

ICOM – CONSTRUCTION MÉTALLIQUE
Institut de Statique et Structures
Département de Génie Civil
ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Rapport de recherche

ICOM **376**

ERHEBUNG VON DATEN AN STRASSENBRÜCKEN ZUR FESTLEGUNG VON AKTUALISIERTEN LASTFAKTOREN

Forschungsauftrag 86/96 auf Antrag der Arbeitsgruppe
für Brückenforschung

André BANZ
Simon F. BAILEY

August 1998

BUNDESAMT FÜR STRASSEN

Forschungsauftrag 86/96 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung

**ERHEBUNG VON DATEN AN STRASSENBRÜCKEN ZUR
FESTLEGUNG VON AKTUALISIERTEN LASTFAKTOREN**

***RELEVÉ DE DONNÉES SUR DES PONTS ROUTES POUR
LA DÉTERMINATION DES FACTEURS DE CHARGE ACTUALISÉS***

ICOM - Construction métallique, EPFL, Lausanne

André Banz, ing. civil dipl. EPFZ/SIA

Simon F. Bailey, Dr. sc. techn., ing. civil BSc/SIA

Publikation ICOM 376

August 1998

VORWORT

Die Ende der achtziger Jahre eingeführten Schweizer Tragwerksnormen (SIA 160, SIA 161, SIA 162) basieren auf einem einheitlichen Nachweiskonzept. Es wird klar zwischen Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit unterschieden. Die Lastmodelle für Verkehrslasten basieren auf Verkehrsmessungen und wurden mit probabilistischen Methoden festgelegt.

Diese Tragwerksnormen sind für die Bemessung von Tragwerken bestimmt; der Nachweis bestehender Tragwerke ist nicht explizit geregelt. Aus diesem Grunde wurde 1994 die Richtlinie SIA 462 zur Beurteilung bestehender Tragwerke eingeführt. Diese Richtlinie enthält Grundsätze für das Vorgehen und numerische Werte für den Hochbau; für den Brückenbau fehlen aber die notwendigen Angaben wie beispielsweise Lastmodelle und Lastfaktoren.

Das Bundesamt für Strassenbau beauftragte das Institut für Stahlbau (ICOM) der ETH Lausanne mit der Ermittlung von aktualisierten Lastmodellen für die Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Strassenbrücken (ASTRA 90/90, VSS Bericht Nr. 515). Das Nachweiskonzept der Tragwerksbemessung bleibt bestehen, jedoch können die Lastmodelle dem Verkehr angepasst werden.

Aus der weiteren Zusammenarbeit des Bundesamtes für Strassenbau und des ICOM ergab sich die Erkenntnis, dass bei bestehenden Brücken auch die Eigen- und Auflasten aufgrund von Messungen am Bauwerk genauer bestimmt werden können, wodurch eine gewisse Abminderung der entsprechenden Lastfaktoren gerechtfertigt ist (ASTRA 86/94, VSS Bericht Nr. 530). Anhand von probabilistischen Methoden wurden aktualisierte Lastfaktoren ermittelt, bei deren Anwendung die bei der Bemessung normenmässig implizit gegebene Tragsicherheit (β - Wert) nicht verändert wird.

Nachdem die theoretischen Grundlagen für den Nachweis der Tragsicherheit bestehender Tragwerke bereitgestellt sind, geht es in der vorliegenden Forschungsarbeit um den Vorgang der Datenerhebung an Strassenbrücken. Es hat sich gezeigt, dass durch das Aktualisieren von Daten an Strassenbrücken aktualisierte Lastfaktoren sowohl für Eigen- wie Auflasten von ungefähr 1.15 möglich sind. Allerdings kann dieses Potential beim heutigen Stand der Messtechnik noch nicht ausgeschöpft werden.

Der nächste Schritt wäre die Beantwortung der Frage, ob bei bestehenden Tragwerken nicht eine kleinere Tragsicherheit verantwortbar ist. Dazu müssten auch Kosten-Nutzen-Analysen angestellt werden, insbesondere im Hinblick auf die zunehmenden Aufwendungen für Unterhalt und Verstärkungen.

Lausanne, August 1998

Prof. Dr. Manfred A. Hirt

ZUSAMMENFASSUNG

ist Teil der Studien, die am Institut für Stahlbau (ICOM) der ETH-Lausanne auf dem Gebiet der Beurteilung bestehender Strassenbrücken durchgeführt werden. Gegenstand der Arbeit ist die Erhebung von Daten an Strassenbrücken. Die folgenden beiden Punkte werden untersucht:

- Der Vorgang der Datenerhebung, insbesondere die Art, der Umfang und die Positionen der durchzuführenden Messungen am Bauwerk.
- Die statistische Auswertung der erhobenen Messdaten zur Ermittlung der **aktualisierten Kennwerte der Eigenlasten** G_{akt} und **Auflasten** q_{akt} und der zugehörigen **aktualisierten Lastfaktoren** $\gamma_{G,akt}$ und Ψ_{akt} .

In den Bemessungsnormen sind die **Eigenlasten**, sowohl der **lastabtragenden** wie auch der **nicht-lastabtragenden** Strukturelemente eines Tragwerks deterministisch durch **charakteristische Kennwerte** und **Lastfaktoren** repräsentiert. In dieser Arbeit wird an einem Modell gezeigt, dass mit Hilfe von Erhebungen am Bauwerk eine probabilistische Erfassung der Eigenlasten möglich ist. Die Eigenlasten werden dabei durch den aktualisierten Kennwert und einen Variationskoeffizienten dargestellt. Letzterer kann zur Ermittlung von aktualisierten Lastfaktoren herangezogen werden. Die Grundlagen für den Nachweis der Tragsicherheit anhand von aktualisierten Daten sind damit bereitgestellt.

Darüber hinaus wird ein Konzept für die praktische Durchführung der Erhebungen an Strassenbrücken entworfen und für jedes Strukturelement der Umfang der Erhebung angegeben.

Eine Fallstudie an der abgebrochenen Überführung der Horwerstrasse in Kriens hat Aufschluss hinsichtlich der Durchführbarkeit der Aktualisierung von permanenten Lasten gegeben. Die Brückenplatten- und Belagsdicken konnten vor dem Abbruch der Brücke anhand des Impact-Echo Verfahrens gemessen werden. Nach dem Abbruch wurden diese Abmessungen anhand des Messbandes überprüft und Materialdichten an entnommenen Kernbohrungen ermittelt. Der aktualisierte Kennwert der Auflast q_{akt} lag weit über dem Nominalwert (+57%), derjenige der Eigenlast G_{akt} stimmte gut mit dem Nominalwert überein (+4%). Die verhältnismässig grosse Variation der systematischen Messabweichung beim Impact-Echo Verfahren (11% beim Belag und 6% bei Betonelementen) schränkt die Möglichkeit zur Aktualisierung von Lastfaktoren erheblich ein. Die Messungen anhand des Messbandes hingegen führten zu aktualisierten Lastfaktoren von ungefähr 1.15, sowohl für Eigen- wie auch Auflasten.

RÉSUMÉ

La présente recherche fait partie des travaux effectués par l'ICOM – Construction Métallique de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne dans le domaine de l'évaluation des ponts routes existants. L'objet de cette recherche est le relevé de données actualisées sur des ponts routes existants. Les points suivants sont traités:

- Les méthodes de mesure; en particulier le type de mesures à effectuer, l'étendue de ces dernières et leurs positions.
- Le dépouillement statistique des relevés afin de déterminer **les valeurs caractéristiques actualisées des poids propres des éléments porteurs G_{akt} et non-porteurs q_{akt}** , ainsi que les **facteurs de charge actualisés** correspondants $\gamma_{G,akt}$ et Ψ_{akt} .

Dans les normes de dimensionnement, le **poids propre des éléments porteurs** ainsi que celui **des éléments non-porteurs** d'une structure sont représentés par des **valeurs caractéristiques**, pondérées par des **facteurs de charge** déterministes. Les travaux de cette recherche ont abouti au développement d'un modèle permettant la description probabiliste du poids propre en le représentant par une valeur caractéristique actualisée et par son coefficient de variation. Ce dernier permet en outre de déterminer un facteur de charge actualisé. Les bases nécessaires à la vérification de la sécurité structurale d'un ouvrage existant à l'aide des données actualisées sont ainsi définies.

De plus, une procédure pour le relevé de données sur un ouvrage existant a été établie et pour chaque élément de la structure l'étendue nécessaire des relevés a été trouvée.

Une étude de cas effectuée lors du démontage du viaduc Horwerstrasse à Kriens a permis d'obtenir d'information important sur la faisabilité d'une actualisation des charges permanentes. Les épaisseurs des éléments en béton et du revêtement ont pu être mesurées avant le démontage à l'aide de la méthode Impact-Echo et validées après le démontage en utilisant une chevillère. Le recours à des carottes a été nécessaire pour déterminer les densités des matériaux. La valeur caractéristique actualisée du poids propre des éléments porteurs G_{akt} est proche de la valeur donnée par la norme (+4%), celle du poids propre des éléments non-porteurs q_{akt} est par contre considérablement plus grande que la valeur nominale (+57%). La relativement grande variation due à l'erreur systématique engendrée par le procédé de mesure Impact-Echo (pour le revêtement: 11% et pour les éléments de béton: 6%) a sensiblement restreint les possibilités de déterminer des facteurs de charge actualisés. Par contre, les mesures faites avec la chevillère ont conduit à des facteurs de charge actualisés d'une valeur de 1.15 environ pour le poids propre des éléments porteurs et non-porteurs.

SUMMARY

This report presents the results of part of ongoing research in the field of the evaluation of existing road bridges at the Institute of Steel Construction (ICOM) at the Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne (EPFL). The report covers the collection of data on road bridges, with a view to investigating:

- Measurement methods and determining the number and position of measurement points on an element of a structure.
- The statistical evaluation of data to define the **updated representative values of the self-weight of the load-bearing structure** G_{akt} and the **self-weight of non-structural elements** q_{akt} as well as the corresponding **updated partial factors** $\gamma_{G,akt}$ and Ψ_{akt} .

In design codes, the **self-weight of load-bearing and non-structural** elements are represented by deterministic **representative values and partial factors**. The approach presented in this report enables the use of a probabilistic model of self weight based on site specific data. The self-weight is thus represented by an updated representative value and a coefficient of variation, which can be used to derive an updated partial factor. In this way, the structural safety of existing road bridges can be verified using site specific data.

This report also describes a concept for the process of data collection on road bridges together with guidance for deciding how much data to collect for each structural element.

A case study based on the recently dismantled Horwerstrasse road bridge in Kriens, has provided valuable information on the feasibility of updating models of permanent loads. Measurements of deck and road surfacing thickness were made using the Impact-Echo method prior to dismantling the bridge, after which the measurements were checked using a tape measure. Material densities were found by performing measurements on cores. The updated representative value for the self-weight of the road surfacing q_{akt} was found to be considerably higher than the nominal value (+57%), whereas the self-weight of the load-bearing structure G_{akt} was close to the nominal value (+4%). It was found that the relatively high variation due to the systematic measurement error of the Impact-Echo method (11% for road surfacing and 6% for concrete elements) significantly limited the potential for updating partial load factors, but that the variation of measurements made by hand would justify reducing load factors to about 1.15 for both road surfacing and self weight.

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|--|-----------|
| BEZEICHNUNGEN..... | 3 |
| 1. EINLEITUNG..... | 5 |
| 1.1 MOTIVATION | 5 |
| 1.2 ZIELSETZUNG | 5 |
| 1.3 VORGEHEN..... | 6 |
| 1.4 VORHANDENE RICHTLINIEN..... | 6 |
| 1.5 AUFBAU DES BERICHTES | 8 |
| 2. BASISVARIABLEN..... | 9 |
| 2.1 EINLEITUNG..... | 9 |
| 2.2 VARIATIONEN..... | 9 |
| 3. STATISTISCHE AUSWERTUNG | 10 |
| 3.1 EINLEITUNG..... | 10 |
| 3.2 MODELL ZUR ERMITTLUNG DER VARIATION IN DER BASISVARIABLE | 10 |
| 3.3 RECHENREGELN | 12 |
| 3.4 TYPISCHE WERTE FÜR DIE VARIATIONEN VON EIGEN- UND AUFLAST..... | 13 |
| 4. DURCHFÜHRUNG VON MESSUNGEN AN STRASSENBRÜCKEN..... | 14 |
| 4.1 EINLEITUNG | 14 |
| 4.2 BASISVARIABLEN..... | 14 |
| 4.3 MESSGRÖSSEN..... | 15 |
| 4.4 STICHPROBENUMFANG | 16 |
| 4.5 ANORDNUNG DER MESSUNGEN | 17 |
| 4.6 MESSVERFAHREN | 17 |
| 4.7 KONZEPT FÜR DIE DURCHFÜHRUNG VON ERHEBUNGEN..... | 20 |
| 5. FALLSTUDIE..... | 22 |
| 5.1 EINLEITUNG..... | 22 |
| 5.2 ZUSAMMENFASSUNG DER RESULTATE | 22 |
| 5.3 BEURTEILUNG | 25 |
| 6. ZUSAMMENFASSUNG DER WICHTIGSTEN RESULTATE..... | 29 |
| 6.1 EINLEITUNG..... | 29 |
| 6.2 STATISTISCHE AUSWERTUNG | 29 |
| 6.3 PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG | 29 |
| 6.4 FALLSTUDIE..... | 30 |
| 7. ZUKÜNFTIGE ARBEITEN..... | 31 |
| LITERATURVERZEICHNIS..... | 35 |
| ANHANG A: STATISTISCHE TABELLEN | A1 |
| ANHANG B: FALLSTUDIE..... | A5 |

BEZEICHNUNGEN

LATEINISCHE GROSSBUCHSTABEN

| | |
|--------------|--|
| A | Fläche |
| C_i | Konstante |
| C_{GT} | Korrekturfaktor nach Gurland und Tripathi (verhindern das Unterschätzen von s_X) |
| G | Eigenlast |
| G_{akt} | aktualisierter Kennwert der Eigenlast |
| G_m | Mittelwert der Eigenlast |
| Q_{akt} | aktualisierter Kennwert der Leiteinwirkung |
| S | Beanspruchung |
| S_d | Bemessungswert der Beanspruchung |
| V | Variation (Variationskoeffizient) |
| V_G | Variationskoeffizient der Eigenlast |
| V_q | Variationskoeffizient der Auflast |
| V_{nat} | natürliche Zufallsstreuung |
| $V_{v,syst}$ | Variation der systematischen Messabweichung |
| V_{Mess} | Variation der zufälligen Messabweichung |
| V_{mod} | Modellunschärfe |
| V | Volumen |
| X | Messgrösse, Zufallsvariable |
| Y | Funktion, Basisvariable, Zielgrösse bestehend aus den Messgrössen X_1, X_2, \dots, X_n |

LATEINISCHE KLEINBUCHSTABEN

| | |
|-----------|---|
| b | Breite |
| c | Beton, partielle Ableitung |
| f | Funktion |
| $f_X(x)$ | Wahrscheinlichkeitsdichte der Zufallsvariable X |
| g | Erdbeschleunigung ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) |
| h | Höhe, Bauteildicke |
| q | Auflast |
| q_{akt} | aktualisierter Kennwert der Auflast |
| q_m | Mittelwert der Auflast |
| l | Länge |
| m | Masse |
| m_X | empirischer Mittelwert der Messgrösse X (aus den Messwerten ermittelt) |
| s_X | empirische Standardabweichung der Messgrösse X (aus den Messwerten ermittelt) |
| t | Zeit |
| v | Schallausbreitungsgeschwindigkeit |
| x | Variable, Messung |
| x_{nom} | Nominalwert, Nennwert |
| x_r | Charakteristischer Kennwert |

GRIECHISCHE BUCHSTABEN

| | |
|------------------|---|
| γ | Lastfaktor, Raumlast |
| $\gamma_{G,akt}$ | aktualisierter Lastfaktor für die Eigenlast |
| μ | Erwartungswert, bekannter Mittelwert, wahrer Wert |
| ν | Bias (auch Schiefe genannt) |
| ν_{syst} | systematische Messabweichung |
| ρ | Korrelationskoeffizient, Dichte |
| σ | bekannte Standardabweichung |
| ψ | Lastfaktor für Auflast |
| ψ_{akt} | aktualisierter Lastfaktor für die Auflast |

INDIZES

| | |
|--------|-------------------------------------|
| a | Stahl |
| akt | aktualisiert |
| b | Breite |
| d | Bemessung |
| g | Erdbeschleunigung |
| G | Eigenlast |
| GT | Gurland und Tripathi |
| h | Höhe |
| i, j | Laufvariablen |
| q | Auflast |
| l | Länge |
| m | Mittelwert |
| Mess | Messung |
| mod | Modell |
| n | Anzahl Messungen, Stichprobenumfang |
| nat | natürlich |
| nom | Nominalwert, Nennwert |
| r | Kennwert |
| syst | systematisch |
| Schätz | Schätzung |
| X | Zufallsvariable |
| ν | Bias (auch Schiefe genannt) |

1. EINLEITUNG

1.1 MOTIVATION

Anzahl und Alter der bestehenden Tragwerke im Schweizerischen Strassennetz erhöhen sich stetig, was ein wachsendes Interesse der Eigentümer an der Beurteilung bestehender Strassenbrücken hervorruft. Das Bundesamt für Strassenbau (ASTRA), heute Bundesamt für Strassen (ASTRA), betraut das Institut für Stahlbau (ICOM) der ETH Lausanne seit Ende der achtziger Jahre mit Forschungsmandaten auf dem Gebiet der Beurteilung bestehender Strassenbrücken. Im Laufe der fruchtbaren Zusammenarbeit wurden bereits mehrere Forschungsaufträge abgeschlossen.

Der Forschungsauftrag 90/90 beschäftigte sich mit der Bestimmung von Kriterien für die Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Strassenbrücken, sowie der Festlegung von aktualisierten Lastmodellen für den Strassenverkehr [1]. Daran anschliessend wurde im Forschungsauftrag 86/94 mit Hilfe einer probabilistischen Analyse ein Modell zur Ermittlung von aktualisierten Lastfaktoren $\gamma_{G,akt}$ erarbeitet [2].

Der Gegenstand der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Erhebung von Daten an Strassenbrücken zur Ermittlung von aktualisierten Kennwerten der Eigenlasten G_{akt} und Auflasten q_{akt} , sowie der zugehörigen Lastfaktoren $\gamma_{G,akt}$ und ψ_{akt} .

1.2 ZIELSETZUNG

Die Tragsicherheit eines Bauwerkes ist das Produkt von Einflussgrössen, die teilweise nur mit beschränkter Genauigkeit erfasst werden können. Diesem Umstand trägt das der Tragwerksbemessung des SIA [3,4,5] zugrundeliegende Nachweiskonzept durch die Einführung von Teilsicherheitsfaktoren Rechnung. Mit Hilfe des Widerstandsbeiwertes auf der Widerstandsseite und der Lastfaktoren auf der Seite der Beanspruchung wird unter anderem die Ungenauigkeit in den Querschnittsabmessungen, die Variabilität von Werkstoffeigenschaften und die statistische Streuung der Grösse von Einwirkungen berücksichtigt.

Für die Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Brückenbauwerke können diese Variationen durch das Sammeln von Daten am bestehenden Bauwerk - zum Beispiel durch das Nachmessen von Querschnittsabmessungen oder das Testen von Werkstoffeigenschaften - verkleinert werden. Es dürfen anstelle der Lastfaktoren der Bemessungsnormen [3] die aktualisierten Lastfaktoren [2] und anstelle der normativen Kennwerte die aktualisierten Kennwerte der Einwirkungen für den Nachweis der Tragsicherheit verwendet werden.

Das allgemeine Vorgehen beim Sammeln der Daten am Bauwerk wurde bisher noch nicht wissenschaftlich untersucht. Im Bestreben die fehlenden Grundlagen bereitzustellen, werden folgende Hauptziele verfolgt:

1. Entwerfen eines Konzeptes für den Vorgang der Datenerhebung, wobei Art, Umfang und Positionen der durchzuführenden Messungen am Bauwerk festzulegen sind.
2. Bereitstellen der Grundlagen für die statistische Auswertung der erhobenen Messdaten zur Ermittlung von aktualisierten Kennwerten der Eigenlasten G_{akt} und Auflasten q_{akt} und der zugehörigen Lastfaktoren $\gamma_{G,akt}$ und ψ_{akt} .

1.3 VORGEHEN

Das Erreichen der gesteckten Ziele soll mit dem nachstehend erklärten Vorgehen in drei Phasen garantiert werden. In **Phase I** werden allgemeine und theoretische Grundlagen bereitgestellt, wobei auf die technische Ausführung der Messungen und die statistische Auswertung der erhobenen Messdaten besonderes Augenmerk gelegt wird:

- Aufarbeiten des aktuellen Wissensstandes durch Studium der Literatur, im Speziellen der bestehenden normativen Unterlagen und der Berichte zu den vorangehenden Forschungsaufträgen [1,2].
- Erarbeiten der statistischen Grundlagen.
- Erstellen eines allgemeinen Modells zur Ermittlung der Basisvariablen (Zielgrössen) und der zugrundeliegenden Messgrössen.
- Analyse der Basisvariablen und der Messgrössen zwecks Festlegung des angezeigten Stichprobenumfangs, der notwendigen Messraster und möglicher Messverfahren.
- Entwerfen eines Konzeptes für den Vorgang der Datenerhebung.

In der **Phase II** werden die Erkenntnisse der Phase I im Rahmen einer Fallstudie überprüft:

- Erstellen des Messkonzeptes für das Messobjekt, wobei mittels zerstörender Messverfahren zerstörungsfreien Verfahren überprüft werden können.
- Planen, Begleiten und teilweises Ausführen der Messarbeiten.
- Statistische Auswertung der gesammelten Daten mit der anschliessenden Ermittlung von aktualisierten Kennwerten der Lasten G_{akt} und q_{akt} und den zugehörigen Lastfaktoren $\gamma_{G,akt}$ und ψ_{akt} für das Messobjekt.
- Analyse und Beurteilung der Messresultate mit Rückschlüssen auf die Tauglichkeit der verwendeten Messverfahren und auf Grenzen des technisch Machbaren hinsichtlich Messungen an bestehenden Strassenbrücken.
- Vorschlag für zukünftige Arbeiten.

Im Rahmen von zukünftigen Arbeiten könnte in der **Phase III** eine ausgedehnte Messkampagne an verschiedenen Strassenbrücken im Schweizerischen Strassennetz durchgeführt werden. Dabei erhobene Messdaten könnten in einer Datenbank abgelegt und somit ein wertvolles Mittel für die praktische Beurteilung von bestehenden Strassenbrücken geschaffen werden.

1.4 VORHANDENE RICHTLINIEN

Die vorliegende Studie wird im Anschluss an die Forschungsarbeit 86/94 [2] ausgeführt. Weiterführende Angaben zu den Grundlagen finden sich dort in Kapitel 2. Die wichtigsten Grundsätze für die Beurteilung der Tragsicherheit werden an dieser Stelle noch einmal aufgenommen. Gemäss SIA Richtlinie 462 ist die Tragsicherheit bestehender Bauwerke erbracht, falls die folgende Bedingung erfüllt ist:

$$S_d = S(\gamma_d \cdot Q_{akt}, \gamma_{G,akt} \cdot G_{akt}, \psi_{akt} \cdot q_{akt}) \quad (1)$$

- Q_{akt} : aktualisierter Kennwert der Leiteinwirkung
 $\gamma_{G,akt}$: aktualisierter Lastfaktor für Eigenlasten des Tragwerks
 G_{akt} : aktualisierter Kennwert der Eigenlast
 ψ_{akt} : aktualisierter Lastfaktor für die Auflast
 q_{akt} : aktualisierter Kennwert der Auflast

Falls ergänzende Sicherheitsmassnahmen gemäss SIA 462 Art. 5 21 [6] angeordnet werden, dürfen beim Tragsicherheitsnachweis für bestehende Tragwerke nach (1) gegenüber der Bemessung verschiedene Anpassungen vorgenommen werden. Für diese Studie relevant sind folgende Artikel:

Art 4 22 4: Der Lastfaktor für Auflasten darf gegenüber den Werten der Norm 160 von 1.5 auf 1.3 bei Leiteinwirkungen bzw. von 1.3 auf 1.15 bei Begleiteinwirkungen abgemindert werden, sofern die Auflasten nach Grösse und Wirkung zuverlässig bekannt sind.

Art 4 22 2: Der Lastfaktor für Eigenlasten darf gegenüber dem Wert der Norm 160 von 1.3 auf 1.15 abgemindert werden, sofern die durch entsprechende Erhebungen am Bauwerk festgestellten Abmessungen der Berechnung der Eigenlasten zugrunde gelegt werden.

Die Hinweise für die Anpassungen der Lastfaktoren wurden nicht wissenschaftlich auf ihre Gültigkeit überprüft. Mit der Forschungsarbeit 86/94 [2] wurde diese Lücke teilweise geschlossen, indem anhand von probabilistischen Analysen aktualisierte Lastfaktoren für die Betoneigenlasten $\gamma_{G,akt}$ und die Auflasten ψ_{akt} bereitgestellt wurden (Bilder 1 und 2). Diese aktualisierten Lastfaktoren sind so kalibriert, dass bei deren Verwendung der durch die SIA Normen vorgegebene Sicherheitsindex nicht verändert wird. Die aktualisierten Lastfaktoren sind in Funktion des Variationskoeffizienten V berechnet. Dieser wichtige statistische Kennwert ist ein Mass für den relativen Streubereich einer probabilistischen Grösse. Durch Messungen am Bauwerk kann die Variation des Kennwertes der Eigenlasten G_m und Auflasten q_m eingeschränkt und die Lastfaktoren $\gamma_{G,akt}$ und ψ_{akt} entsprechend aktualisiert werden. Gleichzeitig können die Kennwerte der Eigenlast G_{akt} und der Auflast q_{akt} angepasst werden.

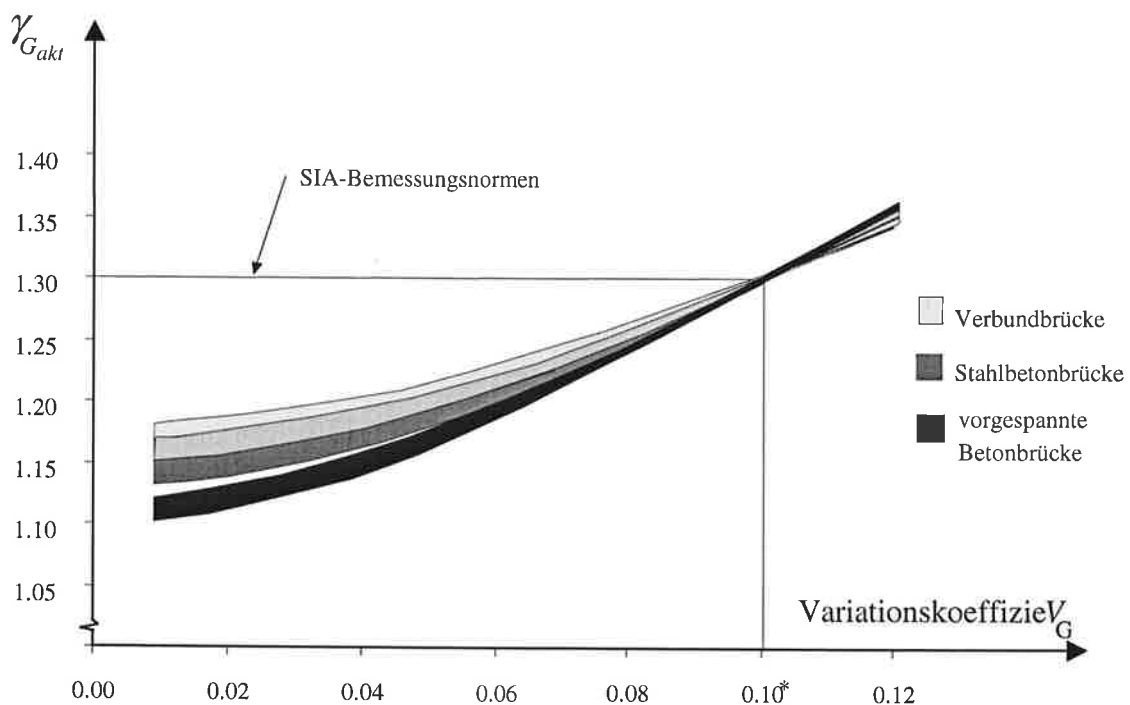


Bild 1 - Aktualisierte Lastfaktoren für die Stahlbetoneigenlast nach [2]

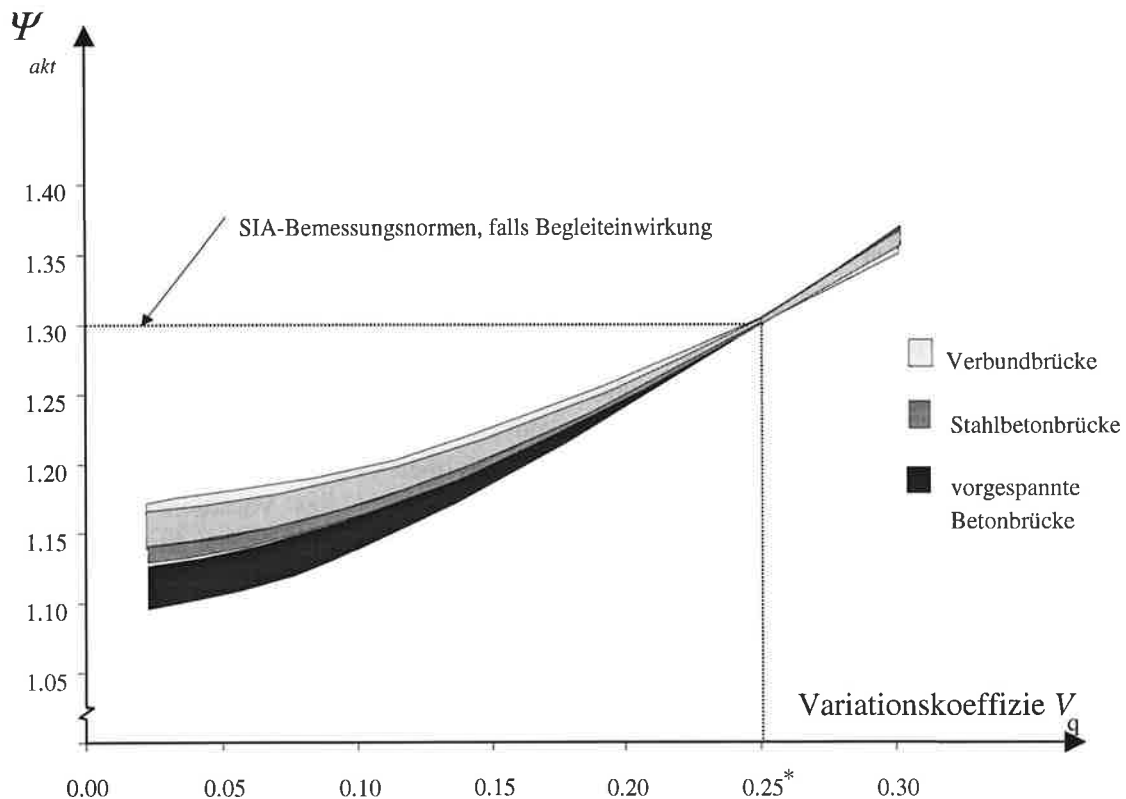


Bild 2 - Aktualisierte Lastfaktoren für die Auflast nach [2]

1.5 AUFBAU DES BERICHTES

Der erste Teil dieses Berichtes besteht aus den **Kapiteln 1 bis 7**. Er behandelt die Forschungsergebnisse aus der Phase I hinsichtlich der statistischen Auswertung der Daten und der technischen Ausführung der Erhebungen. Überdies werden die Ergebnisse aus der Fallstudie zusammengefasst, Schlüsse gezogen und das zukünftige Arbeiten vorgeschlagen. Im zweiten Teil, den **Anhängen**, wird zur Hauptsache die Fallstudie erläutert.

Der erste Teil ist wie folgt gegliedert: In **Kapitel 2** sind notwendige statistische Grundbegriffe erklärt, die für die statistische Auswertung der Messresultate (**Kapitel 3**) verwendet werden. In **Kapitel 4** wird auf die praktische Durchführung der Erhebungen eingegangen. Wichtige Aspekte wie der Stichprobenumfang, die Messpositionen und Messverfahren werden behandelt. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Resultate der Fallstudie ist in **Kapitel 5** gegeben. Rekapitulativ werden in **Kapitel 6** die ausgeführten Arbeiten dargelegt, Resultate zusammengefasst und Folgerungen gezogen. Ein Vorschlag für das zukünftige Vorgehen findet sich in **Kapitel 7**.

Im zweiten Teil, den Anhängen, sind mehrere Schwerpunkte zu erkennen. Im **Anhang A** finden sich erklärende Angaben zur Datenauswertung. Im abschliessenden **Anhang B** sind ausführliche Angaben zur Fallstudie (Messobjekt, Messkonzept, Durchführung der Messungen, Rohdaten) gemacht.

2. BASISVARIABLEN

2.1 EINLEITUNG

Die in [2] ermittelten aktualisierten Lastfaktoren basieren auf probabilistischen Analysen. Dazu wurde die Zuverlässigkeit der Tragsicherheit mit Hilfe von Grenzzustandsgleichungen ermittelt, unter Berücksichtigung der Variation der Basisvariablen. Solche Basisvariablen sind zum Beispiel die Werkstoffeigenschaften oder die Einwirkungen. Im Rahmen dieser Studie richtet sich das Augenmerk auf die Eigenlasten, sowohl lastabtragender wie auch nicht-lastabtragender Strukturelemente.

Bei der deterministischen Betrachtungsweise wird die Basisvariable durch den charakteristischen Kennwert x_r und einen Lastfaktor γ_r repräsentiert. Beim probabilistischen Ansatz hingegen wird die Basisvariable als Zufallsvariable mit gegebener Wahrscheinlichkeitsdichte $f_X(x)$ (beispielsweise repräsentiert durch Mittelwert μ_X und Standardabweichung σ_X) und -verteilung betrachtet. Die Basisvariable kann mit Hilfe von zwei statistischen Kennziffern beschrieben werden:

1. Der **Variationskoeffizient** V ist ein Mass für den relativen Streubereich des repräsentativen Wertes der Zufallsvariable.
2. Der **Bias** ν ist der Quotient aus Erwartungswert und nominalem Wert. Er stellt die Verbindung zwischen der deterministischen und der probabilistischen Betrachtungsweise dar.

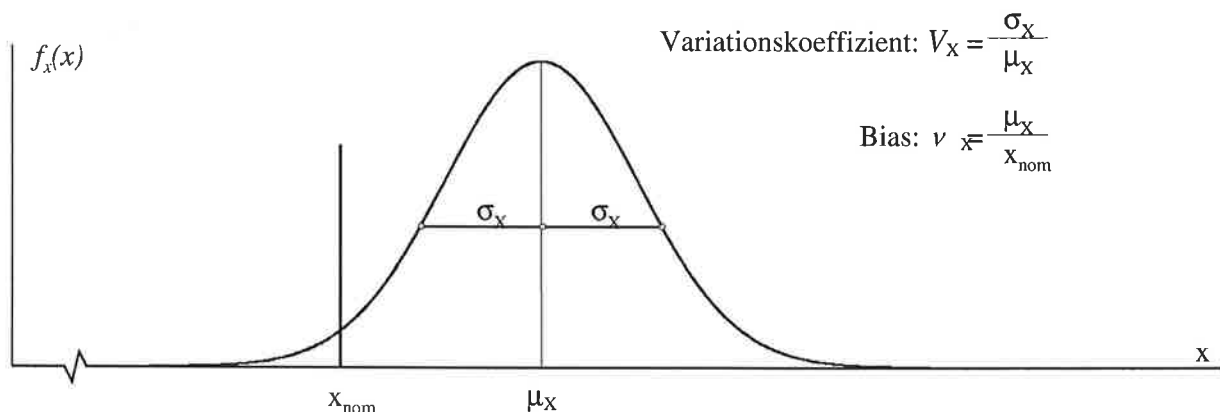


Bild 3 - Probabilistische Kennwerte

2.2 VARIATIONEN

Die Variation der Basisvariable hat im wesentlichen vier Komponenten [7]. Diese werden in der Folge beschrieben und Möglichkeiten zu deren Verkleinerung erklärt:

Die **natürliche Zufallsstreuung** der Basisvariable entspricht dem Naturzustand der Messgrösse und ist durch das Erheben von grossen Datenmengen nicht zu verringern. Die **Schätzvariation** entsteht durch die Verwendung von unvollständigem (endliche Anzahl Messungen) und nicht exaktem Datenmaterial (Grenzen der Messtechnik) beim Bewerten der gesammelten Daten, das heisst beim Abschätzen der statistischen Kennziffern. Sie kann durch die Vergrößerung des Stichprobenumfangs und die Verwendung von genaueren Messgeräten verkleinert werden. Die **Modellunschärfe** ist bedingt durch die Ungenauigkeit in den mathematischen Modellen, welche die Wirklichkeit abbilden. Nichtverstehen des Phänomens und Vereinfachungen sind ihre Ursache. **Menschliche Fehler** sind statistisch schwer zu erfassen und können durch sorgfältiges Arbeiten und Kontrollen verringert werden. Sie werden im weiteren Verlauf der Studie nicht mehr berücksichtigt.

3. STATISTISCHE AUSWERTUNG

3.1 EINLEITUNG

In diesem Kapitel wird die statistische Erfassung der in Kapitel 2 eingeführten Komponenten der Variation in der Basisvariable erklärt. Um die Variation in der Basisvariable verkleinern zu können, gilt es vorerst das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten zu begreifen. Dazu wird in Abschnitt 3.2 ein allgemeines Modell zur Ermittlung der Variation in der Basisvariable eingeführt [8,9]. Eine übersichtliche grafische Darstellung des Modells ist in Bild 5 gegeben. Zum besseren Verständnis werden ausgewählte Rechenregeln erst in Abschnitt 3.3 nachgeliefert.

3.2 MODELL ZUR ERMITTLUNG DER VARIATION IN DER BASISVARIABLE

Zielgrösse bei der Erhebung von aktualisierten Daten ist die Basisvariable, zum Beispiel die Eigenlast. Mit statistischen Mitteln wird aus den gesammelten Daten der Mittelwert und die Variation der Basisvariable abgeschätzt. Da Basisvariablen meist Funktionen Y von verschiedenen direkt messbaren, physikalischen Grössen sind, wird die Aufmerksamkeit vorerst auf diese sogenannten Messgrössen X_i gerichtet.

VARIATION DER MESSGRÖSSE

Anhand von gemessenen Daten (im Text *kursiv* und in Bild 4 als graues Histogramm dargestellt) können Mittelwert μ_X und Standardabweichung σ_X der Messgrösse X (beispielsweise die Bauteildicke) durch den empirischen Mittelwert m_X und die Standardabweichung s_X abgeschätzt werden, wobei der Messgrösse eine bestimmte Wahrscheinlichkeitsverteilung zugrunde gelegt wird.

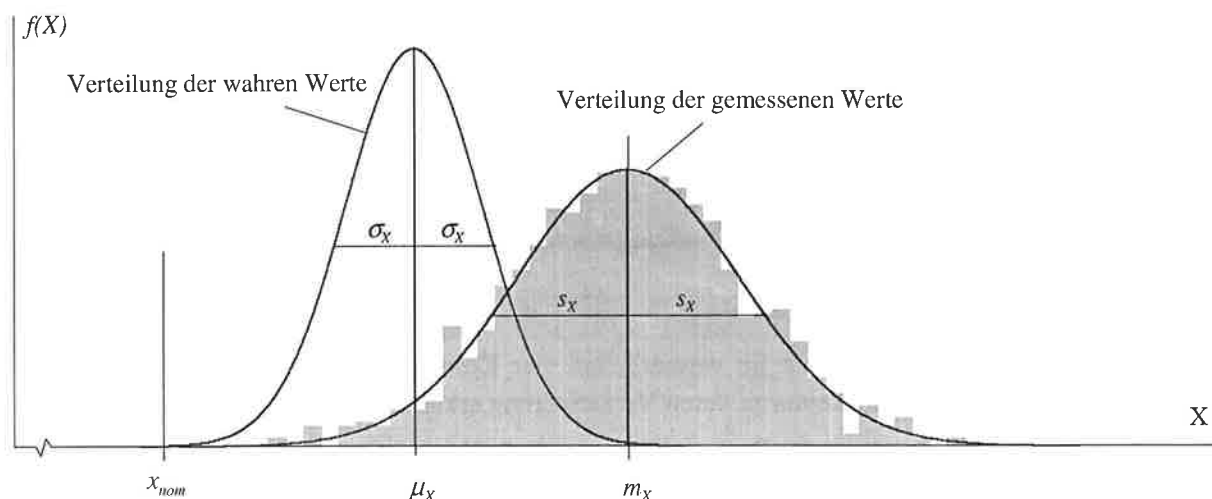


Bild 4 - Abschätzen von μ_X und σ_X anhand von m_X und s_X

Die Güte der gesammelten Messdaten ist teilweise durch die Eigenschaften des Messgerätes bestimmt. Die Genauigkeit eines Instrumentes ist die Eigenschaft, den Naturzustand ohne systematische Messabweichung zu erfassen, während die Empfindlichkeit angibt, mit welcher Auflösung die Mess-Skala abgelesen werden kann [10].

Die **systematische Messabweichung** kann durch den Bias

$$V_{X,\text{sys}} = \frac{\mu_X}{m_X} \quad (2)$$

$V_{X,\text{sys}}$: Systematische Messabweichung der Messgrösse X, Bias

μ_X : Wahrer Wert der Messgrösse

m_X : Empirischer Mittelwert der Stichprobe, siehe (4)

beschrieben, jedoch durch statistische Methoden nicht behoben werden. Mittelwert $\mu_{v_{X,\text{sys}}}$ und Variation $V_{v_{X,\text{sys}}}$ der systematischen Messabweichung können anhand von Messungen mit Geräten grösserer Genauigkeit und Empfindlichkeit ermittelt werden.

Aus der Empfindlichkeit des Messgerätes resultiert eine **zufällige Messabweichung**. Diese nimmt mit zunehmender Anzahl Messungen n ab. Ein Mass für diese zufällige Komponente in der Messabweichung ist:

$$V_{X,\text{Mess}} = \frac{C_{GT} \cdot s_X / \sqrt{n}}{m_X} \quad (3)$$

$V_{X,\text{Mess}}$: Mass für die zufällige Messabweichung, Variationskoeffizient

s_X : Empirische Standardabweichung aus der Stichprobe, siehe (5) und (6)

C_{GT} : Korrekturfaktor nach Gurland and Tripathi, wird im folgenden Paragraphen erklärt

n : Stichprobenumfang

Die Schätzung des Mittelwertes ist erwartungstreu, nicht aber diejenige der Standardabweichung s_X . Um die Standardabweichung σ_X nicht zu unterschätzen, ist die empirische Standardabweichung s_X mit einem Korrekturfaktor C_{GT} nach Gurland und Tripathi zu multiplizieren. Dieser ist abhängig vom Stichprobenumfang n . In Tabelle 6 in Anhang B sind die Werte des Korrekturfaktors C_{GT} in Funktion von n angegeben.

Die **natürliche Zufallsstreuung** der Messgrösse kann wie folgt erfasst werden:

$$V_{X,\text{nat}} = \frac{\sigma_X}{\mu_X} \cong \frac{C_{GT} \cdot s_X}{m_X} \quad (4)$$

$V_{X,\text{nat}}$: Mass für die natürliche Zufallsstreuung, Variationskoeffizient

σ_X : Standardabweichung der Messgrösse

Wie in (11) und Bild 5 gezeigt, können die natürliche Zufallsstreuung $V_{X,\text{nat}}$, die zufällige Messabweichung $V_{X,\text{Mess}}$ und die Variation der systematischen Messabweichung $V_{v_{X,\text{sys}}}$ zur Schätzvariation $V_{X,\text{Schätz}}$ zusammengefasst werden.

VARIATION DER BASISVARIABLE

Die Basisvariable wird mit Hilfe der mathematischen Modellfunktion $Y = f(X_1, \dots, X_n)$ erfasst. Die Unschärfe im mathematischen Modell wird durch $V_{Y,\text{mod}}$ und $v_{Y,\text{mod}}$ beschrieben. Aus den Schätzvariationen $V_{X_i,\text{Schätz}}$ der einzelnen Messgrössen und der Modellunschärfe $V_{Y,\text{mod}}$ wird die Variation der Basisvariable V_Y bestimmt. Parallel dazu ist der Bias v_Y in der Basisvariable als Produkt aus den einzelnen systematischen Messabweichungen in den verschiedenen Messverfahren $v_{X_i,\text{sys}}$ und

dem Bias in der Modellfunktion $v_{Y,mod}$ zu bestimmen. Für die praktische Durchführung der statistischen Auswertung wird auf die Rechenbeispiele in Anhang B verwiesen.

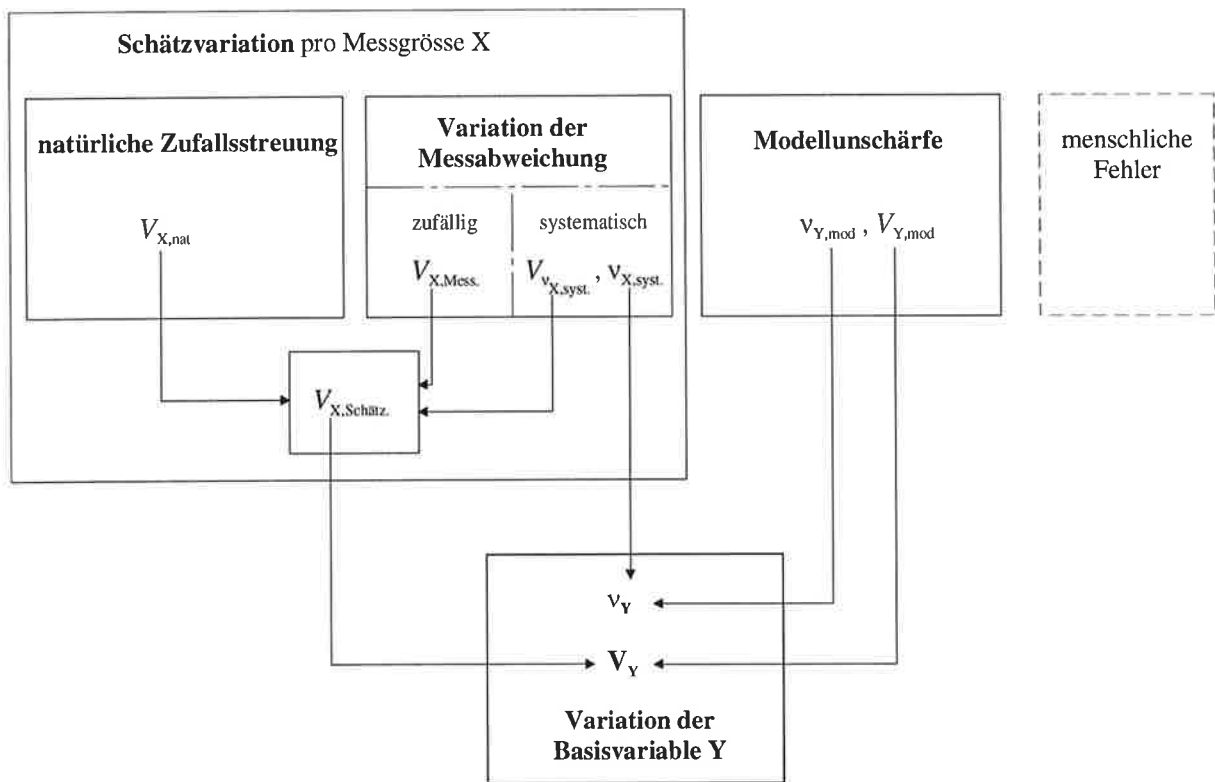


Bild 5 - Modell zur Ermittlung von Variation V_Y und Bias v_Y der Basisvariable

3.3 RECHENREGELN

MITTELWERT UND STANDARDABWEICHUNG

Der empirische Mittelwert m_X einer Stichprobe ist definiert durch:

$$m_X = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

x_i : Messungen

Die empirische Standardabweichung der Stichprobe s_X berechnet zu:

$$s_X = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_X)^2} \quad (6)$$

ERWARTUNGSWERT DER LINEARISIERTEN FUNKTION DER BASISVARIABLEN

Der beste Schätzer für den Erwartungswert der Messgröße ist:

$$\mu_X = v_{X,syst.} \cdot m_X \quad (7)$$

Und für den Erwartungswert der Basisvariable:

$$\mu_Y \cong V_{Y,\text{mod}} \cdot \sum_{i=1}^n \mu_{X_i} \quad (8)$$

Da es sich bei der Basisvariable meist um eine Funktion von Messgrössen handelt wird der Erwartungswert und die Varianz anhand der linearisierten Funktion $Y = f(X_1, \dots, X_n)$ bestimmt. Aus der Entwicklung der Funktion Y in eine Taylor'sche Reihe unter Vernachlässigung der nicht-linearen Terme ergibt sich die Variation der Basisvariable zu:

$$V_Y^2 \cong V_{Y,\text{mod}}^2 + \frac{1}{\mu_Y^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{ij} \cdot c_i \cdot c_j \cdot \sigma_{X_i}^2 \cdot \sigma_{X_j}^2 \quad (9)$$

wobei $c_i = \partial f / \partial X_i$ und ρ_{ij} die Korrelationskoeffizienten für X_i und X_j sind. Für statistisch unabhängige Messgrössen vereinfacht sich (9) zu:

$$V_{Y,\text{tot}}^2 \cong V_{Y,\text{mod}}^2 + \frac{1}{\mu_Y^2} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} \right)^2 \cdot (V_{X_i,\text{Schätz}} \cdot \mu_{X_i})^2 \quad (10)$$

Die Schätzvariation der Messgrösse kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$V_{X,\text{Schätz}} \cong \sqrt{V_{X,\text{nat}}^2 + V_{X,\text{Mess}}^2 + V_{V_{X,\text{syst}}}^2} \quad (11)$$

3.4 TYPISCHE WERTE FÜR DIE VARIATIONEN VON EIGEN- UND AUFLAST

Um eine Idee der Grössenordnung der Variation von Eigenlast und Auflast zu erhalten, sind in Tabelle 1 entsprechende Werte aus [7], wobei dort auch auf [11,12,13,14] verwiesen wird, zusammengefasst. Die Daten bezüglich den SIA Normen wurden aus [2] entnommen. Alle anderen Daten betreffen Bauwerke im Ausland.

Tabelle 1 - Variationen von Eigenlasten und Auflasten aus der Literatur

| Lastart | Variation | | | | | | |
|----------------|--------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|
| | Modell | | natürliche Zufallsstreuung | Schätzung | | Basisvariable | |
| | $V_{Y,\text{mod}}$ | $V_{Y,\text{mod}}$ | | $V_{X,\text{nat}}$ | $V_{X,\text{syst}}$ | $V_{X,\text{Schätz}}$ | v_Y |
| Stahl | 1.01 | 0.02 | 0.02 | 1.00 | 0.01 | 1.01 | 0.03 |
| Beton vor Ort | 1.07 | 0.05 | 0.06 | 1.00 | 0.05 | 1.07 | 0.10 |
| vorfabr. Beton | 1.03 | 0.02 | 0.02 | 1.00 | 0.03 | 1.03 | 0.04 |
| Strassenbelag | 1.20 | 0.05 | 0.14 | 1.00 | 0.05 | 1.20 | 0.25 |
| Eigenlasten | | | | | | | 0.10 ⁽¹⁾ |
| Auflasten SIA | | | | | | | 0.25 ⁽¹⁾ |

⁽¹⁾ In den Diagrammen in den Bildern 1 und 2 mit * gekennzeichnet.

4. DURCHFÜHRUNG VON MESSUNGEN AN STRASSENBRÜCKEN

4.1 EINLEITUNG

Das in Kapitel 3 eingeführte Verfahren für die statistische Auswertung der Messresultate ist unabhängig von Typ und volumetrischer Form der untersuchten Strassenbrücke und auch bei wenigen verfügbaren Daten anwendbar. Die Umsetzung dieser theoretischen Erkenntnisse in die praktische Ausführung ist Gegenstand des vorliegenden Kapitels. Die beiden Hauptziele der Erhebung seien hier noch einmal explizit erwähnt:

- Aktualisieren der Kennwerte der Eigenlasten G_m und Auflasten q_m und
- Ermitteln der zugehörigen aktualisierten Lastfaktoren $\gamma_{G,akt}$ und ψ_{akt}

Es gilt in diesem Zusammenhang den Geltungsbereich der in [2] vorgestellten aktualisierten Lastfaktoren festzuhalten. Zur Ermittlung der aktualisierten Lastfaktoren wurde dort das Gefährdungsbild "Leiteinwirkung Verkehr, Eigenlast und Auflast als Begleiteinwirkung" berücksichtigt. Bei der Bestimmung der Tragwerkszuverlässigkeit wurden einzig die Beanspruchungen in Längsrichtung in Feldmitte und bei der Stütze betrachtet, Einwirkungen aus örtlicher Beanspruchung dagegen nicht. So wird beispielsweise des Gefährdungsbild Eigengewicht einer seitlich auskragenden Fahrbahnplatte durch die aktualisierten Lastfaktoren nicht abgedeckt. Ausführlichere Angaben finden sich in [2, Abschnitt 1.4].

Ziel dieses Kapitels ist es ein Konzept für die Durchführung von Erhebungen zu entwerfen. Dazu werden vorerst die massgebenden Einflussgrössen besprochen. In Abschnitt 4.2 werden die Basisvariablen Eigenlast und Auflast und in Abschnitt 4.3 deren Messgrössen diskutiert. Mit Hilfe einer groben Einteilung der Strukturelemente in Bauteilklassen können aus der gesamten Tragstruktur die für die Erhebung in Frage kommenden Strukturelemente ausgeschieden werden. Bei den anschliessenden Abschnitten liegt der Schwerpunkt in der technischen Ausführung, wobei der Stichprobenumfang (Abschnitt 4.4), der Messraster (4.5) und die Messverfahren (4.6) untersucht werden. Im abschliessenden Abschnitt 4.7 wird ein Konzept für die Durchführung von Erhebungen vorgestellt.

4.2 BASISVARIABLEN

Die Eigenlasten der lastabtragenden Struktur sind dauernd vorhandene Einwirkungen, deren Änderungen im Laufe der Zeit vernachlässigt werden können (siehe Diagramm links in Bild 6). Die Auflasten - nach [3] die Eigenlasten nichttragender Strukturelemente und die Lasten fester Einrichtungen - können ihrerseits Veränderungen unterworfen sein. Diese sind jedoch normalerweise abrupt (zum Beispiel beim Einbauen eines neuen Belages, siehe Diagramm rechts in Bild 6) und deshalb keiner natürlichen zeitlichen Schwankung unterworfen.

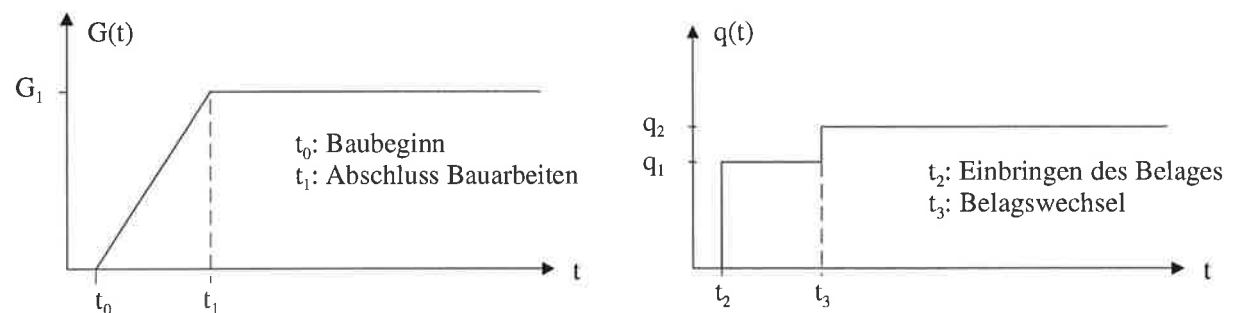


Bild 6 - Veränderung von Eigenlast G und Auflast q in Funktion der Zeit

Die Basisvariablen sind die Eigenlast G und die Auflast q . Sie sind Funktionen der volumetrischen Abmessungen und der Dichte. Es wird sowohl für die Dichte als auch die Abmessungen und damit auch für die Basisvariablen eine logarithmische Normalverteilung angenommen. Diese kann bei kleinen Variationskoeffizienten ohne Verlust an Genauigkeit durch eine Normalverteilung ersetzt werden [7,15]. Die Erdbeschleunigung wird vereinfachend als konstant angenommen ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$).

4.3 MESSGRÖSSEN

4.3.1 Dichte

Die Dichte kann in erster Näherung als konstant verteilt über das Strukturelement angenommen werden, nicht jedoch über das ganze Tragwerk. Am häufigsten ist die Dichte bei den nachfolgend aufgeführten Materialien zu bestimmen:

Beim **Betonstahl** ist die Variation in der Dichte unbedeutend. Bei Strassenbrücken in Stahlbeton liegt der Stahlgehalt erfahrungsgemäss bei 80 bis 120 kg/m^3 . Der Stahlgehalt kann über das betrachtete Strukturelement als konstant angenommen werden.

Die Verteilung der Dichte von **Beton** kann sowohl durch den Bauablauf (Betonieretappen) als auch durch die Bauteildicke (grössere Dichte der untenliegenden Teile) beeinflusst werden. Zumindest eine feldweise Ermittlung der Dichte empfiehlt sich.

Die Dichten von **Belag** (Verschleiss- und Schutzschicht: z.B. Gussasphalt) und der üblicherweise darunterliegenden **Abdichtung** (zum Beispiel heissverklebte Dichtungsbahnen) werden als konstant über das gesamte Tragwerk angenommen.

4.3.2 Räumliche Abmessungen

Bei den räumlichen Abmessungen wird - um den vielfältigen volumetrischen Ausbildungen der Strukturelemente Rechnung zu tragen - zwischen globaler Volumetrie des gesamten Tragwerks und lokaler Volumetrie des Strukturelementes unterschieden. Die Abmessungen von Bauteilen in verschiedenen Richtungen können in der Regel als unabhängig voneinander angesehen werden [15].

Je nach Standort des Strukturelementes innerhalb des Tragwerks verändert sich dessen Einfluss auf die Grenzzustandsgleichung. Auf diese wirkt sich beispielsweise eine grosse Variation der Eigenlast in Feldmitte im Vergleich zum Stützenquerschnitt anders aus. Die Quantifizierung dieses Zusammenhanges ist aufwendig und von vielen Faktoren abhängig, wie zum Beispiel dem statischen System oder der Art des untersuchten Grenzzustandes. Abschätzungsweise kann der Einfluss der globalen Volumetrie mit Hilfe der Modellunschärfe erfasst werden.

Bei Betrachtung von (11) fällt auf, dass die Messgrösse mit der grössten Schätzvariation einen starken Einfluss auf die Grösse der Variation der Basisvariable hat, hingegen jene mit kleinen Schätzvariationen (fast) vernachlässigt werden können. Oft sind die transversalen Bauteilabmessungen mit vergleichsweise grossen Schätzvariationen behaftet. In Tabelle 2 sind Strukturelemente mit ähnlichen volumetrischen Ausbildungen in Bauteilklassen zusammengefasst, wobei zu erhebende Messgrössen empfohlen werden.

Tabelle 2 - Bauteilklassen für die Durchführung von Erhebungen an Strassenbrücken

| Bauteilkategorie | Merkmal | | Messgrößen | Modellfunktion | Typische Bauteile |
|------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-----------------|---|--|
| 1 | komplizierte volumetrische Form | | ρ, l, b, h | $q = \int_V \gamma \cdot dV$ $G = \int_V \gamma \cdot dV$ | Beleuchtungsmast, Brückengeländer |
| 2 | Bauteile mit rechteckigem Querschnitt | $l \gg h$ und $l \gg b$ | ρ, b, h | $q = l_{\text{nom}} \cdot \int_A \gamma \cdot dA$ $G = l_{\text{nom}} \cdot \int_A \gamma \cdot dA$ | Brüstung, Längs- und Querträger, Pfeiler |
| 3 | | $l \gg h$ und $b \gg h$ | ρ, h | $q = l_{\text{nom}} \cdot b_{\text{nom}} \cdot \int_h \gamma \cdot dh$ $G = l_{\text{nom}} \cdot b_{\text{nom}} \cdot \int_h \gamma \cdot dh$ | Belag, Brückenplatte |
| 4 | | $l \gg b$ und $h \gg b$ | ρ, b | $q = l_{\text{nom}} \cdot h_{\text{nom}} \cdot \int_h \gamma \cdot db$ $G = l_{\text{nom}} \cdot h_{\text{nom}} \cdot \int_h \gamma \cdot db$ | Wandelement |

$\gamma = \rho \cdot g$ (Raumlast = Dichte · Erdbeschleunigung)

4.4 STICHPROBENUMFANG

Der zur Erhebung der Messgrößen notwendige Umfang der Stichprobe n ist von verschiedenen Einflussgrößen abhängig und muss fallweise angepasst werden. Nachstehend werden die Einflussgrößen diskutiert und Zusammenhänge aufgezeigt:

| | |
|---|--|
| Volumetrie | Planparallele und nicht gekrümmte Bauteiloberflächen verringern den Stichprobenumfang erheblich und erlauben teilweise die Vereinfachung der Modellfunktion (siehe auch Tabelle 2). |
| Messgröße | Messgrößen mit vergleichsweise grosser Schätzvariation erfordern einen grösseren Stichprobenumfang. |
| Statistische Auswertung | Das Diagramm in Bild 11 in Anhang A beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Stichprobenumfang n und der Schätzvariation $V_{X, \text{Schätz}}$. Es wird gezeigt, dass ab zirka 10 Messungen pro Messgröße die Schätzvariation nur noch unwesentlich abnimmt. |
| Angestrebter Wert γ_{akt} | Die in den Bildern 1 und 2 eingetragenen Streubereiche für die aktualisierten Lastfaktoren fallen für sehr kleine Variationskoeffizienten nur noch leicht ab. Das bedeutet, dass für kleine Variationskoeffizienten die Vergrößerung der Anzahl Messungen nur noch wenig einträgt. |
| Messverfahren | Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Messverfahrens werden durch die Erhöhung des Stichprobenumfangs verbessert. Bei gewissen Messverfahren ist die Erweiterung des Stichprobenumfangs nur mit wenig Mehraufwand verbunden. Es liegt eine grosszügigere Festlegung von n nahe. |

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die Zielgröße ab 10 bis 15 Messungen pro Messgröße nur noch geringfügig verändert.

4.5 ANORDNUNG DER MESSUNGEN

Der Messraster sollte derart angelegt werden, dass ein möglichst repräsentatives Abbild der Wirklichkeit erstellt werden kann. Jedes zu erhebende Strukturelement erhält einen eigenen Messraster. Für die Dichtemessungen eignet sich die feldweise Ermittlung. Grundsätzlich eignen sich regelmässige Messabstände für jede zu erhebende Messgrösse. In diesem Zusammenhang wird auch auf den gewählten Raster am Messobjekt verwiesen (Bild 18 und 19 in Anhang B).

Falls sich in den Strukturelementen durchgehende Öffnungen befinden, können diese als Messpositionen herangezogen werden. Solche Messungen bringen wertvolle Aufschlüsse hinsichtlich systematischer Messabweichung des Messverfahrens.

4.6 MESSVERFAHREN

4.6.1 Anforderungen an die Messverfahren

Die Anforderungen an die Messverfahren sind nachstehend formuliert:

- Die Datenerhebung soll möglichst wenig Zerstörung am untersuchten Strukturelement verursachen.
- Das Erhebungsverfahren soll andernorts wieder einsetzbar und für verschiedene Brückentypen (zum Beispiel Kastenträger) verwendbar sein.
- Die Messungen sind nach Möglichkeit ohne grosse Zusatz- und Hilfsbauten, sowie Verkehrsbehinderungen von der Fahrbahn aus durchzuführen.
- Die Datenerhebung soll mit einem erträglichen zeitlichen und technischen Aufwand verbunden sein.
- Die Dicken von einzelnen Schichten des Strukturelementes, beispielsweise Belag und Stahlbeton, können getrennt erhoben werden.

4.6.2 Beschreibung möglicher Erhebungsverfahren

Grundsätzlich stehen zur Erhebung von Daten zerstörungsfreie und zerstörende Messverfahren zur Auswahl [16]. Im Rahmen dieser Untersuchung werden beide Arten der Datenerhebung in Betracht gezogen. In den folgenden Abschnitten werden verschiedene Erhebungsverfahren kurz vorgestellt und deren Eigenschaften unter Berücksichtigung der definierten Anforderungen nach positiven (+) und negativen (–) Gesichtspunkten bewertet.

ZERSTÖRUNGSFREIE VERFAHREN

Anheben der Brücke

Der Brückenoberbau wird - zum Beispiel mit Hilfe von Pressen - angehoben und gewogen.

- + Einfache Idee, jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden und in Praxis kaum ausführbar, weil Brückenober- und unterbau oft monolithisch miteinander verbunden sind.
- Das Eigengewicht der gesamten Brücke kann genau bestimmt, es kann aber nicht zwischen einzelnen Strukturelementen und Schichten unterschieden werden.

Messung mittels Schublehre oder Messband

Abmessungen werden unter Einsatz einer geeichten Schublehre oder des Messbandes ermittelt. Die Messungen werden von der Brückenplatte aus durchgeführt.

- + Einfaches Messverfahren.
- + Geschätzte Genauigkeit: $\pm 0.5\%$ für die Schublehre und $\pm 1\%$ für das Messband. Die systematische Messabweichung ist vernachlässigbar klein.
- Dieses Messverfahren eignet sich nur für Messungen am freien Rand und ist deshalb nicht für alle Strukturelemente geeignet.

Vermessung

Es kommt das aus der Vermessungstechnik bekannte Verfahren der tachymetrischen Aufnahme mit Messung des Horizontal- und des Höhenwinkels, sowie der Distanz zur Anwendung.

- + Einfaches Messverfahren, unter Einsatz von bekanntem technischen Gerät.
- + Geschätzte Genauigkeit: ± 1 bis 2% . Die systematische Messabweichung ist von der Messdistanz abhängig.
- Der visuelle Zugang zur Ober- und Unterseite der Brückenplatte muss gewährleistet sein.
- Es wird die gesamte Bauteildicke ohne Unterscheidung zwischen den einzelnen Schichten (Beton, Belag) erhoben.
- Bei fahrbahnunterseitigen Messungen mit erheblichem zeitlichen Aufwand verbunden (ca. 8 bis 10 Messungen pro Stunde).

Ground Penetrating Radar, Georadar [17,18]

Bei diesem elektromagnetischen Messverfahren wird über eine Antenne elektromagnetische Energie auf das Strukturelement abgegeben. Ein Teil der abgegebenen Strahlung wird an den Schichtgrenzen und beim Austritt an der Rückwand des Strukturelementes reflektiert. Die reflektierte Strahlung kann durch einen Empfänger erfasst und daraus die Bauteildicke abgeleitet werden. Dieses Verfahren wird vor allem bei der Bestimmung von Belagsdicken angewendet.

- + Zugang zur Oberseite der Brückenplatte genügt für die getrennte Erfassung der Schichten.
- + Antenne und Sender können auf einem Fahrzeug montiert werden.
- Geschätzte Genauigkeit: $\pm 7\%$ für Asphaltbeläge [18], die systematische Messabweichung ist zu berücksichtigen.

Impact-Echo [17,19]

Das Verfahren beruht auf der Fortpflanzung und Reflexion von Druckwellen im Strukturelement. Mit Hilfe eines mechanischen Impulses - zum Beispiel Hammerschlag - wird eine elastische Schwingung auf das Strukturelement übertragen. Diese Schwingungen werden an Diskontinuitäten des Strukturelementes (Schichtwechsel oder Rückwand) reflektiert und durch einen Empfänger, der unmittelbar neben dem Sender angebracht ist, erfasst. Mit Hilfe eines tragbaren Computers kann der Experte ein Amplituden-Frequenz-Diagramm der empfangenen Wellen aufzeichnen und daraus die Bauteildicke ableiten. Das Messprinzip ist in Bild 7 dargestellt.

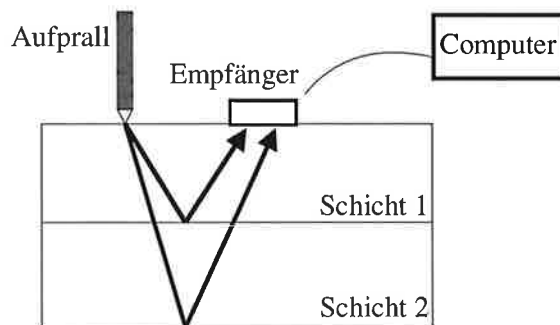


Bild 7 - Messprinzip des Impact-Echo Verfahrens

- + Der Zugang zur Oberseite der Brückenplatte genügt für die schichtweise Erfassung der Bauteildicken.
- + Mit Hilfe eines tragbaren Handgerätes können in kurzer Zeit viele Messpunkte aufgenommen werden (ca. 20 bis 30 Messpunkte pro Stunde).
- + Geschätzte Genauigkeit: ± 1 bis 3% für Beläge [20] und $\pm 5\%$ für Betonelemente [21], wobei die systematische Messabweichung zu berücksichtigen ist.
- + Hohlkörper können gemessen werden.
- Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im durchschallten Medium muss kalibriert werden, zum Beispiel mittels Ultraschall-Messungen. Diese Kalibrationsmessungen können am Bauteilrand oder bei durchgehenden Öffnungen durchgeführt werden. Mit neueren Geräten kann die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit direkt gemessen werden [20].
- Klima und Armierungsgehalt beeinflussen die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Messungen.

Impulse Response

Das Verfahren beruht auf dem gleichen Prinzip wie Impact-Echo mit dem Unterschied, dass die aufgebrachten Schwingungen in höheren Frequenzen liegen, was sich bei grösseren Bauteildicken (über 0.5 m) durch eine starke Dämpfung der empfangenen Wellen äussert. Das Verfahren ist noch nicht in gleichem Masse verbreitet wie Impact-Echo.

Ultrasonic Pulse Echo

Das neueste der hier vorgestellten Verfahren beruht auf der Laufzeitmessung von Ultraschallwellen bei der Durchdringung von Materialien. Das Ultrasonic Pulse Echo Verfahren wird in verschiedenen Varianten angewendet, die sich durch die aufgebrachten Frequenzen, sowie die Positionierung von Sender und Empfänger, teils auf der gleichen, teils auf gegenüberliegenden Seiten des Strukturelementes unterscheiden.

ANMERKUNG

Die Verfahren Ground Penetrating Radar und Impact-Echo, sowie 7 Varianten des Ultrasonic Pulse Echo Verfahrens werden in [17] miteinander verglichen. Das Verfahren Ground Penetrating Radar erwies sich dabei als weniger zuverlässig und genau als das Impact-Echo Verfahren. Alle Varianten der Ultrasonic Pulse Echo Verfahren lieferten mit Zunahme des Armierungsgehalts unbefriedigende Messresultate.

ZERSTÖRENDE VERFAHREN

Bohrproben oder Kernbohrungen an Strukturelementen

An den zu untersuchenden Strukturelementen werden Bohrungen oder Kernbohrungen vorgenommen. Mit Hilfe von Fero-Scannern kann das Durchbohren von Armierungseisen und das Anbohren von Spannkabeln teilweise umgangen werden. Diese Erhebungen dienen in erster Linie der Ermittlung der Dichte mit Hilfe des Tauchverfahrens. Das Messen von Bauteildicken hat untergeordnete Bedeutung.

- + Durch Wägen der Bohrkerne über und unter Wasser kann die Dichte bestimmt werden.
- + Geschätzte Genauigkeit für die Abmessungen der einzelnen Schichtdicken : $\pm 3\%$, bei Bohrkernen: $\pm 2\%$, die systematischen Messabweichungen sind vernachlässigbar klein.
- Erheblicher zeitlicher und technischer Aufwand.
- Die lückenlose Gewinnung der Bohrprobe ist teilweise schwierig.

Verwendung von Bruchstücken

An Bruchstücken werden Erhebungen durchgeführt; zum Beispiel werden mittels Schublehre oder Messband Abmessungen und mittels Wägen über und unter Wasser Dichten bestimmt.

4.7 KONZEPT FÜR DIE DURCHFÜHRUNG VON ERHEBUNGEN

Ein Konzept zur Durchführung von Erhebungen am Bauwerk ist in Bild 8 gezeigt. Grundsätzlich wird zwischen drei verschiedenen Vorgehensweisen unterschieden. Für jedes Strukturelement ist zu entscheiden, ob der Tragsicherheitsnachweis mit

- aktualisierten Lastfaktoren und Kennwerten,
- nur mit aktualisierten Kennwerten,
- oder normengemäss, d.h. ohne aktualisierte Werte

durchgeführt wird. Falls der Lastfaktor und der Kennwert aktualisiert werden, sind Messgrössen, Messmethoden und Messraster zu definieren. Bei der Festlegung der Messgrössen ist Tabelle 2 hilfreich. Beim ausschliesslichen Aktualisieren des Kennwertes wird die Bauteildicke als Messgrösse und das Messband als Messverfahren empfohlen. Im allgemeinen ist pro Messgrösse ein Stichprobenumfang von 10 bis 15 Messungen ausreichend (siehe Abschnitt 4.4).

Kriterien zur verbindlichen Festlegung der Vorgehensweise sind im Rahmen dieser Arbeit nicht erarbeitet worden. Folgende Merkmale sind jedoch zu beachten:

- Der Anteil der Eigenlast des untersuchten Strukturelementes an derjenigen des Tragwerks.
- Bisweilen reicht das Aktualisieren der Kennwerte aus, um den Tragsicherheitsnachweis zu erbringen.
- Je komplizierter die Volumetrie des Strukturelementes, umso grösser der Erhebungsaufwand und umso grösser in der Regel der ermittelte Variationskoeffizient. Für die Beurteilung der Volumetrie sind die in Tabelle 2 aufgeführten Bauteilklassen hilfreich.

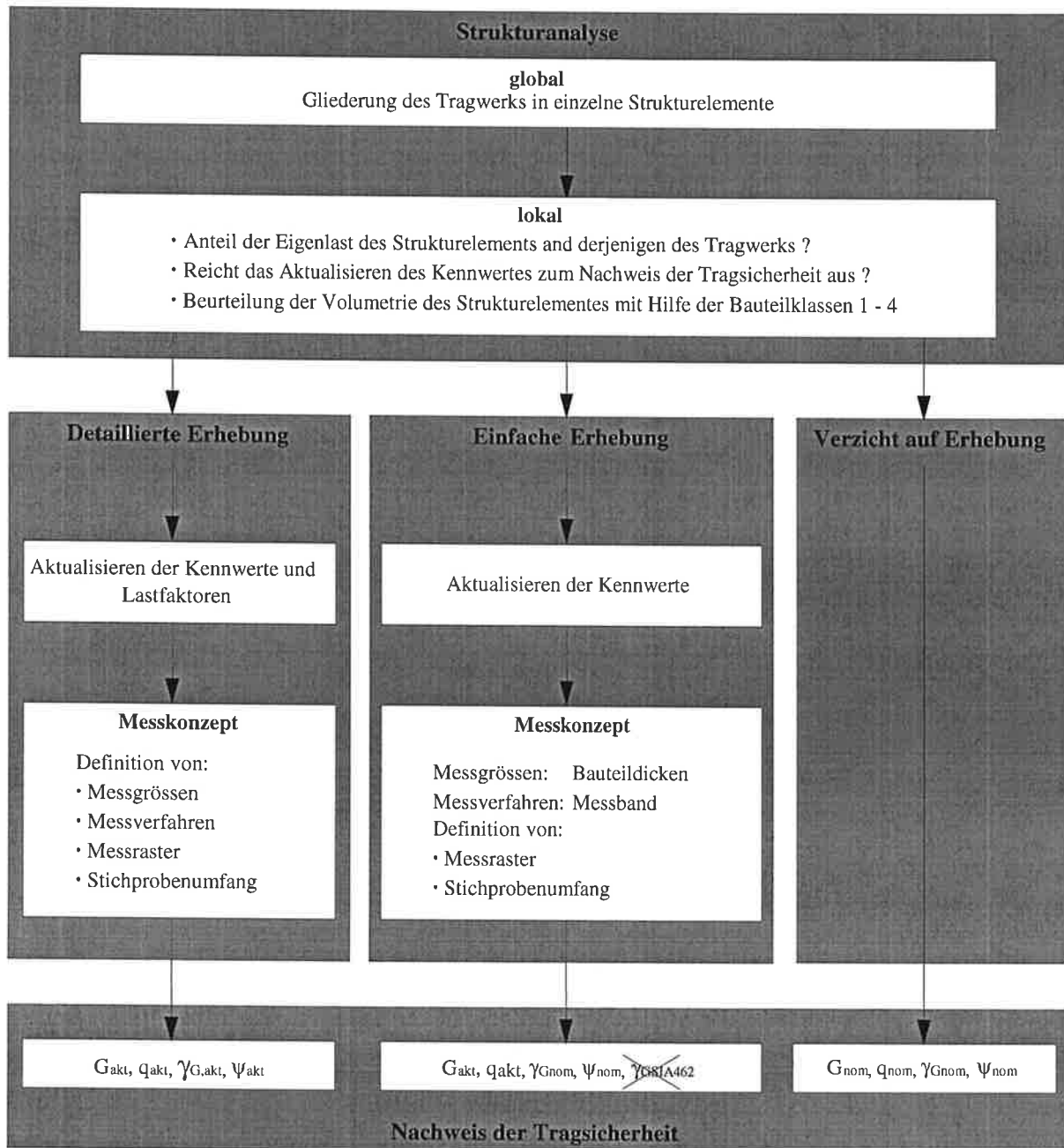


Bild 8 - Konzeptentwurf für das Vorgehen beim Erheben von Daten am Bauwerk

5. FALLSTUDIE

5.1 EINLEITUNG

Das Messobjekt und das Messkonzept, sowie die Ausführung der Messungen und die erhobenen Rohdaten sind im Anhang B ausführlich dargestellt. In diesem Kapitel sind die Resultate der statistischen Auswertung zusammengefasst (Abschnitt 5.2) und die für das Messobjekt ermittelten aktualisierten Lastfaktoren angegeben. In Abschnitt 5.3 werden die Resultate, sowie die verwendeten Messverfahren und insbesondere das Impact-Echo Verfahren beurteilt.

5.2 ZUSAMMENFASSUNG DER RESULTATE

Die betrachteten Strukturelemente sind von prismatischer Form und gehören der in der Tabelle 2 aufgeführten Bauteilklasse 3 an. Die Unschärfen der Modellfunktionen werden als vernachlässigbar klein angenommen. Die mit dem Messband erhobenen Daten sind im Vergleich zu den Impact-Echo Daten genauer. So kann für jeden Messpunkt eine systematische Messabweichung festgestellt werden. Diese wird bei der Ermittlung der Variation der systematischen Messabweichung des Impact-Echo Verfahrens berücksichtigt.

5.2.1 Auflasten

Die Resultate der statistischen Auswertung sind in der Tabelle 3 angegeben. Der Quotient zwischen Erwartungswert μ (wahre Grösse) und Nominalwert x_{nom} ist ebenfalls von Interesse. Die Nominalwerte basieren auf den Abmessungen in Ausführungs- und Armierungsplänen und den Raumlasten nach [3]. Fettgedruckte Werte sind von besonderem Interesse und werden anschliessend erläutert:

Tabelle 3 - Statistische Auswertung für die Auflast

| | Messverfahren | Messgrösse | Variation | | | | | | | | μ | μ/x_{nom} |
|-----|---------------|------------|-------------|-------------|---------------------|-------------|---------------|----------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|---------------|
| | | | Modell | | natürliche Streuung | Schätzung | | | Basisvariable | | | |
| | | | $V_{Y,mod}$ | $V_{Y,mod}$ | | $V_{X,nat}$ | $V_{X,syst.}$ | $V_{X,Schätz}$ | v_Y | V_Y | | |
| ① | Tauchen | ρ | - | - | 0.01 | 1.00 | 0.01 | - | - | 2319 kg/m ³ | ¹ 0.95 | |
| ② | Messband | h | - | - | 0.10 | 1.00 | 0.10 | - | - | 82.7 mm | 1.66 | |
| ①+② | | q | 1.00 | 0.00 | - | - | - | 1.00 | ³ 0.10 | 1880 N/m ² | ² 1.57 | |
| ③ | IE | h | - | - | 0.10 | 1.08 | 0.12 | 1.08 | 0.12 | 76.3 mm | 1.53 | |
| ①+③ | | q | 1.00 | 0.00 | - | 1.08 | - | 1.08 | ⁴ 0.15 | 1735 N/m ² | 1.45 | |

IE : Impact-Echo Messverfahren

ρ : Dichte

h : Bauteildicke

q : Auflast

¹ : Der Wert der erhobenen Dichten liegt 5% unter dem Nominalwert der SIA (als nominale Dichte wird die durch die Erdbeschleunigung ($\cong 9,81 \text{ m/s}^2$) dividierte Raumlast angesetzt, wobei letztere nach [3] für bituminöse Beläge bei 24 kN/m^3 liegt).

- ² : Der aktualisierte Kennwert liegt 57% über der nominellen Auflast. (Raumdichte nach [3], Belagsdicke nach Plänen).
- ^{3,4} : Die Variationen in der Basisvariable ($\cong 0.10$ für das Messkonzept "Tauchen und Messband" und 0.15 für das Messkonzept "Tauchen und Impact-Echo") werden in das Diagramm aus Bild 1 übertragen, wobei der Streubereich für die vorgespannten Betonbrücken berücksichtigt wird. Die auf diese Weise ermittelten aktualisierten Lastfaktoren für die Auflast ψ_{akt} sind im Diagramm in Bild 9 eingetragen. Ihre Gültigkeit beschränkt sich auf die Fallstudie.

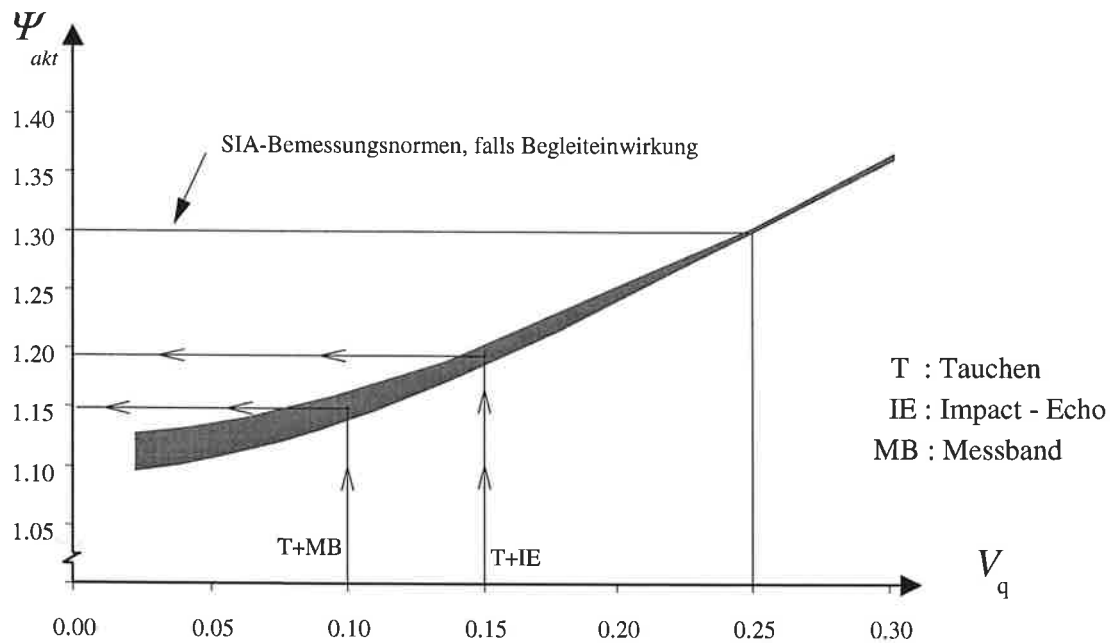


Bild 9 - Aktualisierte Lastfaktoren für die Auflasten

Der aktualisierte Lastfaktor für die Auflast ermittelt sich anhand des Messkonzeptes "Tauchen und Messband" zu $\psi_{akt} = 1.15$ und anhand des Konzeptes "Tauchen und Impact-Echo" zu $\psi_{akt} = 1.19$ (Bild 9).

5.2.2 Eigenlasten

Die Resultate der Eigenlasten sind in der Tabelle 4 getrennt nach den Strukturelementen "Fahrbahnplatte" und "Trottoirplatte" aufgeführt, wobei die Schallausbreitungsgeschwindigkeit am Strukturelement ermittelt wurde. Die Ermittlung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit an Bohrkernen führte zu ca. 4% kleineren Werten bei gleichbleibender Variation (siehe Tabelle 4). Fettgedruckte Werte sind von besonderem Interesse und werden anschliessend erläutert:

Tabelle 4 - Eigenlasten von Beton, Stahl und Stahlbeton

| | | Variation | | | | | | | | | |
|-----------------------|-----------------------------------|-----------------|-------------|-------------|------------------------|-------------|----------------|---------------|-------------------|------------------------|-------------------|
| | Mess- verfahren | Mess- grösse | Modell | | natürliche Streuung | Schätzung | | Basisvariable | | | |
| | | | $V_{Y,mod}$ | $V_{Y,mod}$ | $V_{X,nat}$ | $v_{X,mod}$ | $V_{X,Schätz}$ | v_Y | V_Y | μ | μ/x_{nom} |
| Fahrbahnplatte | | | | | | | | | | | |
| ① | Tauchen | ρ_c | - | - | 0.01 | 1.00 | 0.01 | - | - | 2465 kg/m ³ | ¹ 1.01 |
| ② | Messband | h_c | - | - | 0.02 | 1.00 | 0.02 | - | - | 603 mm | 1.01 |
| ①+② | | G_c | 1.00 | 0.00 | - | - | - | 1.00 | 0.02 | 14933 N/m ² | 1.04 |
| ③ | IE | h_c | - | - | 0.02 | 1.02 | 0.09 | - | - | 591 mm | 0.98 |
| ①+③ | | G_c | 1.00 | 0.00 | - | 1.02 | - | 1.02 | 0.09 | 14284 N/m ² | 0.99 |
| | Literatur* | G_a | - | - | - | - | - | 1.05 | 0.03 | 621 N/m ² | 1.03 |
| ①+② +④ | Tauchen, Messband Literatur | G_{ac} | 1.00 | 0.00 | - | - | - | - | ³ 0.02 | 15554 N/m ² | ² 1.04 |
| ①+③ +④ | Tauchen,IE Literatur | G_{ac} | 1.00 | 0.00 | - | - | - | - | ⁴ 0.09 | 14905 N/m ² | 0.99 |
| Trottoirplatte | | | | | | | | | | | |
| ① | Tauchen | ρ_c | - | - | 0.01 | 1.00 | 0.01 | - | - | 2433 kg/m ³ | 0.99 |
| ② | Messband | h_c | - | - | 0.03 | 1.00 | 0.03 | - | - | 171 mm | 1.00 |
| ①+② | | G_c | 1.00 | 0.00 | - | - | - | 1.00 | 0.03 | 4081 N/m ² | 0.99 |
| ③ | IE | h_c | - | - | 0.03 | 1.01 | 0.08 | - | - | 170 mm | 1.00 |
| ①+③ | | G_c | 1.00 | 0.00 | - | 1.02 | - | 1.02 | 0.09 | 4061 N/m ² | 0.99 |
| | Literatur | G_a | - | - | - | - | - | 1.05 | 0.03 | 138 N/m ² | 0.81 |
| ①+② +④ | Tauchen, Messband Literatur | G_{ac} | 1.00 | 0.00 | - | - | - | - | ⁵ 0.03 | 4265 N/m ² | 1.00 |
| ①+③ +④ | Tauchen,IE Literatur | G_{ac} | 1.00 | 0.00 | - | - | - | - | ⁶ 0.08 | 4199 N/m ² | 1.01 |

Siehe auch Legende Tabelle 3

* aus der Literatur entnommene Werte [2].

G : Eigenlast

a : Stahl

c : Beton

ac : Stahlbeton

¹ : Der Wert der erhobenen Dichte liegt 1% über dem Nominalwert der SIA (mittlere Raumlast $\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$ für Beton [3]).

² : Der aktualisierte Kennwert der Eigenlast des Messobjektes liegt rund 4% über dem nominalen Wert (Raumdichte nach [3], Abmessungen nach Plänen).

³⁻⁶ : Die Variationen in der Basisvariable werden analog zum Vorgehen in Abschnitt 5.2.1 behandelt. Als Grundlage dient das Diagramm in Bild 2. Die auf diese Weise ermittelten aktualisierten Lastfaktoren für die Eigenlast $\gamma_{G,akt}$ sind im Diagramm in Bild 10 eingetragen. Ihre Gültigkeit beschränkt sich auf die Fallstudie.

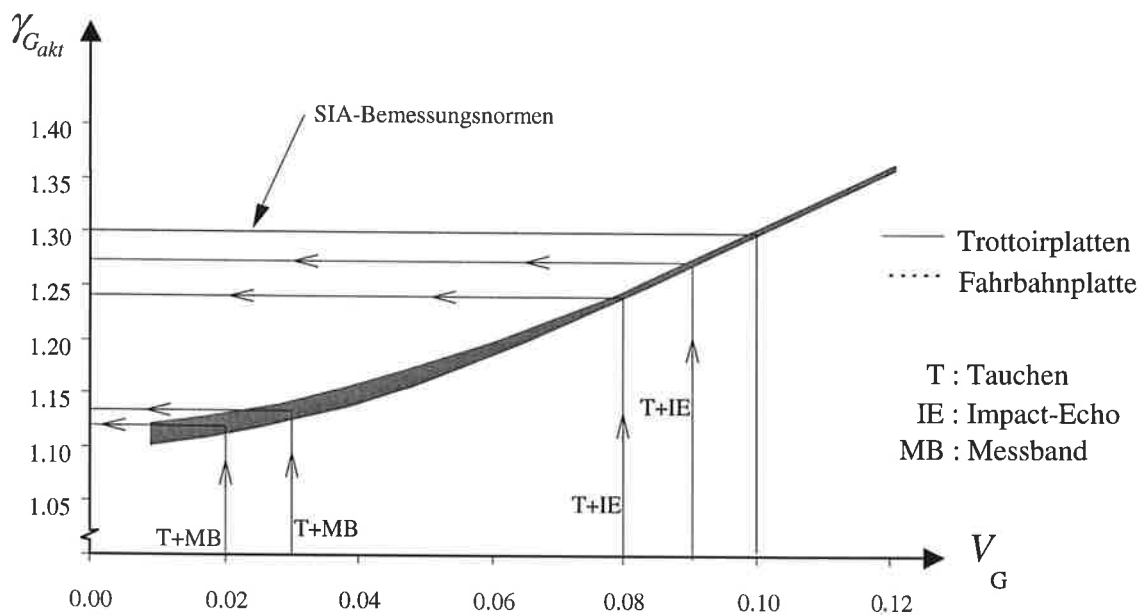


Bild 10 - Aktualisierte Lastfaktoren für die Betoneigenlasten

Der aktualisierte Lastfaktor für die Eigenlast der Fahrbahnplatte wird anhand des Messkonzeptes "Tauchen und Messband" zu $\gamma_{G,akt} = 1,12$ und anhand des Konzeptes "Tauchen und Impact-Echo" zu $\gamma_{G,akt} = 1,27$ (Bild 10) ermittelt. Für die Trotoirplatten findet sich anhand des Messkonzeptes "Tauchen und Messband" $\gamma_{G,akt} = 1,14$ und anhand des Konzeptes "Tauchen und Impact-Echo" $\gamma_{G,akt} = 1,24$.

5.3 BEURTEILUNG

5.3.1 Messresultate

GEMESSENE DICHTEN

Die Variation der einzelnen Messungen sind gering, was auf eine als konstant anzunehmende Dichte über das gesamte Brückenfeld hinweist. Die erhobenen Dichten liegen beim Belag 5% unter dem Nominalwert der SIA, beim Beton 1% darüber. Generell sind für die Dichten geringe Abweichungen von den Normwerten feststellbar.

AKTUALISIERTE KENNWERTE DER EIGENLAST UND AUFLAST

Die aktualisierten Kennwerte der Eigenlasten liegen 0 bis 4% über den nominalen Werten [3], stimmen also gut mit diesen überein. Der aktualisierte Kennwert der Auflast jedoch liegt 57% über dem Nominalwert der Auflast. Dies ist wahrscheinlich auf das Auftragen von zusätzlichen Belagsschichten zurückzuführen. Die Bedeutsamkeit der Verwendung von aktualisierten Daten bei Beurteilung der Tragsicherheit wird an diesem Beispiel untermauert.

AKTUALISIERTE LASTFAKTOREN

Mit ansteigender Güte des Messkonzeptes verkleinert sich der Messaufwand und die Grösse der ermittelten aktualisierten Lastfaktoren. Anhand des Messkonzeptes "Messbandes und Tauchen" ergeben sich die aktualisierten Lastfaktoren für die Auflast zu $\psi_{akt} = 1.15$, für die Eigenlast zu $\gamma_{G,akt} = 1.12$ (Fahrbahnplatte) und $\gamma_{G,akt} = 1.14$ (Trottoirplatten). Die Angaben beruhen auf a-posteriori Messungen an Bauteilrändern. Die erreichte Messgenauigkeit ist dementsprechend gut und dürfte durch andere zerstörungsfreie Messverfahren kaum überschritten werden. Die anhand der Messungen am Messobjekt ermittelten Lastfaktoren stimmen gut mit dem in [6] vorgeschlagenen, deterministischen Lastfaktor von $\gamma_{G,SIA462} = 1.15$ überein. Dabei werden die Streubereiche aus den Diagrammen in den Bildern 1 und 2 [2] für die Ermittlung der aktualisierten Lastfaktoren verwendet.

Die anhand des Messkonzeptes "Tauchen und Impact-Echo" ermittelten aktualisierten Lastfaktoren liegen teilweise deutlich höher, für die Auflast bei $\psi_{akt} = 1.19$ für die Eigenlast bei $\gamma_{G,akt} = 1.27$ (Fahrbahnplatte) und $\gamma_{G,akt} = 1.24$ (Trottoirplatten).

5.3.2 Messkonzept

TAUCHMESSVERFAHREN FÜR DIE DICHTEN

Die Dichtemessung mittels Eintauchen von Prüfkörpern aus den untersuchten Strukturelementen erweist sich als praktisch in der Anwendung und überzeugend in der Messgenauigkeit.

IMPACT-ECHO

Aus der Anwendung des Impact-Echo Verfahrens am Messobjekt können die folgenden Schlüsse gezogen und Grenzen der Einsatzmöglichkeiten definiert werden:

Die **Wetterbedingungen** beeinflussen die Zuverlässigkeit der Messungen. Feuchte Fahrbahnoberflächen erschweren, nasse verunmöglichen die Durchführung von Messungen. Mit dem Anstieg der Temperatur auf der Bauteiloberfläche wird der Empfang der ausgesendeten Wellen gedämpft. Im Rahmen der Fallstudie konnte praktisch bei allen Messpunkten die gesamte Bauteildicke ermittelt werden. Die **Durchschallbarkeit** von Abdichtungen in den Brückenkörpern ist nicht definitiv gewährleistet und die Beeinträchtigung der Messgenauigkeit aufgrund des **Armierungsgehaltes** und nicht planparalleler **Bauteiloberflächen** nicht eindeutig auseinanderzuhalten. Die **Kalibration der Schallausbreitungsgeschwindigkeit** im Material hat einen starken Einfluss auf die Messresultate. Dies schlägt sich in den ermittelten systematischen Messabweichungen für die beiden angewendeten Kalibrationsverfahren - am Betonelement und an der Bohrkernprobe - nieder (Tabelle 5).

Tabelle 5 - Systematische Messabweichung der Impact-Echo Verfahren für das Messobjekt

| Kalibration Schallausbreitungsgeschw. | Messobjekt | Systematische Messabweichung | |
|---------------------------------------|--------------|------------------------------|-------------------------|
| | | Absolut: $v_{X,syst}$ | Variation: $V_{X,syst}$ |
| am Betonbauteil | Betonbauteil | - 2 % | 5 bis 6 % |
| | Belag | - 8 % | 11 % |
| an der Bohrkernprobe | Betonbauteil | + 2 % | 5 bis 6 % |
| | Belag | - 4 % | 11 % |

Die überraschend grosse Variation der systematischen Messabweichung kann auf das Fehlen einer Abdichtungsschicht zurückgeführt werden, was das Erkennen der Schichtgrenze zwischen Belag und Betonschicht erschwerte. Zusätzlich setzte die sehr raue Trennfläche zwischen Belag und Betonschicht die Messgenauigkeit des Messbandes herab, was vor allem bei kleinen absoluten Bauteildicken stark ins Gewicht fällt.

Aus den obgenannten Gründen bringt die Verwendung des Impact-Echo Verfahrens für die Bestimmung der Bauteildicken nicht die gewünschte Abminderung der aktualisierten Lastfaktoren. Das Impact-Echo Verfahren ist deshalb beim jetzigen Stand der Messtechnik als zu ungenau für die Bestimmung der Bauteildicken zu bewerten.

6. ZUSAMMENFASSUNG DER WICHTIGSTEN RESULTATE

6.1 EINLEITUNG

Gegenstand dieser Forschungsarbeit ist die Erhebung von Daten an bestehenden Strassenbrücken. Das Ziel dieser Erhebungen ist die Ermittlung von aktualisierten Kennwerten der Eigenlasten und Auflasten, sowie der zugehörigen aktualisierten Lastfaktoren für den Nachweis der Tragsicherheit. In diesem Zusammenhang interessieren die folgenden Punkte:

- Die statistische Auswertung der erhobenen Messdaten, und
- der Vorgang der Datenerhebung am Bauwerk, insbesondere Art, Umfang und Durchführung der Messungen.

Die dazu benötigten, theoretischen Grundlagen werden in dieser Arbeit bereitgestellt und anhand einer Fallstudie - Messobjekt ist die Überführung Horwerstrasse - überprüft.

6.2 STATISTISCHE AUSWERTUNG

Vorerst werden die zur statistischen Auswertung von erhobenen Daten verwendete Kennziffern eingeführt. Von zentraler Bedeutung sind die Variationen der Basisvariablen Eigenlast und Auflast, die zur Bestimmung von aktualisierten Lastfaktoren benötigt werden. Die einzelnen Komponenten dieser Variationen werden identifiziert und in einem Modell, das deren systematische Erfassung und den Einbezug von fremden Messdaten erlaubt, zusammengeführt. Die Anwendung des Modells wird anhand der statistischen Auswertung der am Messobjekt erhobenen Daten erklärt.

6.3 PRAKTISCHE DURCHFÜHRUNG

Ein Konzept für die praktische Durchführung der Erhebungen wird entworfen, wobei für jedes Strukturelement die Möglichkeiten "Kennwert und Lastfaktor aktualisieren", "nur Kennwert aktualisieren" oder "keine Erhebungen" in Frage kommen. Folgende Einflussgrößen sind dabei zu berücksichtigen:

Die **volumetrische Form** des Strukturelementes, sowie dessen **Anteil an der gesamten Eigenlast** des Tragwerks entscheiden über den gewählten Ansatz. Für leichte Strukturelemente mit gekrümmten Oberflächen wird empfohlen von einer Erhebung abzusehen, für schwere und planparallele Strukturelemente eine einfache oder detaillierte Erhebung vorgeschlagen.

Als **Messverfahren** für die Dichte ist das Wägen von an Strukturelementen entnommenen Prüfkörpern unter und über Wasser geeignet. Für die räumlichen Abmessungen kommen je nach Lage des Strukturelementes innerhalb der gesamten Tragstruktur verschiedene Verfahren in Frage. Als schwierig stellt sich die getrennte Erfassung von Belag- und Betonbauteildicke heraus.

Die Modellfunktion mit deren Hilfe die Basisvariable berechnet wird, gibt einen ersten Anhaltspunkt über den **Stichprobenumfang**. Grundsätzlich gilt, dass die Messgrösse mit der grössten Variation - oft die transversale(n) Bauteilabmessung(en) - übermässig stark ins Gewicht fällt. Bei mehr als 10 bis 15 Messungen pro Messgrösse wird das Resultat nur noch geringfügig verbessert.

Der **Messraster** soll ein möglichst repräsentatives Abbild der Wirklichkeit wiedergeben. Für die Dichtemessungen eignet sich beispielsweise die feldweise Ermittlung und für die räumlichen Abmessungen ein Raster mit regelmässigen Messabständen pro Messgrösse und Strukturelement.

6.4 FALLSTUDIE

Die gemessenen Werte für die **Dichten** weichen nur gering von den nominalen Werten ab. Sie liegen beim Belag 5% unter, beim Beton 1% über diesen. Die Dichte kann als konstant über das untersuchte Brückenfeld bezeichnet werden.

Die **aktualisierten Kennwerte der Eigenlasten** stimmen bei 0 bis 4% Abweichung gut mit den nominalen Werten [3] überein. Der **aktualisierte Kennwert der Auflast** jedoch liegt um 57% über der nominellen Auflast, wahrscheinlich aufgrund von zusätzlich aufgetragenen Belagsschichten.

Für die Ermittlung der aktualisierten Lastfaktoren werden die Streubereiche aus den Diagrammen in den Bildern 1 und 2 verwendet [2]. Das bedeutet, dass der von der SIA vorgegebene Sicherheitsindex nicht verändert wird. Anhand des Messkonzeptes "Messbandes und Tauchen" ergeben sich die **aktualisierten Lastfaktoren** für die **Auflast** zu $\psi_{akt} = 1.15$, für die **Eigenlast** der verschiedenen Strukturelemente zu $\gamma_{G,akt} = 1.12$ bzw. 1.14. Die anhand der Messungen am Messobjekt ermittelten Lastfaktoren stimmen gut mit dem in [6] vorgeschlagenen einheitlichen Lastfaktor von $\gamma_{G,SIA462} = 1.15$ überein.

Hingegen liegen die mit dem Messkonzept "Tauchen und Impact-Echo" ermittelten aktualisierten Lastfaktoren teilweise deutlich höher; für die Auflast bei $\psi_{akt} = 1.19$ für die Eigenlasten der verschiedenen Strukturelemente bei $\gamma_{G,akt} = 1.24$ bzw. 1.27.

Die systematische Messabweichung des Impact-Echo Verfahrens ist stark abhängig vom gewählten Kalibrationsverfahren für die Ermittlung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit. Wichtiger jedoch ist die Variation der systematischen Messabweichung des Impact-Echo Verfahrens. Diese ist mit 6% bei den Betonelementen und mit 11% beim Belag verhältnismässig gross, was die unbefriedigend hohen aktualisierten Lastfaktoren nach sich zieht. Das Impact-Echo Verfahren ist deshalb beim jetzigen Stand der Messtechnik als zu ungenau für die Bestimmung der Bauteildicken zu bewerten.

7. ZUKÜNFTIGE ARBEITEN

Von den durchschallenden Messverfahren verspricht das Impact-Echo Verfahren am ehesten Erfolg. Zur Vertiefung der Kenntnisse sind an verschiedenen Messkörpern Laborversuche durchzuführen. Auf diese Weise könnten die Einflüsse des Armierungsgehaltes, der Umgebungstemperatur, nicht planparalleler Bauteiloberflächen und die Durchschallbarkeit von Abdichtungsschichten untersucht werden. Zudem könnten wertvolle Daten hinsichtlich systematischer Messabweichung und deren Variation gesammelt werden.

Zur Zeit wird das Impact-Echo Verfahren am Institut MCS (Maintenance, construction, sécurité des ouvrages) an der ETH Lausanne untersucht. Die Verbesserung der Kenntnisse hinsichtlich der Variation der systematischen Messabweichung, wie auch der Durchschallbarkeit von Abdichtungsschichten sind Bestandteil dieser Untersuchungen.

VERDANKUNGEN

Unser Dank richtet sich an das Bundesamt für Strassen für die finanzielle Unterstützung des vorliegenden Forschungsprojektes.

Im weiteren danken wir den Mitgliedern der Arbeitsgruppe Brückenforschung des ASTRA – Begleitkommission C, den Herren P. Matt (Präsident), M. Donzel, Prof. R. Favre, H. Figi, H. Fleischer und P. Wüst für ihre konstruktiven Ideen und die kritische Durchsicht der Arbeit.

Die kompetente Leitung und teilweise Durchführung der Messarbeiten durch die Andreas Steiger & Partner AG aus Luzern, sowie die fachkundige Durchführung der Impact-Echo Messungen durch Geotest SA aus Zollikofen haben das Ausführen der Forschungsarbeit erheblich erleichtert.

Besonderen Dank möchten wir Herrn Professor Manfred A. Hirt für seine fachliche Betreuung und die persönliche Unterstützung aussprechen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] BEZ, R., BAILEY, S.F., HAESLER, V, *Modèles de charge actualisés pour l'évaluation de la sécurité structurale de ponts-routes existants*, Union de professionnels suisses de la route (VSS) Zurich 1995 (Mandat de recherche OFR 90/90), rapport N^o 515.
- [2] BASSETTI, A., BAILEY, S.F., BANZ, A., *Lastfaktoren für die Eigenlast und Auflast zur Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Strassenbrücken*, Verein Schweizerischer Strassenfachleute (VSS) Zürich 1998 (Mandat de recherche OFR 86/94).
- [3] NORM SIA 160, *Einwirkungen auf Tragwerke*, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Zürich, 1990.
- [4] NORM SIA 161, *Stahlbauten*, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Zürich, 1989.
- [5] NORM SIA 162, *Betonbauten*, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Zürich, 1989.
- [6] RICHTLINIE SIA 462, *Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke*, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Zürich, 1994.
- [7] BAILEY, S.F., *Basic principles and load models for the structural safety evaluation of existing road bridges*, thèse No. 1467, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1996.
- [8] ANG, A.M.S., TANG, W.H., *Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume II, Decision, Risk and Reliability*, John Wiley & Sons Inc. New York, 1975.
- [9] ANG, A.M.S, *Structural Risk Analysis and Reliability-Based Design*, Journal of Structural Division, Volume 99, ASCE, 1973, pp.1891-1910.
- [10] PLATE, E.J., *Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure*, Ernst & Sohn, Berlin 1993.
- [11] Supplement No.1-1990 to CSA Standard CAN/CSA-S6-88, *Existing Bridge Evaluation, Design of Highway Bridge*, Canadian Standards Association, Ontario 1990.
- [12] NOWAK, A.S., *Probabilistic basis for bridge evaluation*, Bridge Evaluation Repair and Rehabilitation, The University of Michigan 1987, p 311-321.
- [13] BEZ, R., *Modélisation des charges dues au trafic routier*, thèse No.793, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1989.
- [14] ELLINGWOOD, B. et al, *Development of a probability based load criterion for American National Standard A58*, National Bureau of Standards Special Publication 577, Washington 1990.
- [15] RACKWITZ, R., *Einwirkungen auf Bauwerke* in "Der Ingenieurbau: Tragwerkszuverlässigkeit und Einwirkungen", Ernst & Sohn, Berlin 1997.
- [16] IP BAU, *Untersuchungstechniken im Tief- und Ingenieurbau, Erhaltung und Erneuerung, Bereich Tiefbau*, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern 1991.

- [17] KRAUSE, M. et al, *Comparison of Pulse-Echo-Methods for Testing Concrete*, International Symposium for non-destructive testing in civil engineering, proceedings Vol. 1 Lectures, Berlin 1995.
- [18] MASER, K. et al, *Evaluation of pavement thickness using ground penetrating radar*, International Symposium for non-destructive testing in civil engineering, proceedings Vol. 1 Lectures, Berlin 1995.
- [19] NAJI, B. et al, *Impact-Echo Response in Ferrocement-polystyrene beaded concrete laminates*, International Symposium for non-destructive testing in civil engineering, proceedings Vol. 1 Lectures, Berlin 1995.
- [20] SANSALONE, M., STREETT, W., *Use of the Impact-Echo Method and Field Instrument for Non-destructive Testing of Concrete Structures*, International Symposium for non-destructive testing in civil engineering, proceedings Vol. 1 Lectures, Berlin 1995.
- [21] SACK, D., OLSON, L., *High speed testing technologies for NDT of structures*, International Symposium for non-destructive testing in civil engineering, proceedings Vol. 1 Lectures, Berlin 1995.

ANHANG A: STATISTISCHE TABELLEN**A1 KORREKTURFAKTOREN NACH GURLAND UND TRIPATHI***Tabelle 6 - C_{GT} - Faktoren zur Korrektur der empirischen Standardabweichung s_x*

| n | C_{GT} |
|----------|----------------------------|
| 2 | 1.253 |
| 3 | 1.128 |
| 4 | 1.085 |
| 5 | 1.064 |
| 6 | 1.051 |
| 7 | 1.042 |
| 8 | 1.036 |
| 9 | 1.032 |
| 10 | 1.028 |
| 11 | 1.025 |
| 12 | 1.023 |
| 13 | 1.021 |
| 14 | 1.019 |
| 15 | 1.018 |
| 16 | 1.017 |
| 17 | 1.016 |
| 18 | 1.015 |
| 19 | 1.014 |
| 20 | 1.013 |
| 21 | 1.012 |
| 22 | 1.012 |
| 23 | 1.011 |
| 24 | 1.011 |
| 25 | 1.010 |
| 26 | 1.010 |
| 27 | 1.010 |
| 28 | 1.009 |
| 29 | 1.009 |
| 30 | 1.009 |
| 31 | 1.008 |
| 35 | 1.007 |
| 40 | 1.006 |
| 50 | 1.005 |
| 60 | 1.004 |
| 70 | 1.004 |
| 80 | 1.003 |
| 90 | 1.003 |
| 100 | 1.003 |

A2 EINFLUSS DES STICHPROBENUMFANGS

In der Folge wird gezeigt, wie die Grösse des Stichprobenumfangs n auf die Schätzvariation der Messgrösse einwirkt. Dazu werden die Konstanten C_1 und C_2 eingeführt.

Die Konstante C_1 entspricht dem Verhältnis zwischen der natürlichen Zufallsstreuung $V_{X,\text{nat}}$ und der Variation der systematischen Messabweichung $V_{v,\text{sys}}$:

$$C_1 = \frac{V_{X,\text{nat}}}{V_{v,\text{sys}}} \quad (12)$$

Durch einführen von C_1 und des Korrekturfaktors C_{GT} nach Gurland und Tripathi (Tabelle 6) kann (11) wie folgt geschrieben werden:

$$V_{X,\text{Schätz.}} \cong V_{X,\text{nat.}} \cdot \underbrace{\sqrt{C_{\text{GT}} \cdot \left[1 + \frac{1}{n}\right] + C_1^2}}_{C_2} \quad (13)$$

Für einen vorgegebenen Faktor C_1 kann die Schätzvariation $V_{X,\text{Schätz.}}$ als Produkt aus der unveränderlichen natürlichen Zufallsstreuung $V_{X,\text{nat}}$ und der Hilfsgrösse C_2 ausgedrückt werden. Von Interesse ist die Grösse von C_2 in Abhängigkeit des Stichprobenumfangs n . Für verschiedene Werte von C_1 wurde C_2 berechnet und im Diagramm in Bild 11 in Funktion von n aufgetragen:

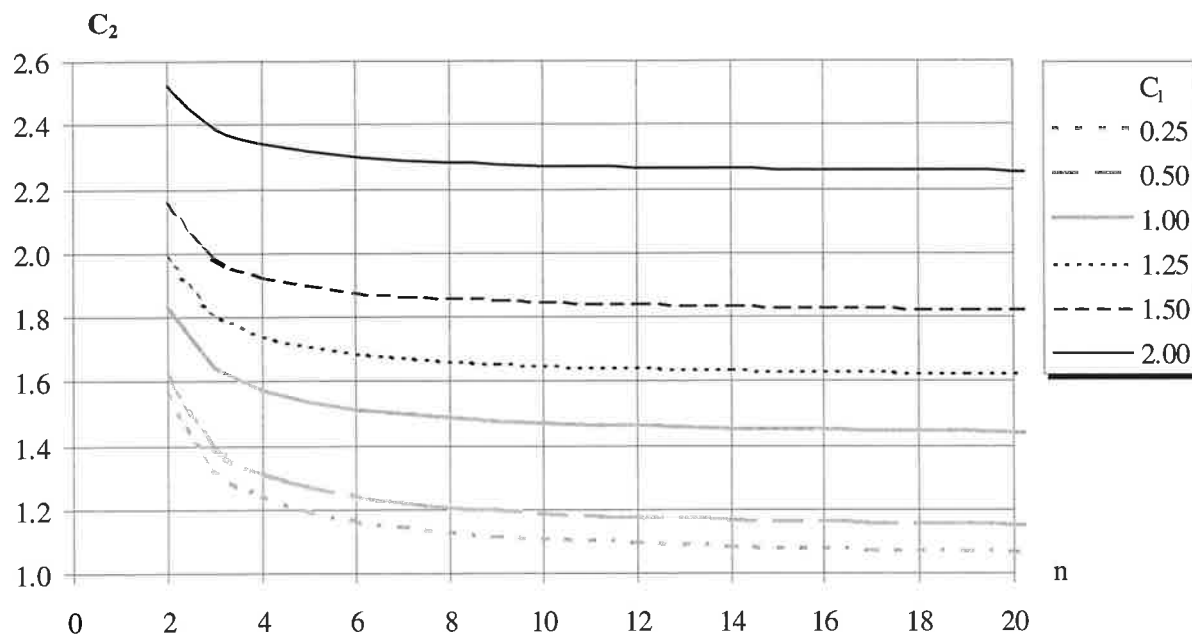


Bild 11 - Hilfsgrösse C_2 in Funktion des Stichprobenumfangs n für verschiedene C_1

Aus dem Diagramm in Bild 11 ist ersichtlich, dass sich die Hilfsgrösse C_2 unabhängig vom gewählten C_1 (Verhältnis zwischen der natürlichen Zufallsstreuung $V_{X,\text{nat}}$ und der Variation der systematischen Messabweichung $V_{v,\text{sys}}$) ab 10 bis 15 Messungen nicht mehr wesentlich verkleinert. Da die natürliche Zufallsstreuung eine unveränderliche Grösse ist, bedeutet dies, dass sich die Schätzvariation $V_{X,\text{Schätz.}}$ ab 10 bis 15 Messungen nicht mehr wesentlich verkleinert und ebendiese Anzahl Messungen pro Messgrösse ausreichend ist.

ANHANG B: FALLSTUDIE

B1 EINFÜHRUNG

Die durchgeführte Fallstudie sollte im Sinne einer Standortbestimmung über die technische Grenzen bei der Erhebung von Daten an Strassenbrücken zur Bestimmung der aktualisierten Kennwerte der Eigenlasten und der zugehörigen aktualisierten Lastfaktoren aufklären. So wurde die Wahl des Messkonzeptes nicht nur bezüglich der untersuchten Brücke optimiert, sondern auch im Hinblick auf eine umfangreichere Messkampagne an verschiedenen Brückenbauten im schweizerischen Strassennetz. Es bot sich die Gelegenheit, im Rahmen der Abbrucharbeiten an der Brücke, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit von zerstörungsfreien Messverfahren durch genauere zerstörende Verfahren zu überprüfen.

B2 MESSOBJEKT

Beim Messobjekt handelte es sich um die Überführung der Horwerstrasse über die Autobahn N2 im Abschnitt Kriens, Arsenal- Kantonsgrenze LU/NW. Das Messobjekt war die 3-feldrige, vorgespannte Stahlbetonbrücke, welche die Nationalstrasse N2 überspannte. Die Feldbreiten betragen 8,7, 24 und 8,7 m. Die Stützen (bestehend aus einer Reihe von 5 Stützen) standen direkt am Rande der N2, wobei die Stützenachsen mit der Brückenlängsachse einen Winkel von 60 bis 70° einschlossen. Bild 12 zeigt die Brücke in Blickrichtung Nord.



Bild 12 - Überführung Horwerstrasse, Blickrichtung Nord

Die Brückenplatte wies eine Breite von 8,0 m auf. Sie war als vorgespannter, konstanter Vollquerschnitt ausgeführt worden (statische Höhe: 60 cm). Seitlich an der Brückenplatte kragten 2,1 m breite Plattenstreifen aus, die als Trottoir funktionierten. Diese Trottoirplatten waren zwischen 14 und 20 cm stark. Der Konsolkopf wies Abmessungen von 25 cm x 25 cm auf. Die Brückenplatte

war sowohl mit den beiden Trottoirplatten, wie auch mit den Stützen monolithisch verbunden. Zwischen Belag und Stahlbeton der Brückenplatte war keine Dichtungsschicht vorhanden. Bild 13 zeigt den Brückenquerschnitt in Feldmitte schematisch.

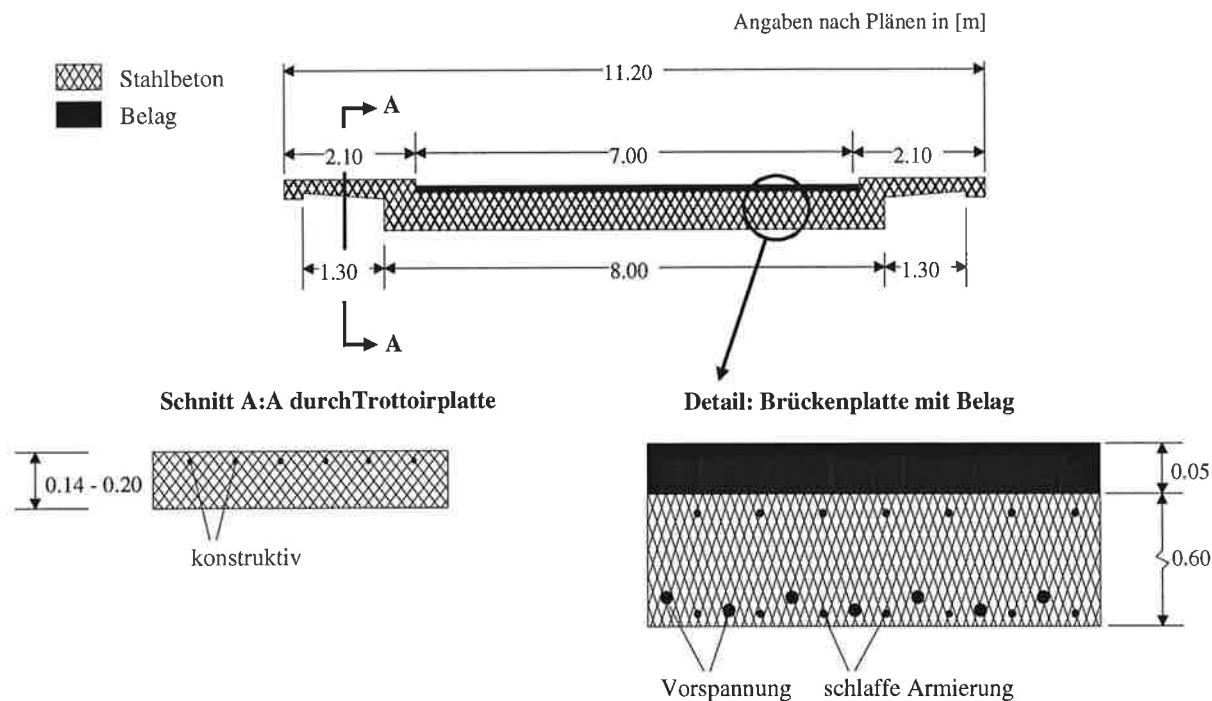


Bild 13 - Schematische Darstellung des Brückenquerschnittes in Feldmitte

Das Messobjekt wurde in den Monaten August bis Oktober 1997 abgebrochen. Im Rahmen dieser Demontage konnten am Oberbau der Brücke Messungen durchgeführt werden. Der Abbruch wurde durch die Entfernung des Belages eingeleitet und die Zerstörung der Brückenplatte in den beiden Randfeldern durch den Betonbeisser fortgeführt. Im Mittelfeld wurden streifenförmige Plattenteile abgetrennt und in ein Zwischendepot verbracht. Der Vorgang der Datenerhebung wurde wesentlich durch den Ablauf der Demontage bestimmt.

B3 MESSKONZEPT

Als Messgrößen wurden die Bauteildicken und die Dichte der Fahrbahnplatte bzw. des Belages festgelegt. Die in Abschnitt 4.6 formulierten Anforderungen an die Messverfahren wurden als Zielkriterien zur Bewertung herangezogen. Das in Bild 14 präsentierte Messkonzept erfüllte die Randbedingungen und die Zielkriterien am besten:

| | Fahrbahnplatten und Belag | Trottoirplatten |
|------------------------------|---|---|
| Erhebung der Abmessungen | Impact - Echo | Impact - Echo |
| Überprüfen der Abmessungen | Nachmessen an Schnitt- rändern der Abbruchstücke | Nachmessen an Schnitt- rändern der Abbruchstücke |
| Erhebung der Materialdichten | Bohrkerne | Bruchstücke |

Bild 14 - Messkonzept für die Fallstudie

B4 DURCHFÜHRUNG

Die Ermittlung der Materialdichten an den 12 aus der Fahrbahnplatte entnommenen Bohrkernen, sowie den Bruchstücken aus den Trottoirplatten wurde durch Wägen der Probestücke über und unter Wasser bewerkstelligt. Der Situationsplan mit den Entnahmestellen ist in Bild 18 gegeben. Mit dem Tauchverfahren konnte anhand der Archimedischen Auftriebskraft das Volumen der Probe bestimmt werden.

Die Impact-Echo Messungen wurden am 21. August 1997 vor Beginn der Abbrucharbeiten durchgeführt. Zwischen 6 und 9 Uhr morgens wurden nach einem vorgegebenen Messpunkteraster rund 77 Messpunkte aufgenommen. Der Situationsplan mit dem Messpunkteraster findet sich in Bild 19. Der Messvorgang ist in den Bildern 15 bis 17 dokumentiert. Exklusive Ermittlung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit wurden 20 bis 30 Messungen pro Stunde durchgeführt. Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit wurde anhand von Ultraschall-Messungen an Strukturelementen und an Bohrkernproben kalibriert.

Die Dicke des Belages konnte unmittelbar nach dem Herausnehmen des vorgeschrittenen Belages mit dem Messband erhoben werden. Nach dem Entfernen des Belages wurden die Punkte des Messrasters auf die Oberfläche des Stahlbetons aufgezeichnet. Im Zwischendepot wurden die Dicken der Stahlbetonelemente nachträglich mit dem Messband erhoben.

Die erhobenen Messdaten sind in Anhang B5 aufgeführt. Eine Zusammenfassung der ausgewerteten Daten ist in Kapitel 5.2 gegeben.

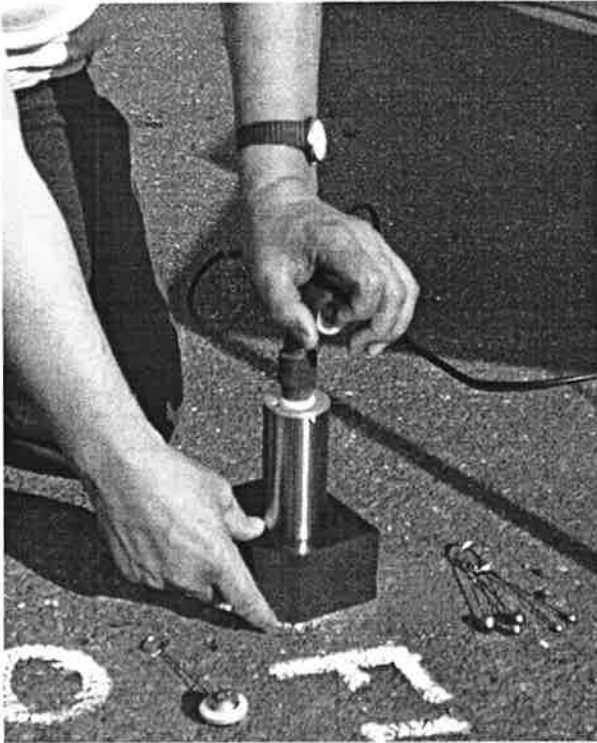


Bild 15 - Impact-Echo Messgerät (Sender und Empfänger) mit Hammer

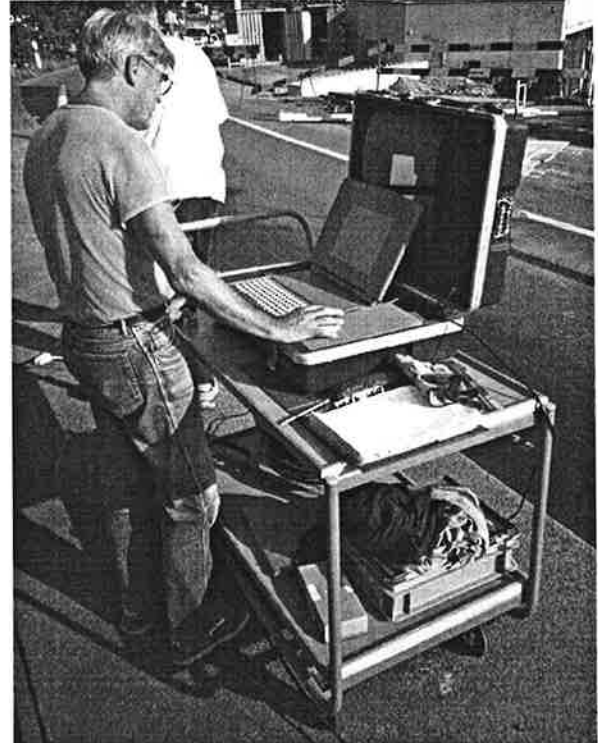


Bild 16 - Tragbarer Computer der die Messdaten registriert.



Bild 17 - Ermittlung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit am Bohrkern mit Ultraschall

B5 MESSWERTE

Die erhobenen Messwerte der Materialdichten sind in Tabelle 7 aufgelistet. Die Entnahmestellen der Bohrkerne und Handstücke sind in Bild 18 ersichtlich.

Tabelle 7 - Messwerte Dichten

| Nr. | Bezeichnung Probe | Masse [g] | Dichte Belag [g/cm ³] | Dichte Beton [g/cm ³] |
|-----|-------------------|--------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 | T1* | 7421 | | 2.42 |
| 2 | T2* | 4974 | | 2.43 |
| 3 | T3* | 2591 | | 2.46 |
| 4 | T4* | 6765 | | 2.44 |
| 5 | A2/3.0 | 1126 | 2.34 | |
| 6 | A2/3.1 | 2013 | | 2.46 |
| 7 | A2/3.2 | 3374 | | 2.47 |
| 8 | A2/3.3 | 5333 | | 2.46 |
| 9 | A5/6.0 | 1127 | 2.25 | |
| 10 | A5/6.2 | 5195 | | 2.46** |
| 11 | A5/6.3 | 4370 | | 2.47 |
| 12 | A5.0 | 1004 | 2.36 | |
| 13 | A5.1 | 5776 | | 2.48 |
| 14 | A5.2 | 2300 | | 2.43 |
| 15 | A5.3 | 2648 | | 2.47 |
| 16 | A8/9.0 | 712 | 2.33 | |
| 17 | A8/9.1 | 2965 | | 2.45 |
| 18 | A8/9.2 | 2344 | | 2.44 |
| 19 | A8/9.3 | 4348 | | 2.45 |
| 20 | 6.0 | 1077 | 2.33 | |
| 21 | 6.1 | 1431 | | 2.48** |
| 22 | 6.2 | 4528 | | 2.47 |
| 23 | 6.3 | 2150 | | 2.44 |
| 24 | 7.0 | 1260 | 2.34 | |
| 25 | 7.1 | 2353 | | 2.47 |
| 26 | 7.2 | 2095 | | 2.47 |
| 27 | 7.3 | 3498 | | 2.46 |
| 28 | 8.0 | 1363 | 2.29 | |
| 29 | 8.1 | 3677 | | 2.48 |
| 30 | 8.2 | 3223 | | 2.47 |
| 31 | 8.3 | 1414 | | 2.48 |
| 32 | 9.0 | 1149 | 2.32 | |
| 33 | 9.1 | 2782 | | 2.50 |
| 34 | 9.2 | 2158 | | 2.44 |
| 35 | 9.3 | 2926 | | 2.45 |
| 36 | 11.0 | 1071 | 2.34 | |
| 37 | 11.1 | 3587 | | 2.52 |
| 38 | 11.2 | 3416 | | 2.47 |
| 39 | 11.3 | 3794 | | 2.46 |
| 40 | 12.0 | 1015 | 2.31 | |
| 41 | 12.1 | 3438 | | 2.46 |
| 42 | 12.2 | 3633 | | 2.45 |
| 43 | 12.3 | 3822 | | 2.44 |
| 44 | 13.0 | 1033 | 2.30 | |
| 45 | 13.1 | 3731 | | 2.49 |
| 46 | 13.2 | 2997 | | 2.46 |
| 47 | 13.3 | 4317 | | 2.46 |

*: Handstücke

** : Messwert korrigiert, um den in der Probe enthaltenen Anteil Armierungseisen zu berücksichtigen.

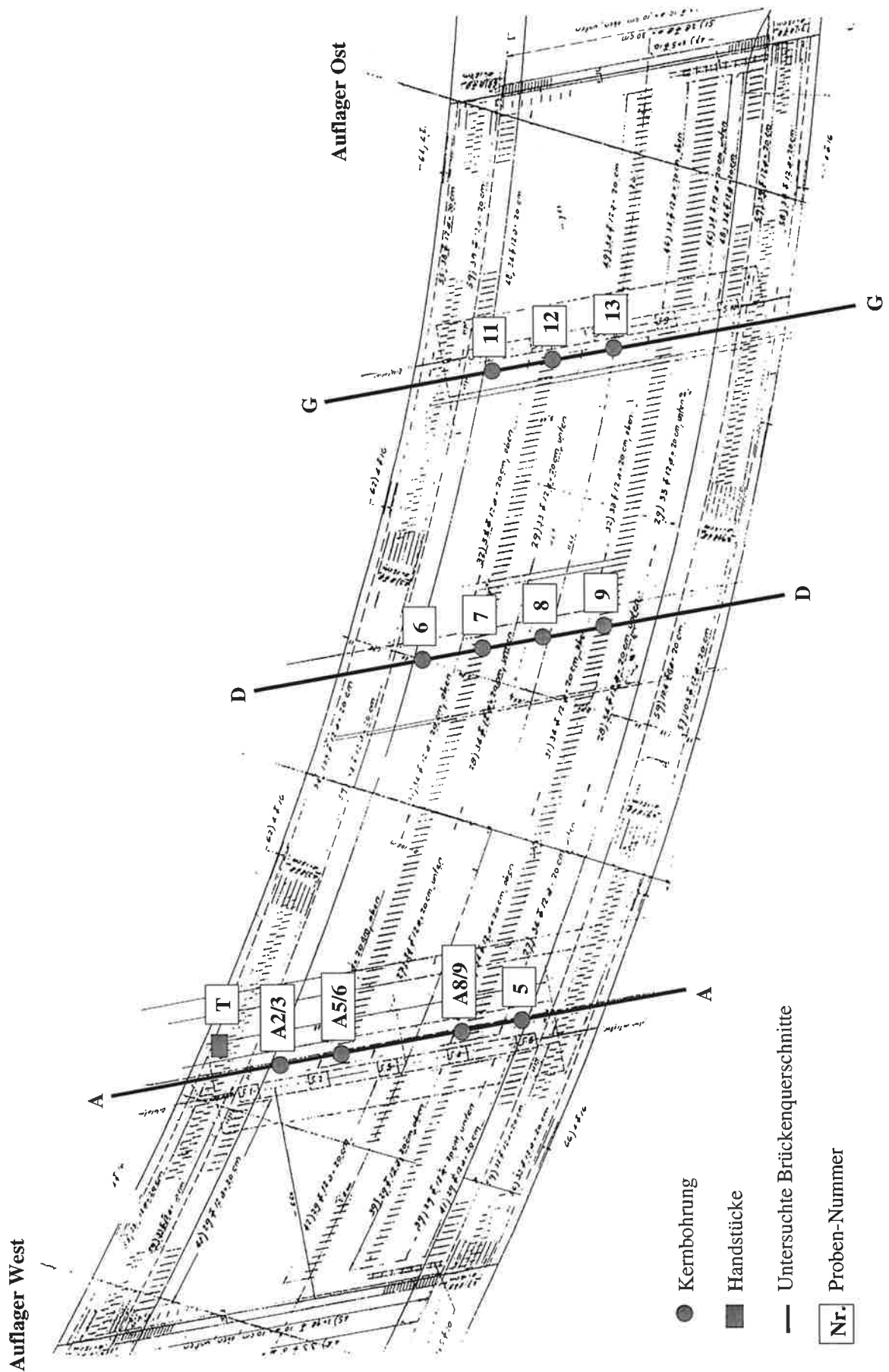


Bild 18 - Entnahmestellen der Bohrkern und Handstücke

Die erhobenen Messwerte der Dicken von Belag und Stahlbeton der Fahrbahnplatte sind in Tabelle 8 aufgelistet. Der Raster der Impact-Echo Messpunkte ist in Bild 19 ersichtlich.

Tabelle 8 - Messwerte Bauteildicken

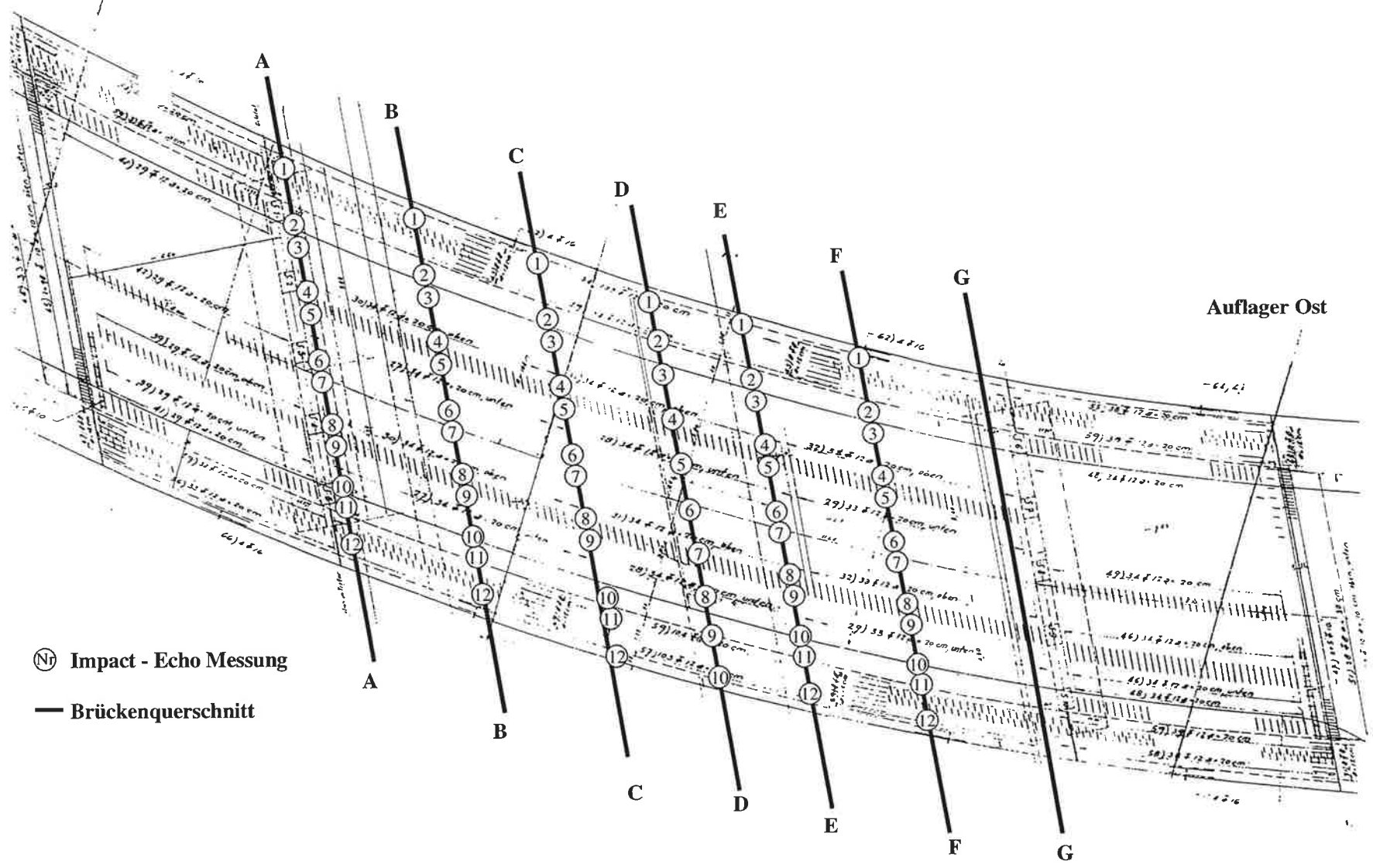
| Nr. | Bez. | Messung mit IE | | | Messung mit Messband | |
|-----|------|----------------|--------------|--------------|----------------------|------------|
| | | Belag [mm] | Beton 1 [mm] | Beton 2 [mm] | Belag [mm] | Beton [mm] |
| 1 | A 1 | - | 169 | 162 | - | 170 |
| 2 | A 2 | 83 | x | x | 80 | 560 |
| 3 | A 3 | 75 | 624 | 599 | 75 | 560 |
| 4 | A 4 | 79 | 599 | 575 | 75 | 580 |
| 5 | A 5 | k.T. | 604 | 580 | 65 | 580 |
| 6 | A 6 | 72 | 629 | 604 | 80 | 600 |
| 7 | A 7 | 76 | 602 | 578 | 80 | 600 |
| 8 | A 8 | k.T. | 604 | 580 | * | 590 |
| 9 | A 9 | 72 | 547 | 525 | * | 590 |
| 10 | A 10 | 132 | 750 | 720 | * | 585 |
| 11 | A 11 | 180 | 808 | 776 | * | 585 |
| 12 | A 12 | - | 169 | 162 | - | 170 |
| 13 | B 1 | - | 185 | 178 | - | 170 |
| 14 | B 2 | k.T. | 691 | 663 | 90 | 590 |
| 15 | B 3 | 81 | 655 | 629 | 90 | 590 |
| 16 | B 4 | k.T. | 614 | 589 | 85 | 610 |
| 17 | B 5 | k.T. | 614 | 589 | 85 | 610 |
| 19 | B 6 | 74 | 639 | 613 | 95 | 605 |
| 20 | B 7 | 81 | 630 | 605 | 95 | 605 |
| 21 | B 8 | k.T. | 691 | 663 | * | 600 |
| 22 | B 9 | 78 | 659 | 633 | * | 600 |
| 23 | B 10 | 145 | 540 | 518 | * | 605 |
| 24 | B 11 | 218 | 866 | 831 | * | 605 |
| 25 | B 12 | - | 197 | 189 | - | 170 |
| 26 | C 1 | - | 166 | 159 | - | 170 |
| 27 | C 2 | k.T. | 628 | 603 | 95 | 605 |
| 28 | C 3 | k.T. | 653 | 627 | 90 | 605 |
| 29 | C 4 | k.T. | 604 | 580 | 75 | 600 |
| 30 | C 5 | 72 | 608 | 584 | 75 | 600 |
| 31 | C 6 | 78 | 600 | 576 | 80 | 600 |
| 32 | C 7 | k.T. | 602 | 578 | 80 | 600 |
| 33 | C 8 | 76 | 627 | 602 | * | 610 |
| 34 | C 9 | k.T. | 607 | 583 | * | 610 |
| 35 | C 10 | 133 | 688 | 660 | * | 620 |
| 36 | C 11 | 169 | 751 | 721 | * | 620 |
| 37 | C 12 | - | 185 | 178 | - | 170 |
| 38 | D 1 | - | 168 | 161 | - | 170 |
| 39 | D 2 | - | 174 | 167 | - | 870 |
| 44 | D 3 | 80 | 588 | 564 | 70 | 590 |
| 45 | D 4 | k.T. | 594 | 570 | 80 | 600 |
| 46 | D 5 | k.T. | 594 | 570 | 80 | 595 |
| 47 | D 6 | k.T. | 624 | 599 | * | 610 |
| 48 | D 7 | 81 | 609 | 585 | * | 610 |
| 49 | D 8 | 150 | 858 | 824 | * | 600 |
| 50 | D 9 | - | 192 | 184 | - | 850 |
| 51 | D 10 | - | 158 | 152 | - | 160 |
| 54 | E 1 | - | 172 | 165 | - | 170 |
| 55 | E 2 | 73 | 610 | 585 | 95 | 600 |
| 56 | E 3 | 80 | 539 | 517 | 95 | 600 |
| 57 | E 4 | 80 | 578 | 555 | 90 | 610 |
| 58 | E 5 | k.T. | 585 | 562 | 90 | 610 |
| 59 | E 6 | k.T. | 607 | 583 | 90 | 615 |
| 60 | E 7 | k.T. | 607 | 583 | 90 | 615 |
| 61 | E 8 | 82 | 598 | 574 | * | 620 |
| 62 | E 9 | k.T. | 607 | 583 | * | 620 |
| 63 | E 10 | k.T. | 744 | 714 | * | 625 |
| 64 | E 11 | 118 | 994 | 954 | * | 625 |
| 65 | E 12 | - | 185 | 178 | - | 180 |
| 66 | F 1 | - | 174 | 167 | - | 170 |
| 67 | F 2 | 81 | 590 | 566 | 80 | 595 |
| 68 | F 3 | k.T. | 674 | 647 | 80 | 595 |
| 69 | F 4 | k.T. | 598 | 574 | 80 | 610 |
| 70 | F 5 | k.T. | 598 | 574 | 80 | 610 |
| 71 | F 6 | k.T. | 575 | 552 | 70 | 610 |
| 72 | F 7 | 84 | 586 | 562 | 70 | 610 |
| 73 | F 8 | k.T. | 598 | 574 | * | 615 |
| 74 | F 9 | k.T. | 647 | 621 | * | 615 |
| 75 | F 10 | 150 | 681 | 654 | * | 615 |
| 76 | F 11 | 200 | 695 | 667 | * | 615 |
| 77 | F 12 | - | 188 | 180 | - | 180 |

Beton 1 An Bohrkern ermittelter Gradient
 Beton 2 An mittlerer Betongeschwindigkeit ermittelt
 k.T. Trennschicht Belag / Stahlbeton auf Scan nicht ersichtlich

* kein Messwert vorliegend
 - Messpunkt im Bereich der Trottoirplatte, d.h. kein Belag vorhanden

Auflager West

Auflager Ost



- Ⓝ Impact - Echo Messung
- Brückenquerschnitt

Bild 19 - Raster der Impact-Echo Messungen

B6 STATISTISCHE AUSWERTUNG

AUFLAST

Der Belag wird in die Bauteilklasse 3 nach Tabelle 2 eingeteilt. Dementsprechend sind die Messgrößen Dichte ρ und Belagsdicke h erhoben worden. Die Modellfunktion für die Auflast pro Quadratmeter wird folgendermassen formuliert:

$$q = h \cdot \rho \cdot g \quad (14)$$

q : Auflast

h : Bauteildicke

ρ : Dichte

g : 9.81 m/s²

Der aktualisierte Kennwert der Auflast berechnet sich mit (8) aus:

$$q_{\text{akt}} \cong v_q \cdot m_h \cdot m_\rho \cdot g \quad (15)$$

q_{akt} : aktualisierter Kennwert der Auflast

m : empirischer Mittelwert: Gewogenes Mittel für die Ermittlung von m_ρ

v : Systematische Messabweichung

Die Variation der Auflast berechnet sich nach (11) zu:

$$V_q \cong \sqrt{V_{q,\text{mod}}^2 + V_{h,\text{Schätz}}^2 + V_{\rho,\text{Schätz}}^2} \quad (16)$$

V_q : Variation der Auflast

$V_{q,\text{mod}}$: Modellunschärfe

$V_{h,\text{Schätz}}$: Schätzvariation der Bauteildicke nach (11)

$V_{\rho,\text{Schätz}}$: Schätzvariation der Belagsdichte nach (11)

EIGENLASTEN

Da im Rahmen der durchgeführten Erhebungen die Abmessungen des Stahlbetons und die Dichte des Betons gemessen worden sind, wird die Eigenlast G getrennt nach Stahleigenlast G_a (Armierung und Spannkabel) und der Betoneigenlast G_c ermittelt. Die Stahleigenlast wird anhand der Angaben in den Plänen und in der Literatur berechnet. Die Betoneigenlast kann in gleicher Weise wie die Auflasten ermittelt werden, wobei die Fahrbahnplatte ebenfalls in die Bauteilklasse 3 nach Tabelle 2 eingeteilt wird. Die Modellfunktion für die Eigenlast pro Quadratmeter wird wie folgt formuliert:

$$G = G_a + G_c = G_a + h_c \cdot \rho_c \cdot g \quad (17)$$

G : Eigenlast

G_a : Eigenlast Stahl

G_c : Eigenlast Beton

h_c : Bauteildicke Beton

ρ_c : Dichte Beton

Der aktualisierte Kennwert der Eigenlast berechnet sich nach (8) aus:

$$G_{\text{akt}} = v_{G_a} \cdot \overline{G}_a + v_{G_c} \cdot m_{h_c} \cdot m_{p_c} \cdot g \quad (18)$$

G_{akt} : Mittelwert

m : empirischer Mittelwert: Gewogenes Mittel für die Ermittlung von m_{p_c} . Sind Stahlteile in den Bohrkernproben enthalten muss der Messwert entsprechend korrigiert werden.

v : Systematische Messabweichung, (Bias der Stahleigenlast $v_{G_a} = 1.05$ nach [2])

\overline{G}_a : Mittelwert der Stahleigenlast (aus Plänen, Stahldichte nach [3])

Die Variation der Eigenlast berechnet sich nach (11) zu:

$$V_G \cong \sqrt{V_{G,\text{mod}}^2 + \frac{\overline{G}_a^2 \cdot V_{G_a}^2 + \mu_{G_c}^2 \cdot V_{G_c,\text{Schätz.}}^2}{\mu_G}} \quad (19)$$

V_G : Variation der Eigenlast

$V_{G,\text{mod}}$: Modellunschärfe

V_{G_a} : Variation der Stahleigenlast (= 0.03 nach [2])

V_{G_c} : Variation der Betoneigenlast (siehe Verfahren Auflast)