Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 87 (1969)

Heft: 32

Artikel: Das elektrische Lichtbogenschweissen des kaltverwundenen Armierungsstahles Roll-S

Autor: Elsner, Emil / Wehosky, Helmut

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-70746

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: 13.12.2025

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

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, 8021 ZÜRICH, POSTFACH 630

Das elektrische Lichtbogenschweissen des kaltverwundenen Armierungsstahles Roll-S

Von Dr.-Ing. **Emil Elsner** und Ing. grad. **Helmut Wehowsky**, Gerlafingen

DK 669.14:621.791.7

1. Problemstellung

Die Forderung nach einer guten Schweisseignung der Armierungsstähle wird heute ebenso selbstverständlich erhoben wie nach ausreichenden Festigkeitseigenschaften, gutem Verformungs- und Ermüdungsverhalten und gutem Haftvermögen. Ein Grund dafür ist, dass die üblichen Lagerlängen für einige Stahlbetontragwerke nicht ausreichen. Auch gewinnt die Vorfabrikation von Montagebauteilen, die später auf der Baustelle miteinander verbunden werden, an Boden.

Die beste und einfachste Möglichkeit, die Armierungen kraftschlüssig zu verbinden, bietet das Schweissen. Dem Schweissen von Armierungsstählen stand man bisher mit einiger Reserve gegenüber. In der DIN 1045, Ausgabe November 1959, war lediglich das elektrische Abbrennstumpfschweissen naturharter Stähle zugelassen. Das autogene Pressschweissen naturharter Stähle wurde nur aufgrund von Sondergenehmigungen der zuständigen Aufsichtsbehörden für spezielle Anwendungsfälle erlaubt, [1] bis [6].

Für das Abbrennstumpfschweissen des kaltverwundenen Torstahles besteht in Deutschland seit 1956 eine allgemeine Zulassung [7], die später auf das Lichtbogenschweissen ausgedehnt wurde [8]. Auch für das autogene Pressschweissen gibt es in den meisten Bundesländern Deutschlands eine Anwendungsgenehmigung. Es ist aber zu beachten, dass die Verwendung von geschweissten Armierungen nur in Stahlbetonbauteilen mit vorwiegend ruhender Belastung zulässig ist.

Im Neuentwurf der DIN 1045 vom März 1968 wird der Entwicklung der letzten Jahre auf dem Gebiete des Schweissens von Armierungsstählen Rechnung getragen, indem nunmehr die Schweisseignung der kaltverwundenen Sonderbetonstähle für das Abbrennstumpfschweissen, das Lichtbogenschweissen und das Widerstandspunktschweissen gewährleistet wird. Hinsichtlich der Schweisseignung naturharter Stähle haben sich keine Änderungen ergeben; sie wird nach wie vor nur für das Abbrennstumpfschweissen gewährleistet.

Die SIA-Norm 162, Ausgabe 1968, für die «Berechnung, Konstruktion und Ausführung von Bauwerken aus Beton, Stahl- und Spannbeton» lässt die Wahl des Schweissverfahrens offen. Der Schweissbarkeitsnachweis für die Armierungsstähle ist jedoch in Form einer sogenannten Verfahrensprüfung zu erbringen. Gemäss SIA-Norm 162 ist «die Schweissbarkeit der Stahleinlagen der Gruppe III, sofern das Lieferwerk Schweissen nach bestimmten Verfahren und unter bestimmten Bedingungen als zulässig erachtet, auf Verlangen schriftlich zu gewährleisten». Die Bestimmung gilt also sowohl für die naturharten Betonstähle der Gruppe IIIa als auch für die kaltverwundenen Sonderbetonstähle der Gruppe IIIb.

Um diese Bedingungen der SIA-Norm zu erfüllen und geeignete Voraussetzungen für die Erstellung eines Schweissmerkblattes zu schaffen, wurden unter Anwendung des Lichtbogenschweissverfahrens umfangreiche Schweissversuche an Roll-S durchgeführt. Das Lichtbogenschweissen ist neben dem Abbrennstumpfschweissen und dem CO_2-Schutzgasschweissen das gebräuchlichste Schweissverfahren zum Verbinden von kaltverwundenen Armierungsstählen. Es bietet die Möglichkeit, das Wärmeeinbringen beim Schweissen klein zu halten. Dieser Umstand ist – darauf soll später noch ausführlich eingegangen werden – von besonderer Bedeutung.

Über die Versuchsergebnisse wird im zweiten Teil der vorliegenden Arbeit berichtet. Einleitend soll anhand einer Literaturauswertung auf das unterschiedliche Schweissverhalten naturharter und kaltverwundener Armierungsstähle eingegangen werden, das sich aus der Verschiedenheit der Zusammensetzung und der Herstellung dieser Stähle ergibt.

2. Schweisseignung und Schweissverhalten naturharter und kaltverwundener Armierungsstähle.

Nach der VSM-Norm Nr. 14042, «Schweissbarkeit der Stähle» sind folgende Abstufungen zu treffen: gut, genügend, schlecht und nicht schweissbar. Mit welchem dieser Prädikate ein Stahl zu beurteilen ist, hängt weitgehend von seiner chemischen Zusammensetzung ab. Von einer guten Schweissverbindung wird unter anderem verlangt, dass sie nach dem Schweissen frei von Rissen ist und auch bei den später im Betrieb auftretenden Belastungen frei von Rissen bleibt. Das setzt voraus, dass dem Stahl auch nach dem Schweissen ein ausreichendes Formänderungsvermögen erhalten bleibt. Das Formänderungsvermögen des Stahles kann durch den Schweissvorgang infolge Aufhärtung in der wärmebeeinflussten Zone, die im folgenden mit der gebräuchlichen Abkürzung WEZ bezeichnet wird, soweit abgebaut werden, dass der Stahl unter Einwirkung von Fremd- und/oder Eigenspannungen versagt.

Von besonderer Bedeutung für die Beurteilung der Schweisseignung eines Stahles ist daher seine Härtbarkeit, das heisst seine Neigung, in der WEZ aufzuhärten. Das Mass der Aufhärtung wird von mehreren Einflussgrössen bestimmt, die in ihrer Wirkung entweder die kritische Abkühlgeschwindigkeit des Stahles oder die Abkühlgeschwindigkeit der WEZ beeinflussen. Unter der kritischen Abkühlgeschwindigkeit des Stahles versteht man die Abkühlgeschwindigkeit, bei der erstmals Martensit auftritt. Sie wird besonders von der chemischen Zusammensetzung bestimmt. Dagegen wird die Abkühlgeschwindigkeit in der WEZ von der

- zugeführten Wärmemenge } Streckenergie
- Schweissgeschwindigkeit } Streckenergie
- Grösse des zu verschweissenden Querschnitts und der Querschnittsform
- Schweissnahtform
- Ausgangstemperatur des Bauteiles
- Maximaltemperatur, die beim Schweissen erreicht wird,

massgeblich beeinflusst [9].

Ist die Abkühlgeschwindigkeit in der WEZ gleich oder grösser als die kritische Abkühlgeschwindigkeit des betreffenden Stahles, so entsteht Martensit, ein bei höheren Kohlenstoffgehalten äusserst harter und spröder Gefügebestandteil.

Unlegierte Stähle haben eine hohe, legierte Stähle eine niedrige kritische Abkühlgeschwindigkeit. Zahlreiche Elemente wie Kohlenstoff, Mangan, Silizium, Chrom und andere senken die kritische Abkühlgeschwindigkeit. Ein Stahl, dem diese Elemente zulegiert werden, wird «härtefreudiger», das heisst er neigt schon bei kleineren Abkühlgeschwindigkeiten zur Martensitbildung.

Die Wirkung auf die Verbesserung oder auch Verschlechterung der Härtbarkeit ist von Element zu Element unterschiedlich. Die unterschiedliche Wirkung der Legierungselemente auf die Härtbarkeit wird über den Zusammenhang zwischen den Härtbarkeitswirkfaktoren und

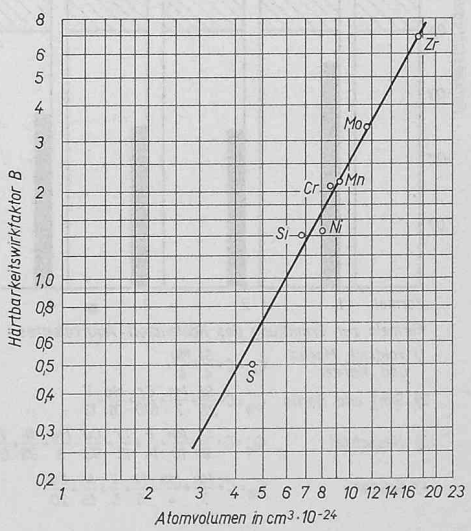


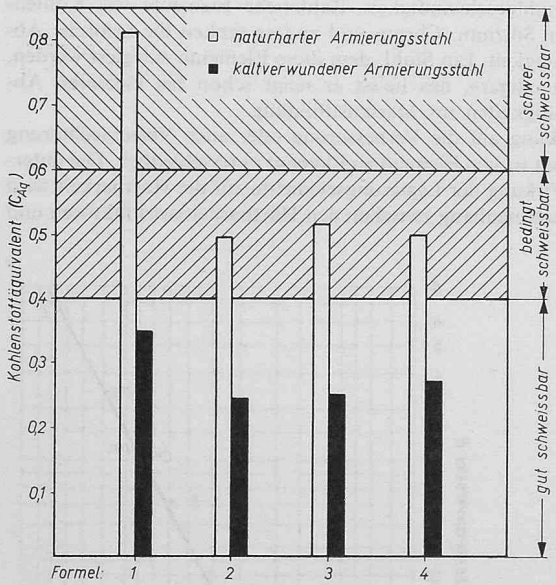
Bild 1. Beziehung zwischen Atom-Volumen und Härtbarkeits-Wirkfaktor einiger Elemente (nach A. Moser und A. Legat)

den Atomvolumina der Elemente erklärt [10]. In Bild 1 ist die Beziehung zwischen Atomvolumen und Härtbarkeitswirkfaktor einiger Legierungselemente dargestellt. Bei einem Atomvolumen $> 6 \cdot 10^{-24}$ cm³ wird der Härtbarkeitswirkfaktor B > 1,0, das heisst alle Legierungselemente, deren Atomvolumen $> 6 \cdot 10^{-24}$ cm³ ist, verbessern die Härtbarkeit. Legierungselemente dagegen, deren Atomvolumen $< 6 \cdot 10^{-24}$ cm³ ist, verschlechtern die Härtbarkeit. Zu den Legierungselementen, die nach Bild 1 die Härtbarkeit erhöhen, gehören in der Reihenfolge ihrer Wirkung Zirkon, Molybdän, Mangan, Chrom, Nickel und Silizium. Schwefel übt einen negativen Einfluss auf die Härtbarkeit aus. Sehr wichtig ist jedoch der Kohlenstoffgehalt des Stahles, da von seinem Gehalt neben der Wirkung auf die kritische Abkühlgeschwindigkeit vor allem die Härte des sich bildenden Martensits abhängt.

Mit zunehmender Härte des Martensits nimmt das Formänderungsvermögen ab. Die Rissneigung erhöht sich dadurch beträchtlich. Vielfach wird deshalb – entsprechend dem Dokument IX-115-55 des International Institute of Welding – die maximal zulässige Härte in der WEZ einer Schweissnaht auf 350 HV begrenzt.

Um die Schweisseignung von unlegierten und niedriglegierten Stählen abschätzen zu können, ist als Vergleichsgrundlage die Ermittlung eines äquivalenten Kohlenstoffgehaltes, des sogenannten Kohlenstoffäquivalentes, eingeführt worden, [11] bis [14]. Man versucht, mit der Berechnung des Kohlenstoffäquivalentes die aufhärtende Wirkung der Legierungselemente mit der des Kohlenstoffes zu vergleichen und quantitativ zu erfassen. In Bild 2 sind vier gebräuchliche Gleichungen zur Berechnung des Kohlenstoffäquivalentes wiedergegeben. Weitere Formeln siehe unter [11]. Wie ein Vergleich zeigt, weichen die Formeln in ihrer Beurteilung hinsichtlich der Wirkung der einzelnen Legierungselemente auf die Härtbarkeit teilweise erheblich voneinander ab. Daneben werden in verschiedenen Formeln die die Aufhärtung beeinflussenden Elemente Silizium, Chrom, Vanadium und andere nicht erfasst. Trotz der Mängel, mit denen die Formeln teilweise behaftet sind, kann das errechnete Kohlenstoffäquivalent wichtige Hinweise auf das Verhalten des betreffenden Stahles beim Schweissen geben.

Es erhebt sich die Frage, wie die Schweisseignung naturharter und kaltverwundener Armierungsstähle nach dem Kohlenstoffäquivalent zu bewerten ist. In Tabelle 1 sind Durchschnittsanalysen eines naturharten und eines kaltverwundenen Armierungsstahles wiedergegeben, die beide eine Streckgrenze von rund 50 kp/mm² ergeben.



Formeln zur Ermittlung des Kohlenstoff-Äquivalentes:

1) Voldrich, Martin und Harder $C_{Aq} = C + \frac{Si}{4} + \frac{Mn}{4}$

2) Sims und Banta $C_{Aq} = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn}{7} + \frac{Cr}{510} + \frac{Mo}{31} + \frac{V}{13}$

3) Heuschkel $C_{Aq} = C + \frac{Si}{9} + \frac{Mn}{10} + \frac{P}{14} + \frac{Cr}{10} + \frac{Cu}{99} + \frac{Mo}{3} + \frac{Ni}{99} + \frac{V}{6}$

4) Schaar $C_{Aq} = C + \frac{Mn}{7} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cr}{5} + \frac{V}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cu}{20}$

Bild 2. Nach verschiedenen Formeln berechnete Kohlenstoff-Äquivalente eines naturharten und eines kaltverwundenen Armierungsstahles mit einer Streckgrenze von rund 50 kg/mm²

Tabelle 1

Legierungsgehalt (%)	C	Mn	Si	P	S	Cr (als Spurenelemente)	Ni	Cu
kaltverwunden	0,15	0,60	0,20	0,020	0,030	0,10	0,10	0,20
naturhart	0,28	1,30	0,85					

Ein Vergleich der beiden Analysen zeigt die höheren Gehalte des naturharten Stahles an Kohlenstoff, Mangan und Silizium. In Bild 2 sind die nach den verschiedenen Formeln ermittelten Kohlenstoffäquivalente für den kaltverwundenen und den naturharten Stahl graphisch wiedergegeben. In den ersten 3 Formeln wird der Einfluss des Siliziums auf die Härtbarkeit berücksichtigt. Jedoch wird seine Wirkung sehr unterschiedlich beurteilt. Daher weicht vor allem das nach Formel 1 ermittelte Kohlenstoffäquivalent stark von den übrigen ab. Die nach den Formeln 2, 3 und 4 errechneten Kohlenstoffäquivalente zeigen dagegen eine recht gute Übereinstimmung. Wie Bild 2 zeigt, ist bei den hier betrachteten Stahlsorten das Kohlenstoffäquivalent des naturharten Stahles etwa doppelt so hoch wie das des kaltverwundenen Stahles gleicher Streckgrenze. Lediglich bei dem Kohlenstoffäquivalent nach Formel 4, die den Einfluss des Siliziums nicht berücksichtigt, ist die Differenz geringer.

Stähle mit einem Kohlenstoffäquivalent von unter 0,40 werden im allgemeinen als gut schweissbar, von 0,40 bis 0,60 als bedingt schweissbar und von über 0,60 als schwer schweissbar angesehen, [15] und [16]. Nimmt man das Kohlenstoffäquivalent als Bewertungsgrundlage für die Schweisseignung, so ergibt sich für den kaltverwundenen Armierungsstahl eine gute, für den naturharten Armierungsstahl dagegen eine bedingte Schweisseignung.

2.1 Naturharte Stähle

Aufgrund der höheren Legierungsbestandteile ist der betrachtete naturharte Stahl härtefreudiger. Die schon unter normalen Schweissbedingungen zu rasche Abkühlung der WEZ bewirkt die Bildung eines Mischgefüges, das je nach den Schweissbedingungen mehr oder weniger Martensit enthalten kann. Besonders wenn mengenmässig grössere Anteile an hochgekohltem Martensit vorliegen, ist infolge von Aufhärtungen mit Rissbildung zu rechnen. *A. Rose* weist darauf hin [17], dass «eine Menge von mehr als 50% Martensit in der Übergangszone als kritisch für Rissbildungen bereits beim Abkühlen nach dem Schweissen anzusehen ist und bei Mengen über 30% mit Spannungen zu rechnen ist, die durch Glühen abgebaut werden müssen, damit sie nicht das Bauwerk unter Belastung gefährden».

Beim Schweissen von naturharten Stählen höherer Streckgrenze kommt es deshalb darauf an, durch Beeinflussung der Abkühlbedingungen eine Martensitbildung in der Schweisseinflusszone entweder zu unterdrücken oder doch wenigstens auf möglichst kleine Anteile zu begrenzen. Eine sinnvolle Abstimmung der weiter oben genannten, die Abkühlgeschwindigkeit beeinflussenden Faktoren ist daher wichtig. Es kann nötig sein, die Ausgangstemperatur des Bauteiles zu erhöhen, das heisst vorzuwärmen. Wie sich das Vorwärmen auf die Abkühlgeschwindigkeit der WEZ auswirkt, zeigt Bild 3. Entstehende Schweissspannungen und Aufhärtungen in der Schweissübergangszone werden dadurch gemildert oder gar vermieden. Die Erhöhung der Wärmezufuhr durch die Wahl dickerer Elektroden, durch höhere Stromstärken und durch die Erniedrigung der Schweissgeschwindigkeit wirkt in der gleichen Richtung wie das Vorwärmen. Weiter kann die Rissanfälligkeit durch den Einsatz kalkbasischer Elektroden herabgesetzt werden [18]. Auch eine thermische Nachbehandlung nach dem Schweissen führt zum Abbau von Härtespitzen und Schrumpfspannungen. Sie ist natürlich nur dann sinnvoll, wenn sichergestellt ist, dass sich nicht schon bei der Abkühlung nach dem Schweissen Risse gebildet haben.

2.2 Kaltverformte Stähle

Über das Schweissen kaltverformter Armierungsstähle wird in mehreren Arbeiten berichtet, [19] bis [24]. Erfahrungen, die beim Schweissen anderer kaltverformter Stähle (z. B. bei Kaltprofilen) gemacht wurden, werden in weiteren Veröffentlichungen wiedergegeben, [25] bis [31]. Auch die Ergebnisse dieser Arbeiten geben wichtige Hinweise für das Schweissen kaltverformter Armierungsstähle, da hier wie dort die Schweisswärme im Zusammenspiel mit der Kaltverformung Werkstoffveränderungen herbeiführen kann, die zu einer Beeinträchtigung der Tragfähigkeit des Stahles im Bauwerk

führen können. Besondere Beachtung muss beim Schweissen von kaltverformten Stählen einer möglichen

- Entfestigung oder Aufhärtung durch die Schweisswärme
- Versprödung infolge Alterung
- Grobkornbildung durch Rekristallisation

geschenkt werden.

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten der Stähle kann demzufolge durch das Schweissen beeinträchtigt werden. Ob und in welchem Umfang dies der Fall ist, hängt im wesentlichen von

- dem Grad der kritischen Kaltverformung
- Art und Umfang des Wärmeeinbringens
- der Lage der Schweissnaht im kaltverformten Bereich
- dem zu verschweissenden Querschnitt und
- dem Werkstoff

ab [25]. Dabei spielt die Frage einer durch die Schweisswärme verursachten Entfestigung die grösste Rolle.

Als ein wichtiges Ergebnis der erwähnten Arbeiten kann festgehalten werden, dass durch das Wärmeeinbringen beim Schweissen kaltverformter Stähle keine oder eine nur unwesentliche Beeinträchtigung der Festigkeit erfolgt. Begründet wird diese Tatsache von *P. U. Schmithals, D. Schreiber* und *P. Eidamshaus* [26] damit, dass ursprünglich vorhandene Härteunterschiede neben der Schweissnaht, die durch das Schweissen entstanden sind, durch kleine plastische Formänderungen – ausgelöst durch Fremd- oder Eigenspannungen – ausgeglichen werden. Auch *K. Klöppel* und *R. Schardt* [29] kommen bei ihren Versuchen zu dem Ergebnis, dass durch eine Abschreckwirkung – hervorgerufen durch die grosse Abkühlgeschwindigkeit in der WEZ – und durch das starke Wärmegefälle über die Schweissnaht Eigenspannungen entstehen, die zu plastischen Verformungen und damit zu einem gewissen Festigkeitsausgleich führen. Weiter wird darauf hingewiesen, dass der durch die Schweisswärme verursachte Festigkeitsabfall erwartungsgemäss in der Nahtrandzone (WEZ) am stärksten ist. An dieser Stelle setzt jedoch die Quernaht der Einschnürung einen stärkeren Widerstand entgegen, als ihn Querschnitte in grösserer Entfernung von der Schweissnaht aufbringen können.

Beim Schweissen von Vergütungsstählen liegen ähnliche Verhältnisse vor. Auch bei diesen Stählen ist in der WEZ ein gewisser Härteabfall in der Anlasszone neben der Schweissnaht – ein sogenannter Härtesack – zu beobachten. *J. Mennen* [32] führte Mikrozerreissversuche an Proben aus geschweissten Vergütungsstählen durch. Aus Härtemessungen vor und nach Zugbelastung bis in den Fliessbereich ergab sich, dass infolge plastischer Verformung ein Härteausgleich eintritt. Daraus wird gefolgert, dass ein gewisser Härteabfall über eine schmale Zone nicht als schwache Stelle einer Schweissverbindung angesehen zu werden braucht.

Infolge Alterung können Stähle verspröden. Altert ein Stahl, so werden Streckgrenze und Zugfestigkeit erhöht, Dehnung, Einschnürung und Kerbschlagzähigkeit fallen dagegen ab. Die Alterungsanfälligkeit wird besonders durch höhere Gehalte an Stickstoff gefördert. Aber auch anderen Elementen wie Kohlenstoff und Phosphor sowie der ursprünglichen Korngrösse des Stahles wird ein Einfluss auf die Alterungsneigung zugeschrieben [25] [33]. Das gleiche gilt für Sauerstoff und Schwefel [34]. Der Alterungsvorgang wird dadurch ausgelöst, dass sich im Eisen gelöste Stickstoffatome an den im Gitteraufbau vorhandenen Fehlstellen – den sogenannten Versetzungen – ablagern. Der Verformungswiderstand an den Korngrenzen steigt dadurch an. Durch eine Kaltverformung wird die Anzahl der Versetzungen erhöht, und zwar um so mehr, je grösser der Verformungsgrad ist. Damit erhöht sich auch die Alterungsneigung. Die Diffusion zu den Versetzungen ist in starkem Masse temperaturabhängig. Wird ein Stahl auf höhere Temperaturen (bis 400 °C) erwärmt, so läuft der Alterungsvorgang wegen der grösseren Diffusionsgeschwindigkeit bedeutend schneller ab.

Beim Schweissen treten in der WEZ sämtliche Temperaturen zwischen Raumtemperatur und Schmelztemperatur des Stahles auf, so dass bei alterungsanfälligen Stählen der Alterungsvorgang in einer bestimmten Zone durch die Schweisswärme beschleunigt wird. Es wäre daher möglich, dass kaltverwundene Armierungsstähle beim Schweissen infolge Alterung verspröden, wenn der Stahl entsprechend hohe Gehalte an Stickstoff aufweist. Bei Stickstoffgehalten $< 0{,}01\,\%$ sind beruhigte Stähle mit niedrigen Kohlenstoffgehalten weitgehend unempfindlich gegenüber Alterung. Bei dem in der Schweiz üblichen Stahlherstellungsverfahren im Lichtbogenofen werden diese Gehalte im allgemeinen nicht überschritten. Infolgedessen behalten die kaltverwundenen Armierungsstähle auch nach dem Schweissen ihr gutes Verformungsvermögen, wie später noch anhand von Biegeproben gezeigt wird.

In der Literatur liegen zum Problem der Alterung durch Schweisswärme unterschiedliche Ergebnisse vor. Einige Verfasser konnten keine oder nur eine geringe Erhöhung der Sprödbruchneigung kaltverformter Stähle (z. B. Kaltprofile) infolge Alterung feststellen [26] [28]. Andere weisen nach, dass die Schweisswärme eine Alterung kaltverformter Stähle bewirken kann [25] [27] [30]. Bei diesem Versuchsmaterial handelte es sich jedoch um Stähle, die aufgrund ihres hohen Stickstoffgehaltes als stark alterungsanfällig anzusehen sind (Thomasstähle).

Die Zähigkeit eines Stahles wird auch von seiner Korngrösse bestimmt. Es ist daher die Frage von Bedeutung, ob beim Schweissen eines im kritischen Bereich kaltverformten Stahles Grobkornbildung infolge Rekristallisation auftreten kann. Der kritische Verformungsbereich, bei dem durch Rekristallisation Grobkornbildung eintritt, liegt im allgemeinen bei Baustählen zwischen 5 und 15 %; die Temperatur, bei der die Rekristallisation abläuft, beträgt je nach Verformungsgrad 500° bis 700 °C. Da Diffusionsvorgänge den Rekristallisationsablauf steuern, ist für die Kornneubildung und besonders für das Kornwachstum eine kritische Glühzeit erforderlich. Beim Schweissen werden die erforderlichen Temperaturen jedoch nur kurzzeitig erreicht, so dass ein durch die Schweisswärme hervorgerufenes Kornwachstum bisher nicht festgestellt werden konnte [25] [26] [27] [31].

3. Schweissversuche an Roll-S

3.1 Versuchsdurchführung

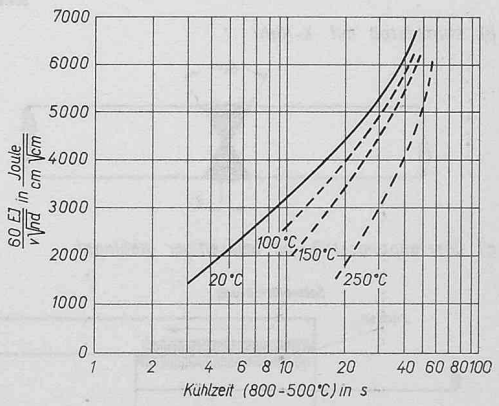
Roll-S ist ein Armierungsstahl der Gruppe IIIb gemäss SIA-Norm 162. Seine garantierten Mindestwerte betragen jedoch:

Streckgrenze	$\sigma_{2,0}$	$= 5000$ kg/cm²
Zugfestigkeit	β_z	$= 5600$ kg/cm²
Dehnung	λ_5	$= 13\,\%$ (gemäss SIA-Norm 162)

Diese Festigkeitseigenschaften werden durch Kaltverwinden der mit Schrägrippen versehenen Stäbe mit quadratischem Querschnitt erreicht. Der Verwindegrad liegt normalerweise bei $10 \times d$ (d = Nenndurchmesser), das heisst eine Ganghöhe erstreckt sich über eine Stablänge von $10 \times$ Stabnenndurchmesser.

In Tabelle 2 sind Analyse und Festigkeitswerte des für die Schweissversuche verwendeten Materials wiedergegeben. Der Stahl weist den für Elektrostahl üblichen, niedrigen Stickstoffgehalt auf. Seine Alterungsneigung ist daher gering. Die Festigkeitswerte liegen über den Garantiewerten.

Ziel und Zweck der Versuche war, den Nachweis der Schweisseignung von Roll-S bei Anwendung des elektrischen Lichtbogen-



Bemerkung:

$\frac{60\,EJ}{v\sqrt{nd}}$ in $\frac{\text{Joule}}{\text{cm}\sqrt{\text{cm}}}$ = *von A. Rose vorgeschlagene Formel zur Bestimmung des Wärmeeinbringens und der durch die Geometrie bedingten Wärmeabfuhr beim Schweißen (Schweißbedingungen).*

Dabei ist:
- *E die Spannung in Volt*
- *J die Stromstärke in Ampère*
- *v die Vorschubgeschwindigkeit in cm/min*
- *d die Blechdicke in mm*
- *n Faktor für die Geometrie der Wärmeableitung*

Bild 3. Einfluss des Vorwärmens auf die Abkühlung der wärmebeeinflussten Zone (nach A. Rose)

Tabelle 2: Analyse und mechanische Eigenschaften des für die Schweissversuche verwendeten Materials (Roll-S)

Nenndurchmesser mm	Analyse C %	Mn %	Si %	P %	S %	N %	Mechanische Werte σ_S kp/mm²	σ_B kp/mm²	δ_5 %
12	0,14	0,62	0,22	0,026	0,036	0,0068	51,8–54,1	61,0–62,9	14,4–18,2
20							50,7–55,6	59,5–66,1	13,9–17,9
30							51,0–56,4	60,3–63,1	13,5–15,8
34							58,8	61,8	15,5

schweissens zu erbringen und die Schweissbedingungen festzulegen. Dabei kam den Einflussgrössen Verbindungsform, Wärmeeinbringen und Wärmeabfuhr besondere Bedeutung zu.

In der Praxis haben sich vor allem in Deutschland 2 Verbindungsformen durchgesetzt. Dies sind der Überlappungsstoss mit einseitiger, unterbrochener Kehlnaht und der Stumpfstoss mit X-Naht (Bilder 4a und 4b). Die Anwendung des Überlappungsstosses bei Druckbeanspruchung ist umstritten, weil der Spitzendruck der Stäbe die Betonüberdeckung zum Abplatzen bringen kann [34]. Bei Zugbeanspruchung hat er sich dagegen bestens bewährt [24]. Werden die Stäbe auf Druck beansprucht, wird vorwiegend der Stumpfstoss mit X-Naht vorgesehen. So darf zum Beispiel nach deutschen Vorschriften [8] der Stumpfstoss mit X-Naht *nur* bei auf Druck beanspruchten Stäben > 20 mm ⌀ in Stützen angewendet werden. Bei Zugbeanspruchung sind demnach abbrennstumpfgeschweisste Stösse oder lichtbogengeschweisste Überlappungsstösse vorzusehen. Doch zeigten bereits früher durchgeführte Schweissuntersuchungen [22], dass es möglich ist, runde Stäbe aus schweissbarem Armierungsstahl mit einer normalen X-Naht axial – und zumindest für statische Zugbeanspruchung – vollwertig zu stossen. Diese Stösse wiesen die gleiche Tragfähigkeit auf wie die ungeschweissten Stäbe.

Die für das Schweissen von Armierungsstählen verbindlichen schweizerischen und österreichischen Vorschriften enthalten keine Angaben hinsichtlich des bei Zug- bzw. Druckbeanspruchung zu wählenden Verbindungsstosses.

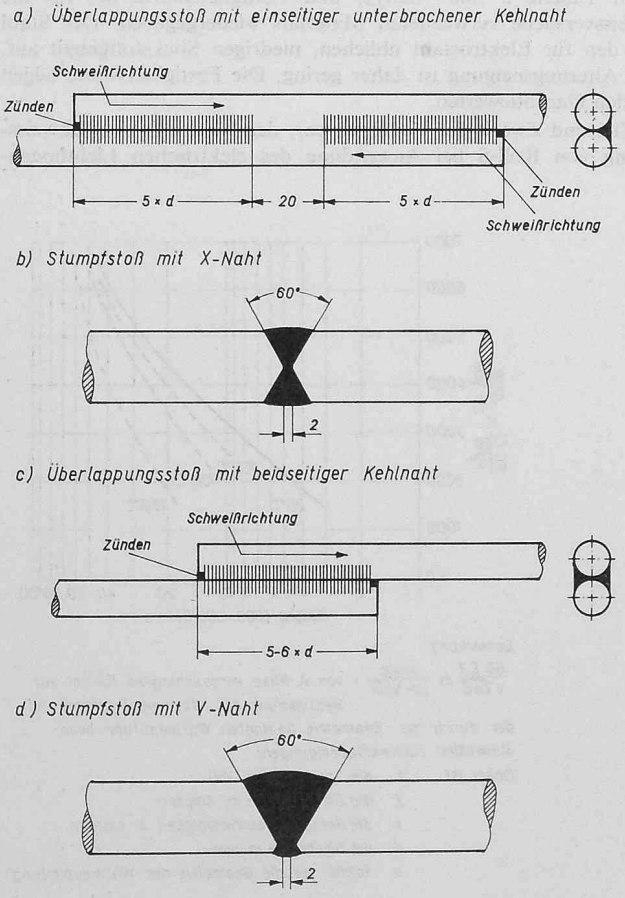


Bild 4. Untersuchte Verbindungsformen zum Schweissen von Roll-S-Stäben

Neben den beiden erwähnten Verbindungsformen wurden bei den Schweissversuchen auch der Überlappungsstoss mit beidseitiger Kehlnahtschweissung sowie der Stumpfstoss mit V-Naht erprobt (Bilder 4c und 4d). Vorversuche hatten gezeigt, dass für Stösse mit beidseitiger Kehlnaht eine Überlappungslänge von L = 5 d als ausreichend angesehen werden kann. Der Stumpfstoss mit V-Naht ist wegen des grossen Nahtvolumens eigentlich nur für kleinere Abmessungen von Bedeutung. Er wurde jedoch der Vollständigkeit halber auch im oberen Abmessungsbereich untersucht. Weitere Vorversuche gaben Aufschluss über die bei den verschiedenen Durchmessern zu wählenden Elektrodendurchmesser und Stromstärken. Denn um eine Entfestigung der kaltverwundenen Armierungsstähle zu vermeiden, darf beim Schweissen nur soviel Wärme eingebracht werden, wie zur Sicherstellung einer fehlerfreien Verbindung von Schweissgut und Grundwerkstoff erforderlich ist. Je kleiner der Elektrodendurchmesser und je niedriger die Stromstärke gewählt werden, um so geringer ist das Wärmeeinbringen. Die für das Schweissen von Roll-S günstigsten Bedingungen sind in Bild 5 wiedergegeben.

Das Reduzieren des Wärmeeinbringens allein ist jedoch nicht ausreichend für die Sicherstellung einer guten Schweissverbindung. Zusätzlich ist jeder Wärmestau in der WEZ einer Schweissverbindung zu vermeiden, weil auch dadurch eine entfestigende Wirkung hervorgerufen werden kann. Daher kommt den Abkühlbedingungen der Schweissstelle beim Schweissen eine besondere Bedeutung zu. Durch geeignete Massnahmen muss in kürzester Zeit möglichst viel Wärme abgeführt werden. Zur Klärung dieser Verhältnisse wurden die nachfolgenden drei Abkühlungsvarianten erprobt:

1. Beschleunigte Abkühlung mit Wasser. Die Abkühlung wurde dadurch gemildert, dass eine Brause oder ein nasser Lappen verwendet wurde.
2. Abkühlung an ruhender Luft mit Abkühlungspausen. Bevor eine neue Lage geschweisst wurde, war die vorhergehende auf Temperaturen unter 200 °C (gemessen mit Thermocolorstiften) abgekühlt. Auf eine Abkühlung auf Handwärme – wie es zuweilen empfohlen wird – wurde verzichtet, da mit kleiner werdenden Temperaturdifferenzen sehr lange Abkühlzeiten erforderlich sind.
3. Abkühlung an ruhender Luft ohne Abkühlungspausen zwischen den einzelnen Schweisslagen.

Die Wasserabkühlung führt zwangsläufig zu einer sehr schnellen Ableitung der Schweisswärme. So können die längeren Abkühlungspausen zwischen den einzelnen Schweisslagen, die den Arbeitsprozess verzögern, entfallen. Bei den Untersuchungen wurde der Einflussgrösse «Wasserabkühlung» besondere Beachtung geschenkt. Fällt die Abkühlung zu schroff aus, besteht die Möglichkeit einer übermässigen Aufhärtung vor allem des Schweissgutes, das höhere Anteile an aufhärtenden Legierungszusätzen enthält als der Grundwerkstoff. Die Wasserabkühlung muss daher möglichst «milde» sein. Dies sollte auf die beschriebene Weise erreicht werden. Ein weitgehender Abbau der auch bei «milder» Wasserabkühlung entstehenden Härtespitzen erfolgt durch die Viellagenschweissung beim Stumpfstoss. Durch die nachfolgenden Lagen werden die vorhergehenden angelassen. Dies bewirkt eine Vergütung des Schweissgutes. Die Zähigkeit der Schweissverbindung wird dadurch verbessert. Eine Ausnahme bildet die letzte Lage, die sogenannte Decklage; sie erfährt keine Anlassbehandlung. Da aber gerade die Zähigkeit der Randzone von entscheidendem Einfluss auf das Verformungsverhalten des Stabes ist, wurde in einer zweiten Versuchsstufe des Biegeversuches auf die Wasserabkühlung der Decklagen verzichtet. *St Soretz* und *R. Tinti* [20] beschreiben ein Verfahren zur Herstellung abbrennstumpfgeschweisster Torstahlstäbe, deren Schweissstelle nach dem Schweissen aus der Stauchhitze (Abbrennstumpfschweissverfahren) mit Wasser abgeschreckt wird. Diese wassergehärteten Schweissverbindungen haben im Biegeversuch – gemäss den Bestimmungen der DIN E 4227 – ein ausreichendes Verformungsvermögen gezeigt.

Tabelle 3: Richtanalysen und mechanische Gütewerte des reinen Schweissgutes der erprobten Elektroden

Elektroden-bezeichnung	Lieferwerk	Analyse C %	Si %	Mn %	Ni %	V %	Mo %	Mechanische Werte σ_S kp/mm²	σ_B kp/mm²	δ_5 %
EV 63	Boehler	0,08	0,7	1,8	—	—	—	50–55	60–70	23–28
NiV70 Kb	Boehler	0,10	0,3	1,3	0,55	0,12	—	56–64	65–72	22–26
Tenacito-70	Oerlikon	0,07	0,55/0,65	1,3/1,5	0,50/0,65	—	—	58–62	64–68	20–24
Tensal	Sécheron	0,06/0,08	0,15/0,25	1,5/1,7	—	—	0,40/0,60	55–60	65–70	20–25

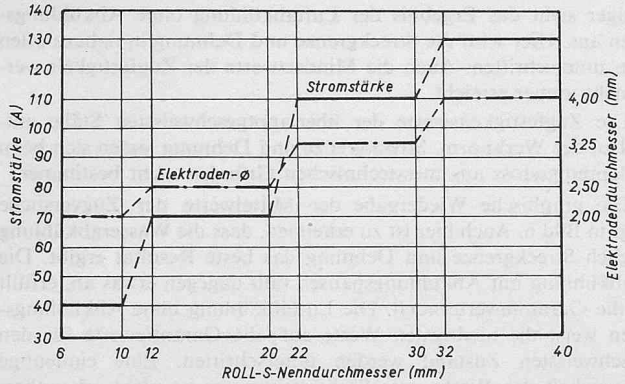


Bild 5. Stromstärke und Elektrodendurchmesser in Abhängigkeit von den Roll-S-Nenndurchmessern

Bei Abkühlungen an Luft sind, um grössere Wärmestauungen zu vermeiden, zwischen den einzelnen Lagen Abkühlungspausen einzuschalten. Diese Pausen können zu unliebsamen Verzögerungen des Arbeitsprozesses führen, wenn sie nicht durch gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Stösse ausgenutzt werden. Beim Überlappungsstoss sind ungleich weniger Lagen erforderlich als beim Stumpfstoss. Vielfach wird aus diesem und anderen Gründen (Nahtvorbereitung, Beanspruchungsart) dem Überlappungsstoss der Vorzug gegeben. Bei der Luftabkühlung ohne Abkühlungspausen wurde Lage auf Lage geschweisst. Diese Abkühlungsvariante sollte Aufschluss darüber geben, in welchem Masse sich der zwangsläufig ergebende Wärmestau entfestigend auswirkt. Sie wurde jedoch nur im begrenzten Rahmen bei der Stumpfstossschweissung untersucht.

Bei der Stumpfstossschweissung wurden möglichst viele Lagen zügig geschweisst. Damit wurde in Verbindung mit den anderen Massnahmen sichergestellt, dass das Wärmeeinbringen pro Lage kleingehalten wurde und die Schweisswärme leichter abgeleitet werden konnte. Je nach Durchmesser betrug beim Stumpfstoss die Anzahl der Lagen zwischen 6 (bei 12 mm ⌀) und 10 (bei 30 mm ⌀). Auf die mit der Viellagenschweissung verbundenen Vorteile wurde bereits im Zusammenhang mit der Wasserabkühlung hingewiesen. Beim Überlappungsstoss, der bei der Abmessung 20 mm ⌀ erprobt wurde, wurden je Naht 1–2 Lagen geschweisst.

Die Zusammensetzung und die Festigkeitswerte der bei den Versuchen benutzten Elektroden werden in Tabelle 3 wiedergegeben. Bei den bereits erwähnten Vorversuchen hatten sich diese Elektroden als gleichwertig und geeignet für das Schweissen von Roll-S erwiesen. Die Schweissarbeiten wurden mit einem Schweissumformer Typ Arcofix 300 von Sécheron durchgeführt. Der Umformer ist bei einer Nennleistung von 17,3 kVA für 230 A Dauerschweissstrom und 300 A Maximalschweissstrom ausgelegt. Wegen der gleichmässigeren Schweissbedingungen wurde mit Gleichstrom geschweisst. Elektroden, die mit Gleichstrom und Wechselstrom geschweisst werden können, wurden in einigen Fällen vergleichsweise auch mit Wechselstrom geschweisst. Es zeigte sich kein Unterschied in den Ergebnissen.

Insgesamt wurden 73 geschweisste Proben im Zugversuch, 49 Proben im Biegeversuch und 8 Proben im Aufschweissbiegeversuch geprüft. Härteprüfungen erfolgten an 13 Proben, mikroskopische und makroskopische Untersuchungen an weiteren 25 Proben. Nähere Erläuterungen zu den Prüfbedingungen erfolgen im nächsten Kapitel.

Tabelle 4: Ergebnisse der Zugversuche (Stumpfstoss)

Probenummer	Probedurchmesser	Verbindungsart und Nahtform	Abkühlungsart *)	Werte der Zugversuche: Streckgrenze σ_S in kp/mm²	Festigkeit σ_B in kp/mm²	Dehnung δ_5 in %
1a	12 mm	Stumpfstoss mit V-Naht	L (A)	51,9	60,7	10,3
b			L (A)	51,4	62,5	11,7
2a			W	52,6	63,2	17,0
b			W	53,1	63,2	15,8
3a			L	44,4	56,6	11,2
b			L	45,5	58,2	11,7
4a		Stumpfstoss mit X-Naht	L (A)	51,3	61,9	13,3
b			L (A)	52,4	62,2	14,7
5a			W	53,3	62,1	17,0
b			W	53,8	62,3	17,8
6a			L	42,9	55,7	15,0
b			L	45,9	57,5	14,2
7a	20 mm	Stumpfstoss mit V-Naht	L (A)	50,0	63,4	12,8
b			L (A)	48,2	63,3	11,8
8a			W	54,6	61,8	14,9
b			W	52,7	63,0	15,6
9a			L	43,8	57,6	11,2
b			L	49,1	61.1	10,4
10a		Stumpfstoss mit X-Naht	L (A)	52,8	65,8	15,7
b			L (A)	55,1	65,9	15,3
11a			W	55,8	63,8	14,3
b			W	53,0	64,9	15,3
12a			L	45,8	61,0	10,0
b			L	48,1	61,9	11,6
13a			W	55,7	65,2	15,0
b			W	53,6	58,9	17,3
14a	20 mm	Stumpfstoss mit X-Naht	W	53,8	60,8	14,2
b			W	51,6	60,0	15,0
15a			W	51,9	59,2	18,0
b			W	51,5	59,0	14,5
16a			W	52,2	58,6	14,3
b			W	54,4	61,1	15,1
17a			W	53,1	61,4	14,2
b			W	52,7	60,3	13,7
18a			W	52,5	59,3	14,5
b			W	53,5	60,5	14,8
19a	30 mm	Stumpfstoss mit V-Naht	L (A)	50,9	60,3	15,8
b			L (A)	47,0	60,8	12,1
20a			W	52,8	59,5	14,8
b			W	50,2	60,5	13,7
21a			L	42,3	55,0	8,0
b			L	45,4	58,5	10,7
22a		Stumpfstoss mit X-Naht	L (A)	55,5	61,0	13,7
b			L (A)	56,2	60,4	13,5
23a			W	48,2	59,8	14,0
b			W	50,3	59,9	13,2
24a			W	53,4	61,7	14,3
b			W	54,7	61,4	13,2
25a			L	43,8	57,7	12,1
b			L	49,3	58,9	9,0
26a	34 mm		W	58,7	61,3	16,1
b			W	57,8	60,2	16,0
27a			W	57,5	60,5	14,8
b			W	58,4	61,3	15,1

*) L (A) = Luft mit Abkühlungspausen
W = Wasser
L = Luft ohne Abkühlungspausen

3.2 Versuchsergebnisse und Diskussion

3.2.1 Zugversuche

Das Ergebnis der Zugversuche für die stumpfstossgeschweissten Proben ist in Tabelle 4, das für die überlapptgeschweissten Proben inTabelle 5 zusammengefasst.

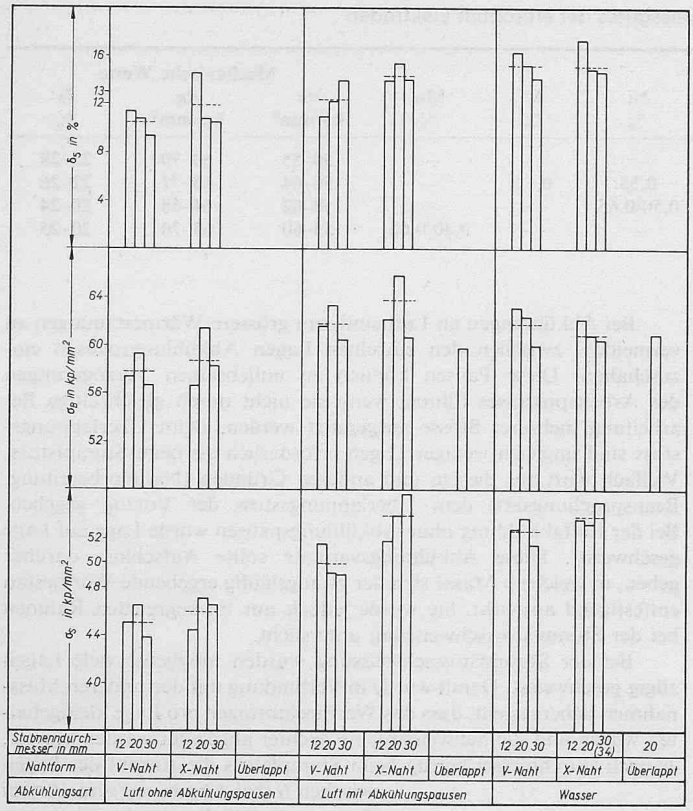


Bild 6. Mittelwerte der Zugversuche an geschweissten Proben (gestrichelte Linien = Mittelwerte aus den drei Abmessungen)

Bei der Betrachtung der Einzelwerte der Zugversuche an den stumpfstossgeschweissten Proben ergibt sich folgendes Bild: Bei der Wasserabkühlung werden Zugfestigkeit und Dehnung in allen Fällen erreicht, die Streckgrenze liegt nur in einem Fall mit 48,2 kp/mm² unter der Werknorm, erfüllt jedoch noch die SIA-Norm. Bei der Luftabkühlung mit Abkühlungspausen erreichten 2 Streckgrenzen- und 5 Dehnungswerte die Werkgarantie nicht. Der niedrigste Streckgrenzenwert liegt bei 47,0 kp/mm², damit wird auch hier die SIA-Vorschrift in jedem Fall erfüllt. Zu bemerken ist in diesem Zusammenhang, dass die unter Werknorm liegenden Werte mit einer Ausnahme auf die Kombination V-Naht/Luftabkühlung mit Abkühlungspausen entfallen. Auf diesen Punkt wird später noch eingegangen. Wesentlich ungünstiger sieht das Ergebnis der Luftabkühlung ohne Abkühlungspausen aus. Hier wird die Streckgrenze und Dehnung in nahezu allen Fällen unterschritten. Auch die Mindestwerte der Zugfestigkeit werden nicht immer erreicht.

Die Zugfestigkeitswerte der überlapptgeschweissten Stäbe entsprechen der Werknorm. Streckgrenze und Dehnung lassen sich beim Überlappungsstoss aus messtechnischen Gründen nicht bestimmen.

Die graphische Wiedergabe der Mittelwerte der Zugversuche erfolgt in Bild 6. Auch hier ist zu erkennen, dass die Wasserabkühlung bezüglich Streckgrenze und Dehnung das beste Resultat ergibt. Die Luftabkühlung mit Abkühlungspausen fällt dagegen etwas ab, erfüllt aber die Garantiewerte noch. Die Luftabkühlung ohne Abkühlungspausen weist die niedrigsten Werte auf; die Garantiewerte für den ungeschweissten Zustand werden unterschritten. Eine eindeutige Abhängigkeit der Werte vom Stabdurchmesser ist nicht erkennbar.

Bilder 7 bis 10. Härteverlauf über die Schweissstelle an stumpfgeschweissten Proben

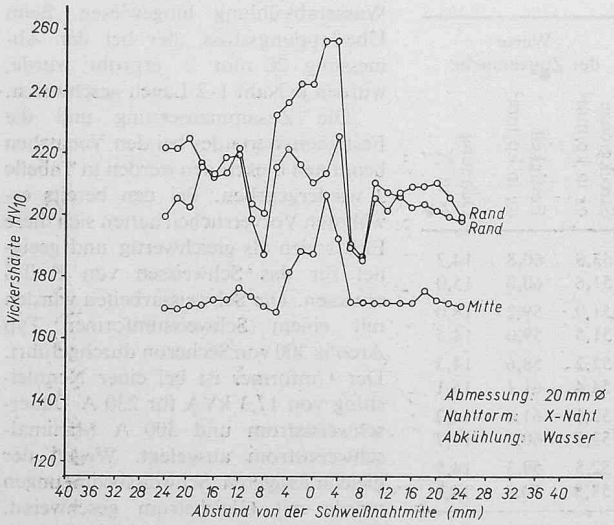


Bild 7

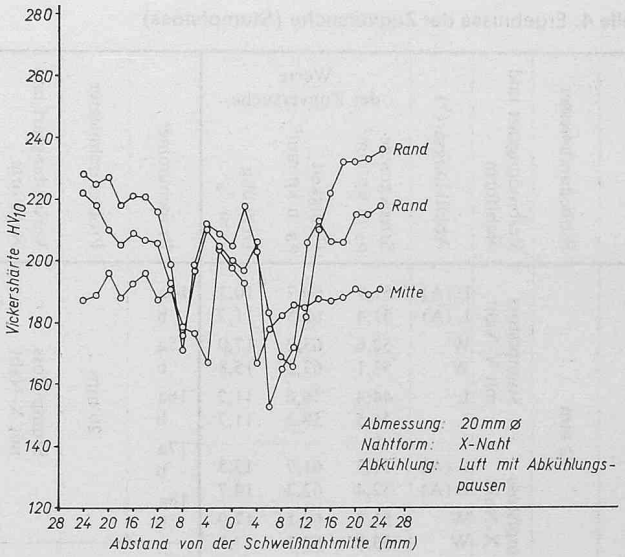


Bild 8

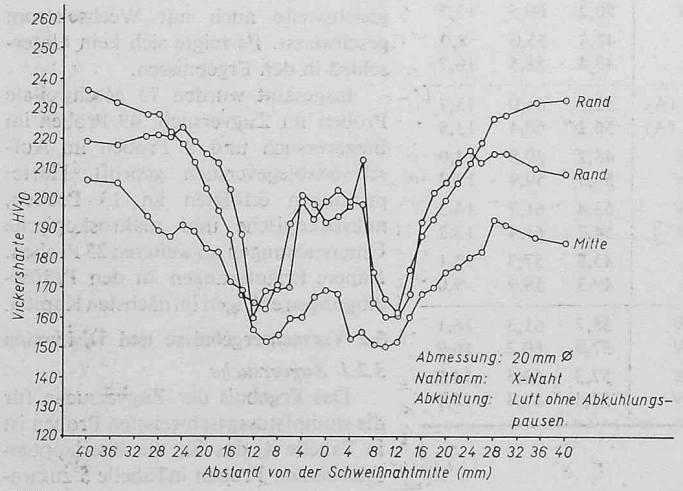


Bild 9

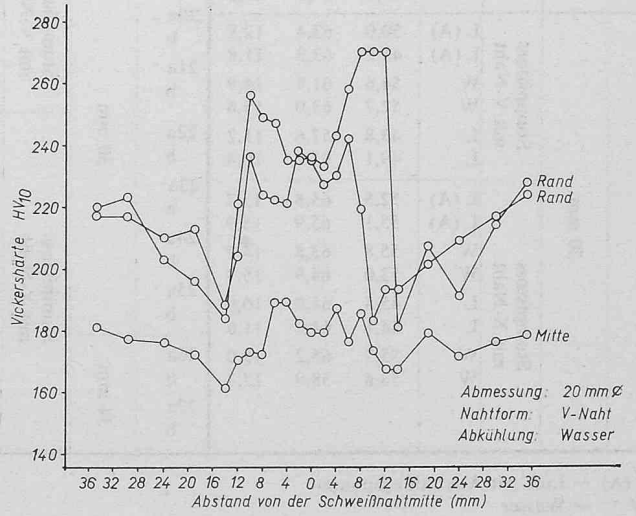


Bild 10

Tabelle 5: Ergebnisse der Zugversuche (Ueberlappungsstoss)

Probenummer	Probedurchmesser	Verbindungsart	Nahtform	Abkühlungsart *)	Zugfestigkeit σ_B in kp/mm²
28 a	20 mm	Überlappungsstoss	beidseitige Kehlnaht	L (A)	59,2
b				L (A)	59,9
c				L (A)	61,5
29 a				W	62,4
b				W	63,0
30 a				W	59,1
b				W	59,2
c				W	59,5
d				W	59,9
31 a				W	58,7
b				W	59,5
c				W	59,9
d				W	59,9
32 a			einseitige Kehlnaht	L (A)	58,0
b				L (A)	60,2
c				L (A)	59,9
33 a				W	59,9
b				W	61,1
c				W	61,2

*) L (A) = Luft mit Abkühlungspausen
W = Wasser

Dagegen tritt der Einfluss der Nahtform auf die Höhe der Streckgrenze und der Dehnung deutlich hervor. Die X-Naht ist der V-Naht überlegen. Das zeigt sich besonders bei der Variante Luftabkühlung mit Abkühlungspausen. Hier entfallen praktisch alle Ausreisser auf die V-Naht. Da das Nahtvolumen der V-Naht grösser ist als das der X-Naht, wird auch das Wärmeeinbringen grösser. Dadurch kommt es zu einer gewissen Entfestigung. Die Anwendung der V-Naht muss daher auf Sonderfälle beschränkt bleiben. Wenn stumpfgestossen werden soll, ist die X-Naht zu wählen.

Um eine Erklärung für das gute Verhalten der wasserabgekühlten Proben im Zugversuch zu finden, muss auch das Ergebnis der Härteprüfung mit berücksichtigt werden. Wie im Abschnitt 3.2.3 noch näher erläutert wird und die Bilder 7 bis 10 zeigen, lässt sich beim Schweissen von kaltverwundenen Stählen eine gewisse Entfestigung über eine schmale Zone neben der Schweissnaht nicht vermeiden. Die Breite der entfestigten Zone ist abhängig von der eingebrachten Wärmemenge und vom Mass der Wärmeableitung. Die Wärmeableitung ist bei der Wasserabkühlung (Abkühlvariante 1) sehr gross, infolgedessen bleibt der entfestigte Bereich äusserst schmal. Bei der Luftabkühlung mit Abkühlungspausen (Abkühlvariante 2) wird die entfestigte Zone infolge des stärkeren Wärmestaus breiter. Sie nimmt noch weiter zu, wenn keine Abkühlungspausen (Abkühlvariante 3) zwischengeschaltet werden. Die Breite der entfestigten Zone beeinflusst die Bruchlage der Zerreissstäbe wesentlich. Die wasserabgekühlten Proben brachen fast ausschliesslich in grossem Abstand von der Schweissnaht (Bild 11). Dagegen befinden sich die Bruchstellen der luftabgekühlten Proben mit Abkühlungspausen etwa zur Hälfte in der WEZ der Schweissnaht, zur anderen Hälfte im freien Stab. Wurde auf die Abkühlungspausen verzichtet, so brachen die Proben ausnahmslos neben der Schweissnaht.

Damit wird deutlich, warum die Dehungswerte der wasserabgekühlten Stäbe insgesamt gesehen besser ausgefallen sind als die der luftabgekühlten Schweissproben (mit oder ohne Abkühlungspausen). Erfolgt der Bruch zum Beispiel infolge einer gewissen Entfestigung in der WEZ der Schweissnaht, so wird die Dehnung einerseits durch eine Dehnungsbehinderung der Schweissnaht beeinträchtigt, anderseits setzt, falls die entfestigte Zone ein bestimmtes Mass überschreitet, die Einschnürung an dieser schwachen Stelle vorzeitig ein, so dass sich die Gleichmassdehnung über die gesamte Messlänge des Zerreissstabes nur ungenügend ausbilden kann. Diese Erscheinung ist besonders bei den luftabgekühlten Proben zu beobachten, die ohne Abkühlungspausen geschweisst wurden. Werden Abkühlungspausen zur Ableitung der Schweisswärme zwischengeschaltet, so werden die Werte besser, wenn auch die Werte der Luftabkühlung (mit Abkühlungspausen) in Verbindung mit der V-Naht nicht voll befriedigen.

Der Überlappungsstoss hat sich als vollwertige Verbindungsform erwiesen. Die Zugfestigkeitswerte entsprechen in allen Fällen der Vorschrift. Die Bruchlage ist über die freie Stablänge verteilt (Bild 12). Brüche im Übergang treten selten auf. Sie wirken sich aber auch nicht nachteilig auf die Zugfestigkeit der Schweissproben aus.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Ergebnis der Zugversuche beweist, dass sich Roll-S ohne merkliche Beeinträchtigung seiner Festigkeitswerte schweissen lässt. Voraussetzung dafür ist, dass die Wärmezufuhr beschränkt und die Schweisswärme entweder durch Wasser oder bei Luftabkühlung durch Einschalten von Abkühlungspausen abgeführt wird. Eine schmale entfestigte Zone neben der Schweissnaht wirkt sich nicht als schwache Stelle der Schweissverbindung aus. Die Gründe dafür wurden bereits weiter oben angeführt. Die Ergebnisse früherer Untersuchungen an kaltverformten Stählen (Kaltprofile, Armierungsstähle u. a.) [21] [23] [26] [28] [29] werden durch die vorliegende Arbeit im wesentlichen bestätigt.

3.2.2 Biegeversuche

Die SIA-Norm 162 schreibt im Zusammenhang mit dem Schweissbarkeitsnachweis von Armierungsstählen vor, dass ausser entsprechenden Festigkeitswerten genügendes Verformungsvermögen und Sprödbruchsicherheit reproduzierbar nachzuweisen sind. In welcher Form dies zu geschehen hat, wird nicht erwähnt. Aus diesem Grunde musste auf Vorschriften ausländischer Normen zurückgegriffen werden. Ein Entwurf der DIN 488 – Betonstahl – vom September 1967 sieht ebenso wie die neue OENORM B 4200, 7. Teil, zur Prüfung der Verformbarkeit der Schweissstelle einen Biegeversuch vor. Nach dem Entwurf der DIN 488 ist der Biegeversuch jedoch – im Gegensatz zur

Bild 11 (links). Zerreissproben von stumpfgeschweissten Roll-S-Stäben (X = Naht)

Bild 12 (rechts). Zerreissproben von überlapptgeschweissten Roll-S-Stäben

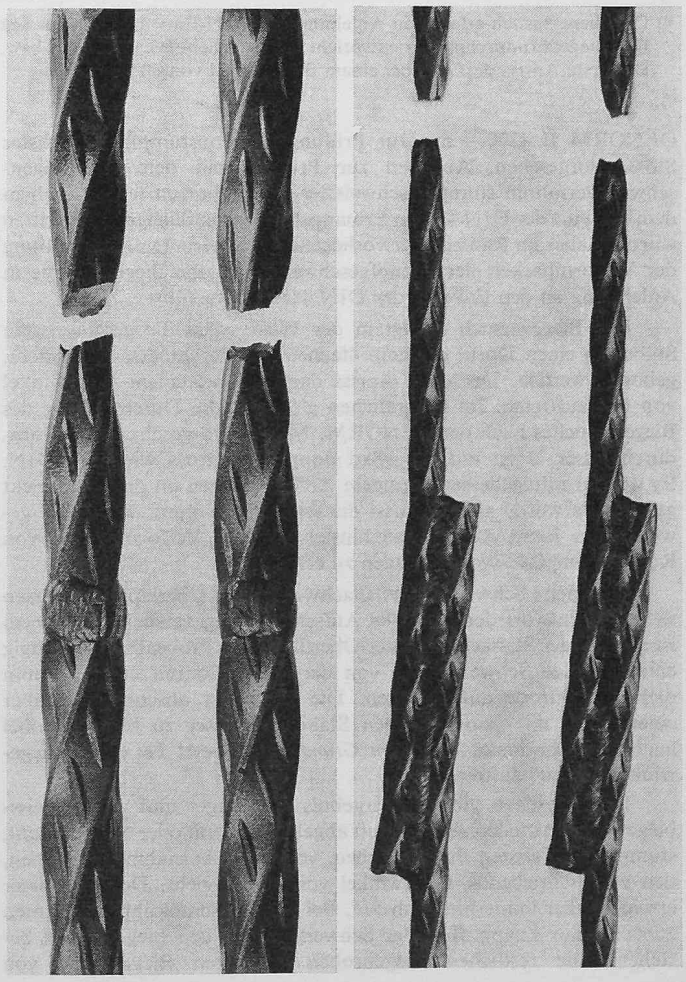


Tabelle 6. Ergebnisse der Biege- und Aufschweissbiegeversuche

Probedurchmesser	Nahtform	Biegeversuch*) (Stumpfstoss) Abkühlung der Proben nach dem Schweissen: Luft mit Abkühlungspausen, erreichter Biegewinkel	Wasser: Decklage Wasser, erreichter Biegewinkel	Wasser: Decklage Luft, erreichter Biegewinkel	Luft ohne Abkühlungspausen, erreichter Biegewinkel	Probedurchmesser	Aufschweissbiegeversuch*) Abkühlung nach dem Schweissen: Luft, erreichter Biegewinkel	Wasser, erreichter Biegewinkel
12 mm	V-Naht	71 best. 180 best.	46 n. best. 180 best.	— —	180 best. 180 best.	20 mm, versehen mit einer einlagigen Schweissraupe von 40 mm Länge	180 best. 180 best.	180 best. 180 best.
	X-Naht	180 best. 72 best.	86 best. 52 n. best.	— —	180 best. 180 best.		180 best. 180 best.	180 best. 180 best.
20 mm	V-Naht	180 best. 82 best.	64 best. 180 best.	— —	180 best. 180 best.			
	X-Naht	180 best. 180 best. 70 best. 51 n. best. 69 best. — —	46 n. best. 180 best. 42 n. best. 51 n. best. 70 n. best. — —	180 best. 180 best. 80 best. 180 best. 180 best. 180 best. 180 best.	180 best. 180 best. — — — — —			
30 mm	V-Naht	180 best. 180 best.	56 n. best. 62 best.	— —	180 best. 180 best.			
	X-Naht	180 best. 180 best.	43 n. best. 59 n. best.	— —	180 best. 180 best.			
		14× best. 1× n.best.	6× best. 9× n.best.	7× best. 0× n.best.	12× best. 0× n.best.		4× best. 0× n.best.	4× best. 0× n.best.

*) Der Biegeversuch erfolgte in Anlehnung an DIN-Entwurf 488 vom Sept. 1967, der Aufschweissbiegeversuch gemäss diesem Entwurf.
Der Biegedorndurchmesser entspricht dem 4fachen (Biegeversuch) bzw. 3,5fachen (Aufschweissbiegeversuch) Stabdurchmesser.
Der erste Anriss darf erst bei einem Biegewinkel von 60° auftreten.

OENORM B 4200 – nur zur Prüfung abbrennstumpfgeschweisster Stösse vorgesehen. Angaben zur Prüfung mit dem Lichtbogenschweissverfahren stumpfgeschweisster Verbindungen fehlen auch in dem Entwurf der DIN 488. In Ermangelung verbindlicher Vorschriften wurden daher im Rahmen der vorliegenden Untersuchung zur Prüfung der Verformbarkeit der stumpfgeschweissten Stäbe Biegeversuche in Anlehnung an den Entwurf der DIN 488 durchgeführt.

Der Biegeversuch erfolgt in der Weise, dass die geschweissten Stäbe um einen Dorn, der dem 4fachen Stabdurchmesser entspricht, gebogen werden. Der erste Anriss darf erst bei einem Biegewinkel von 60° auftreten. Im wesentlichen gleich ist die Durchführung des Biegeversuches nach der OENORM. Nur der vorgeschriebene Dorndurchmesser D ist mit D = 8xd doppelt so gross wie nach DIN. Es werden infolgedessen geringere Anforderungen an das Prüfobjekt gestellt. Es wurde aber bewusst die schärfere Prüfung nach DIN gewählt, um klare Aufschlüsse hinsichtlich der Verformbarkeit von Roll-S-Stumpfstossverbindungen zu erhalten.

Für den Schweissbarkeitsnachweis von Überlappungsstössen sieht der Entwurf der DIN 488 Aufschweissbiegeversuche vor. Dazu ist entlang der Stabachse auf der Oberfläche des Probeabschnitts zügig eine einlagige Schweissraupe von der Länge 2d mit einer 2,5 mm dicken Elektrode aufzubringen. Die Probe ist anschliessend über einen Dorn mit dem 3,5fachen Stabdurchmesser zu biegen, wobei auch hier der erste Anriss *im Grundmaterial* erst bei einem Biegewinkel von 60° auftreten darf.

Die Tabelle 6 gibt das Ergebnis der Biege- und Aufschweissbiegeversuche wieder: Alle an Luft abgekühlten (mit oder ohne Pausen), stumpfgeschweissten Proben haben, von einer Ausnahme abgesehen, den vorgeschriebenen Biegewinkel von 60° erreicht. Der Ausreisser erreichte aber immerhin noch 51°. Bei der Wasserabkühlung konnten zunächst nur knapp 50% der Schweissproben den Biegeversuch bestehen. Die restlichen Biegeproben erreichten Biegewinkel von 42–59°. Sie liegen somit nur knapp unter der Vorschrift. Die Ursache für das schlechtere Verformungsverhalten gegenüber den luftabgekühlten Proben wurde auf die etwas grössere Aufhärtung des Schweissgutes (Kapitel 3.2.3) zurückgeführt. Aufgrund dieses unbefriedigenden Ergebnisses wurden in einer zweiten Stufe der Versuche Biegeproben geschweisst, bei denen die Decklagen nicht mit Wasser, sondern an Luft abgekühlt wurden. Es wurde bereits an anderer Stelle darauf hingewiesen, dass vor allem die Zähigkeit der Randzone des Armierungsstabes wichtig im Hinblick auf das Biegeverhalten des Stabes ist. Mit dieser Massnahme konnte eine Verbesserung des Verformungsverhaltens erzielt werden. Die Vorteile der Wasserabkühlung – hohe Streckgrenzen- und Dehnungswerte – wurden auf diese Weise mit der Forderung nach einer guten Verformbarkeit der Schweissverbindung in Einklang gebracht. Wie Tabelle 6 zeigt, haben alle nach dieser Variante geschweissten Proben den Biegeversuch bestanden, 6 der 7 Proben erreichten einen Biegewinkel von 180° (Bild 13).

Auch das Ergebnis des Aufschweissbiegeversuches ist zufriedenstellend. Alle Proben, unabhängig davon, ob an Luft oder mit Wasser abgekühlt, erreichten Biegewinkel von 180° (Bild 14). Nur eine der Proben zeigte bei diesem Biegewinkel erste Anrisse im Grundmaterial.

Damit ist erwiesen, dass Schweissverbindungen von Roll-S ein ausreichendes Verformungsvermögen aufweisen. Die Verformbarkeit von Schweissproben wird durch eine Wasserabkühlung nicht beeinträchtigt, wenn die Decklagen an Luft abgekühlt werden. Durch diese Massnahme wird die Zähigkeit der Randzone ohne andere nachteilige Nebenwirkungen erhöht.

3.2.3 Härteprüfung an der Schweissstelle

An insgesamt 13 stumpfgeschweissten Proben wurden Härteprüfungen nach Vickers (10 kp) durchgeführt. Der Abstand der Messpunkte betrug 2 mm. Die Bilder 7 bis 10 zeigen den charakteristischen Kurvenverlauf der Härtewerte für die untersuchten Schweissvarianten, wobei die Schweissbedingungen in den Bildern angegeben sind.

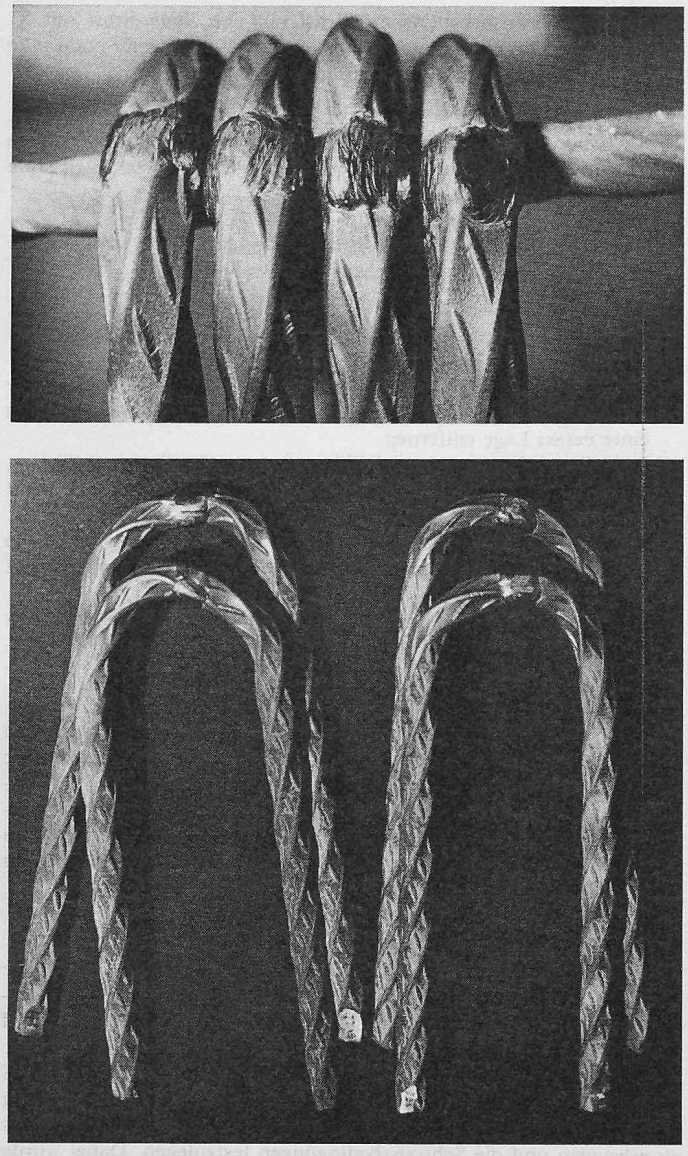


Bild 13. Biegeproben von stumpfgeschweissten Roll-S-Stäben (in Anlehnung an DIN 488, Entwurf September 1967)

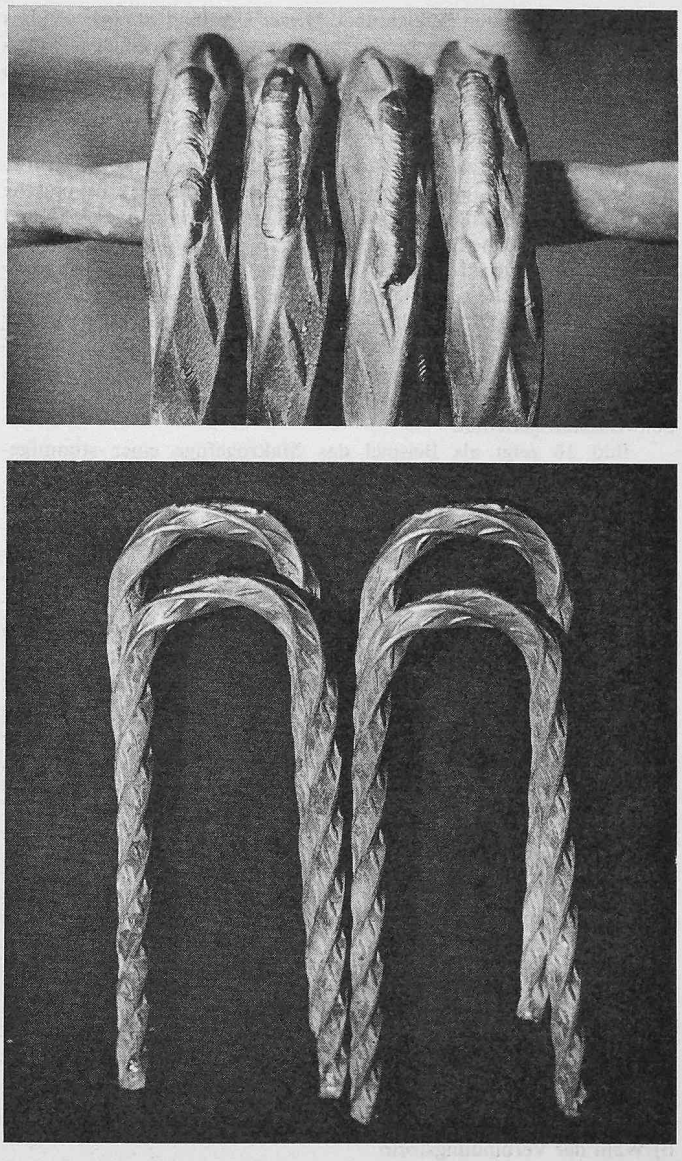


Bild 14. Aufschweiss-Biegeproben von Roll-S-Stäben (gemäss DIN 488, Entwurf September 1967)

Allen Bildern gemeinsam ist der mehr oder weniger ausgeprägte Härteabfall in der WEZ der Schweissnaht. Dieser entfestigte Bereich ist bei den wasserabgekühlten Proben am schmalsten, nimmt bei den luftabgekühlten Proben mit Abkühlungspausen zu und ist bei den luftabgekühlten Proben ohne Abkühlungspausen am breitesten. In dieser schmalen Zone entfestigt der Stahl bei der Luftabkühlung bis auf die Grössenordnung des unverwundenen Zustandes. Bei der Wasserabkühlung ist die Entfestigung nicht so durchgreifend, die Härtewerte des unverwundenen Zustandes werden nicht erreicht.

Die Zugversuche zeigten bereits, dass die Entfestigung dann ohne nachteilige Auswirkung auf die Trägfähigkeit des Stabes bleibt, wenn der entfestigte Bereich eine bestimmte Breite nicht überschreitet. Dies ist bei der Wasserabkühlung und bei der Luftabkühlung mit Abkühlungspausen der Fall.

Die Höchsthärte des Schweissgutes beträgt bei beiden Varianten der Luftabkühlung 220–230 HV. Durch die Wasserabkühlung steigt sie erwartungsgemäss an. Es wurden Härtewerte von 230 HV bis nahezu 300 HV gemessen. Die für die WEZ maximal zulässige Härte von 350 HV wurde jedoch nicht erreicht. Die Schwankungen in der Höchsthärte dürften auf unterschiedlich grosse Abkühlungsgeschwindigkeiten bei der Wasserabkühlung zurückzuführen sein. Die geringfügigen Aufhärtungen des Grundwerkstoffes sind bedeutungslos.

Bild 15 gibt den Härteverlauf eines überlapptgeschweissten, wasserabgekühlten Probestabes parallel zur Schweissnaht wieder (Längsschnitt). Die Lage der Messstrecke ist eingezeichnet. Auch hier ergibt sich eine entfestigte, eine leicht aufgehärtete und eine unbeeinflusste Zone. Die entfestigte Zone liegt im Bereich der Überlappung. Die aufgehärtete Zone beginnt im Übergang. Sie geht fliessend

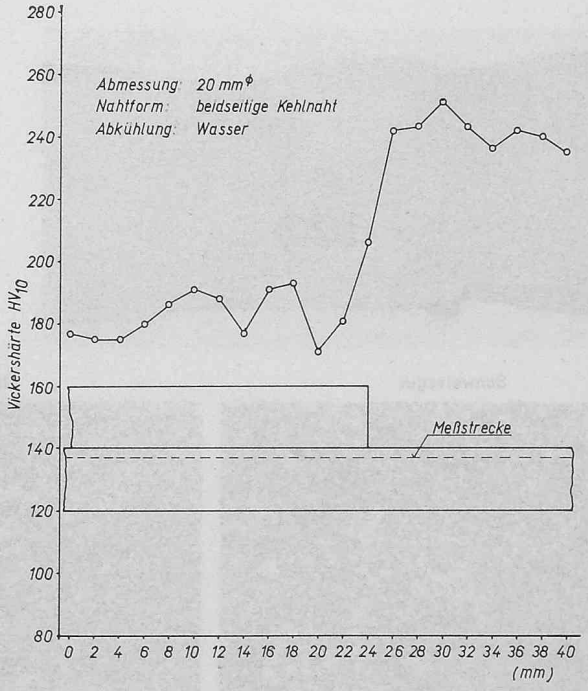


Bild 15. Härteverlauf eines überlapptgeschweissten Probestabes (Längsschnitt) parallel zur Schweissnaht

in den unbeeinflussten Bereich über. Dieser Umstand ist als besonders vorteilhaft anzusehen, da beim Überlappungsstoss der Querschnittsübergang die kritische Zone ist. So brachen auch praktisch alle Proben in dem unbeeinflussten Bereich der Stäbe.

3.2.4 Metallographische Untersuchung

Ein repräsentativer Querschnitt von 25 Schweissproben wurde makroskopisch und mikroskopisch untersucht. Die makroskopische Prüfung sollte Aufschluss über die Güte der Schweissnähte geben und eventuell vorhandene Schweissfehler aufzeigen. Zum Beispiel könnten bei zu niedrig gewählter Schweissenergie durch «Kaltschweissen» Bindefehler entstehen, die zu einer Minderung der Belastbarkeit und Verformbarkeit der Verbindung führen. Es wurden jedoch bei keiner Probe Bindefehler festgestellt. Bei der mikroskopischen Untersuchung wurde aus den bereits geschilderten Gründen besonderes Augenmerk auf eine eventuelle Grobkornbildung in der WEZ der Schweissnaht gerichtet.

Bild 16 zeigt als Beispiel das Makrogefüge einer stumpfgeschweissten Verbindung sowie die Mikrogefüge des Schweissgutes, des Übergangs- und des Grundwerkstoffes. Das Schweissgut besteht aus Zwischenstufengefüge. Der Grundwerkstoff weist ein ferritisch-perlitisches Gefüge auf. Der Übergang besteht aus einem Mischgefüge dieser Komponenten. Die Struktur ist feinkörnig. Sie entspricht der Korngrösse 6–7 gemäss Stahl-Eisen-Prüfblatt 1510–61. Bei keiner der untersuchten Proben konnte Grobkorn festgestellt werden. So zeigen diese Untersuchungen, dass die für das Kornwachstum erforderlichen kritischen Glühzeiten beim Schweissen nicht erreicht werden. Da einerseits die Entfestigung des Stahles in tragbaren Grenzen bleibt (mit Ausnahme der luftabgekühlten Proben ohne Abkühlungspausen) und anderseits keine Fehlschweissungen auftreten, wird durch dieses Ergebnis die richtige Wahl der Schweissbedingungen bestätigt.

4. Richtlinien für das Schweissen von Roll-S

Die Ergebnisse der Schweissversuche gestatten, Richtlinien für das Lichtbogenschweissen von Roll-S aufzustellen. Es sind folgende Punkte besonders zu beachten:

a) Vorbereitung zum Schweissen
- Nicht verwundene Stabenden entfernen
- Schweissstelle von Schmutz und Rost befreien
- Nahtvorbereitung bei Stumpfstoss mechanisch (nicht mit Autogenbrenner) durchführen
- Nicht vorwärmen

b) Wahl der Verbindungsform
- Bei Zugbeanspruchung vorzugsweise den Überlappungsstoss mit ein- oder beidseitiger Kehlnaht (Bilder 4a und 4c) vorsehen
- Bei Druckbeanspruchung möglichst nur den *Stumpfstoss* mit X-Naht (Bild 4b) einsetzen. (Stumpfstoss mit V-Naht auf Sonderfälle und kleine Abmessungen beschränken.)

c) Elektroden und Schweissdaten
- Elektroden des in der Tabelle 3 angegebenen Typs oder andere gleichwertige kalkbasische Elektroden gleicher Festigkeitsstufe verwenden
- Feuchte Elektroden trocknen
- Elektrodendurchmesser und Stromstärke nach Bild 5 wählen
- Nach Möglichkeit mit Gleichstrom schweissen

d) Schweissen und Abkühlen
- Zünden des Lichtbogens nur in der Naht (Bild 4)
- Lichtbogen kurz halten
- Einbrandkerben vermeiden; Wurzellage bei Stumpfstössen vor dem Nachschweissen auskratzen; Schlacke vor dem Schweissen einer neuen Lage entfernen
- Beim Stumpfstoss zügig viele dünne Lagen schweissen
- Beim Überlappungsstoss je nach Dimension 1–2 Lagen pro Naht schweissen
- Zur Ableitung der Schweisswärme nach jeder Zwischenlage Abkühlungspausen einschalten (Schweissstelle muss an Luft auf Temperaturen unter 200 °C abkühlen).
  Oder mit Wasser abkühlen. Dazu kann eine Brause oder ein nasser Lappen verwendet werden. Das Wasser soll so lange der Schweissstelle zugeführt werden, bis es gerade noch verdampft.
- Die Decklagen in jedem Fall an Luft abkalten lassen.

Nach der SIA-Norm 162 soll der Schweissbarkeitsnachweis in Form einer sogenannten Verfahrensprüfung erbracht werden. Die Prüfung wird von einer amtlichen Prüfstelle aufgrund der Schweissrichtlinien des Lieferwerkes durchgeführt. Für das elektrische Lichtbogenschweissen von Roll-S ist diese Verfahrensprüfung mit positivem Ergebnis in der EMPA erfolgt (siehe EMPA-Bericht Nr. 66679/1 vom 27.2.1969).

5. Zusammenfassung

Einleitend wird anhand einer Literaturauswertung auf die Schweisseignung und das Schweissverhalten naturharter und kaltverwundener Armierungsstähle mit Streckgrenzenwerten von rund 50 kp/mm² eingegangen.

Im zweiten Teil der Arbeit wird über Schweissversuche an Roll-S berichtet. Ziel der Versuche war, den Nachweis der Schweisseignung von Roll-S bei Anwendung des elektrischen Lichtbogenschweissens zu erbringen und die Schweissbedingungen festzulegen. Dabei wurde den Einflussgrössen Verbindungsform, Wärmeeinbringen und Wärmeabfuhr besondere Aufmerksamkeit geschenkt.

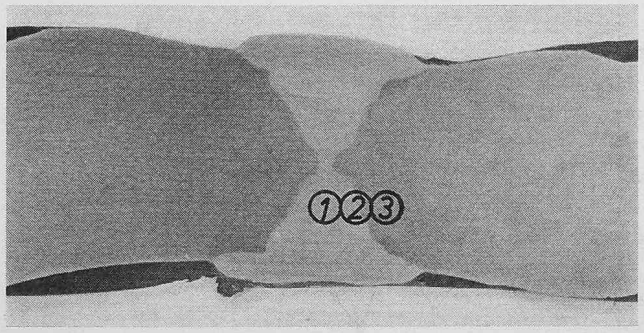
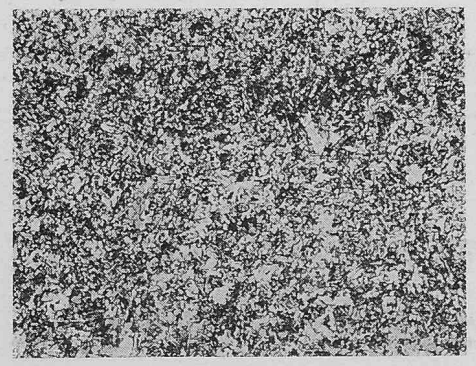
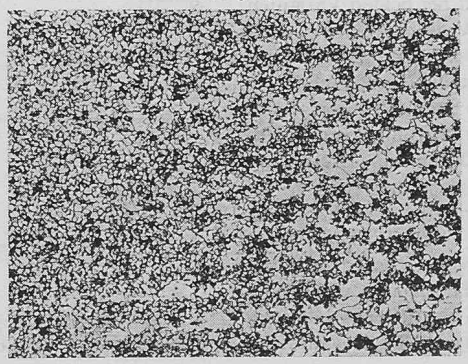


Bild 16. Längsschnitt durch eine Roll-S-Schweiss-Verbindung. Makroskopisches (links) und mikroskopisches (unten, Massstab 100:1) Gefüge des Schweissgutes, des Übergangs und des Grundwerkstoffs. Abmessung: 30 m Ø; X-Naht; Abkühlung: Wasser

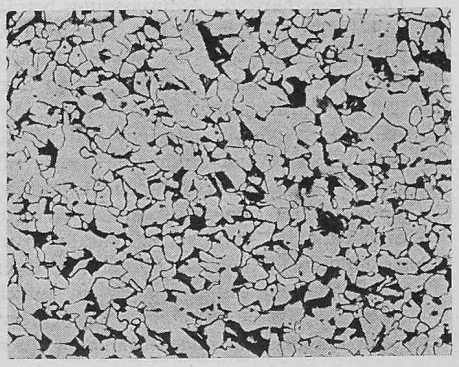
Schweissgut



Übergang



Grundwerkstoff



Als Verbindungsform ist der Stumpfstoss mit X-Naht und der Überlappungsstoss mit einseitiger, unterbrochener oder mit beidseitiger Kehlnaht zu empfehlen. Dabei ist der Überlappungsstoss nur bei Zugbeanspruchung zu verwenden, der Stumpfstoss mit X-Naht ist bevorzugt bei Druckbeanspruchung einzusetzen.

Das Wärmeeinbringen muss möglichst gering gehalten werden. Bei stumpfgestossenen Verbindungen ist eine Viellagenschweissung anzuwenden. Die zu wählenden Stromstärken und Elektrodendurchmesser werden angegeben. Bei der Wärmeabfuhr wurde neben der Luftabkühlung mit Abkühlungspausen, die die Schweissarbeit wesentlich verzögern können, die Wasserabkühlung untersucht. Die Wasserabkühlung hat sich, wenn die Decklagen an Luft abkühlen, als die beste Variante sowohl in bezug auf die praktische Schweissarbeit als auch auf die Festigkeits- und Zähigkeitswerte der Schweissverbindungen erwiesen.

Alle Schweissvarianten wurden im Zugversuch, im Biegeversuch, durch Härtemessungen an der Schweissstelle und durch makroskopische und mikroskopische Gefügeuntersuchungen geprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass sich Roll-S bei Einhaltung der Schweissrichtlinien praktisch ohne Entfestigung und ohne Versprödung schweissen lässt. Die sich aus den Versuchen ergebenden Schweissrichtlinien werden angegeben.

Literaturverzeichnis

[1] *Arnds, W.:* Autogenes Pressschweissen von Betonstählen, Fachbuchreihe Schweisstechnik (1955), Band 3, S. 53/57.

[2] *Tiefholz, K.H.:* Gaspressschweissen von Bewehrungsstählen, «Schweissen und Schneiden» 2 (1959), S. 236/237.

[3] *Steidl, P.:* Das autogene Pressschweissen im Stahlbeton-Hochbau, «Schweissen und Schneiden» 10 (1958), S. 242/244.

[4] *Kniewasser, W.:* Anwendung des autogenen Pressschweissens beim Bau einer Stahlbetonbrücke, «Schweissen und Schneiden» 12 (1960), S. 208/209.

[5] *Burat, F., W. Hofmann und E. Oertel:* Erfahrung mit dem Gaspressschweissen im Stahlbeton-Hochbau, «Schweissen und Schneiden» 14 (1962), S. 385/389.

[6] *Speidel, E.:* Erfahrungen mit gaspressgeschweissten Betonrippenstählen mit Stumpfnaht beim Bau des Stahlbetonturmes der Richtfunkstelle Ulm/Donau Ermingen, «Schweissen und Schneiden» 16 (1964), S. 449/451.

[7] Zulassungsbescheid des Ministers für Wiederaufbau des Landes Nordrhein-Westfalen vom 1.9.1956, AZ II A4–2.43 Nr. 1927/56.

[8] Zulassungsbescheid des Ministers für Wohnungsbau und öffentliche Arbeiten des Landes Nordrhein-Westfalen vom 18.6.1968, AZ II B–2.420 Zul. 8.

[9] *Beckert, M. und H. Stein:* Experimentelle Untersuchungen zur Anwendbarkeit von ZTU-Schaubildern bei Stahlschweissungen, «Ind.-Bl.» 62 (1962), S. 61/69.

[10] *Moser, A. und A. Legat:* Der Einfluss der Legierungselemente auf die Härtbarkeit, «Berg- und hüttenm. Mh.» 112 (1967), S. 321/331.

[11] *Bettzieche, P.:* Schweissbarkeit der Stahlwerkstoffe, «Stahl und Eisen» 85 (1965), S. 29/36.

[12] *Lueb, H.:* Anwendung der Erkenntnisse moderner Metallkunde auf das Schweissen von Stählen höherer Festigkeit, «Schweissen und Schneiden» 5 (1953), Sonderheft S. 70/73.

[13] *Tauscher, H. und H. Fleischer:* Entwicklung und Eigenschaften hochfester Vergütungsstähle, «Neue Hütte» 7 (1962), S. 102/111.

[14] *Born, K. und G. von Reumont:* Werkstoffe mit hoher Streckgrenze und guter Schweisseignung für den Bau von Kugelbehältern, «Erdöl und Kohle» 10 (1962), S. 623/630.

[15] *Fitch, J.C.:* Practical Control in the Welding of Alloy Steels, «Brit. Weld. J.» (1955), S. 151/158.

[16] *Class, I.:* Auswahl und Entwicklung von Stählen unter dem Gesichtspunkt guter Schweissbarkeit, «Ind.-Anz.» 84 (1963), S. 22/32.

[17] *Rose, A.:* Schweissbarkeit der hochfesten Baustähle, Einfluss der Schweissbedingungen auf das Werkstoffverhalten, «Stahl und Eisen» 86 (1966), S. 663/671.

[18] *Lueb, H.:* Schweissbarkeit der Stähle, «Techn. Mitt.», Essen 57 (1964), S. 363/364.

[19] *Böttrich, H.:* Geschweisste Torstähle im Brückenbau, «Brücke und Strasse» 4 (1952), S. 75/77.

[20] *Soretz, St. und R. Tinti:* Die Schweissung von Torstählen, «Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereins» 97 (1952), S. 138/143, 156/160 und 172/179.

[21] *Soretz, St.:* Schweissung von Torstahl, «Schweisstechn.» Wien 7 (1953), S. 77/90.

[22] *Soretz, St.:* Richtlinien für die Schweissung von Torstahl, «Schweisstechn.» Wien 10 (1956), S. 125/130.

[23] *Brede, Chr.:* Das Schweissen von Torstahl, Betonstahl IIIb, «Beton- und Stahlbetonbau» 52 (1957), S. 182/187.

[24] *Rehm, G.:* Betonrippenstähle, «Beton, Herstellung und Verwendung» 16 (1966), S. 185/189.

[25] *Veit, H.J.:* Probleme des Schweissens im Bereich kaltgeformter Profile, «Schweissen und Schneiden» 20 (1968), S. 113/119.

[26] *Schmithals, P.U., D. Schreiber und P. Eidamshaus:* Beitrag zur Frage des Schweissens von Kaltprofilen, «Stahlbau» 1 (1965), S. 13/19.

[27] *Beckert, M. und U. Franz:* Schweissbarkeit kaltverformter Baustähle, «Schweisstechn.», Berlin 13 (1963), S. 318/323.

[28] *Mel'nikov, N.P., L.J. Gladshtein und B.D. Malyshev:* The Problem of Using High-Tensile Steels for Welded Metal Structures, «Avt. Svarka» (1961), S. 47/55.

[29] *Klöppel, K. und R. Schardt:* Versuche mit kaltgereckten Stählen, «Stahlbau» 30 (1961), S. 193/202.

[30] *O'Neill, H.:* Ferrous Welding Metallurgy, «Brit. Weld. J.» (1955), S. 241/246.

[31] *Maas, H.:* Versuche mit Schweissungen an kaltverformten Rohren, «Schweisstechn.», Berlin 7 (1957), S. 321/322.

[32] *Mennen, J.:* Schweissen von Vergütungsstählen, «Fachbuchreihe Schweisstechnik» (1961), Band 23, S. 18/25.

[33] *Rädeker, W.:* Die Rolle des Stickstoffs beim Schweissen, «Schweissen und Schneiden» 20 (1968), S. 105/113.

[34] *Wirtz, H.:* Das Verhalten der Stähle beim Schweissen, Teil I: Grundlagen, «Fachbuchreihe Schweisstechnik» (1966), Band 44, S. 87 und 111.

[35] *Leonhardt, F. und J. Schlaich:* Hamburger Fernmeldeturm, Entwurf und Berechnung, «Beton- und Stahlbetonbau» 9 (1968), S. 193/203.

Adresse der Verfasser: Dr.-Ing. *E. Elsner* und Ing. grad. *H. Wehowsky*, von Roll AG, 4563 Gerlafingen.

Paul Hofer zum 8. August 1969

DK 92

Der Ordinarius für Geschichte des Städtebaus und der Denkmalpflege an der ETH Zürich wird sechzig. Sein Gymnasiastentraum war es, Bildhauer zu werden. Es kam anders, er befasste sich zunächst mit oberitalienischer Landschaftsmalerei, dann aber immer häufiger mit Steinwerk, Steinmetz, Architektur – und schliesslich endgültig mit jener Pluralform dieser Gattung, für die es keine Parallele in den anderen Gattungen gibt: der Stadt. Er ist zum eigentlichen und wirklichen «Herzspezialisten» für Städte geworden, ausgestattet mit dem Ohr des Arztes und mit der Tastempfindlichkeit des Bildhauers. Er beugt sich über die «Pleins et vides» einer Stadt mit der selben Intensität und instinkthaft witternden Sicherheit, wie sich der begabte Arzt über die «Pleins et vides» des Menschenleibes beugt: nie nur den Körper und doch stets den Körper im Auge, aber in ihm und um ihn das Faszinierende, den Raum gewahrend, wo andere vorwiegend Leere meinen. Wie man diesen Stadt-Raum dingfest machen, wie man ihn exakt, aber nicht nur statistisch, wie man ihn unsentimental, aber mit dem gehörigen Respekt vermessen kann – das scheint mir sein jetziges Problem zu sein, jetzt, wo er sich aufmacht zur dritten «Campagne» in Südwestsizilien, die der Gesamtaufnahme gilt von Städten aus dem 17. Jahrhundert mit christlichem Kern und islamischem Kranz.

Wie es, vom einstigen Bildhauer-Vorhaben über die Explorierung der Stadt Bern (in den inzwischen berühmt gewordenen drei Bänden der Kunstdenkmäler-Reihe, 1947—59) bis zur Sizilien-Forschung, von Kreis zu Kreis zu neuen, meist auch neuartigen Fragestellungen kam, kann hier nicht nachskizziert werden. Eine Bibliographie der bisherigen Publikationen wird zu finden sein in dem Band «Fundplätze – Bauplätze», der eine Reihe von Paul Hofers wichtigsten Aufsätzen vereinigt. Er wird in Kürze erscheinen als Publikation «gta» 9 des Instituts für Geschichte und Theorie der Architektur an der ETH.

Was hier folgt, sind Kostproben – oder gleichsam «Gesteinsproben» – aus den vielfältigen Beobachtungs- und Werkschichten Paul Hofers. Der Aufforderung, sie auszuwählen, sind Frau Dr. *Trudi Hofer* und Prof. *H. B. Hoesli* mit Vergnügen nachgekommen. – Zeugnisse eines Geistes, der zwischen Fund und Bau in stetsfort neue Entdeckungen verstrickt ist und keinen Tag kennt, an dem er nicht umgetrieben wäre vom Drang zur Aufschlüsselung eines Steins, eines Plans oder eines Wortes. *A. M. Vogt*