

Eric J. Rathe Prof. ETH, Dr. sc. techn.
Beratender Ingenieur SIA
Wettsteinstrasse 71, CH-8332 Russikon

Bericht No. 150
20. Januar 1982

BUNDESAMT FUER STRASSENBAU

Forschungsauftrag Nr. 10/80:

AKUSTISCHE WIRKUNG DER BEPFLANZUNG VON LÄRMSCHUTZWÄLLEN

PHASE 1

SCHLUSSBERICHT

INHALTSVERZEICHNIS

FORSCHUNGSZIEL	2
EINLEITUNG	2
SCHALLAUSBREITUNG IM FREIEN	3
MESSGERAETE FUER SCHALLAUSBREITUNGSMESSUNGEN	9
MESSVORGANG	18
ZEITLICHER ABLAUF DER ENTWICKLUNG	20
MESSUNGEN IN COLDRERIO	21
ZUSAMMENFASSUNG	24
BEILAGEN	26
LITERATUR	40

AKUSTISCHE WIRKUNG DER BEPFLANZUNG VON LÄRMSCHUTZWÄLLEN

FORSCHUNGSZIEL

Die Forschungsstelle will Grundlagen für die Planung von Bepflanzungen an Lärmschutzeinschnitten und -wällen liefern, die den akustischen Anforderungen des Immissionsschutzes entsprechen.

1. EINLEITUNG

Die bisherige Praxis der Lärmschutzplanung an Nationalstrassen beschränkt sich auf die Beurteilung der Lage und Höhe eines Hindernisses, das als Immissionsschutz dienen soll. Aus den Erkenntnissen der Schallausbreitung ohne Hindernisse ist anzunehmen, dass bei ungeeigneter Bepflanzung eines Hindernisses die erwartete Schallpegelsenkung um 3 bis 8 Dezibel verringert wird. Die Bearbeitung dieser Frage ist dringend, weil in der Schweiz viele Lärmschutzprojekte ausgeführt oder geplant sind, die bepflanzt werden.

Ein erstes Forschungsgesuch für die Bearbeitung dieser Probleme wurde am 14. Januar 1980 eingereicht. Am 26. Juni 1980

führte das Bundesamt für Strassenbau zu diesem Thema eine Expertensitzung in der EMPA in Dübendorf durch. Aufgrund dieser Beratungen wurde der Zeitplan des Projektes neu gegliedert, um so rasch wie möglich Anhaltspunkte darüber zu erhalten, wie weit die anlässlich der Sitzung im Labor demonstrierten Pegelminderungen (ca. 5 Dezibel bei 1 kHz) auch im Freien nachgewiesen werden können. Mit dem Forschungsauftrag No. 10/80 vom 13.8.1980 wurde deshalb aus dem ganzen Projektvorhaben eine erste Phase bewilligt, die dem Aufbau der Messeinrichtungen, und einer qualitativen Evaluation dienen sollte. Die wissenschaftliche Untersuchung der massgebenden Parameter der Schallausbreitung über bepflanzte Hindernisse wurde der zweiten Phase zugeordnet. Der vorliegende Bericht bezieht sich auf die erste Projektphase.

2. SCHALLAUSBREITUNG IM FREIEN

Die Schallausbreitung im Freien wird durch Eigenschaften der Schallquellen, die topographischen Bedingungen, und durch meteorologische Parameter beeinflusst. Die Bedeutung der verschiedenen Einflusskomponenten ist um so grösser, je grösser die Entfernung zwischen der Quelle und dem Beobachtungsort ist. Die Bedeutung ist aber auch dann besonders gross, wenn durch Schutzmassnahmen künstlich ein Pegelunterschied gegenüber freier Schallausbreitung erzielt werden

soll. Einige Aspekte der Schallausbreitung sind in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben.

2.1 Geometrische Ausbreitungsdämpfung

Die im Verkehr auftretenden Lärmquellen lassen sich mit zwei idealisierten Normalquellen nachbilden. Jede einzelne Quelle verhält sich für alle Entfernungen, die grösser als die massgebenden Quellenabmessungen sind, wie eine Punktquelle. Dafür gilt generell als Ausbreitungsdämpfung eine Pegelabnahme von 6 Dezibel pro Verdopplung der Distanz zwischen der Quelle und dem Beobachter. Der Wert von 6 dB folgt aus der dreidimensionalen Ausbreitung der akustischen Leistung.

Wenn auf einem Verkehrsweg eine Anzahl von Fahrzeugen gleichzeitig Lärm erzeugen, dann lässt sich das Gesamtverhalten mit der idealisierten Linienquelle vergleichen. Sie berücksichtigt, dass der Beobachter mit zunehmendem Abstand von der Quelle einen immer grösser werdenden Anteil der Quelle überblicken, resp. wahrnehmen kann. Die physikalische Beschreibung ist eine zweidimensionale Ausbreitung der akustischen Leistung, wobei die Pegel pro Verdopplung der Distanz nur noch um 3 Dezibel abnehmen.

Sowohl für das Punktquellenmodell, wie auch für das Linienquellenmodell kann nachgewiesen werden, dass der Mittelungspegel L_{eq} für Quellen, die sich über einen festen Verkehrsweg bewegen, pro Verdoppelung der Distanz des Beobachters um 3 Dezibel abnimmt (1)*. Der Mittelungspegel ist als Messgrösse für Grenzwerte der Strassenlärmimmissionen nach Inkrafttreten des neuen Umweltschutzgesetzes vorgesehen (2).

2.2 Dämpfung durch Hindernisse

Mit Hindernissen lässt sich die Ausbreitungsdämpfung zwischen einer Schallquelle und dem Empfänger auf engstem Raum erhöhen. Sie werden deshalb in der Form von Wällen und Wänden als Schutz vor Strassenlärm bevorzugt angewendet. Die nutzbare Dämpfung setzt ein, sobald die Sichtverbindung vom Empfänger zur Quelle durch das Hindernis unterbrochen wird. Ein Mass für die Wirksamkeit des Hindernisses ist das Verhältnis der Verlängerung des Ausbreitungsweges über das Hindernis (gegenüber der geradlinigen Verbindung von Quelle und Empfänger) zur Wellenlänge der akustischen Signale. Damit wird die Dämpfung frequenzabhängig, und wirkt bevorzugt bei hohen Frequenzen. Die maximal erzielbare Dämpfung ist theoretisch sehr gross, aber alle auf die Praxis ausgerichteten Prognosemethoden enthalten Einschränkungen, um die Auswirkungen von Luftturbulenzen, sowie von Wind- und

* Siehe Verzeichnis ausgewählter Literaturstellen am Schluss des Berichtes

Temperaturgradienten im Freien wenigstens global zu berücksichtigen. Die Wirkung von Bepflanzungen wurde bisher nicht einbezogen (3,4,5). Ansätze zur Berechnung komplizierter Hindernisformen sind in neueren Arbeiten angegeben worden (18).

2.3 Dämpfung durch Bewachsung in ebenem Gelände

Die klassischen Methoden der Dämpfungsberücksichtigung beruhen auf der Annahme, dass die Bodenbewachsung nur schallabsorbierende Eigenschaften aufweist. Die Dämpfung kann dann mit Pegelsenkungen pro Distanzeinheit (z.B. Dezibel pro 100m) für verschiedene Frequenzen angegeben werden (4). In neuerer Zeit hat sich gezeigt, dass die akustischen Eigenschaften des Bodens als endliche, komplexe Impedanz eine massgebende Rolle spielen (6,7), sogar derart, dass eine gemähte Wiese sich fast gleich verhält wie eine Wiese mit voller Grashöhe (8,19). Die Ausbreitungsverhältnisse werden ferner stark durch die vom Boden aus gemessene Höhe der Quelle und des Empfängers geprägt. Für Büsche und Bäume sind Theorien über den Grad der Schallstreuung vorgeschlagen worden (9,10), die nur noch eine beschränkte Absorption der Blätter vorsehen. Für fast alle bisherigen Arbeiten gilt die Einschränkung, dass nur ebenes Gelände untersucht wurde. Ebenso sind die meteorologischen Einflüsse kaum berücksichtigt.

2.4 Meteorologische Einflüsse

Die über grössere Distanzen oft beobachteten Änderungen der Schallausbreitung, wie sie beispielsweise bei Temperaturinversionen vorkommen, sind in der Umgebung von Hindernissen auch auf kleinem Raum wichtig. Durch einen Temperaturgradienten entsteht eine ortsabhängige Schallgeschwindigkeit, weil die Ausbreitungsgeschwindigkeit proportional zur Wurzel aus der absoluten Temperatur ist. Die Luft wird dadurch zu einem brechenden Medium, sodass die Schallausbreitungswege (Schallstrahlen) einen gekrümmten Verlauf bekommen. Bei Inversionslagen mit Temperaturabsenkung am Boden sind die Schallstrahlen nach unten gekrümmt. Dies führt Schallstrahlen zurück zum Boden, die bei der Quelle im Winkelbereich nach oben gerichtet waren, und verursacht eine Reduktion der Ausbreitungsdämpfung. Das Gleiche geschieht, wenn der Wind eine Komponente in der Richtung von der Quelle zum Empfänger aufweist. Die Wirkung des Windes ist um so ausgeprägter, je grösser der vertikale Gradient der Windgeschwindigkeit ist. Dieser ist seinerseits durch die mittlere Windgeschwindigkeit und die Bodenrauigkeit (einschliesslich Bepflanzung und Bebauung und Topographie) gegeben (11,12,13).

2.5 Bepflanzungen auf Lärmschutzwällen

Bei einem Lärmschutzwall können alle oben angeführten Einflussgrössen auf das akustische Verhalten einwirken. Die Untersuchungen über die Wirksamkeit von Schallschutzwänden unter Berücksichtigung der akustischen Bodenimpedanz (14,15,16) führten zu wesentlich komplexeren Resultaten als die einfache Theorie (3,4). Laboruntersuchungen über den Einfluss von Wind auf die Dämpfung von Schallschutzwänden wurden ebenfalls durchgeführt, und zeigten Pegelunterschiede von ± 3 bis ± 8 dB(A) gegenüber der Dämpfung ohne Wand (17).

Von besonderem Interesse sind zwei Arbeiten über den Einfluss von Bäumen auf Lärmschutzwällen (20,21). In der ersten Arbeit werden Modellversuche im Masstab 1 : 20 zur Nachbildung eines 3m hohen Walles beschrieben, wobei auf der Dammkrone eine Reihe von ca. 6m hohen Bäumen angeordnet wurde. Mit simulierten Laubbäumen fand gemäss Beilage 1 für Frequenzen über 500 Hz eine Reduktion der Hindernisdämpfung um 10 bis 15 dB. Für Nadelbäume setzte der Dämpfungsverlust erst etwa bei 2 kHz ein.

Die Messungen von Schuller und Zeeuw wurden im Freien durchgeführt. Eine Reihe von Bäumen, die sich hinter einem Wall befindet, reduziert die Hindernisdämpfung gemäss Beilage 2

oberhalb von 500 Hz um 5 bis 10 dB, falls die Bäume belaubt sind.

Im vorliegenden Projekt interessieren besonders Anordnungen, die im schweizerischen Nationalstrassenbau angewendet werden. Einige Beispiele sind auf Beilage 3 dargestellt. Für diese Fälle sind bisher keine geeigneten Unterlagen aus der Literatur bekannt. Die Anordnungen erfordern die Berücksichtigung der Geländeform, der akustischen Impedanz des Bodens, von bevorzugten Windrichtungen, sowie von den Temperaturgradienten, die durch die Bepflanzung im Bereich der Hindernisse beeinflusst werden. Als Vorgehen eignet sich die systematische Messung der Ausbreitungsbedingungen an konkreten Beispielen im Gelände, weil dann alle Parameter praxisgerecht erfasst werden.

3. MESSGERÄTE FÜR SCHALLAUSBREITUNGSMESSUNGEN

3.1 Pflichtenheft

Für die Untersuchung der Schallausbreitung sind vergleichbare Messwerte von einer Auswahl von Messorten erforderlich. Als Schallquelle ist der normale Verkehrslärm auf den Nationalstrassen vorgesehen. Da diese Quelle grundsätzlich nicht genau reproduzierbar ist, müssen die interessierenden Mess-

orte gleichzeitig erfasst werden. Die Messdauer muss der Tatsache angepasst sein, dass ein weiter von der Strasse entfernter Messort nicht den gleichen zeitlichen Verlauf der Geräusche wahrnimmt, wie ein Messort in Strassennähe. Diesem Umstand trägt eine energetische Mittelwertbildung über ein genügend grosses Zeitintervall Rechnung (typisch ca. 10 Minuten).

An jedem Messort muss gleichzeitig das Verkehrsgeräusch, die Temperatur und der Wind gemessen werden.

Da bei der Schallausbreitung für verschiedene Frequenzen unterschiedliche Dämpfungen auftreten, muss das Signal für jeden Messort einer Frequenzanalyse zugeführt werden. Die übliche Methode benützt Terzfilter, die den Messbereich von 50 Hz bis 10 kHz in 24 Teilbereiche aufteilen. Eine Gesamtbeurteilung erfolgt zusätzlich mit dem A-bewerteten Pegel, der der Wahrnehmung des menschlichen Gehörs angepasst ist. Da sowohl in der Nähe einer Strasse, wie auch hinter Abschirmungen und bis ca. 200m Abstand von der Strasse gemessen werden soll, muss der Messbereich mindestens von 30 dB(A) bis 100 dB(A) reichen. Alle Messkanäle müssen auf allfällige Uebersteuerungen hin überwacht werden. Die Eichung soll für alle Kanäle mit einem einheitlichen Signal durchgeführt werden, sodass auch geringe Pegeldifferenzen zwischen den Kanälen mit möglichst guter Messgenauigkeit ermittelt werden können.

Die Temperaturmessung soll mit einem vor Sonneneinwirkung geschützten Geber laufend auf 0.1°C genau möglich sein.

Bei der Windmessung interessieren die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung. Wenn möglich sind die Windkomponenten parallel und senkrecht zur Strassenachse, sowie eine allfällige Vertikalkomponente getrennt zu messen. Als Ergebnis ist der zeitliche Mittelwert der Windgeschwindigkeit massgebend. Es könnten später auch Angaben über die Streuung der Windgeschwindigkeit als Mass für den Turbulenzgrad interessieren. Der Wind soll so nah wie möglich bei jedem Mikrophon gemessen werden, aber ohne dass das Schallfeld gestört wird.

Die Anzahl der gleichzeitig erfassbaren Messorte soll wenn möglich 10 sein. Sie sind in der Regel in 2er-Gruppen (am gleichen Mast in verschiedener Höhe) anzuordnen. Die Masthöhe soll bis ca. 10m ausbaubar sein.

Alle Messsignale sind während den Messungen so weit zu verarbeiten, dass allfällige Messfehler und Ausfälle erkannt werden können. Die Resultate sind für die digitale Weiterverarbeitung geeignet zu speichern. Beim Auftreten von Fremdgeräuschen (zB. Flugzeug) soll die Messung für alle Mikrophone gleichzeitig unterbrochen, und wieder fortgesetzt werden können, ohne dass dies die Auswertung beeinflusst.

3.2 Konzept

Aus der Forderung für eine Mittelwertbildung über Perioden von der Grössenordnung von 10 Minuten ergibt sich ein grosser Unterschied zwischen der während der Messung zu berücksichtigenden Datenmenge, und den als Resultat gewünschten Daten. Dieses Verhältnis wirkt sich besonders bei den akustischen Signalen stark aus. Für die nachträgliche Frequenzanalyse im Labor müssten die Signale für jeden der 10 Messkanäle zB. auf Tonband aufgenommen werden. Dabei ist selbst bei genauester Eichung nicht gewährleistet, dass die Aufzeichnungseigenschaften der Tonbänder über den ganzen Frequenzbereich und über die ganze Dauer der Aufzeichnungen so konstant bleiben, dass Differenzmessungen zwischen ähnlichen Signalen noch möglich sind. Da auch Tonbänder professioneller Qualität Unregelmässigkeiten von ± 1 dB aufweisen können, musste eine Lösung gesucht werden, die während den Messungen bereits Analysen einschliesst. Gleichzeitig sollte dadurch das Problem bewältigt werden, dass eine direkte, optische oder akustische Ueberwachung von 10 Messgeräten nicht durch das Bedienungspersonal erfolgen kann.

Als zweckmässigste Lösung ergab sich eine Messeinrichtung mit laufender Verarbeitung der Daten, und digitaler Speicherung der Resultate. Dazu können Mikroprozessoren ein-

gesetzt werden. Mit dieser Methode ist sowohl eine laufende Ueberwachung aller Messkanäle, wie die Beurteilung der Qualität der Messresultate bereits am Messort möglich, ohne auf eine Laborauswertung zu warten.

Diese Lösung erfordert allerdings die Eigenentwicklung einer Reihe von Messgeräten. Wir haben diesen Aufwand in Kauf genommen, um eine möglichst zweckmässige Messanlage für die Forschungsaufgabe einsetzen zu können.

3.3 Eigenschaften der Messgeräte

3.3.1 Akustische Messeinrichtungen

Das Blockschema der akustischen Messkette ist auf Beilage 4 dargestellt. Die Anlage umfasst 10 Mikrophone mit 10 Vorverstärkern, die beliebig auf verschiedene Masten verteilt werden können. Mit jedem Mikrophon kann der Messbereich von 30 dB(A) bis 130 dB mit einer Dynamik von 60 dB erfasst werden.

Am Mastfuss sind Leistungsverstärker angeordnet. Damit können die Signale auf einen Wert für optimale Aussteuerung der Auswertanlage verstärkt werden. Bei der Uebertragung der Signale über lange Leitungen (bis 400m) wird dadurch der Einfluss von Fremdeinstreuungen möglichst gering gehalten.

Der Verstärkungsgrad jedes Leitungsverstärkers kann vom Messwagen aus eingestellt werden. Insgesamt 14 Leitungsverstärker sind paarweise in 7 Kasten eingebaut. Damit können bis zu 7 auseinander liegende Masten bedient werden. Wenn 3 oder 4 Mikrophone auf einem Mast sind, werden diesem Mast zwei Leitungsverstärkerkasten zugeordnet.

Im Messwagen werden die Leitungen von den aktiven Leitungsverstärkern in einem Rangierpaneel auf die Eingänge von 10 Terzanalysatoren geschaltet. Da kommerzielle Ausführungen dieser Echtzeitanalysatoren einerseits sehr teuer, und andererseits für die gleichzeitige Verwendung von 10 Eingangskanälen nur beschränkt geeignet sind, wurden diese Geräte an der ETH entwickelt. Sie enthalten pro Ausgang bereits einen Effektivwertgleichrichter mit 125 ms Zeitkonstante.

Die eigentliche Messung erfolgt mit einem Analog-Digital-Wandler, der als elektronisches Voltmeter mit automatischer Umschaltung der Eingänge (Multiplexer), und digitaler Ausgabe arbeitet. Im Rythmus von ca. 20'800 Messungen pro Sekunde wird jeder der 260 Ausgänge (10 Analysatoren mit je 26 Ausgängen) alle 12,5 Millisekunden abgetastet und gemessen. Diese Abtasthäufigkeit reicht bei einer Gleichrichterzeitkonstanten von 125 ms auch zur Erfassung von sehr schnellen Signaländerungen aus. Bei jeder einzelnen Messung wird für

den betreffenden Ausgang ein Vergleich mit den bisherigen Maximal- und Minimalwerten durchgeführt, um diese laufend nachzuführen. Dann wird der Messwert quadriert, und zur bisherigen Summe der Quadrate addiert. Aus der Gesamtsumme kann am Ende der Messperiode der energetische Mittelwert bestimmt werden. Falls ein Messwert die maximal zulässige Grenze der Aussteuerung überschreitet, wird ein Warnsignal gesetzt, das diesen Zustand in das periodische Messprotokoll auf dem Printer überträgt. Der Messvorgang ist so arbeitsintensiv, dass ein Mikroprozessor damit voll ausgelastet ist.

Die oben beschriebenen Aufgaben müssen kontinuierlich durchführbar sein. Nach einer Messperiode von beispielsweise 10 Minuten wird deshalb der gesamte Speicher für die Messwerte der 260 Ausgänge auf einen zweiten Bereich umgeschaltet. Während sich in diesem die Daten der zweiten Messperiode ansammeln, kann der Inhalt des ersten Speichers ausgelesen und fertig verarbeitet werden. Auch das Ausdrucken und überspielen auf ein digitales Kassettengerät gehört in diese Phase. Diese Zusatzfunktionen übernimmt ein zweiter Mikroprozessor, der über eine besondere Schnittstelle mit dem Akustikprozessor verbunden ist, und dessen Datenspeicher lesen kann.

Der ganze Messvorgang kann durch eine Taste jederzeit unterbrochen, und entsprechend wieder in Gang gesetzt werden.

Diese Funktion dient dem Ausblenden von unerwünschten Störgeräuschen, wie zB. Flugzeuglärm.

3.3.2 Wind- und Temperaturmessgeräte

Das Blockschema der Meteo-Messstelle ist auf Beilage 5 dargestellt. Die Anlage umfasst 12 vollständige Meteo-Einheiten, die beliebig auf verschiedene Masten verteilt werden können. Jede Einheit misst die Komponenten X, Y, und Z des Windes je im Bereich von 0.1 m/s bis 20 m/s, und die Temperatur über einen Bereich von $\pm 20^{\circ}\text{C}$ gegenüber einem einstellbaren Grundwert.

Der Windmesser enthält keine beweglichen Teile. Auf drei senkrecht zu einander angeordneten Messstrecken sind je zwei Ultraschallwandler angeordnet. Damit werden nacheinander Ultraschallsignale vorwärts, und dann rückwärts (Sender und Empfänger vertauscht) gesendet. Aus dem Vergleich der Ausbreitungsgeschwindigkeit in den beiden Richtungen lässt sich ersehen, ob eine Windkomponente in dieser Richtung besteht, und wie gross diese ist.

Am Mastfuss ist das Auswertegerät aufgestellt. Zwei Geräte zur Bedienung von zwei Meteo-einheiten sind im gleichen Gehäuse mit zwei Leitungsverstärkern der Schallmessung zusammengebaut. Insgesamt stehen somit 14 Geräte in 7 Kasten

zur Verfügung. Für zwei Meteoeinheiten reicht ein Kasten, für 3 oder 4 Meteoeinheiten pro Mast müssen dort zwei Kästen eingesetzt werden.

Im Messwagen befindet sich ein Steuergerät und der Mikroprozessor für die Durchführung und Auswertung der Messungen. Da die Windmesser bereits digitale Signale liefern, ist kein Analog-Digitalwandler erforderlich. Dreissig Mal pro Sekunde wird jede der drei Windrichtungen pro Meteoeinheit ausgewertet. Sind gegenüber den vorhergehenden Messwerten starke Änderungen aufgetreten, dann kann beim Ueberschreiten eines Schwellwertes eine Ueberwachungsmeldung mit genauer Kanalangebe ausgelöst werden. Sie dient der Erkennung von Turbulenzen. Ueber die gesamte Messzeit werden Mittelwerte der Temperatur und jeder einzelnen Windgeschwindigkeitskomponente gebildet.

Zur Ermöglichung von kontinuierlichen Messungen wird wie bei den akustischen Daten mit zwei umschaltbaren Resultatspeichern gearbeitet. Da der Meteobetrieb den zweiten Mikroprozessor nicht voll auslastet, sind diesem noch alle Ueberwachungsaufgaben und die gesamte Datenausgabe übertragen.

3.3.3 Gesamtanordnung

Die Gesamtanordnung ist auf Beilage 6 dargestellt. Sie ist auf eine möglichst flexible Verwendung von bis zu 7 Masten

verschiedener Höhe ausgelegt. Die besonders empfindlichen Akustiksignale werden mit Sternleitungen auf kürzestem Weg zum Messwagen gebracht. Die Steuersignale und Meteodaten werden auf einer Ringleitung von Mast zu Mast geführt. Die Beilage 7 zeigt eine Ansicht einer Messstelle mit Mikrophon, Windmesser und Temperaturfühler. Das Mikrophon ist mit dem üblichen Windschirm (schwarze Schaumstoffkugel) versehen. Der Temperaturfühler ist durch vertikal angeordnete Zylinder und eine Abdeckplatte vor Sonneneinstrahlung geschützt. Auf der gleichen Beilage sind die elektronischen Geräte abgebildet, die im Messwagen aufgestellt werden. Zwei Gehäuse enthalten zusammen 10 Terzanalysatoren. Die Mikroprozessoren sind mit den entsprechenden Speicherplatinen je in einem Gehäuse untergebracht. Zwei kleinere Gehäuse dienen dem Rangieren der Kabelleitungen und der Meteo-Steuerung. Dazu kommen noch zwei handelsübliche Videoterminals, ein Printer und ein digitales Kassettengerät.

4. MESSVORGANG

Beim Einrichten der ganzen Messanordnung wird nach den elektrischen Installationen, und unmittelbar vor dem Aufstellen der fertig montierten Maste die gesamte Eichung durchgeführt. Dazu wird mit einem geeichten Generator nacheinander bei jedem Leitungsverstärker ein genau definiertes Signal eingespeist. Die damit erzielten Messwerte werden

für jede Verstärkungseinstellung der Leitungsverstärker und für jeden Terzfilterausgang separat abgespeichert. Für die 10 Mikrophone ergibt das 10×26 (Filter) $\times 7$ (Verstärkungen) = 1820 + 260 Offsetwerte der Gleichrichter = 2080 Eichwerte. Die Absolutempfindlichkeit der Mikrophone wird anschliessend mit einer Normal-Eichquelle ermittelt und pro Mikophon mit einem weiteren Eichwert festgehalten. Damit sind alle Einflüsse von Verstärkern, Filtern und der Leitungen abgedeckt. Die Windmesser werden ebenfalls abgeglichen, und zwar unter Verwendung einer winddichten Hülle ($12 \times 3 = 36$ Eichwerte). In dieser Phase hat sich die Verständigung mit Funkgeräten als unerlässlich erwiesen.

Nach der Eichung können die Masten aufgestellt werden. Die eigentlichen Messabläufe sind weitgehend vorprogrammiert. Dazu dient ein sehr gut ausgebautes Monitorprogramm mit einer eigenen Programmiersprache für die vorliegende Anwendung. Mit 57 Einzelbefehlen können Messvorgänge ausgelöst, Eichungen durchgeführt oder beliebige Bildschirm- oder Printdarstellungen erzeugt werden. Eine Auswahl von 31 vorprogrammierten Befehlsgruppen beschreiben die Normalfunktionen und sind fest im Speicher eingebaut. Weitere 30 Befehlsprotokolle können von der Bedienungskonsole aus vorbereitet und nach Bedarf abgerufen werden. Für dieses Programmsystem wurden über 10'000 Speicherplätze mit ca. 4'000 Befehlen belegt.

Als Besonderheit regeln spezielle Synchronisiersignale auch die laufende Zusammenarbeit der beiden sonst unabhängigen Mikroprozessoren.

Vor jeder Messung müssen alle Verstärkungen gewählt, und die Aussteuerungen überprüft werden. Die Kanalzuordnungen und Einstellungen werden schriftlich festgehalten. Für die laufende Ueberwachung können ausgewählte Daten in der Form von Balkendiagrammen graphisch auf dem Bildschirm dargestellt werden. Die Kontrolle sämtlicher Signale auf Uebersteuerung wird in festen Intervallen von zB. 2 Sekunden automatisch vorgenommen. Falls Fehler festgestellt werden wird die genaue Kanal- und Fehlerangabe schriftlich über den Drucker ausgegeben.

Nach jeder Messperiode stehen auch die Messergebnisse zur Verfügung, und werden vorzugsweise sowohl auf das digitale Kassettengerät, wie auf den Drucker geleitet.

5. ZEITLICHER ABLAUF DER ENTWICKLUNG

Die umfangreichen Vorbereitungsarbeiten einschliesslich Entwicklung und Ausführung der recht komplizierten Messanlage nahm fast die ganze, für die Phase 1 des Forschungsprojektes zur Verfügung stehende Zeit in Anspruch. Der Fortschritt der Arbeit wurde der begleitenden Kommission in regelmässigen Zwischenberichten alle 2 Monate dargelegt.

Die eigentliche Geräte- und Programmentwicklung wurde ab Januar 1981 an der ETH durch die Herren H. Hochstrasser, dipl. El. Ing. ETH, und G. Wagener, dipl. El. Ing. ETH durchgeführt. Im September 1981 konnte der Messwagen mit den peripheren Einrichtungen in Bern der Forschungskommission des Bundesamtes für Strassenbau vorgestellt werden. Zu jenem Zeitpunkt war es bereits möglich, einen Messkanal mit allen Auswertungen zu betreiben. Nachher folgte eine intensive Programmentwicklung, um die komplizierte Verflechtung aller automatisch ablaufenden Messvorgänge, und die Zusammenarbeit der Mikroprozessoren zu gewährleisten. Besondere Probleme der gleichzeitigen Datenerfassung traten zum Beispiel mit der Einstreuung von Ultraschallsignalen der Windmessgeräte in die Akustikkanäle auf. Schliesslich konnte doch für die Woche vom 14. Dezember 1981 eine Feldmessung vorgesehen werden. Sie sollte in möglichst schneefreiem Gelände stattfinden, um jede unnötige Erschwerung der Arbeit zu vermeiden. Glücklicherweise fand sich in Coldrerio, ca. 4km nördlich von Chiasso, ein geeigneter Messort.

6. MESSUNGEN IN COLDRERIO

In der Nähe des Rastplatzes Coldrerio an der N2 liegt die Nationalstrasse in einem Einschnitt. Unmittelbar nebeneinander ist ein Teil der Böschung mit Gras bewachsen und ein Teil mit Büschen und jungem Laubwald von ca. 6m Höhe

bedeckt. In diesen Abschnitten wurden am 15. Dezember 1981 zwei Messreihen durchgeführt. Die topographischen Verhältnisse sind aus der Beilage 8 und die Art der Bewachung aus Beilage 9 ersichtlich. Sämtliche Bäume und Büsche waren ohne Laub.

Zur Erleichterung der Aufstellung wurden nur 5 Mikrophone und 5 Meteeinheiten eingesetzt. Sie waren auf 3 Masten verteilt. Der Messwagen konnte auf einem Feldweg am Rand des Einschnittes aufgestellt werden. Der Benzingenerator befand sich ausser akustischer Reichweite am Strassenrand der N2. Alle Geräte arbeiteten einwandfrei. Die Eichungen bereiteten keine besonderen Probleme.

Als Messperiode wurden 10 Minuten gewählt. Ein Beispiel des unmittelbar nach einer Messung erhaltenen Originalausdruckes ist auf Beilage 10 wiedergegeben. Es enthält Angaben über die Messzeit, dann mit C bezeichnet die Mittelungspegel L_{eq} für die Messperiode. Die Daten in den Kolonnen 2 bis 6 sind Pegel in $\frac{1}{10}$ Dezibel für die Mikrophone 1 bis 5. Die Kolonne 1 gibt die Nummer des Filterausganges an: 0 entspricht 50Hz, 10 entspricht 500 Hz, 13 entspricht 1 kHz, 20 entspricht 5 kHz, 24 entspricht der linearen Messung, und 25 entspricht dem A-bewerteten Pegel. Die nachfolgenden Datenblöcke geben die Maximal- und Minimalpegel an, die während der Messperiode festgestellt wurden. Der letzte Block enthält die mittleren

Windgeschwindigkeiten in den Richtungen X, Y und Z in Einheiten von 0.1 m/s, und die Temperatur in Zehntelgrad.

6.1 Messresultate

Die Messanordnungen sind auf Beilage 11 als Geländeschnitte dargestellt. Nach der Auswertung im Labor zeigte es sich, dass für das Mikrophon 1 eine zu geringe Höhe gewählt worden war, sodass die Leitplanken auf der Mittelachse der N2 eine erhebliche Abschirmung für die Geräusche von Fahrzeugen auf den entfernten Spuren bewirkten. Als Bezugspunkt wurde deshalb das Mikrophon 3 am Rand des Einschnittes, in 6m Höhe gewählt. Die geometrische Anordnung der Masten für die Mikrophone 2 bis 5 ist in beiden Fällen gleich.

In der Messebene A (ohne Bewachsung) wurden 7 Messperioden von je 10 Minuten ausgewertet und gemittelt. Bei der Messebene B (mit Bewachsung) konnten der vorgeschrittenen Zeit halber nur 4 Messperioden von je 10 Minuten erfasst werden, die hier auch als Mittelwert wiedergegeben sind.

Das wichtigste Ergebnis sind die Differenzspektren der Beilagen 12 bis 14. Auf Beilage 12 sind die Pegelunterschiede der Mikrophone 2, 4 und 5 gegenüber dem Mikrophon 3 für die Messebene A ohne Bewachsung dargestellt. Beilage 13 ent-

hält die Angaben für die Messebene B mit Bewachsung. Die Spektren auf Beilage 14 zeigen den Unterschied zwischen den Ebenen A und B. Daraus ergibt sich, dass die Bewachsung beim Mikrophon 5 in 6m Höhe eine Pegelerhöhung von 2 dB(A) durch Spektralkomponenten oberhalb von 200 Hz erzeugte. Beim Mikrophon 4 in 1.4m Höhe über Boden ist der Einfluss der Bewachsung als Pegelerhöhung von 4.5 dB(A) ersichtlich. Der Einfluss setzt bei 200 Hz ein, und erreicht bei 1 kHz etwa 5 Dezibel, und bei 4 kHz etwa 7 Dezibel.

Im vorliegenden Beispiel könnte die Bewachsung zum Teil auch die Messebene A noch beeinflussen, sodass der Unterschied zwischen den Messebenen eher über den gefundenen Messwerten anzusetzen ist, weil die beiden Geländearten unmittelbar aneinander angrenzen. Bei der Begehung des Geländes entstand auch subjektiv der Eindruck, dass im Bereich der Bewachsung eine Art zusätzliche, mehr hochfrequente Geräuschquelle ständig wahrnehmbar war.

7. ZUSAMMENFASSUNG

In der ersten Phase des Forschungsauftrages sollte eine Messeinrichtung aufgebaut werden, die es gestattet, den Einfluss der Bepflanzung von Lärmschutzwällen an konkreten Beispielen im Gelände zu erfassen. Es zeigte sich, dass zu diesem Zweck gleichzeitige Messungen an allen interessierenden Stellen

vorgenommen werden müssen, dass die Messgenauigkeit an die Grenze der technischen Möglichkeiten stossen muss, und dass gleichzeitig genaue Angaben über Temperatur und vektorielle Windkomponenten für jeden Messort benötigt werden. Eine entsprechende Messeinrichtung für 10 Messorte wurde entwickelt und aufgebaut. Sie wurde bei Coldrerio an der Nationalstrasse N2 mit Erfolg eingesetzt. Der damit durchgeführte Vergleich von zwei ähnlichen Geländesituationen mit und ohne Bewachsung durch Jungwald ohne Laub ergab spektrale Pegelunterschiede von der gleichen Grössenordnung (5 Dezibel) wie bei Laborversuchen in der EMPA. Die Frage, ob sich in konkreten Beispielen an Nationalstrassen eine schutzmindernde Wirkung der Bepflanzung nachweisen lasse, muss für diesen Fall bejaht werden. Die Messeinrichtungen sind nun bereit, um im Rahmen der zweiten Phase des Forschungsprojektes eine systematische Untersuchung von typischen Bepflanzungen vorzunehmen und die massgebenden Parameter zu erforschen. Ein entsprechendes Gesuch wird der Forschungskommission des Bundesamtes für Strassenbau eingereicht.

20. Januar 1982

E. J. Rafke

Beilage 1: Ergebnisse der Modellversuche von Blair (20)

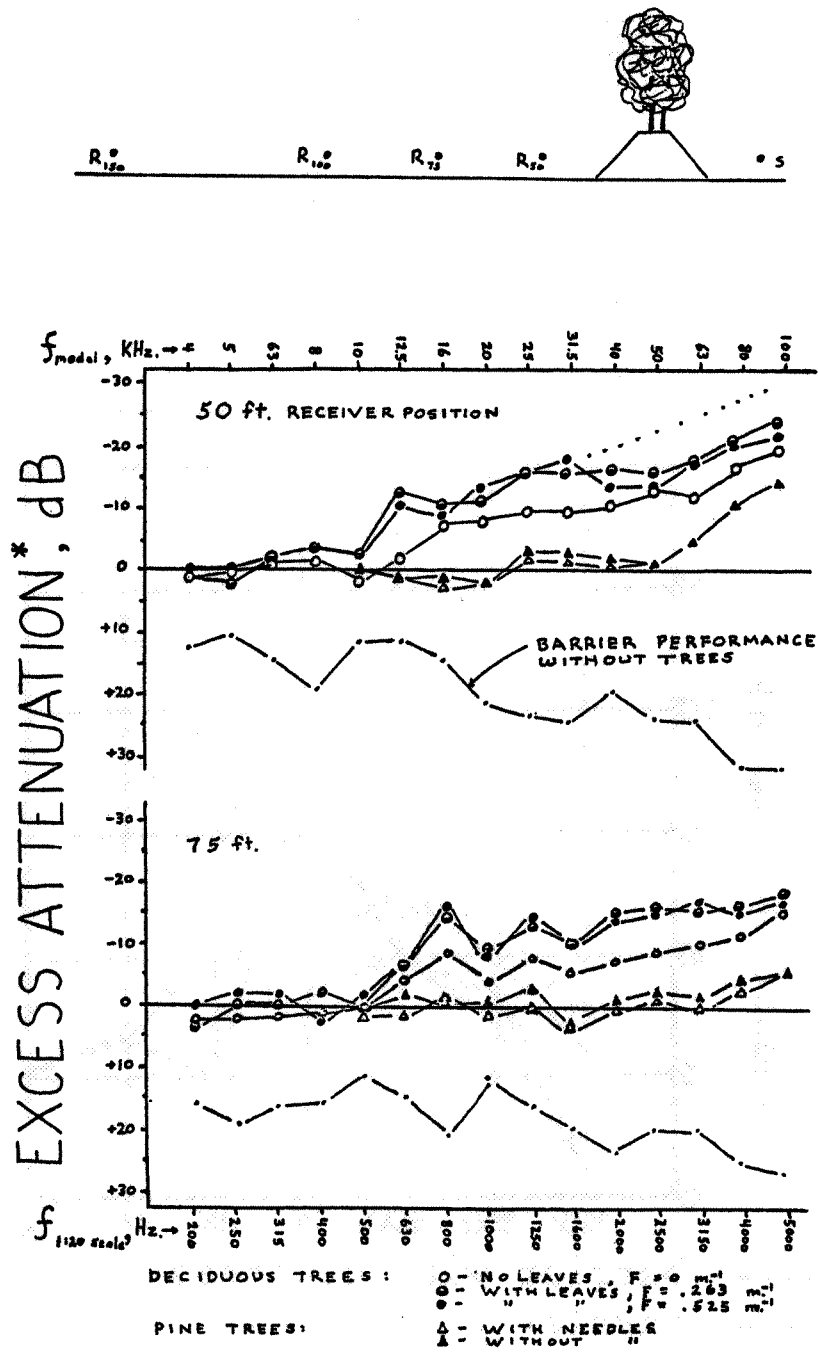


FIG. 34. EXCESS ATTENUATION FROM
DECIDUOUS AND EVERGREEN TREES
ON TOP OF A BARRIER

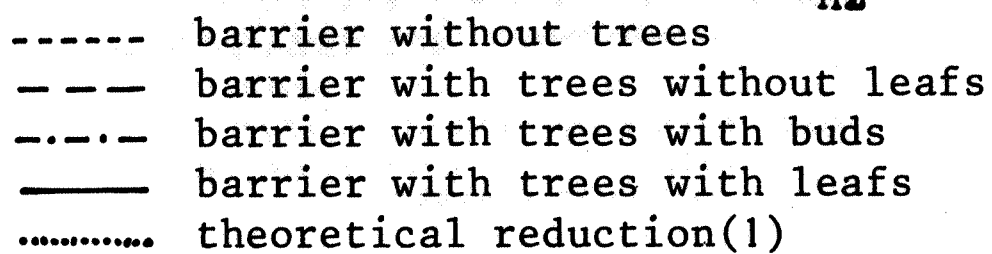
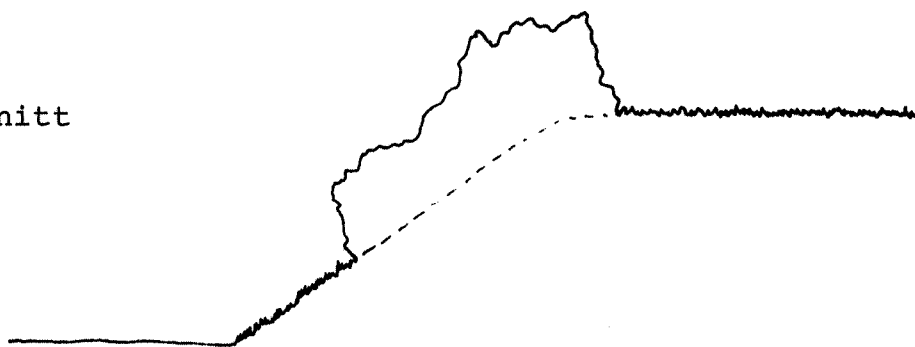


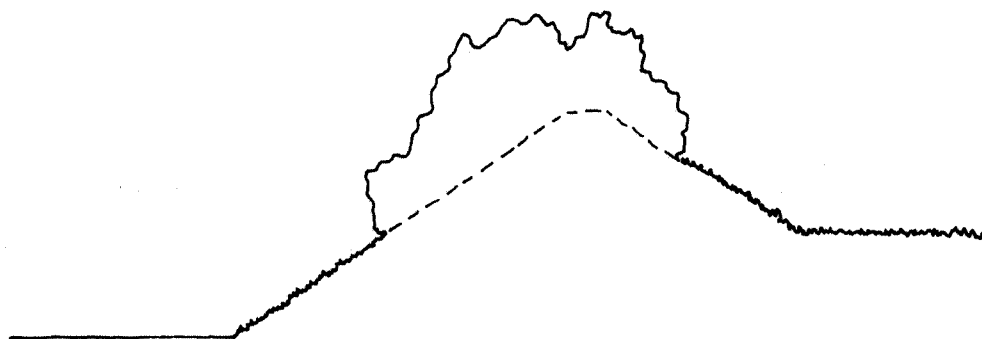
Figure 6: Results of the measurements at the dike

Beilage 3: Schallschutzanordnungen an schweizerischen
Nationalstrassen

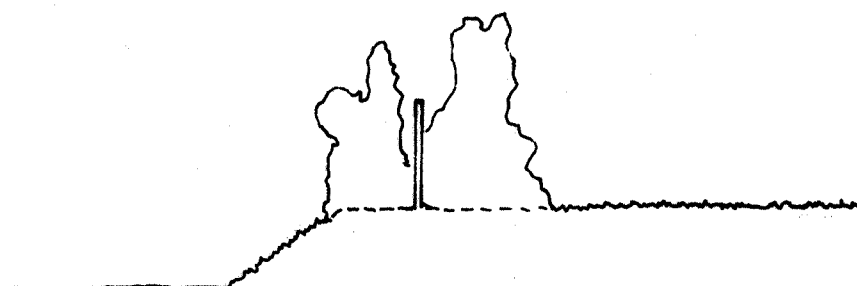
Einschnitt



Wall



Wand



Beilage 4: Schema der akustischen Messkette

Mast:



Windschirm

Mikrophon (Total 10 Mikrophone)Vorverstärker

Impedanzanpassung für das Mikrophon

Erzeugung der Polarisationsspannung 200V

Verstärkung wahlweise x1 oder x10 (Schiebeschalter)

Mastfuss:

Leitungsverstärker

Verstärker mit einstellbarer Verstärkung

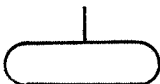
Fernsteuerung des Verstärkungsgrades in

geeichten Schritten von 10 dB über den

Bereich von 0 bis 70 dB. Anpassung an Kabel

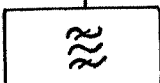
Kabel:

Messwagen:

Rangierpaneel

für wahlweise Zuordnung der übertragenen Signale

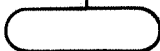
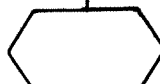
von 14 Leitungsverstärkern auf 10 Auswertekanäle

Terzfilter

10 Einheiten mit je 24 Terzfilter im Bereich

von 50 Hz bis 10 kHz, sowie A-Filter und LIN.

Jedem Ausgang ist ein eigener Effektivwertgleichrichter mit 125ms Zeitkonstante zugeordnet

Multiplexer = elektronischer Schalter für gewünschten FilterausgangAnalog-Digitalwandler = digitales Voltmeter

Auflösung 15 bit (=16384 Stufen für 0-5.12 Volt)

Digitale Auswertung

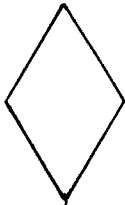
Eichwerte und Offset, Überwachung der Max und

Min-Werte, Quadrierung und Summenbildung für

die Mittelwerte pro Filterausgang

Beilage 5: Schema der Windmessung

Mast:

Ultraschallwandler

3 Paare, je ein Paar für X, Y, Z-Richtung

Resonanzfrequenz ca. 38 kHz

1 Temperaturfühler mit Sonnenschutz

Schaltverstärker

wählt nacheinander jeden der 6 Ultraschallwandler als Sender aus, und schaltet den zum gleichen Paar gehörenden Wandler als Empfänger. Damit wird jede Messstrecke vorwärts und rückwärts beschallt. Die Phasendifferenz der in beiden Richtungen für ein Wandlerpaar bestimmten Übertragungsfunktionen ist linear von der Windkomponente in dieser Richtung abhängig. Die Temperaturmessung ist wie ein Wind codiert.

Mastfuss:

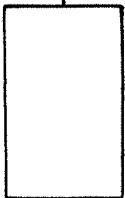
Windmesser

Auswertegerät. Steuert die Schaltverstärker und überträgt digitale Phasendifferenzen auf Leitung zum Messwagen. Abtastung pro Windrichtung 30 Mal pro Sekunde

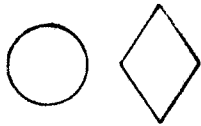
Messwagen:

Steuergerät

Sequentielle Ansteuerung der Windmesser

Auswertung

Offsetkorrekturen, Mittelwertbildung mit Zeitkonstante 150 ms zur Entstörung. Anwendung von Turbulenzkriterien. Summation der Werte zur Mittelwertbildung, Zählen der Messwerte.

Beilage 6: Gesamtanordnung

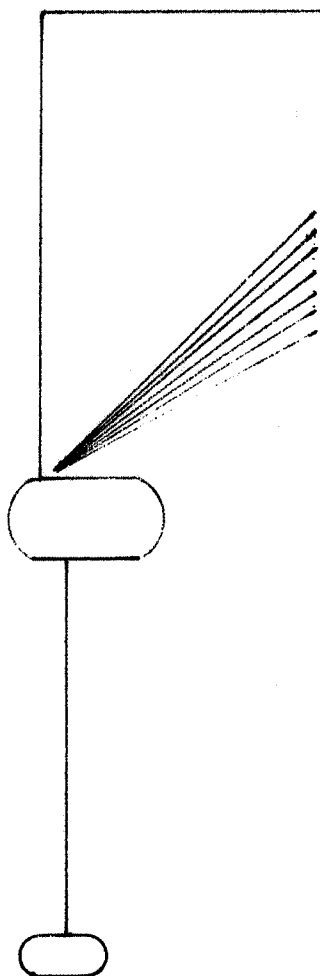
10 Mikrophone
12 Meteoeneinheiten



7 Mastkopfstücke 1m
12 Mastrohre 2.5m, zusammensetzbar
7 Mastfussstücke 1m



7 Kasten mit je 2 Leitungsverstärkern
und 2 Windmessern



1 Ringleitung = serielle Verbindung zwischen
allen Masten für Steuerung und Meteodaten

7 Sternleitungen von den Kasten zum
Messwagen. Für die Akustikdaten
Die Leitungen reichen aus für Abstände
bis ca. 300m von der Nationalstrasse

Messwagen mit

10 Terzanalysatoren von 50 Hz bis 10 kHz
12 Meteokanälen

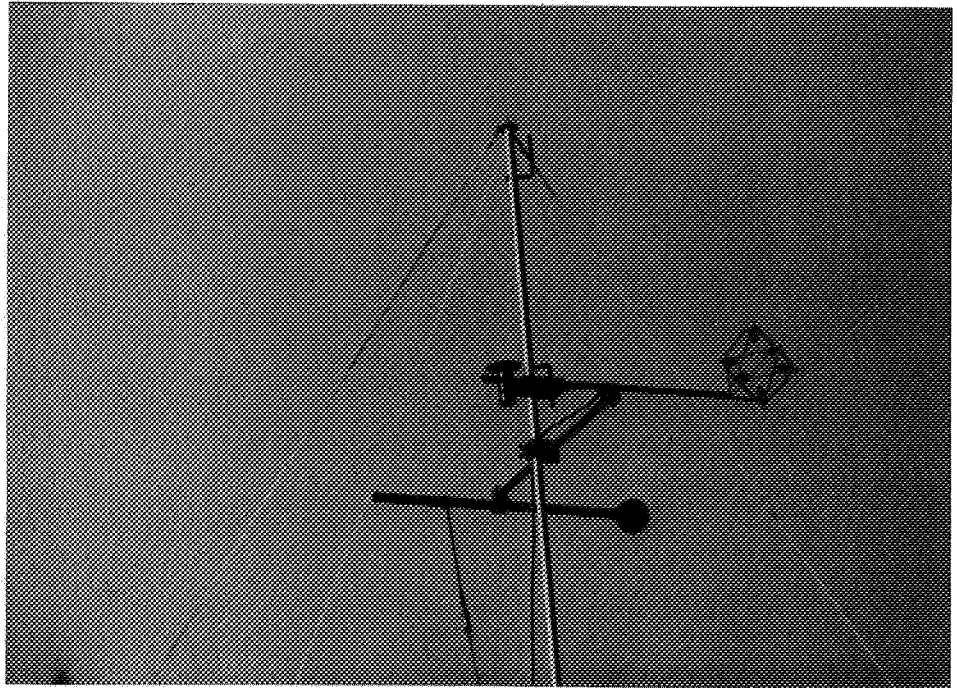
2 Videoterminals für Bedienung und
Ueberwachung

1 Drucker für Eichdaten, Warnungen, Resultate

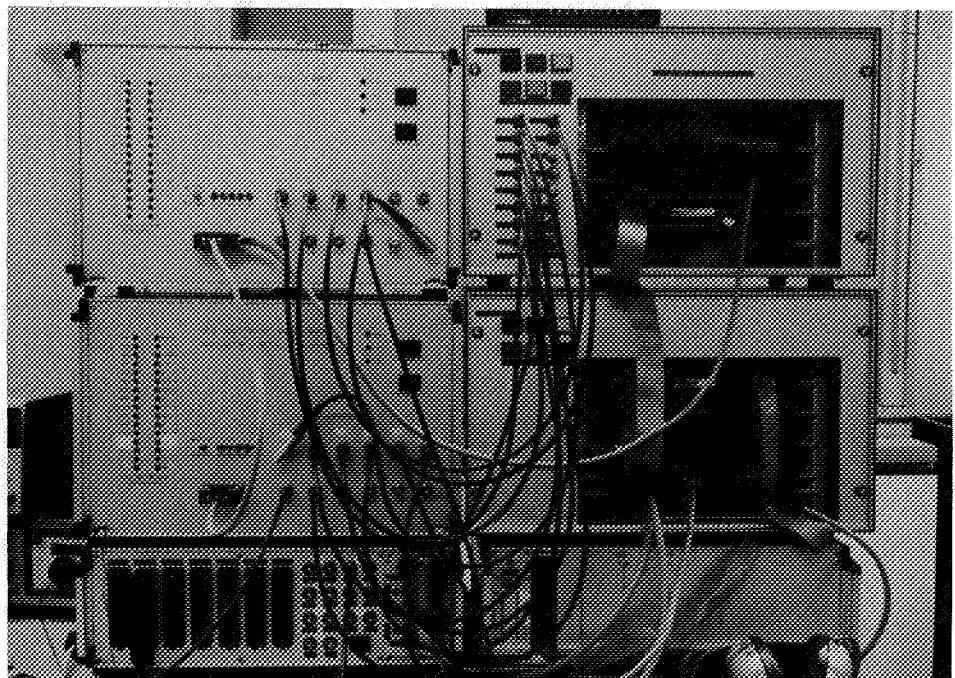
1 Kassettengerät für die digitale Speicherung
der Messresultate auf Magnetband

Benzinaggregat für Netzversorgung

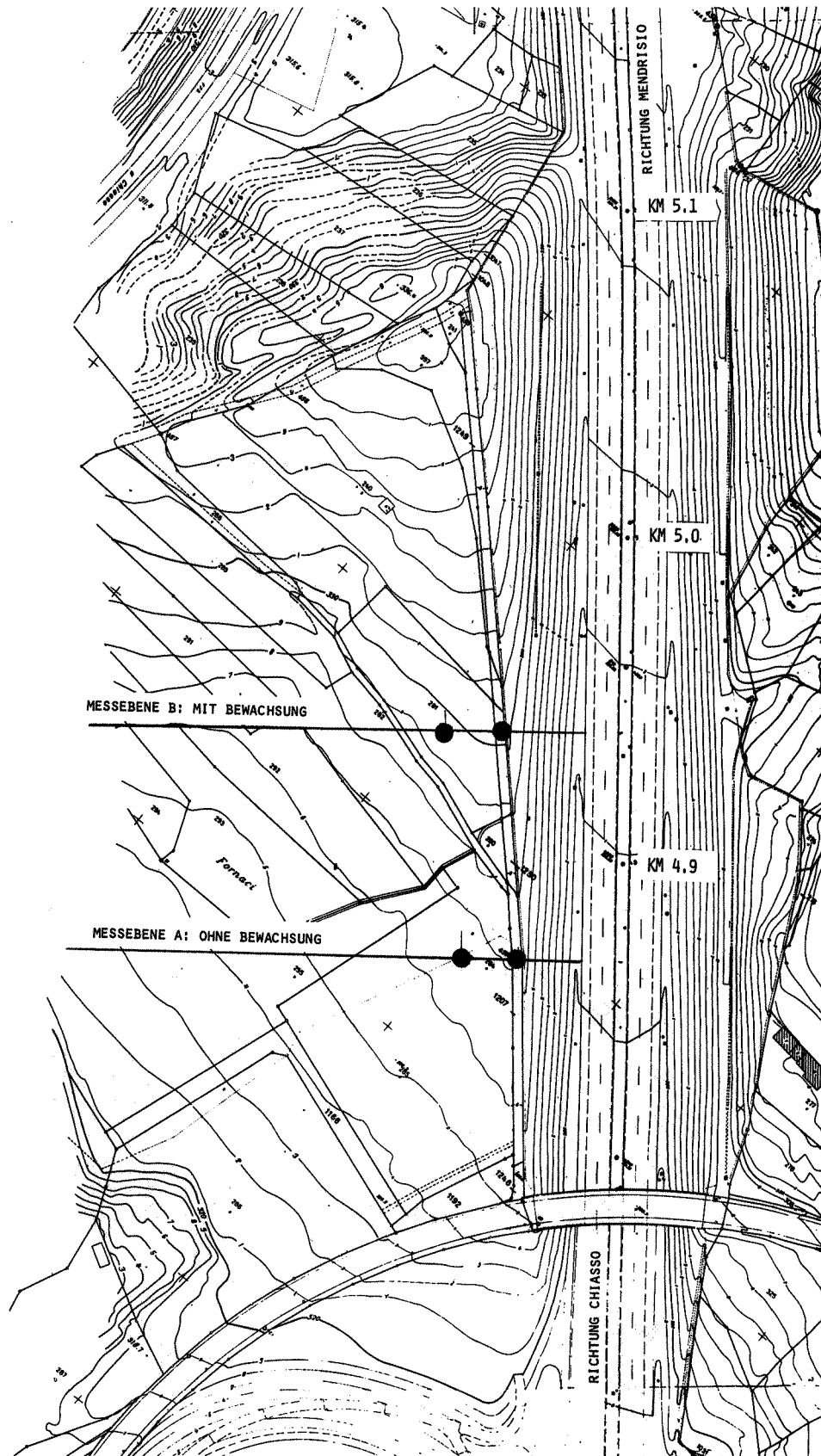
Beilage 7: Messeinheit mit Mikrophon, Windmesser und
Temperaturfühler auf dem Mast



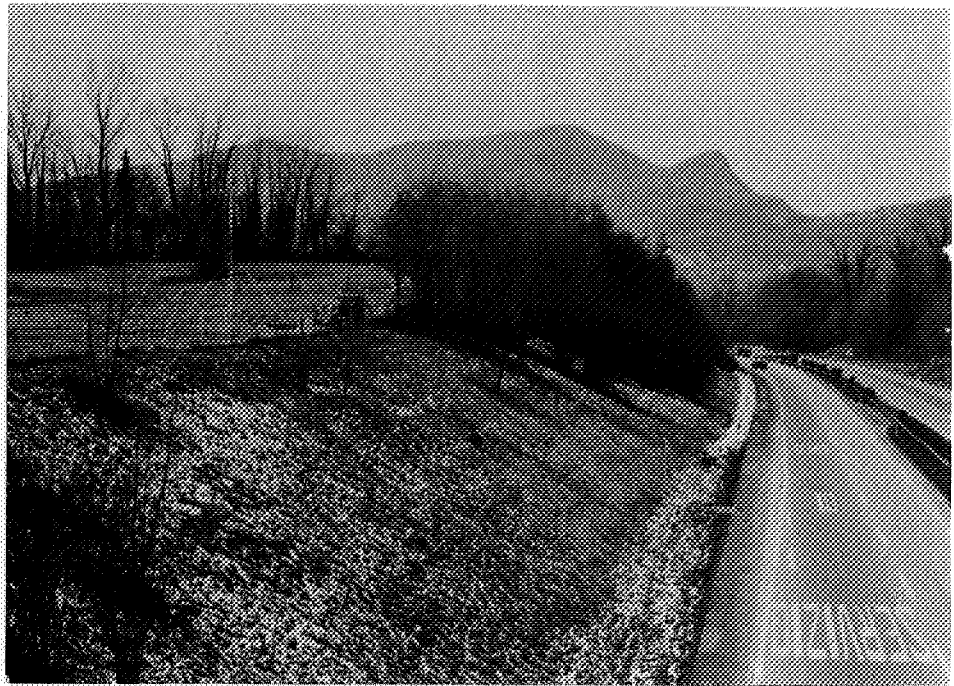
Auswertegeräte im Messwagen: links Terzfilter
rechts zwei Mikroprozessoren, unten Rangier-
paneel und Steuergerät für Windmesser.



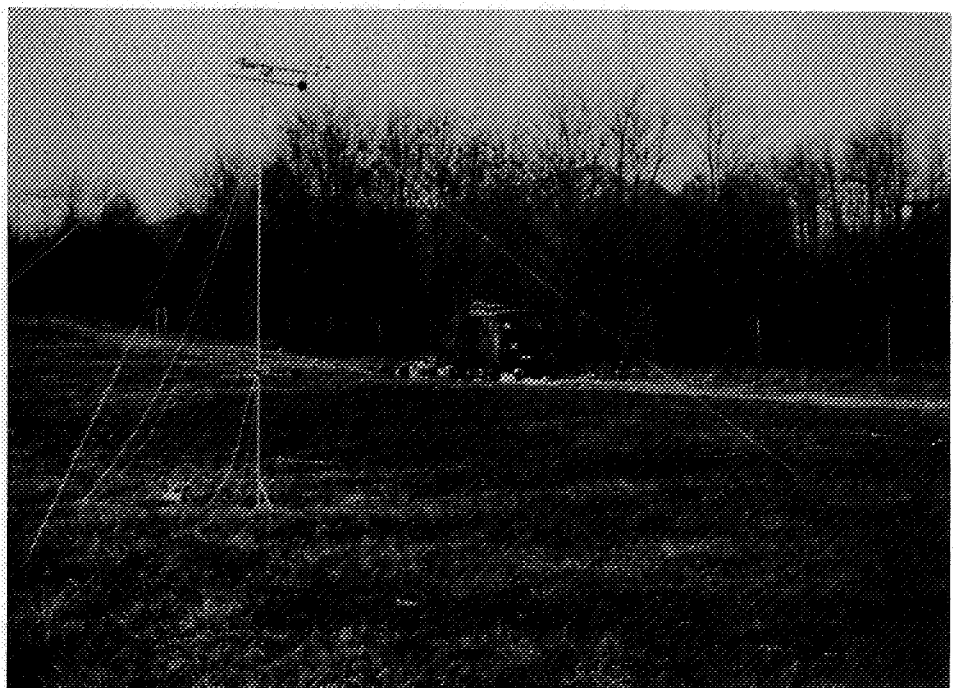
Beilage 8: Messorte bei Coldrerio an der N2



Beilage 9: Ansicht des Messgeländes von Süden mit Messorten 1 bis 3 der Messebene A (ohne Bewachsung)



Ansicht des Messgeländes von Südwesten mit den Messorten 4 und 5 der Messebene A. Sicht gegen die Bewachsung.



Beilage 10: Ausschnitt aus dem im Messwagen gedruckten Protokoll einer Messung

15: 1: 3 ENDE MESSINTERVALL 2 START 3

LEQ :

C 0	654	630	667	592	587	- 878	-1000	-1000	-1000	-1000
C 1	660	639	665	595	591	- 813	-1000	-1000	-1000	-1000
C 2	681	672	663	626	622	- 789	-1000	-1000	-1000	-1000
C 3	701	680	668	630	627	- 835	-1000	-1000	-1000	-1000
C 4	701	657	683	600	601	- 808	-1000	-1000	-1000	-1000
C 5	689	618	681	556	562	- 800	-1000	-1000	-1000	-1000
C 6	661	559	648	502	525	- 879	-1000	-1000	-1000	-1000
C 7	672	550	659	487	523	- 808	-1000	-1000	-1000	-1000
C 8	700	566	691	478	521	- 806	-1000	-1000	-1000	-1000
C 9	661	562	682	468	515	- 813	-1000	-1000	-1000	-1000
C10	661	565	653	455	503	- 810	-1000	-1000	-1000	-1000
C11	678	590	660	468	511	- 802	-1000	-1000	-1000	-1000
C12	678	622	661	482	524	- 797	-1000	-1000	-1000	-1000
C13	688	642	664	491	539	- 829	-1000	-1000	-1000	-1000
C14	682	641	648	478	533	- 823	-1000	-1000	-1000	-1000
C15	672	633	627	463	528	- 865	-1000	-1000	-1000	-1000
C16	656	613	593	438	506	- 820	-1000	-1000	-1000	-1000
C17	636	586	554	404	481	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000
C18	616	555	502	378	455	- 861	-1000	-1000	-1000	-1000
C19	595	528	458	342	417	- 863	-1000	-1000	-1000	-1000
C20	574	498	399	286	378	- 993	-1000	-1000	-1000	-1000
C21	550	464	327	184	322	- 876	-1000	-1000	-1000	-1000
C22	524	433	245	188	255	- 824	-1000	-1000	-1000	-1000
C23	498	403	261	117	234	- 836	-1000	-1000	-1000	-1000
C24	815	762	799	699	708	- 919	-1000	-1000	-1000	-1000
C25	772	719	743	577	621	- 901	-1000	-1000	-1000	-1000

MAX :

B 0	837	779	822	743	739	- 831	-1000	-1000	-1000	-1000
B 1	840	761	802	705	704	- 784	-1000	-1000	-1000	-1000
B 2	877	858	801	804	801	- 771	-1000	-1000	-1000	-1000
B 3	893	828	801	761	761	- 809	-1000	-1000	-1000	-1000
B 4	894	821	836	723	724	- 784	-1000	-1000	-1000	-1000
B 5	923	788	859	687	698	- 777	-1000	-1000	-1000	-1000
B 6	822	710	805	638	655	- 831	-1000	-1000	-1000	-1000
B 7	822	660	780	585	616	- 784	-1000	-1000	-1000	-1000
B 8	921	784	900	640	684	- 784	-1000	-1000	-1000	-1000
B 9	857	766	877	626	671	- 792	-1000	-1000	-1000	-1000
B10	840	702	784	554	617	- 784	-1000	-1000	-1000	-1000
B11	902	746	812	572	608	- 777	-1000	-1000	-1000	-1000
B12	859	751	773	542	604	- 777	-1000	-1000	-1000	-1000
B13	849	753	761	566	651	- 800	-1000	-1000	-1000	-1000
B14	884	752	761	532	609	- 792	-1000	-1000	-1000	-1000
B15	839	761	747	525	621	- 831	-1000	-1000	-1000	-1000
B16	811	718	684	501	615	- 792	-1000	-1000	-1000	-1000
B17	796	693	648	485	591	- 905	-1000	-1000	-1000	-1000
B18	787	706	609	502	577	- 819	-1000	-1000	-1000	-1000
B19	775	719	566	461	525	- 819	-1000	-1000	-1000	-1000
B20	763	697	517	395	502	- 905	-1000	-1000	-1000	-1000
B21	733	674	454	319	475	- 831	-1000	-1000	-1000	-1000
B22	715	678	370	259	416	- 792	-1000	-1000	-1000	-1000
B23	718	670	353	237	424	- 809	-1000	-1000	-1000	-1000
B24	976	871	913	813	841	- 860	-1000	-1000	-1000	-1000
B25	948	826	856	636	701	- 844	-1000	-1000	-1000	-1000

MIN :

E 0	527	532	577	499	501	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000
E 1	449	464	499	495	480	- 844	-1000	-1000	-1000	-1000
E 2	449	480	494	483	468	- 809	-1000	-1000	-1000	-1000
E 3	491	495	526	483	471	- 880	-1000	-1000	-1000	-1000
E 4	472	447	489	447	442	- 844	-1000	-1000	-1000	-1000
E 5	455	438	496	429	427	- 831	-1000	-1000	-1000	-1000
E 6	395	412	500	391	404	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000
E 7	410	400	512	360	400	- 844	-1000	-1000	-1000	-1000
E 8	383	387	519	337	396	- 831	-1000	-1000	-1000	-1000
E 9	415	401	508	338	377	- 844	-1000	-1000	-1000	-1000
E10	414	420	507	352	387	- 844	-1000	-1000	-1000	-1000
E11	450	438	507	376	408	- 831	-1000	-1000	-1000	-1000
E12	468	454	513	392	407	- 831	-1000	-1000	-1000	-1000
E13	468	467	512	400	422	- 860	-1000	-1000	-1000	-1000
E14	432	464	488	391	421	- 860	-1000	-1000	-1000	-1000
E15	440	457	462	379	410	- 940	-1000	-1000	-1000	-1000
E16	426	419	419	353	383	- 860	-1000	-1000	-1000	-1000
E17	233	364	381	287	354	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000
E18	390	342	332	246	315	- 940	-1000	-1000	-1000	-1000
E19	285	293	310	187	197	- 940	-1000	-1000	-1000	-1000
E20	238	267	216	139	148	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000
E21	318	222	213	128	142	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000
E22	286	262	214	119	133	- 860	-1000	-1000	-1000	-1000
E23	223	126	213	117	141	- 905	-1000	-1000	-1000	-1000
E24	635	619	680	613	620	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000
E25	545	556	594	491	510	-1000	-1000	-1000	-1000	-1000

WIND :

u 0	- 2	- 5	- 4	- 4	- 3	0	0	0	0	- 16
u 1	- 1	1	0	2	1	0	0	0	0	- 1
u 2	0	2	4	0	0	0	0	0	0	- 29

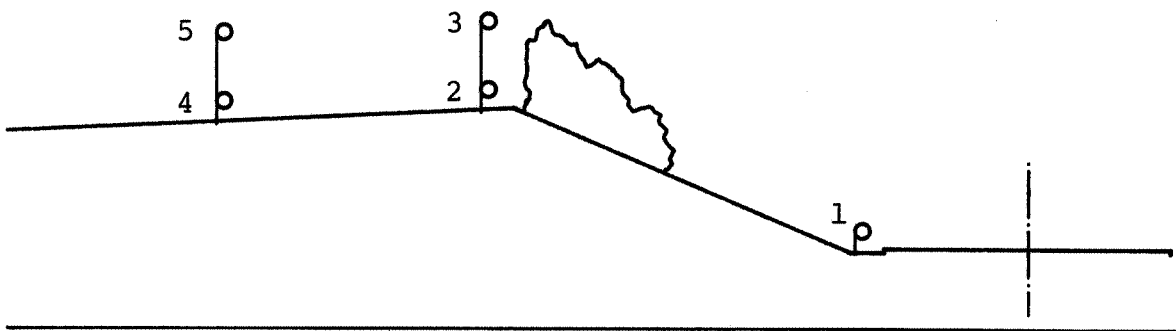
TEMP :

t	50	55	50	32	52	150	150	150	150	150 (1/10 DEG. CELS.)
---	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-------------------------

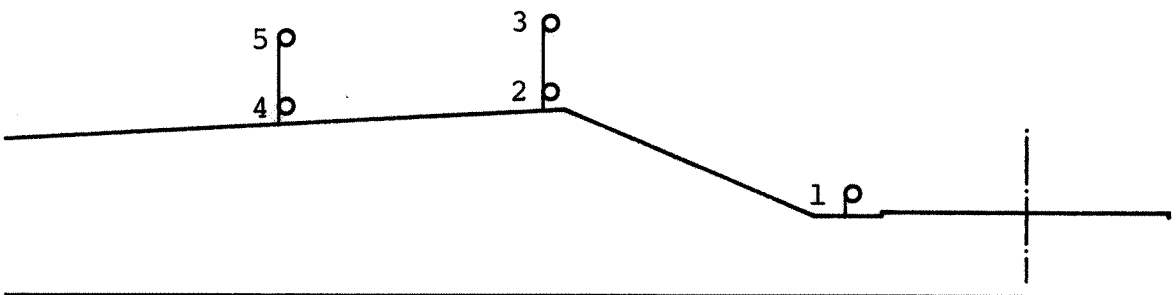
15:11: 3 PAGE MODE = 0
15:11: 3 ENDE MESSINTERVALL 3 START 4

Beilage 11: Geländeschnitte bei Coldrerio

Messebene B: Mit Bewachsung

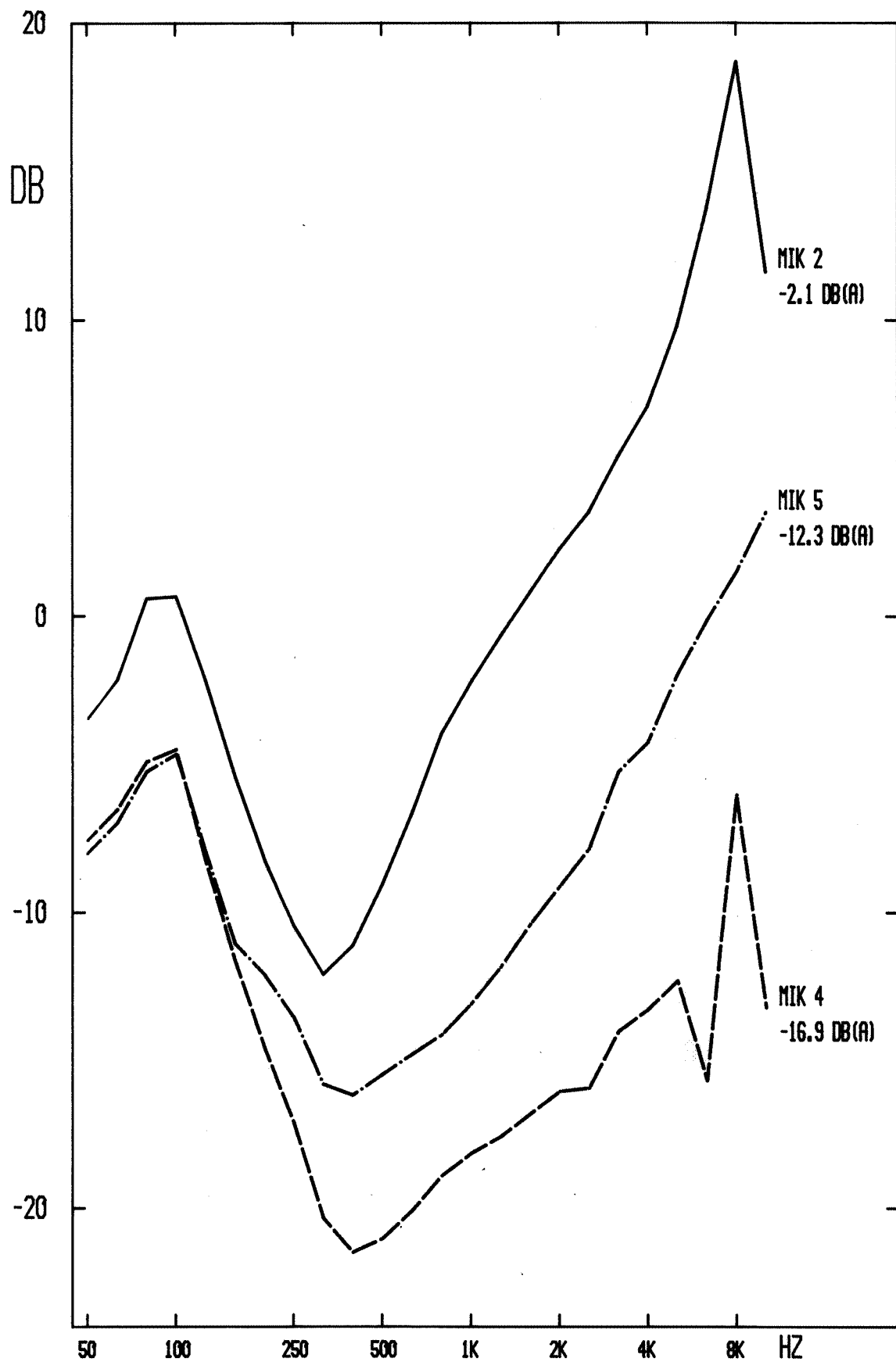


Messebene A: Ohne Bewachsung



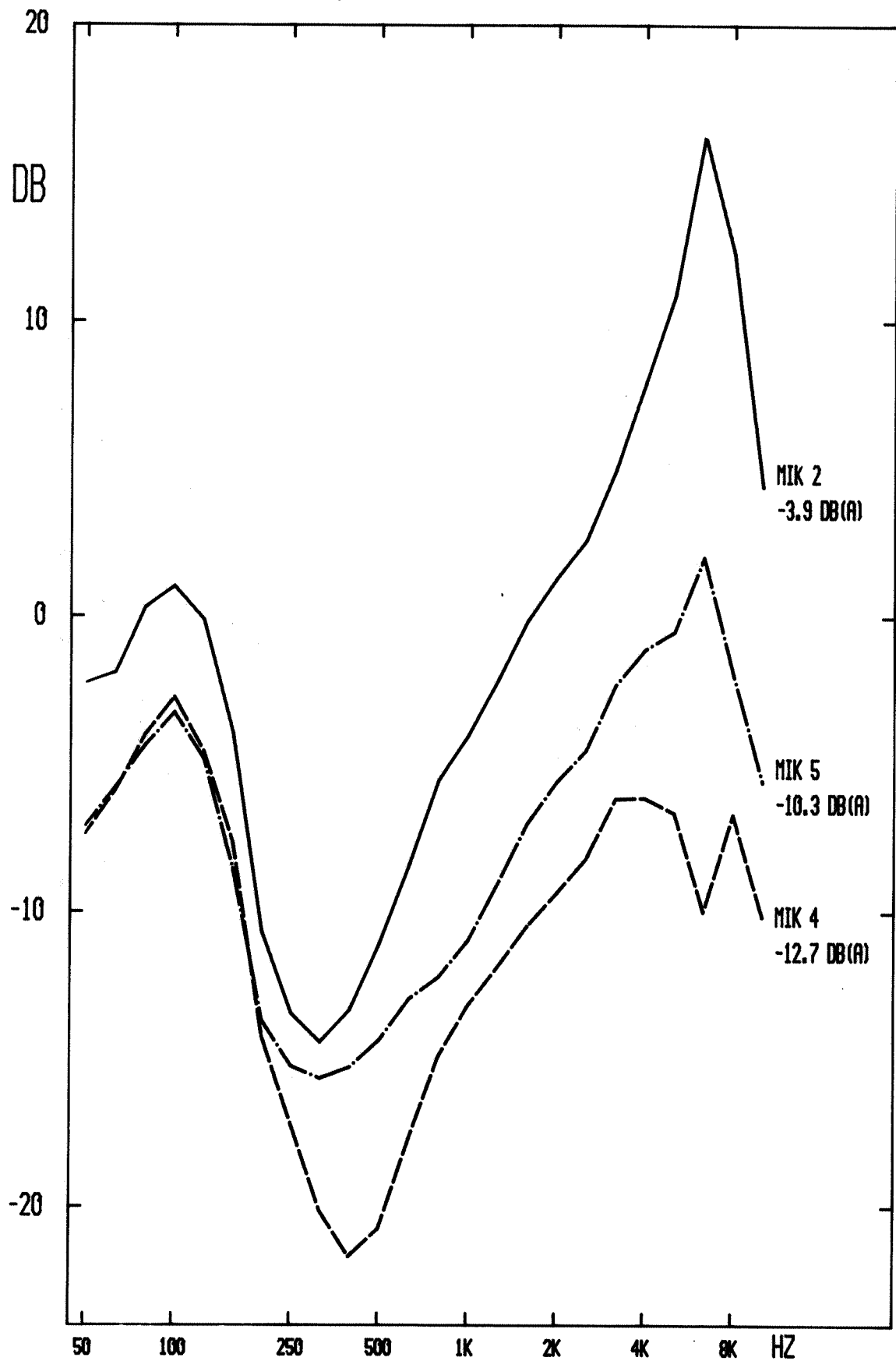
Beilage 12: Messebene A ohne Bewachung:

Pegeldifferenzen bezogen auf Mikrophon 3

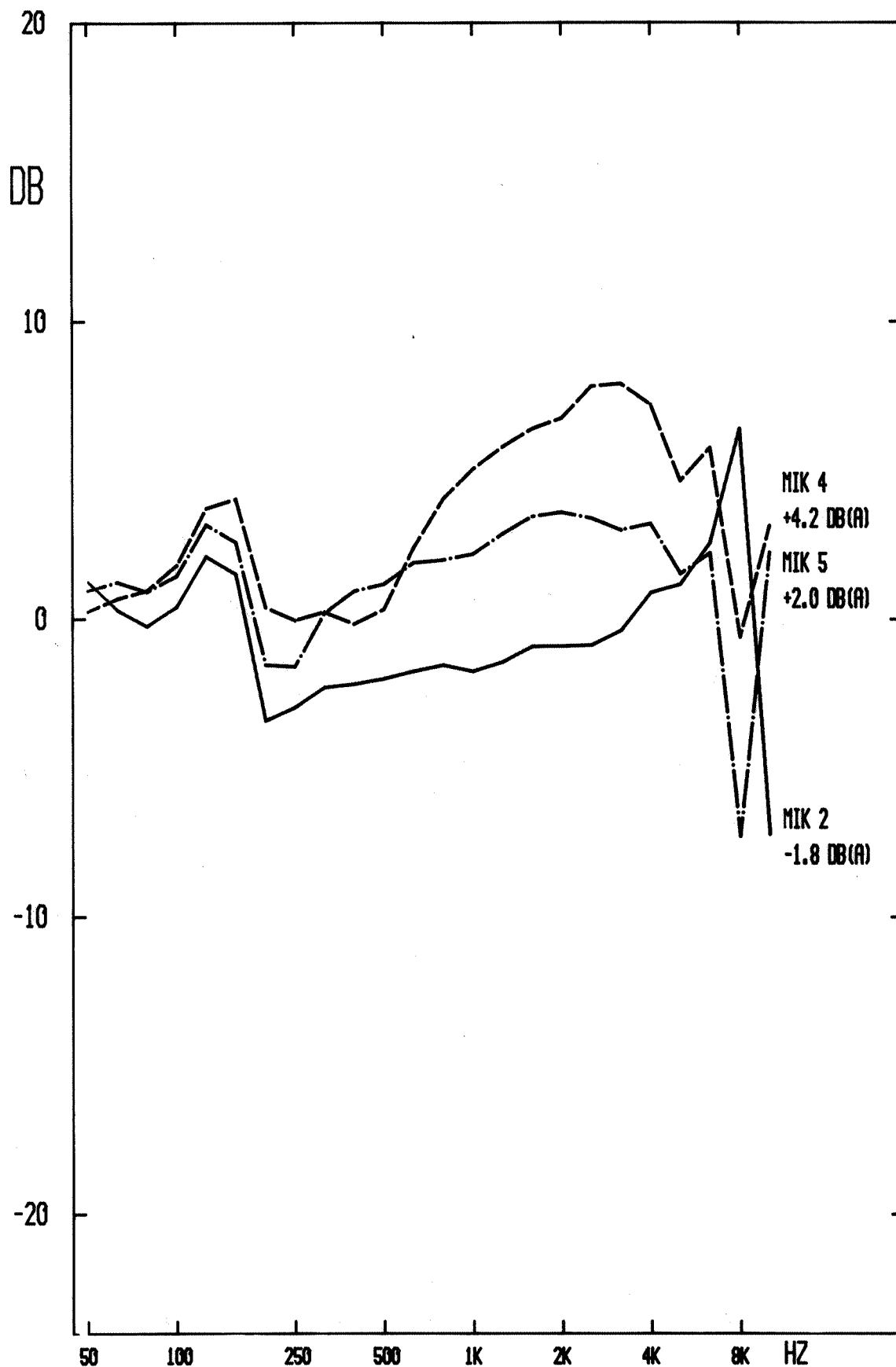


Beilage 13: Messebene B mit Bewachung

Pegeldifferenzen bezogen auf Mikrophon 3



Beilage 14: Vergleich der Messebenen mit und ohne Bewachung
Unterschied zwischen den auf Mikrophon 3 bezogenen
Differenzen. (Messwerte Beilage 13 minus Messwerte
Beilage 12)



LITERATUR

- 1) Rathe, E. J., Railway noise propagation,
J. Sound Vibration 1977(51/3) 371-388
- 2) Eidg. Kommission für die Beurteilung von Lärm-Immissions-
grenzwerten, 1. Teilbericht: Belastungsgrenzwerte für
den Strassenverkehrslärm, Bundesamt für Umweltschutz,
Bern, Juni 1979.
- 3) Lauber A. et al, Lärmschutz an Nationalstrassen,
Schriftenfolge Nr. 15, März 1974, Schweiz. Vereinigung
für Landesplanung, Bern.
- 4) Immissionsschutz an Nationalstrassen, Schlussbericht
der vom Eidg. Amt für Strassen- und Flussbau eingesetzten
Expertenkommission. Bern 1974.
- 5) Kurze U. J. Noise reduction by barriers.
J. Acoust. Soc. Amer. 1974(55)504-518
- 6) Embleton T.F. et al, Outdoor sound propagation over
ground of finite impedance.
J. Acous. Soc. Amer. 1976(59)267-277
- 7) Durnin J., Bertoni H.L. Acoustic propagation over ground
having inhomogeneous surface impedance.
J. Acous. Soc. Amer. 1981(70)852-859
- 8) Lindblad S.G. Analytical models for transmission, propa-
gation and spatial correlation of sound. Report 54 (1974)
Division of Building Technology, Lund Inst. of Technology
- 9) Pao S.P., Prediction of excess attenuation spectrum for
natural ground cover. Report WR 72-3, Wyle Laboratories 1972
- 10) Leschnik W., Zur Schallausbreitung in bebauten und be-
pflanzten Gebieten. Acustica 1980(44)14-22
- 11) Moerkerken A., Meteorological factors affecting the
transmission of sound. Report VL-DR-21-04 Interdepartmen-
tale Commissie Geluidhinder, TNO Delft, 1977

- 12) Larsson C., et al., Effects of meteorological parameters on the propagation of noise from a traffic route. Report 54, 1979, Uppsala University.
- 13) Delany M.E., Sound propagation in the atmosphere, a historical review. Proceedings of the Institute of Acoustics, Medal Lectures, London 1977
- 14) Jonasson H.G. Sound reduction by barriers on the ground. J. Sound Vib 1972(22)113-126
- 15) Isei T. et al, Noise reduction by barriers on finite impedance ground. J. Acous. Soc. Amer. 1980(67)46-58
- 16) Daumas A., Etude de la diffraction par un écran mince disposé sur le sol. Acustica 1978(40)213-222
- 17) De Jong R., Stusnick E., Scale model studies of the effects of wind on acoustic barrier performance. Noise Contr. Engng 1976(6)101-109
- 18) Medwin H., Shadowing by finite noise barriers J. Acous. Soc. Amer. 1981(69)1060-1064
- 19) Bolen L.N., Bass H.E., Effects of ground cover on the propagation of sound through the atmosphere J. Acous. Soc. Amer. 1981(69)950-954
- 20) Blair C., Effects of trees on noise barrier performance MSC Thesis, MIT Cambridge Mass 1976
- 21) Schuller W.M., Zeeuw J.H., Acoustic effect of trees on barriers. Internoise 1981, Proceedings, p. 253-256