

# Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben

## Verfahrensunterlage

**Titel:** Beanspruchung der ERAM Schächte durch Erdbeben  
**Autor:** Göbel, I. & Pfeiffer, R.  
**Erscheinungsjahr:** 2000  
**Unterlagen-Nr.:** P 096  
**Revision:** 00  
**Unterlagenteil:**



Inhalt:

|   |    |
|---|----|
| Verkürzte Zusammenfassung                             | 4  |
| 1 Zielsetzung und Aufgabenstellung                    | 5  |
| 2 Eingabegrößen                                       | 6  |
| 2.1 Übertage-Bemessungsantwortspektrum                | 6  |
| 2.2 Deckgebirgsaufbau und -eigenschaften              | 7  |
| 2.2.1 Schacht MARIE                                   | 7  |
| 2.2.2 Schacht BARTENSLEBEN                            | 9  |
| 2.3 Schachtmauerwerk                                  | 11 |
| 2.4 Schachtausbau                                     | 12 |
| 2.4.1 Schacht MARIE                                   | 12 |
| 2.4.2 Schacht BARTENSLEBEN                            | 12 |
| 3 Ergebnisse für das Deckgebirgsverhalten             | 13 |
| 3.1 Amplitude der Übertragungsfunktion                | 13 |
| 3.1.1 Schacht MARIE                                   | 13 |
| 3.1.2 Schacht BARTENSLEBEN                            | 14 |
| 3.2 Zeitverlaufsmethode                               | 15 |
| 3.2.1 Schacht MARIE                                   | 15 |
| 3.2.1.1 Maximale Bewegungsgrößen aus S-Wellenanregung | 15 |
| 3.2.1.2 Maximale Scherdehnungen im Deckgebirge        | 17 |
| 3.2.1.3 Antwortspektren am Modell-Fußpunkt            | 18 |
| 3.2.2 Schacht BARTENSLEBEN                            | 19 |
| 3.2.2.1 Maximale Bewegungsgrößen aus S-Wellenanregung | 19 |
| 3.2.2.2 Maximale Scherdehnungen im Deckgebirge        | 21 |
| 3.2.2.3 Antwortspektren am Modell-Fußpunkt            | 21 |
| 4 Schnittgrößen für den Schachtausbau                 | 23 |
| 4.1 Schachtausbau MARIE                               | 23 |

|     |                             |    |
|-----|-----------------------------|----|
| 4.2 | Schachtausbau BARTENSLEBEN  | 25 |
| 5   | Zusammenfassung             | 28 |
| 6   | Literaturverzeichnis        | 30 |
| 7   | Abkürzungsverzeichnis       | 32 |
| 8   | Verzeichnis der Tabellen    | 33 |
| 9   | Verzeichnis der Abbildungen | 34 |

Gesamtblattzahl:

34 Seiten

## Verkürzte Zusammenfassung

Autor: Göbel, I., Pfeiffer, R.  
Titel: Beanspruchung der ERAM-Schächte durch Erdbeben  
Stichwörter: Bemessungserdbeben, Schnittgrößen, Übertragungsfunktion, Zeitverlaufsmethode

Für die Beurteilung der Zusatzbelastung der Schächte durch ein standortspezifisches Bemessungsbeben werden eindimensionale numerische Gebirgsmodelle eingesetzt. Die physikalischen Parameter des Gebirges stammen aus Auswertungen von *in situ*-Messungen (GÖBEL & PFEIFFER 2000), ergänzt durch Schätzwerte. Die Materialgrößen werden variiert, um ihren Einfluß auf die Schnittgrößen im Schachtausbau abzuschätzen. Die für die Zeitverlaufsmethode eingesetzten synthetischen Zeitreihen werden aus dem Übertage-Bemessungsantwortspektrum des Standortes (LEYDECKER & KOPERA 1999) abgeleitet. Die Beanspruchung erfolgt durch senkrecht von unten einfallende S- und P-Wellen. Die Verformungsgrößen des Deckgebirges und die Schnittgrößen (Längs- und Querkraft, Biegemoment) der Schachtausbaue werden ermittelt. Die maximalen Beträge der Verschiebungen und der Schnittgrößen werden als Funktion der Teufe aus den Zeitreihen bestimmt.

## 1 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Ziel ist die Abschätzung der Zusatzbeanspruchung der Schächte durch ein Bemessungsbeben auf der Basis des neuesten Erkundungsstandes für das Deckgebirge in der Nähe der Schächte (GÖBEL & PFEIFFER 2000) und des letzten standortspezifischen seismologischen Gutachtens (LEYDECKER & KOPERA 1999).

Die Einteilung des Deckgebirges um die Schächte in Homogenbereiche sowie die Abmessungen und Eigenschaften der Schachtausbaue werden von KLEIN, STADIE & GÄRTNER (1999) übernommen. Die Bestimmung der dynamischen Deckgebirgseigenschaften geschieht nach den Auswertungen von *in situ*-Messungen von Dichte, P- und S-Wellengeschwindigkeit in schachtnahen Erkundungsbohrlöchern (GÖBEL & PFEIFFER 2000).

Es werden für die numerischen Berechnungen folgende Annahmen getroffen:

- Das Deckgebirge ist isotrop und lateral homogen.
- Die Gesteinsschichten verhalten sich linear-elastisch\*.
- Nichtlineare Effekte wie Bodenverflüssigung sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung.
- Die Wechselwirkung zwischen Schachtausbau und Deckgebirge wird vernachlässigt. Der Schachtausbau hat Kontakt zum Deckgebirge und wird vom Deckgebirge verformt. Der Bodenaushub spielt keine Rolle. Eine eventuell vorhandene Auflockerungszone um den Schachtausbau wird nicht berücksichtigt.
- Das Deckgebirge wird durch ein eindimensionales Modell (d. h. planparallele horizontale Schichten) dargestellt.
- Das Verhalten des Deckgebirges wird über die Finite-Elemente-Methode bestimmt (Programm DYBAST-3D von SARFELD 1995). Teilweise werden Berechnungen auch mit einer analytischen Methode (vgl. SCHNABEL, LYSMER & SEED 1972) durchgeführt.

---

\* Es wird im Folgenden geprüft werden, ob die Scherdehnungen, die durch das standortspezifische Bemessungsbeben hervorgerufen werden, klein genug sind, um dieser Annahme zu genügen.

- Der Schacht wird numerisch durch Balkenelemente modelliert. Die Verformungen des Deckgebirges werden den Balkenelementen aufgezwungen.
- Die Anregung erfolgt durch horizontal und vertikal wirkende Zeitreihen, deren Verlauf auf der Grundlage des Übertage-Spektrums von LEYDECKER & KOPE-RA (1999) ermittelt wird.
- Der untere Rand der Modelle für die Schacht-Standorte befindet sich auf einer Teufe von 500 m unterhalb des Salzspiegels.
- Die Amplitude der P-Welle ist halb so groß wie die Amplitude der S-Welle (siehe auch LEYDECKER & KOPERA 1999) .

## **2 Eingabegrößen**

### **2.1 Übertage-Bemessungsantwortspektrum**

Die für die Zeitverlaufsmethode benötigten synthetischen Zeitreihen werden aus dem Übertage-Bemessungsantwortspektrum von LEYDECKER & KOPERA (1999) abgeleitet. Die Erzeugung geschieht mit dem Algorithmus von GASPARINI & VANMARCKE (1976). Die von der KTA 2201.4 (1990) geforderten Kriterien für die Spektrumkompatibilität von Zeitreihen werden erfüllt. Die Zeitreihen sind basis- und null-linienkorrigiert, um numerische Fehler bei den anschließenden Rechenläufen klein zu halten.

Die Dauer des gesamten Bebens beträgt 12.8 s. Als Zeitschrittweite wird ein Wert von 0.005 s gewählt.

Testrechnungen haben ergeben, dass nur die Ergebnisse für Deckgebirgsverformungen je nach Zeitreihe variieren können, dass jedoch die hier interessierenden Schnittgrößen im Schachtausbau für alle Zeitreihen nur sehr wenig voneinander abweichen, so dass sich die Darstellung hier auf die Ergebnisse einer einzigen Zeitreihe beschränkt.

## 2.2 Deckgebirgsaufbau und -eigenschaften

Die dynamischen Eigenschaften werden in den Homogenbereichen als konstant angenommen. Die Bodenschichten sind hysteretisch gedämpft. Die Dämpfungsgrade der einzelnen Schichten werden geschätzt.

Überall da, wo die Auswertung der *in situ*-Logs aus den schachtnahen Erkundungsbohrungen (GÖBEL & PFEIFFER 2000) keine Ergebnisse erzielt hat, werden Gesteinsparameter über die von KLEIN, STADIE & GÄRTNER (1999) zusammengestellten Ergebnisse von statischen Tests und die empirischen Ausgleichshyperbeln

$$\frac{E_{\text{dyn}}}{E_{\text{stat}}} = a + \frac{b}{E_{\text{stat}}} \quad (2-1)$$

bestimmt. Für den Parameter a wird ein Wert von 1.35 vorgegeben (vgl. GÖBEL & PFEIFFER 2000). Die Größe von Parameter b ist für verschiedene Datensätze Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Empirischer Parameter b der Ausgleichshyperbeln für verschiedene Datensätze, Gleichung ( 2-1 ).

| Name des Datensatzes                                 | b     |
|--|-------|
| MARIE  | 18500 |
| ERAM   | 15000 |
| BARTENSLEBEN   | 14000 |
| Obergrenze Fels (HAUPT & HERRMANN 1987)              | 4617  |
| Untergrenze Fels (HAUPT & HERRMANN 1987)             | 2480  |
| bindige & nichtbindige Böden (HAUPT & HERRMANN 1987) | 124   |

### 2.2.1 Schacht MARIE

Tabelle 2 zeigt die den dynamischen Berechnungen zugrundegelegten Eingabeparameter. Mit Ausnahme von Homogenbereich 1 liegen für alle Homogenbereiche *in situ* bestimmte Messwerte von Dichte, P- und S-Wellengeschwindigkeit vor (GÖBEL & PFEIFFER 2000).

Beim Homogenbereich 1 wird die Dichte der Deckschicht als ungefährender Wert aus den Messungen von Schacht BARTENSLEBEN übernommen, vgl. Ab-

schnitt 2.2.2. Die S- und P-Wellengeschwindigkeiten folgen aus der im statischen Versuch bestimmten Querkontraktionszahl, dem Schätzwert für den statischen E-Modul (nach KLEIN, STADIE & GÄRTNER 1999) und aus dem Verhältnis aus dynamischem und statischem E-Modul nach Gleichung ( 2-1 ) und Tabelle 1 für  $b = 124$  (Böden). Abbildung 1 zeigt das Profil der S-Wellengeschwindigkeit. Zum Vergleich sind die Ergebnisse für eine grobe Abschätzung der Wellengeschwindigkeit aus statischen Messergebnissen mit eingetragen worden.

Tabelle 2: Modellierung der Umgebung von Schacht MARIE.

Für die grau schattierten Werte von Materialparametern liegen *in situ*-Messwerte (GÖBEL & PFEIFFER 2000) vor.

| Homogenbereich<br>Nr. | Stratigraphische<br>Einheit | Mächtigkeit<br>[m] | Dichte<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | S-Wellen-<br>Geschwindigkeit<br>[m/s] | P-Wellen-<br>Geschwindigkeit<br>[m/s] | Dämpfungs-<br>grad |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|
| 1                     | qw + qs                     | 8                  | 2200                           | 254                                   | 598                                   | 0.050              |
| 2                     | jm                          | 142                | 2385                           | 1805                                  | 2966                                  | 0.010              |
| 3                     | jm                          | 26                 | 2343                           | 1897                                  | 2921                                  | 0.010              |
| 4                     | cr                          | 19                 | 2702                           | 3008                                  | 4883                                  | 0.003              |
| 5                     | cr                          | 73.8               | 2780                           | 3009                                  | 5070                                  | 0.003              |
| 6                     | z                           | 500                | 2063                           | 2434                                  | 4392                                  | 0.001              |



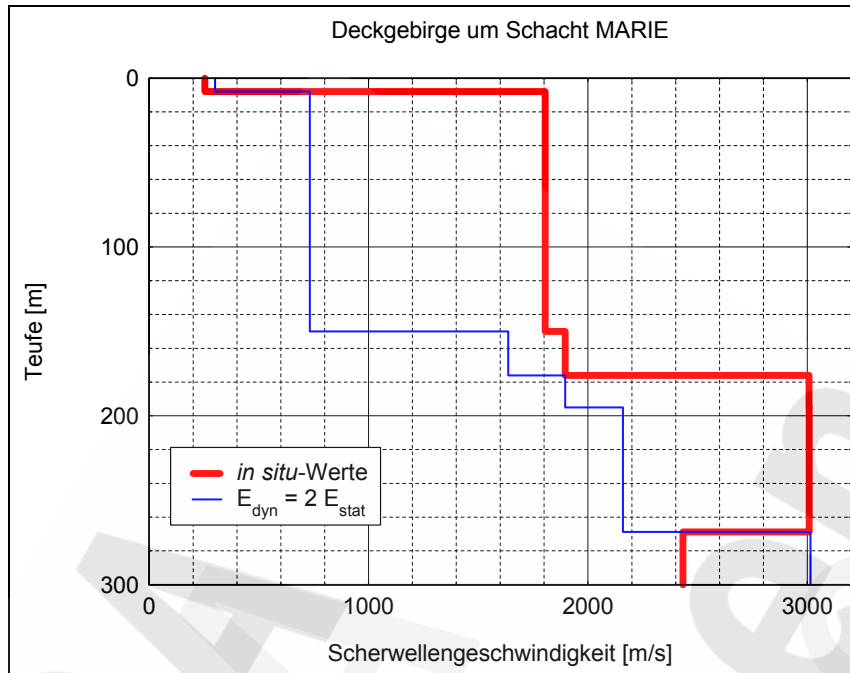


Abbildung 1: Scherwellen-Geschwindigkeit als Funktion der Tiefe für das Deckgebirge um Schacht MARIE.

### 2.2.2 Schacht BARTENSLEBEN

Tabelle 3 zeigt die den dynamischen Berechnungen zugrundegelegten Eingabeparameter mit den geschätzten Dämpfungsgraden der hysteretisch gedämpften Deckgebirgsschichten. Im Homogenbereich 1 ist die *in situ* gemessene P-Wellengeschwindigkeit relativ hoch. Da in dieser Arbeit Parameterstudien durchgeführt werden, wird der Wert beibehalten.

Dort, wo keine S-Wellengeschwindigkeit gemessen werden konnte, muss sie geschätzt werden. Es wird wieder von der Hyperbelgleichung (2-1) für  $E_{\text{dyn}}/E_{\text{stat}}$  ausgegangen, zusammen mit einem der empirisch ermittelten Parameter für  $b$  aus Tabelle 1. Aus dem Verhältnis  $E_{\text{dyn}}/E_{\text{stat}}$  folgt zusammen mit dem Schätzwert des statischen E-Moduls nach KLEIN, STADIE & GÄRTNER (1999) und den *in situ* Messwerten eine S-Wellengeschwindigkeit und eine Querkontraktionszahl.

Für die oberflächennahe Schicht (Homogenbereich 1) erhält man mit  $b = 124$  für Böden (vgl. Tabelle 1) den in Tabelle 3 aufgeführten Wert. Für die Homogenbereiche 2 bis 4 wird mit  $b = 4617$  gearbeitet, und für die Homogenbereiche 7 bis 9 wird  $b = 14000$  angesetzt. Im Homogenbereich 7 wurde der statische E-

Modul heraufgesetzt, da für die dynamische Betrachtung die mittleren Eigenschaften des Deckgebirges von Interesse sind. Mit diesen Annahmen ergibt sich der Datensatz von Tabelle 3 und Abbildung 2.

Alternativ ist in Abbildung 2 ein Geschwindigkeitsverlauf eingezeichnet worden, in der Legende betitelt mit „*in situ*-Werte,  $v_s$  groß“, bei dem die S-Wellengeschwindigkeit für alle Homogenbereiche ausser dem ersten mit  $b = 14000$  geschätzt wird.

Tabelle 3: Modellierung der Umgebung von Schacht BARTENSLEBEN.

Für die grau schattierten Werte von Materialparametern liegen *in situ*-Messwerte vor.

| Homogenbereich<br>Nr. | Stratigraphische<br>Einheit | Mächtigkeit<br>[m] | Dichte<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | S-Wellen-<br>Geschwindigkeit<br>[m/s] | P-Wellen-Ge-<br>schwindigkeit<br>[m/s] | Dämpfungs-<br>grad |
|-----------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------------------|---------------------------------------|--|--------------------|
| 1                     | q + ko(1)                   | 8                  | 2228                           | 243                                   | 2029                                   | 0.050              |
| 2                     | ko(1)                       | 27                 | 2231                           | 901                                   | 2227                                   | 0.010              |
| 3                     | kmSM                        | 7                  | 2316                           | 1007                                  | 2342                                   | 0.010              |
| 4                     | kmSM                        | 27                 | 2342                           | 1339                                  | 2421                                   | 0.010              |
| 5                     | kmGo                        | 76                 | 2376                           | 1847                                  | 3449                                   | 0.010              |
| 6                     | kmGo                        | 32                 | 2355                           | 1961                                  | 3179                                   | 0.010              |
| 7                     | kmS                         | 0.2                | 2219                           | 1616                                  | 2502                                   | 0.010              |
| 8                     | kmS                         | 8.8                | 2192                           | 1626                                  | 2359                                   | 0.010              |
| 9                     | kmS                         | 51                 | 2258                           | 1571                                  | 2363                                   | 0.010              |
| 10                    | kmGu                        | 17                 | 2297                           | 1717                                  | 2535                                   | 0.010              |
| 11                    | cr                          | 19.5               | 2428                           | 2464                                  | 4702                                   | 0.003              |
| 12                    | z                           | 500                | 2106                           | 2534                                  | 4701                                   | 0.001              |

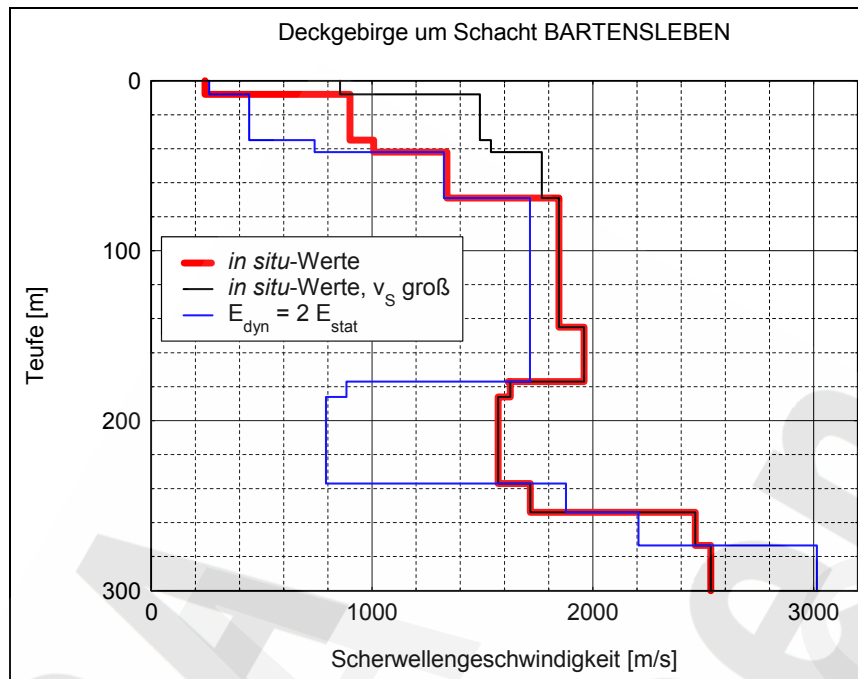


Abbildung 2: Scherwellen-Geschwindigkeit als Funktion der Teufe für das Deckgebirge um Schacht BARTENSLEBEN.

### 2.3 Schachtmauerwerk

Die Eigenschaften des Mauerwerks für den Schachtausbau sind Tabelle 4 zu entnehmen. Es wird postuliert, dass der dynamische E-Modul dem Doppelten des statischen E-Moduls entspricht. Die Dichte wurde von den Gutachtern (KLEIN, STADIE & GÄRTNER 1999) nicht bestimmt. Es wird mit einem Schätzwert von  $2000 \text{ kg/m}^3$  gearbeitet, da Testrechnungen gezeigt haben, dass der Einfluss der Dichte auf die Schnittgrößen gering ist. Der Dämpfungsgrad in Tabelle 4 entspricht den Vorgaben der KTA 2201.4 (1990;Tabelle 4-1).

Die maximale Elementlänge für Finite-Elemente-Berechnungen liegt für das Schachtmauerwerk bei etwa zehn Metern (für eine maximale Frequenz von 50 Hz).

Tabelle 4: Eingabegrößen für das Mauerwerk in DYBAST-3D (SARFELD 1995)

| Dichte<br>[ $\text{kg/m}^3$ ] | dynamischer E-Modul<br>[ $\text{N/mm}^2$ ] | dynamischer Schubmodul<br>[ $\text{N/mm}^2$ ] | Dämpfungsgrad |
|-------------------------------|--|---|---------------|
| 2000                          | 30000                                      | 12000   | 0.07          |

## 2.4 Schachtausbau

### 2.4.1 Schacht MARIE

Die teufenabhängigen Abmessungen des Schachtausbaus mit für das Balkenmodell wichtigen Eingabegrößen sind in Tabelle 5 zusammengestellt worden. Es gibt drei unterschiedliche Geometrien für den Schachtausbau. Die Abmessungen sind in jedem Homogenbereich jeweils konstant. Das Ende des Schachtausbaus befindet sich auf 522 m Teufe.

Tabelle 5: Schachtausbau MARIE nach KLEIN, STADIE & GÄRTNER (1999).

| Homogenbereich Nr. | Innendurchmesser | Wandstärke | Aussendurchmesser | Querschnittsfläche | Schubfläche       | Flächenträgheitsmoment |
|--------------------|------------------|------------|-------------------|--------------------|-------------------|------------------------|
|                    |                  | [m]        | [m]               | [m <sup>2</sup> ]  | [m <sup>2</sup> ] | [m <sup>4</sup> ]      |
| 1                  | 5.32             | 0.490      | 6.30              | 8.94               | 4.47              | 38.01                  |
| 2                  | 5.32             | 0.615      | 6.55              | 11.47              | 5.73              | 51.03                  |
| 3                  | 5.32             | 0.490      | 6.30              | 8.94               | 4.47              | 38.01                  |
| 4                  | 5.32             | 0.615      | 6.55              | 11.47              | 5.73              | 51.03                  |
| 5                  | 5.32             | 0.365      | 6.05              | 6.52               | 3.26              | 26.44                  |
| 6                  | 5.32             | 0.365      | 6.05              | 6.52               | 3.26              | 26.44                  |

### 2.4.2 Schacht BARTENSLEBEN

Die teufenabhängigen Abmessungen des Schachtausbaus mit für das Balkenmodell wichtigen Eingabegrößen sind in Tabelle 6 zusammengestellt worden. Es gibt drei unterschiedliche Geometrien für den Schachtausbau, die zudem nicht mit denen von Schacht MARIE übereinstimmen. Die Abmessungen des Schachtausbaus sind ausser im Homogenbereich 12 in jedem Homogenbereich konstant. Das Ende des Schachtausbaus befindet sich auf 526 m Teufe.

Tabelle 6: Schachtausbau BARTENSLEBEN nach KLEIN, STADIE & GÄRTNER (1999).

| Homogenbereich Nr. | Innendurchmesser [m] | Wandstärke [m]    | Aussendurchmesser [m] | Querschnittsfläche [m <sup>2</sup> ] | Schubfläche [m <sup>2</sup> ] | Flächenträgheitsmoment [m <sup>4</sup> ] |
|--------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------------------|-------------------------------|--|
| 1                  | 5.25                 | 0.49              | 6.23                  | 8.84                                 | 4.42                          | 36.66                                    |
| 2                  | 5.25                 | 0.49              | 6.23                  | 8.84                                 | 4.42                          | 36.66                                    |
| 3                  | 5.25                 | 0.49              | 6.23                  | 8.84                                 | 4.42                          | 36.66                                    |
| 4                  | 5.25                 | 0.49              | 6.23                  | 8.84                                 | 4.42                          | 36.66                                    |
| 5                  | 5.25                 | 0.49              | 6.23                  | 8.84                                 | 4.42                          | 36.66                                    |
| 6                  | 5.25                 | 0.615             | 6.47                  | 11.23                                | 5.61                          | 48.73                                    |
| 7                  | 5.25                 | 0.615             | 6.47                  | 11.23                                | 5.61                          | 48.73                                    |
| 8                  | 5.25                 | 0.615             | 6.47                  | 11.23                                | 5.61                          | 48.73                                    |
| 9                  | 5.25                 | 0.615             | 6.47                  | 11.23                                | 5.61                          | 48.73                                    |
| 10                 | 5.25                 | 0.615             | 6.47                  | 11.23                                | 5.61                          | 48.73                                    |
| 11                 | 5.25                 | 0.615             | 6.47                  | 11.23                                | 5.61                          | 48.73                                    |
| 12a                | 5.25                 | 0.615 (bis 482 m) | 6.47                  | 11.23                                | 5.61                          | 48.73                                    |
| 12b                | 5.25                 | 0.375 (bis 526 m) | 5.97                  | 6.34                                 | 3.17                          | 25.06                                    |

### 3 Ergebnisse für das Deckgebirgsverhalten

#### 3.1 Amplitude der Übertragungsfunktion

##### 3.1.1 Schacht MARIE

In Abbildung 3 ist die Amplitude der Übertragungsfunktion zwischen Erdoberfläche und Salzspiegel über der Frequenz aufgetragen worden.

Die Auswirkungen der Eigenschaften von Homogenbereich 1 zeigt eine Parameterstudie, bei der die S-Wellengeschwindigkeit angehoben wird: Die Eigenfrequenzen bleiben in etwa erhalten, aber die Amplituden sinken.

Die grobe Abschätzung des Bodenprofils mit  $E_{\text{dyn}} = 2 E_{\text{stat}}$  ergibt ein deutlich anderes Bild, mit einer erheblich kleineren ersten Eigenfrequenz.

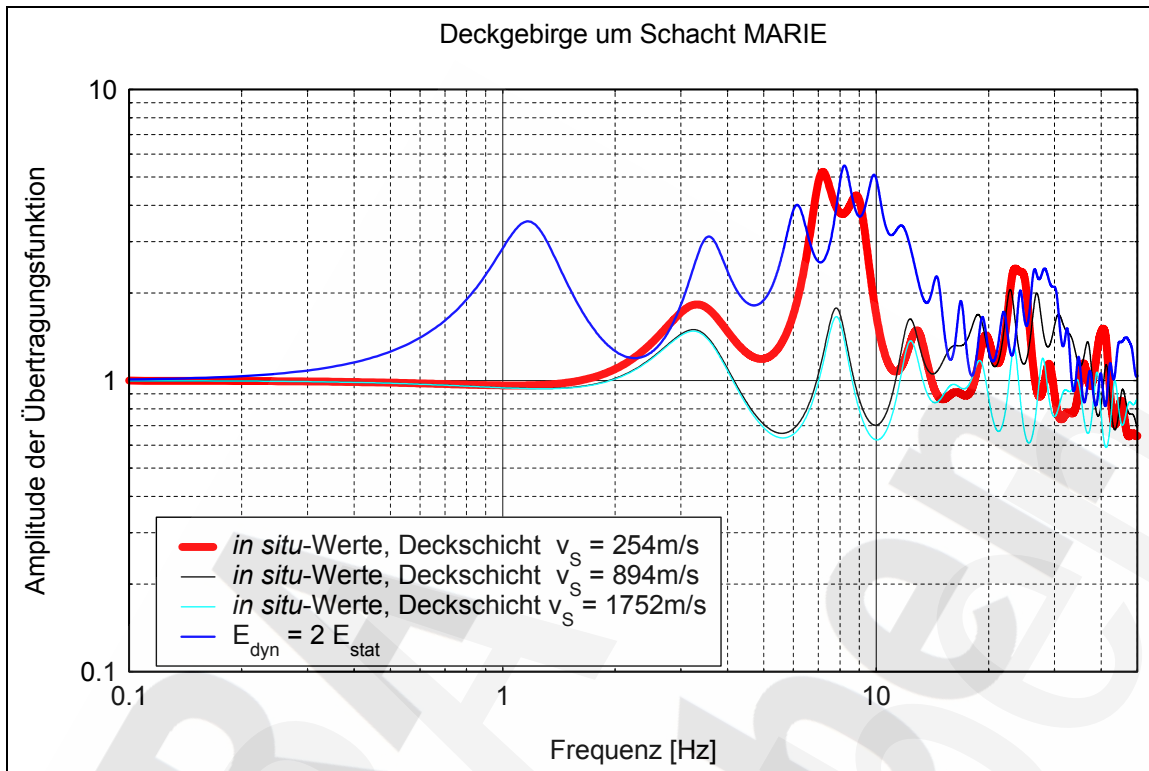


Abbildung 3: Amplitude der Übertragungsfunktion an der Erdoberfläche im Vergleich zum Salzspiegel für das Deckgebirge um Schacht MARIE.

### 3.1.2 Schacht BARTENSLEBEN

Die Übertragungsfunktion für das Deckgebirge zwischen Salzspiegel und Erdoberfläche wird in Abbildung 4 gezeigt.

Wie zuvor bleibt das Übertragungsverhalten bei den Deckgebirgsmodellen mit den *in situ*-Werten ähnlich; eine Erhöhung der Scherwellengeschwindigkeiten in den Homogenbereichen, für die geschätzt werden muss, erniedrigt lediglich die Amplituden.

Eine Schätzung auf der Basis der statischen Messergebnisse führt hingegen zu einem ganz anderen Übertragungsverhalten.

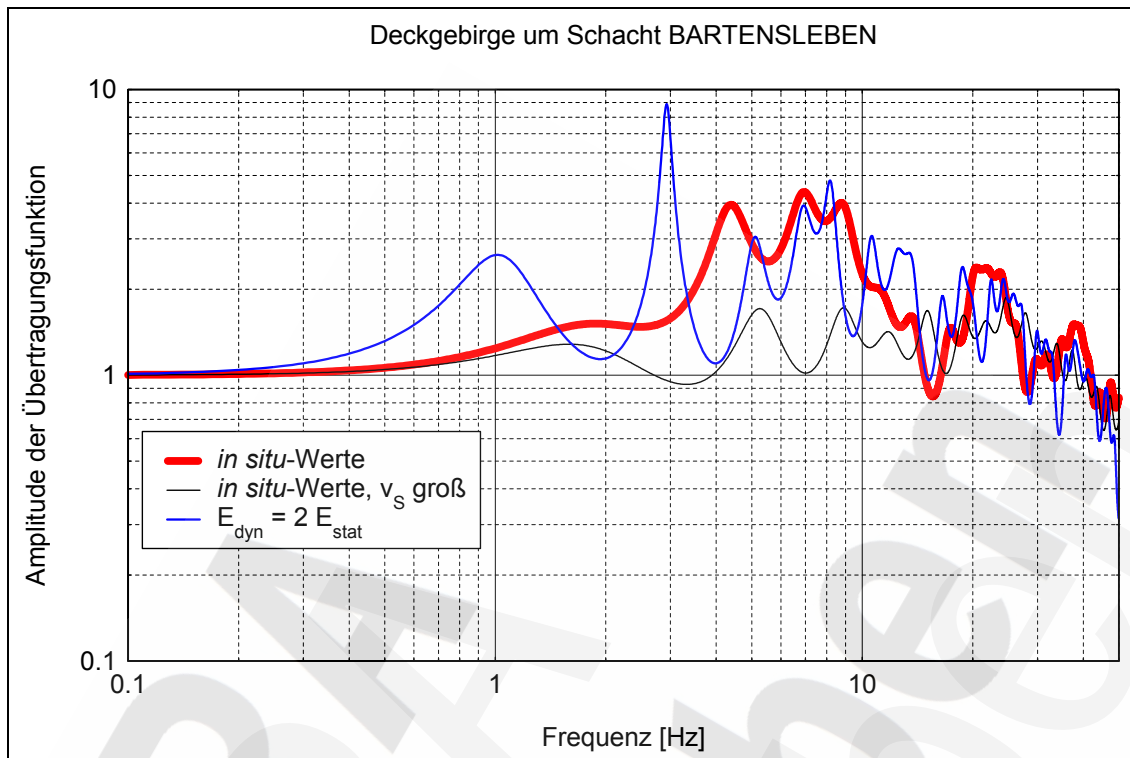


Abbildung 4: Amplitude der Übertragungsfunktion zwischen Erdoberfläche und Salzspiegel für das Deckgebirge um Schacht BARTENSLEBEN.

## 3.2 Zeitverlaufsmethode

### 3.2.1 Schacht MARIE

#### 3.2.1.1 Maximale Bewegungsgrößen aus S-Wellenanregung

Die im Betrag größten Amplituden der Systemantworten werden in Abhängigkeit von der Tiefe ermittelt und aufgetragen. Die Ergebnisse für die Schwinggeschwindigkeit zeigt Abbildung 5. Entsprechende Werte für die Verschiebungen sind in Abbildung 6 zu finden. Man sieht, dass die Unterschiede zwischen den Deckgebirgsmodellen insbesondere bei den Verschiebungsamplituden gering sind.

Die Erhöhung der Scherwellengeschwindigkeit im Homogenbereich 1 (in den Abbildungen nicht dargestellt) hat ebenfalls keine große Wirkung. Wie bei der Übertragungsfunktion unterscheiden sich die Ergebnisse für  $v_s = 894$  m/s nicht sehr von denen für 1725 m/s.

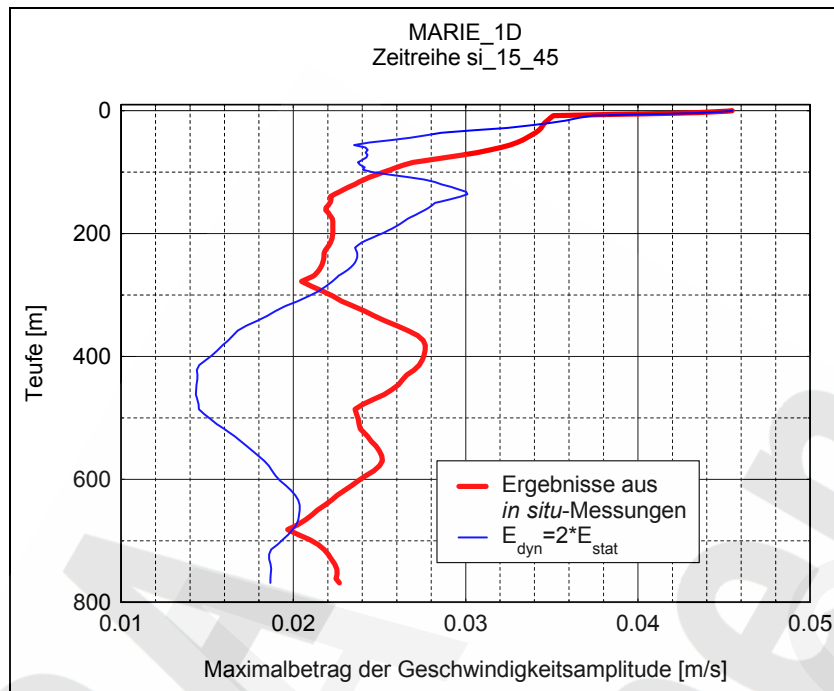


Abbildung 5: Maximale Absolutwerte für die Schwinggeschwindigkeit im Deckgebirge um Schacht MARIE.

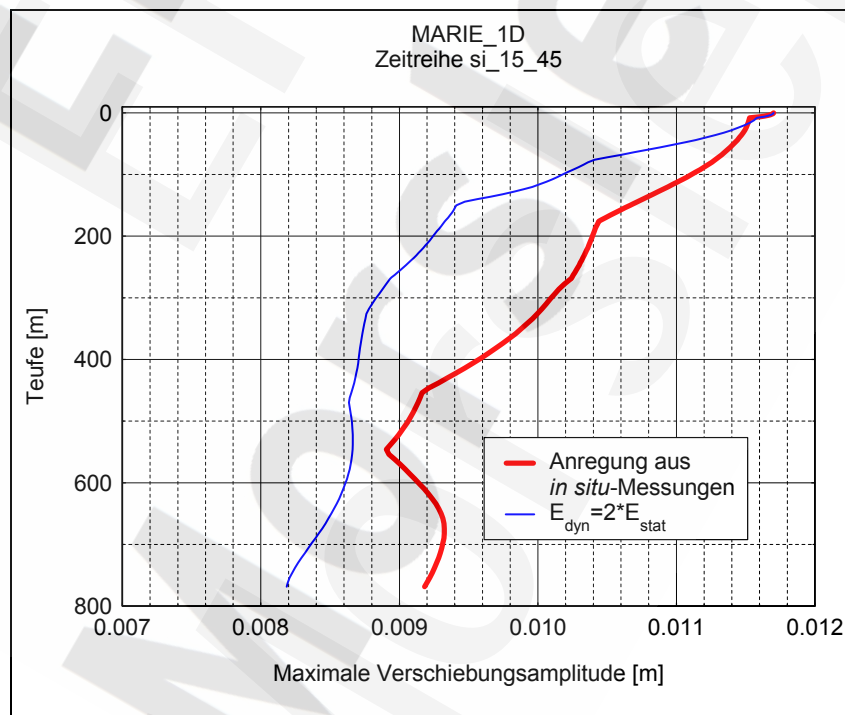


Abbildung 6: Maximale Absolutwerte für die Verschiebungsamplitude im Deckgebirge um Schacht MARIE.



### 3.2.1.2 Maximale Scherdehnungen im Deckgebirge

In Abbildung 7 sind die größten Beträge der Scherdehnungsamplituden aus den Zeitreihen in Abhängigkeit von der Tiefe aufgetragen worden. Bei Anhebung der S-Wellengeschwindigkeit im Homogenbereich 1 ist ein deutlicher Abfall der Scherdehnung in diesem Bereich zu erkennen. In allen übrigen Homogenbereichen sieht man keine größeren Unterschiede in den Ergebnissen.

Die Größe der Scherdehnungen ist eine Kontrollgröße, um zu prüfen, ob die Annahme linear-elastischen Materialverhaltens erfüllt wird. Für Tonstein (Tiefe von 8 bis 140 m) ist die Bedingung linearer Elastizität erfüllt, wenn man nach SEED & IDRIS (1970) als Grenzdehnung einen Wert von 0.01 % ansetzt. Für Sand liegt der Grenzwert nach SEED & IDRIS (1970) bei 0.001 % Scherdehnung.

Lediglich im Homogenbereich 1 (Tiefe von 0 bis 8 m) werden die zulässigen Scherdehnungen für die Modelle mit den niedrigen S-Wellengeschwindigkeiten überschritten. Da Bodendaten sehr stark streuen können, wird eine Berücksichtigung der Scherdehnungsabhängigkeit des Schubmoduls jedoch nicht als zwingend erforderlich angesehen.

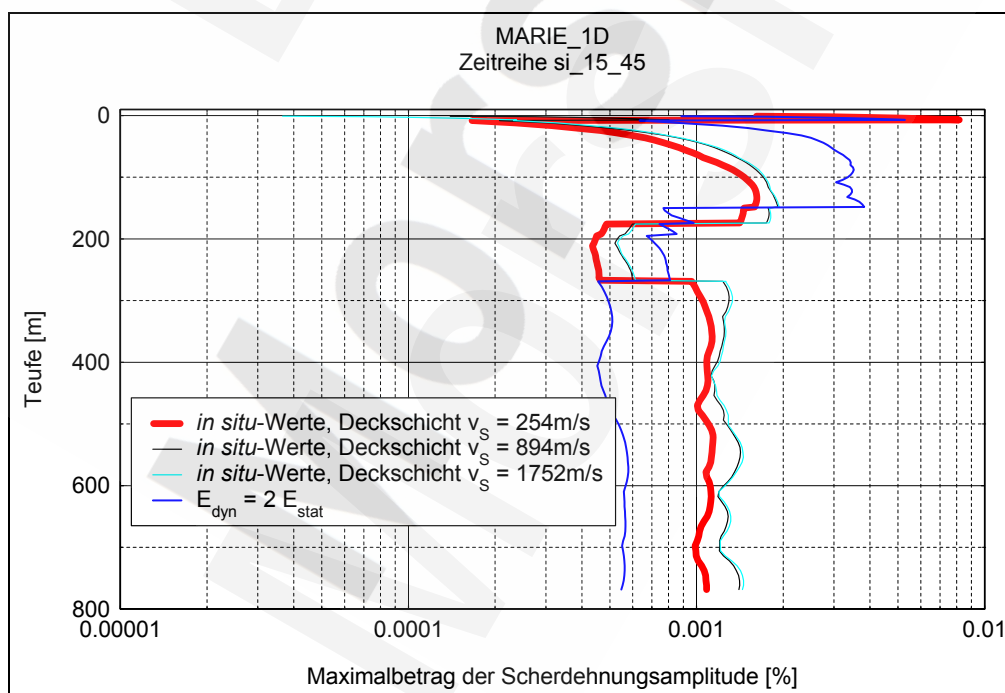


Abbildung 7: Maximalbeträge der Scherdehnung in Abhängigkeit von der Tiefe für das Deckgebirge um Schacht MARIE.

### 3.2.1.3 Antwortspektren am Modell-Fußpunkt

Für die Beschleunigungs-Zeitreihen am Fußpunkt des Modells werden die Antwortspektren ermittelt. Das Freifeld-Bemessungsantwortspektrum für Untertage von LEYDECKER & KOPERA (1999) wird durch zwei geteilt, um es mit den Antwortspektren der Fußpunkts-Zeitreihen vergleichbar zu machen, Abbildung 8. Der Ausgangspunkt der Berechnungen, das Übertage-Bemessungs-Antwortspektrum mit dem Antwortspektrum der zugehörigen synthetischen Beschleunigungs-Zeitreihe ist in Abbildung 8 ebenfalls zu sehen.

Insbesondere im Bereich kleiner Frequenzen gibt es keine nennenswerten Unterschiede zwischen den einzelnen Deckgebirgsmodellen. Der frequenzabhängige Verlauf des Untertage-Bemessungsantwortspektrums passt hingegen weniger gut zum Gebirgsaufbau.

Das Modell mit den *in situ*-Werten von Tabelle 2 trifft den Einhängewert des Untertage-Bemessungsantwortspektrums von LEYDECKER & KOPERA (1999) ausgezeichnet. Die Erhöhung der S-Wellengeschwindigkeit im Homogenbereich 1 führt zu einem deutlichen Anheben des Einhängewerts für das Untertage-Spektrum.

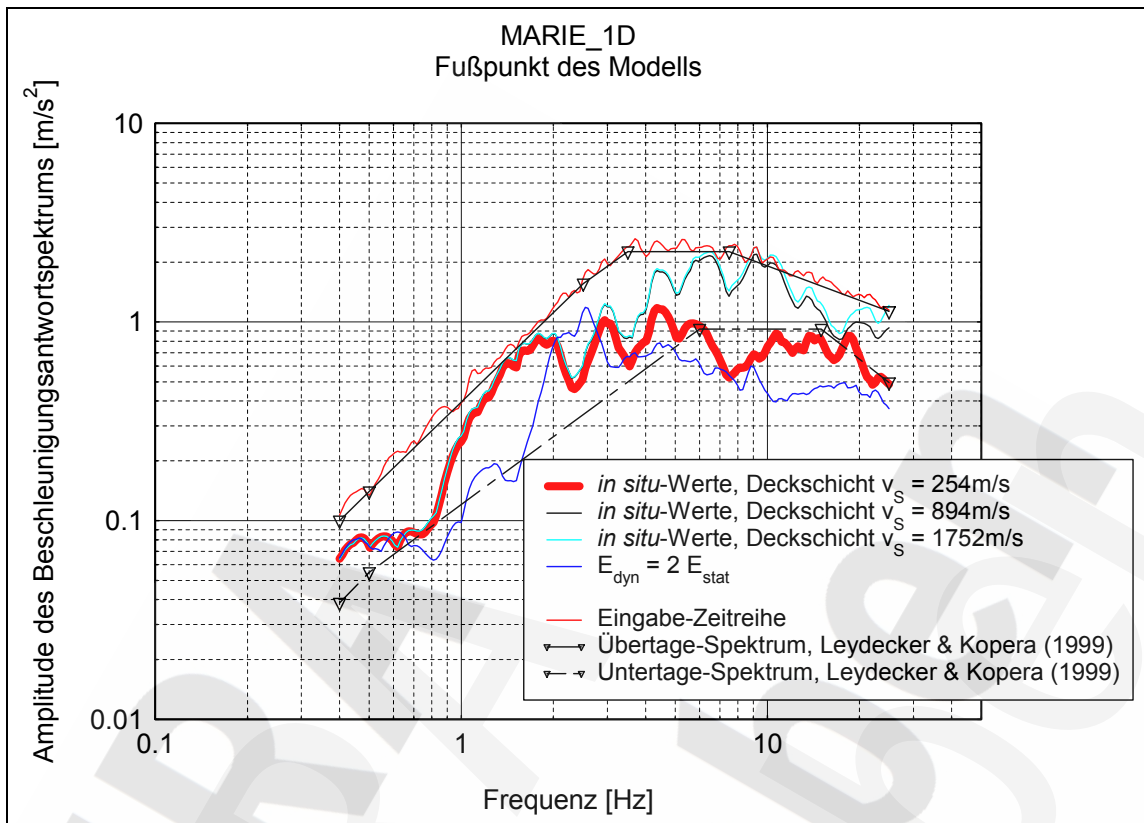


Abbildung 8: Antwortspektren am Fußpunkt des Deckgebirgsmodells für Schacht MARIE für die si\_15-Zeitreihe.

### 3.2.2 Schacht BARTENSLEBEN

#### 3.2.2.1 Maximale Bewegungsgrößen aus S-Wellenanregung

Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen die Maximalbeträge für die Geschwindigkeit und die Verschiebung in Abhängigkeit von der Teufe. Der Abfall der Schwinggeschwindigkeiten und Verschiebungen mit der Teufe ist sehr ähnlich den Verläufen für das Deckgebirge um Schacht MARIE und ändert sich von Modell zu Modell nur wenig.

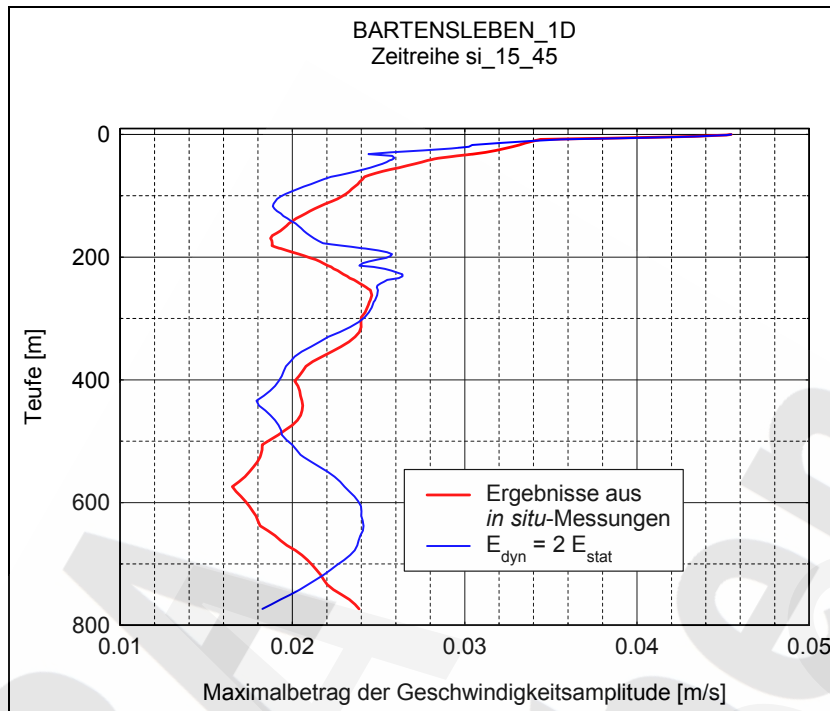


Abbildung 9: Maximale Absolute für die Schwinggeschwindigkeit im Deckgebirge um Schacht BARTENSLEBEN.

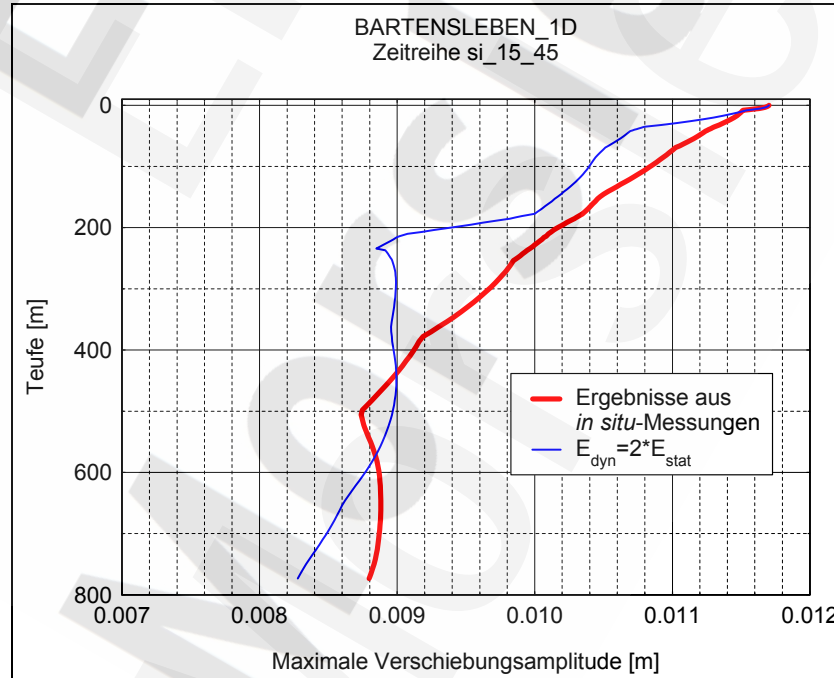


Abbildung 10: Maximale Absolute für die Verschiebungsamplitude im Deckgebirge um Schacht BARTENSLEBEN.

### 3.2.2.2 Maximale Scherdehnungen im Deckgebirge

Abbildung 11 zeigt den Verlauf der maximalen Scherdehnungsbeträge in Abhängigkeit von der Teufe. Wie schon bei Schacht MARIE bleibt auch hier der Teil des Deckgebirges, der tonig oder aus Tonstein ist, im linear-elastischen Bereich (Teufe von 8 bis 177 m). Die quartäre Deckschicht wird sowohl als tonig als auch als feinsandig charakterisiert. Ihre maximale Scherbeanspruchung von etwa  $7 \cdot 10^{-3} \%$  liegt für Sand über dem ungefähren Grenzwert von  $10^{-3} \%$ . Man befindet sich zumindest wieder in einem Grenzbereich des linear-elastischen Verhaltens. Eine Ausnahme bildet nur das Modell mit den groß geschätzten Wellengeschwindigkeiten, denn hier ist die Scherdehnung im Homogenbereich 1 nicht größer als 0.001%.

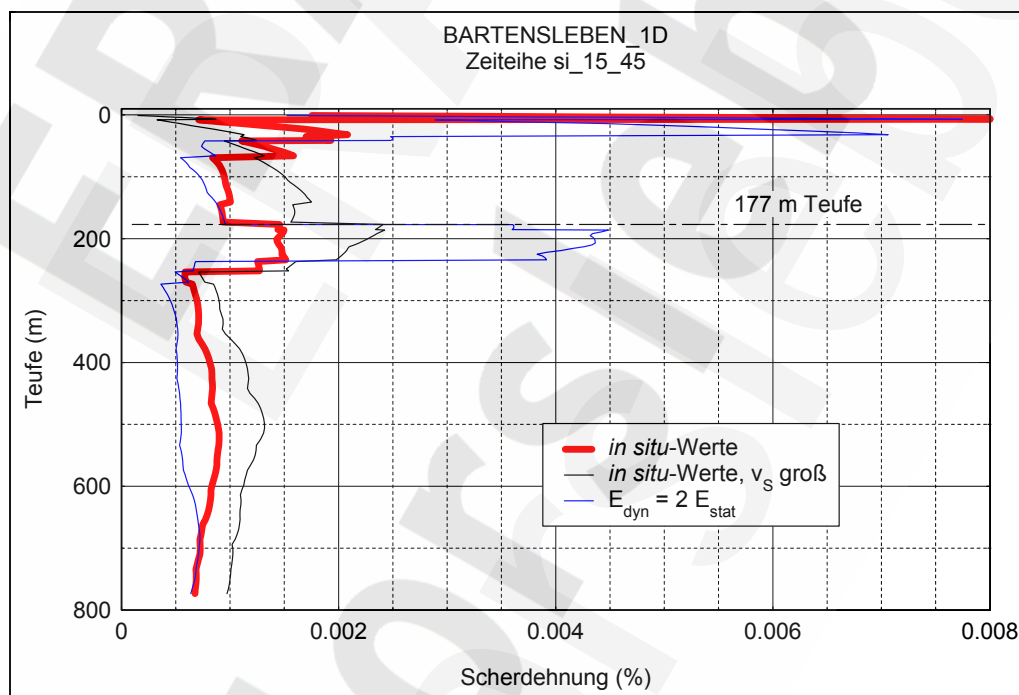


Abbildung 11: Maximalbeträge der Scherdehnung in Abhängigkeit von der Teufe für das Deckgebirge um Schacht BARTENSLEBEN.

### 3.2.2.3 Antwortspektren am Modell-Fußpunkt

In Abbildung 12 sind die Antwortspektren der Fußpunkts-Zeitreihen zu sehen: Beide Modelle mit *in situ*-Werten treffen den von LEYDECKER & KOPERA (1999) bestimmten Einhängewert des Untertage-Bemessungs-Antwortspektrums rela-

tiv gut. Der Frequenzgehalt des berechneten Antwortspektrums unterscheidet sich jedoch wie schon bei Schacht MARIE deutlich von dem des Untertage-Bemessungs-Antwortspektrums.

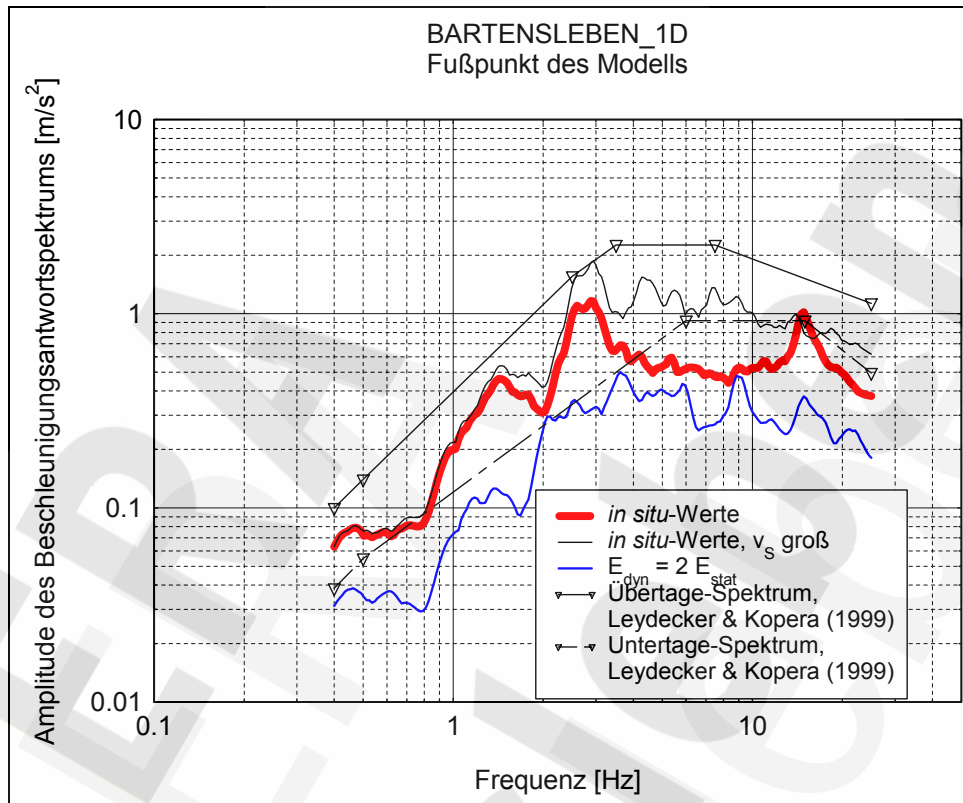


Abbildung 12: Antwortspektren am Fußpunkt des Deckgebirgs-Modells für Schacht BARTENSLEBEN.

## 4 Schnittgrößen für den Schachtausbau

### 4.1 Schachtausbau MARIE

Die Maximalbeträge für die Querkraft, für das Biegemoment und die Längskraft sind für das Modell der Tabelle 2 und die grob abgeschätzten Gesteinsparameter („ $E_{\text{dyn}} = 2 E_{\text{stat}}$ “) in Tabelle 7 zu finden. Werte an den Grenzen der Homogenbereiche werden bei der Ermittlung der maximalen Absolutbeträge immer bei beiden Homogenbereichen berücksichtigt. Graphische Darstellungen der Maximalbeträge der einzelnen Schnittgrößen sind in Abhängigkeit von der Teufe in Abbildung 13 bis Abbildung 15 zu finden.

Die Unterschiede zwischen den Modellen sind im teufenabhängigen Verlauf relativ klein. Interessant sind vor allem die Unterschiede im oberflächennahen Bereich, da hier die Schnittgrößen am größten sind. Hier können die Abweichungen bis zu 40 % betragen. Ursache ist vermutlich der Unterschied im Impedanzsprung zwischen den Homogenbereichen 1 und 2.

Tabelle 7: Maximalbeträge für die Schnittgrößen im Schachtausbau von MARIE für das Modell von Tabelle 2 und die grobe Schätzung mit  $E_{\text{dyn}} = 2 E_{\text{stat}}$ .

| Homogenbereich | Querkraft<br>[MN] |                                      | Biegemoment<br>[MNm] |                                      | Längskraft<br>[MN] |                                      |
|----------------|-------------------|--------------------------------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|
|                | Tabelle 2         | $E_{\text{dyn}} = 2 E_{\text{stat}}$ | Tabelle 2            | $E_{\text{dyn}} = 2 E_{\text{stat}}$ | Tabelle 2          | $E_{\text{dyn}} = 2 E_{\text{stat}}$ |
| 1              | 3.11              | 2.03                                 | 7.50                 | 4.12                                 | 2.98               | 1.74                                 |
| 2              | 3.11              | 2.03                                 | 7.50                 | 4.19                                 | 2.98               | 3.63                                 |
| 3              | 0.23              | 0.81                                 | 1.33                 | 4.19                                 | 1.54               | 0.57                                 |
| 4              | 0.23              | 0.07                                 | 1.33                 | 0.32                                 | 1.33               | 0.59                                 |
| 5              | 0.08              | 0.06                                 | 0.43                 | 0.32                                 | 0.56               | 0.58                                 |
| 6              | 0.09              | 0.07                                 | 0.43                 | 0.32                                 | 0.57               | 0.47                                 |

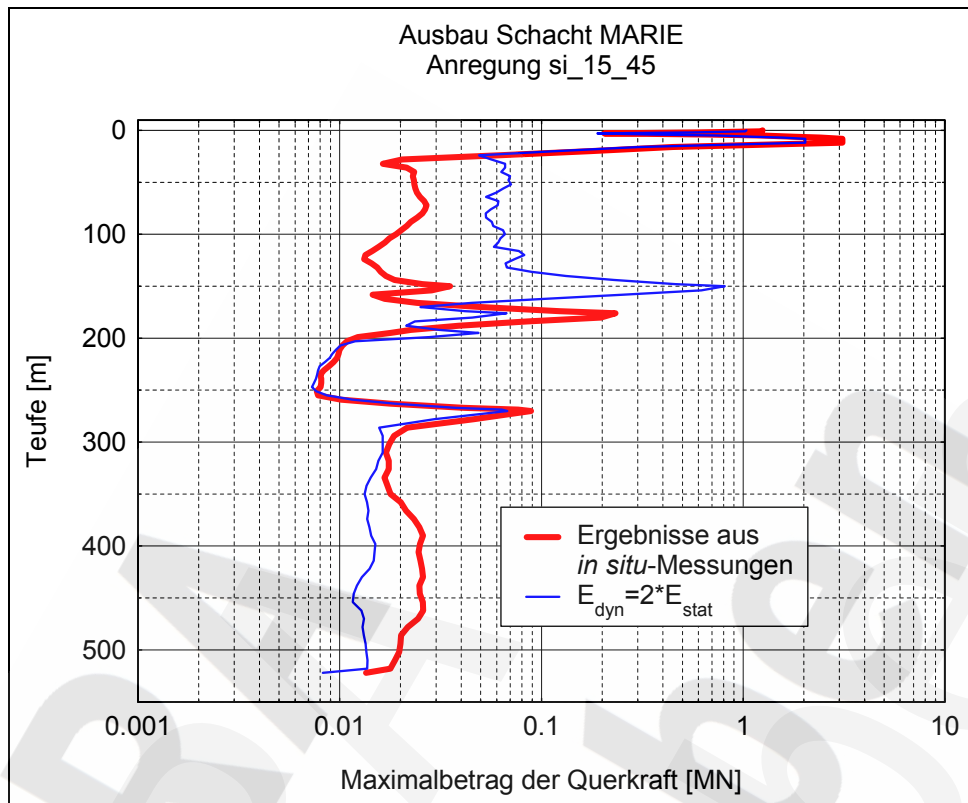


Abbildung 13: Maximalbetrag der Querkraft für den Schachtausbau von MARIE.

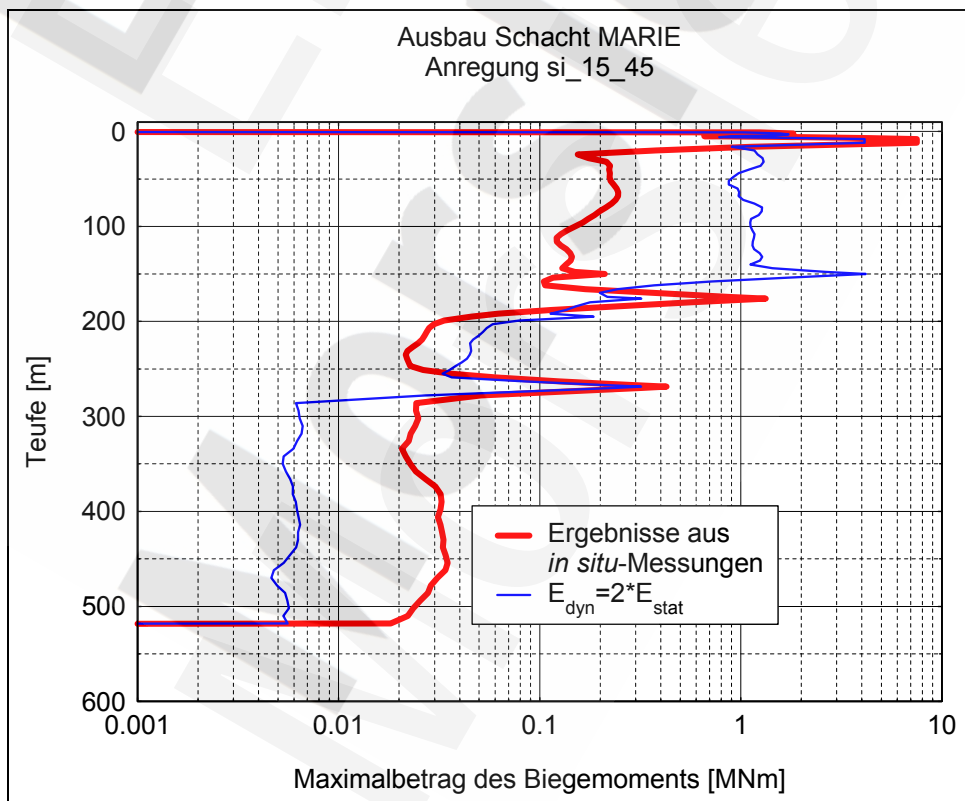


Abbildung 14: Maximalbetrag des Biegemoments im Schachtausbau von MARIE.



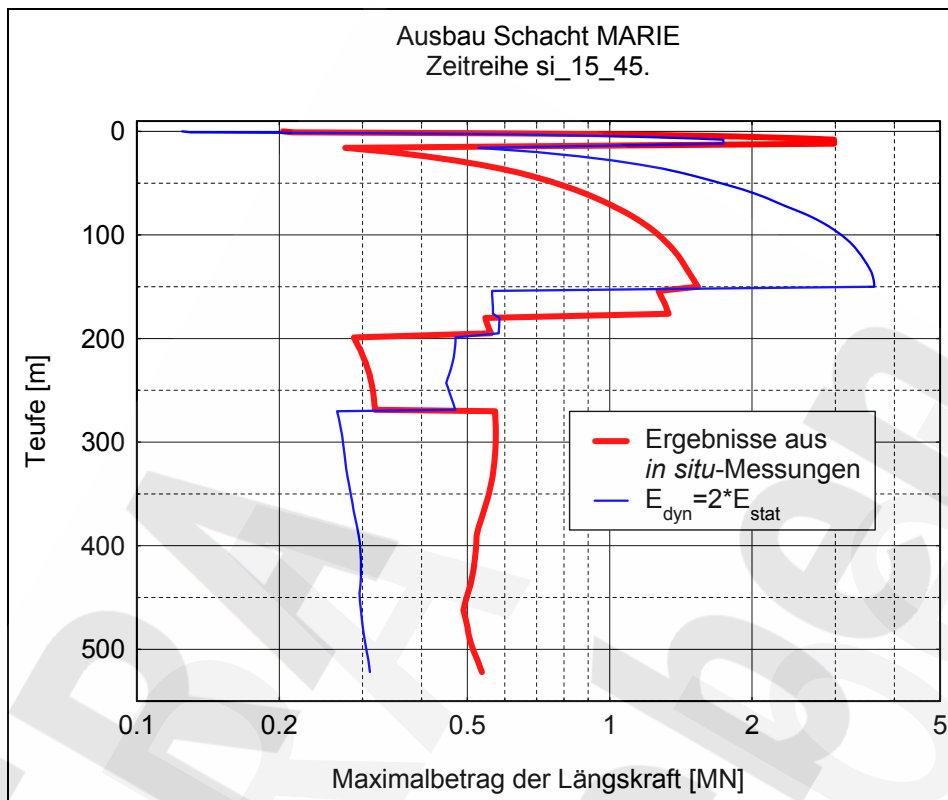


Abbildung 15: Maximalbetrag der Längskraft im Schachtausbau von MARIE.

#### 4.2 Schachtausbau BARTENSLEBEN

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt wie für den Schachtausbau von MARIE. Zahlenwerte zeigt Tabelle 8. Graphische Darstellungen finden sich von Abbildung 16 bis Abbildung 18.

Qualitativ ist der Verlauf der Schnittgrößen über der Teufe für die beiden betrachteten Modell wieder sehr ähnlich. In Oberflächennähe liegen Querkraft und Biegemoment für beide Modelle um bis zu 50 % auseinander. Signifikante Unterschiede gibt es hingegen bei der Längskraft, wo der Anstieg der Längskraft mit der Teufe beim *in situ*-Modell sehr viel langsamer erfolgt als beim Modell aus der Grobabschätzung („ $E_{\text{dyn}} = 2 E_{\text{stat}}$ “).

Tabelle 8: Maximalbeträge für die Schnittgrößen im Schachtausbau von BARTENSLEBEN. Zeitreihe si\_15\_45.

| Homogenbereich | Querkraft [MN] |                                      | Biegemoment [MNm] |                                      | Längskraft [MN] |                                      |
|----------------|----------------|--------------------------------------|-------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|
|                | Tabelle 3      | $E_{\text{dyn}} = 2 E_{\text{stat}}$ | Tabelle 3         | $E_{\text{dyn}} = 2 E_{\text{stat}}$ | Tabelle 3       | $E_{\text{dyn}} = 2 E_{\text{stat}}$ |
| 1              | 2.94           | 1.85                                 | 6.26              | 3.03                                 | 0.20            | 1.87                                 |
| 2              | 2.94           | 1.85                                 | 6.26              | 5.68                                 | 0.49            | 2.35                                 |
| 3              | 0.21           | 1.12                                 | 0.95              | 5.68                                 | 0.49            | 0.61                                 |
| 4              | 0.21           | 0.51                                 | 0.95              | 3.17                                 | 0.64            | 0.16                                 |
| 5              | 0.16           | 0.08                                 | 0.82              | 0.37                                 | 0.65            | 0.60                                 |
| 6              | 0.12           | 0.63                                 | 0.82              | 4.34                                 | 1.15            | 0.86                                 |
| 7              | 0.17           | 0.86                                 | 0.82              | 4.34                                 | 1.98            | 2.31                                 |
| 8              | 0.17           | 0.86                                 | 0.79              | 4.17                                 | 2.30            | 2.40                                 |
| 9              | 0.08           | 0.81                                 | 0.46              | 4.91                                 | 2.39            | 3.15                                 |
| 10             | 0.18           | 0.81                                 | 1.04              | 4.91                                 | 2.39            | 0.13                                 |
| 11             | 0.18           | 0.08                                 | 1.04              | 0.41                                 | 2.04            | 0.85                                 |
| 12a            | 0.04           | 0.08                                 | 0.11              | 0.36                                 | 0.68            | 0.65                                 |

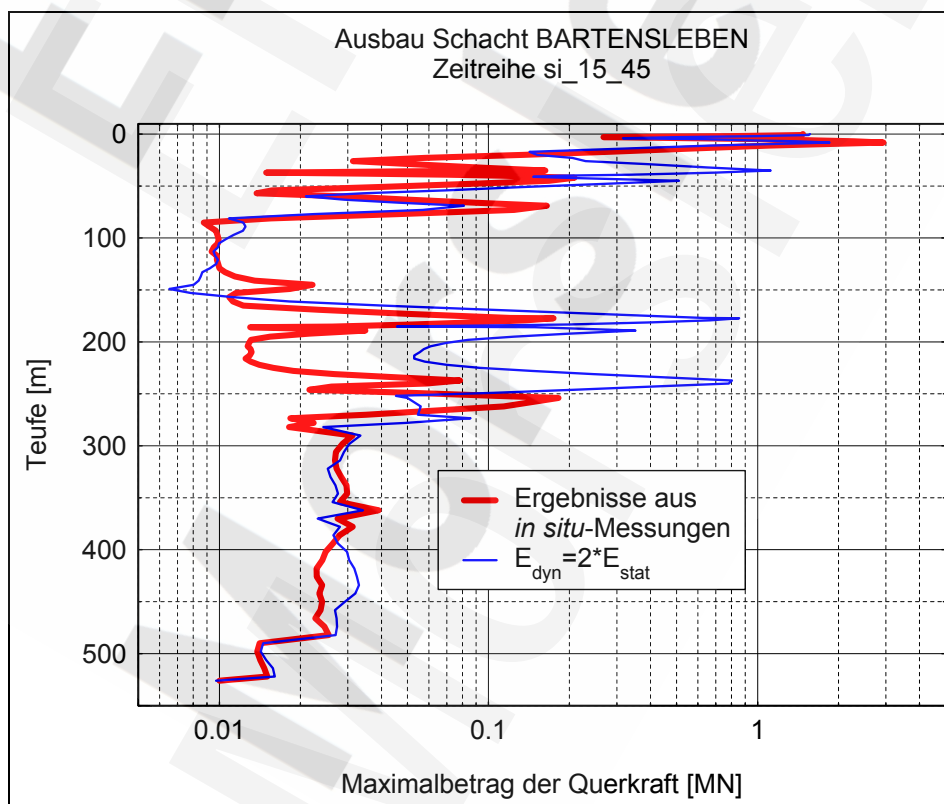


Abbildung 16: Maximalbetrag der Querkraft im Schachtausbau von BARTENSLEBEN.

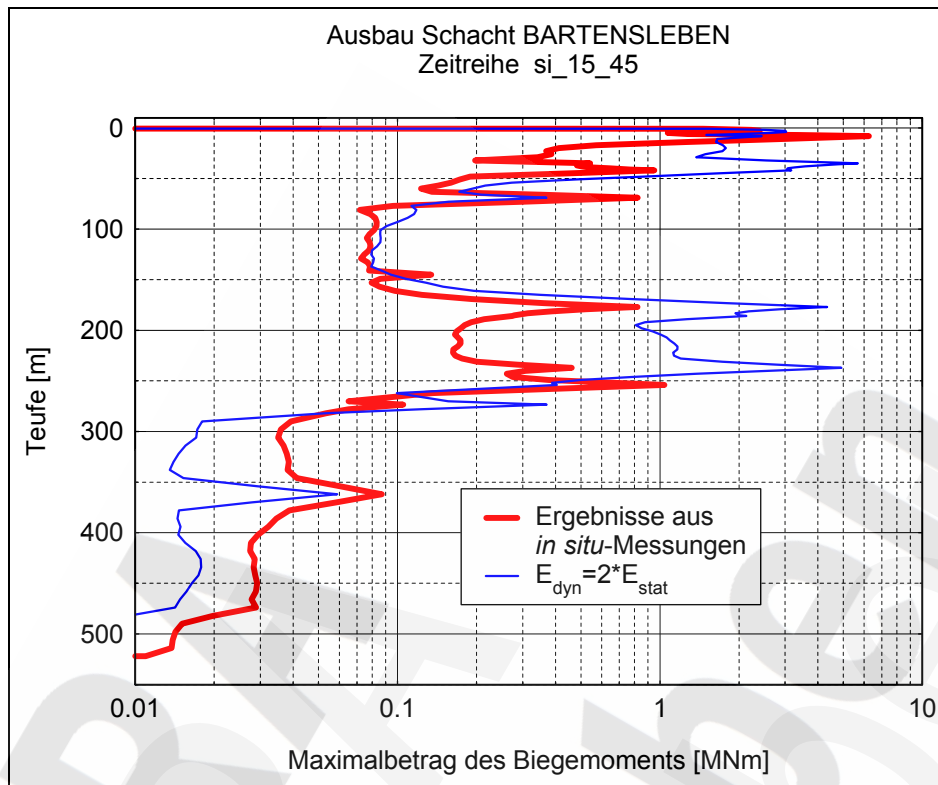


Abbildung 17: Maximalbetrag des Biegemoments im Schachtausbau von BARTENSLEBEN.

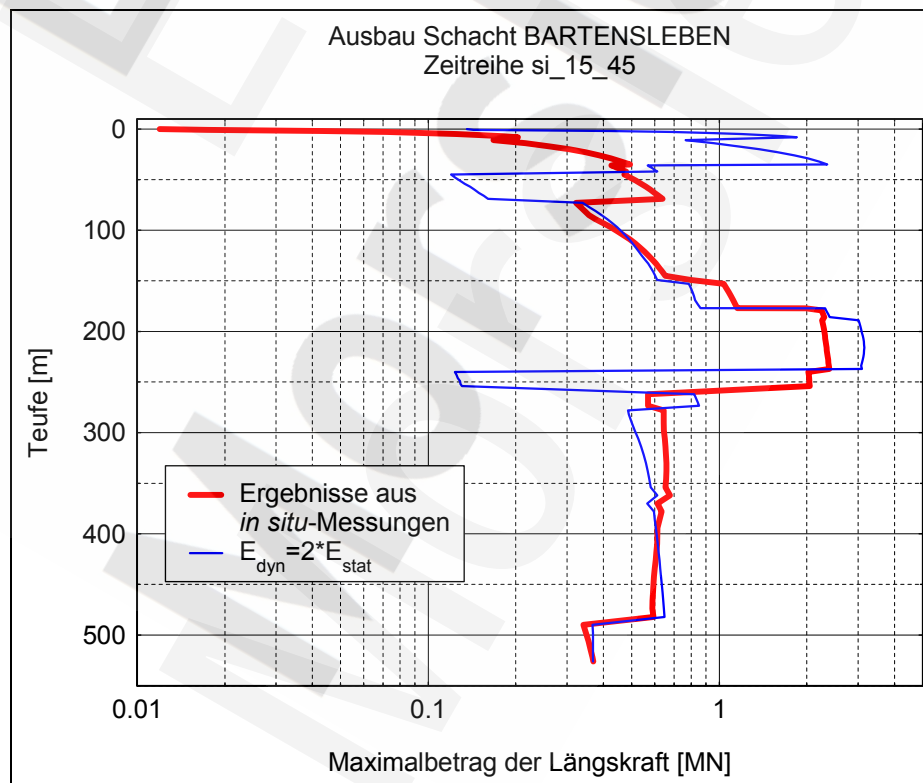


Abbildung 18: Maximalbetrag der Längskraft im Schachtausbau von BARTENSLEBEN.

## 5 Zusammenfassung

Für eine überschlägige Beurteilung der Zusatzbelastung der Schächte durch ein standortspezifisches Bemessungsbeben werden eindimensionale Deckgebirgsmodelle eingesetzt.

Die physikalischen Parameter von Deckgebirge und Salinar werden aus *in situ*-Messungen in Schachtnähe bestimmt, ergänzt durch Schätzwerte. Um die Bandbreite von Rechenergebnissen überschlägig abschätzen zu können, werden zum einen Schätzwerte im *in situ*-Modell variiert und zum anderen wird ein grob aus statischen Kenngrößen abgeschätztes Modell durchgerechnet.

Linear-elastisches Verhalten wird vorausgesetzt. Die Voraussetzungen für linear-elastisches Verhalten sind, wie Berechnungen der Schubdehnung zeigen, in der Regel erfüllt: Lediglich im Homogenbereich 1 befindet man sich in einem Grenzbereich.

Für die Zeitverlaufsmethode werden synthetische Zeitreihen erzeugt, die aus dem Übertage-Bemessungsantwortspektrum (LEYDECKER & KOPERA 1999) abgeleitet sind. Die Beanspruchung erfolgt durch senkrecht von unten einfallende S- und P-Wellen.

Die Verformungsgrößen des Deckgebirges und die Schnittgrößen (Längs- und Querkraft, Biegemoment) der Schachtausbaue werden ermittelt. Die maximalen Beträge der Verschiebungs- und Schnittgrößen-Zeitserien werden als Funktion der Teufe bestimmt.

Im oberflächennahen Bereich ist die Beanspruchung des Schachtausbaus am größten. Die Maximalbeträge der Schnittgrößen werden im wesentlichen durch die Größe des Impedanzsprungs beeinflusst. Im obersten Homogenbereich wird den Schachtausbauen eine maximale Querkraft von 3.5 MN, ein Biegemoment von nicht mehr als 7.5 MNm und eine Längskraft von höchstens 3 MN auferlegt. Die Belastungen nehmen mit zunehmender Teufe ab.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE  
HANNOVER

Datum: 21.12.00

Im Auftrag

(Dr. H. Raschka, Dir. u. Prof.)  
Abteilungsleitung B2

(Dr.-Ing. habil. I. Göbel, WA)  
Autorin und Arbeitspaketleitung

(Dr.-Ing. M. Wallner, Dir. u. Prof.)  
Projektleitung

(R. Pfeiffer, ADV)  
Autorin

## 6 Literaturverzeichnis

- GASPARINI, D. A., & VANMARCKE, E. H. (1976): Simulated Earthquake Motions Compatible With Prescribed Response Spectra. - Evaluation of Seismic Safety Buildings, Report No. 2; Cambridge, Massachusetts.
- GÖBEL, I. & PFEIFFER, R. (2000): Dynamische Eigenschaften des ERAM-Deckgebirges. Auswertung von in situ-Messungen in schachtnahen Erkundungsbohrlöchern. – Ergebnisbericht zum Arbeitspaket 9M 666 300 310. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- HAUPT, W. & HERRMANN, R. (1987): Querschnittsbericht 1986. Dynamische Bodenkennwerte. - Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der Landesgewerbeanstalt Bayern; Nürnberg.
- KLEIN, J., STADIE, U. & GÄRTNER, D. (1999): Standsicherheitsnachweis für Schacht Bartensleben und Schacht Marie. - Abschlussbericht U 461 M4, Deutsche Montan Technologie GmbH, Geschäftsbereich MinTec: Geotechnik, Tiefbau; Essen.
- KTA 2201.3 (1990): Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Teil 3: Auslegung der baulichen Anlagen. - Kerntechnischer Ausschuss (KTA), (Heymanns); Köln.
- KTA 2201.4 (1990): Auslegung von Kernkraftwerken gegen seismische Einwirkungen, Teil 4: Anforderungen an Verfahren zum Nachweis der Erdbebensicherheit für maschinen- und elektrotechnische Anlagenteile. - Kerntechnischer Ausschuss (KTA), (Heymanns); Köln.
- LEYDECKER, G. & KOPERA, J. R. (1999): Seismologisches Gutachten für den Standort des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben. - Archiv-Nummer 117 575, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; Hannover.
- SARFELD, W. (1995): DYBAST-3D. Computersystem zur dreidimensionalen Dynamischen Berechnung von Baugrund und Strukturen, Version 2.2 Release 11/95. - Computer Software and Development in Statics and Dynamics; Berlin.

SEED, H. B. & IDRISSE, I. M. (1970): Soil Moduli and Damping Factors For Dynamic Response Analyses. - Earthquake Engineering Research Center, Report No. EERC 70-10; Berkeley, California.

SCHNABEL, P., LYSMER, J., & SEED, H. B. (1972): SHAKE. A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. - A Computer program distributed by NISEE/Computer Applications. Report No. EERC 72 - 12, College of Engineering, University of California; Berkeley, California.

## 7 Abkürzungsverzeichnis

### Allgemein

|                   |  |
|-------------------|--|
| d                 | Verschiebung, m                            |
| E-Modul           | Elastizitätsmodul, N/m <sup>2</sup>        |
| E <sub>dyn</sub>  | dynamischer E-Modul, N/m <sup>2</sup>      |
| E <sub>stat</sub> | statischer E-Modul, N/m <sup>2</sup>       |
| ERAM              | Endlager für radioaktive Abfälle Morsleben |
| P-Welle           | Primär- oder Kompressionswelle             |
| S-Welle           | Sekundär- oder Scherwelle                  |
| v                 | Geschwindigkeit, m/s                       |



## 8 Verzeichnis der Tabellen

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Tabelle 1: | Empirischer Parameter $b$ der Ausgleichshyperbeln für verschiedene Datensätze, Gleichung ( 2-1 ).   | 7  |
| Tabelle 2: | Modellierung der Umgebung von Schacht MARIE.  | 8  |
| Tabelle 3: | Modellierung der Umgebung von Schacht BARTENSLEBEN.   | 10 |
| Tabelle 4: | Eingabegrößen für das Mauerwerk in DYBAST-3D (SARFELD 1995)   | 11 |
| Tabelle 5: | Schachtausbau MARIE nach KLEIN, STADIE & GÄRTNER (1999).  | 12 |
| Tabelle 6: | Schachtausbau BARTENSLEBEN nach KLEIN, STADIE & GÄRTNER (1999).   | 13 |
| Tabelle 7: | Maximalbeträge für die Schnittgrößen im Schachtausbau von MARIE für das Modell von Tabelle 2 und die grobe Schätzung mit $E_{\text{dyn}} = 2 E_{\text{stat}}$ . | 23 |
| Tabelle 8: | Maximalbeträge für die Schnittgrößen im Schachtausbau von BARTENSLEBEN. Zeitreihe si_15_45.   | 26 |

## 9 Verzeichnis der Abbildungen

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Scherwellen-Geschwindigkeit als Funktion der Teufe für das Deckgebirge um Schacht MARIE.                                   | 9  |
| Abbildung 2: Scherwellen-Geschwindigkeit als Funktion der Teufe für das Deckgebirge um Schacht BARTENSLEBEN.                            | 11 |
| Abbildung 3: Amplitude der Übertragungsfunktion an der Erdoberfläche im Vergleich zum Salzspiegel für das Deckgebirge um Schacht MARIE. | 14 |
| Abbildung 4: Amplitude der Übertragungsfunktion zwischen Erdoberfläche und Salzspiegel für das Deckgebirge um Schacht BARTENSLEBEN.     | 15 |
| Abbildung 5: Maximale Absolutwerte für die Schwinggeschwindigkeit im Deckgebirge um Schacht MARIE.                                      | 16 |
| Abbildung 6: Maximale Absolutwerte für die Verschiebungsamplitude im Deckgebirge um Schacht MARIE.                                      | 16 |
| Abbildung 7: Maximalbeträge der Scherdehnung in Abhängigkeit von der Teufe für das Deckgebirge um Schacht MARIE.                        | 17 |
| Abbildung 8: Antwortspektren am Fußpunkt des Deckgebirgsmodells für Schacht MARIE für die $s_{i\_15}$ -Zeitreihe.                       | 19 |
| Abbildung 9: Maximale Absolutwerte für die Schwinggeschwindigkeit im Deckgebirge um Schacht BARTENSLEBEN.                               | 20 |
| Abbildung 10: Maximale Absolutwerte für die Verschiebungsamplitude im Deckgebirge um Schacht BARTENSLEBEN.                              | 20 |
| Abbildung 11: Maximalbeträge der Scherdehnung in Abhängigkeit von der Teufe für das Deckgebirge um Schacht BARTENSLEBEN.                | 21 |
| Abbildung 12: Antwortspektren am Fußpunkt des Deckgebirgs-Modells für Schacht BARTENSLEBEN.   | 22 |
| Abbildung 13: Maximalbetrag der Querkraft für den Schachtausbau von MARIE.  | 24 |
| Abbildung 14: Maximalbetrag des Biegemoments im Schachtausbau von MARIE.  | 24 |
| Abbildung 15: Maximalbetrag der Längskraft im Schachtausbau von MARIE.  | 25 |
| Abbildung 16: Maximalbetrag der Querkraft im Schachtausbau von BARTENSLEBEN.  | 26 |
| Abbildung 17: Maximalbetrag des Biegemoments im Schachtausbau von BARTENSLEBEN.   | 27 |
| Abbildung 18: Maximalbetrag der Längskraft im Schachtausbau von BARTENSLEBEN.   | 27 |