

Auswirkungen dynamischer Belastungen  
bei einem geogitterbewehrten Steilwall  
und einem Regeldamm

**T 2592**

T 2592

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)



in Zusammenarbeit mit:

## Laboratorium für Dynamik und Optik

Dr.-Ing. habil. Rainer Blum  
Ludwig-Finckh-Weg 27

71229 Leonberg

Auswirkungen dynamischer Belastungen bei  
einem geogitterbewehrten Steilwall und  
einem Regeldamm

Forschungsvorhaben DIBt IV 1-5 660/92

Auftraggeber : Deutsches Institut für Bautechnik  
Reichpietschufer 74-76  
10785 Berlin

Unser Auftrag : IV.45/13211

Datum : 6. Oktober 1993

Dieser Bericht umfaßt 54 Textseiten

## 1. EINLEITUNG

Mit Geokunststoffen als Bewehrung können Böschungen, Dämme und ähnliche Erdbauwerke steiler hergestellt werden. Sie beanspruchen weniger Grundfläche als solche, deren Vorderseite als Regelböschung ausgebildet sind. Das fällt vor allem ins Gewicht bei Verbreiterung alter Anlagen wie Straßen und Eisenbahnlinien, wo Eigentumsfragen in vielen Fällen eine Planung negativ beeinflussen können. Außerdem sind solche Bauwerke in der Erstellung kostengünstiger als herkömmliche Stützbauwerke.

Nun ist das Tragverhalten solcher Bauwerke gegenüber statischen Lasten weitgehend bekannt. Man kennt Bemessungsregeln und Sicherheitsfaktoren, kurz, ihre Auslegung und Konstruktion ist Stand der Technik. Wenig ist dagegen bekannt über das Verhalten unter dynamischen Lasten. Hier betritt man vollständiges Neuland.

Im Bereich der Bundesbahndirektion Karlsruhe wurde nun ein solcher mit Geokunststoffen bewehrter Damm bei einer Brückenbaumaßnahme aus Platzgründen temporär aufgebaut (nach Beendigung des Brückenbaues wurde dieser Teil angeschüttet, so daß wieder ein Damm mit Regelböschung entstand) und mußte den normalen Zugverkehr über sich ergehen lassen. So bestand die einmalige Gelegenheit, hier seine Reaktion unter dynamischer Beanspruchung zu messen.

Im Vergleich dazu sollten an einem normalen Bahndamm Messungen durchgeführt werden, um das Verhalten der beiden Bauweisen gegenüber stellen zu können.

Bevor die einzelnen Messergebnisse und deren Interpretation vorgestellt werden sollen, seien noch einige Bemerkungen zum Aufbau der vorliegenden Arbeit gemacht: An den Anfang seien einige einfache theoretische Betrachtungen gestellt, aus denen hervorgeht, mit welcher einfachen Annahmen man die prinzipiellen Ergebnisse der Messungen interpretieren kann. Danach werden die Ergebnisse der Untersuchungen am kunststoffverstärkten und am klassischen Damm referiert und zum Schluß die Ergebnisse gegenübergestellt.

## 2. SYNTHETISCHE GENERIERUNG EINER ZUGDURCHFART

Zuerst soll eine Zugdurchfahrt, wie sie von einem Aufnehmer "erlebt" wird, zumindest prinzipiell synthetisch generiert werden. Dabei werden sehr einfache Annahmen getroffen, es kommt uns hier nicht auf die Darstellung aller Feinheiten an, es soll im Gegenteil versucht werden, die Tragweite eines möglichst einfachen Modell auszuloten.

Dazu ist die Kenntnis der Längen von Lok und Waggon, ihrer Achsabstände und die von Schwellenabstände etc. notwendig. Diese Größen, die von Lok- zu Loktyp und von Waggon- zu Waggontyp nur sehr wenig schwanken, seien angegeben:

Lok:

4 Achsen in zwei Drehgestellen, Länge über Puffer: 15,70 m, Gesamtachsenstand: 10,50 m, Achsenabstand Drehgestell: 3,20 m, Raddurchmesser: 1,25 m

Waggon:

4 Achsen in zwei Drehgestellen, Länge über Puffer: 26,4 m, Drehzapfenabstand: 19 m, Achsenabstand Drehgestell: 2,5 m, Raddurchmesser: 1 m

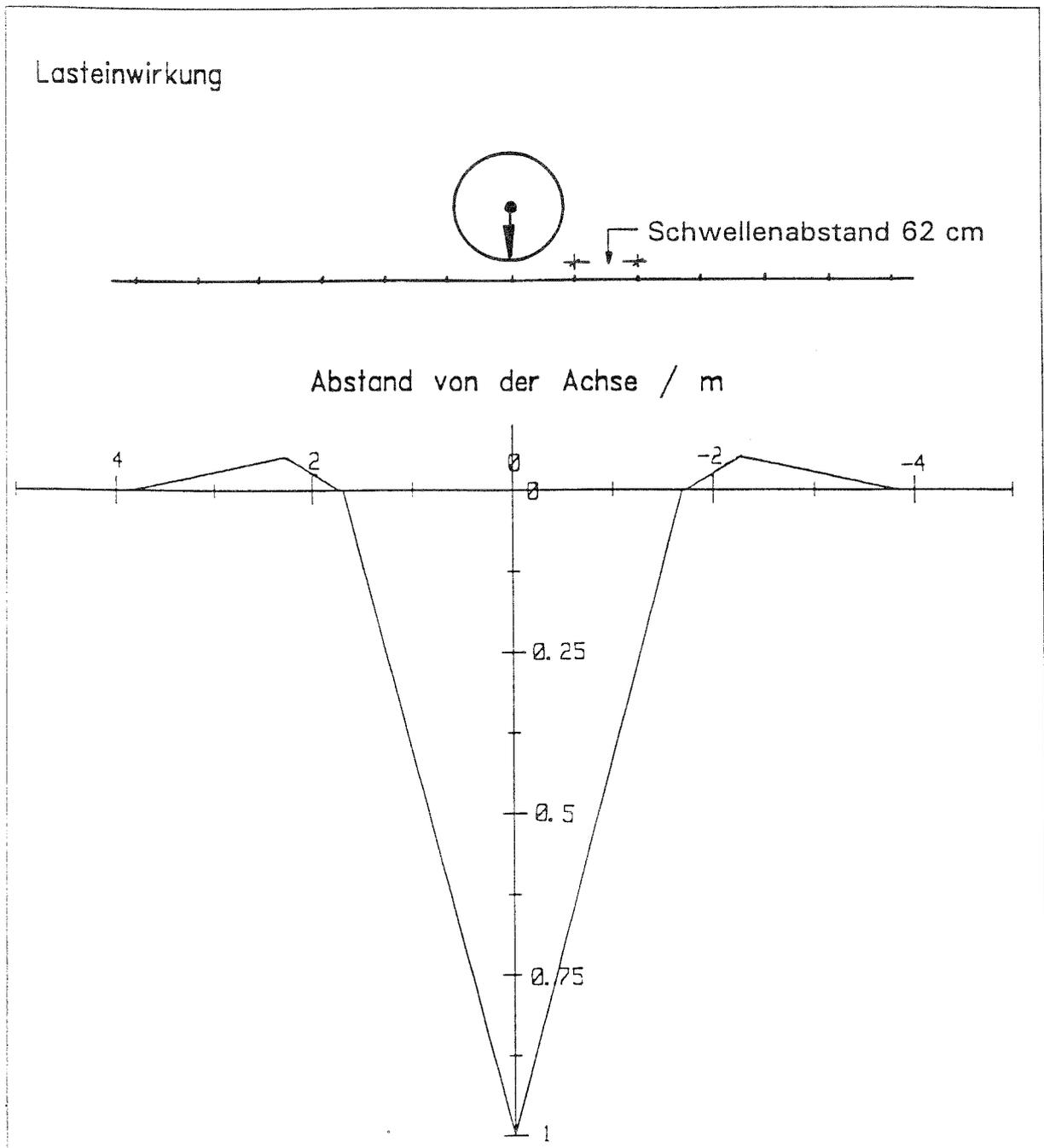
Spurweite: 1,42 m.

Schwellenabstand: 0,62 m.

Es werde die Einwirkung des Zuges über Schiene und Schwelle auf die Oberfläche des Dammes selbst, d.h. auf das Schotterbett, simuliert. Der Zug werde durch die einzelnen Radlasten, angenähert durch Einzellasten, modelliert. Diese Radlasten wirken über die Schiene und Schwelle auf das Schotterbett ein. Zuerst werde von den Schwellen abstrahiert, es werde angenommen, daß die Schiene direkt auf dem Schotterbett aufliegt, was dem Modell eines gebetteten Balkens entspricht. Damit ergibt sich eine gewisse Eintragslänge der Einzellast, die nach der Literatur ungefähr 6 Schwellenabstände beträgt, siehe /1/. Die Form der Lasteinwirkungskurve werde hier ganz grob durch Dreiecke angenähert.

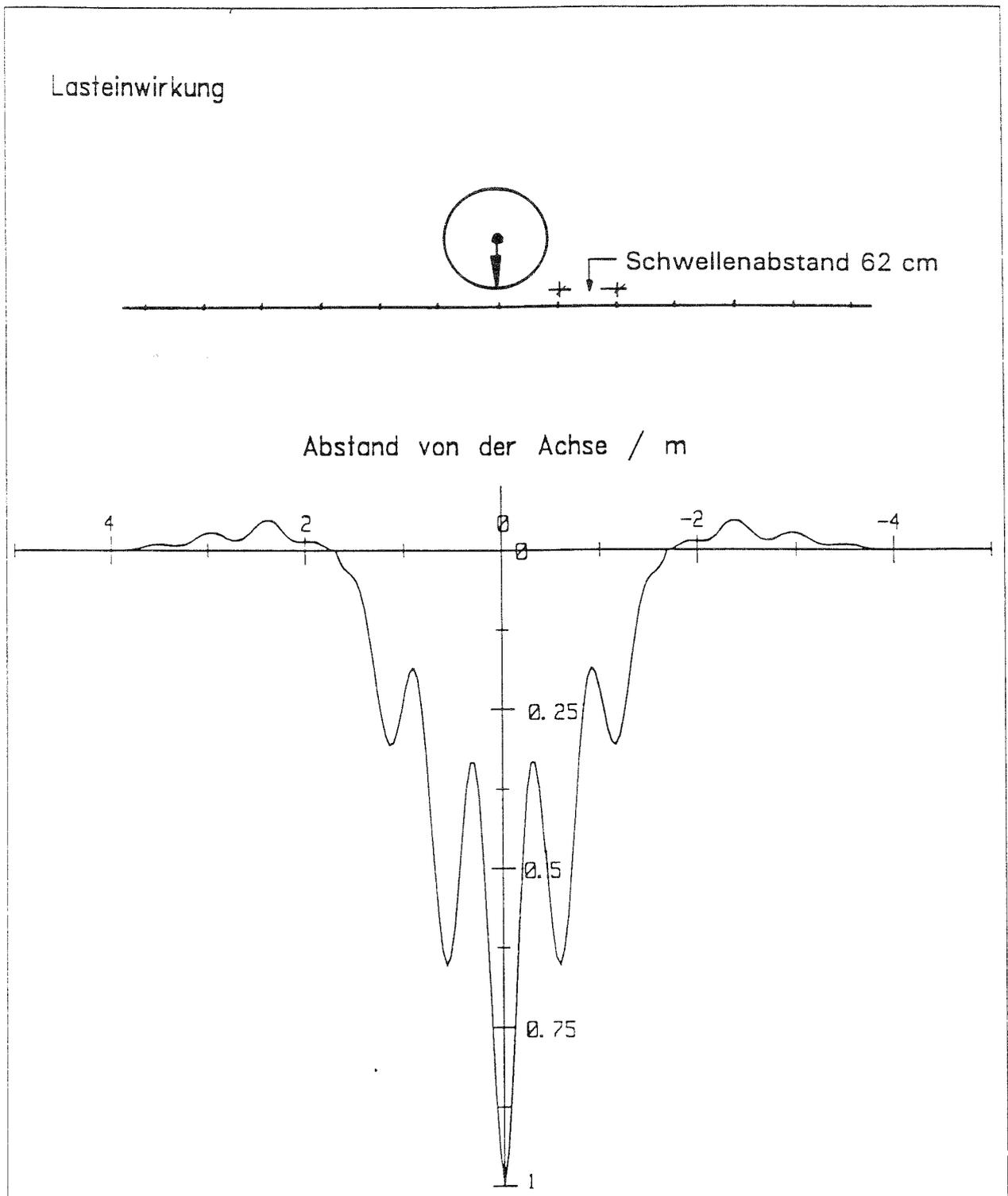
Die Einwirkung einer jeden einzelnen Achse des Zuges auf den Damm über die Schiene wird also durch eine solche mit der Geschwindigkeit  $v$  wandernde Lastverteilung synthetisiert wie in Bild 1 dargestellt, deren Maximalwert proportional zum über die Achse eingebrachten Gewicht gewählt werde.

Bild 1: Lasteinwirkung einer einzelnen Achse auf den Bahndamm bei Annahme einer Einwirkungsbreite von 6 Schwellenabständen und kontinuierlicher Lasteinleitung.



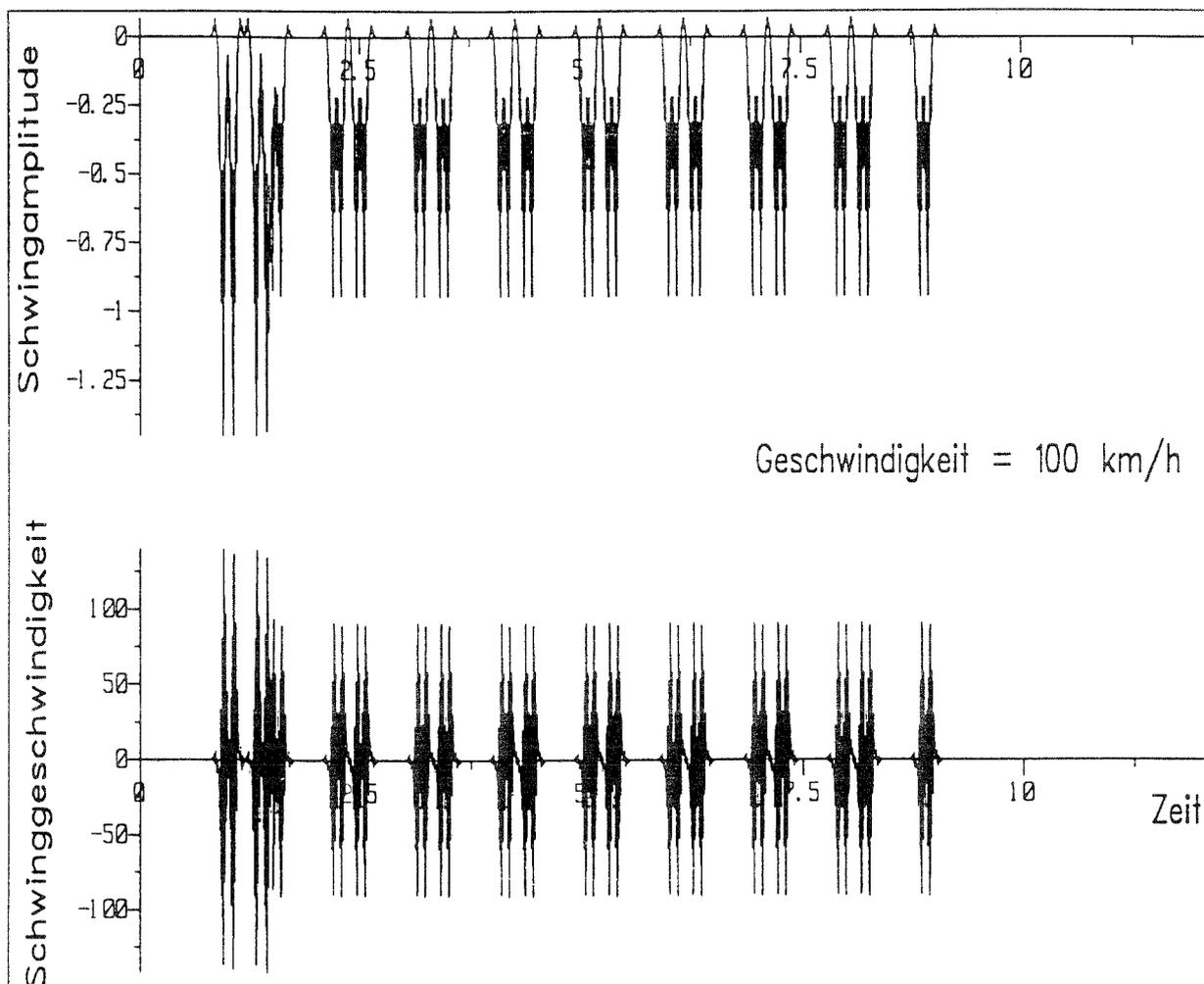
Diese Lastverteilungskurve wirkt nun in Realität nicht auf das Schotterbett, sondern auf den Schwellenrost. Die Einwirkung auf das Schotterbett werde simuliert durch Multiplikation dieser Kurve mit einer Funktion, die die Diskretisierung der Lasteinleitung durch die einzelne Schwelle modelliert. Das Schotterbett wird diese diskrete Funktion in eine kontinuierliche umwandeln, deren Form wie in Bild 2 angenommen wird.

Bild 2: Modulation der Lasteintragungskurve durch die Schwellen



Der gesamte Zug ergibt sich durch eine lineare Superposition aller Einzellasten mit den realen Achsabständen. Das größere Gewicht der Lok wurde durch eine linear vergrößerte Lasteinwirkungskurve berücksichtigt. Für einen Zug mit einer Lok und 8 Waggon wie gemessen ist die Einwirkungskurve in Bild 3 dargestellt, die sich mit der Zuggeschwindigkeit  $v$  über den Damm bewegt. Weiter ist in diesem Bild die Schwinggeschwindigkeit aufgezeichnet, die daraus durch Zeitableitung entsteht. Dabei wurde die Zuggeschwindigkeit zu  $100 \text{ km/h} = 27 \text{ m/sec}$  angenommen. In dieser Größenordnung lagen nämlich die Geschwindigkeiten bei den gemessenen Zugdurchfahrten.

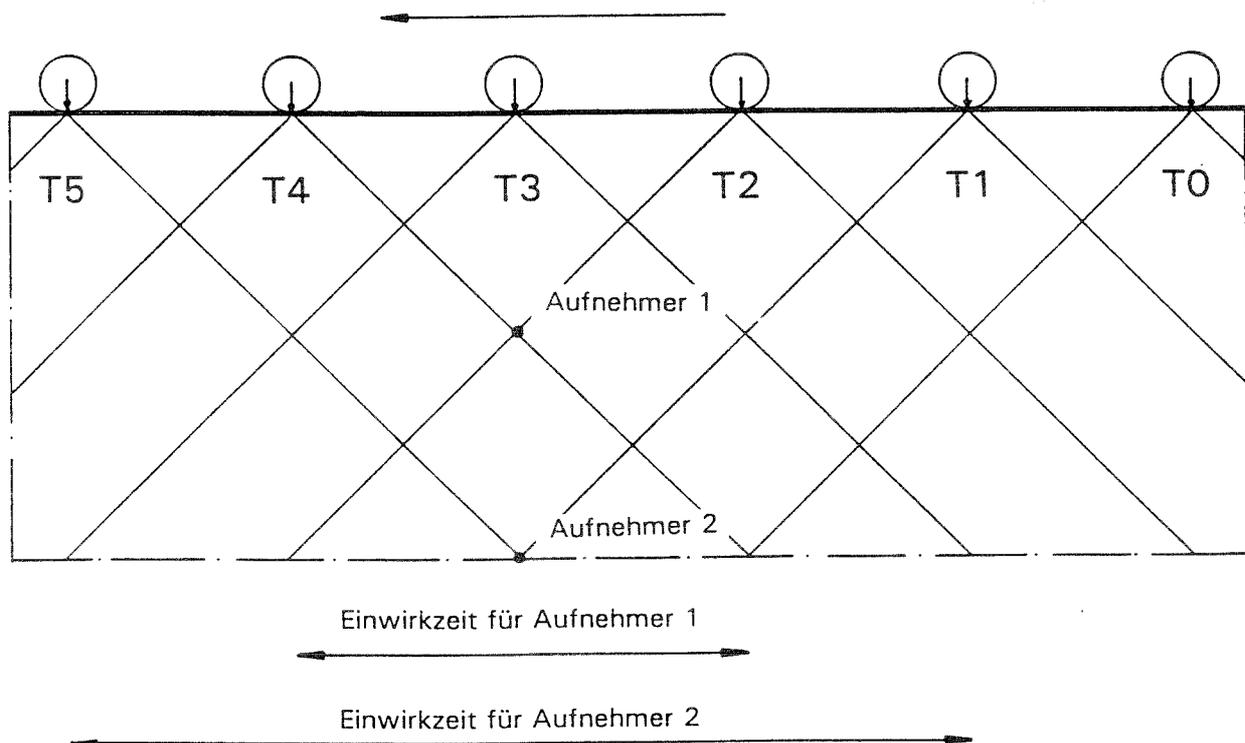
Bild 3: Einwirkung einer Zugdurchfahrt auf die Dammoberfläche durch Superposition der einzelnen Achsen bei einer Geschwindigkeit von  $100 \text{ km/h}$ , Amplituden der Bewegung und der Geschwindigkeiten



Damit hat man die Einwirkung des Zuges direkt auf die Dammoberfläche. Es wurde dabei aber vernachlässigt, daß sich normalerweise an der Oberfläche eine Rayleigh- oder Oberflächenwelle ausbreitet, die dem Zug vorausseilt. Die Ausbildung dieser Rayleigh-Welle wird aber durch das Schotterbett mit seiner großen Dämpfung unterdrückt.

Jede Einzellast verursacht im Damm eine Lastverteilung analog einer Spannungszwiebel, die mit ihrer Geschwindigkeit durch den Damm wandert. Aus dem Einfluß der Einzellasten läßt sich durch Superposition die Wirkung der obigen Gesamtlast aufbauen. Ein Aufnehmer in einer bestimmten Tiefe erfährt die Einwirkung durch die Spannungszwiebel, und zwar erstens das direkte Signal wie es oben abgeleitet wurde und zweitens einen zusätzlichen Anteil, der von der Schrägeinstrahlung der nahenden Schallquelle herrührt. Das bedeutet daß der Aufnehmer vor der direkten Überfahrt schon ein Signal empfängt wie es in Bild 4 skizziert ist.

Bild 4: Beeinflussungsgrößen auf einen Aufnehmer in einer bestimmten Tiefe im Bahndamm

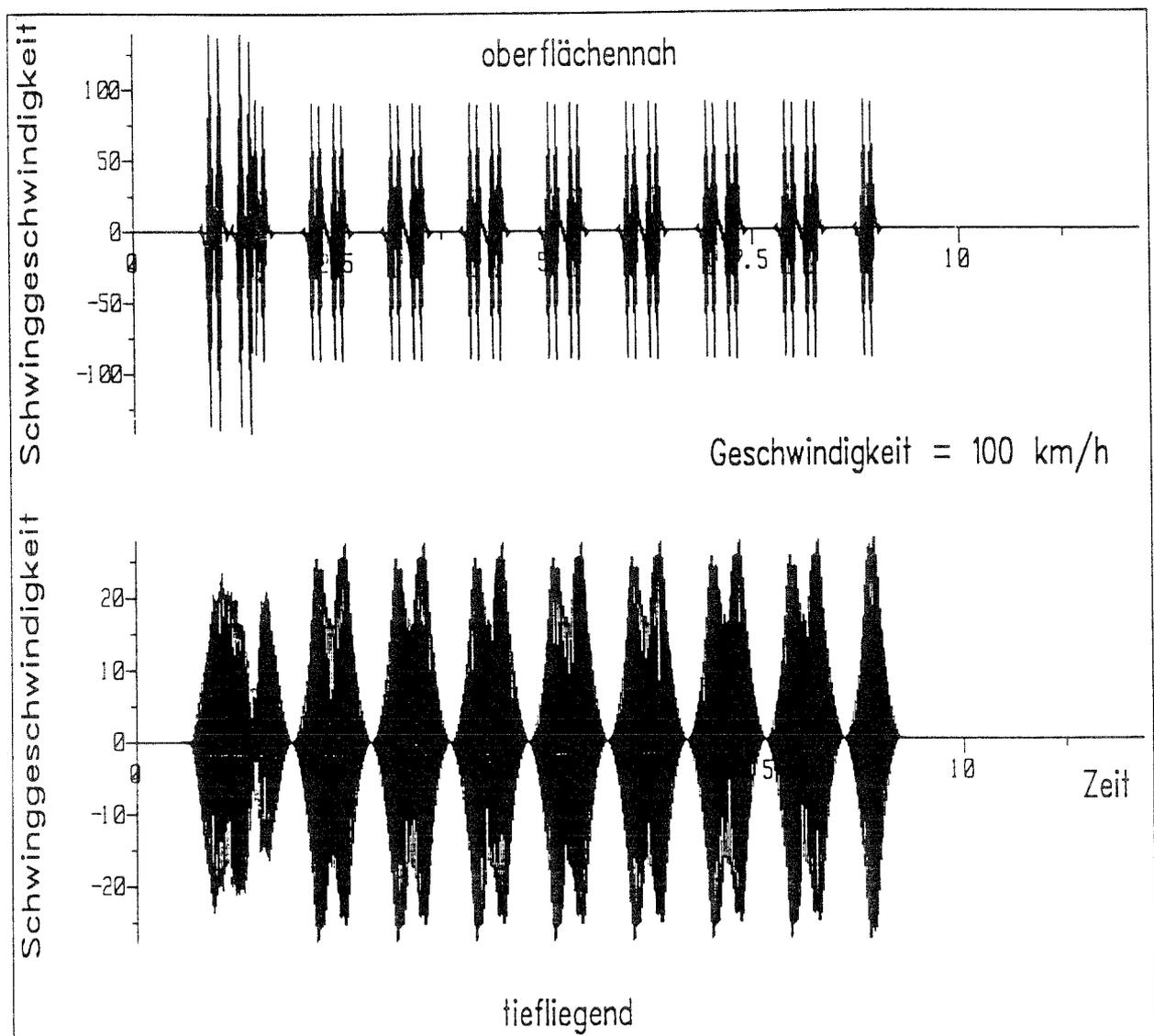


Zeitpunkte einer Radüberfahrt

DR.-ING. HABIL. RAINER BLUM

Wenn man annimmt, daß der halbe Öffnungswinkel der Spannungszwiebel 45 Grad beträgt, erhält man die Signale in Bild 5 für einen oberflächennahen und für einen tiefliegenden (Tiefe 6 Schwellenabstände) Aufnehmer. Dabei wurde die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle im Damm nicht berücksichtigt, da sie wesentlich höher ist als die Geschwindigkeit des Zuges. Ebenfalls wurde die Materialdämpfung der Welle vernachlässigt, es wurde im Gegenteil angenommen, daß die Energie im ersten und im zweiten Aufnehmer die gleiche sei.

Bild 5: Synthetisches Signal eines oberflächennahen und eines tiefliegenden Aufnehmers. Deutlich ist die etwas größere Breite zu erkennen, die das tieferliegende Signal von dem oberflächennahen unterscheidet.

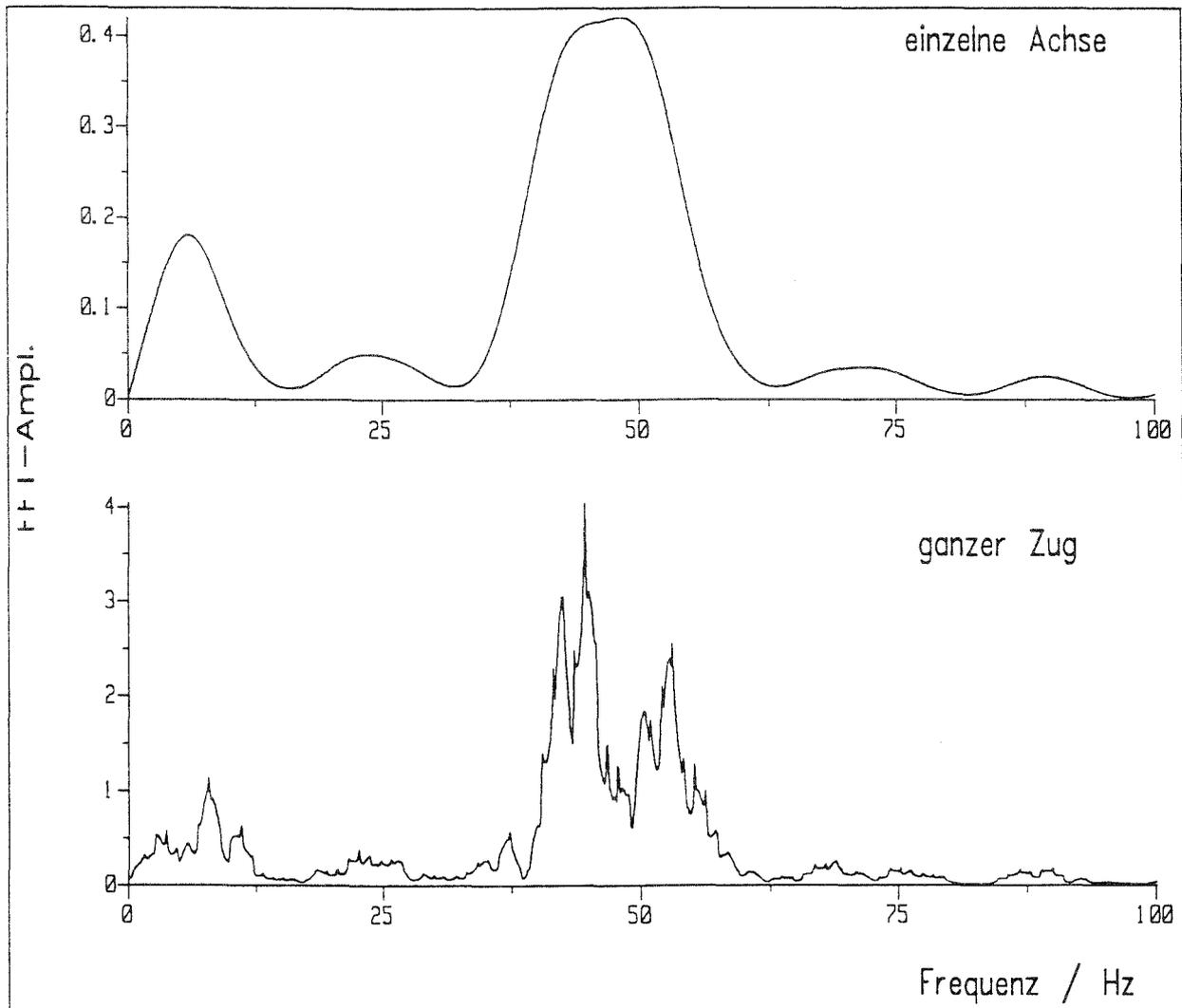


In diesem Bild fällt auf, daß sich im Signal des oberflächennahen Aufnehmers der größere Einfluß der Lok noch sehr deutlich widerspiegelt, während der tiefliegende Aufnehmer hier ein eher schwächeres Signal zeigt, eine Tatsache, die sich in den Messungen auch widerspiegeln wird. Diese Tatsache resultiert daraus, daß der untere Aufnehmer über eine größere Einwirkungszeit integriert und daß am Anfang über eine kleinere Erregung integriert wird als in der Mitte.

Damit sei die Modellierung einer Zugdurchfahrt abgeschlossen. Es handelt sich bei den erhaltenen Signalen um quasistationäre, d. h. um solche, die über eine längere Zeit gleiche Eigenschaften aufweisen. Solche Signale können gut durch eine Überlagerung von Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenzen dargestellt werden. Um dieses sichtbar zu machen, kann man das Werkzeug der Fouriertransformation anwenden, welches das Zeitsignal umwandelt in die Magnituden der entsprechenden Frequenzen, aus denen man sich das Zeitsignal aufgebaut denken kann und ihrer Phasenverschiebung. In Bild 6 ist die Magnitude der Fouriertransformierten /2/ für die Einwirkung der einzelnen Achse und die Superposition der Achsen zu einem Zug für einen ganzen Zug in oberflächennahen Bereich dargestellt.

Im ersten Spektrum der einzelnen Achse kann man zwei unterschiedliche Frequenzschwerpunkte unterscheiden: Einmal diejenige bei 44,8 Hertz, die dem Schwellenabstand von 0,62 m bei einer Geschwindigkeit von  $100 \text{ km/h} = 27,8 \text{ m/sec}$  entspricht und einmal die bei 8 Hertz analog der gesamten Lasteinwirkungsbreite von 4 Meter bei dieser Geschwindigkeit von  $27,8 \text{ m/sec}$ .

Bild 6: Frequenzspektrum einer Achsendurchfahrt und einer Zugdurchfahrt.

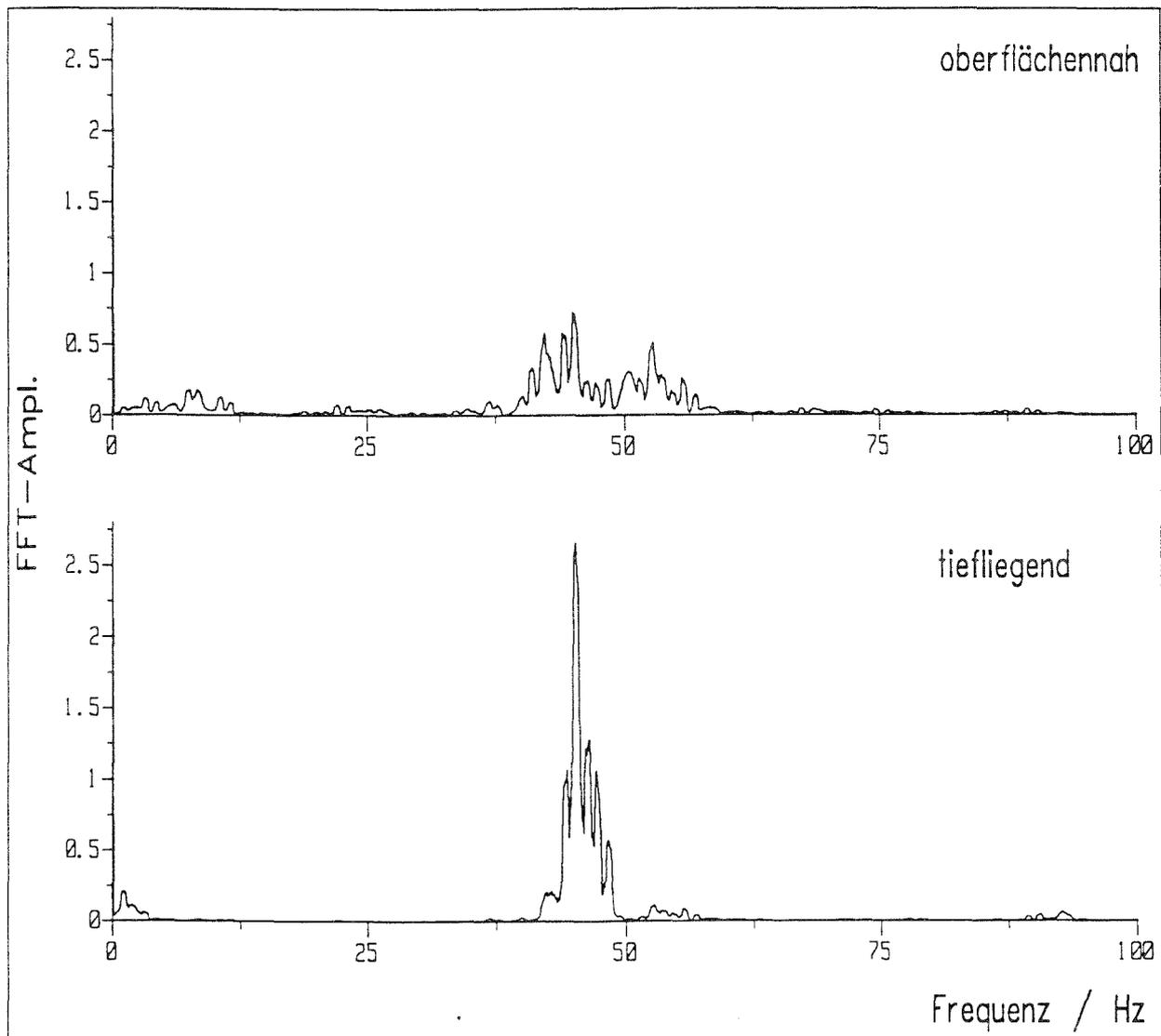


Im zweiten Spektrum für die gesamte Zugdurchfahrt erkennt man die beiden Frequenzschwerpunkte wiederum, nur sind sie entsprechend der Summation vieler Achsen schärfer geworden und zeigen ausgeprägtere Peaks. Im ersten Paket zwischen 0 und 12 Hertz spiegeln sich neben der Lasteinleitungsbreite noch die Frequenzen wider, die dem Abstand der Achsen im Drehgestell und dem Abstand der Drehgestelle entsprechen.

Im zweiten Paket hat sich die Schwellenabstandsfrequenz von 44,8 Hertz deutlich herausgehoben. Daneben erhält man einen neuen Peak bei 52 Hertz, der einer Interaktion zwischen der Einwirkung des Schwellenabstandes und der Lasteinleitungsbreite entspricht. Solche Interaktionen schlagen sich in einer Addition der entsprechenden Frequenzen nieder.

In Bild 7 wird der Unterschied der Spektren für einen oberflächennahen und einen tieferen Aufnehmer dargestellt. Man erkennt deutlich folgende Tatsachen: Der oberflächennahe Aufnehmer besitzt ein breiteres Spektrum als der tiefliegende. Das kommt daher, daß an der Oberfläche das Signal der Zugdurchfahrt noch relativ diskret ist. Diskrete Signale besitzen ein breites Spektrum. Dagegen ist das Signal in der Tiefe eher verschmiert, d. h. kontinuierlicher. Dem entspricht ein diskreteres Verhalten im Frequenzbereich. Weiter ist interessant, daß Frequenzen unter 12 Hertz im selbst oberflächennahen Bereich zwar noch vorhanden sind, daß sie aber eine eher untergeordnete Rolle spielen.

Bild 7: Spektrum der Schwinggeschwindigkeiten eines oberflächennahen und eines tiefliegenden Aufnehmers



Das hängt damit zusammen, daß hier die Schwinggeschwindigkeiten dargestellt wurden, die um so geringer werden, je kleiner die Frequenzen sind. Für die tiefliegenden Aufnehmer nimmt die Rolle der tiefen Frequenzen im Verhältnis zu den hohen auch immer mehr ab. Die Peaks des Spektrums sind auch leicht zu erklären: Im tieferliegenden Aufnehmer spiegelt sich der Schwellenabstand von 0,62 m, der bei einer Durchfahrtsgeschwindigkeit von 27 m/sec zu einer Frequenz von 46 Hertz führt, deutlich wider. Andere Frequenzen treten fast nicht mehr auf. Beim oberflächennahen Aufnehmer sind auch noch tiefe Frequenzen vorhanden wie schon oben erwähnt. Sie stammen wie schon oben erwähnt her von den Frequenzen, die den Achsabständen im Drehgestell der Lok (8,18 Hertz) und im Drehgestell des Waggons (10,5 Hertz) entsprechen.

Insgesamt kann man aber mit einiger Berechtigung sagen, daß die interessanten Frequenzen bei einer Zugdurchfahrt ab ungefähr 10 Hertz beginnen.

Neben diesen Anregungen, die sich in unserem Modell widerspiegeln, treten bei der Durchfahrt eines Zuges natürlich noch andere Anregungsfrequenzen auf, die zum Beispiel mit den Umlaufgeschwindigkeiten der verschiedenen Räder verbunden sind. Für die Waggonräder ergibt sich eine solche von 10 Hertz und für die Lokräder eine von 8,8 Hertz bei einer Durchfahrtsgeschwindigkeit von 100 km/h. Die oben abgeleiteten Signale müßten also mit einer solchen Erregung moduliert werden. Das wird hier in der Theorie nicht ausgeführt, weiter unten wird darauf eingegangen werden. Es sei nur so viel gesagt, daß sich die Modulation im Spektrum durch additive Anteile zu den sonstigen Frequenzen bemerkbar macht.

Damit hat man zumindest einen Anhaltspunkt darüber, wie die einzelnen Spektren aussehen müssen und was sich in ihnen widerspiegelt.

### 3. MESSGERÄTE UND DEREN MONTAGE

#### Aufnehmer

Die Aufnehmer selbst waren selbstgebaute Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer, die auf einem Schwingtisch kalibriert worden waren. Es wurden diese selbstgebaute Aufnehmer eingesetzt, da nicht sicher war, ob sie nach den Messungen noch geborgen werden konnten und handelsübliche in Anbetracht der geringen zur Verfügung stehenden Mittel einen zu großen Verlust dargestellt hätten. Die angegebenen Amplituden sind also Geschwindigkeiten, in unserem speziellen Fall mm/sec. Bemerkt werden muß hier, daß die Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer auf Grund ihrer Bauart für die Registrierung tiefer Frequenzen nicht geeignet sind. Deshalb werden Frequenzen unter 10 Hertz in diesem Bericht nicht ausgewertet. Das ist nach den theoretischen Voruntersuchungen auch gerechtfertigt.

In Bild 8 wird die Prinzipskizze des Aufnehmers für eine Achse gezeigt und in Bild 9 die Montage der einzelnen Aufnehmer zu einem Dreiachsaufnehmer

Bild 8: Prinzipskizze des Aufnehmers für die vertikale Achse

## SCHWINGUNGS-AUFNEHMER

- 1 Schwingmasse mit Permanentmagnet
- 2 Permanentmagnete
- 3 Spule
- 4 Verstellechraube
- 5 Federblech
- 6 Grundkörper

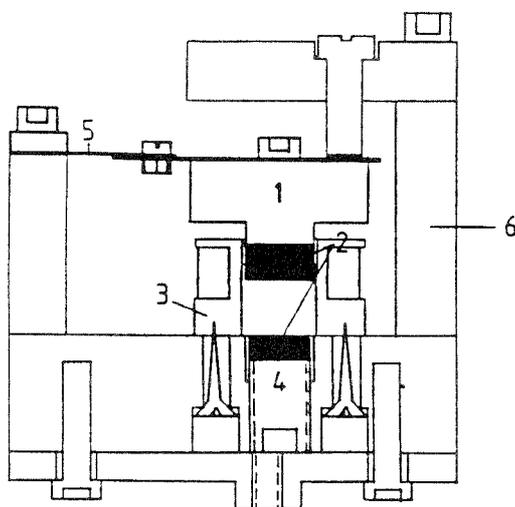
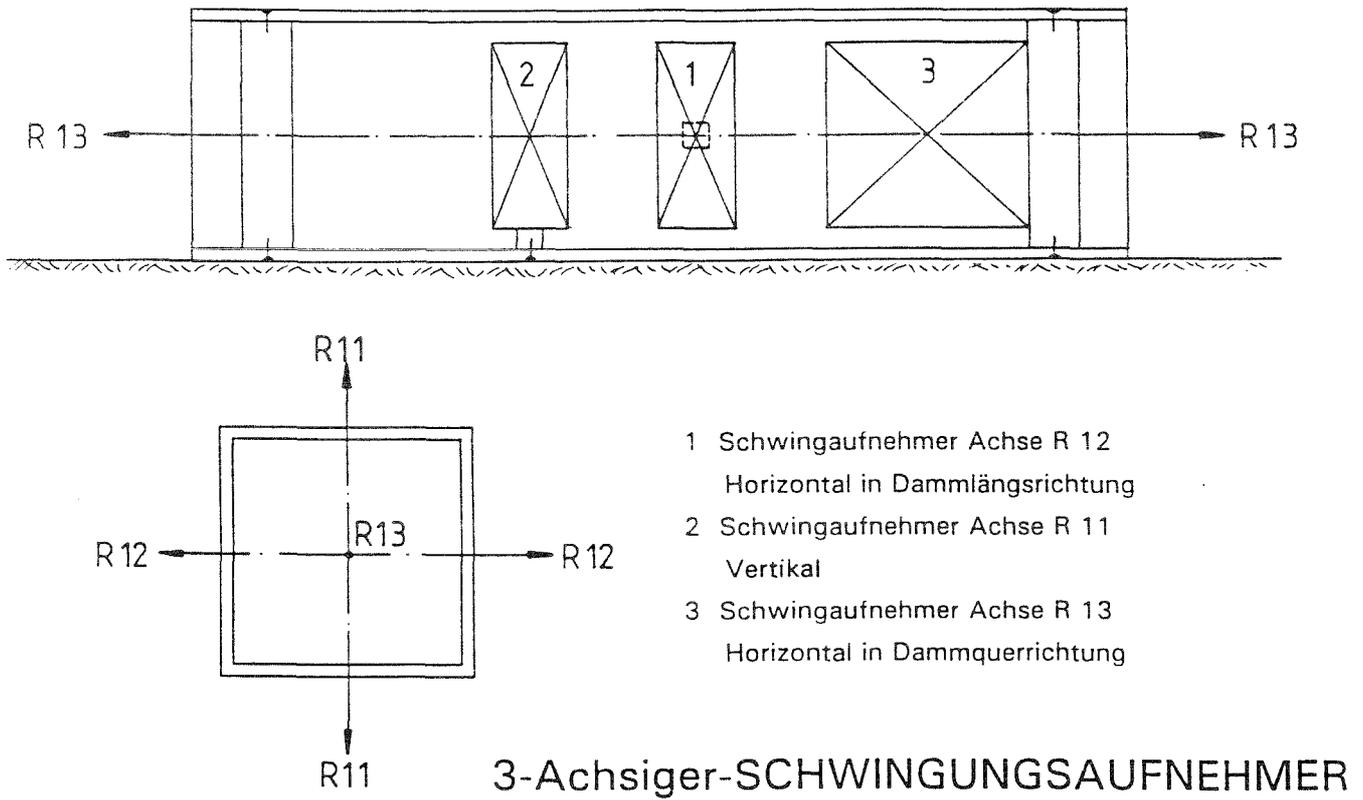


Bild 9: Zusammenbau der einzelnen Aufnehmerachsen zu einem Dreiachsaufnehmer



### KALIBRIERUNG

Die selbstgebauten Aufnehmer zeigten aus Kosten- und Sensitivitätsgründen kein lineares Verhalten, sie wiesen eine Reihe von Resonanzstellen auf, die bei den handelsüblichen Aufnehmern durch Dämpfung unterdrückt werden. Um trotzdem zu vernünftigen Signalen zu kommen, wurden sie auf einem vertikal und horizontal erregbaren Schütteltisch zusammen mit einem kalibrierten Aufnehmer montiert und gemeinsam angeregt. Die Übertragungsfunktion zwischen den beiden Aufnehmern wurde gemessen und alle Messergebnisse wurden mit dieser Übertragungsfunktion beaufschlagt.

### REGISTRIERUNG

Die Signale aller Aufnehmer, insgesamt  $6 \cdot 3 = 18$  Kanäle, wurden in einer Datenerfassungsanlage der Firma Megadac digitalisiert und auf Band gespeichert. Die Summenabtastrate für alle Kanäle betrug 20 kHz, so daß sich pro Kanal eine Abtastrate von ungefähr 1000 Hz ergab. Damit lassen sich Frequenzen bis zu 150 Hertz sicher messen.

### EINBAU DER AUFNEHMER

Ein Quadratrohr mit den Außenabmessungen 120\*120 mm wurde von einem Gerüst aus mit einem pneumatisch angetriebenen Rammhammer horizontal in den Damm eingerüttelt. Der Querschnitt an der Vorderseite des Rohres war als Schneide ausgebildet. Mit einer Spüllanze wurde das Material aus dem Innenraum ausgespült. Die Aufnehmer wurden mit einem Setzstock eingeschoben. Danach wurde das Rohr zurückgezogen, und die korrekte Lage der Aufnehmer überprüft. Auf diese Art wurde die Umgebung der Aufnehmer durch den Einbau sehr wenig gestört. Die so hergestellten Hohlräume erwiesen sich wider Erwarten als standfest, so daß sämtliche Aufnehmer nach Durchführung der Versuche wieder geborgen werden konnten.

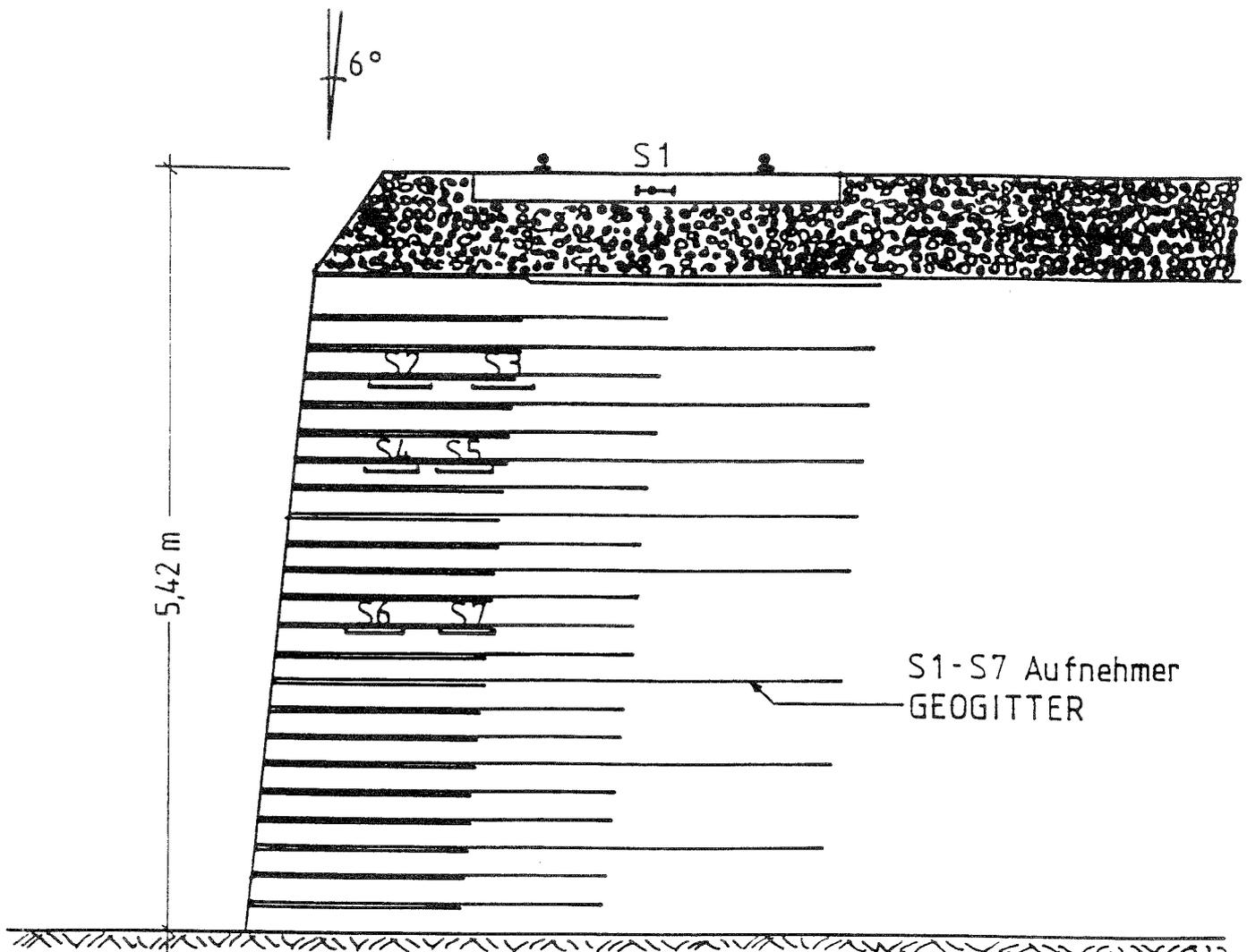
#### 4. MESSUNGEN AN EINEM KUNSTSTOFFVERSTÄRKTEM DAMM

##### 4A. LAGEPLAN DER AUFNEHMER UND TABELLE DER GEMESSENEN ZUGDURCHFÄHRTEN

Der Querschnitt und Aufbau des Dammes ist in Bild 8 gezeigt. Der Damm selbst wurde in Anlehnung an die Bauweise der "Bewehrten Erde" hergestellt. Die Frontseite wurde während des Baues mit einer Schalung abgestützt. Dahinter wurden Kieslagen (Körnung des Kieses 0 - 56 mm) eingebaut und verdichtet. Die einzelnen Kieslagen waren durch Geogitter getrennt. Mit einer Rammsondierung wurde die Lagerungsdichte erkundet. Es ergab sich eine dichte Lagerung.

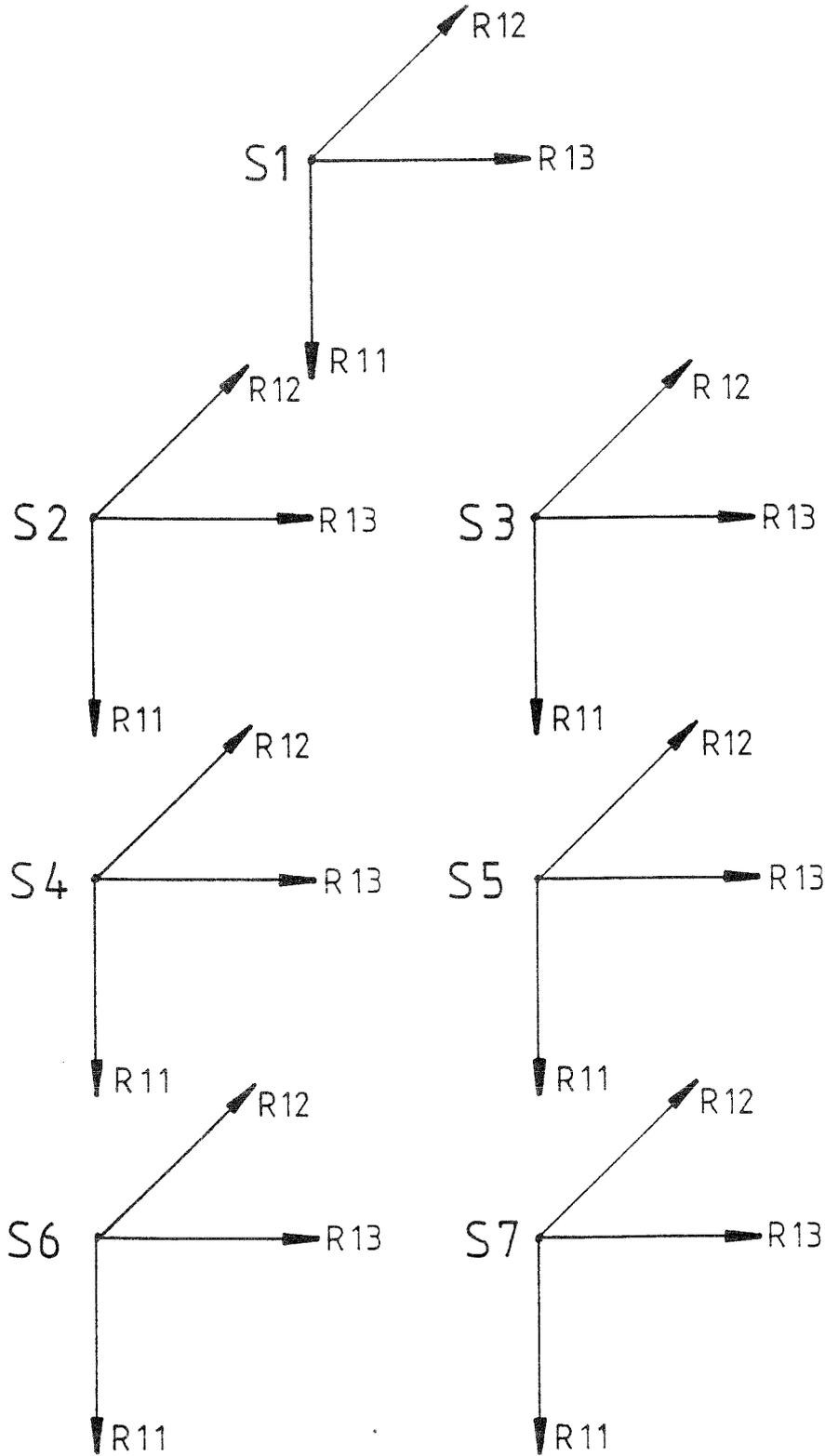
Der Damm selbst stand auf Schotter-Rüttel-Säulen, die nur sehr wenig nachgiebig waren. Das bedeutet, daß der Impedanzunterschied zwischen dem eigentlichen Damm und dem Untergrund gering war, oder, mit anderen Worten, daß im Damm sich ausbreitende Wellen in den Untergrund leicht eindringen konnten und nicht in der Grenzschicht reflektiert wurden. Auf dem Damm liefen drei Gleise, die, ausgehend von dem Gleis über dem verstärkten Teil, mit den Zahlen 1, 2 und 3 numeriert wurden. Der Einbau der Aufnehmer wurde oben beschrieben. Der Aufbau des Dammes ist in Bild 10 zusammen mit der Lage der Aufnehmer gezeigt.

Bild 10: Aufbau des verstärkten Dammes und Lage der Dreiachsaufnehmer S1 bis S7. Jeder Dreiachsaufnehmer besteht aus drei einzelnen Aufnehmern, denen Kanalnummern zugeordnet sind.



In Bild 11 ist die Zuordnung der verschiedenen Raumachsen zu den Kanalnummern gezeigt.

Bild 11: Zuordnung der Kanalnummern zu den Raumachsen



In der folgenden Tabelle 1 sind alle gemessenen Zugdurchfahrten aufgelistet.

Tabelle 1: Gemessene Zugdurchfahrten mit Charakteristika

Mes- sung Nr.	Uhr -zeit	Gleis	Rich- tung	Zugart
1	13:59	2	Nord	Triebwagen
2	14:05	1	Nord	Lok+3 Waggons, NVZ
3	14:07	3	Süd	Lok+2 Waggons
4	14:11	3	Süd	Lok+11 Waggons
4a	14:11	2	Nord	Lok+1 Waggon
5	14:15	3	Süd	Triebwagen
6	14:36	1	Nord	Lok+3 Waggons
7	15:01	1	Süd	Lok+7 Waggons, Ausfall
8	15:16	2	Nord	Albtalbahn (Straßenbahn)
9	15:19	3	Süd	Lok+6 Waggons, NVZ
10	15:24	3	Süd	Triebwagen
11	15:27	1	Süd	Lok+4 Waggons
12	15:44	3	Süd	Albtalbahn
13	15:53	1	Süd	Lok+7 Waggons
14	15:54	2	Nord	Triebwagen
15	16:03	1	Nord	Lok+3 Waggons

## 4B. EINZELDURCHFART, ZEITSIGNALE

Vor einer ausführlicheren Diskussion sollen zuerst die Zeitsignale aller Aufnehmer für die Durchfahrt Nummer gezeigt und einzeln besprochen werden.

Bild 12: Signal des Aufnehmers 3, R11 vertikale Richtung, R12 horizontal in Fahrbahnrichtung, R13 horizontal senkrecht zur Fahrbahnrichtung. Die Richtung R13 ist ausgefallen. Beim Signal R11 erkennt man deutlich das relativ diskrete Signal wie oben bei der synthetischen Generierung der Zugdurchfahrt schon abgeleitet.

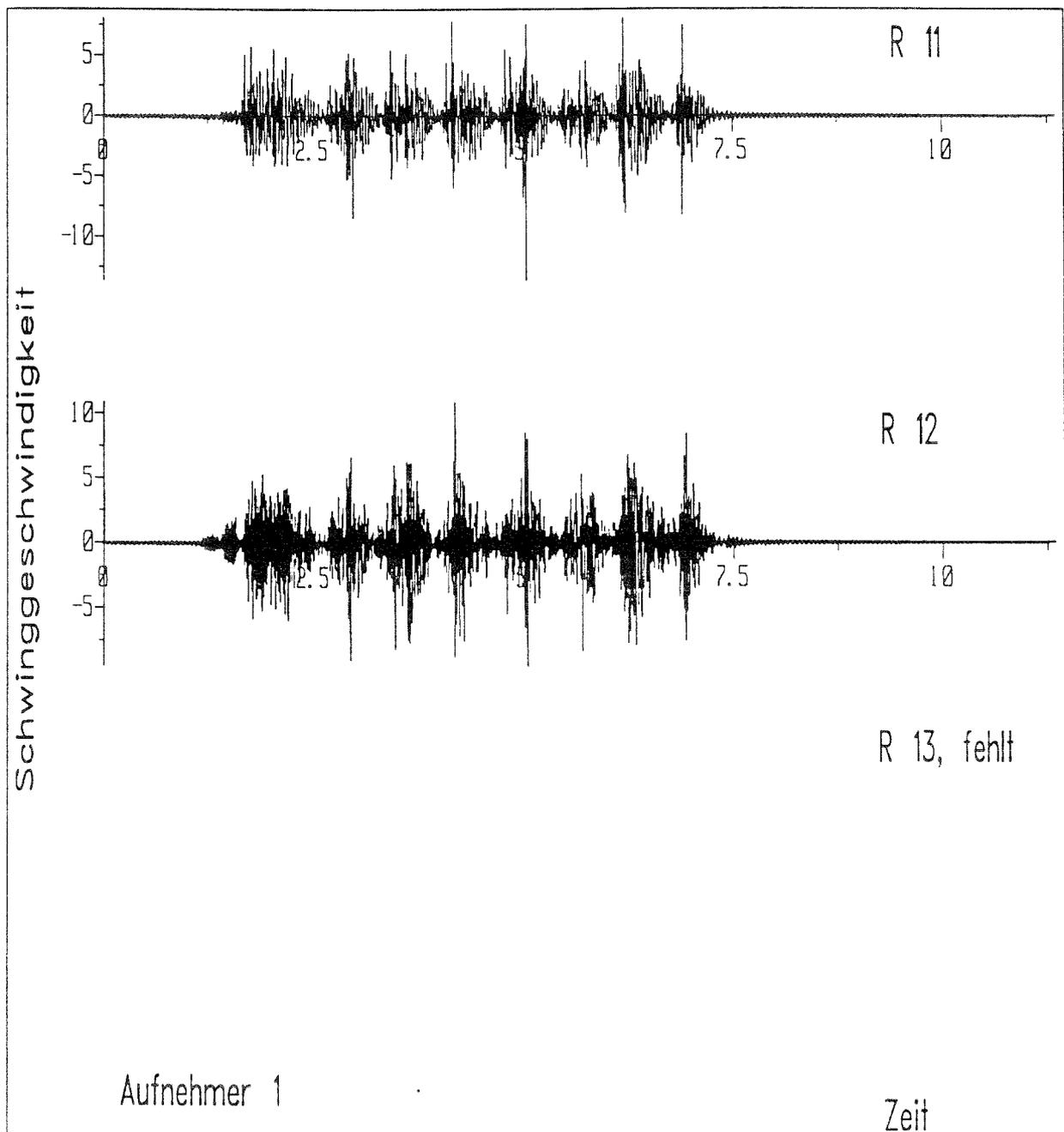


Bild 13: Signal des Aufnehmers 2, R11 vertikale Richtung, R12 horizontal in Fahrbahnrichtung, R13 horizontal senkrecht zur Fahrbahnrichtung ist ausgefallen. Wieder ist ein relativ diskretes Signal zu erkennen. Die Lok zeichnet sich am Anfang durch höhere Amplituden deutlich ab. Die Amplituden sind deutlich niedriger als in Bild 9.

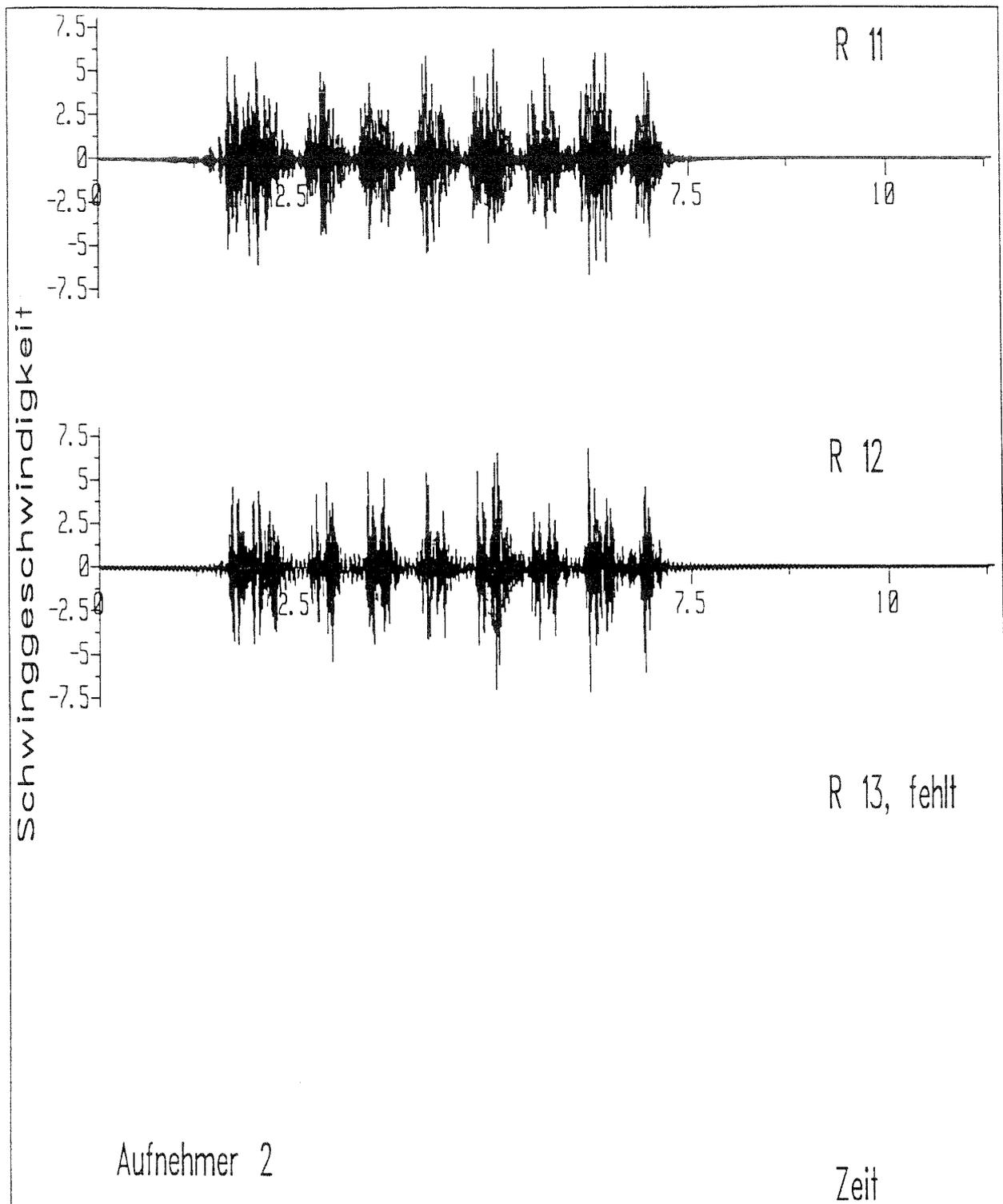


Bild 4: Signal des Aufnehmers 5, R11 vertikale Richtung, R12 horizontal in Fahrbahnrichtung, R13 horizontal senkrecht zur Fahrbahnrichtung. Das Signal für den vertikalen Aufnahme zeigt eine zunehmend "kontinuierliches " Erscheinungsbild. Die 13-Richtung ist wiederum ausgefallen.

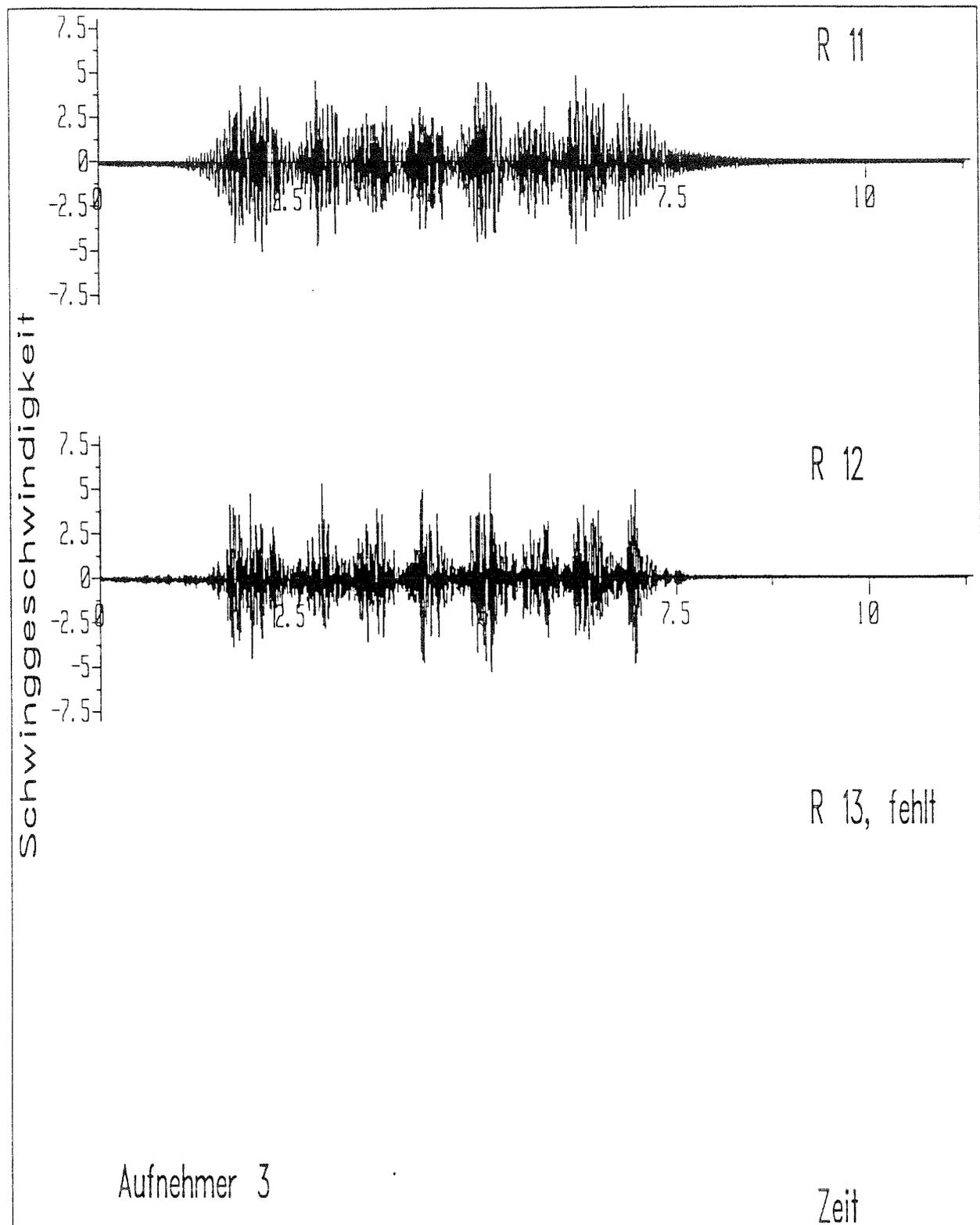


Bild 15: Signal des Aufnehmers 4, R11 vertikale Richtung, R12 horizontal in Fahrbahnrichtung, R13 horizontal senkrecht zur Fahrbahnrichtung. Der Kommentar von oben könnte für die Richtungen 11 und 12 ohne Abänderung wiederholt werden, die Richtung 13 zeigt das gleiche Bild. Die Amplituden haben aber noch weiter abgenommen. Hier zeigt sich der Effekt, daß die Lok eine geringere Erschütterung induziert als die Waggons, eine Tatsache, die schon oben erwähnt und erklärt wurde.

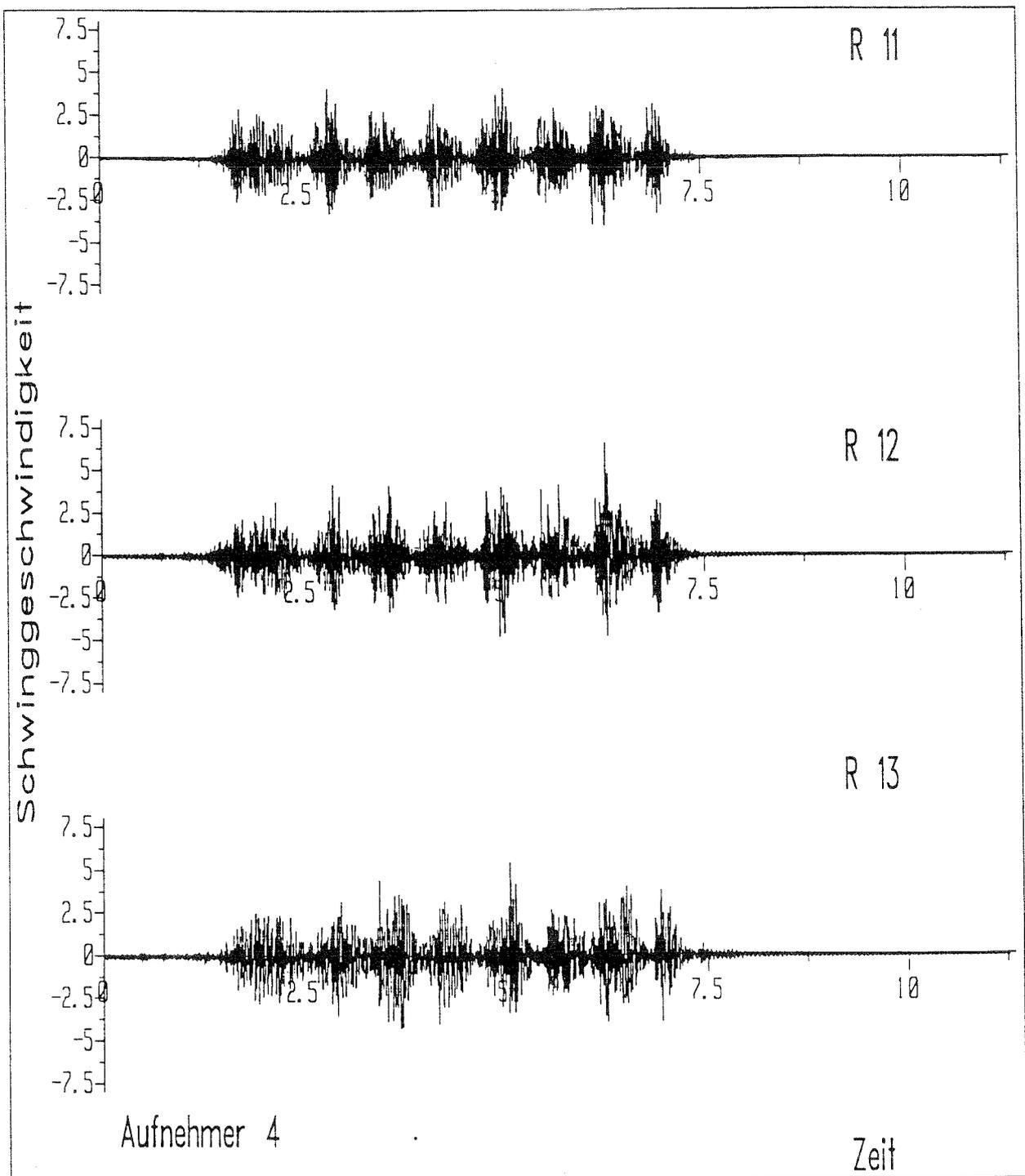


Bild 16: Signal des Aufnehmers 7, R11 vertikale Richtung, R12 horizontal in Fahrbahnrichtung, R13 horizontal senkrecht zur Fahrbahnrichtung. Das vertikale Signal wird immer kontinuierlicher ebenso wie die horizontalen. Die Abnahme der Amplituden wirkt sich bemerkbar aus.

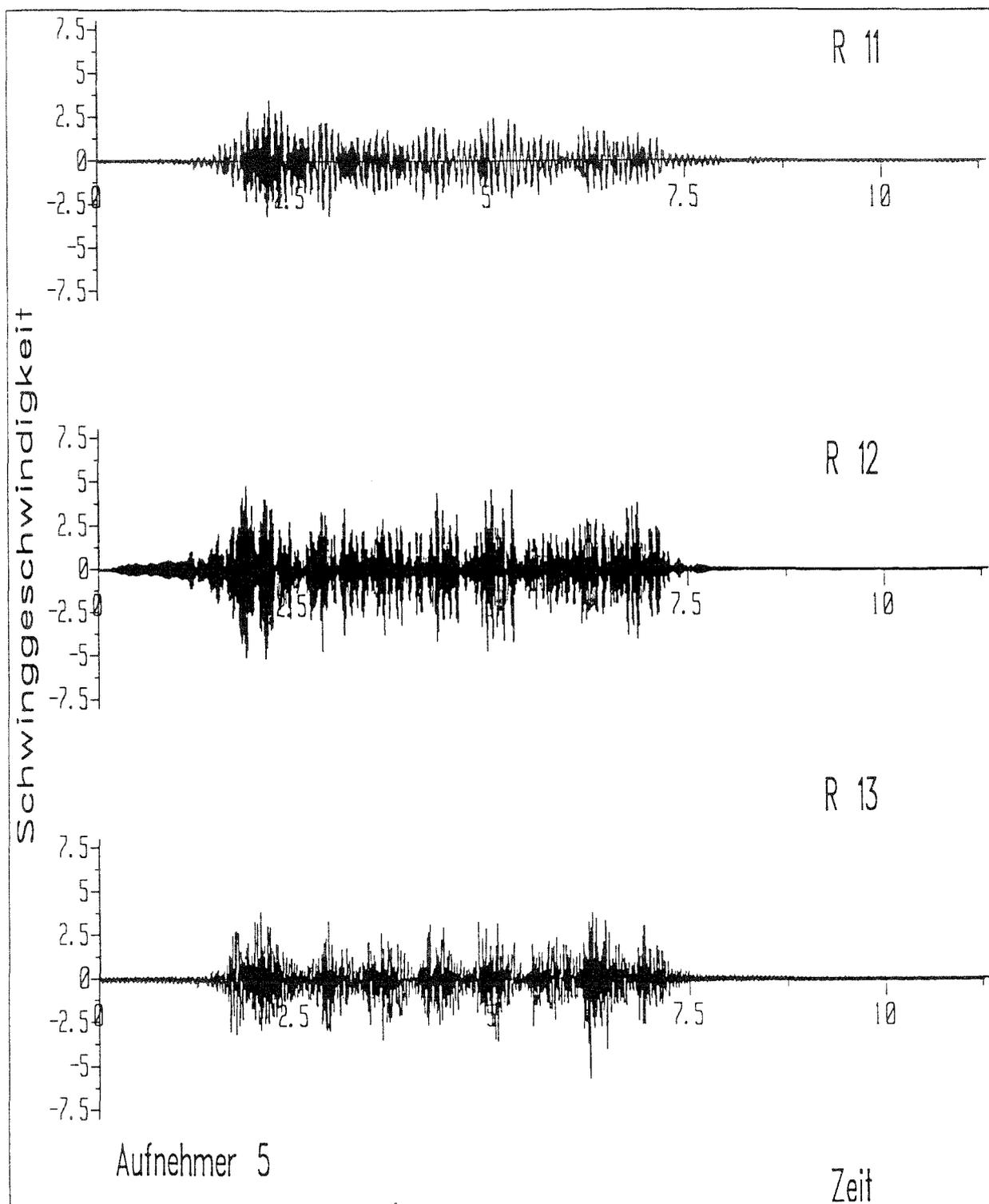
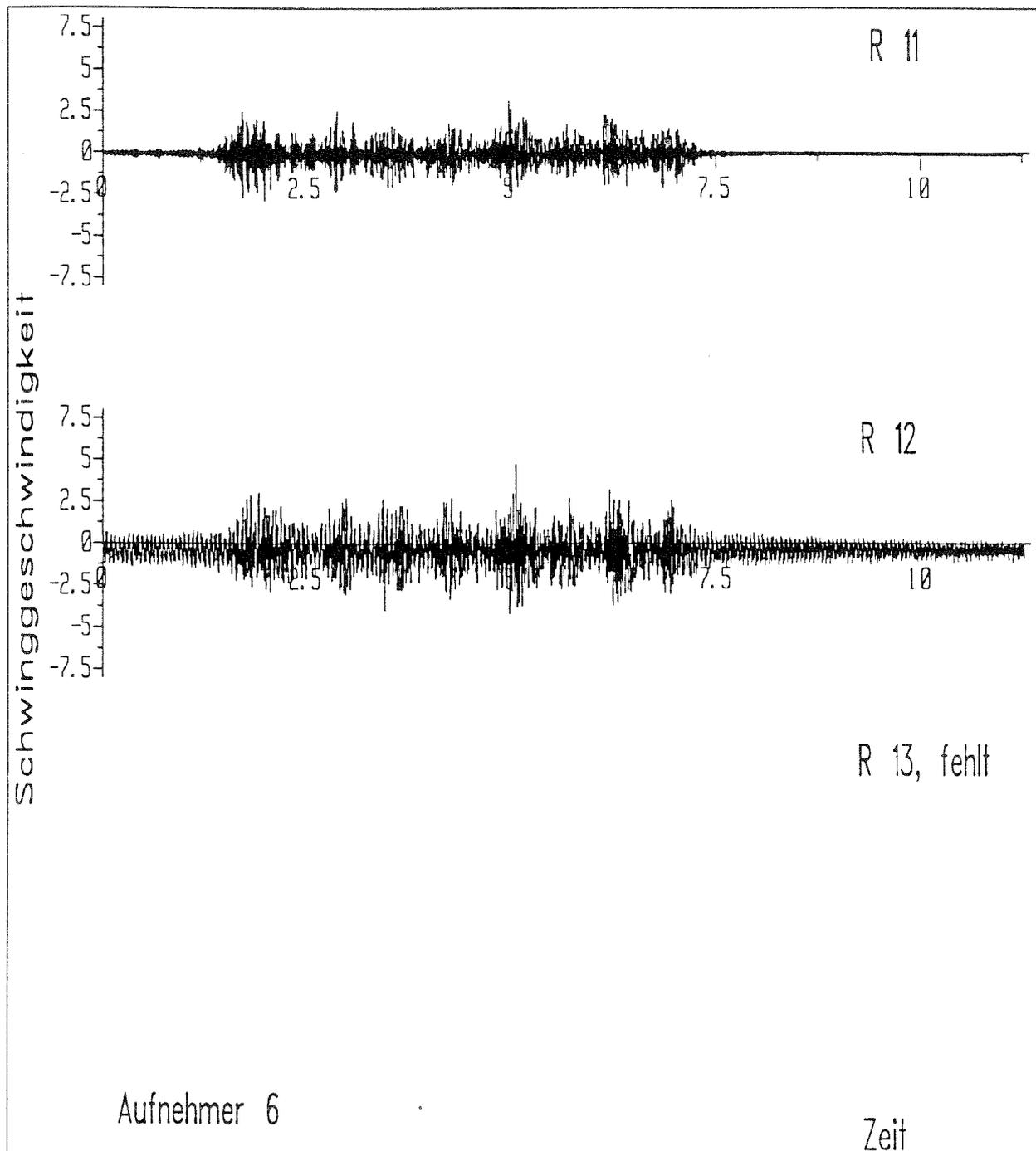


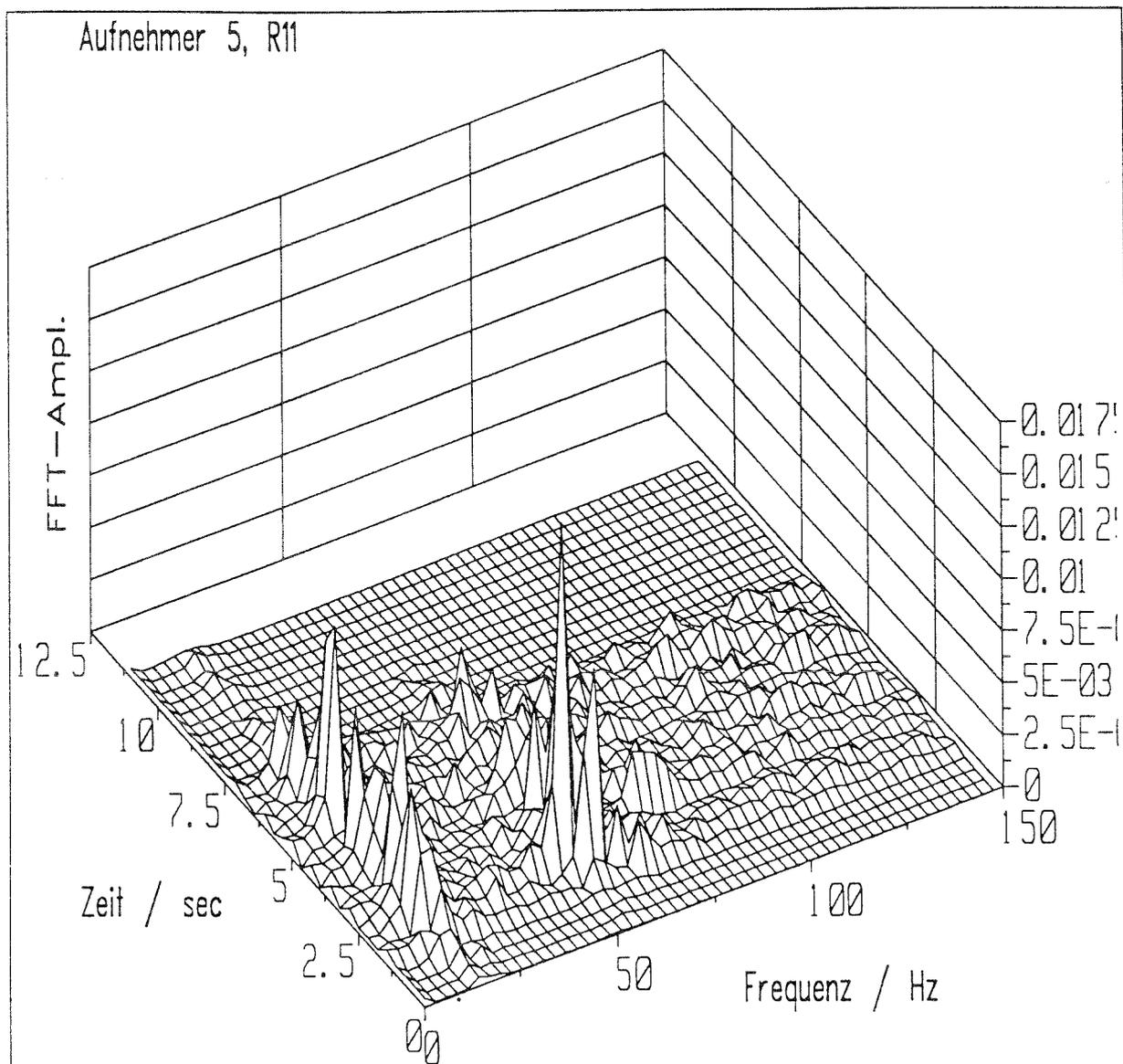
Bild 17: Signal des Aufnehmers 6, R11 vertikale Richtung, R12 horizontal in Fahrbahnrichtung, R13 horizontal senkrecht zur Fahrbahnrichtung. Richtung 13 ist ausgefallen. Richtung 12 zeigt ein zu hohes Rauschen, dessen Ursache in eine Fehlfunktion liegen könnte. Ansonsten läßt sich der Kommentar von Bild 13 ohne Abänderung wiederholen. Auffällig ist der mehr und mehr "kontinuierliche" Charakter der Signale. Bei einem direkten Vergleich mit dem Signal in Bild 12 erkennt man wie oben angedeutet, daß dieses Signalbreiter ist als das in Bild 12 gezeigte.



## 4C. WASSERFALLDARSTELLUNG EINES DURCHFARTSIGNALS

In Bild 15 werde die Wasserfalldarstellung eines Signals (Aufnehmer 5, Richtung 11 senkrecht) gezeigt. Deutlich erkennt man einen Spektrenschwerpunkt unter ungefähr 10 Hertz und einen zwischen 40 und 50 Hertz. Damit ist die Modellierung im ersten Kapitel zumindest der Idee nach richtig. Die Amplituden der niedrigeren Frequenzen sind allerdings höher als oben abgeleitet. Das rührt daher, daß in der obigen Ableitung die Radumlauf Frequenzen, die bestimmt eine große Rolle spielen, nicht berücksichtigt wurden. Von einem theoretisch vorhandenen Dopplereffekt läßt sich nichts feststellen.

Bild 18: Wasserfalldarstellung des Signals R11 des Aufnehmers 5.



## 4D. ÜBER ALLE ZUGDURCHFARTEN GEMITTELTE SPEKTREN

Im folgenden sollen die gemittelten Spektren aller Zugdurchfahrten vorgestellt werden. Dazu wurden zuerst alle Geschwindigkeiten der Züge aus den Zeitsignalen bestimmt. Es ergaben sich nur wenig von  $100 \text{ km/h} = 26 \text{ m/sec}$  abweichende Geschwindigkeiten. So war es gerechtfertigt, alle Durchfahrten mit einer linearen Zeittransformation auf eine gemeinsame Geschwindigkeit von  $26 \text{ m/sec}$  zu transformieren und die dann entstehenden Spektren zu summieren. Man erhält so ein mittleres Spektrum, in dem die zufälligen Schwingungen von Drehgestellen, Wagenkästen etc. und die Unwuchten von Rädern etc. fast keine Rolle mehr spielen. Dieses mittlere Spektrum kennzeichnet die dynamischen Eigenschaften des Dammes besser als ein mit vielen Zufälligkeiten behaftetes Spektrum einer Einzeldurchfahrt.

Bild 19: Gemittelte Spektren für den Aufnehmer 3 mit den drei Richtungen R11 (vertikal), R12 (horizontal in Zugrichtung) und R13 (horizontal senkrecht zur Zugrichtung).

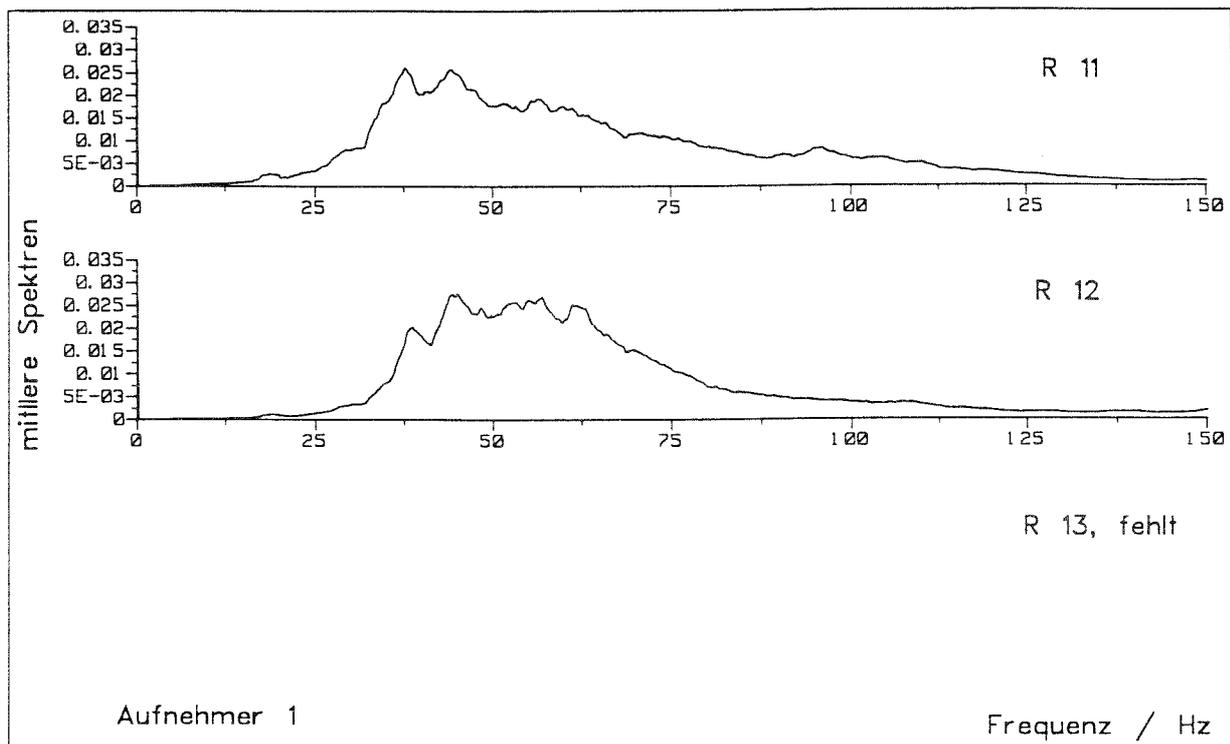


Bild 20: Gemittelte Spektren für den Aufnehmer 2 mit den drei Richtungen R11 (vertikal), R12 (horizontal in Zugrichtung) und R13 (horizontal senkrecht zur Zugrichtung).

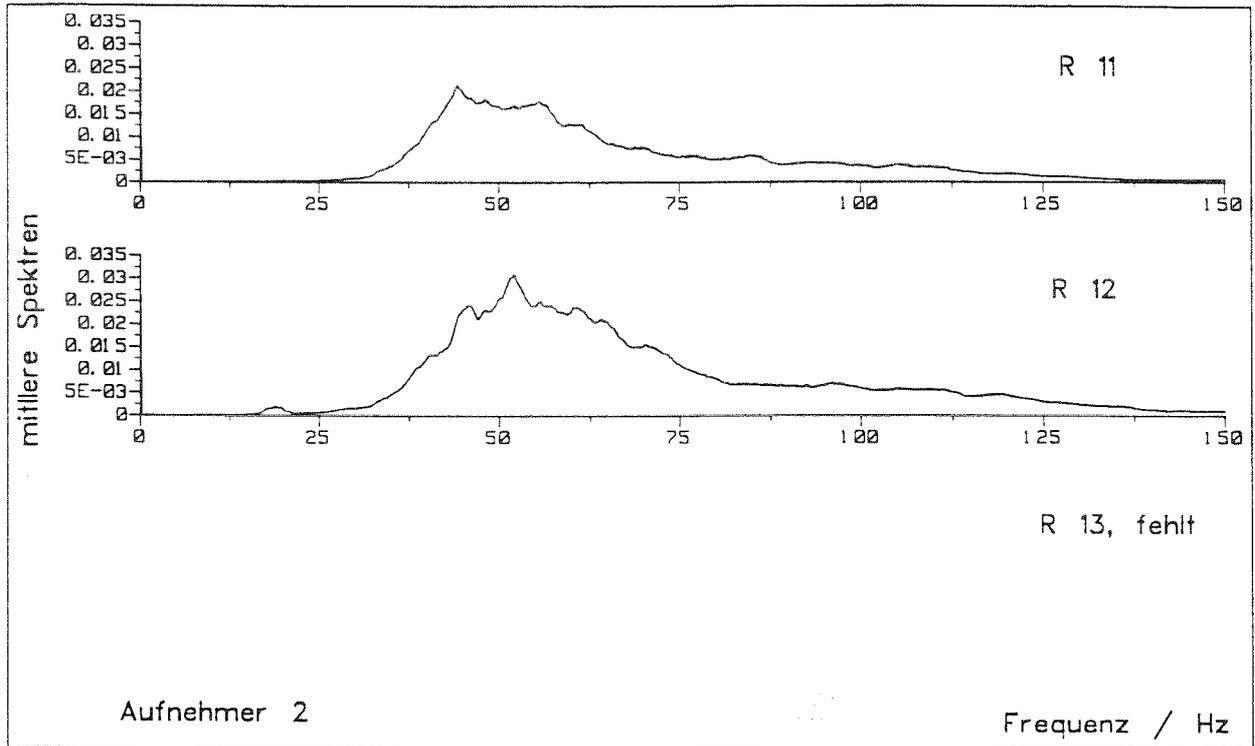


Bild 21: Gemittelte Spektren für den Aufnehmer 5 mit den drei Richtungen R11 (vertikal), R12 (horizontal in Zugrichtung) und R13 (horizontal senkrecht zur Zugrichtung).

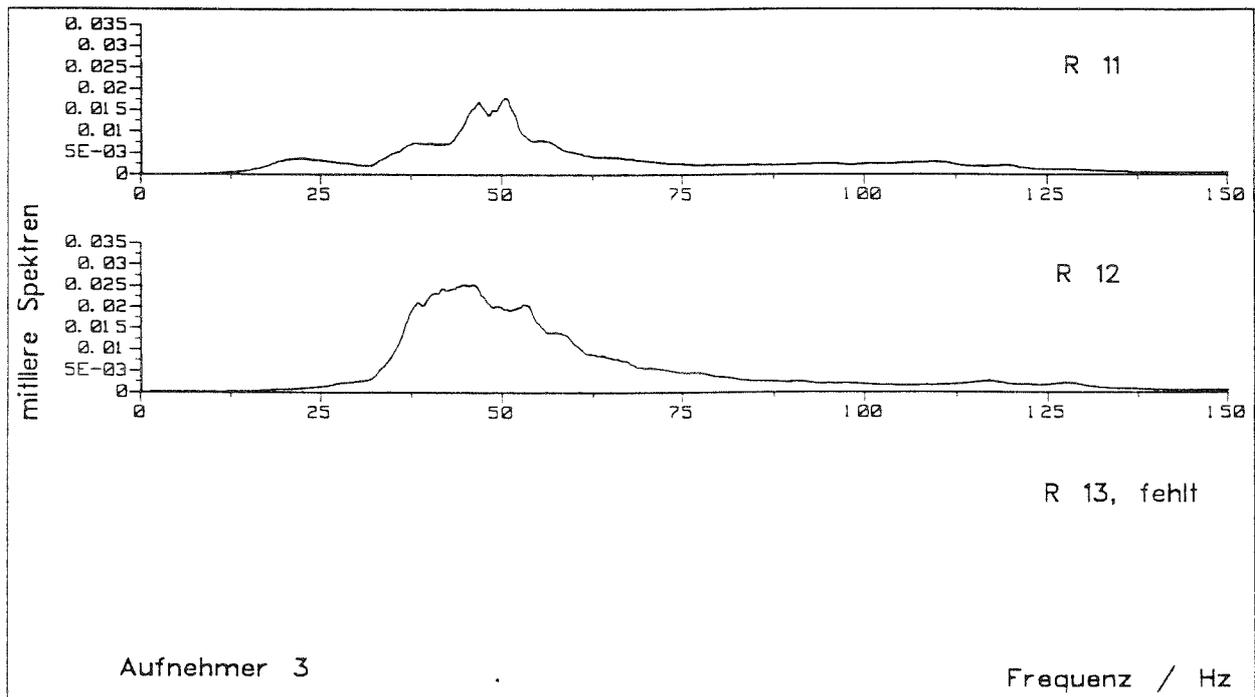


Bild 22: Gemittelte Spektren für den Aufnehmer 4 mit den drei Richtungen R11 (vertikal), R12 (horizontal in Zugrichtung) und R13 (horizontal senkrecht zur Zugrichtung).

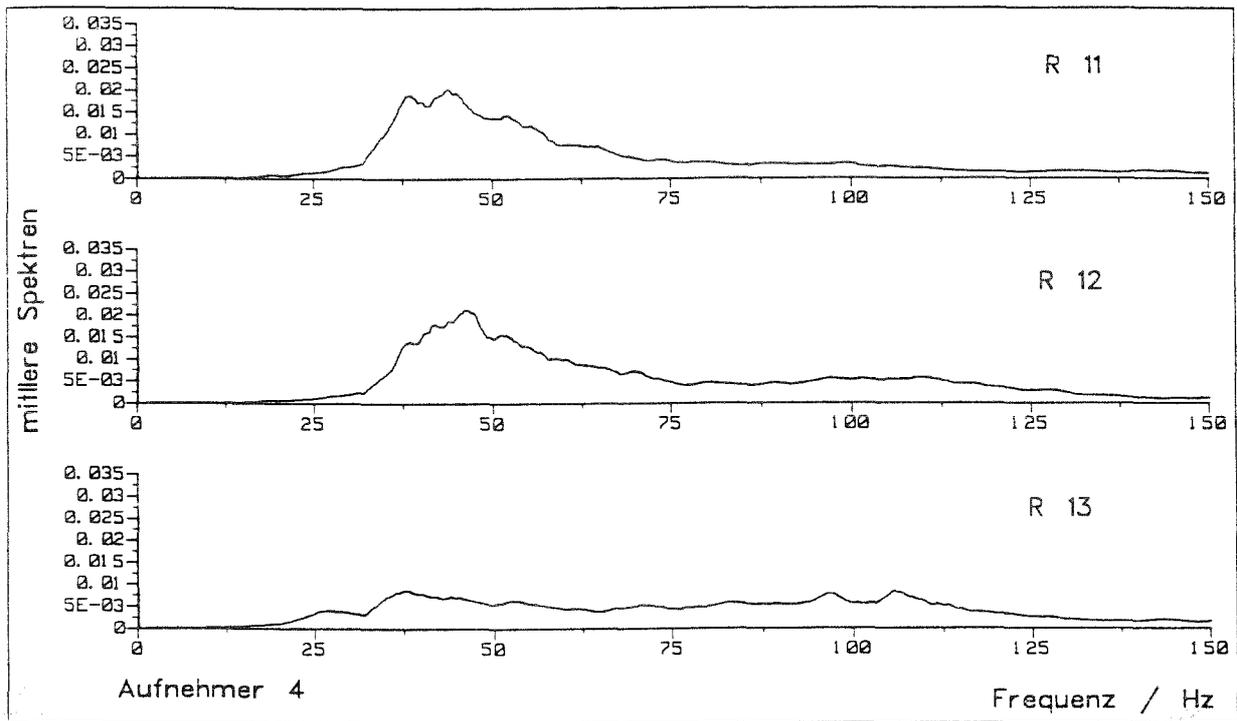


Bild 23: Gemittelte Spektren für den Aufnehmer 7 mit den drei Richtungen R11 (vertikal), R12 (horizontal in Zugrichtung) und R13 (horizontal senkrecht zur Zugrichtung).

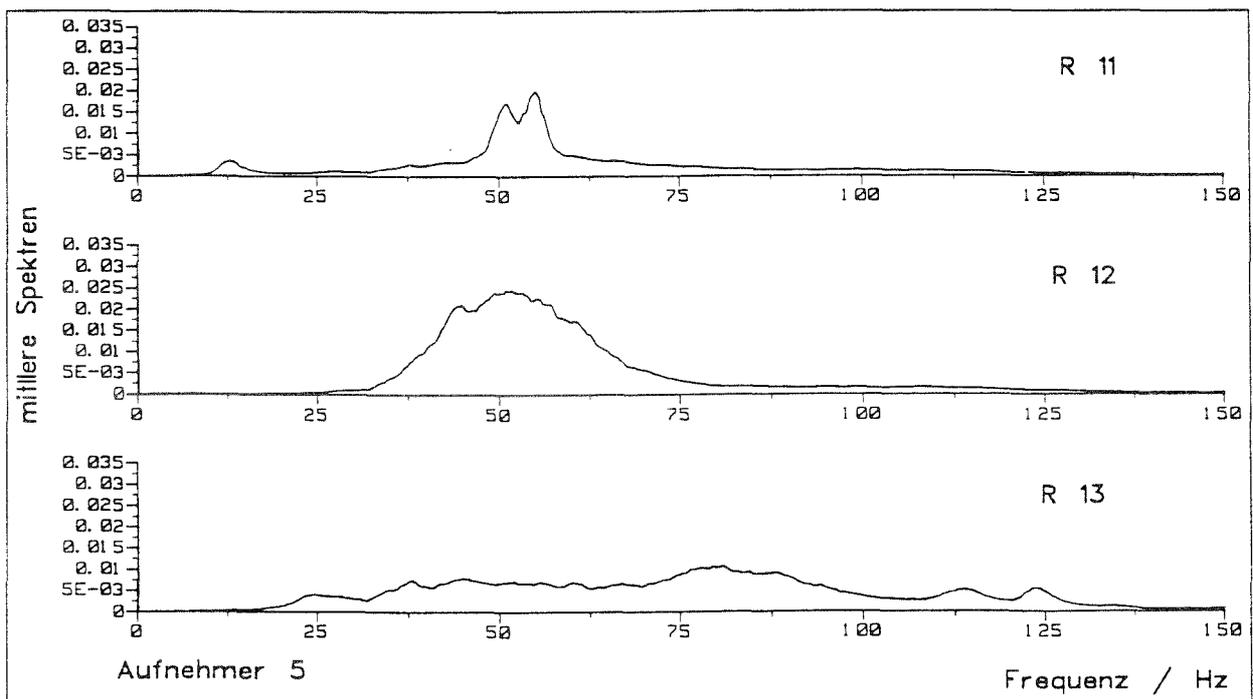
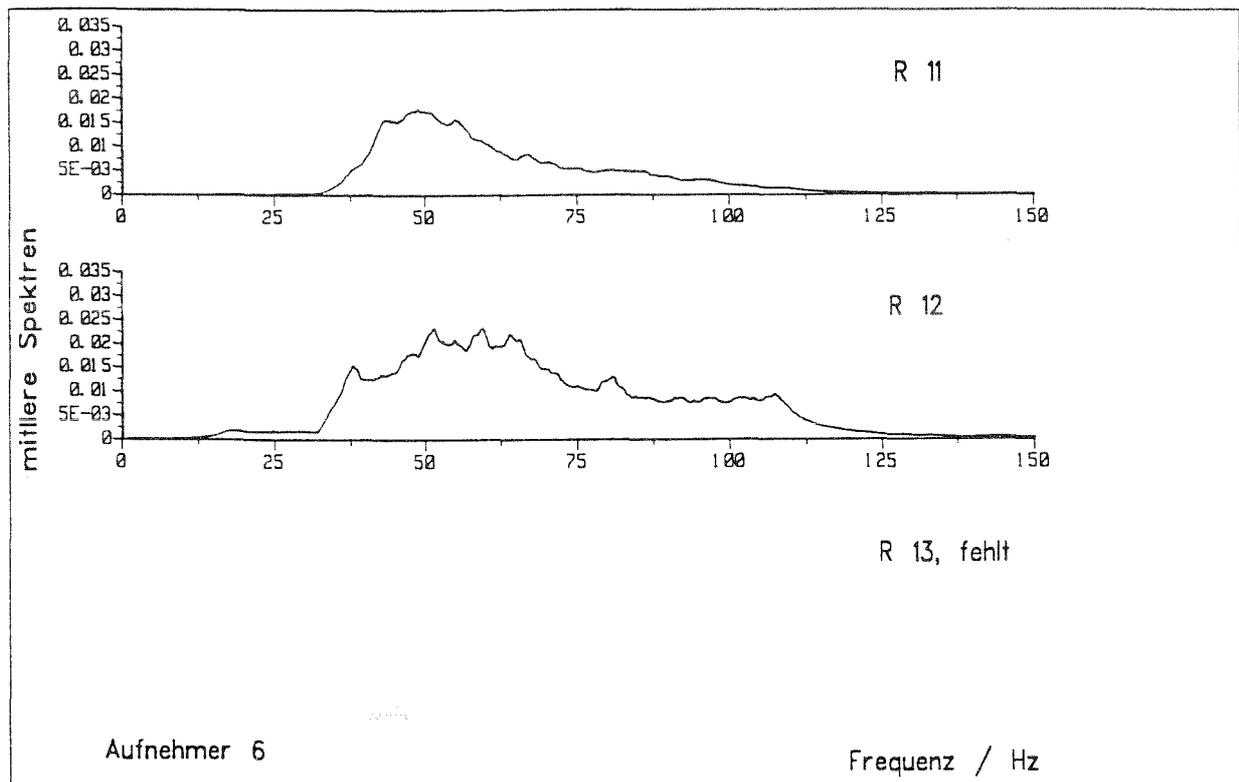


Bild 24: Gemittelte Spektren für den Aufnehmer 6 mit den drei Richtungen R11 (vertikal), R12 (horizontal in Zugrichtung) und R13 (horizontal senkrecht zur Zugrichtung).



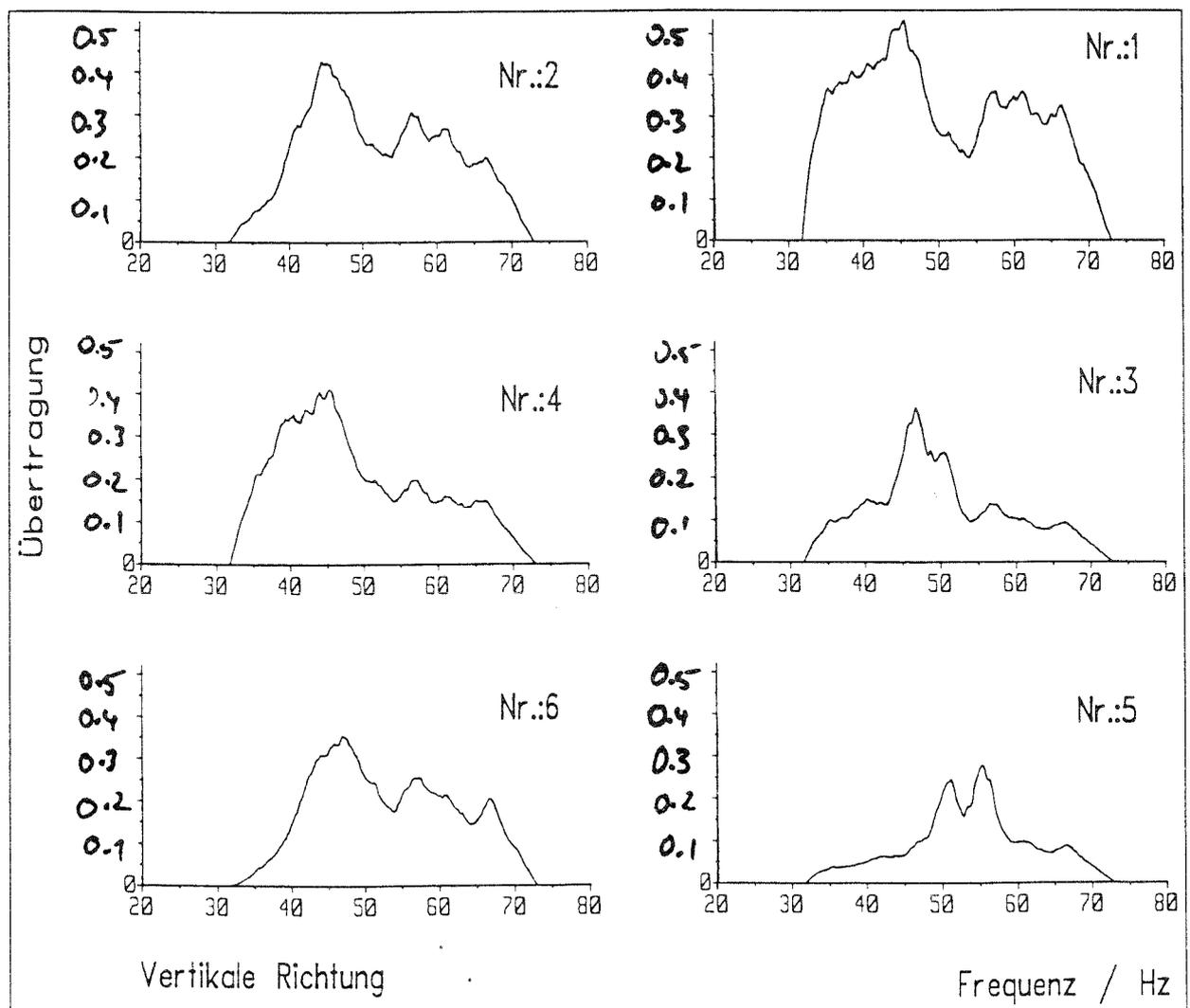
Man erkennt in allen Spektren ein breites Frequenzband mit wesentlichen Anteilen zwischen 30 und 80 Hertz. Aus diesem Frequenzband heben sich Peaks mit 36, 46 und 56 Hertz noch besonders heraus. Die 46 Hertz entsprechen dem Schwellenabstand bei 100 km/h, während die 36 und 56 Hertz durch die Modulation dieser Frequenz mit der Radumlauf Frequenz von 10 Hertz und mit derjenigen, die dem Abstand im Drehgestell entspricht, entstanden sein könnten. Nach den obigen theoretischen Untersuchungen sind tiefere Frequenzen zwar vorhanden, aber von untergeordneter Bedeutung. Zumindest im Ansatz erkennbar ist die Tatsache, daß die Spektren der weiter unten liegenden Aufnehmer schärfer, separierter sind als die der weiter oben liegenden. Insgesamt aber sind die Spektren vergleichbar, auch bemerkt man eine vermutete Abnahme der Amplitude mit der Tiefe.

Um diesen angesprochenen Vergleich einsichtiger zu machen, wurden die Magnituden der Übertragungsfunktion zwischen den einzelnen Kanälen berechnet und vorgestellt. Diese Magnituden beschreiben die Abnahme der Amplitude als Funktion der Frequenz im

DR.-ING. HABIL. RAINER BLUM

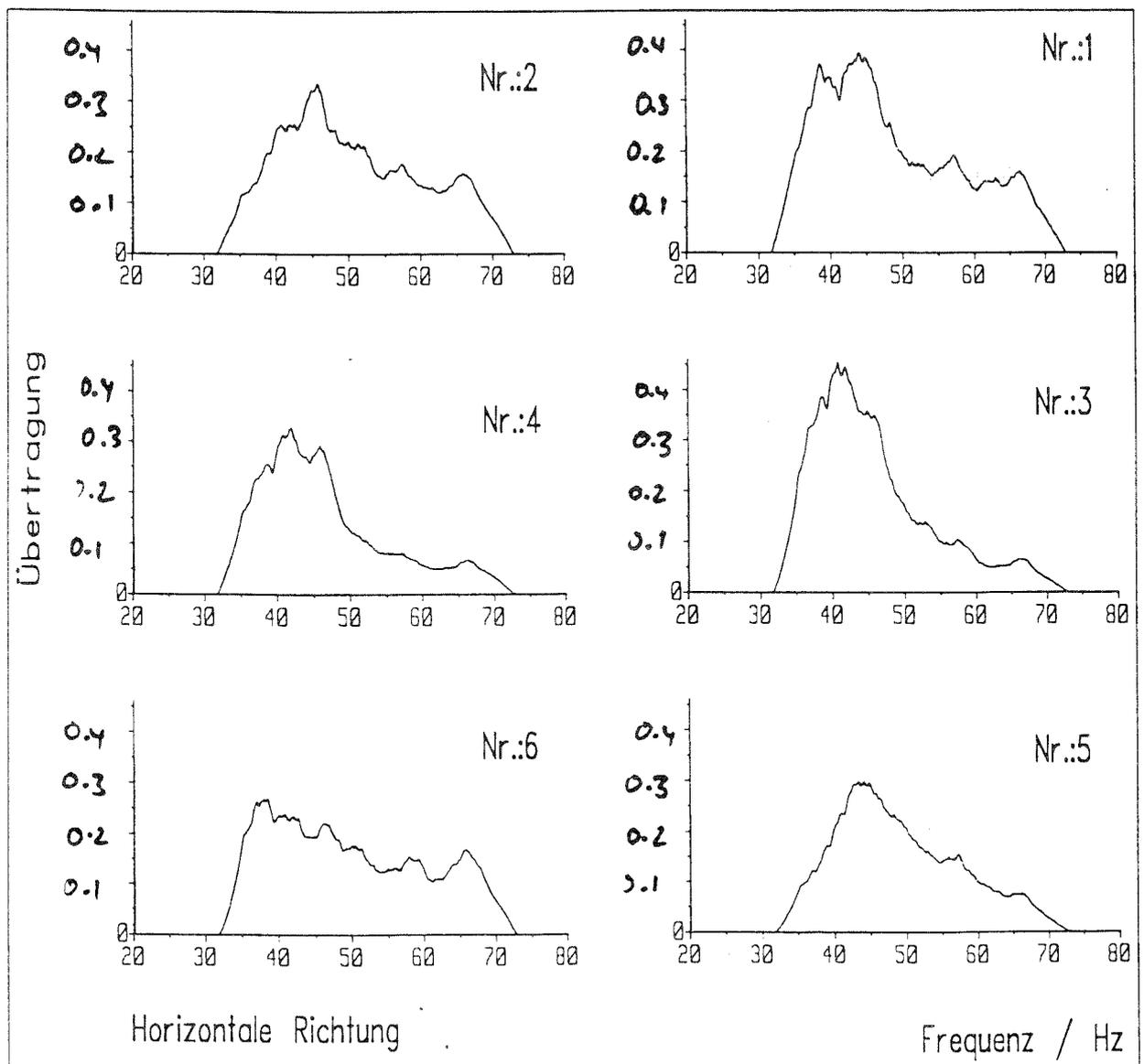
Verhältnis zur Eingangsamplitude. Interessant sind nämlich nicht die eigentlichen Spektren, sondern die Weise, wie die oben in den Bahndamm eingeleiteten Schwingungen nach unten weitergegeben und dabei gedämpft werden. Dazu dient die Magnitude der Übertragungsfunktion, die in den folgenden Bildern zwischen dem Signal des Aufnehmers auf dem Bahndamm und den weiter unten liegenden gezeigt werde. Man sieht, daß nur mehr ungefähr 40 Prozent der Amplitude durch das Schotterbett weiter gegeben werden. Auffällig sind die Peaks der Magnitude, die jeweils eine Anregungsfrequenz kennzeichnen. Charakteristisch ist eine prinzipielle Abnahme der Magnitude mit der Frequenz im oben definierten wesentlichen Bandbereich.

Bild 25: Magnitude der Übertragungsfunktion für die vertikale Komponente der Aufnehmer zwischen der in den Bahndamm direkt eingeleiteten Bewegungen und den in den verschiedenen Punkten gemessenen Erschütterung.



In diesen Bildern fallen noch einige Eigenheiten auf: Die Aufnehmer mit den geraden Nummern, die untereinander und oberflächenah liegen, zeigen ein "kontinuierlicheres" Spektrum als die tiefer liegenden mit den ungeraden Nummern. Das könnte darauf zurückzuführen sein, daß die letzteren genau dort lagen, wo die eine Lage des Geokunststoffs aufhörte. Dort könnte sich unter Umständen eine Lamb-Welle ausbilden, die die beobachteten Eigenheiten aufwies. Auch die im nächsten Bild 26 gezeigten Übertragungsfunktionen der horizontalen Bewegungen zeigten in etwa diese Erscheinung.

Bild 26: Magnitude der Übertragungsfunktion für die horizontale Komponente der Aufnehmer zwischen der in den Bahndamm direkt eingeleiteten Bewegungen und den in den verschiedenen Punkten gemessenen Erschütterung.



#### 4E. DISKUSSION

Als erstes fällt auf, daß sich bestimmte Charakteristika der oben unter einfachsten Annahmen theoretisch abgeleiteten Spektren zumindest im Prinzip sich in den Messungen wieder finden lassen. Die Peaks werden sehr gut beschrieben. Die Unterschiede lassen sich auf die in der obigen Beschreibung nicht enthaltenen Materialdämpfung zurückführen, die theoretisch zu einer Verbreiterung der Peaks und zu ihrer Verschleifung führt, was ja dann auch festgestellt wird. Die Schwellenfrequenz als bestimmende läßt sich in allen Spektren wiederfinden. Die Amplitude ihrer Schwinggeschwindigkeiten liegt bei ungefähr 0,025 mm/sec für den obersten und 0,017 mm/sec für den tiefsten Aufnehmer. Diese Werte entsprechen einer Bewegungsamplitude von 0,000 000 9 und 0,000 000 6 mm.

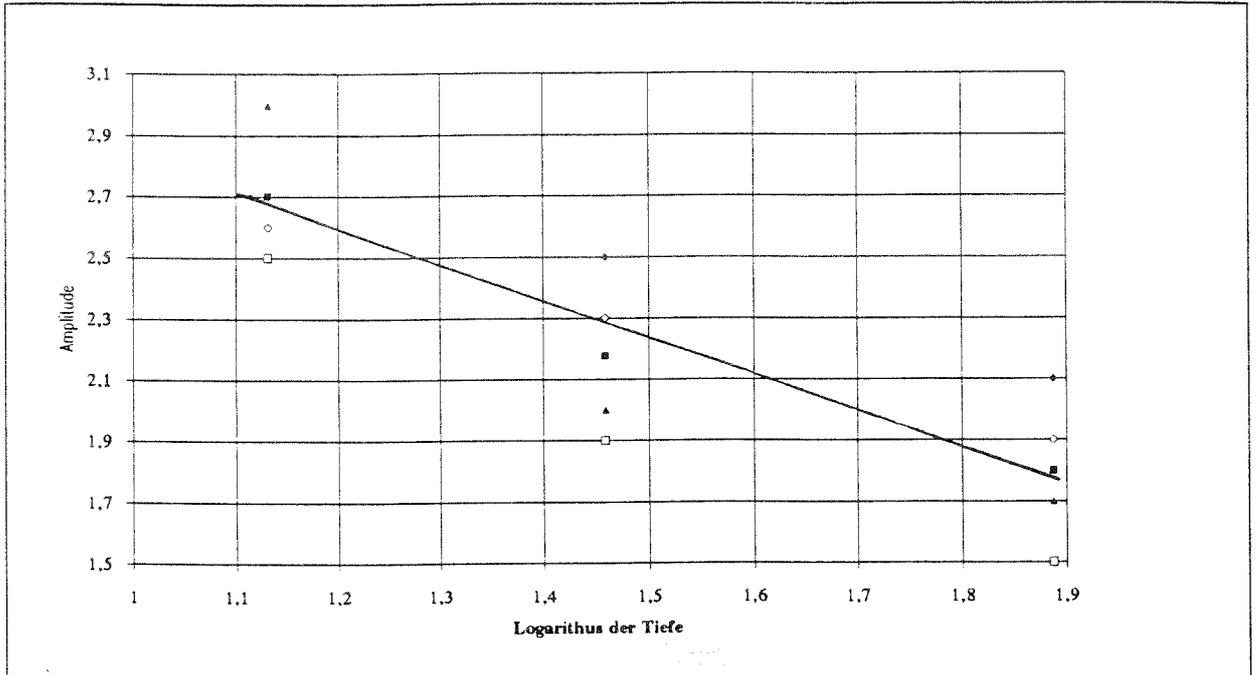
Weiter fällt auf, daß die in den Damm eingeleitete Erschütterung schon relativ rasch gedämpft wird, und zwar auf das 0,40-fache für den obersten und das 0,20-fache für den untersten Aufnehmer bei der Schwellenfrequenz. Die Dämpfung wächst mit der Frequenz an. Einen wesentlichen Unterschied zwischen den außen und den innen liegenden Aufnehmern kann man nicht feststellen, ein Anzeichen dafür, daß in diesen Entfernungen von der senkrechten Begrenzung die Rayleigh-Wellen sich noch nicht ausgebildet haben und keine Rolle spielen.

Die Amplituden der horizontalen Bewegungen sind etwas geringer als die vertikalen, sie liegen aber in der gleichen Größenordnung wie diese. Die anderen oben beschriebenen Eigenheiten findet man auch hier. Auffallend ist, daß die horizontalen Bewegungen senkrecht zur Fahrtrichtung sehr klein sind.

Aus der Übertragungsfunktion kann man eine Abhängigkeit der Dämpfung von der Frequenz herauslesen. Das im Einzelnen durchzuführen würde aber den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Dafür seien aber die Höhen der Peaks bei der Schwellenfrequenz als Funktion des Logarithmus der Tiefe aufgezeichnet. Das Ergebnis ist in Bild 27 für die beiden ausgezeichneten Richtungen gezeigt.

DR.-ING. HABIL. RAINER BLUM

Bild 27: Amplitude der Übertragungsfunktion als Funktion des Logarithmus der Tiefe für alle Aufnehmer und mit Mittelwert über alle Aufnehmer: Die Mittelwerte sind mit einer Linie verbunden.



Hier erkennt man im logarithmischen Maßstab einen mit guter Annäherung geraden Zusammenhang für den Mittelwert. Die Steigung dieser Geraden kann als charakteristisch für den Dammaufbau angesehen werden.

## 5. MESSUNGEN AN EINEM KLASSISCHEN DAMM

### 5A. VORBEMERKUNGEN UND LAGEPLAN

Zunächst waren die Messungen am gleichen Damm an einem Teil mit Regelböschung geplant. Dies war aber leider nicht möglich, da ein Gleis zusätzlich angeschüttet wurde, das erst 1993 in Betrieb ging. So wurden die Messungen an einem ca. 100 Jahre alten Damm durchgeführt. Dieser bestand aus einem Material aus einem Buntsandsteinbruch. Teilweise waren sehr große Einzelblöcke eingebaut. Sehr wahrscheinlich wurde der Damm nicht beim Bau, sondern nur durch die immerhin schon lange einwirkende Verkehrsbelastung verdichtet. Der Versuch, die Lagerungsdichte durch eine Rammsondierung analog zu oben zu erkunden, schlug wegen der Blöcke fehl.

Zunächst wurde versucht, die Aufnehmer analog der Vorgehensweise beim kunststoffbewehrten Damm einzubringen. Dies scheiterte an den Blöcken, so daß gebohrt werden mußte. Mit dem zur Verfügung stehenden Bohrgerät konnten die Löcher aber nur in einer relativ zum Gleis größeren Tiefe hergestellt werden. Daher waren sowohl der horizontale wie auch der vertikale Abstand zur Fahrtrichtung größer als beim kunststoffbewehrten Damm. Die Situation beim Einbau ist in Bild 27 gezeigt, das die Schwierigkeiten beim Bohren der Löcher gut zeigt. Bild 28 zeigt einen Querschnitt durch den klassischen Damm

Bild 28: Situation beim Bohren der Löcher in dem normalen Damm

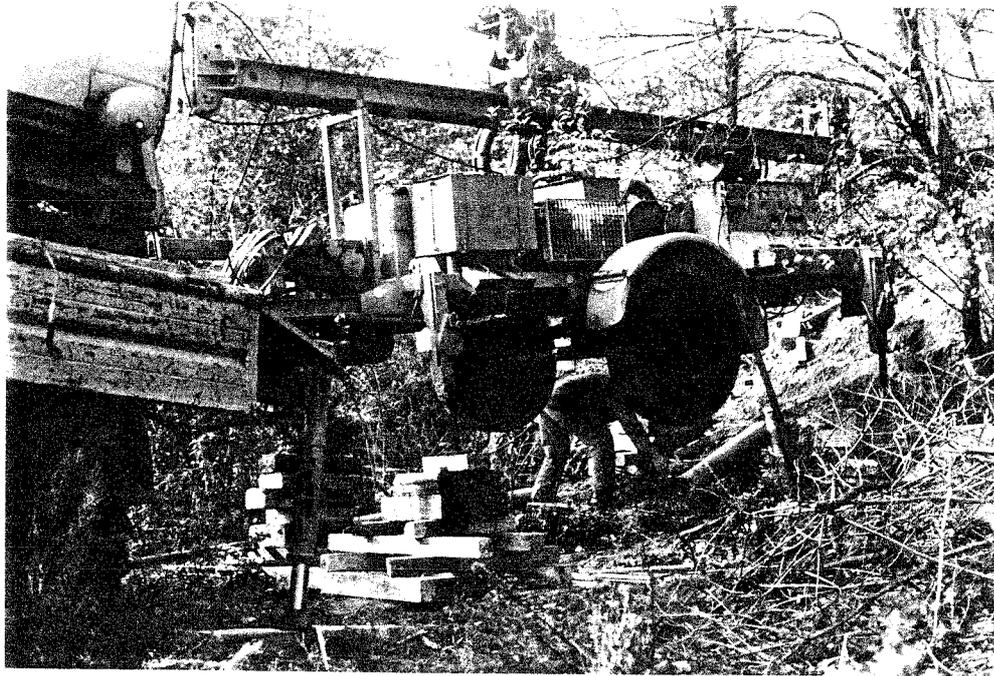
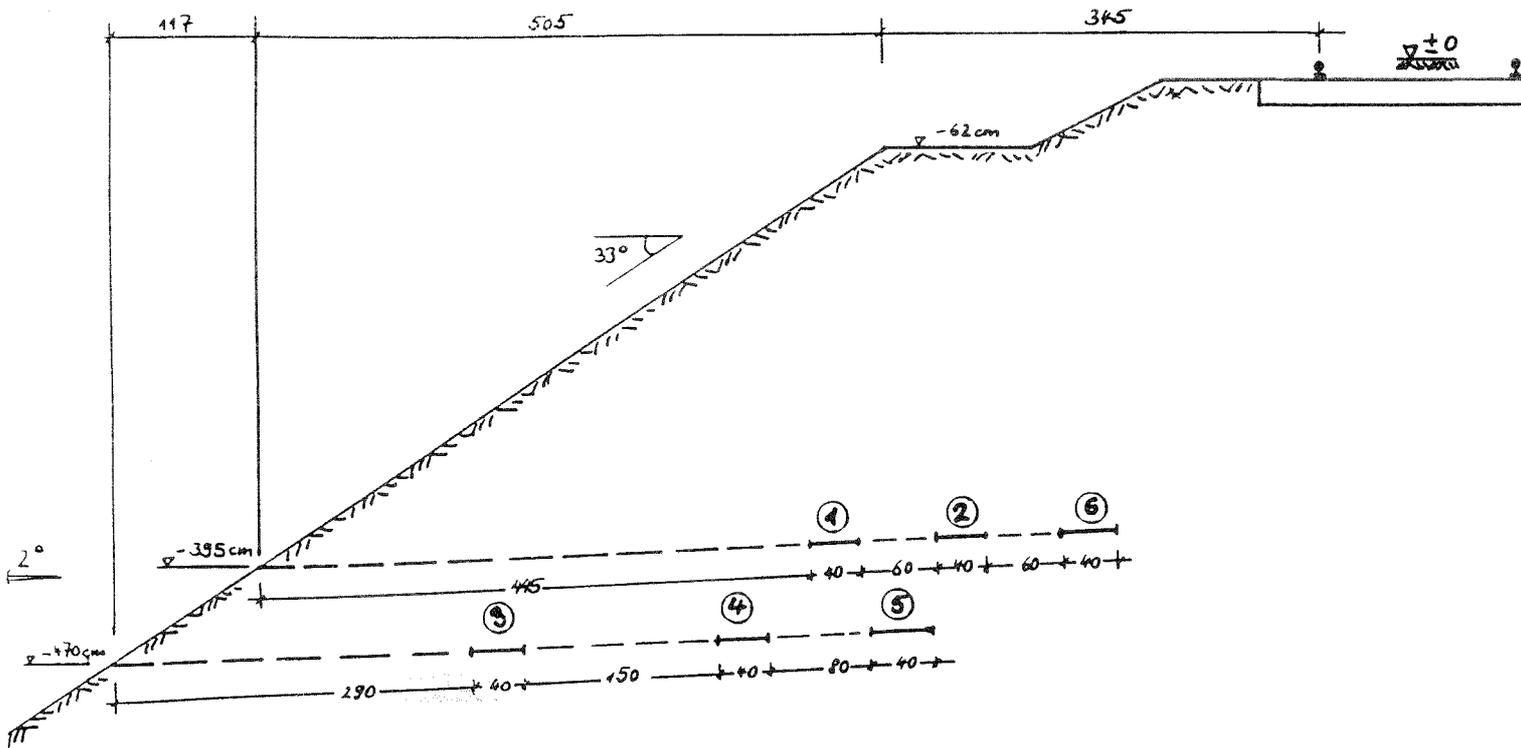


Bild 29: Querschnitt durch den klassischen Damm mitsamt Lage der Aufnehmer



Eine Tabelle der Zugdurchfahrten wird nicht mitgeliefert, da diese hier zu umfangreich werden würde. Mitgeteilt sei nur, daß 25 Zugdurchfahrten gemessen wurden. Die Züge waren IC und ICE-Züge, die Geschwindigkeit schwankte geringfügig um 100 km/h.

## 5B. EINZELDURCHFART, ZEITSIGNAL

Zuerst sollen wieder wie oben ausgewählte Zeitsignale aller Aufnehmer präsentiert werden. Bild 29: Signal des Aufnehmers 1, R11 vertikale Richtung, R12 horizontal in Fahrbahnrichtung, R13 horizontal senkrecht zur Fahrbahnrichtung. Die Richtung R13 ist ausgefallen. Beim Signal R11 erkennt man deutlich das relativ diskrete Signal wie oben bei der synthetischen Generierung der Zugdurchfahrt schon abgeleitet und auch beim kunststoffverstärkten Damm festgestellt. Die Größenordnung der Schwinggeschwindigkeiten hier ist mit derjenigen der Ergebnissen des geokunststoffverstärkten Damms zumindest vergleichbar. Das ist zumindest bemerkenswert, da die Aufnehmer hier in größerer Tiefe als im geokunststoffverstärkten Damm lagen.

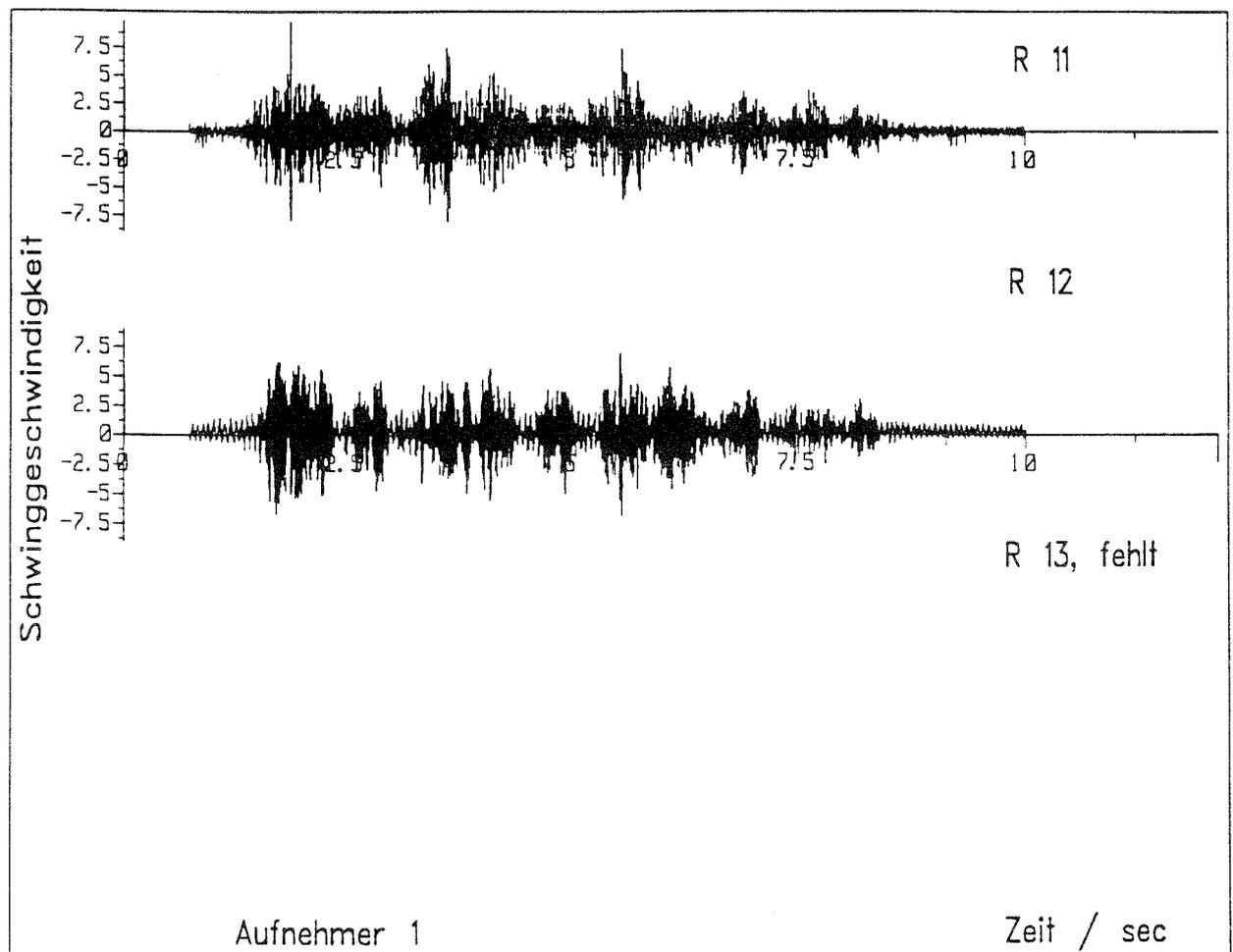


Bild 30: Signal des Aufnehmers 2, R11 vertikale Richtung, R12 horizontal in Fahrbahnrichtung, R13 horizontal senkrecht zur Fahrbahnrichtung. Die Richtung R13 ist defekt.

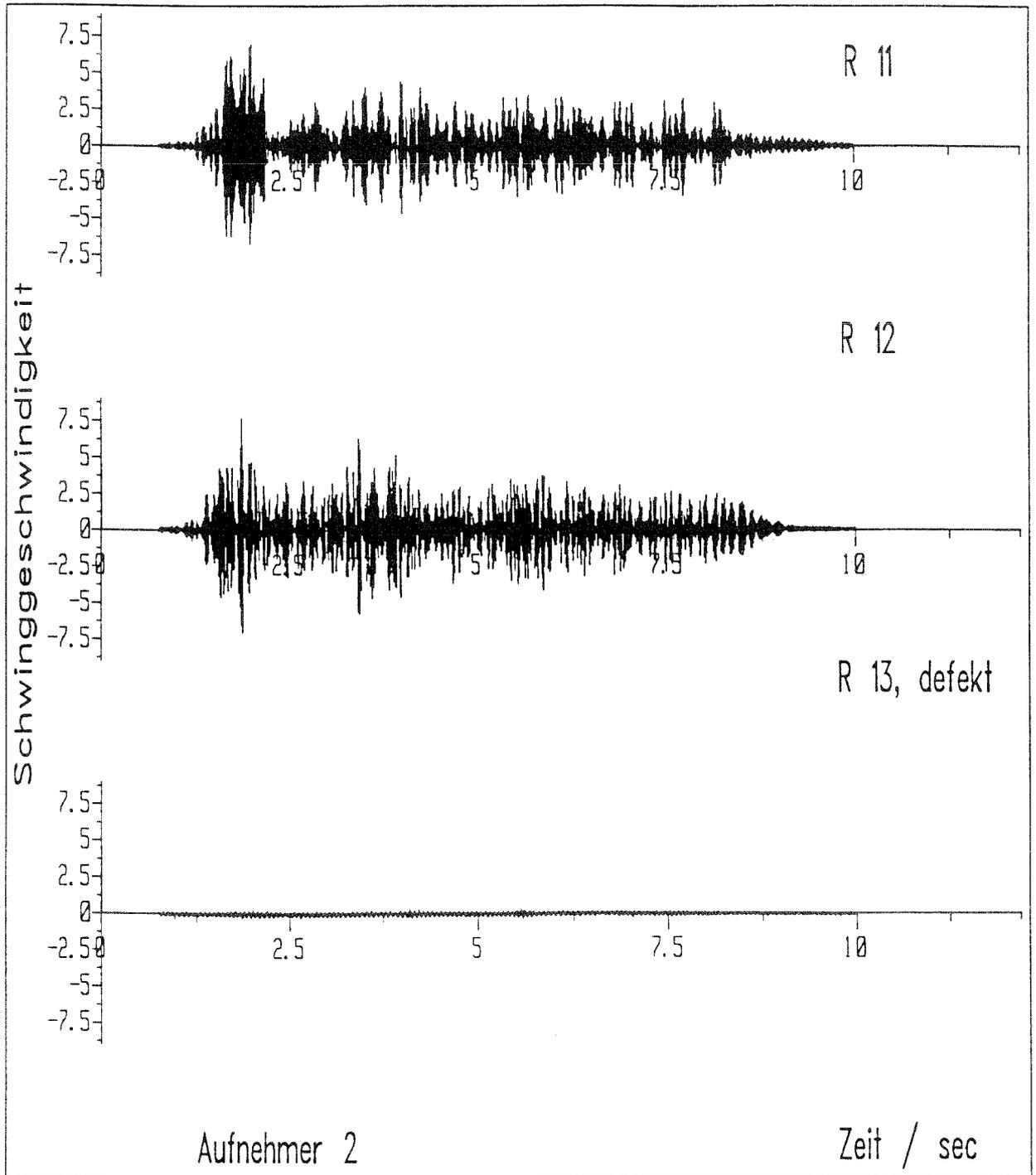


Bild 31: Signal des Aufnehmers 3, R11 vertikale Richtung, R12 horizontal in Fahrbahnrichtung, R13 horizontal senkrecht zur Fahrbahnrichtung. Hier sind die Amplituden sehr groß gegenüber denjenigen der anderen Aufnehmern. Das mag daran liegen, daß der Aufnehmer 3 sehr nahe an der Oberfläche lag und sich hier eine Rayleigh-Welle mit den bekannten Eigenschaften sich schon ausgebildet hatte.

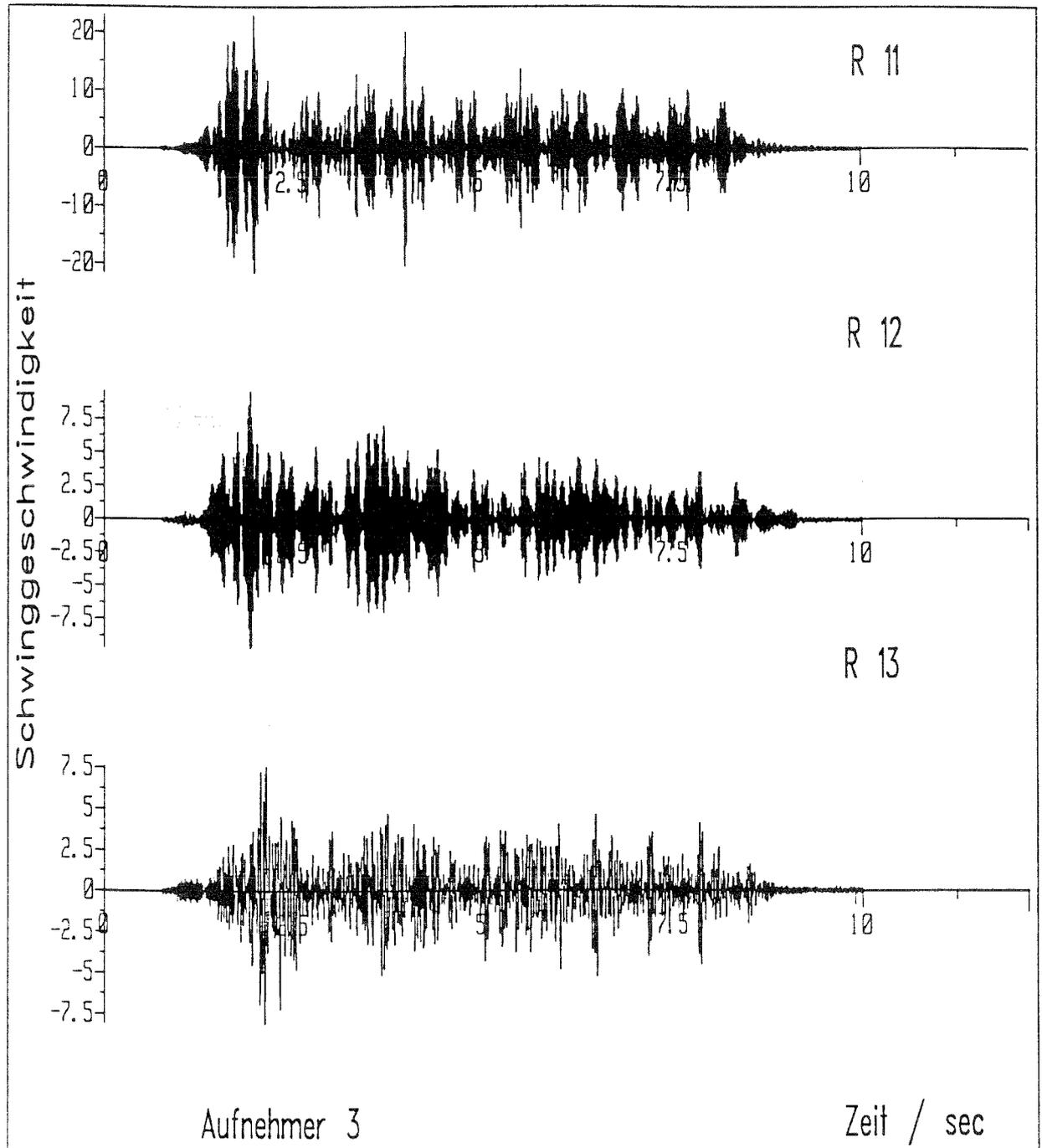


Bild 32: Signal des Aufnehmers 4, R11 vertikale Richtung, R12 horizontal in Fahrbahnrichtung, R13 horizontal senkrecht zur Fahrbahnrichtung.

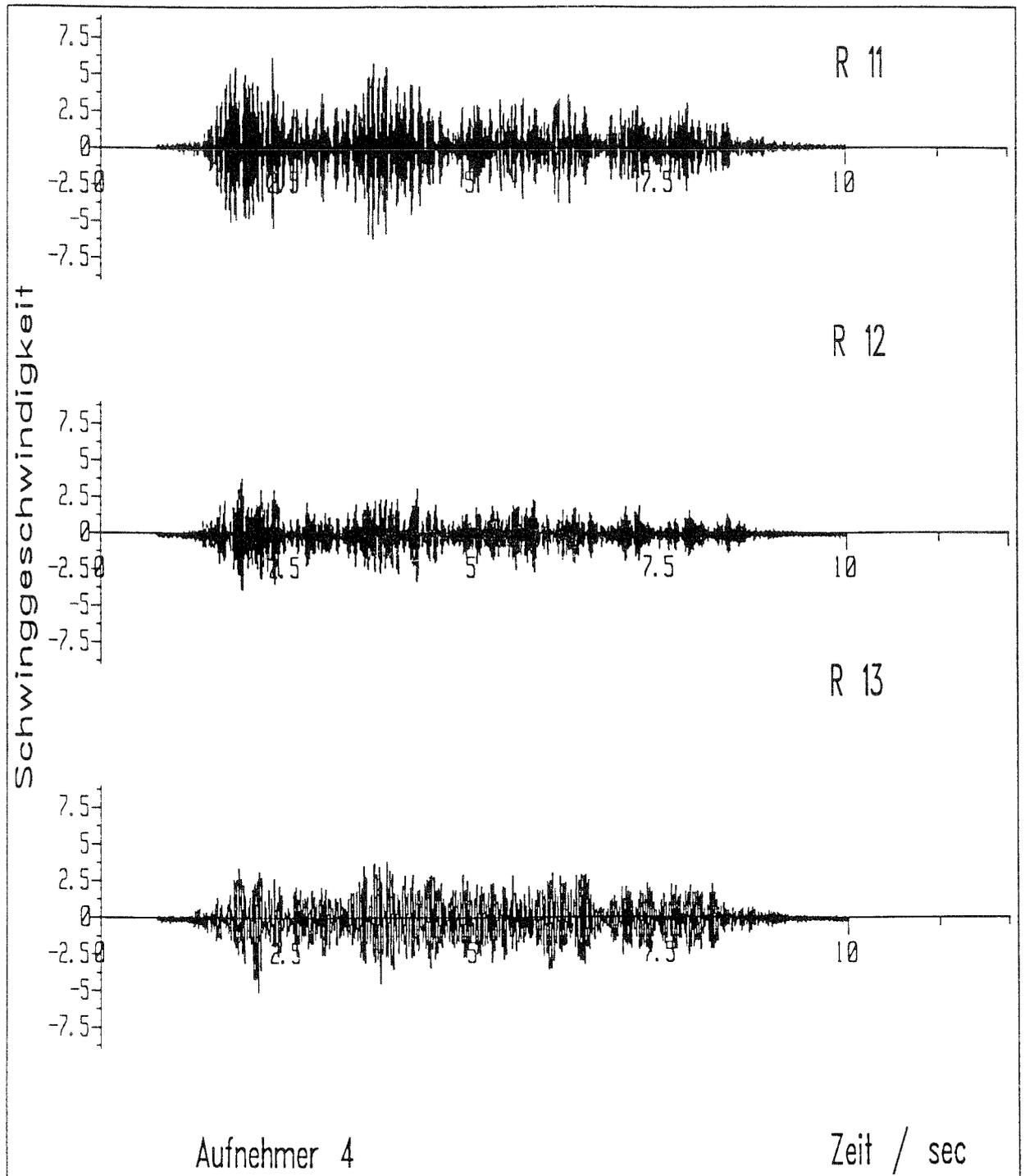


Bild 33: Signal des Aufnehmers 5, R11 vertikale Richtung, R12 horizontal in Fahrbahnrichtung, R13 horizontal senkrecht zur Fahrbahnrichtung. Die Richtung R13 ist wiederum ausgefallen. Die Abnahme der Amplituden und das eher "kontinuierliche" Aussehen der Signale fällt ins Auge.

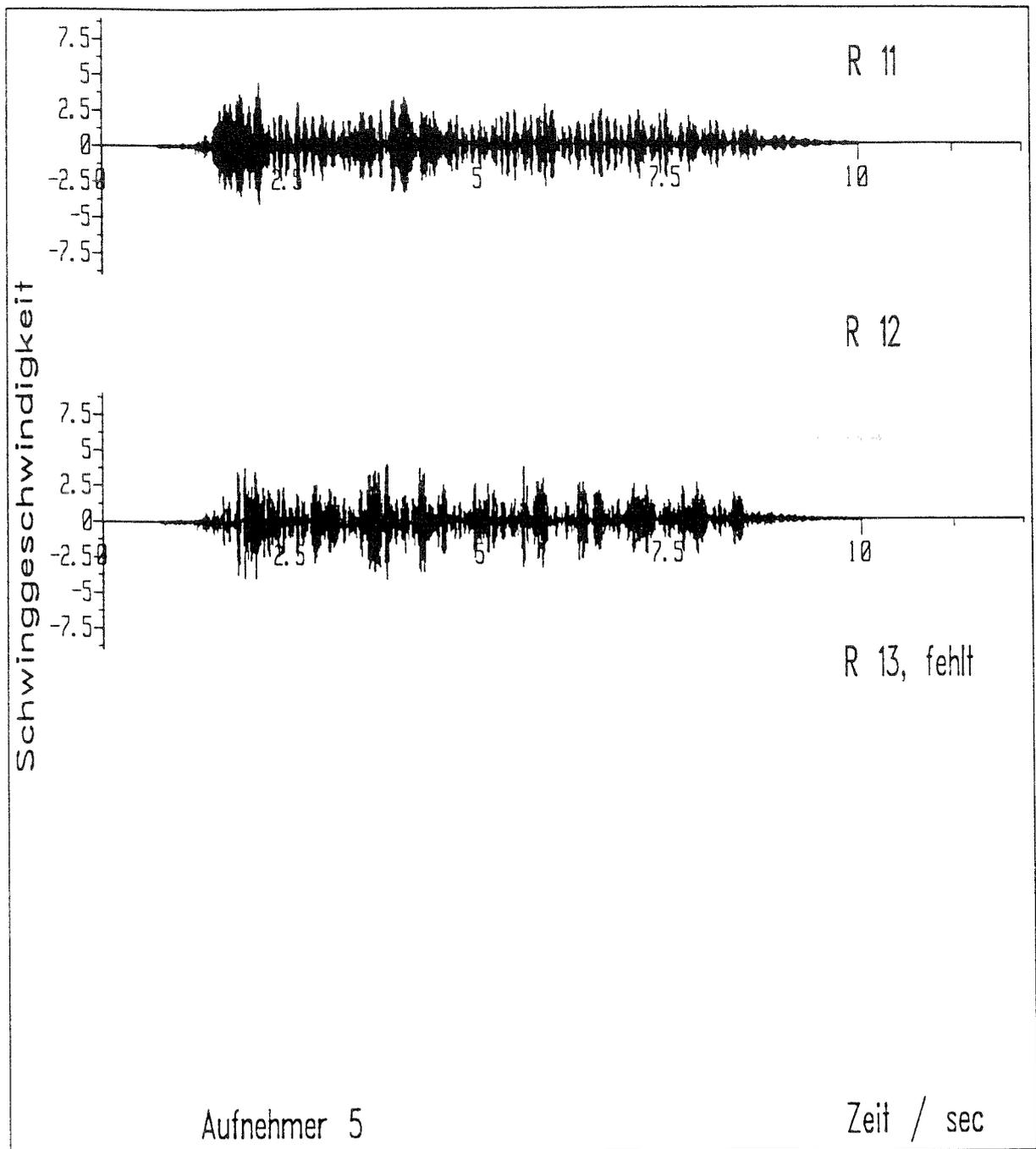
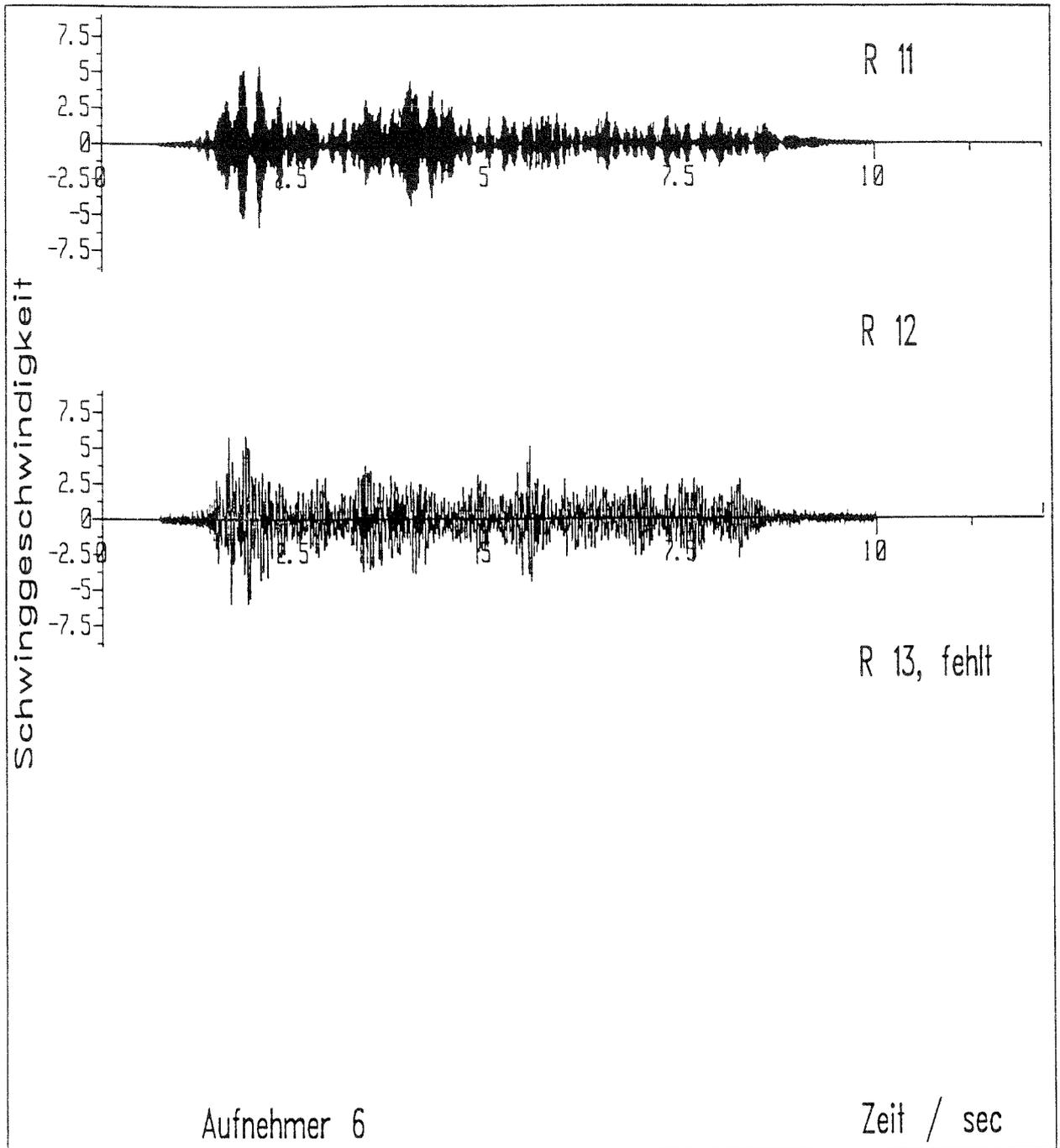


Bild 34: Signal des Aufnehmers 6, R11 vertikale Richtung, R12 horizontal in Fahrbahnrichtung, R13 horizontal senkrecht zur Fahrbahnrichtung. Die Richtung R13 ist ausgefallen.



## 4D. ÜBER ALLE DURCHFahrTEN GEMITTELTES SPEKTRUM

Genau wie oben wurden wieder die Spektren aller Zugdurchfahrten berechnet und daraus ein mittleres Spektrum konstruiert, wobei die Zeitsignale vorher auf eine Geschwindigkeit von auf 100 km/h kalibriert wurden. Damit ergaben sich auch genau wie oben mittlere Spektren, die die dynamischen Charakteristika des Dammes besser präsentieren.

Bild 35: Mittleres Spektrum der Signale des Aufnehmers 1. R11 vertikale Richtung, R12 horizontal in Fahrbahnrichtung, R13 horizontal senkrecht zur Fahrbahnrichtung. Die Amplituden sind etwas tiefer als im ersten Falle des geokunststoffverstärkten Dammes, insgesamt ist das Erscheinungsbild glatter. Die einzelnen oben definierten Anregungsfrequenzen bilden sich nicht so scharf ab wie beim geokunststoffverstärkten Damm. Trotzdem kann man die oben angeführten Anregungsfrequenzen wieder erkennen. Die Schwellenfrequenz von 46 Hertz ist hier wie in allen folgenden Bildern gekennzeichnet.

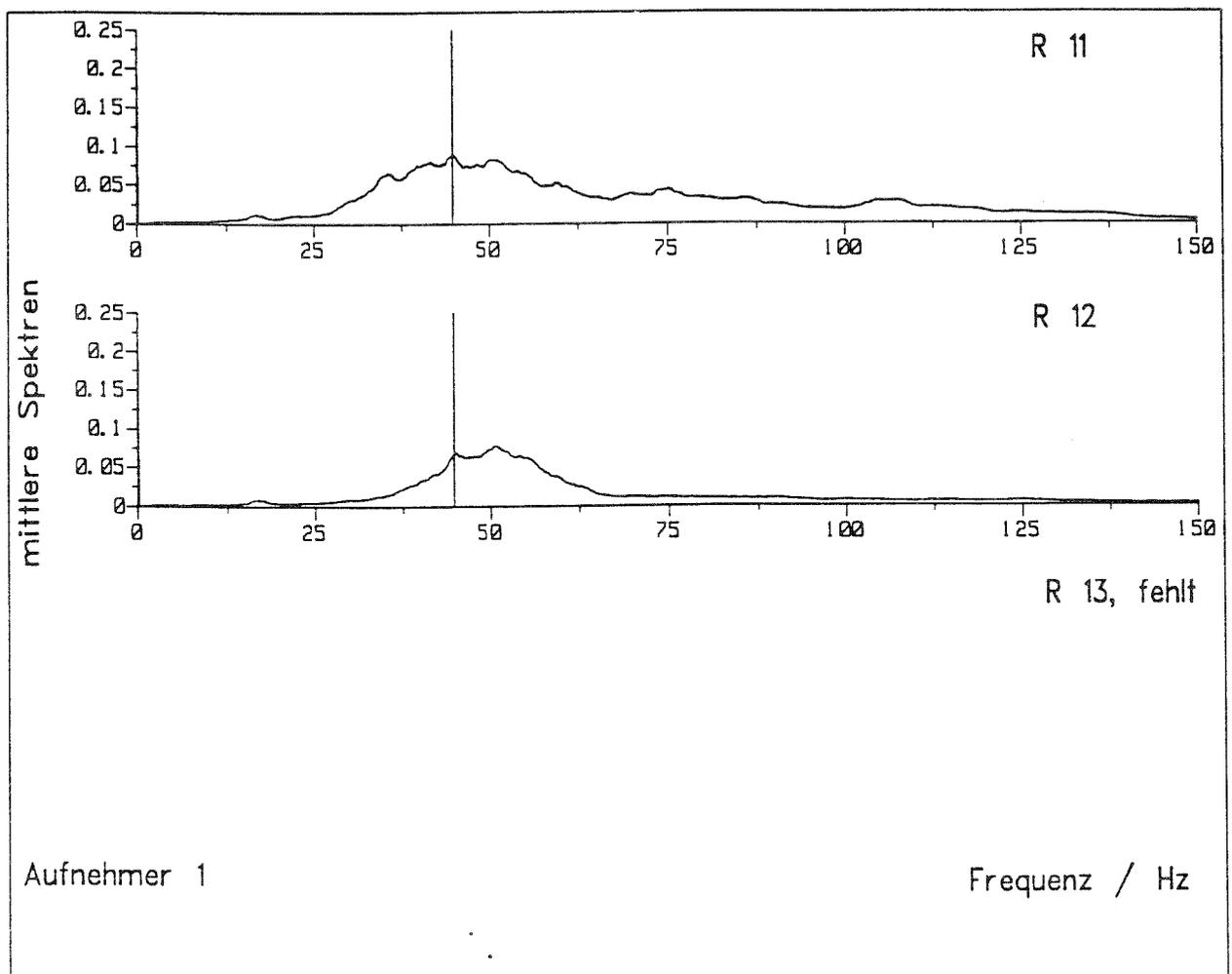


Bild 36: Mittleres Spektrum der Signale des Aufnehmers 2. R11 vertikale Richtung, R12 horizontal in Fahrbahnrichtung, R13 horizontal senkrecht zur Fahrbahnrichtung. Die Größenordnung der Signale entspricht derjenigen von Bild 35.

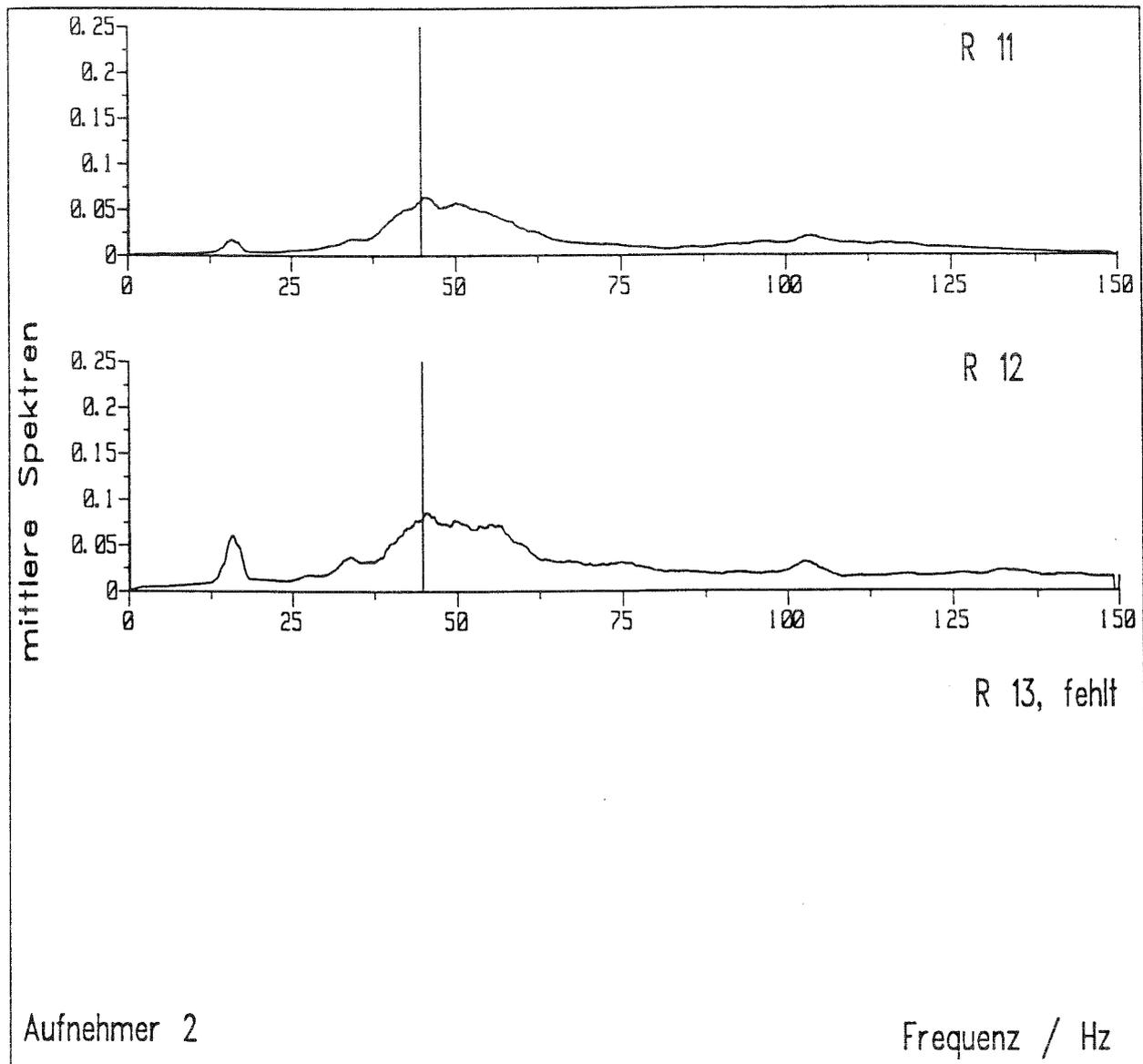


Bild 37: Mittleres Spektrum der Signale des Aufnehmers 1. R11 vertikale Richtung, R12 horizontal in Fahrbahnrichtung, R13 horizontal senkrecht zur Fahrbahnrichtung. Hier sind überraschenderweise die Amplituden höher als in den weniger tief liegenden Fällen 1, 2 und auch 6. Das hat seinen Grund darin, daß der Aufnehmer 3 näher an der Oberfläche liegt und sich somit eine ausgebildete Rayleigh-Welle stärker bemerkbar macht.

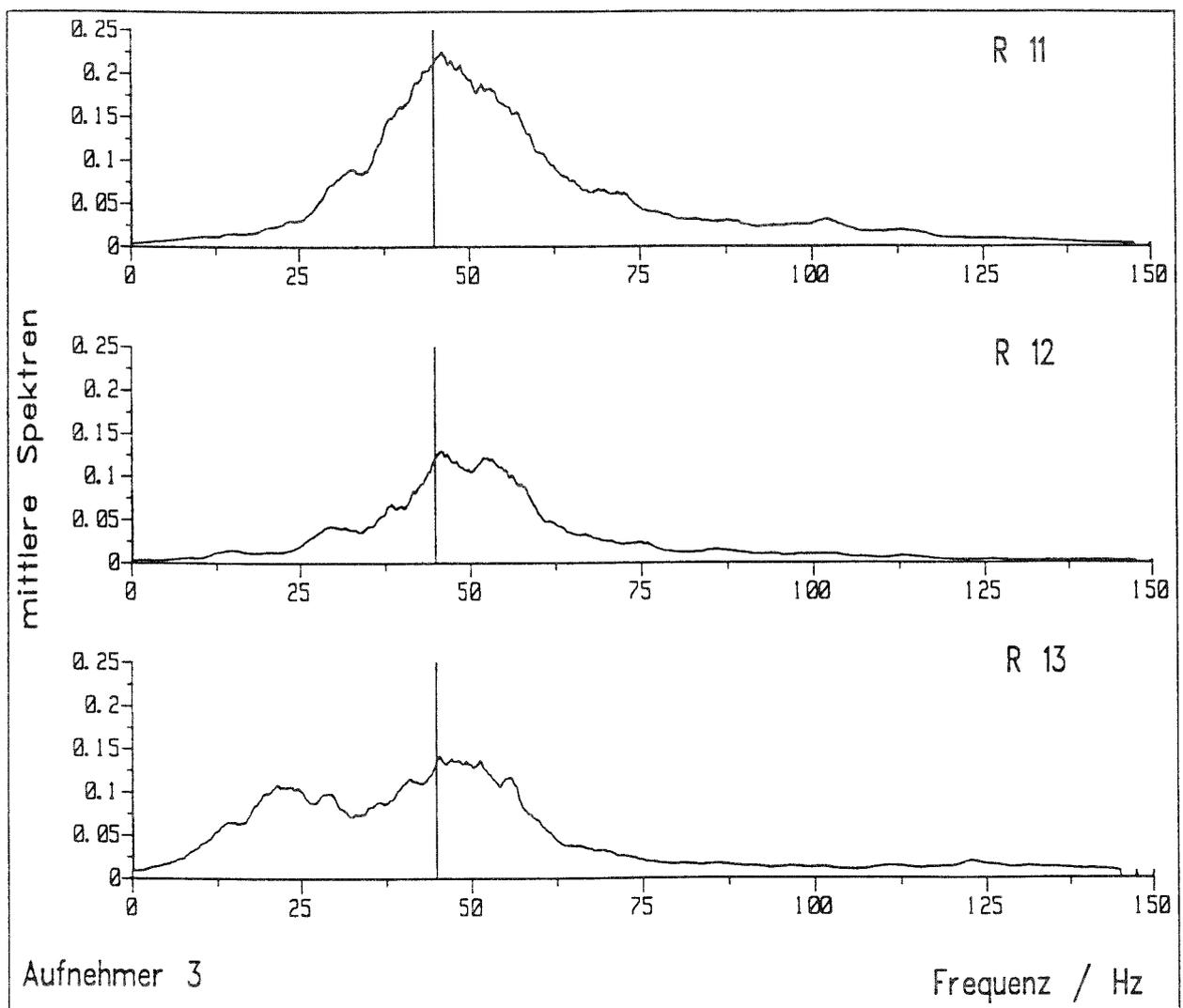


Bild 38: Gemittelttes Spektrum der Signale des Aufnehmers 4. R11 zeigt die vertikale Komponente, R12 diejenige in horizontaler Richtung in Zugrichtung, R13 diejenige in horizontaler Richtung senkrecht zur Zugrichtung. Diese Spektren sind eher mit denjenigen des Aufnehmers 1 zu vergleichen als mit den des zweiten, da 1 und 4 fast in der gleichen Entfernung zur Oberfläche liegen. Die Schwellenfrequenz zeichnet sich noch gut ab.

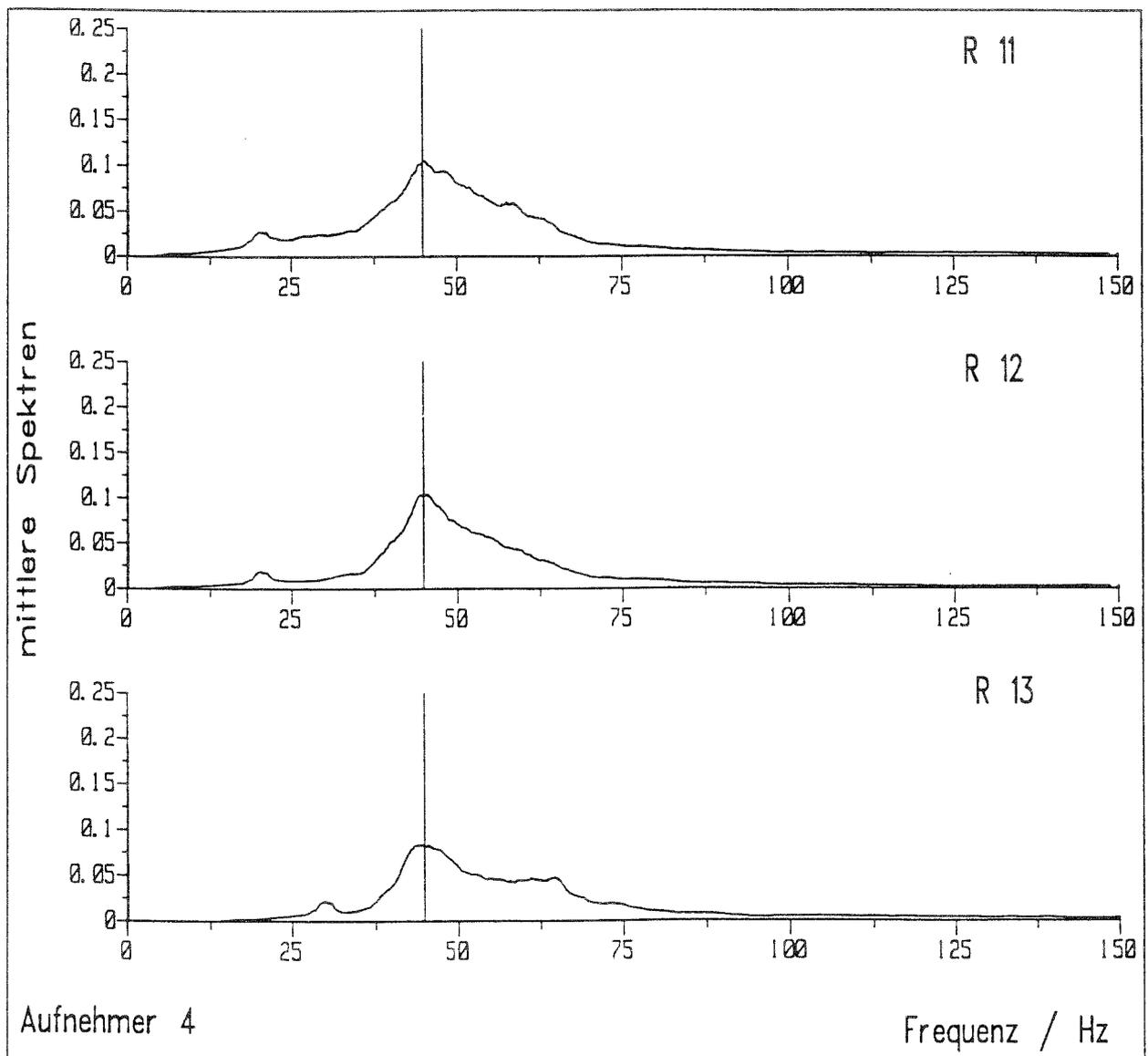


Bild 39: Gemitteltetes Spektrum der Signale des Aufnehmers 5. R11 zeigt die vertikale Komponente, R12 diejenige in horizontaler Richtung in Zugrichtung, R13 diejenige in horizontaler Richtung senkrecht zur Zugrichtung. R13 ist defekt. Diese Spektren sind mit denjenigen der Aufnehmer 2 und 4 gut zu vergleichen.

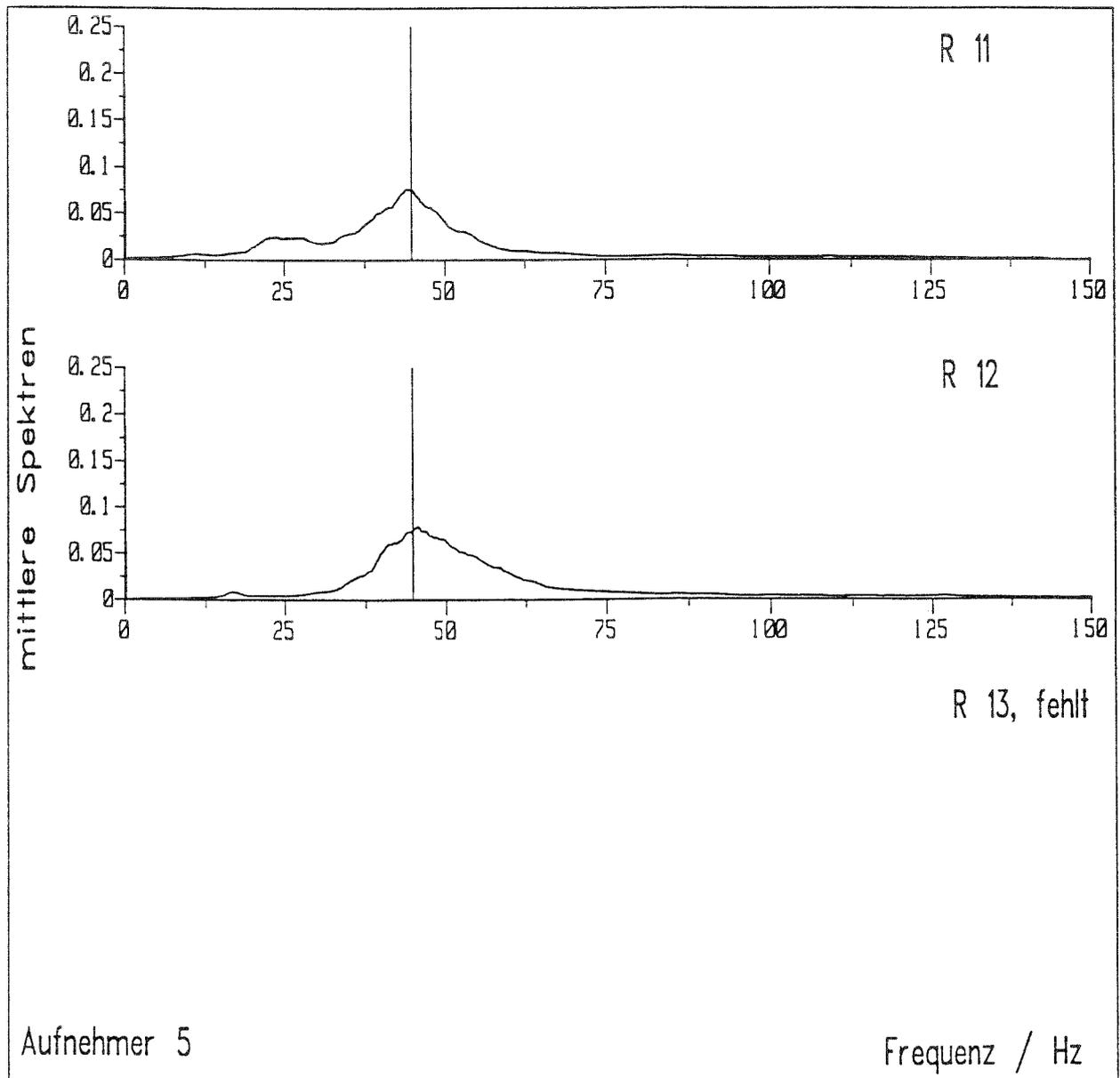
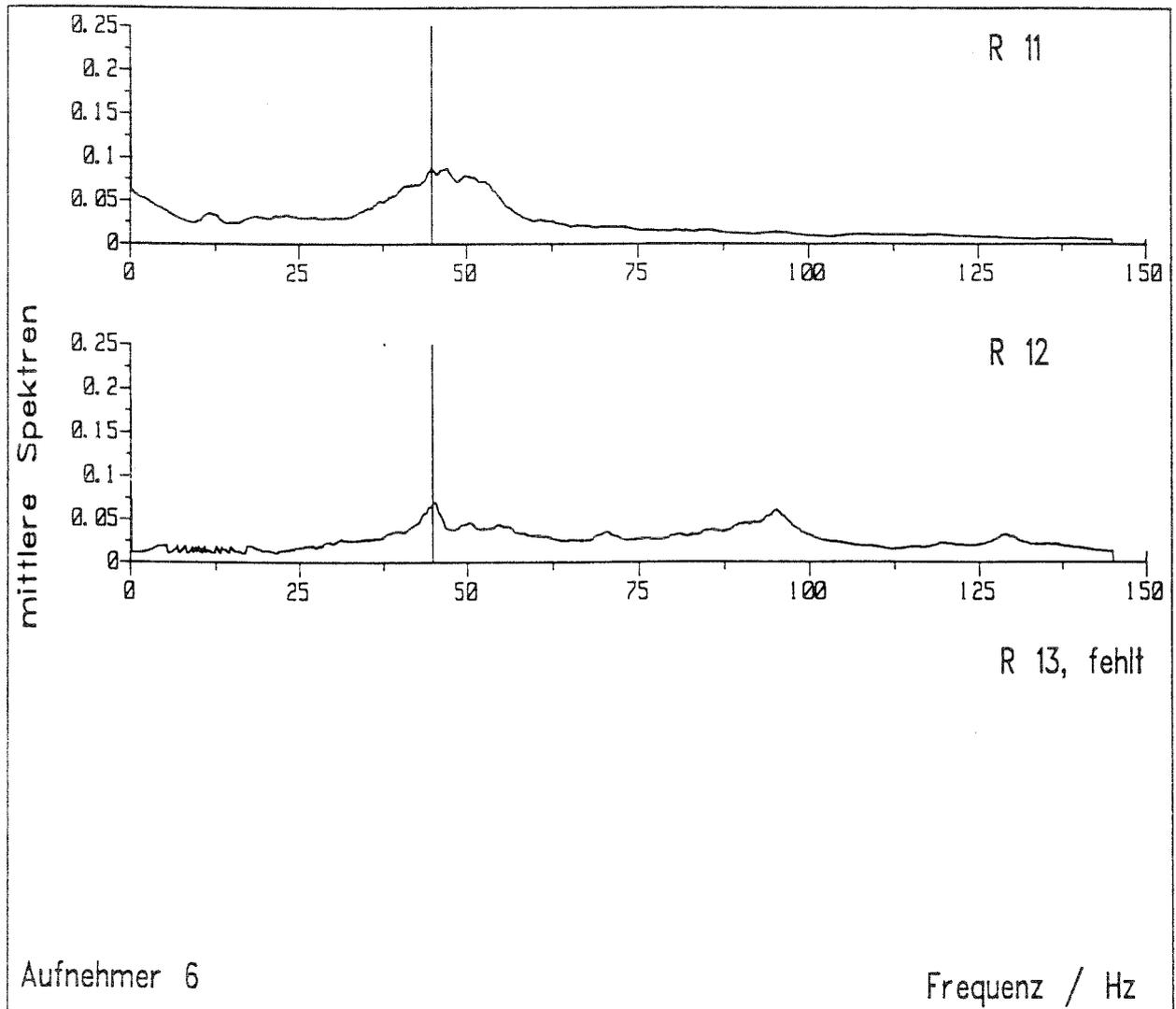


Bild 40: Gemitteltetes Spektrum der Signale des Aufnehmers 6. R11 zeigt die vertikale Komponente, R12 diejenige in horizontaler Richtung in Zugrichtung, R13 diejenige in horizontaler Richtung senkrecht zur Zugrichtung. R13 ist ausgefallen. Die Amplituden sind vergleichbar mit denen des Aufnehmers 5 wie auch die Position vermuten läßt.

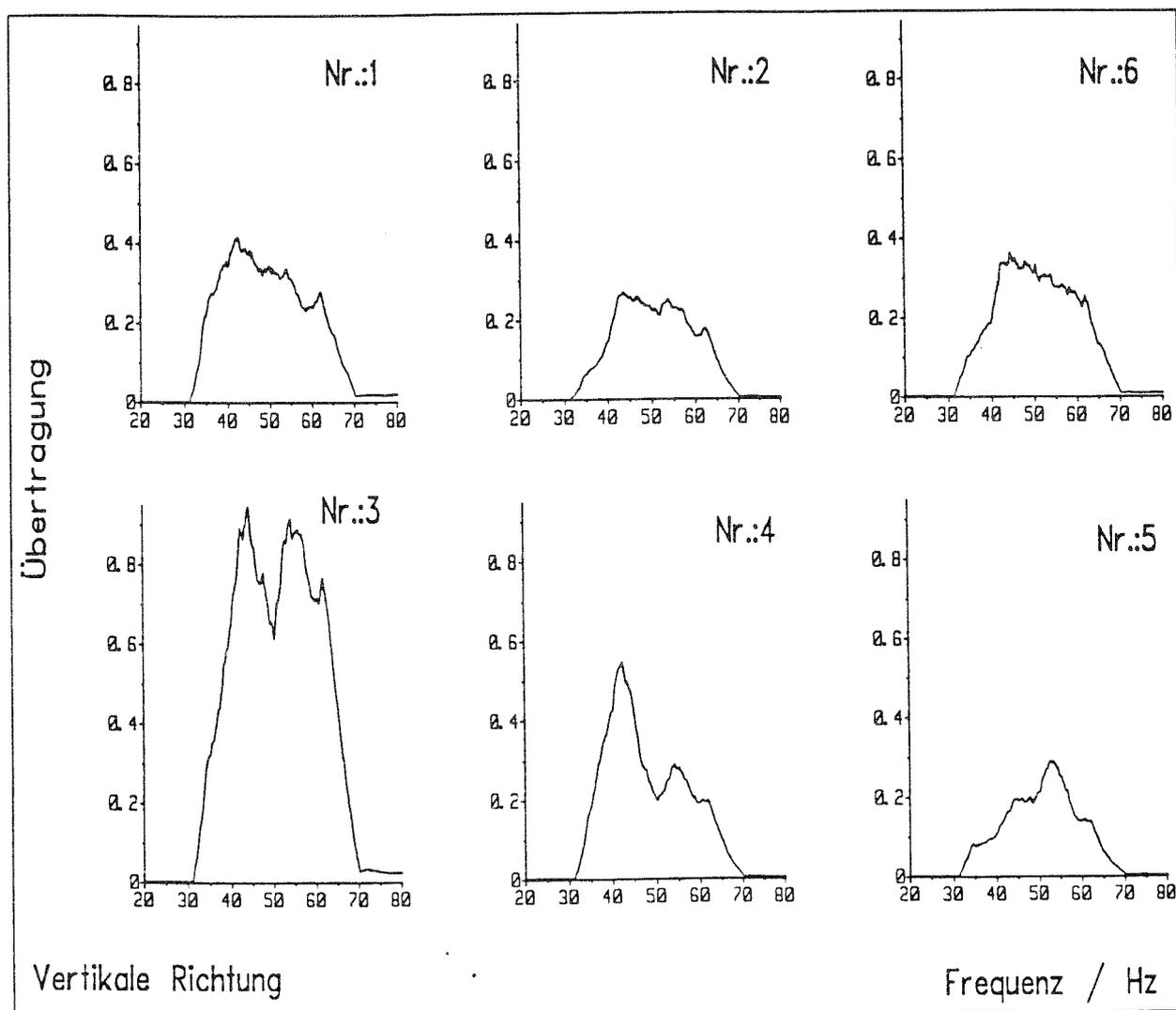


Zusammenfassend kann man sagen, daß die Spektren in einem klassischen Damm in der Amplitude mit denen im geokunststoffverstärkten Damm durchaus vergleichbar sind, wenn sie in einem gewissen Abstand von der Oberfläche liegen. Auch das Band, in dem die wesentlichen Amplituden auftreten, ist vergleichbar. Aber hier ist das Erscheinungsbild "glatter" als im Falle des geokunststoffverstärkten Dammes. Eine Ausnahme von diesen

Beobachtungen bilden die Signale des Aufnehmers 3. Dieser liegt knapp unter der Oberfläche und er zeigt höhere Amplituden als alle anderen Aufnehmer. Hier hat sich wohl schon eine Oberflächenwelle ausgebildet, die immer wesentlich höhere Amplituden aufweist.

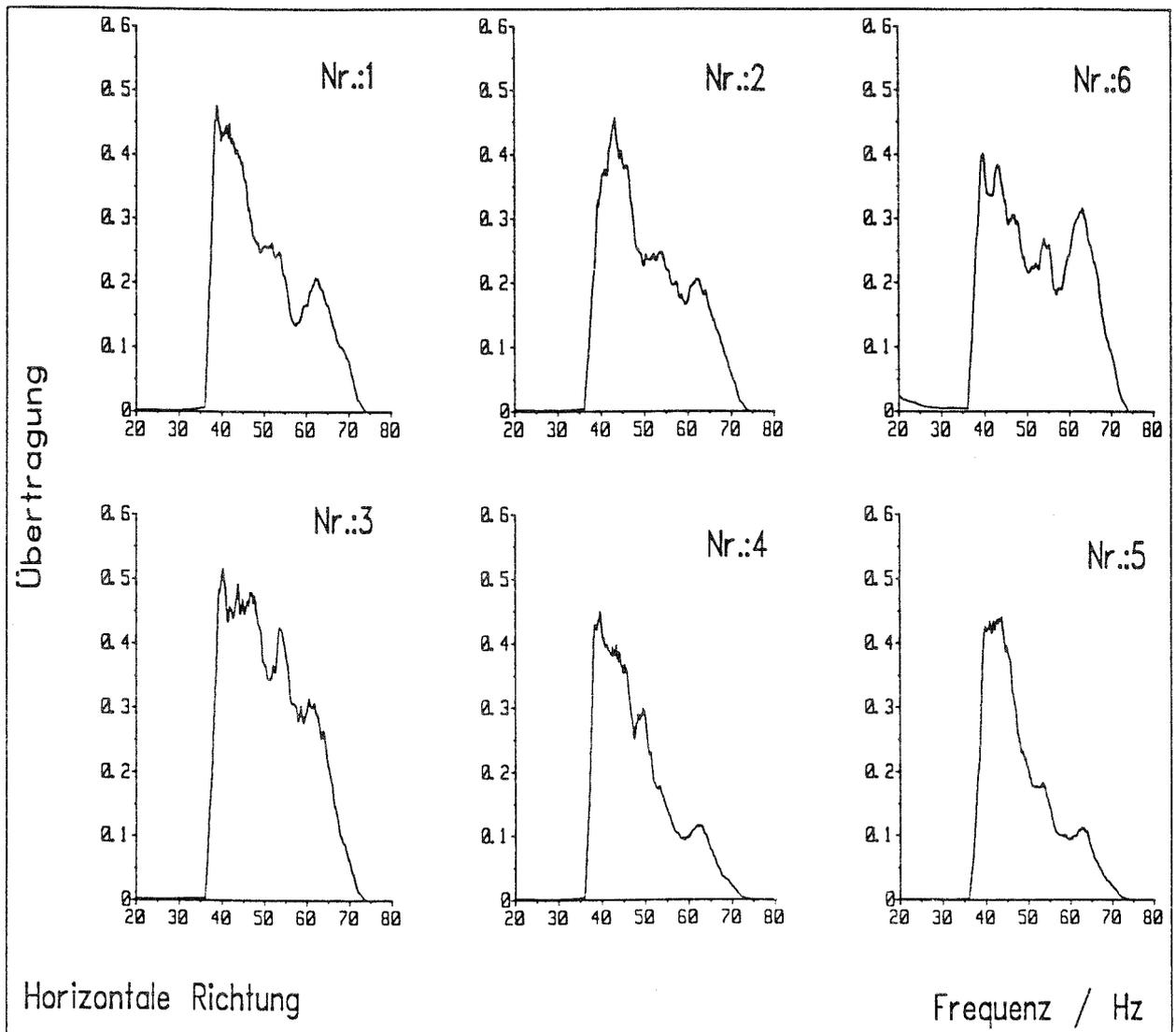
Zum besseren Vergleich wurden nun hier auch die Magnituden der Übertragungsfunktion vom in das Schotterbett eingeleiteten Erschütterungen zu denjenigen der einzelnen Aufnehmer errechnet, wodurch sich das Dämpfungsverhalten gut beschreiben läßt. Wiederum war parallel zu oben die Richtung R13 so oft ausgefallen, daß hier die Übertragungsfunktion nicht berechnet wurde.

Bild 40: Magnituden der Übertragungsfunktion zwischen der in das Schotterbett eingeleiteten Erregung und den Erschütterungen in den einzelnen Aufnehmer für die vertikale Richtung



Die Übertragungsfunktion zeigt bis auf diejenige für den Aufnehmer 3 die gleichen Erscheinungen wie die im geokunststoffverstärkten Damm, die Abnahme der Amplitude liegt in der gleichen Größenordnung. Das ist um so verblüffender, als diese Aufnehmer im klassischen Damm weiter von der Erregungsstelle entfernt waren als die im kunststoffverstärkten. Die Erschütterungen im Aufnehmer 3 wurden schon oben besprochen, die Höhe wurde auf die Ausbildung einer Rayleigh-Welle zurückgeführt.

Bild 41: Magnituden der Übertragungsfunktion zwischen der in das Schotterbett eingeleiteten Erregung und den Erschütterungen in den einzelnen Aufnehmer für die horizontal parallel zur Fahrtrichtung.



#### 4G. DISKUSSION DER MESSUNGEN AM KLASSISCHEN DAMM

Das Erscheinungsbild der dynamischen Erscheinungen am klassischen ist im Prinzip gleich demjenigen am kunststoffverstärkten Damm. Die gemessenen Peaks konnten durch das oben abgeleitete Modell ebenfalls einfach erklärt werden. Da die Meßaufnehmer in größerer Tiefe relativ zur Gleisoberkante, aber in geringerer Tiefe relativ zur Böschung lagen, konnten Erscheinungen beobachtet werden, die auf eine Ausbildung von Oberflächenwellen an der Böschung hindeuten. Diese Erscheinungen wurden im kunststoffverstärkten Damm nicht festgestellt werden, da dort die relative Position der Aufnehmer zu Gleis und Oberfläche eine andere war.

Weiter wurde eine im Vergleich zum kunststoffverstärkten Damm geringe Dämpfung festgestellt. Das könnte darauf zurückzuführen sein, daß die Impedanzunterschiede zum Untergrund größer waren und so die Energie nicht in den Untergrund abgegeben wurde.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

1. Als erstes konnte ein relativ einfaches Modell aufgestellt werden, mit dem die meisten der Versuchsergebnisse in guter Näherung zu beschreiben waren. Nicht enthalten in diesem Modell war die Materialdämpfung. Trotzdem ergaben sich aus dieser Modellbildung die bei der Messung festgestellten Frequenzbänder. Die Dispersion, d. h. die Abnahme der Amplitude, die sich aus geometrischen und materialspezifischen Eigenschaften des Dammes ergibt, konnte damit aber nicht erfaßt werden.

2. Die Geschwindigkeiten der Zugdurchfahrten lagen bei beiden Dämmen bei ungefähr 100 km/h = 27 m/sec mit einer Schwankungsbreite von  $\pm 5\%$ . Deshalb war es unter der Annahme, daß die Wellenausbreitungseigenschaften in diesem engen Bereich sich nicht wesentlich mit der Frequenz ändern, sinnvoll, diese Geschwindigkeiten durch eine Zeittransformation auf eine gemeinsame Geschwindigkeit von 100 km/h zu bringen. Damit hat man eine Reihe von Zugdurchfahrten mit gleichem Zeitmaßstab, deren Fouriertransformierte man addieren und so ein mittleres Spektrum errechnen kann. In diesem mittleren Spektrum zeichnen sich die Charakteristika besser ab, während die einzelnen zufällig auftretenden Eigenheiten keine so große Rolle mehr spielen. Die Aufstellung mittlerer Spektren ist auch aus dem Grunde sinnvoll, daß bei der Beurteilung der Eigenschaften weniger oder gar nicht auf die spezifischen Eigenheiten einer Durchfahrt, sondern mehr auf die gemittelten Eigenschaften aller Durchfahrten ankommt.

3. Die prinzipielle Übereinstimmung zwischen der Theorie und den Messungen war für beide Dämme unter Anbetracht der einfachen Annahmen sehr gut. Lediglich die Abnahme der Amplituden mit der Tiefe in Abhängigkeit von der Frequenz, d. h. die Dispersion, konnte nicht beschrieben werden. Mit den vorliegenden Messungen sind aber die Voraussetzungen für einen entsprechenden Umbau des Modells gelegt.

4. Es eröffnete sich die Möglichkeit, die dynamischen Beanspruchungen eines Geokunststoffs einfach zu erfassen und abzuschätzen. Zielführend ist das Modell eines Kissens, das mit Sand gefüllt ist. Die Einzelheiten können hier aber nicht dargelegt werden, das würde den Rahmen der Arbeit sprengen.

Beim Vergleich der beiden Dämme fallen folgende Eigenheiten und Unterschiede auf:

1. Im geokunststoffverstärkten Damm zeigt die Übertragungsfunktion, berücksichtigt man die Geometrie des Einbaus, eine stärkere Dämpfung an als im klassischen Damm. Das kann darauf zurückzuführen sein, daß der geokunststoffverstärkte Damm neu geschüttet war und so die Setzungserscheinungen und Verdichtungen noch nicht zum Abschluß gekommen waren. Demgegenüber war der klassische Damm schon lange im Gebrauch, daß die Setzungserscheinungen bestimmt abgeschlossen waren und als Folge die Dämpfung geringer war als beim geokunststoffverstärkten Damm.

2. Die Spektren in beiden Dämmen zeigten Frequenzen zwischen 20 und 70 Hertz an und waren durchaus vergleichbar. Frequenzen unter 10 Hertz wurden nicht gemessen und ausgewertet, sie spielten aber nach den theoretischen Untersuchungen auch keine so große Rolle.

## LITERATUR

/1/ G. Huber:

Erschütterungsausbreitung beim Rad/Schiene-System

Dissertation Karlsruhe 1988

/2/ H. W. Schüßler

Digitale Signalverarbeitung

Berlin Heidelberg New York 1988

oder

A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer

Discrete-Time Signal Processing

Englewood Cliffs, New Jersey 1989

T 2592

## Summary

By placing layers of geosynthetics into each filling a supporting structure may be produced by the soil-synthetics-compound with a big bearing capacity. Until now official agreement has only been granted for a primarily static load. As owing to the increasing acceptance of this construction the use in the area of dynamic loads cannot be excluded, it is very interesting to have knowledges about the behaviour of such structures under dynamic load. In a special case of use a 4,9 m high steep wall reinforced with geogrids is submitted to railway traffic. It has to be investigated how far and to what extent the dynamic influence becomes effective. The measures have to be executed upon a normal slope and a steep wall so that it is possible to compare.

For each of the dam types self-made vibration meters were introduced into horizontal bore holes in order to measure the effects of the crossing trains at velocities of 100 km/h. Over a Fourier-transformation the vibration speed and the spectrum were determined and compared. The measuring results confirmed a simple theoretic model developed on the basis of the rail and train geometry. It has been stated that the damping of a steep wall reinforced with geogrids is bigger than for a normal dam. The measures could be evaluated in a way that the real dynamic material stresses of the reinforcing material can be determined.

12592

## Résumé

En plaçant une couche de géotextiles par chaque remblayage une construction de support est créée par le compound sol-matière synthétique qui possède une grande capacité de portance. Jusqu'à maintenant il n'y a qu'un agrément officiel pour la charge statique. Mais grâce à l'acceptance croissante de cette construction l'utilisation dans le domaine de charges dynamiques ne peut être exclue, c'est pourquoi il est intéressant d'avoir des connaissances sur le comportement de ces structures sous charges dynamiques. Dans un cas spécial d'application un remblai raide d'une hauteur de 4,9 m renforcé de géogrilles est soumis aux sollicitations du trafic ferroviaire. Il doit être examiné comment et dans quelle mesure s'étend l'influence dynamique. Les mesures doivent être réalisées sur une pente normale et un mur raide pour pouvoir comparer.

Pour chacune des deux types de remblais des vibromètres construites par nous sont introduites dans les trous forés horizontaux pour mesurer les effets du passage du train à des vitesses de 100 km/h. Par une transformation Fourier les vitesses de vibration et les spectres ont été déterminés et comparés. Les résultats de mesure confirmaient un modèle simple théorique sur la base de la géométrie du rail et du train. Il a été constaté que l'amortissement du remblai raide renforcé de géogrilles est plus grand que pour un remblai normal. Les mesures pouvaient être évaluées d'une manière que les sollicitations dynamiques véritables du matériel de renforcement pouvaient être déterminées.