

Zeitschrift: IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen
Band: 19 (1959)

Artikel: Zur Relaxation von Stahldrähten
Autor: Stüssi, Fritz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-16960>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 26.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Zur Relaxation von Stahldrähten

On the Relaxation of Steel Wires

Sur la relaxation des fils d'acier

FRITZ STÜSSI

Prof. Dr., Präsident der IVBH, ETH, Zürich

1. Problemstellung

Hält man die Länge eines mit einer hohen Vorspannung σ_0 gespannten Drahtes konstant, so vermindert sich die Spannung im Laufe der Zeit; dieser Spannungsabfall wird als Relaxation bezeichnet. Eine dazu eng verwandte Erscheinung ist das Kriechen; hält man die Spannung σ_0 konstant, so verlängert sich der Draht.

Diese Relaxationserscheinungen besitzen in der Bauweise des vorgespannten Betons grundlegende Bedeutung: der Beton soll durch die gespannten Drähte oder Drahtkabel so stark auf Druck vorgespannt werden, daß unter Gebrauchsbelastung keine Zugspannungen auftreten können. Bei einer Entspannung der Vorspannkabel durch Relaxation geht aber ein Teil der Betonvorspannung verloren. Wenn diese Entspannung unterschätzt wird, was nach den heutigen Bauvorschriften der Fall ist, so treten im Laufe der Zeit Zugspannungen und Risse im Beton auf, und die Gefahr der Ermüdung von Beton und Vorspannkabeln wird vergrößert.

Die Hauptschwierigkeit bei der versuchstechnischen Abklärung der Relaxationsvorgänge beruht darauf, daß diese sich sehr langsam abspielen. Wir sind bei einer tragbaren Versuchsdauer immer darauf angewiesen, die Versuchsergebnisse über die Versuchsdauer hinaus zu extrapolieren. Eine solche Extrapolation ist aber nur dann zuverlässig möglich, wenn wir den grundsätzlichen Verlauf der Relaxation oder das «Relaxationsgesetz» kennen.

Es kann nun unschwer festgestellt werden, daß die bisher bekannt gewordenen Versuchswerte über die Relaxation einen ähnlichen Verlauf mit der Zeit zeigen, wie etwa die Wöhlerkurve der Wechselfestigkeit eines Stahles mit der Lastwechselzahl. Damit liegt es nahe, der Interpretation von Re-

laxationsversuchen den gleichen Ansatz zu Grunde zu legen, den ich vor einiger Zeit für die Wechselfestigkeit vorgeschlagen habe¹⁾). Im Zusammenhang mit der Beurteilung eines großen Bauvorhabens im Ausland sah ich mich kürzlich gezwungen, mich eingehender mit dieser Frage der Relaxation zu beschäftigen, wobei auch der Einfluß des Betonkriechens auf die Stahlrelaxation abzuklären war. Die vorgesehene Lieferfirma für die Vorspanndrähte, die Felten & Guilleaume Carlswerk AG. in Köln-Mülheim, hat es erfreulicherweise übernommen, die notwendigen Versuche für diese Abklärung durchzuführen; ich danke hier der Geschäftsleitung der Felten & Guilleaume AG. auch bestens für die freundliche Einwilligung zur nachstehenden Veröffentlichung dieser Versuchsergebnisse im Zusammenhang mit meiner Auswertung.

2. Das Relaxationsgesetz

Der Verlauf der Entspannung durch Relaxation eines auf die Vorspannung σ_0 vorgespannten Drahtes mit konstant gehaltener Länge («reine Relaxation») ist in Fig. 1 skizziert, wobei es bei solchen Langzeitvorgängen üblich und bequem ist, die Zeit t in logarithmischem Maßstab, $i = \log t$, aufzutragen. Die Spannung σ nähert sich asymptotisch einem unteren Grenzwert σ_a , den wir als Relaxationsgrenze bezeichnen können. Für diesen Spannungsverlauf führen wir den Ansatz

$$\sigma = \frac{\sigma_0 + f \sigma_a}{1 + f} \quad (1)$$

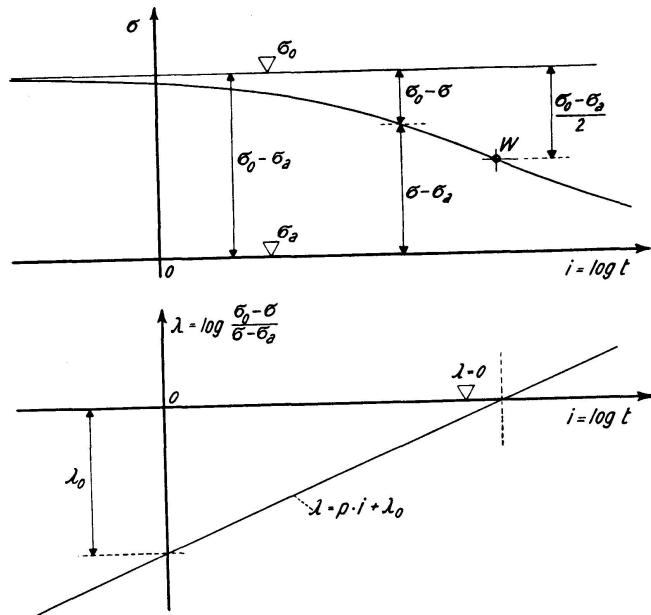


Fig. 1. Relaxationsvorgang, Bezeichnungen.

¹⁾ F. Stüssi: Die Theorie der Dauerfestigkeit und die Versuche von August Wöhler. Mitteilungen der T. K. V. S. B., Nr. 13, Zürich 1955.

ein, in dem f eine noch zu bestimmende «Relaxationsfunktion» bedeutet. Lösen wir Gl. (1) nach f auf,

$$f = \frac{\sigma_0 - \sigma}{\sigma - \sigma_a},$$

und tragen wir die Logarithmen λ dieser Werte,

$$\lambda = \log f = \log \frac{\sigma_0 - \sigma}{\sigma - \sigma_a},$$

über den Abszissen $i = \log t$ auf, so folgt dieser Wert λ bei allen bisher untersuchten Versuchsreihen mit eindrücklicher Genauigkeit einer Geraden

$$\lambda = p i + \lambda_0, \quad (2)$$

woraus sich die gesuchte Relaxationsfunktion f zu

$$f = a^\lambda = c t^p$$

ergibt, oder es ist

$$\sigma = \frac{\sigma_0 + a^\lambda \sigma_a}{1 + a^\lambda} = \frac{a^{-\lambda} \sigma_0 + \sigma_a}{1 + a^{-\lambda}}. \quad (3)$$

Dabei bedeutet a die Basis des Logarithmensystems; man wird wohl stets mit gewöhnlichen Logarithmen, $a = 10$, rechnen.

Gl. (1) läßt sich auch in der Form

$$\sigma - \sigma_a = \frac{\sigma_0 - \sigma_a}{1 + f}$$

oder

$$(\sigma - \sigma_a)(1 + f) = \sigma_0 - \sigma_a = \text{konst.}$$

schreiben. Durch Differenzieren nach der Zeit ergibt sich somit

$$\sigma'(1 + f) + (\sigma - \sigma_a)f' = 0; \quad (4)$$

diese Differentialgleichung, die bei einer physikalischen Deutung des Relaxationsvorganges eine Rolle spielen dürfte, ist wohl als das eigentliche Relaxationsgesetz anzusprechen. Offensichtlich stellt Gl. (2) mit

$$\lambda = \log f = p i + \lambda_0,$$

wenn auch vielleicht nicht die einzige, so doch die einfachste Lösung dieser Gleichung dar. Da aber auch die Ermüdungsfestigkeit (bei konstanter Mittelspannung σ_m), die Zeitstandfestigkeit, das Kriechen und auch Setzungen des Baugrundes den gleichen Beziehungen gehorchen, darf Gl. (4) als das Gesetz der Langzeitvorgänge bezeichnet werden.

Bei der Relaxation nach hohen Vorspannungen σ_0 ergibt sich noch eine Besonderheit daraus, daß die Vorspannung σ_0 nicht in unendlich kurzer Zeit aufgebracht werden kann. Es tritt somit schon eine gewisse «Vor-Relaxation» während der Belastung oder vor dem Beobachtungsbeginn auf. Dieser Vorgang

ist in Fig. 2 unter Annahme einer stufenweise aufgebrachten Belastung skizziert. Diese Vorrelaxationen sind durch Einführung einer fiktiven Vorspannung $\bar{\sigma}_0$,

$$\bar{\sigma}_0 = \sigma_0 + \Delta \sigma_0,$$

zu kompensieren; analog ist vorzugehen, wenn die Beobachtungen erst nach einer gewissen Zeit nach Erreichen der Vorspannung σ_0 (z. B. «nach einer

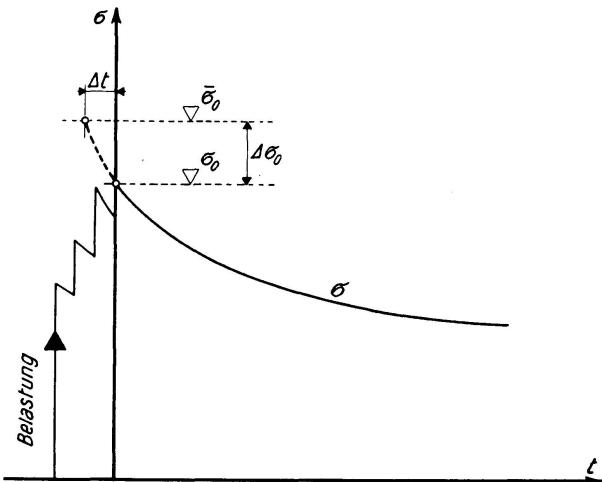


Fig. 2. Vor-Relaxation.

Minute») einsetzen. Auch der Zeitmaßstab ändert damit seinen Nullpunkt, oder es ist mit $\tilde{t} = t + 4 \cdot t$

$$\bar{t} = t + \Delta t$$

zu rechnen. Da Δt jedoch normalerweise klein ist (Größenordnung etwa eine Minute), sind diese Zeitverschiebungen schon nach einer Stunde kaum mehr störend.

Bei der Auswertung von Versuchen besteht nun die grundsätzliche Schwierigkeit, daß wir von einer verhältnismäßig kurzen Versuchsdauer aus (beispielsweise 1000 Stunden) auf einen Endwert σ_a schließen müssen, der auch nach 100 oder mehr Jahren auch annäherungsweise noch nicht erreicht ist; wir haben es also mit einem sehr großen Extrapolationsbereich zu tun. Dies hat zur Folge, daß schon kleine Streuungen der Versuchswerte sich stark störend auf das Ergebnis auswirken müssen. Vor jeder Auswertung sind die Versuchswerte deshalb durch eine stetige Kurve auszugleichen, wobei die Stetigkeit etwa durch Bildung der ersten und zweiten Differenzen kontrolliert werden kann. Wie bedeutungsvoll hier auch kleine Ungenauigkeiten sein können, geht aus folgender Überlegung hervor: Kennen wir drei Spannungswerte $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ mit gleichen Intervallen Δi ,

$$\Delta i = t_2 - t_1 = t_3 - t_2,$$

so muß sein

$$\frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_a} \frac{\sigma_2 - \sigma_a}{\sigma_0 - \sigma_2} = \frac{\sigma_0 - \sigma_2}{\sigma_2 - \sigma_a} \frac{\sigma_3 - \sigma_a}{\sigma_0 - \sigma_3};$$

nach einiger Zwischenrechnung finden wir daraus mit den Abkürzungen

$$a = \sigma_1 \sigma_3 - \sigma_2^2, \quad b = \sigma_1 - 2 \sigma_2 + \sigma_3, \quad c = \sigma_2 [2 \sigma_1 \sigma_3 - \sigma_2 (\sigma_1 + \sigma_3)]$$

den Zusammenhang

$$\sigma_0 = \frac{a \sigma_a - c}{b \sigma_a - a}; \quad \sigma_a = \frac{a \sigma_0 - c}{b \sigma_0 - a}$$

zwischen den Werten σ_0 (bzw. $\bar{\sigma}_0$) und σ_a ; die Empfindlichkeit dieses Zusammenhangs auf auch kleine Ungenauigkeiten geht aus seinem Aufbau hervor, weil er sich aus lauter relativ kleinen Differenzen zusammensetzt.

Der einfachste und zuverlässigste Weg einer Auswertung besteht wohl darin, daß wir mit geschätzten Werten von $\bar{\sigma}_0$ und σ_a die Werte

$$\lambda = \log \frac{\bar{\sigma}_0 - \sigma}{\sigma - \sigma_a}$$

bilden und über den Abszissen $i = \log t$ auftragen; die Schätzung der Ausgangswerte $\bar{\sigma}_0$ und σ_a ist solange zu verbessern, bis die λ -Werte möglichst gut auf einer Geraden liegen.

3. Versuchsergebnisse

Die erwähnten Versuche der Felten & Guilleaume Carlswerk AG. wurden an patentierten gezogenen Stahldrähten aus basischem S.M.-Stahl mit 0,8% C-Gehalt durchgeführt; der Drahtdurchmesser betrug 7 mm und die statische Zugfestigkeit $\sigma_Z = 170 \text{ kg/mm}^2$. Die Vorspannung betrug 60, bzw. 65, 70 und 75% von σ_Z , bzw. 102, 110,5, 119 und 127,5 kg/mm^2 . Die Ergebnisse der Versuche mit reiner Relaxation (Versuchsreihen A) sind in Fig. 3 aufgetragen. Man erkennt aus diesen Ergebnissen, wie wichtig es ist, den gleichen Versuch mit gleicher Vorspannung σ_0 mindestens doppelt durchzuführen; nur so lassen sich die möglichen Streuungen zutreffend beurteilen. Die folgende Tabelle 1 zeigt das Ergebnis der Auswertung.

Die aus diesen Werten berechneten Kurven σ sind in Fig. 3 ebenfalls eingetragen; der Vergleich von Versuch und Rechnung beweist, daß das eingeführte Relaxationsgesetz grundsätzlich richtig ist.

Es ist bemerkenswert, daß für eine bestimmte Vorspannung σ_0 die λ -Werte der beiden Versuchsreihen A 1 und A 2 jeweils mit guter Genauigkeit übereinstimmen; auch scheinen die λ -Geraden einen gemeinsamen Schnittpunkt ($\lambda = 0,249$ für $i = 5,289$) zu besitzen. Die Unterschiede zwischen den Versuchsreihen A 1 und A 2 müssen somit zur Hauptsache einer Streuung der Relaxationsgrenze σ_a zugeschrieben werden. Trotz dieser Streuung ist jedoch unverkennbar, daß diese Relaxationsgrenze σ_a , die hier im Mittel $90 \text{ kg/mm}^2 \approx 53\%$ von σ_Z beträgt, von der Vorspannung σ_0 unabhängig ist und somit bei konstanter Temperatur eine Materialkonstante bedeutet.

Ausgeglichene Relaxationskurven können nun dadurch berechnet werden, daß man eine feste Relaxationsgrenze einführt; diese Kurven für $\sigma_a = 90 \text{ kg/mm}^2$ sind in der Form $\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma$ in Fig. 4 aufgetragen. Die Kurven σ bzw. $\Delta\sigma$ besitzen bei der Halbwertzeit einen Wendepunkt, die Kurven σ' entsprechend somit ein Maximum. Es ergibt sich daraus, daß die Versuchsauswertung ganz wesentlich erleichtert würde, wenn die Versuchsdauer bis in die Nähe dieser Halbwertzeit erstreckt werden könnte. Beim Drahtmaterial der Versuche von Felten & Guilleaume scheint eine solche Ver-

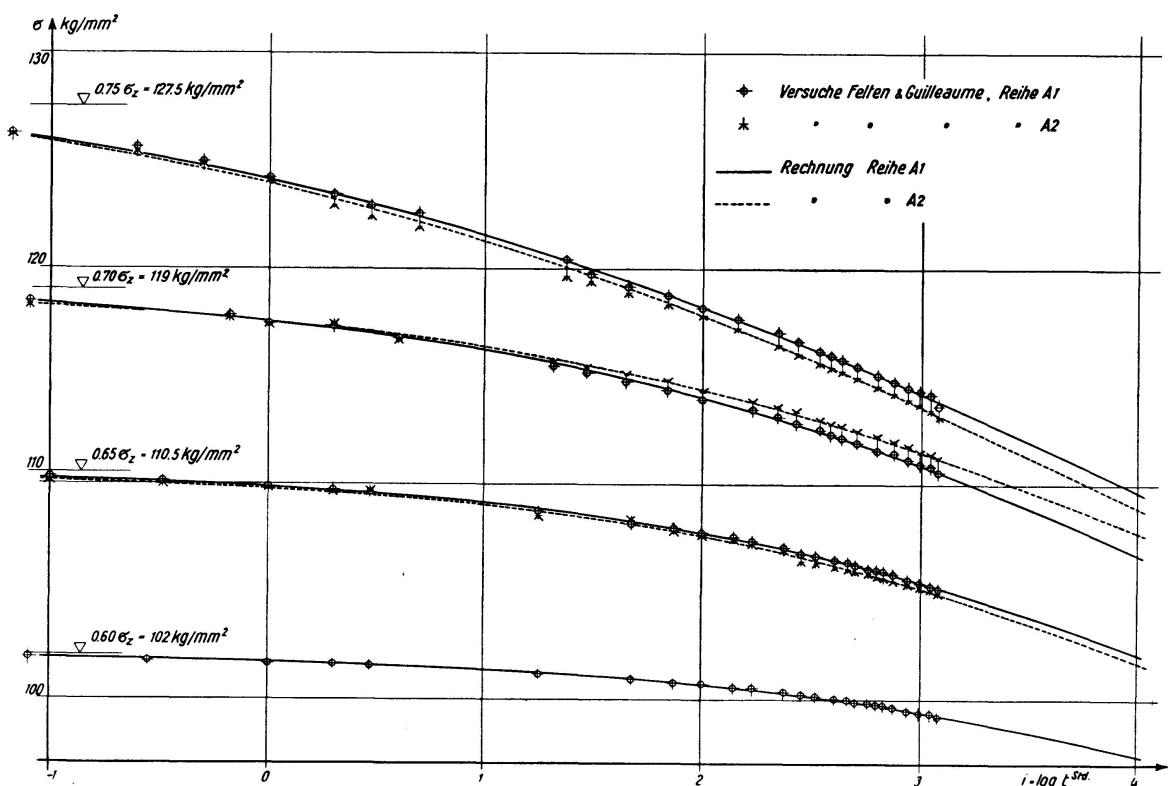


Fig. 3. Versuche Felten & Guilleaume, reine Relaxation.

Tabelle 1

σ_0 kg/mm^2	Reihe	λ	$\bar{\sigma}_0$ kg/mm^2	σ_a kg/mm^2
102	A	$0,350 i - 1,602$	102,00	90,1
110,5	A 1	$0,322 i - 1,454$	110,54	89,9
	A 2		110,52	88,8
119	A 1	$0,272 i - 1,190$	119,24	91,1
	A 2		119,13	93,4
127,5	A 1	$0,200 i - 0,809$	129,57	89,5
	A 2		129,62	87,8

mittel $\sim 90,0 \text{ kg/mm}^2$

suchsdauer auch möglich; die Halbwertzeit beträgt für $\sigma_0 = 102 \text{ kg/mm}^2$ etwa 4,3 Jahre, während sie für $\sigma_0 = 127,5 \text{ kg/mm}^2$ auf etwa 15 Monate absinkt.

In Fig. 5 sind ferner die Ergebnisse einer Versuchsreihe der holländischen C. U. R.-Versuche²⁾ wiedergegeben und mit der Rechnung verglichen. Wir wählen dazu den Draht D, kalt gezogen und gealtert aus, der eine Zugfestigkeit $\sigma_Z = 170 \text{ kg/mm}^2$ (wie die Felten & Guilleaume-Drähte) besitzt. Der Vergleich mit den Relaxationskurven der Fig. 3 bzw. 4 zeigt deutlich, daß es sich

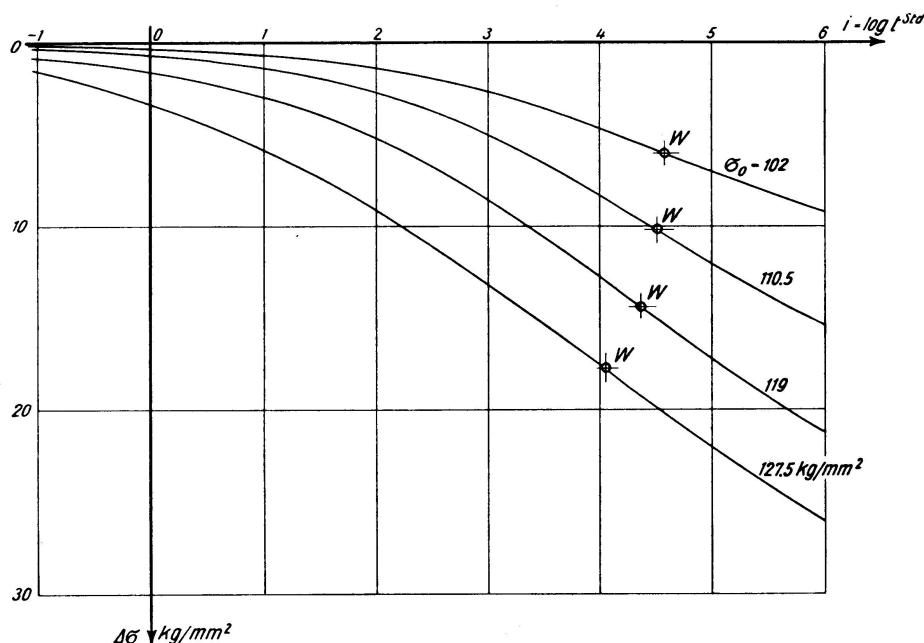


Fig. 4. Ausgeglichene Kurven $\sigma_0 - \sigma$.

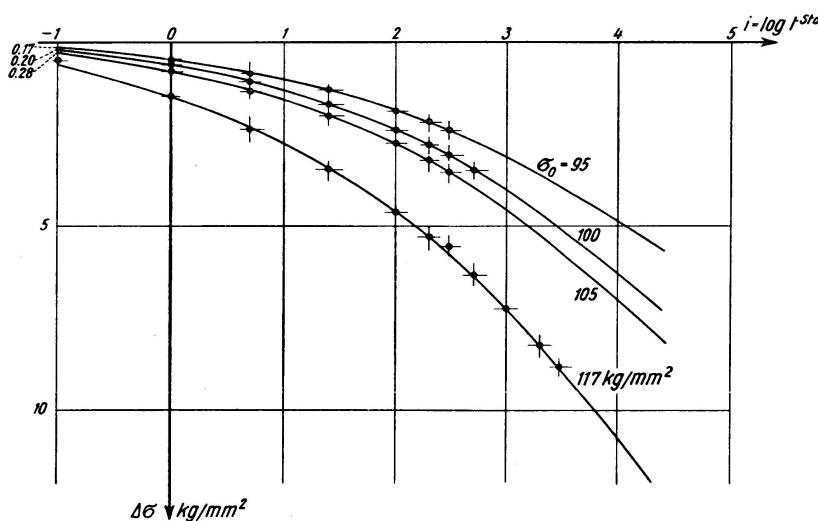


Fig. 5. Versuche C. U. R.-Draht D.

²⁾ Commissie voor Uitvoering van Research (C. U. R.): Onderzoek van hoogwaardig Betonstaal voor voorgespannen Beton. Rapport No. 14, Delft 1958.

hier um einen Stahl mit sehr langsamem Relaxation und tiefliegender Relaxationsgrenze σ_a handelt. Die in Fig. 5 eingetragenen Kurven sind mit den in Tabelle 2 zusammengestellten Werten berechnet. Zu beachten ist, daß die Relaxationswerte erst von der ersten Minute nach Einstellung der Vorspannung an gemessen wurden; wir haben also auch bei den kleineren Vorspannungen σ_0 eine Vor-Relaxation $\Delta\sigma_0$ zu berücksichtigen.

Tabelle 2

σ_0 kg/mm ²	λ	$\bar{\sigma}_0$ kg/mm ²	σ_a kg/mm ²
95	$0,233 i - 1,344$	95,32	76,8
100	$0,233 i - 1,344$	100,41	76,5
105	$0,228 i - 1,315$	105,40	79,4
117	$0,212 i - 1,223$	117,68	79,1

Da hier die Halbwertzeit der Relaxation mit etwa 65 bis 70 Jahren sehr groß ist, liegt das Ende der Versuchsreihen noch sehr weit vom Wendepunkt der σ -Kurven entfernt, und die Auswertung ist deshalb sehr empfindlich. Immerhin zeigt sich auch hier deutlich eine feste Relaxationsgrenze σ_a , deren Mittel mit $\sigma_a \approx 78$ kg/mm² (oder tiefer) bei höchstens 46% der Zugfestigkeit σ_z liegt.

Es ist das Verdienst von Prof. FRANCO LEVI in Turin, schon frühzeitig mit der systematischen Untersuchung der Relaxation begonnen zu haben.

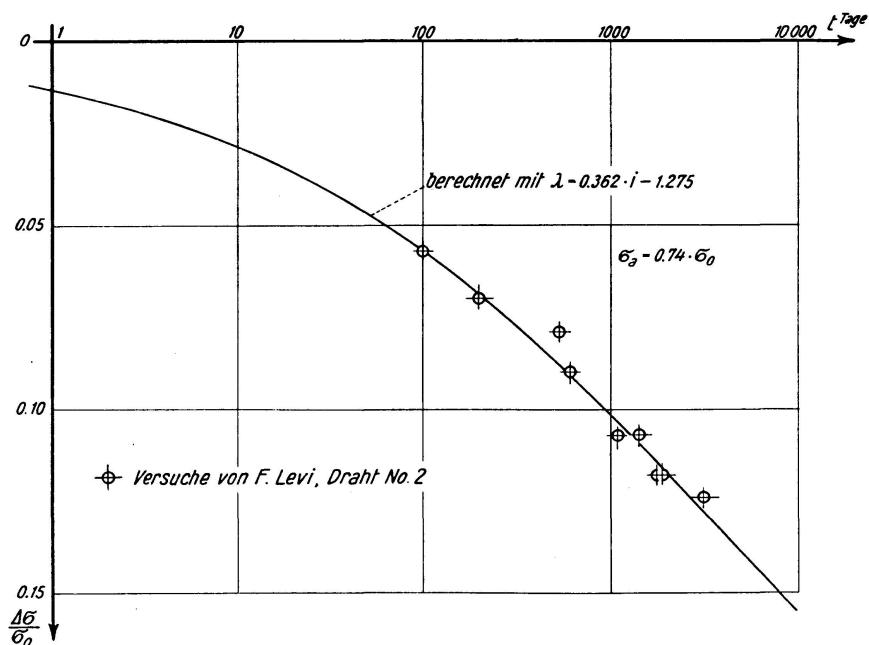


Fig. 6. Versuche von F. Levi, Draht No. 2.

Er verfügt deshalb heute über Versuchsreihen mit einer Versuchsdauer bis zu gegen zehn Jahren. Aus seinem kürzlich veröffentlichten Bericht³⁾ sind in Fig. 6 die Versuchsergebnisse für den Draht Nr. 2, kalt gezogen, Durchmesser 1,98 mm, $\sigma_Z = 212 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_0 = 116 \text{ kg/mm}^2$ aufgetragen. Trotz der langen Versuchsdauer von 3120 Tagen ist der Wendepunkt der $\Delta\sigma$ -Kurve noch nicht mit Sicherheit erreicht. Die eingetragene Kurve ist mit den Werten (Zeit t in Tagen)

$$\lambda = 0,362i - 1,276, \quad \sigma_a = 0,74 \sigma_0, \quad \bar{\sigma}_0 = \sigma_0$$

berechnet. Trotz der langen Versuchsdauer ist der zur Verfügung stehende Versuchsbereich zu kurz, um eine zuverlässige Auswertung zu gewährleisten; die Versuchswerte für kurze Relaxationszeiten von 1 bis 10 Tagen, die diesen Mangel hätten ausgleichen können, waren leider nicht erhältlich. Immerhin kann aus diesen Versuchen der Schluß gezogen werden, daß die Halbwertzeit mindestens etwa 9 Jahre oder 80 000 Stunden beträgt und daß die Relaxationsgrenze bei höchstens 40% der Zugfestigkeit σ_Z liegt.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die Relaxationsgrenze σ_a wesentlich tiefer liegen kann, als heute in den Bauvorschriften angenommen wird, und daß deshalb die Wirkung der Relaxation auf Bauten aus vorgespanntem Beton meist unterschätzt wird.

4. Der Einfluß des Betonkriechens

Durch das Schwinden und Kriechen des Betons wird eine zusätzliche Entspannung der Vorspannkabel verursacht. Um diesen Einfluß auf die Relaxation abzuklären, hat die Felten & Guilleaume Carlswerk AG. eine zweite Gruppe von Versuchen (Versuche B) durchgeführt, bei denen in Intervallen von 120 Stunden solche zusätzliche, dem Betonkriechen entsprechende Entspannungen eingeführt wurden. Fig. 7 zeigt diese Versuchsergebnisse als Mittelwerte von je zwei Versuchsreihen; zum Vergleich sind auch die ausgeglichenen Werte der reinen Relaxation nach Fig. 4 eingetragen. Zunächst zeigt sich, daß am Anfang, $t \leq 1$ Stunde, die Relaxationswerte der Reihen B deutlich etwas kleiner sind als bei den Reihen A; dieser Unterschied ist wahrscheinlich auf eine kleine Überspannung bei Versuchsbeginn zurückzuführen.

Das Zusammenwirken von Betonkriechen und Stahlrelaxation ist in Fig. 8 dargestellt, in der die Spannungen σ mit der Zeit t als Parameter in Funktion der Vorspannung σ_0 aufgetragen sind. Bringen wir zur Zeit $t = 120$ Stunden eine Entlastung $\Delta\sigma_{Kr}$ entsprechend dem Kriechen des Betons auf, so bedeutet dies eine Verkleinerung der Vorspannung σ_0 entsprechend der der Zeit $t = 120$ Stunden entsprechenden σ -Kurve. Bis zur nächsten Entlastungsstufe geht der Relaxationsvorgang entsprechend der verminderten,

³⁾ F. LEVI: Le problème des aciers de précontrainte en Italie. Third congress of the Fédération Internationale de la Précontrainte, Berlin 1958, Session II, Paper No. 16.

aber nun zunächst konstant bleibenden Vorspannung bis zur nächsten σ -Kurve für $t = 240$ Stunden weiter, die für die weitere Verminderung von σ_0 durch die nächste Entlastung $\Delta\sigma_{Kr}$ maßgebend ist. Damit können die Relaxationswerte berechnet werden. Diese berechneten Werte sind in Fig. 9 mit den Versuchs-

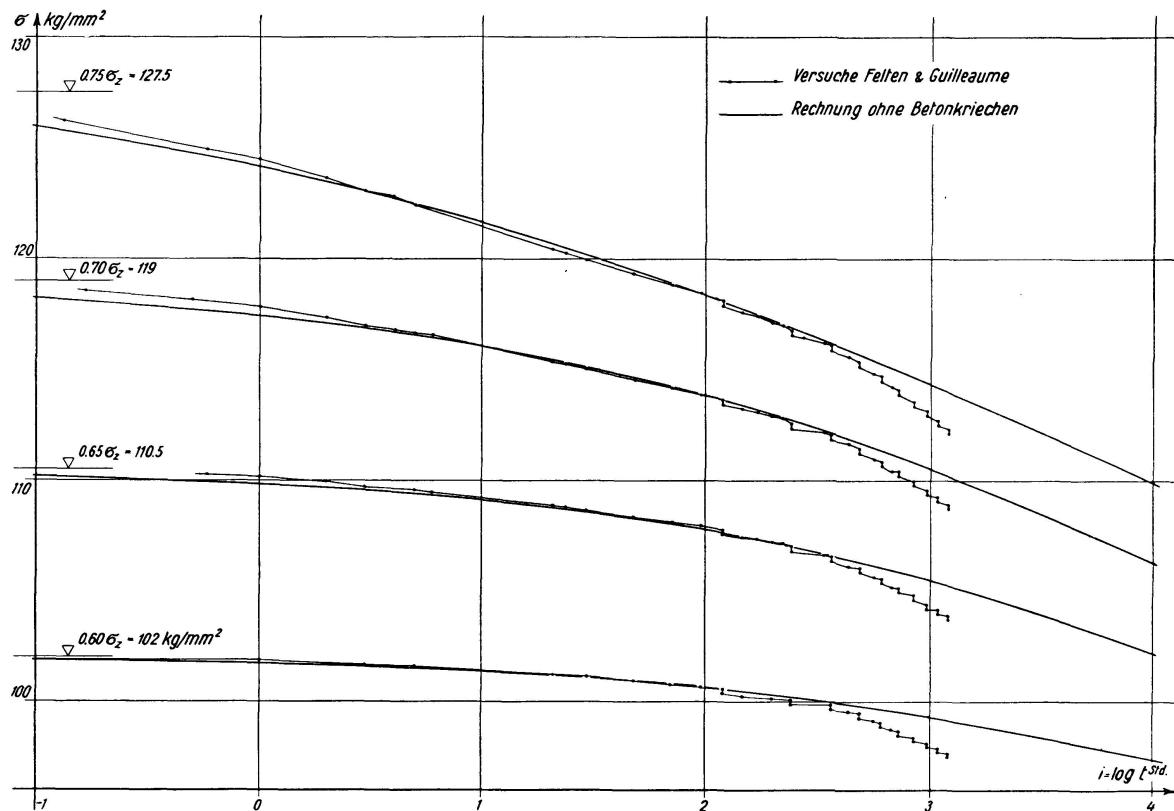


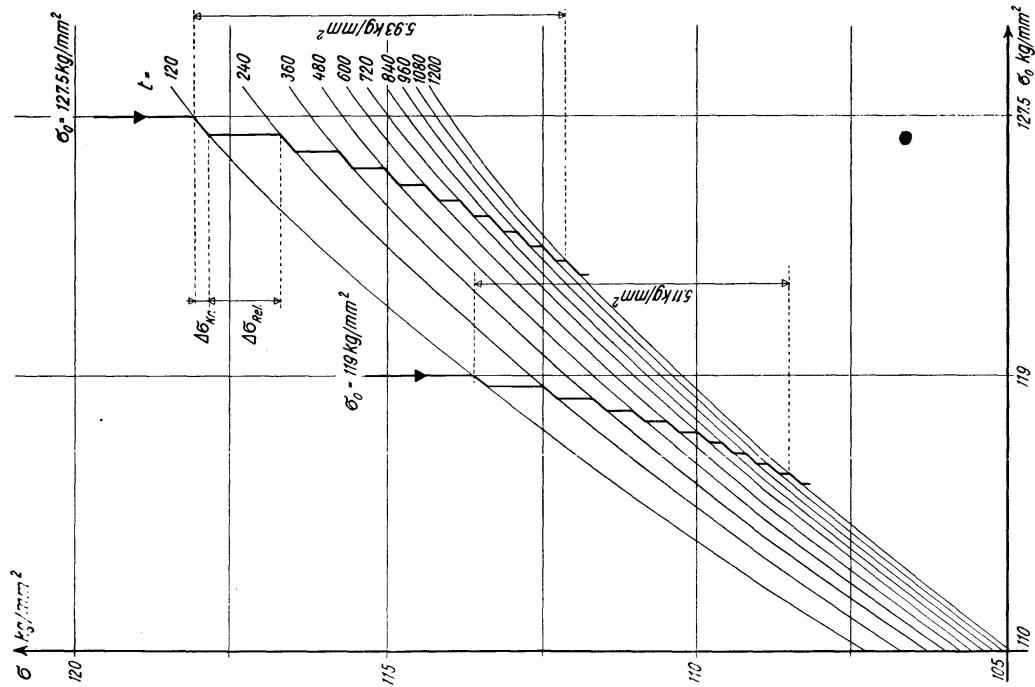
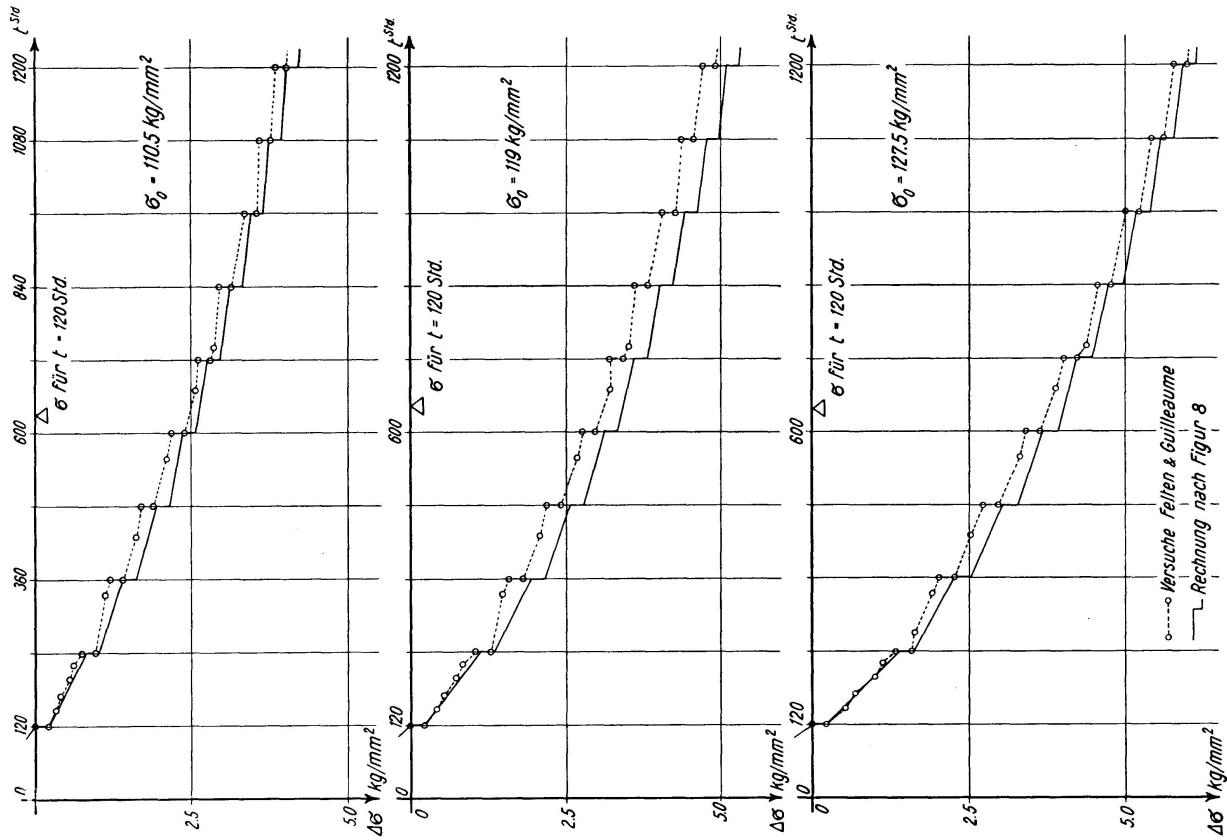
Fig. 7. Versuchsergebnisse Felten & Guilleaume mit Betonkriechen.

werten (Mittel aus je zwei Versuchsreihen) verglichen. Es zeigt sich, daß die berechneten Relaxationswerte etwas größer sind als nach den Versuchen, doch läßt sich feststellen, daß sich in den Versuchen ein Relaxationsverzug bemerkbar macht, der mit größter Wahrscheinlichkeit auf das stufenweise, also unstetige Einbringen der Kriechentlastungen $\Delta\sigma_{Kr}$ zurückzuführen ist. In bezug auf die gesamten Relaxationswerte sind diese Unterschiede zwischen Rechnung und Versuch jedoch klein, so daß der Vorgang der gemischten Relaxation durch das in Fig. 8 gezeigte Vorgehen rechnerisch zutreffend erfaßt werden kann.

5. Kriechen und Schwinden von Beton

Über das Kriechen und Schwinden des Betons in fertigen Bauwerken liegen aufschlußreiche Messungen von U. FINSTERWALDER vor⁴⁾. Die Meß-

⁴⁾ U. FINSTERWALDER: Ergebnisse von Kriech- und Schwindmessungen an Spannbetonbauten. Beton- und Stahlbetonbau, 53. Jg. (1958), Heft 5.



ergebnisse werden in einer Übersicht zusammengefaßt, in der die eingetretenen Verkürzungen ϵ in Prozenten des rechnerisch ermittelten, also geschätzten Endkriechmaßes ϵ_∞ angegeben werden. In der folgenden Tabelle 3 sind die Meßergebnisse für diejenigen Brücken zusammengestellt, bei denen der Kriechbeginn in die Monate Oktober, November und Dezember fällt.

Figur 10 zeigt den zeitlichen Verlauf der mittleren Verkürzungen, die sehr regelmäßige jahreszeitliche Schwankungen um eine mit

$$\lambda_m = 0,740i - 0,775$$

Tabelle 3. Verkürzungen ϵ/ϵ_∞ in Prozenten

Brücke	6	10	12	18	24	30	36	42	Mo- nate 48
Luitpoldbrücke Landshut	46	72	69	55	76	70	87	72	87
Gänstorbrücke Ulm	27	51	50	47	56	63	68	60	62
Lechhauserbrücke Augsburg	31	51	54	50	58	59	65	58	71
Werderbrücke Pforzheim	46	53	52	56	60	50	68	73	72
Rheinbrücke Worms, Bogen 5	29	44	45	48	58	56	62	65	70
Königsdammbrücke Berlin	32	55	68	72	83	77	73	76	83
Brudermühlbr. München, Über- bau 1	44	57	58	58	69	69	75	79	86
Brücke Horrem, langer Stab	22	45	53	58	71	71	79	78	78
Brücke Horrem, kurzer Stab	26	50	52	68	71	79	77	85	88
Brücke Horrem, Nebenbr.	29	44	53	45	55	55	64	70	72
Mittel	33,2	52,2	55,4	55,7	65,5	64,9	71,8	71,6	76,9

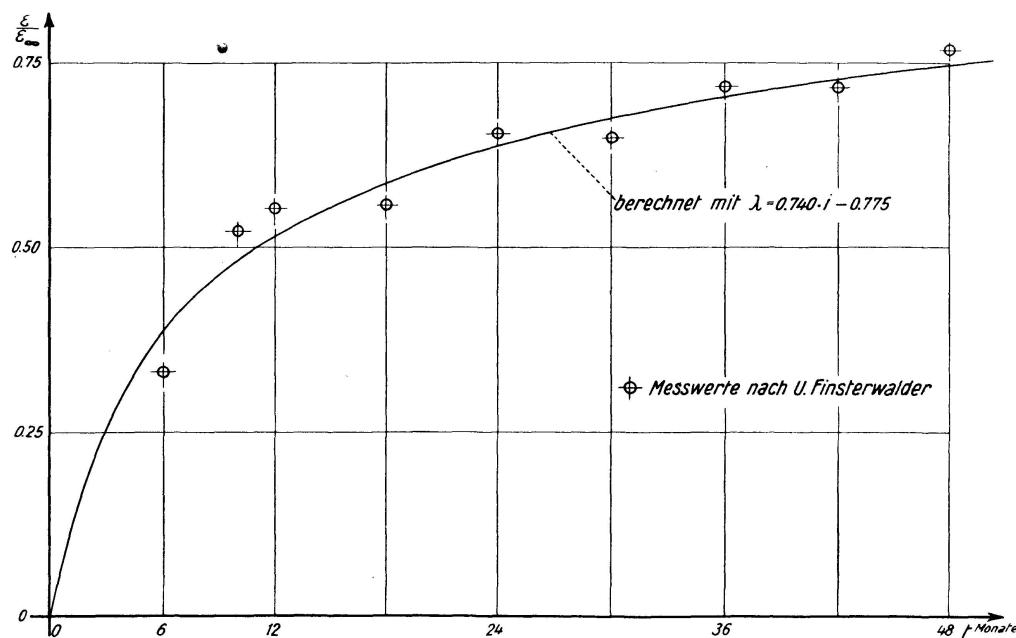


Fig. 10. Kriechen und Schwinden von Beton.

($i = \log t$, Zeit t in Monaten) zu

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_\infty} = \frac{a^{\lambda_m}}{1 + a^{\lambda_m}} = \frac{f_m}{1 + f_m}$$

berechnete Mittelkurve ausführen. Die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung ist gut; sie könnte noch etwas besser sein, wenn die geschätzten Endkriechmaße ϵ_∞ etwas größer gewählt würden.

Zusammenfassung

Es wird vorgeschlagen, den Relaxationsvorgang von Stahldrähten, wie sie im vorgespannten Beton verwendet werden, durch den gleichen Ansatz zu erfassen, den der Verfasser vor einiger Zeit für den Verlauf der Wechselfestigkeit von Metallen unter oft wiederholter Belastung vorgeschlagen hat. Die gute Übereinstimmung dieser Rechnung mit Versuchsergebnissen wird nachgewiesen. Der Einfluß des Betonkriechens auf die Stahlrelaxation wird untersucht. Da der vorgeschlagene Ansatz auch das Schwinden und Kriechen von Beton, die Langzeitfestigkeit von Holz und Stahl wie aber auch Fundamentsetzungen zutreffend erfaßt, darf er wohl als allgemeines Gesetz für solche Langzeitvorgänge bezeichnet werden.

Es zeigt sich, daß die Relaxation von gespannten Stahldrähten durch die heutigen Bauvorschriften unterschätzt wird.

Summary

It is suggested that the relaxation phenomenon of steel wires, such as are used in prestressed concrete, should be evaluated by means of the same expression as that suggested by the author some time ago for the variation in the fatigue strength of metals under frequently repeated loads. The excellent agreement between this calculation and the experimental results is indicated. The effect of the creep of the concrete on the relaxation of the steel is examined. Since the suggested expression correctly determines the shrinkage and creep of concrete, the long-time strength of timber and steel, and also the settlement of foundations, it may well be characterised as a general law for such long-time phenomena.

It is evident that the relaxation of stressed steel wires is underestimated in present-day building regulations.

Résumé

L'auteur étudie le problème de la relaxation des fils d'acier, tels qu'ils sont utilisés dans les ouvrages en béton précontraint; il propose d'appliquer aussi à ce phénomène la loi qu'il a indiquée il y a quelque temps pour décrire

la variation de la résistance à la fatigue des métaux soumis à des charges répétées. La concordance entre les valeurs donnés par le calcul et les résultats d'essais est excellente. L'influence du fluage du béton sur la relaxation de l'acier est étudiée. La loi proposée s'applique également au retrait et au fluage du béton, à la résistance du bois et de l'acier sous des efforts de longue durée ainsi qu'aux tassements des fondations; il semble bien qu'il s'agisse d'une loi générale applicable aux phénomènes de longue durée.

Il appert que les règlements actuels sous-estiment la relaxation des fils tendus.