Belastungsvorschriften für Brücken der Schwertransportstrassen

Autor(en): **Basler, Konrad**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **85 (1967)**

Heft 20

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-69456

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Belastungsvorschriften für Brücken der Schwertransportstrassen

DK 624.042.3:624.21

Von Dr. **Konrad Basler,** Ingenieurbüro Basler und Hofmann, Zürich

Erweiterte Fassung des Vortrages, gehalten am 14. Okt. 1966 an der ETH anlässlich der Studientagung über Neuerungen in den Revisionsentwürfen der SIA-Normen Nr. 160, 161 und 162, durchgeführt von der SIA-Fachgruppe der Ingenieure für Brückenbau und Hochbau

Vorwort

Nachstehend werden die im Vernehmlassungsentwurf der SIA-Belastungsnorm Nr. 160 erwähnten Belastungsannahmen für Brücken in Schwertransportstrassen und die dazugehörigen Transportvorschriften beschrieben und begründet. Die ganze Arbeit ist ein Versuch, die vielen möglichen Schwertransporte auf sog. Export- und Energieversorgungsstrassen in einer Norm bzw. Vorschrift so zu fassen, dass einerseits für die Bemessung der Kunstbauten genügend einfache Unterlagen entstehen, und andererseits die Transportunternehmer ein möglichst grosses Feld von Freiheiten in der Zusammenstellung ihrer Schwertransporte erhalten, dessen Grenzen aber auf die Bemessungsunterlagen abgestimmt sind.

Zur Gliederung des Inhaltes wird im Teil A die eigentliche Belastungsnorm gegeben und im Teil B die entsprechende Vorschrift für die Transportunternehmer. Unter C werden diese beiden Teile kommentiert und auch auf eine Möglichkeit zur Kennzeichnung weniger hoch zu belastender oder vorhandener Brücken hingewiesen. Die Mehrkosten einer so bemessenen Schwertransportstrassenbrücke gegenüber einer Hauptstrassenbrücke werden im Teil D für eine Autobahnüberführung analysiert.

A. Belastungsannahmen

Die Lasten für die Bemessung der Brücken für Schwertransporte sind im nachfolgenden Abschnitt und der zugehörigen Tafel (Bild 1) umschrieben. Man unterscheidet zwei Kategorien Schwertransporte:

Kategorie A: Transporte mit Achslasten von 22,5 t bis zu einer Gesamtlast von 360 t.

Kategorie B: Transporte mit Achslasten von 30 t bis zu einer Gesamtlast von 480 t.

Bei der Berechnung ist immer der ungünstigere der beiden Lastfälle Kategorie A oder B anzunehmen. Die Brücken müssen zudem die Bedingungen des Art. 9 der SIA-Norm 160 erfüllen.

1. Als Lastverteilung im *Längssinn* der Brücke sind zwei gleichmässig verteilte Streckenlasten p über Strecken c_1 und c_2 von je höchstens 14,40 m Länge so anzunehmen, dass der ungünstigste Einfluss für die zu untersuchende Schnittgrösse entsteht. Die beiden Streckenlasten müssen unter sich einen Abstand haben, der gleich oder grösser als die grössere der beiden Laststrecken c_1 bzw. c_2 ist.

2. Im *Quersinne* sind die Lasten nach Kategorie A als Streckenlast $p_1 = 12{,}5$ t/m′ mit einer Exzentrizität, die bis auf zwei Meter an die Fahrbahnränder reichen kann, anzunehmen, zuzüglich eines Stosszuschlages von $\varphi_2/3$ (jedoch mindestens 5%). Die Lasten nach Kategorie B sind als Streckenlast $p_2 = 16{,}7$ t/m′ in Fahrbahnmitte ohne Stosszuschlag einzuführen.

3. Für die *Nachrechnung der Fahrbahnelemente* ist, unabhängig von der Fahrbahnbreite, eine einzige Lastengruppe bestehend aus acht Achsen mit Abständen von je 1,80 m anzunehmen. Entlastende Achsen sind wegzulassen. Jede Achse besitzt vier Räder mit den äusseren Radabständen von 60 cm. Die Berührungsfläche eines Pneus ist als Rechteck von 30×40 cm Seitenlänge oder als Kreis von 40 cm Durchmesser einzuführen.

Bei der Kategorie A muss angenommen werden, dass die Mitte der äussersten Radkolonne der Lastengruppe bis zu 70 cm an den Fahrbahnrand hinausgeschoben werden kann. Der innere Radabstand beträgt 1,40 m. Für die Kategorie B ist die Lastengruppe mit einem inneren Radabstand von 1,40 m bis 2,60 m in Fahrbahnmitte anzunehmen.

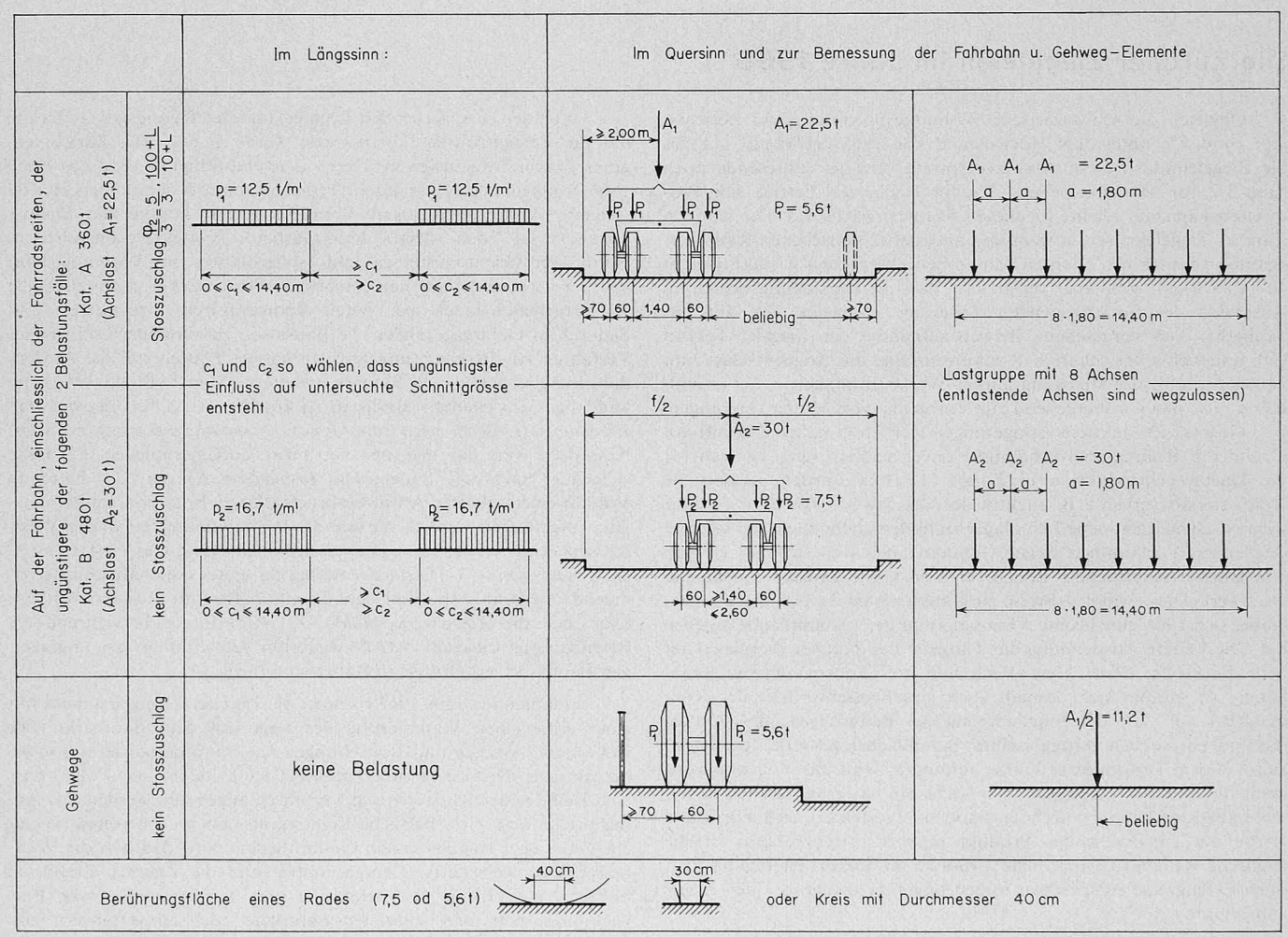


Bild 1. Belastungen von Schwertransportstrassenbrücken

4. Gleichzeitig wirkende *übrige Verkehrslast* ist nur für den Schwertransport der Kategorie A bei Brücken mit richtungsgetrenntem Verkehr in entgegengesetzter Fahrrichtung anzunehmen.

5. *Die Beanspruchung der Gehwege* ergibt sich aus der Wirkung einer halben Achslast $A_1/2 = 11{,}2$ t ohne Stosszuschlag, die im Längssinne an beliebiger Stelle auftreten kann und deren Resultierende im Quersinne bis zu einem Meter an das Geländer möglich ist.

6. *Brücken,* die kürzer sind als ihre Fahrbahnbreite, müssen über ihre ganze Fahrbahn zur Aufnahme von 30 t-Achslasten ausgebildet werden.

7. Auf *Strassenbrücken mit Bahnen* sind gleichzeitig ein Schwertransport von 360 t mit Eisenbahn, jedoch nicht ein Schwertransport von 480 t zusammen mit Bahnlasten zu berücksichtigen.

8. Die *zulässigen Spannungen* sind für alle Brückenteile die selben wie für Hauptlasten der gewöhnlichen Strassenbrücken. Für Hauptträger in Stahl brauchen keine Spannungsabminderungen infolge Ermüdung berücksichtigt zu werden.

B. Vorschriften für den Transportunternehmer

1. Schwertransporte können normalerweise bis zu Achslasten von $A_1 = 22{,}5$ t (Kategorie A) geführt werden. Grössere Achslasten bis zum Höchstwert von $A_2 = 30$ t (Kategorie B) sind nur unter erschwerenden Bedingungen möglich.

Beide Kategorien A und B müssen nach den folgenden Vorschriften zusammengestellt und gefahren werden.

2. Weist ein *Fahrgestell* mehr als acht Achsen auf, sind die Achsen in zwei Gruppen von je höchstens acht Achsen so anzuordnen, dass zwischen den beiden Gruppen der geringste Achsabstand mindestens

die Distanz $(z + 1)\dfrac{A_{\text{vorh}}}{A_{\text{zul}}}\,1{,}80$ m aufweist.

Darin bedeuten:

z die Achszahl der grösseren der beiden Gruppen,

A_{vorh} die höchste effektiv auftretende Achslast und

A_{zul} die nach Absatz 1 zulässige Achslast.

Auf mechanischem oder hydraulischem Wege muss ein genauer Lastausgleich auf alle Achsen einer Gruppe garantiert sein. Alle Räder eines Transportes müssen gleichzeitig bremsbar sein.

3. Die in Absatz 1 zugestandene Achslast ist nur zulässig, falls der *Achsabstand* mindestens 1,80 m beträgt. Wird dieser Abstand unterschritten, ist die in Absatz 1 definierte höchstzulässige Achslast im Verhältnis des Achsabstandes zu 1,80 m abzumindern.

4. Jede *Achse* muss mindestens vier Räder haben, eine Spurbreite von mindestens 3,00 m aufweisen und aus zwei gefederten Pendelachsen bestehen, die einen genauen Lastausgleich auf alle Räder einer Achse gewährleisten. Bei einer Vierradachse darf kein Radabstand (Mitte–Mitte gemessen) weniger als 60 cm betragen, und die Berührungsfläche des Pneus auf eine ebene Fläche soll unter Vollast 1200 cm² nicht unterschreiten. Für den Fall einer Achtradachse gelten obige Masse für jedes Radpaar (Zwillingsrad).

Bei Unterschreitung der Spurbreite, des Radabstandes oder der Berührungsfläche unter das betreffende Sollmass muss die in Absatz 1 gegebene höchstzulässige Achslast proportional dem unterschrittenen Mass zum Sollmass abgemindert werden (Multiplikation der Abminderungsfaktoren bei mehreren Unterschreitungen, einschliesslich derjenigen aus Absatz 3).

5. Mit *Schwertransporten* der Kategorie A darf nicht näher als 50 cm an den Randstein gefahren werden. Der übrige Verkehr ist in der Gegenrichtung auf unbelegten Fahrbahnstreifen zugelassen, falls es sich nicht gleichzeitig um die Begegnung eines weiteren Schwertransportes handelt. In gleicher Richtung fahrende Fahrzeuge müssen einen Abstand von mindestens 30 m zum Lastenzug des Schwertransportes einhalten. Wenn die dem Zugfahrzeug näher gelegene Achsgruppe die höchstzulässige Folge von acht Achsen aufweist, und diese Achslasten 7/8 ihres zugestandenen Höchstwertes überschreiten, so sind auch diese Schwertransporte in Brückenmitte zu führen.

6. *Schwertransporte* der Kategorie B sind genau in Fahrbahnmitte durch Seilzug mit höchstens 2 km/h Geschwindigkeit über die Brücke zu ziehen. Während der Überfahrt bleibt die gesamte Brücke, auch wenn sie fahrrichtungstrennende Abschrankungen besitzt, für allen übrigen Verkehr gesperrt. Das Zugfahrzeug mit der Seilwinde muss für den Seilzug so aufgestellt und eventuell verschoben werden, dass es zu keiner Zeit über der gleichen Spannweite steht wie die Achsen des Schwertransportes.

C. Betrachtungen zur Belastungsnorm für Brücken in Schwertransportstrassen

a) Allgemeines

Die Ausgangsdaten für die Festsetzung der oberen Lastgrenze für Schwertransporte ergeben sich aus der Feststellung, dass heute (1966) in der Schweiz Montagehallen mit Kranen von 300 t (im Ausnahmefall 320 t) Hakenlast bestehen, ebenso ein Rheinhafenkran und ein SBB-Fahrgestell gleicher Tragkapazität. Mit einer Tara von 50% der Nutzlast beträgt das Bruttogewicht des Transportes $1{,}5 \times 320 = 480$ t. Um dieses Bruttogewicht auf mechanischem Wege einfach auf Achsen zu verteilen, sollte die Achszahl nicht grösser als 16 sein (siehe Bild 2), was eine Achslast von $480/16 = 30$ t ergibt.

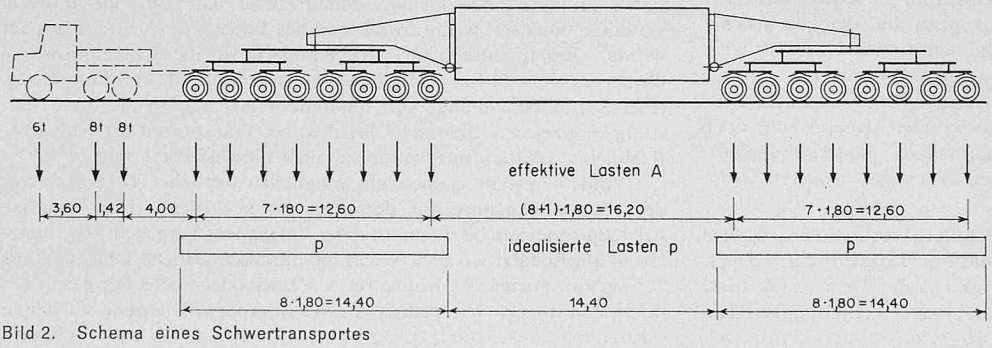
Da solche Transportfälle selten vorkommen, dürfen für das Verschieben solcher Lasten über Brücken die grösstmöglichen Einschränkungen verlangt werden: Sperrung der Brücke für jeden übrigen Verkehr, Trennung des Zugfahrzeuges vom Lastenzug, Befahren der Brücke in Fahrbahnmitte bei einer Höchstgeschwindigkeit von 2 km/h.

Eine Brücke offeriert auch ein gewisses Tragvermögen für Lastenzüge geringeren Gewichtes, die ohne die oben genannten Einschränkungen zulässig sind.

Aus den nachfolgenden Überlegungen geht die Grössenordnung solcher stark aussermittig erlaubter Transporte hervor. Diese werden als Transporte der Kategorie A bezeichnet, im Gegensatz zu den zentrisch geführten, welche Transporte der Kategorie B genannt werden.

Sogenannt zentrische Führung der Transporte nach Kat. B schliesst ein kleines Mass von möglichen Exzentrizitäten e_2 nicht aus. Diese können verursacht sein durch ungenaues Fahren und Zentrieren der Nutzlast über den Anhängern, Quergefälle in der Fahrbahn, Krümmungen in der Brückenaxe und durch Asymmetrie im Querschnitt, die eine Verschiebung des Schubmittelpunktes aus der Fahrbahnmitte bewirkt. Um diesen Einflüssen Rechnung zu tragen, wird angenommen, dass Transporte der Kategorie B bis zu einem Zehntel der Fahrbahnbreite von der genauen Brückenmitte abweichen können.

Die für exzentrische Belastung am meisten gefährdeten Querschnitte sind die offenen, dünnwandigen, wovon ein typisches Beispiel in Bild 3 gegeben ist. Für dieses Beispiel soll die zulässige Schwerverkehrslast – die nach Abschnitt B eine Exzentrizität e_1 von halber Fahrbahnbreite minus zwei Meter aufweisen darf und einen Stosszuschlag von $\varphi_2/3$ bewirkt – so festgelegt werden, dass im Untergurt die selbe Zugspannung erzeugt wird wie aus dem Transport der Kategorie B mit der kleinen Exzentrizität e_2 und ohne Stosszuschlag.



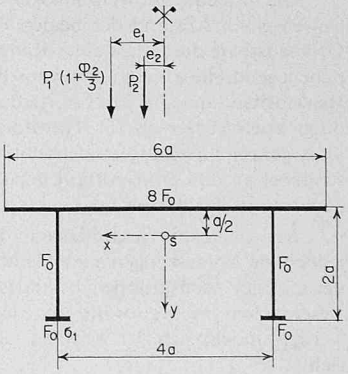


Bild 2. Schema eines Schwertransportes

Bild 3 (rechts). Modell eines offenen dünnwandigen Brückenquerschnittes

Das Längenmass a in Bild 3 sei 2,00 m, und die Fahrbahnbreite sei gleich dem Hauptträgerabstand, somit 8 m. Daraus folgt $e_1/a=1$, $e_2/a=2/5$. Für φ_2 wird ein mittlerer Wert von 20% eingesetzt, was einen Stossfaktor von $1+\frac{\varphi_2}{3}=1+\frac{20}{300}=\frac{16}{15}$ ergibt. Durch Reduktion der Belastung auf den Schubmittelpunkt, der hier in der Symmetrie-Ebene liegt, entstehen die beiden Lastfälle p_y und m_D:

Schwertransport Kat. A	Schwertransport Kat. B
$p_y = +p_1$	$p_y = +p_2$
$m_D = +p_1\, e_1$	$m_D = +p_2\, e_2$

Bei Brücken dieses Types entsprechen die Randbedingungen aus Verdrehung auch denjenigen aus Biegung, weshalb sich das Bimoment M_ω zum Biegemoment M_y verhält wie die oben gegebenen Belastungskomponenten. Überlagerung der Normalspannungen aus Biegung und Wölbtorsion ergeben für den Querschnittspunkt 1:

$$\sigma_1 = \frac{M_y}{I_{yy}}\, y_1 + \frac{M_\omega}{I_{\omega\omega}}\, \omega_1$$

$$= \frac{M_y}{\frac{23}{3}\, a^2 F_0}\, \frac{3}{2}\, a + \frac{e\, M_y}{\frac{424}{15}\, a^4 F_0}\, \frac{14}{5}\, a^2$$

$$= \underline{\frac{M_y}{a F_0}\, \frac{3}{2} \left[\frac{3}{23} + \frac{e}{a}\, \frac{7}{2 \cdot 53} \right]} .$$

Werden mit η die Summe der Einflussordinaten und mit A_1 bzw. A_2 die zulässigen Achslasten bezeichnet, so sind die Biegemomente M_{y1} und M_{y2} aus Kategorie A bzw. B

$$M_{y1} = A_1 \left(1 + \frac{\varphi_2}{3}\right) \eta = A_1 \frac{16}{15}\, \eta$$

$$M_{y2} = A_2\, \eta .$$

Gleichheit der Randspannungen im Zuggurt führt daher zu folgendem Verhältnis der Achslasten A_1/A_2:

$$\sigma_{1,1} = \sigma_{1,2} .$$

$$\frac{A_1 \frac{16}{15}\eta}{a F_0}\, \frac{3}{2} \left[\frac{3}{23} + \frac{7}{2 \cdot 53} \right] = \frac{A_2\, \eta}{a\, F_0}\, \frac{3}{2} \left[\frac{3}{23} + \frac{2}{5}\, \frac{7}{2 \cdot 53} \right]$$

oder

$$\frac{A_1}{A_2} = \underline{\frac{3 \cdot 239}{2 \cdot 479} \simeq 0{,}75} .$$

Mit $A_2 = 30$ t ergibt dies $A_1 = 0{,}75 \times 30 = 22{,}5$ t .

b) Die Belastungsnorm

zu 1.) Für die Bestimmung des ungünstigsten Lasteinflusses auf eine Schnittgrösse ist es wesentlich zu wissen, wie nahe die beiden Lastgruppen zusammenrücken können. Eine sichere Annahme wäre, den Minimalabstand «null» zuzulassen. Überlegungen für das Feldmoment eines einfachen Balkens mittlerer Spannweite oder für das Stützmoment eines durchlaufenden Balkens kleinerer Spannweite zeigen jedoch, dass eine namhafte Verringerung der Biegemomente erreichbar ist durch Sperren des Lastgruppenabstandes auf ein möglichst hohes Mass.

Die bis heute mit sechzehn Achsen ausgeführten Schwertransporte weisen einen Abstand der beiden Radgruppen auf, der von gleicher Grösse ist wie die Länge einer Radgruppe selbst (Bild 2). Es ist daher naheliegend, diese Feststellung zur Bedingung zu postulieren. Für den Reaktorbau sind die Transportstücke gleich hohen Gewichtes allerdings noch kürzer als für Transformatoren oder Generatoren; doch ist es gesamtwirtschaftlich betrachtet dann billiger, längere Transportschnäbel an das Transportgut anzubauen als einen geringeren Gruppenabstand zuzulassen.

Bei kleineren Gesamtlasten, die häufiger vorkommen, werden jedoch die Abmessungen auch kleiner, und das Bedürfnis zur Verminderung des Achsgruppenabstandes erhöht sich. Dem kann ohne wesentlichen Mehraufwand für das Bauobjekt Rechnung getragen werden, indem sich der Abstand nach der Achszahl des Transportes richtet.

zu 2). Mit einer höchstzulässigen Achsfolge von 1,80 m ergibt sich die für die Auswertung von Einflusslinien einzusetzende Streckenlast:

beim Transport der Kategorie A

Achslast $A_1 = 22{,}5$ t : $p_1 = \frac{22{,}5 \text{ t}}{1{,}80 \text{ m}} = 12{,}5$ t/m¹

beim Transport der Kategorie B

Achslast $A_2 = 30$ t : $p_2 = \frac{30 \text{ t}}{1{,}80 \text{ m}} = 16{,}7$ t/m¹ .

Die beim Transport der Kategorie A anzunehmende Exzentrizität des Lastenzuges bezüglich Brückenmitte ergibt sich aus den Betriebsvorschriften B, Absätze 4 und 5, wonach die halbe Spurbreite mindestens 1,50 m betragen muss und nicht näher als 50 cm an den Randstein gefahren werden darf.

An die Fahrgeschwindigkeit des Transportes der Kategorie A werden keine Bedingungen geknüpft. Da es sich aber um mindestens drei Meter breite Transportzüge handelt, kann die Geschwindigkeit bei Vollast nicht hoch sein. Zudem muss durch ein hydraulisches oder ein mechanisches System ein Ausgleich aller Radlasten sichergestellt werden, und die gefederten Achsen müssen luftbereifte Räder haben. Daher scheint es sinnvoll, den in der heute gültigen SIA-Norm 160 (1956), Art. 9, festgelegten Stosszuschlag für Schwertransporte über Hauptstrassenbrücken zu übernehmen mit $\varphi_2/3$.

zu 3). Damit es gelingt, trotz der Vielfalt der Vehikel eine repräsentative Berechnung der Fahrbahnelemente zu spezifizieren, bedarf es der Annahme, dass eine Vergrösserung der Radabstände keine ungünstigere Lokalbeanspruchung verursacht und eine Verringerung der Achsabstände dann zulässig ist, wenn die durchschnittliche Belastung (die Streckenlast) nicht vergrössert wird.

Die erste Annahme bezieht sich auf die Lage der Radlasten in Brückenquerrichtung und scheint deshalb zulässig, weil der Lastenzug im Querschnitt verschoben werden soll, um die (für einen Querträgers oder eine Platte) ungünstigste Belastungslage zu erhalten. Bei der zweiten Annahme ist zu bedenken, dass die Unterschreitung des vorgeschriebenen Achsabstandes von 1,80 m nicht beliebig gross sein wird; $a = 1{,}20$ m dürfte das konstruktiv notwendige Minimalmass darstellen.

zu 4). Die beiden Formulierungen, für den Ingenieur einerseits und den Transportunternehmer oder das Überwachungsorgan andererseits, decken sich zwar nicht, aber der begangene Fehler in dieser einfachen Festsetzung ist tolerierbar klein.

Da die Kategorie A-Transporte auf nicht richtungsgetrennten Fahrbahnen überallhin verschoben werden, ist für ausreichende Bemessung der Fahrbahnplatte und der Querträger immer gesorgt; das Problem bezieht sich nur auf die Hauptträger. Angenommen, es rolle über eine vierspurige Autobahnbrücke ($b \geqslant 12$ m) ein Schwertransport der Kategorie A mit oberstem zulässigem Gewicht (360 t), so liegt es in der Natur solcher Transporte, dass zwei Fahrspuren belegt werden, denn die Ausbaunormen für Exportstrassen sehen dafür eine minimale Lichtraumbreite von 6,00 m vor. Wenn auch auf den beiden übrigen Fahrspuren noch Personenwagen mit grösster Dichte (alle 5 m einer) fahren sollten, so ergäbe die Belastungsdichte rd. $\frac{1{,}5 \text{ t}}{3 \cdot 5 \text{ m}^2} = 0{,}1$ t/m². Ist die Brücke verdrehungsempfindlich und sind somit die Quereinflusslinien steil, so ist der Einfluss auf die Spannungen in der kritischen Fahrbahnhälfte aus Belastung in der anderen Fahrbahnhälfte noch kleiner (entsprechend 0,05 t/m² gleichmässig verteilter Nutzlast, wenn im Beispiel des Bildes 3 $a = 3{,}00$ m gesetzt würde). Bei torsionssteifen Querschnitten ist die Quereinflusslinie flacher, doch bedarf es, bei 0,1 t/m² Nutzlast auf 6 m Fahrbahnbreite, einer Verkehrsbandlänge von mindestens 200 m, um die Mehrbelastung zu erreichen, die solche Brücken bei Transporten der Kategorie B ohnehin erhalten und wofür sie auch dimensioniert sind.

Anders verhält es sich um möglichen Verkehr vor und hinter dem Schwertransport auf derselben Fahrbahnseite. Die verlangte Freihaltezone von je 30 m ist über folgenden Vergleich von Nutzlasten abgeschätzt worden. Wenn die durchschnittliche Belastung aus Schwertransporten der Kategorie A kleiner oder höchstens gleich der durchschnittlichen Hauptstrassenbelastung nach neuestem Vorschlag (September 66) sein soll, so ergibt dies in t/m² und für ein 6 m breites Fahrband formuliert, folgende Freihaltedistanz x:

$$\frac{360\left(1+\frac{\varphi_2}{3}\right)}{6\cdot(50+2\,x)} \leqslant \left[0{,}45+\frac{36}{6\,(50+2\,x)}\right](1+\varphi_2)\,.$$

Mit $\varphi_2 = 0{,}20$ folgt $x \geqslant 28$ m.

zu 5). Die Festigkeit einer Gehwegkonsole sollte irgendwie im Verhältnis zu den Fahrzeuggewichten stehen. Daher sind auch für Brücken in Schwertransportstrassen höhere Beanspruchungen vorgesehen als bei Haupt- oder Nebenstrassenbrücken. Da sich nach der heute gültigen Norm 160 (1956) das Verhältnis der Achslasten von Nebenstrassenbrücken zu Hauptstrassenbrücken wie 1 : 1,5, (10 t zu 15 t) und von diesen zu den Schwerverkehrstrassenbrücken wiederum wie 1 : 1,5 verhält (15 t zu 22,5 t), so wäre es sinnvoll, die «entgleiste Radlast» ebenfalls proportional zu erhöhen von 4 t über 6 t auf 9 t für Brücken von Neben-, Haupt-, bzw. Schwertransportstrassen. Nun ist es aber gelungen, die grösste Radlast von 7,5 t, die bereits in Art. 9 der SIA Norm 160 (1956) vorkommt, bei diesem Vorschlag konstant zu halten. Um die 7,5 t-Raddrücke nicht zu überschreiten, ist daher der Umweg über eine «entgleiste Halbachse» gewählt worden.

zu 6). Es ist möglich, dass enge Unterführungen für Fussgänger oder Durchlässe für Bäche und Kanäle vom Führer eines Transportes der Kategorie B nicht als Brücke erkannt werden. Solche kurzen Bauwerke, die man eigentlich nicht mehr als Brücke bezeichnen sollte, müssen auch sicher für nicht in Fahrbahnmitte gefahrene Transporte dieser Kategorie B sein.

zu 7). In Absatz 3, Art. 9, der SIA-Norm 160 (1956) ist ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die zulässigen Spannungen auch für die Ausnahme eines Schwertransportes einzuhalten seien. Es besteht kein Grund, diese Bestimmung hier für die Transporte der Kategorie A zu ändern. Bei den Transporten der Kategorie B mit ihrer sorgfältigen Überwachung und dem seltenen Eintreffen dürfte eine geringe Überschreitung eventuell toleriert werden. Statt dieses Zugeständnis aber in Spannungen auszudrücken, wird vorgeschlagen, auf die Einführung eines Stosszuschlages ganz zu verzichten, obwohl jede Bewegung einer Last auf der Brücke gewisse Amplituden in den Spannungen verursachen wird.

Hinsichtlich Ermüdung der Hauptträger (nicht der Fahrbahn, für welche die 7,5 t Radlasten massgebend sind) wird folgende Überlegung gemacht: Auch bei häufiger Benutzung einer Brücke durch Schwertransporte ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Grenzbelastung ($16 \times 22{,}5$ t $= 360$ t) mehr als einmal pro Arbeitstag erreicht wird, gering. Aber selbst unter der Annahme, dass dies der Fall wäre, ergäben sich über 100 Jahre nur $100 \times 250 = 25000$ Lastwechsel an der Grenze der zulässigen Spannungen. Diese kleine Zahl der Lastwechsel rechtfertigt noch keine Abminderung der Spannungen in Stahlkonstruktionen.

c) Erteilung von Ausnahmen

Es ist vorgesehen die Schwertransportstrassen in «Exportstrassen» und in «Energieversorgungsstrassen» zu unterteilen. Für neue Bauobjekte in Exportstrassen sollen keine Ausnahmen von der oben umschriebenen Belastungsnorm gewährt werden.

Die «Energieversorgungsstrassen» dienen Schwertransporten zur Belieferung von Kraftwerken und Unterwerken mit Turbinen, Generatoren und Transformatoren. Hier lässt sich eine obere Grenze des zu transportierenden Stückgewichtes eindeutig festlegen. Die Bewilligung von Ausnahmen gegenüber der zitierten Belastungsnorm ist daher sinnvoll, sofern dadurch nennenswerte Kosteneinsparungen für Brücken in «Energieversorgungsstrassen» erreicht werden. Dabei sollte die Ausnahme einheitlich wie folgt festgesetzt werden: Zu dem als obere Grenze festgestellten Stückgewicht G werden 50% als Tara dazugeschlagen, um das Gewicht der Fahrgestelle, der Ladebrücke und des Zugfahrzeuges zu decken. Das Bruttogewicht des Schwertransportes S wird somit veranschlagt zu $S = 1{,}5\ G$ (in t).

Als Zusatz zu der unter Kapitel A aufgeführten Belastungsnorm soll verlangt werden, dass die Summe der Laststrecken, $c_1 + c_2$, für Transporte der Kategorie A das folgende Mass nicht überschreiten muss

$$c_1 + c_2 \leqslant \frac{S}{360}\cdot 28{,}8 \text{ m} \quad \text{und,}$$

dass Transporte der Kategorie B höchstens noch für die Nachrechnung der Fahrbahnelemente in Mitte Fahrbahn berücksichtigt werden müssen.

Die Begründung der Erleichterung für den letzteren Lastfall beruht auf der Annahme, dass, trotz der grösseren Lastkonzentration, die Brücke auch zentrisch das selbe Gesamtgewicht S tragen kann, wie dies exzentrisch und zuzüglich eines Stosszuschlages vorgesehen ist. Wenn zum Beispiel das höchste Stückgewicht in einer «Energieversorgungsstrasse» zu 120 t erhoben worden ist, so wird das Gesamtgewicht des Lastenzuges zu $1{,}5 \times 120$ t $= 180$ t veranschlagt. Daraus ergibt sich

$$c_1 + c_2 \leqslant \frac{180}{360}\cdot 28{,}8 \text{ m} = 14{,}40 \text{ m}\,.$$

Für Brücken in dieser Energieversorgungsstrasse könnte daher die Ausnahmebedingung wie folgt formuliert werden: «Die Brücke ist als Schwertransportstrassenbrücke nach der dafür geltenden Belastungsnorm zu dimensionieren, jedoch mit der zusätzlichen Bedingung, dass in Absatz 1 die Summe der Laststrecken $c_1 + c_2$ die Länge von 14,40 m nicht überschreiten muss, und dass der Lastfall Kategorie B nur noch für die Nachrechnung der Fahrbahnelemente zu berücksichtigen ist.» Da jede Teilstreckenlänge beliebig zwischen null und 14,40 m variieren kann (siehe Bild 1), ist der Belastungsfall $c_1 = 14{,}40$ m, $c_2 = 0$ für Schwertransporte immer noch zugelassen. Sind nun die Brückenspannweiten so kurz, dass die eine Streckenlast nie mit der anderen zusammen einen Einfluss auf eine Schnittgrösse auszuüben vermag, so entsteht keine Einsparung durch die oben formulierte Ausnahme. Daraus ist ersichtlich, dass es sich für viele Brücken kleiner Spannweiten nicht lohnen wird, Ausnahmen von der Norm zu geben. Der Grund dafür liegt darin, dass der Transportunternehmer durch seine Vorschrift gezwungen wird, bei Vergrösserung des Stückgewichtes die Lastverteilung entsprechend weiter auszudehnen.

d) Einschätzung bestehender Objekte

Da diese erteilbaren Ausnahmen die Verordnung für die Transportunternehmer in keiner Weise beeinflusst, ist es möglich, die Tragkapazität einer neuen Brücke für Schwertransportstrassen durch eine einzige Zahl, das festgesetzte maximale Bruttogewicht S des Schwertransportes, zu kennzeichnen, trotzdem der Transportunternehmer noch alle im Kapitel B umschriebenen Freiheiten für die Zusammenstellung der Lastenzüge besitzt.

Ebenso ist es nun auch möglich, eine bestehende Brücke zu kennzeichnen. Entsprechend obiger Regelung der Ausnahmen ist die grösstmögliche Summe der Laststrecken $c_1 + c_2$ für Transporte der Kategorien A und B unter Einhaltung der zulässigen Spannungen zu ermitteln. Das Produkt aus der Streckenlast $p_1 = 12{,}5$ t/m¹ für Kategorie A bzw. $p_2 = 16{,}7$ t/m¹ für Kategorie B, mit der dazu berechneten Länge $c_1 + c_2$ ergibt die Anschrift der Brücke: $S_1 \leqslant \ldots$ t, $S_2 \leqslant \ldots$ t.

Voraussetzung dazu ist allerdings, dass den Fahrbahnelementen die entsprechenden Achslasten zugemutet werden darf. Ist dies nicht der Fall, so muss in einer weiteren Angabe die maximal zulässige Achslast A festgehalten werden: $S_1 \leqslant \ldots$ t, $S_2 \leqslant \ldots$ t, $A \leqslant \ldots$ t.

D. Mehrkosten

a) Das Vergleichsobjekt

Um die Mehrkosten einer nach diesem Normenvorschlag für Schwertransportstrassenbrücken dimensionierten Autobahnüberführung gegenüber einer gewöhnlichen Hauptstrassenbrücke zu erheben, sind zwei ausführungsreife Projekte für die erste Schwertransportstrassenbrücke ausgearbeitet worden, die sich nur in den verschiedenen Belastungsannahmen unterscheiden (obiger Abschnitt A gegenüber Art. 9 der SIA-Norm 160, 1956). Es handelt sich um einen rd. 45° schief gelagerten, über zwei Felder von je 34,3 m Spannweite durchlaufenden Balken aus vorgespanntem Beton. Die Fahrbahn ist 8 m breit, und die beiden Gehwege haben eine Ausladung von 2,50 m.

Auch bei gleicher Gestaltung der Querschnitte – Plattenquerschnitt mit Verdrängungsrohren – gibt es noch zu viele Variablen, um jede Entscheidung des Ingenieurs aus dem Vergleich heraus zu nehmen. Hier wurde die Bedingung aufgestellt, dass die massgebenden Spannungen die selben seien. Das ist der Fall, indem bei beiden Projekten die Zugspannungen in den Feldern bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Temperatureinflüsse massgebend werden (rd. 20 kg/cm² Zug, bzw. 9 kg/cm² Druckreserve ohne Temperatureinfluss). Diese Forderung kann aber noch bei verschiedenen Kombinationen von Plattenstärke, Zahl der Verdrängungsrohre und Vorspannkraft erfüllt werden. Die Nebenbedingung, dass das Vergleichsprojekt ebenfalls ausführbar sein soll, hat jedoch die verbleibenden Entscheide bestimmt.

b) Kostenunterschiede

α) Überbau

Der grösste Unterschied in den Kosten beider Projekte tritt bei der Position Vorspannkabel in Erscheinung, die im Verhältnis 1 : 1,33 (d.h. 18 bzw. 24 Spannkabel) stehen. Aber schon aus der Kostengruppe «Vorspannarbeiten», die sich bei den beiden Projekten wie 1 : 1,29 verhält, erkennt man, dass gewisse Kosten nicht nutzlastabhängig sind. Bei der Schwertransportstrassenbrücke braucht es zum Beispiel genau gleich viele Kabelhalter wie bei der Hauptstrassenbrücke.

Die schlaffe Armierung des Überbaues verhält sich gewichtsmässig wie 1 : 1,30 und kostenmässig wie 1 : 1,28. Der Unterschied in den beiden Verhältnissen entsteht aus der Änderung der Einheitspreise, die mit zunehmendem Durchmesser leicht abnehmen. Dieses erhebliche Gewichtsverhältnis in der schlaffen Armierung gegenüber demjenigen des Betonvolumens im Überbau, 1 : 1,15, ist darauf zurückzuführen, dass die Schwertransportlasten eine grössere Querbeanspruchung der Brückenplatte verursachen. Beim massiven Plattenquerschnitt spielt das für die Betonspannungen keine Rolle, wohl aber für die Querarmierung.

Die Lehrgerüstkosten sind für das Ausführungsprojekt über den Quadratmeterpreis geschätzte Grössen. Aus dieser Richtlinie für die Kosten würden sich überhaupt keine Änderungen ergeben. Da aber ein Unterschied von 15% im Betongewicht vorliegt, ist vorsichtigerweise ein ähnlich grosser Unterschied in den Lehrgerüstkosten angenommen worden (1 : 1,12).

Die Schalungsarbeiten ändern wenig, und die Brückenentwässerung, Versetz- und Schlosserarbeiten überhaupt nicht, da dieselben Randsteine und Geländer benötigt werden. Daher rührt es, dass die reinen Kosten des Überbaues, in der Kostenzusammenstellung als Tragkonstruktion bezeichnet, im Verhältnis von 1 : 1,15 stehen.

β) Unterbau

Beim Unterbau tritt der Einfluss der Nutzlast sehr stark zurück gegenüber dem Eigengewicht und, bei den beiden Widerlagern, auch gegenüber dem Erddruck. Dazu kommt, dass die zwei schief gestellten Widerlager und der Pfeiler in zwei Dimensionen, Breite und Tiefe, hauptsächlich von konstruktiven bzw. geologischen Gesichtspunkten abhängen, die sich in den beiden Projekten nicht unterscheiden.

Schliesslich sind die Wände und Rippen der Widerlager und Pfeiler (also die dritte, noch lastabhängige Dimension) nicht so hoch beansprucht, dass über die im Tiefbau als Minimalmass angesehenen 40 cm Wandstärken hinausgegangen werden müsste. Aus diesen Gründen verhalten sich die Kosten des Unterbaues lediglich wie 1 : 1,033.

γ) Installationen, Nebenarbeiten, Projekt- und Prüfungskosten

Bei den Installationen sind die stationären Kosten in beiden Projekten unverändert übernommen worden, während sich die mobilen Installationskosten im selben Verhältnis wie die totalen Baukosten unterscheiden. An Nebenarbeiten wie Böschungspflästerung und Schleppkonstruktion lässt sich nichts ändern, am Belag nur wenig. Der Posten Unvorhergesehenes ist proportional den reinen Baukosten verändert worden, ebenso die Kosten für Materialprüfung. Vorsichtigerweise ist bei den Projektierungs- und Bauleitungskosten auch ein Sprung in einer Honorarklasse, $\Delta p = 1{,}7\%$, miteinbezogen worden.

δ) Zusammenstellung

Die berechneten Kosten zwischen dem Hauptstrassen- und Schwertransportstrassen-Brückenprojekt verhalten sich wie folgt:

	Hauptstrassenbrücke Fr.	Schwertransport-strassenbrücke Fr.	Mehrkosten Fr.	Mehrkosten %
Tragkonstruktion (Überbau)	391 441	450 771	59 330	15,2
Reine Baukosten	998 000	1 080 000	82 000	8,2
Totale Kosten	1 115 000	1 225 000	110 000	9,9

Anmerkung: Die Preise des ausführenden Unternehmers sind im Durchschnitt 15% tiefer als die hier aus dem Kostenvoranschlag zitierten. Für den Mehrkostenfaktor hat das aber keine Bedeutung.

c) Verallgemeinerung

Die totale Belastung der Hauptstrassenbrücke, einschliesslich Stosszuschlag, ist

— aus p: 5,11 t/m′ · 68,6 m = 350 t
— aus P: 34,5 t = 35 t
385 t

Diesen 385 t Gesamtbelastung stehen die 480 t Bruttogewicht des Lastenzuges gegenüber, was ein Verhältnis von 1 : 1,28 ergibt. Auf die Biegemomente wirkt sich die gleichmässig verteilte Belastung pro t Nutzlast günstiger aus als die konzentrierte Belastung P. Die Lasteinheit aus Schwertransport liegt zwischen diesen beiden Einflüssen.

Die Biegemomente verhalten sich in den beiden Projekten wie folgt (Werte in mt bzw. %):

	im Feld	über der Stütze
aus Eigengewicht g	$\frac{1640}{1430} = 1{,}15$	$\frac{-1580}{-1380} = 1{,}15$
aus Nutzlast p	$\frac{1000}{620} = 1{,}61$	$\frac{-1100}{-684} = 1{,}61$
aus $g + p$	$\frac{2640}{2050} = 1{,}29$	$\frac{-2680}{-2064} = 1{,}30$

Die Annahme, dass die Masse und damit die Kosten des Überbaues etwa mit der Quadratwurzel aus der Steigerung der Momentengrenzwerte ansteigen würde, stimmt hier nicht schlecht, $\sqrt{1{,}30} = 1{,}14$. Der Mehrkostenfaktor des Überbaues ist 1,15.

Die Kostenverhältnisse können bei anderen Brücken möglicherweise stark ändern, weil nicht nur die Spannweite zur Lastenzuglänge von Bedeutung ist, sondern auch der Querschnitt in Formgebung und Breite. Immerhin lassen sich folgende Überlegungen anstellen:

Bei sehr kurzen Spannweiten fällt der ausgleichende Faktor des Eigengewichtes weniger in Betracht, so dass sich das Verhältnis der Momentengrenzwerte aus den beiden Projekten erhöhen dürfte. Dafür ist bei diesen kurzen Brücken der Kostenanteil des Überbaues geringer, so dass die prozentualen Mehrkosten des Bauwerkes vielleicht doch in der selben Grössenordnung bleiben könnten.

Bei sehr grossen Spannweiten nehmen die Biegemomente aus Nutzlast bei Hauptstrassen mit dem Quadrat der Spannweite zu (die Bedeutung von $P = 15$ t verschwindet gegenüber p), während bei Schwertransportstrassen die 480 t unverändert bleiben und somit das Biegemoment linear anwächst. Daher nimmt das Verhältnis der Nutzlastbiegemomente ab, so dass auch für Fälle grosser Spannweiten kein Anlass zur ungünstigeren Einschätzung des Mehrkostenfaktors gesehen wird. (Die absolute Kostendifferenz steigt bei gleichem Mehrkostenfaktor selbstverständlich proportional den Baukosten der Brücke.)

Der Einfluss der Querschnittsgestaltung ist weniger überblickbar. Die hier verwendeten massiven Betonquerschnitte benötigen wenig Mehraufwand zur Querverteilung der Schwertransportlasten. Je aufgelöster die Brückenquerschnitte gestaltet werden, umso mehr werden sich die höheren Achslasten im Aufwand für Querträger und Fahrbahnplatte bemerkbar machen. Es wird die Aufgabe des Ingenieurs sein, von zwei preislich nahe beieinander liegenden Möglichkeiten bei Schwertransportstrassenbrücken die unempfindlichere zu wählen, z. B. an Stelle einer Stahlblechfahrbahn, einer sog. orthotropen Platte, eine Eisenbetonfahrbahn.

Als sichere obere Grenze für die Kosten jeder grösseren, reinen Schwertransportstrassenbrücke kann eine Eisenbahnbrücke angesehen werden, da die Nettogewichte von 300 t auch von der Bundesbahn transportiert werden können, ohne die Lastverteilung wesentlich weiter auszudehnen. Freilich ist es möglich, dass die Totalkosten einer Strassenbrücke jene einer gleichlangen Eisenbahnbrücke übersteigen. Dann ist dies aber darauf zurückzuführen, dass die Strassenbrücke ein viel breiteres Verkehrsband offeriert als die Bahnbrücke.

Verdankung

Diese Arbeit ist auf Initiative des Brückeningenieurs des Kantons Zürich, *R. Schiltknecht,* entstanden. Seine Unterstützung bei der Ausarbeitung dieses Normenvorschlages, sowie diejenige der Arbeitsgruppe für Schwertransporte und der SIA-Normenkommission sei an dieser Stelle herzlich verdankt.

Adresse des Verfassers: Dr. *Konrad Basler,* Oberlandstrasse 2, 8133 Esslingen bei Zürich.