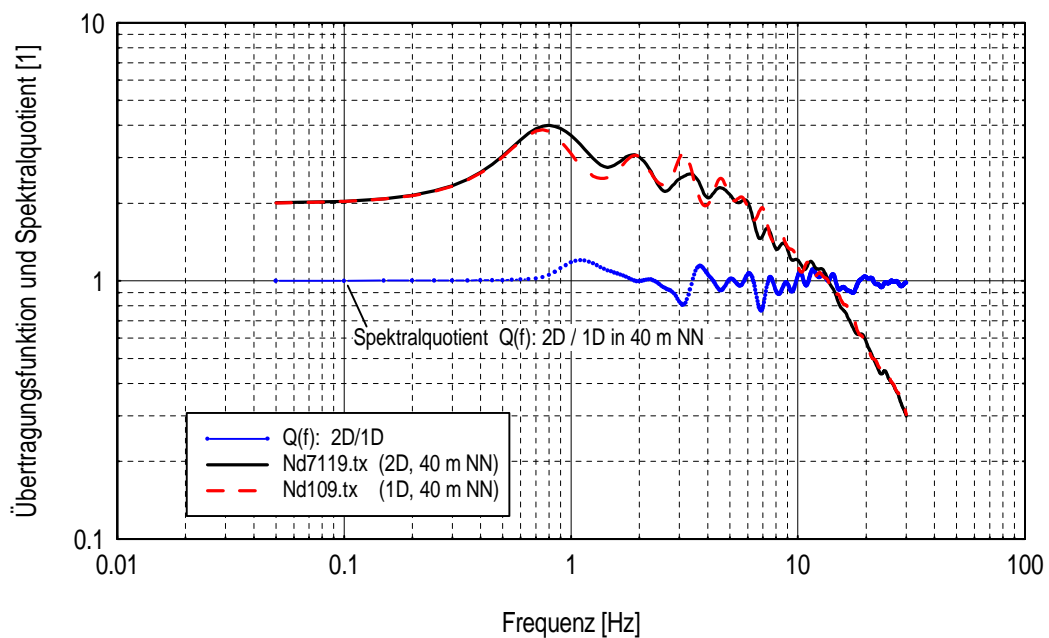


Bild 6: Betrag der Übertragungsfunktionen von 1D- und 2D-Modell und Spektralquotient bei $x = 327$ m und $y = 40$ m NN (Knoten 7119)

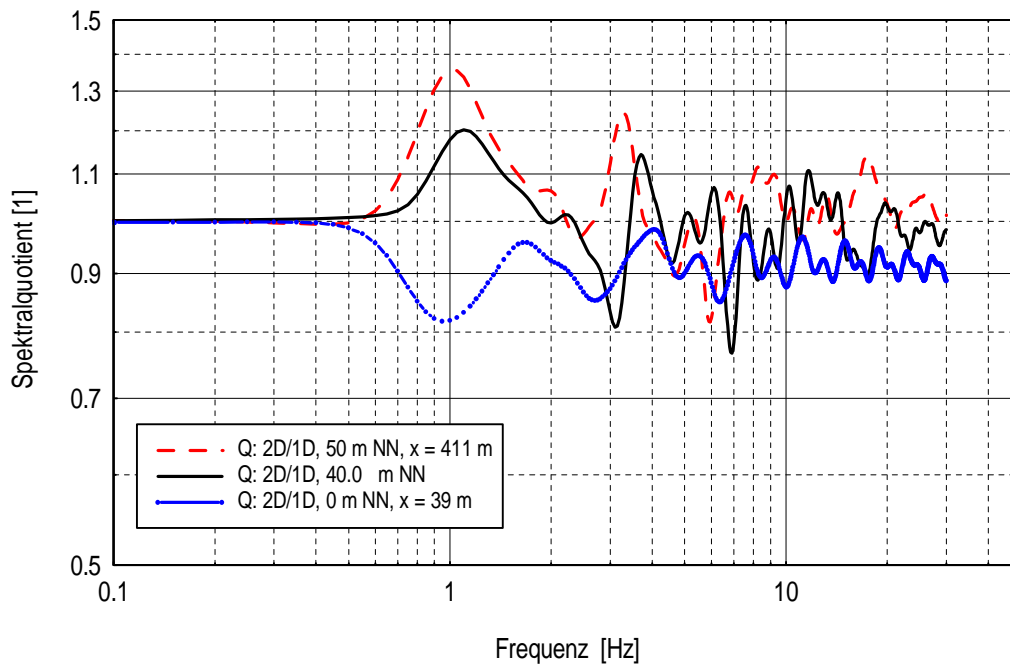


Bild 7: Vergleich der Spektralquotienten $Q(f)$ der Übertragungsfunktionen für drei verschiedene Geländehöhen: 0, 40 und 50 m NN.

Bild 12 zeigt diese Antwortspektren sowie deren Spektralquotient $Q_A(f)$ für das Geländeniveau 40 m NN. Wegen der kaum sichtbaren Unterschiede zwischen den Antwortspektren aus dem ein- und zweidimensionalen Modell bei doppeltlogarithmischer Darstellung, wird nur ein vergrößerter Ausschnitt in halblogarithmischer Form gezeigt.

Im Vergleich zu dem bereits durch einen Polygonzug stark geglätteten Bemessungs-Antwortspektrum haben die berechneten „synthetischen“ Antwortspektren einen rauhen Kurvenverlauf, der sich ebenfalls im Spektralquotient $Q_A(f)$ widerspiegelt. Um den charakteristischen Verlauf dieser Größe herauszuarbeiten, wird der Spektralquotient geglättet. Es erwies sich als geeignet, eine gleitende Mittelwertbildung (*sliding data window, sdw*) über sieben benachbarte Stützstellen vorzunehmen. Das Ergebnis dieser Operation ist in Bild 13 dargestellt. Die Stützstellen des Spektralquotienten sind als Punkte eingezeichnet.

Die Analyse der Antwortspektren an den ausgewählten Knoten des Geländeanstiegs ergab wie erwartet, daß die Spektralquotienten $Q_A(f)$ ähnliche Phänomene zeigen, wie die Spektralquotienten $Q(f)$ der Übertragungsfunktionen, also eine Abschwächung ($Q_A(f) < 1$) im unteren Hangbereich und eine Zunahme für die höheren Geländehöhen ($Q_A(f) > 1$).

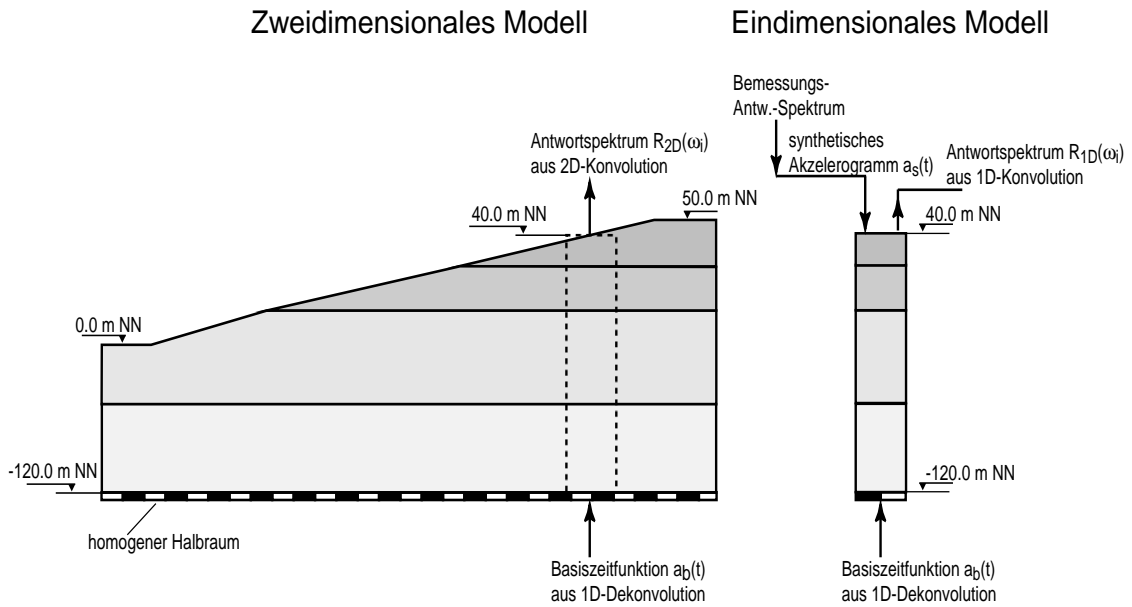


Bild 8: Prinzip-Skizze zur Berechnung von Antwortspektren aus den 1D- & 2D Modellen

Im relevanten Niveau von ca. 40 m NN (Bereich des Reaktorgebäudes) zeigen die Spektralquotienten $Q_A(f)$ ebenfalls ein ausgeprägtes Maximum für Frequenzen um ca. 1 Hz aber mit einer geringeren Verstärkung von etwa 15%. Für höhere Frequenzen schwanken die $Q_A(f)$ Werte in schmalen Frequenzbändern zwischen ca. $\pm 10\%$ um den Verstärkungsfaktor 1 (Bild 13).

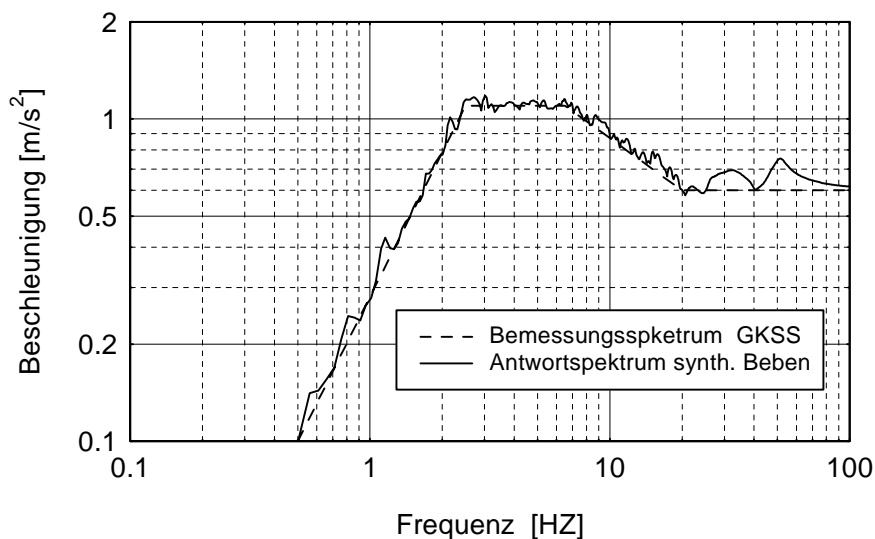


Bild 9: Antwortspektrum des synthetischen Beschleunigungszeitverlaufs $a_s(t)$ im Vergleich zum Bemessungs-Antwortspektrum

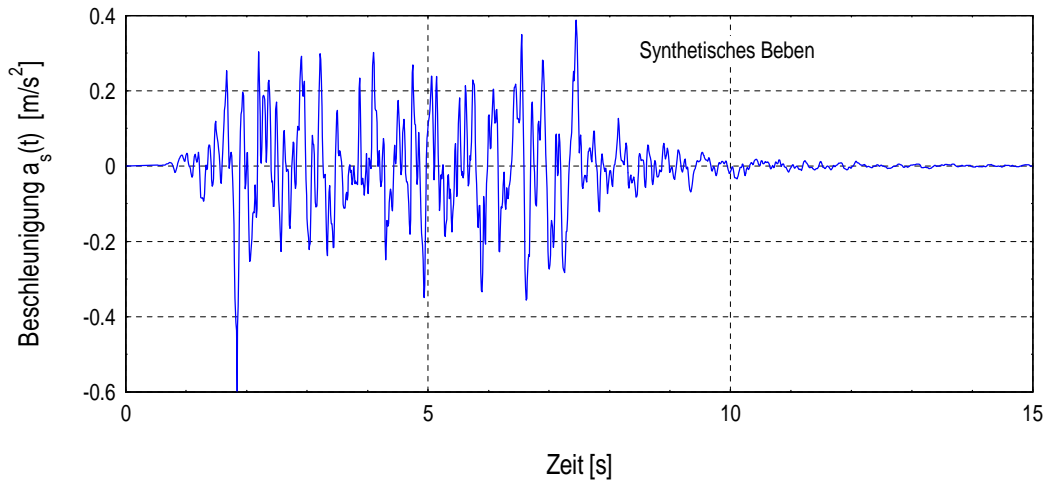


Bild 10: künstlicher Beschleunigungszeitverlauf generiert mit SIMQKE

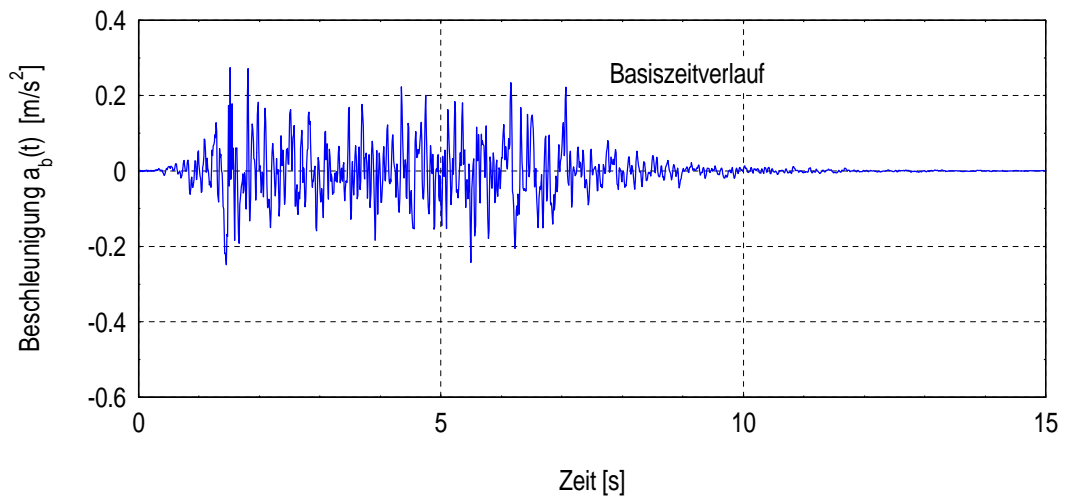


Bild 11: Basiszeitverlauf bei -120m NN durch Dekonvolution berechnet

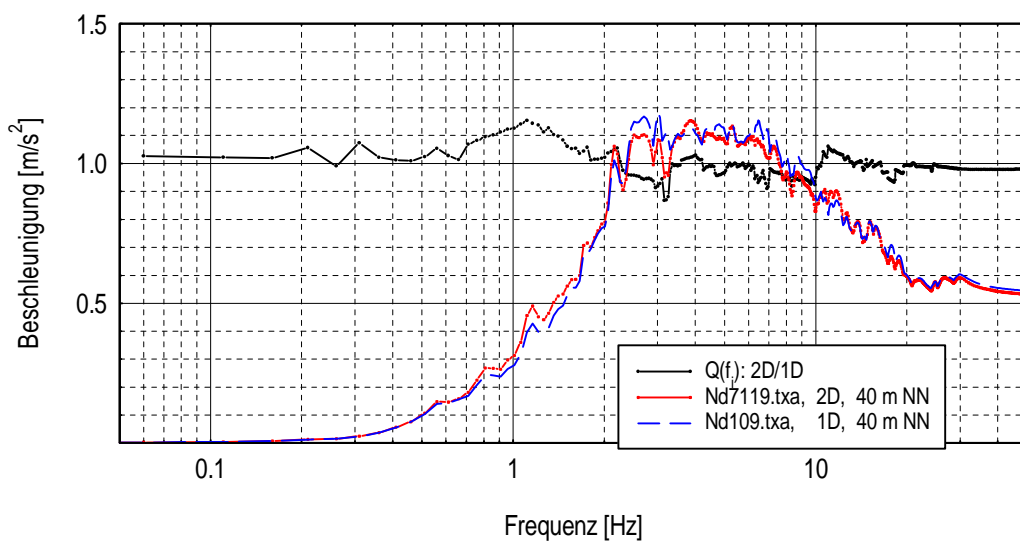


Bild 12: Antwortspektren der 1D- und 2D-Finite-Element-Modelle und daraus berechneter Spektralquotient $Q_A(f_i)$ für das Geländeniveau 40 m NN.

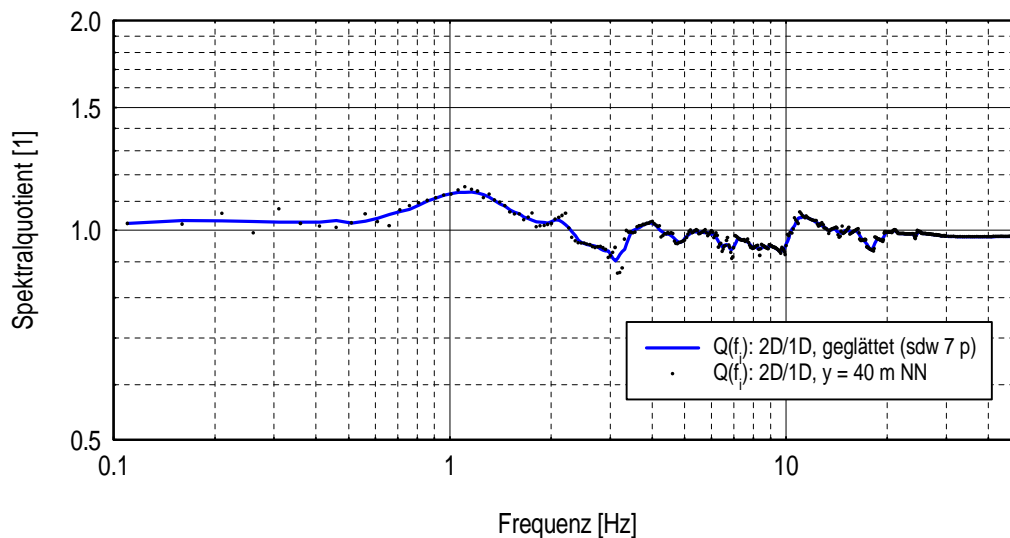


Bild 13: Spektralquotient der Antwortspektren: Für das Geländeniveau 40 m NN (Punkte) und durch gleitende Mittelung geglättet (durchgezogene Linie).

6. SCHLUSSFOLGERUNG

Die Ergebnisse der vorliegende Untersuchung zeigen, daß ein frequenz- und ortsabhängiger Einfluß der Oberflächentopographie auf den Durchgang seismischer Wellen am Standort GKSS vorhanden ist und von der Lage am Geländeanstieg abhängt. Die Auswirkungen auf das Bemessungs-Antwortspektrum bleiben jedoch gering.

7. LITERATUR:

- Christensen, S., Kirsch, R., Schenk, P.-F., Schmidt, R., & Kaiser, D. (1997): Seismologische Standortbeurteilung für das geplante Notstromgebäude des Forschungsreaktors der GKSS in Geesthacht. Gutachten des Landesamtes für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein
- Gasparini D.A. & E.H. Vanmarcke (1976): Simulated earthquake motions compatible with prescribed response spectra. In: Evaluation of Seismic Safety of Buildings, Rep. No.2, MIT Publ. No. R76-4, Order No. 527, 65 pp.
- Leydecker, G., Kopera, J.R. & Rudloff, A. (1998): Seismologische Stellungnahme für die Standorte Krümmel und GKSS Geesthacht. -- Im Auftrag der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln. - Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr.: 117 421, Hannover.
- Sarfeld, W. (1994): Numerische Verfahren zur dynamischen Boden-Bauwerk Interaktion. Dissertation Fachbereich Bauingenieurwesen und angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Berlin.
- Sanchez-Sesma, F.J. (1987): Site effects on strong ground motion. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1987, Vol. 6, No.2, 124-127.
- Savidis, S. & Sarfeld, W. (1980): Verfahren und Anwendung der dreidimensionalen dynamischen Wechselwirkung. In: Vorträge der Baugrundtagung 1980 in Mainz. Aufgelegt in "Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., S. 47-78.