DIE BAUTECHNIK

19. Jahrgang BERLIN, 7. Februar 1941 Heft 6

Alle Rechte vorbehalten.

Ein Autobahnknotenpunkt nach Art der Linienlösung.

Von Dr.-Ing. Max-Erich Feuchtinger, Essen.

I. Allgemeines über Autobahnknotenpunkte.

Eine einfache Straßenkreuzung oder auch nur die Einmündung einer Querstraße wird bei den Reichsautobahnen durch den Grundsatz der Kreuzungsfreiheit und des Nur-Rechtsabbiegens zu einem verwickelten Verkehrsgebilde. Will man auch schleifende Kreuzungen, d. h. Kreislösungen, wie sie bei innerstädtischen Rundplätzen auftreten, vermeiden, dann ist es nicht mehr möglich, eine beliebige Anzahl von Straßenzügen in einem Punkt zusammenzuführen. Die Erfordernisse des Verkehrs, an einem Straßenknoten von jeder Richtung in jede Richtung gelangen zu können, haben bei den Reichsautobahnen dazu geführt, das Zusammentreffen mehrerer Linien derart aufzuteilen, daß jeweils entweder nur eine Linie in eine andere einmündet (Abzweig, Abb. 1) oder daß zwei durchgehende Linien sich kreuzen (Kreuzung, Abb. 2).

Abb. 1. Abzweig einer Autobahn.

Abb. 2. Kreuzung von zwei Autobahnen.

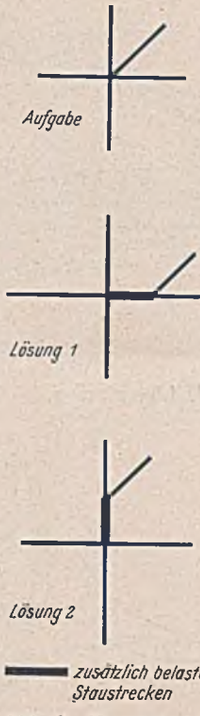


Abb. 3. Kreuzung von zwei Autobahnen und Abzweig einer Autobahn.

Abb. 4. Kreuzung von drei Autobahnen.

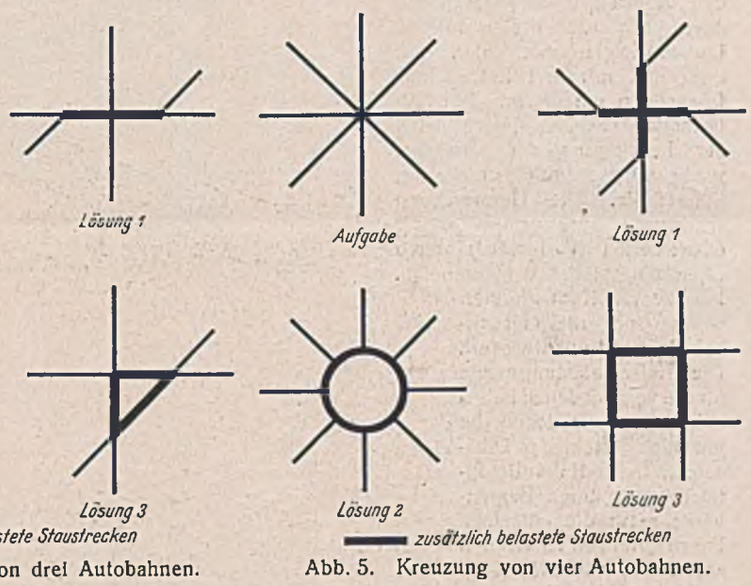


Abb. 5. Kreuzung von vier Autobahnen.

Diese Einschränkung für die Anordnung und Ausbildung der Autobahnknotenpunkte wirkt sich damit auf die gesamte Netzgestaltung und Verkehrsplanung der Reichsautobahnen aus. Treffen netzmäßig mehr als zwei Linien in einem Punkte zusammen, so muß die Einmündungsstelle in mehrere Knotenpunkte auseinandergezogen werden. Es entstehen dadurch zur Aufnahme der Eckverkehre auf den durchgehenden Strecken Zusatzbelastungen, also leistungsmäßig Staustrecken. Je nach der Verkehrsbedeutung der einzelnen Linien und Richtungen ergeben sich dann verschiedene Formen versetzter Autobahnkreuzungen, wie sie Abb. 3 bis 5 zeigen. Vier durchgehende Strecken werden dabei kaum nach Art der Abb. 5, Lösung 1, zusammengeführt werden, es wird sich vielmehr bei einer derartigen Häufung sternförmig zusammenlaufender Strecken immer um eine der großen Hauptstädte als Hauptknotenpunkte handeln, die das auf sie zuführende Autobahnnetz durch einen besonderen Ring abfangen, wobei also der auf den Hauptknotenpunkt selbst ausgerichtete Zielverkehr gegenüber dem durchgehenden Verkehr überwiegt (Abb. 5, Lösung 2 und 3).

Für die Einzelausbildung der Autobahnknoten, also der Abzweige und Kreuzungen, haben sich in Deutschland bisher einige wenige, immer wiederkehrende und somit dem Kraftfahrer einprägsame Formen entwickelt: die Trompete, das Dreieck und die Birne oder Kaiserberglösung bei den Abzweigen, das Kleeblatt, der Verteilerkreis und neuerdings die Turbinenlösung bei den Kreuzungen. Die Abzweige, insbesondere das Dreieck mit seinen zahlreichen Fahrbahnüberschneidungen, sind bei dem Laien-Kraftfahrer, der nicht ingenieurmäßig geschult ist und die mathematische Form der Anlage bei ihrem Durchfahren nicht erfassen kann, nicht beliebt. Auch der Verteilerkreis läßt den Fahrer die Richtung verlieren und zwingt ihn, ebenso wie beim Abzweig, sich durch die Wegweisung führen zu lassen und die eigene Überlegung auszuschalten. Die klarste Form in dieser Hinsicht ist das Kleeblatt, das die Straßenkreuzung am offensichtlichsten zum Ausdruck bringt. An die Tatsache, daß hier — entsprechend dem Grundsatz des Nur-Rechtsabbiegens — der Linkseckverkehr durch eine Rechtsdrehung bewerkstelligt wird, wird sich der Kraftfahrer mit der Zeit gewöhnen.

Die Wahl der Knotenform ist in jedem Einzelfall jedoch nicht nur von der Übersichtlichkeit der Gesamtform, sondern von zahlreichen anderen Gesichtspunkten abhängig, und zwar von:

1. der Auswirkung auf die Netzgestaltung,
2. dem Ausbauplan des Autobahnnetzes,
3. der Verflechtung der Autobahn mit dem übrigen Straßennetz,
4. der verkehrlichen Leistungsfähigkeit des Autobahnknotens,
5. den geländetechnischen Gegebenheiten,
6. der Einfügung des Knotens in die Landschaft,
7. den entwurfstechnischen und baulichen Einzelfragen.

II. Die Linienlösung.

Unter Berücksichtigung dieser Vorbedingungen können sich Knotenformen ergeben, die von den obengenannten abweichen. Im Hinblick auf eine reibungslose Verkehrsabwicklung bei Spitzenverkehr sind vor allem die in Abschnitt I skizzierten versetzten Knoten mit Staustrecken zu vermeiden. So ist u. a. die Linienlösung entstanden, bei der sich zwei durchgehende Strecken sehr schiefwinklig nach Art von Eisenbahnüberschneidungen kreuzen. Sie ermöglicht in ihrer einfachen Form nicht den spitzwinkligen Eckverkehr. Sie ist neuerdings in einem Sonderfall in abgeänderter Form mit der Möglichkeit des Eckverkehrs in allen Richtungen zur Ausführung bestimmt worden. Es münden hier netzmäßig zwei Nebenstrecken sehr schiefwinklig in eine durchgehende Hauptstrecke ein. Die bewegten Geländeverhältnisse bedingen, daß die eine der beiden Nebenstrecken nicht in der Richtung des Hauptverkehrsstromes, sondern in entgegengesetzter Schiefwinkligkeit in die Haupt-

strecke eingeführt werden muß (Abb. 6). Die Ausbildung einer klaren Kreuzung nach Art eines Kleeblattes war schon aus geländetechnischen Gründen nicht möglich. Sie war auch nicht erwünscht, da die Verkehrsbedingungen weniger einen Übergang des Verkehrs zwischen den beiden Abzweigstrecken als zwischen der Stammstrecke und den Abzweigstrecken erkennen ließen. Daraus ergab sich eine örtliche Trennung der beiden Abzweigpunkte, die für gewöhnlich entsprechend obigen Ausführungen als Trompeten, Dreiecke oder Birnen auszubilden wären. Um jedoch gleichzeitig den Verkehr zwischen den beiden Abzweigstrecken, der in diesem Sonderfall als Erholungsverkehr an schönen Sonntagen und zur Reisezeit zu bedeutenden Spitzen führen kann, nicht mit dem sich auf der Stammstrecke abwickelnden starken Berufsverkehr und Schwerlastverkehr auf einer Fahrbahn zusammenzuführen, wurde zur Ausschaltung einer Staustrecke eine Linienlösung besonderer Art entwickelt, die also in diesem Einzelfall hauptsächlich zur Erreichung größter verkehrlicher Leistungsfähigkeit gewählt worden ist. Die Linienlösung soll daher im folgenden grundsätzlich auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht werden. Die Einzelausbildung dieser Knotenform hat ohnehin Fragen auftreten lassen, die die Zusammenhänge zwischen Ausgestaltung und verkehrlicher Leistungsfähigkeit der Autobahnknotenpunkte deutlich aufzeigen.

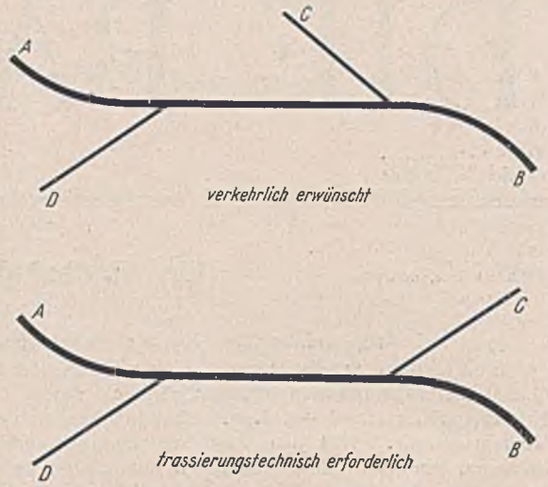


Abb. 6. Netzmäßige Zusammenführung von drei Autobahnen nach Art der Linienlösung anläßlich eines praktischen Falles.

III. Die verkehrliche Leistungsfähigkeit der Linienlösung.

Zur Untersuchung werden verschiedene Formen der Linienlösung mit spitzwinkligem Eckverkehr herangezogen. Die Bewertung der verschiedenen Formen der zweiseitigen Linienlösung ohne spitzwinklige Eckverkehre kann danach ohne Schwierigkeiten abgeleitet werden. Die beiden Abzweigstrecken sollen hier mit der Stammstrecke grundsätzlich durch zwei Dreiecke verknotet werden. Bei Trompeten oder Birnen als Abzweiganlagen der versetzten Kreuzung ergeben sich entsprechende Verhältnisse für die verkehrliche Leistungsfähigkeit der Gesamtanlage.

Außer der Grundform der versetzten Kreuzung, bei der die Stammstrecke zusätzliche Belastungen erhält und sich zwischen den Abzweigen als Staustrecke auswirkt, werden drei erweiterte Linienlösungen mit einer, mit zwei und mit drei Entlastungsfahrbahnen untersucht. Die Entlastungsfahrbahnen dienen dabei zur Beseitigung der leistungsmäßig schwachen Staustrecke der Stammlinie. Die Untersuchung wird nach dem vom Verfasser entwickelten Verfahren[1]) durch „Belastungspläne" vorgenommen. Für die vier Knotenformen werden nur die Gesamtbelastungspläne entwickelt. Die Einzelbelastungspläne für die verschiedenen Fahrtrichtungen, aus denen die jeweilige Anzahl der Drosselpunkte und die Beeinträchtigung durch Begleitverkehr für die einzelnen Fahrtrichtungen zu ersehen ist, können ohne Schwierigkeiten aus den Gesamtbelastungsplänen abgeleitet werden.

Die in Abb. 7 dargestellten Belastungsannahmen für die einzelnen Verkehrsrichtungen (absolute Zahlen) entsprechen als Durchschnitt zwischen der gewöhnlichen werktäglichen und der durch Erholungsverkehr hervorgerufenen sonntäglichen Spitzenbelastung weitgehend den tatsächlichen Verkehrsverhältnissen für den obengenannten praktischen Fall, in dem eine versetzte Autobahnkreuzung als Linienlösung ausgeführt wird.

[1]) Bautechn. 1939, Heft 31, S. 433 u. Heft 32, S. 451.

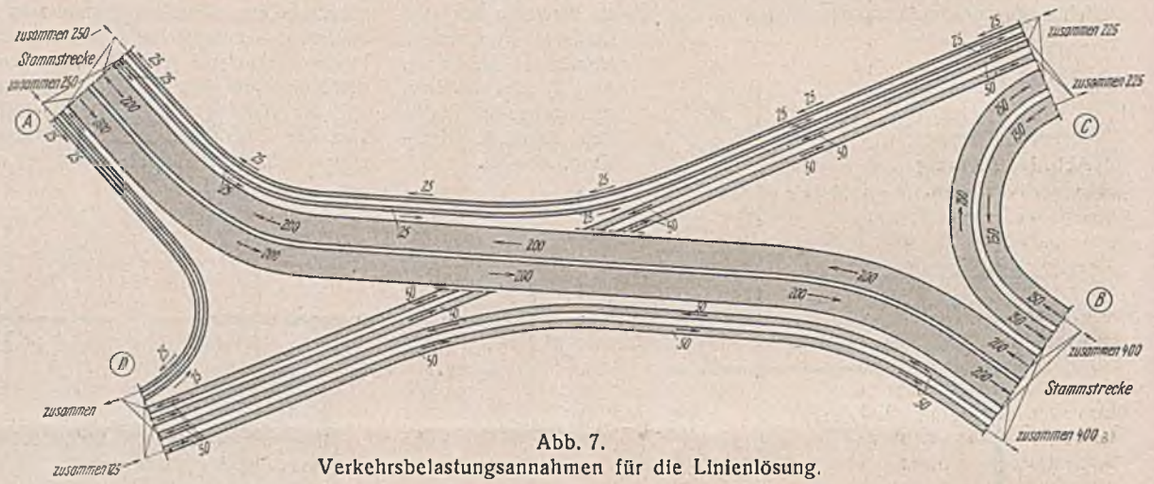


Abb. 7.
Verkehrsbelastungsannahmen für die Linienlösung.

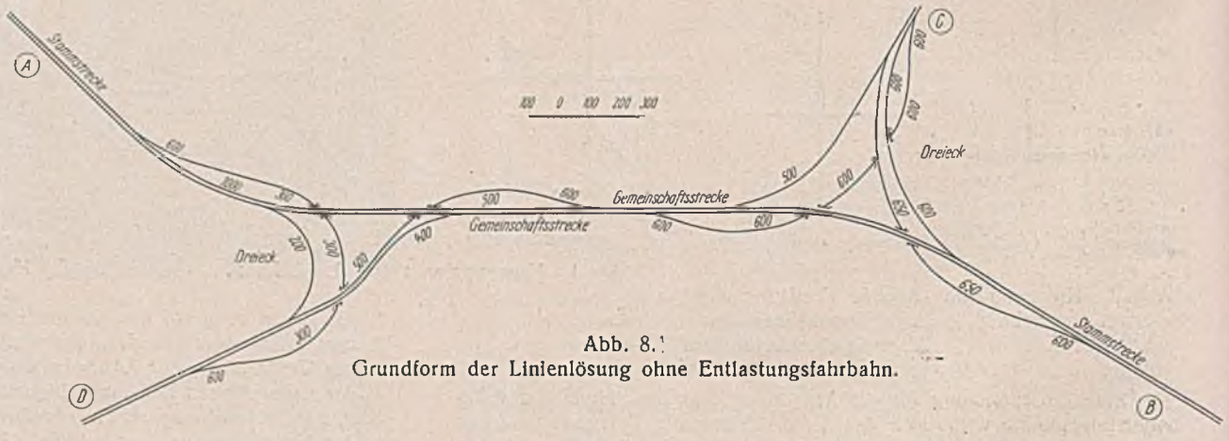


Abb. 8.
Grundform der Linienlösung ohne Entlastungsfahrbahn.

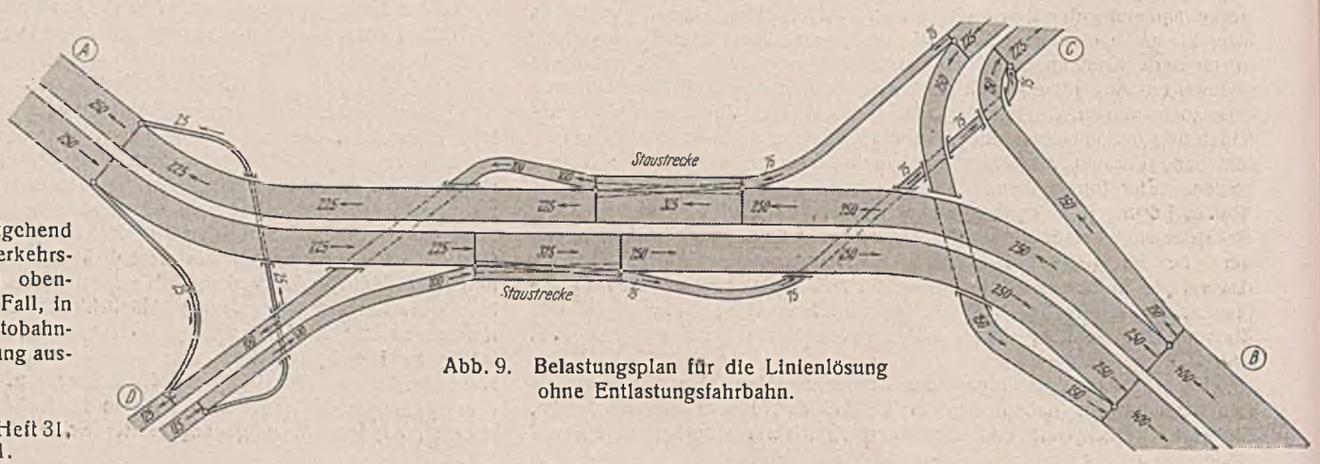


Abb. 9. Belastungsplan für die Linienlösung ohne Entlastungsfahrbahn.

1. Die Linienlösung ohne Entlastungsfahrbahn.

Sie ist die Grundform der Linienlösung. Durch die einfache Aneinanderreihung zweier Dreiecke (Abb. 8) ergeben sich mit zweimal sechs = zwölf Drosselpunkten sehr wenig Gefahrenstellen, jedoch statt dessen um so größere Staustrecken auf dem zusätzlich belasteten Zwischenstück der Stammstrecke zwischen den beiden Dreiecken (Abb. 9). Die Gesamtbelastung der Stammstrecke steigt hier von 225 bzw. 250 auf 325. In dem hier untersuchten Zahlenbeispiel wäre daher die zusätzliche Belastung der Stammstrecke in tragbaren Grenzen unter der Voraussetzung, daß die Stammstrecke ausreichend lang ist, um den beim Kraftverkehr ohnehin dauernd wechselnden Verkehrsfluß ohne Stockungen zu bewältigen. Dazu wäre eine Zwischenstrecke von mehreren Kilometern erforderlich. Die Leistungsfähigkeit dieser Zwischenstrecke könnte durch die Anordnung einer vollen dritten Fahrspur für beide Fahrtrichtungen dem Zusatzverkehr angeglichen werden.

Ist jedoch durch die Gelände- und die Linienführungsverhältnisse ein sehr nahes Zusammenrücken der beiden Dreiecke bedingt, wie Abb. 8 darstellt, die dem obenerwähnten praktischen Fall und Zahlenbeispiel entsprechend und im Längenmaßstab unverzerrt gezeichnet ist, so kann die Linienlösung ohne Entlastungsfahrbahn nicht als befriedigende Knotenform angesehen werden.

2. Die Linienlösung mit einer Entlastungsfahrbahn.

Sie entsteht durch Zusammenfassung des zwischen den beiden Abzweigstrecken durchgehenden Verkehrs und des stumpfwinkligen Abzweigverkehrs zwischen der Stammstrecke und den Abzweigstrecken in je einer Entlastungsfahrbahn für die beiden Fahrtrichtungen neben der Stammstrecke (Abb. 10). Der auf den Abzweigstrecken durchgehende Verkehr hat somit keine Berührung mit der Stammstrecke mehr. Der stumpfwinklige Abzweigverkehr wird aus der Stammstrecke in die Entlastungsfahrbahn abgezweigt, bevor der stumpfwinklige Einmündungsverkehr aus der Entlastungsfahrbahn in die Stammstrecke eingeführt ist. Die Gesamtzahl der Drosselpunkte wird dadurch von 12 auf 16 erhöht. An der Stammstrecke liegen jedoch ebenso wie bei Lösung 1 zwei Aus- und zwei Einmündungspunkte, also vier Drosselpunkte je Fahrtrichtung. Die zusätzlichen Drosselpunkte entfallen auf die über die Entlastungsfahrbahn geführten Verkehrsrichtungen. Die gegenseitige Reibung dieser Verkehre auf der Entlastungsfahrbahn muß in Kauf genommen werden, um auf der am stärksten belasteten Stammstrecke jede Staustrecke zu vermeiden, wie der Gesamtbelastungsplan zeigt (Abb. 11).

Die Belastung der Stammstrecke im Kern des Knotens beträgt 200 anstatt 325 bei Lösung 1, ist also ohne jeden Begleitverkehr. Auf der Entlastungsfahrbahn liegen jedoch drei Verkehrsrichtungen:

1. durchgehender Verkehr der Abzweigstrecken,
2. stumpfwinkliger Abzweigverkehr aus der Stammstrecke,
3. stumpfwinkliger Einmündungsverkehr in die Stammstrecke.

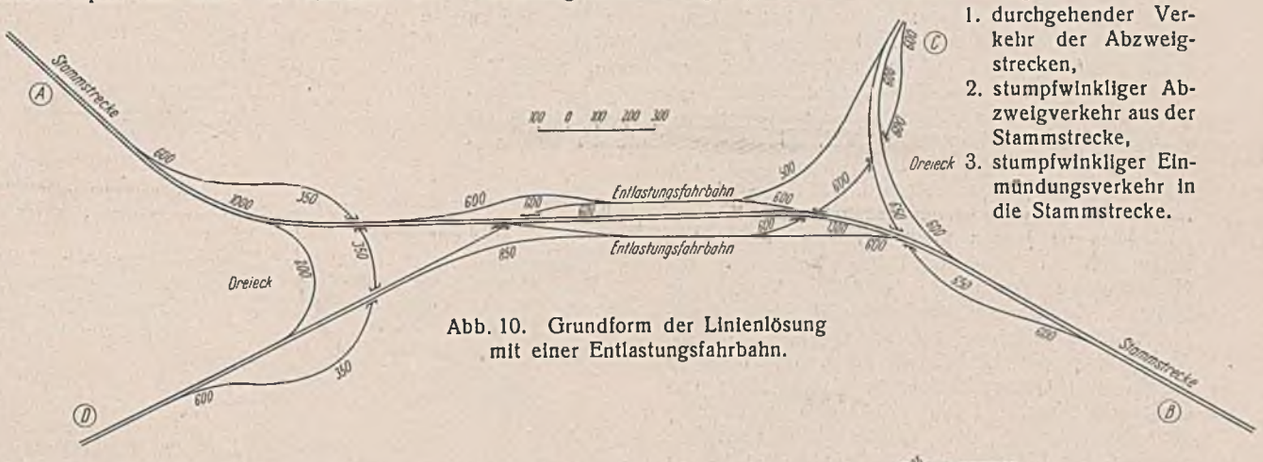


Abb. 10. Grundform der Linienlösung mit einer Entlastungsfahrbahn.

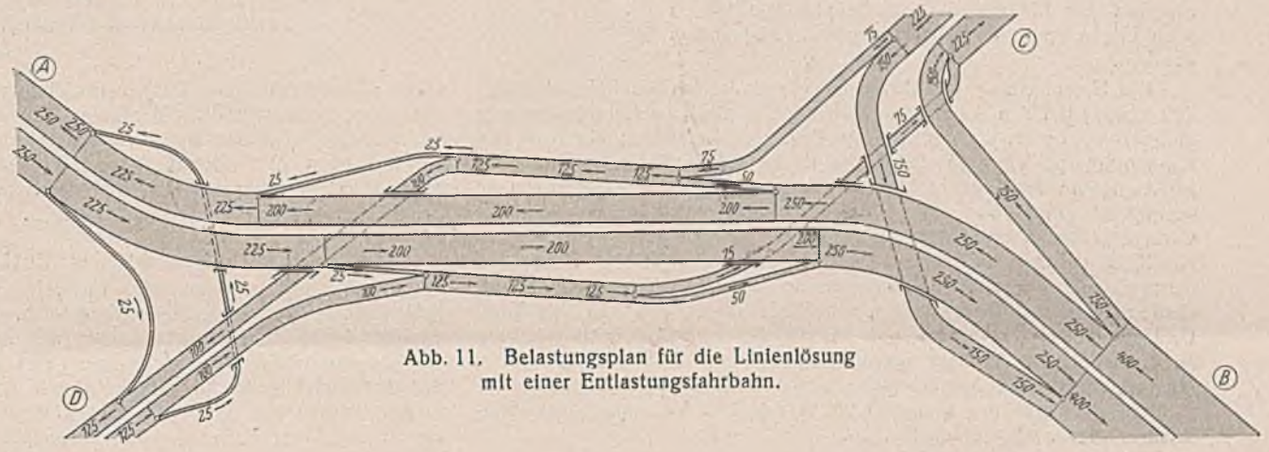


Abb. 11. Belastungsplan für die Linienlösung mit einer Entlastungsfahrbahn.

Abb. 12. Grundform der Linienlösung mit zwei Entlastungsfahrbahnen.

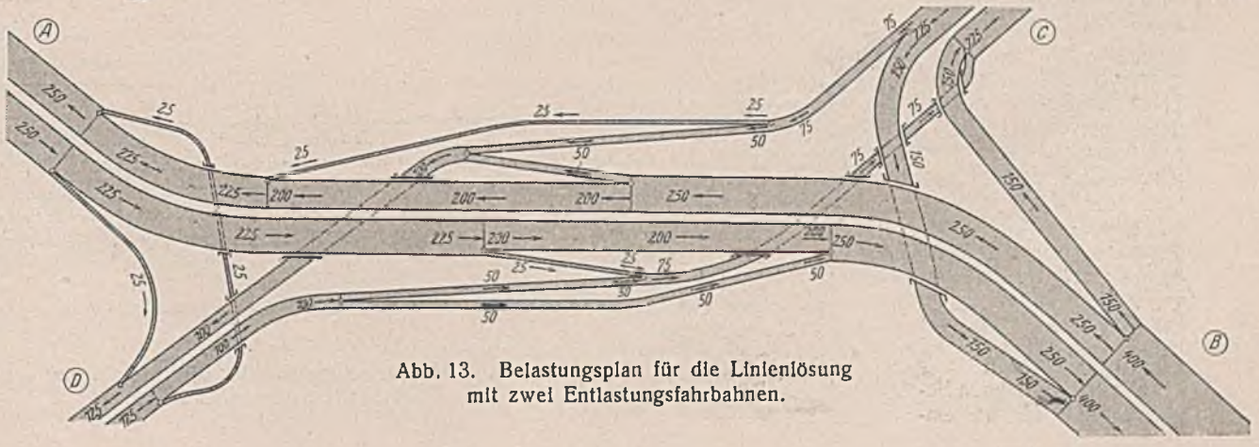


Abb. 13. Belastungsplan für die Linienlösung mit zwei Entlastungsfahrbahnen.

Es ist danach keine dieser Verkehrsrichtungen ohne Begleitverkehr. Bei überdurchschnittlicher Belastung einer von ihnen (Erholungsverkehrsspitze usw.) kann auf die beiden anderen Verkehrsrichtungen infolge der beschränkten Länge der Entlastungsfahrbahn ein Rückstau eintreten. Dieser Rückstau kann sich durch die beschränkte Länge der Zwischenverbindung zwischen Stammstrecke und Entlastungsfahrbahn bis auf den durchgehenden Verkehr der Stammstrecke auswirken.

Damit sind die leistungsschwachen Stellen der Linienlösung überhaupt grundsätzlich erfaßt: Rückstau bei Spitzenverkehr über die in ihrer Längenentwicklung beschränkten Entlastungsfahrbahnen und Zwischenverbindungen auf die durchgehende Stammstrecke. Diese Tatsache ist erst durch den Verkehrsbelastungsplan eindeutig klar herausgestellt worden. Der Belastungsplan wirkt sich also seinerseits auf die Ausgestaltung der Knotenform aus. In diesem Falle ist eine ausreichend große Länge der Entlastungsfahrbahn und Zwischenverbindung anzustreben. Mit ihrer Länge nimmt aber auch die Breitenausdehnung des Knotens zu. Dies ist jedoch in den meisten praktischen Fällen ebenso wie die Längenausdehnung der Gesamtanlage durch die örtlichen Verhältnisse bedingt: Landinanspruchnahme und -durchschneidung, Rücksichtnahme auf vorhandene Bebauung, Abriegelung der Umgebung durch die bedingte Anzahl von Querverbindungen, hohenmäßige Geländeverhältnisse. Darin liegt also gleichzeitig die Beschränkung der verkehrlichen Leistungsfähigkeit der Linienlösung überhaupt. Die beiden noch folgenden Knotenformen zeigen dies besonders deutlich.

Die Untersuchung ist also auch ein eindruckvolles Beispiel dafür, daß künftig bei den Autobahnknoten weniger die Krümmungshalbmesser und Steigungen als die gegenseitige Lage und Verteilung der Aus- und Einmündungspunkte und damit die Länge der Verbindungsfahrbahnen zur Aufnahme des Eckverkehrs die Leistungsfähigkeit der Gesamtanlage beeinflußt. Die kolonnenartige Verkehrsbelastung der Parkways in den Vereinigten Staaten hat dort dazu geführt, an den Einmündungsstellen von Knoten zur reibungslosen Verkehrsabwicklung völlige Haltstellen einzurichten. Die weitere Folge waren neuartige Knotenformen mit kleinen Krümmungshalbmessern, wie z. B. die „Brezel" in New York. Diese Gesichtspunkte werden auch bei den deutschen Autobahnen künftig mit zunehmender Verkehrsbelastung stärker zu berücksichtigen sein. Man wird auch die Möglichkeit schaffen müssen, daß die Autobahnknoten bei Überlastung und dadurch verursachter Verstopfung auf Notabfahrten verlassen werden können.

3. Die Linienlösung mit zwei Entlastungsfahrbahnen.

Sie entsteht dadurch, daß der aus der Stammstrecke abzweigende stumpfwinklige Linkseckverkehr erst dann in die Entlastungsfahrbahn eingeführt wird, nachdem aus ihr der aus der Abzweigstrecke in die Stammstrecke einmündende stumpfwinklige Rechtseckverkehr durch eine zweite Entlastungsfahrbahn abgetrennt ist (Abb. 12). Die Gesamtzahl der Drosselpunkte hat sich mit 16 gegenüber der Lösung 2 nicht erhöht, ebenso ist die Zahl der Drosselpunkte an der Stammstrecke mit vier je Fahrtrichtung geblieben. Durch die Anordnung weiterer Fahrbahnen sind jedoch für die Verkehrsabwicklung zusätzliche Rinnsale geschaffen. Der Gesamtbelastungsplan zeigt, daß dadurch auch auf den Entlastungsfahrbahnen keine Staustrecken und keine vorübergehenden Begleitverkehre für die einzelnen Fahrtrichtungen mehr auftreten (Abb. 13). Die Belastung der Entlastungsfahrbahnen ist von 125 bei Lösung 2 nunmehr auf 50 als stärkste Einheitsbelastung heruntergedrückt.

Für den obengenannten praktischen Fall ist die Linienlösung mit zwei Entlastungsfahrbahnen zur Ausführung bestimmt worden. Abb. 14 zeigt maßstäblich die Ausbildung des Knotens entsprechend der Grundsatzskizze in Abb. 12. Es ist zu erkennen, daß die erste Entlastungsfahrbahn in ihrer Längenentwicklung sehr kurz ist. Dies ergab die geländetechnische Wahl der Linie. Bei weniger schwierigen Geländeverhältnissen wird man mit Rücksicht auf die bei Lösung 2 erläuterten Auswirkungen des Rückstaus bei Spitzenbelastungen Verbesserungen durch größere Längenentwicklung der Entlastungsfahrbahnen und der Zwischenverbindungen anzustreben haben.

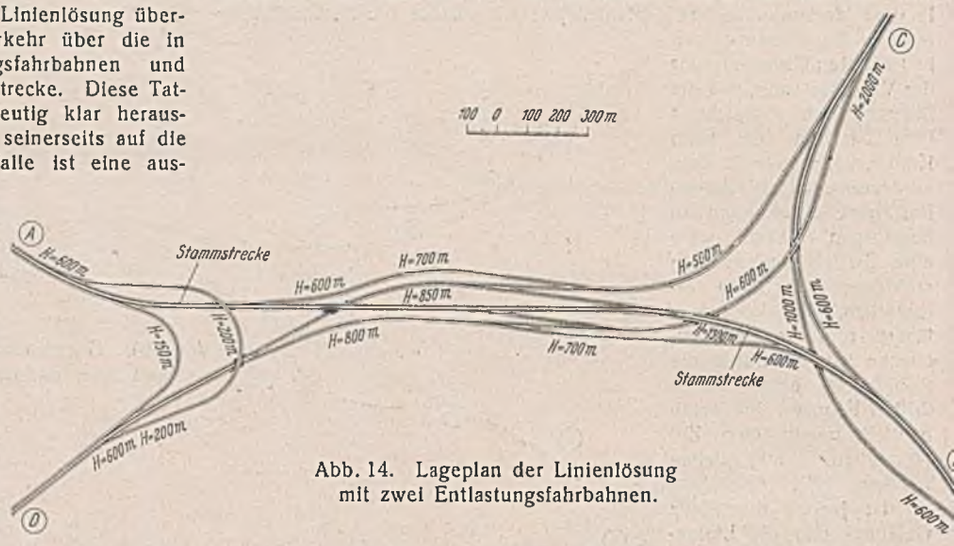


Abb. 14. Lageplan der Linienlösung mit zwei Entlastungsfahrbahnen.

4. Die Linienlösung mit drei Entlastungsfahrbahnen.

Der Versuch, die genannten Nachteile der Lösung 3 auszuschalten, hat zu dieser vierten Linienlösung geführt. Dadurch, daß der stumpfwinklige Linkseckverkehr gleichzeitig mit dem spitzwinkligen Rechteckverkehr aus der Stammstrecke abgezweigt wird und dementsprechend der stumpfwinklige Rechtseckverkehr gleichzeitig mit dem spitzwinkligen Linkseckverkehr in die Stammstrecke eingeführt wird, entstehen drei ausreichend lange Entlastungsfahrbahnen (Abb. 15). Die Gesamtzahl der

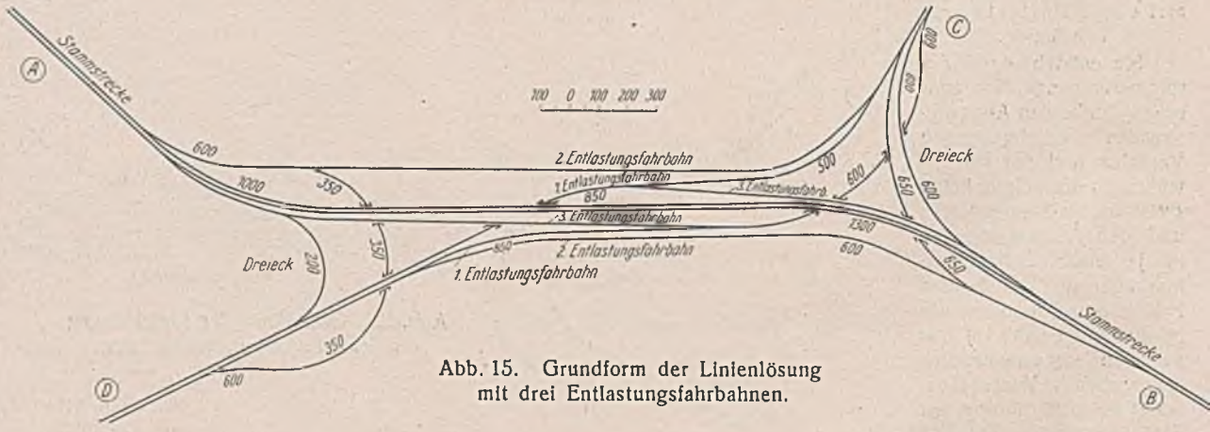


Abb. 15. Grundform der Linienlösung mit drei Entlastungsfahrbahnen.

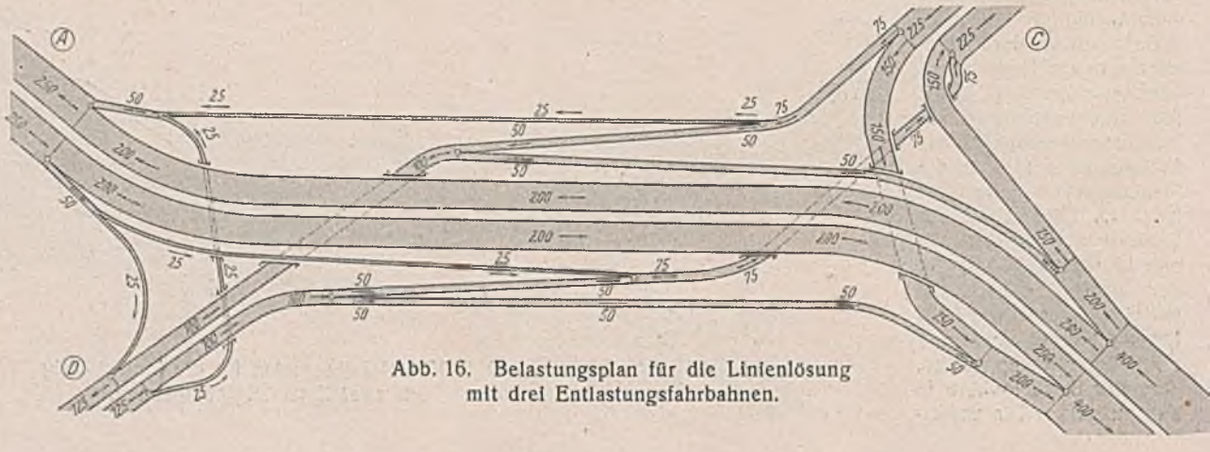


Abb. 16. Belastungsplan für die Linienlösung mit drei Entlastungsfahrbahnen.

Drosselpunkte beträgt wiederum 16, die Stammstrecke ist jedoch durch je einen Aus- und einen Einmündungspunkt, also zwei Drosselpunkte je Fahrtrichtung weitestgehend entlastet. Die Lösung ist also bei stark überwiegender Verkehrsbedeutung der Stammstrecke besonders günstig.

Der Gesamtbelastungsplan zeigt, daß das scherenförmige Zusammenhängen der Entlastungsfahrbahnen nicht mehr als nachteilig bezeichnet werden kann (Abb. 16). Die Gefahr des Rückstaus ist aus dem Bereich der Entlastungsfahrbahnen herausgenommen und damit nicht mehr wie bei Lösung 3 für alle Verkehrsrichtungen von Einfluß. Sie kann sich nunmehr nur noch an den Abzweigpunkten der Stammstrecke und somit nur auf diese auswirken. Ähnlich wie beim Kleeblatt kann auch diese Beeinträchtigung gemildert werden, indem man die Zwischenverbindung mit der Stammstrecke gleichlaufend führt, also die Drosselpunkte auseinanderzieht. Auch fahrtechnisch ist die Lösung 4 sehr günstig, indem der gesamte aus der Stammstrecke abzweigende Verkehr nur an einer Stelle die Stammstrecke verläßt. Dadurch wird dem Fahrer klar zum Ausdruck gebracht, wann er sich im Bereich des Knotens befindet und von wann ab er entsprechende Aufmerksamkeit auf die Beschilderung und weitere Verkehrsführung zu nehmen hat.

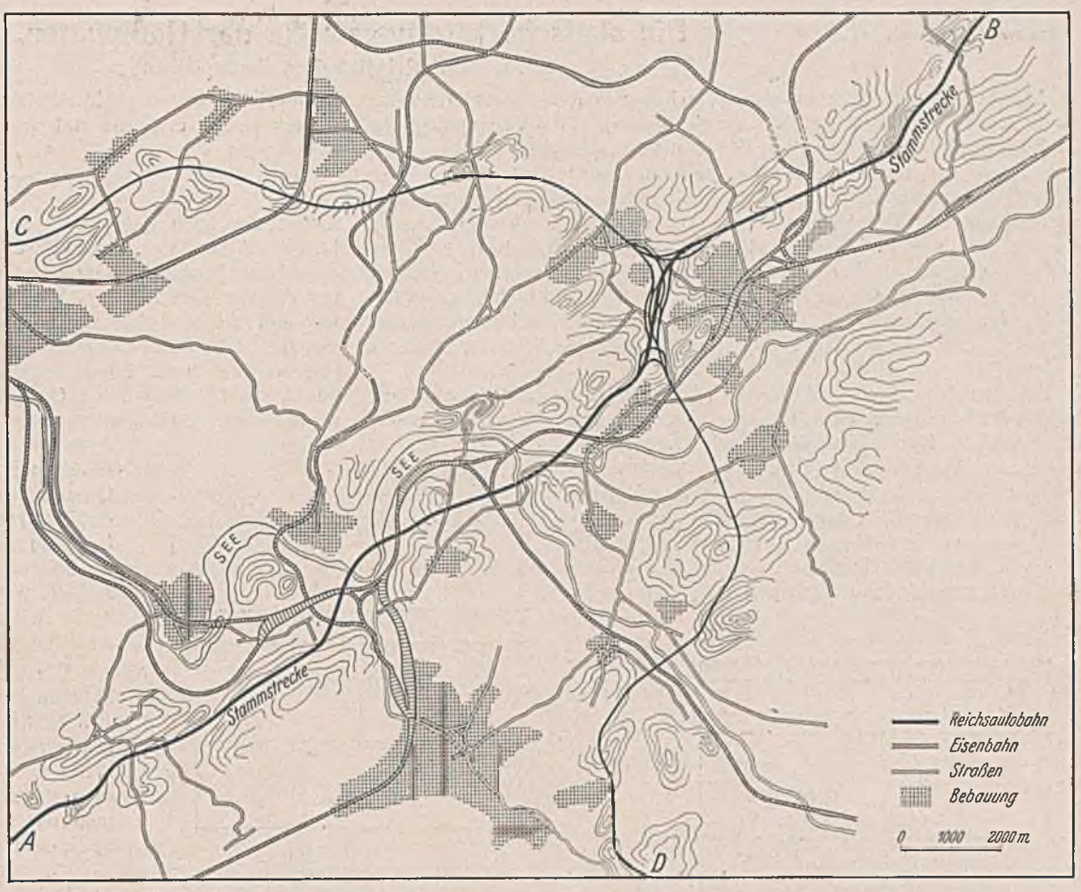


Abb. 17. Übersichtsplan über die Kreuzung zweier Reichsautobahnen nach Art der Linienlösung.

Die Lösung 4 ist also die leistungsfähigste, aber durch die große Fahrbahnlänge auch teuerste Knotenlösung. Sie ist in noch ausgeprägterem Maße als die vorangegangenen Linienlösungen eine eisenbahnmäßige Knotenform, die räumlich nur mit Schwierigkeiten unter Zuhilfenahme

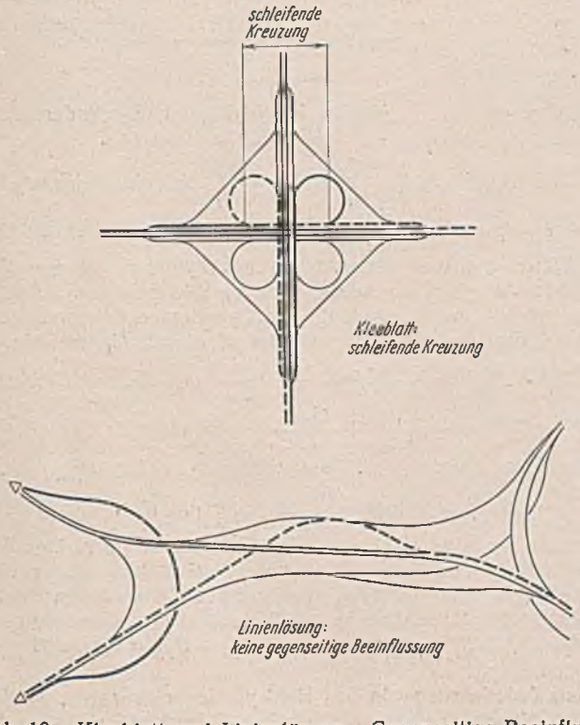


Abb. 18. Kleeblatt und Linienlösung. Gegenseitige Beeinflussung zweier gleichzeitig auftretender Linkseckverkehre.

weitgehender Erdbewegungen und Anpflanzungen einigermaßen befriedigend ausgestaltet werden kann. Schon die starke Abriegelung der Umgebung dadurch, daß der Kosten wegen nur wenige Querverbindungen durch den mehrere Kilometer langen Knoten geschaffen werden können, schränkt die Anwendungsmöglichkeit der Linienlösung ein. Insbesondere die Lösung 4 wird daher nur in Einzelfällen mit entsprechenden Spitzenbelastungen einzelner Verkehrsrichtungen zu wählen sein.

IV. Zusammenfassung.

In Abb. 17 ist skizzenmäßig ein Übersichtslageplan für den eingangs erwähnten praktischen Fall einer Linienlösung mit zwei Entlastungsfahrbahnen dargestellt. Die verkehrsmäßigen Bindungen für die Zusammenführung der sich dort vereinigenden Reichsautobahnen wurden bereits erläutert. Die geländetechnischen Bindungen, die zu der Linienlösung führten, sind aus dem Lageplan deutlich zu ersehen. Die Schwierigkeiten der Zugänglichmachung des Gebiets beiderseits des Knotens gehen ebenfalls aus dem Lageplan hervor. Man kann schon daraus entnehmen, daß — abgesehen von der Rücksicht auf die Landschaftsgestaltung, die Verkehrsführung (Leitung des Kraftfahrers usw.), die Ausbildung der sehr schiefwinkligen Brückenbauwerke usw. — das Anwendungsgebiet für die Linienlösung sehr begrenzt sein wird.

Die Verkehrsuntersuchung hat Aufschluß über die verkehrliche Leistungsfähigkeit der Linienlösung gegeben. Sie hat insbesondere auch die gegenseitigen Bindungen zwischen der Einzelausbildung und der Leistungsfähigkeit eines Autobahnknotens aufgedeckt und damit den Wert der Untersuchungen der Knotenpunkte durch Verkehrsbelastungspläne an einem praktischen Beispiel nachgewiesen.

Mit zunehmender Motorisierung wird die Wahl der Knotenformen für die Reichsautobahnen nach den Grundsätzen ihrer Leistungsfähigkeit immer mehr an Bedeutung gewinnen. Es wird bei Spitzenverkehr mit der gleichzeitigen Vollbelastung mehrerer Verkehrsrichtungen an den Autobahnknotenpunkten gerechnet werden müssen. Die Verkehrsvoraussage wird Aufschluß über die vermutlichen gleichzeitig auftretenden Spitzenverkehrsrichtungen geben können. Dadurch erscheinen dann auch die bisher gebräuchlichen Knotenformen in einem besonderen Licht. Während beispielsweise beim Kleeblatt 2 um 90° versetzte gleichzeitig auftretende Linkseckverkehre auf den dritten Fahrbahnen noch schleifend Kreuzungen hervorrufen (Abb. 18, oben), ist dies bei der Linienlösung nicht mehr der Fall (Abb. 18, unten).

Völlig werden sich aber bei keiner Knotenform gegenseitige Reibungen beseitigen lassen, da an einer Stelle immer wieder die Aufspaltung oder Vereinigung der Verkehrsströme vor sich gehen muß. Sie muß jedoch so gestaltet werden, daß die Reibungen auf ein Mindestmaß herabgesetzt werden. Die Autobahnknoten werden daher immer weitgehender auf diese Gesichtspunkte hin zu untersuchen sein, wobei in besonders gelagerten Fällen sich auch noch weitere neue Knotenformen herausbilden können, wie die Untersuchung der Linienlösung gezeigt hat.

Alle Rechte vorbehalten.

Die statische Wirkungsweise der Hohlplatten.

Von Dr. techn. F. Reinitzhuber, Berlin/Salzgitter.

Auf die günstige Wirkung der geschlossenen Röhren als drehsteife Bauglieder wurde schon mehrfach hingewiesen[1]). Ihre Verwendung für den Brückenbau wurde von Prof. Eiselin vorgeschlagen, der eine einfache Röhre als tragenden Brückenquerschnitt wählt. In Erweiterung dieses Gedankens durch Zusammenfügen mehrerer Röhren (entsprechend den mehrholmigen Schalenflügeltragwerken des Flugzeugbaues[2]), kommt man zu den von F. Leonhardt mit Hohlplatten bezeichneten Baugliedern, die den bisher üblichen Trägerrosten entsprechen, statisch jedoch in anderer Art wirken, worauf bisher nicht ausführlich hingewiesen wurde. Im folgenden soll daher an Hand der in Abb. 1 dargestellten, an zwei Seiten aufliegenden Hohlplatte ihre statische Wirkung erläutert werden.

Eine an beliebiger Stelle der Fahrbahn wirkende Last erzeugt, auf Plattenmitte bezogen, eine lotrechte Kraft und ein Verdrehmoment. Die lotrechte Kraft beansprucht alle Längsträger in gleicher Weise auf Biegung, vorausgesetzt, daß die Querträger genügend steif sind. Diese Voraussetzung wird um so besser zutreffen, je größer das Verhältnis von Querträgerhöhe zu Querträgerstützweite ist. Das Verdrehmoment, das bei den Trägerrosten die verschiedene Beanspruchung der Längsträger bewirkt, wird bei Hohlplatten mit steifen Querträgern zum größten Teil durch die Querträger in die geschlossenen, aus den Längsträgern und den beiden waagerechten Glattblechen gebildeten Röhren eingeleitet und von diesen mit biegungsfreier Verdrehung an die Auflager gebracht. Es werden wohl zusätzliche Längsspannungen in den Längsträgergurten infolge der behinderten Querschnittsverwölbung an den Querträgern entstehen, die jedoch nach den Erfahrungen des Flugzeugbaues wesentlich kleiner sind als die Gurtkräfte der Trägerroste. Ihre Größe hängt ab von den Querschnittsabmessungen (Blechstärken, Gurtflächen), der Steifheit der Querschotte und der Art der Belastung.

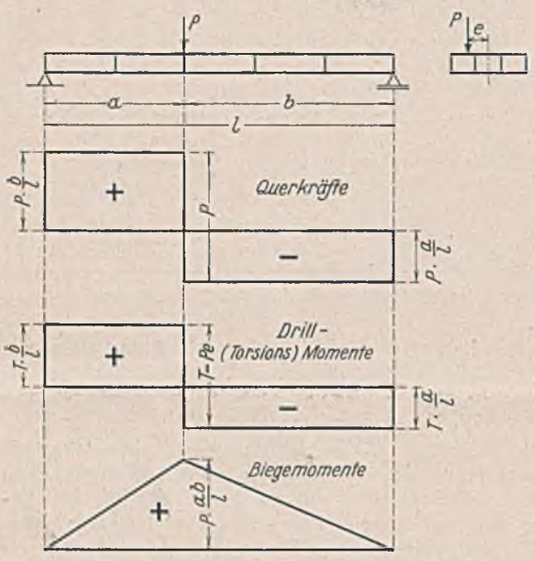


Abb. 1a. Querkräfte, Drill (Torsions)- und Biegemomente einer frei aufliegenden Hohlplatte.

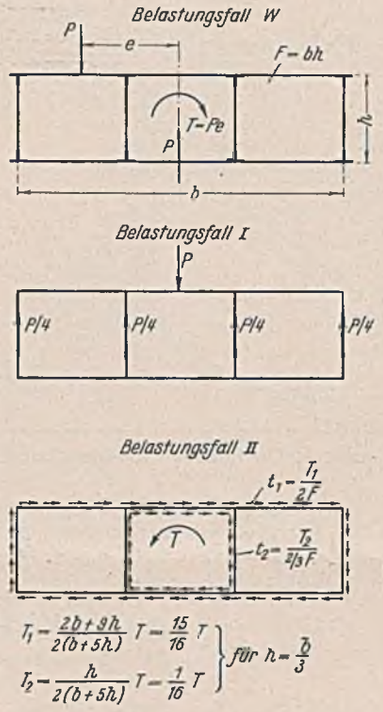


Abb. 1b. Krafteinleitung am Querträger. ($W = I + II$.)

Die biegungsfreie Verdrehung in geschlossenen Röhren ist eine Art der Kräfteübertragung, die dem Bauingenieur meist nicht geläufig ist; sie soll daher kurz erläutert werden[3]).

In einem geraden, dünnwandigen Hohlzylinder mit der von der Mittellinie der Wand eingeschlossenen Fläche F kann ein Verdrehungsmoment durch reine Schubspannungen übertragen werden, wenn eine Verwölbung des Querschnitts an den Enden nicht verhindert wird. Das Verdrehungsmoment T verteilt sich dann bei hinreichend geringer Wandstärke gleichmäßig über den Umfang nach der Bredtschen Formel[4])

$$t = \frac{T}{2F},$$

worin F die von der Mittellinie der Wand eingeschlossene Fläche ist. Daraus findet man die mit der Blechstärke s veränderlichen Schubspannungen

$$\tau = \frac{t}{s} = \frac{T}{2Fs}\ ^{5});$$

Längsspannungen treten nicht auf. Mit t, das die Benennung Kraft je Länge hat und als „Schubfluß" bezeichnet wird, läßt sich bequemer als mit der Schubspannung rechnen, da zu seiner Berechnung nach Bredt nur die von dem Tragwerk abhängige Größe F bekannt zu sein braucht, während die erst bei der Bemessung festliegende Blechstärke s nicht eingeht. Die Verformungen, die der Hohlzylinder erleidet, sind Verdrehungen in der Ebene senkrecht zur Zylinderachse um einen Drehpunkt, der bei behinderter Querschnittsverwölbung der „Schubmittelpunkt" ist, und im allgemeinen auch Verschiebungen in Richtung der Zylindererzeugenden, die als Verwölbungen bezeichnet werden. Hohlzylinder mit bestimmten Querschnitten erleiden keine Verwölbungen, z. B. der Kreiszylinder. Wird der Hohlzylinder an einem Ende an seiner Verwölbung behindert, so treten in Richtung der Zylindererzeugenden Längskräfte auf, die Wölbkräfte genannt werden. Die Wölbkräfte stehen für sich im Gleichgewicht, sie bilden eine Wölbkraftgruppe.

Die Bredtsche Formel und die längs spannungsfreie Momentenübertragung kann man sich leicht an einem rechteckigen dünnwandigen Hohlzylinder (Seitenlängen l_1 und l_2) von der Länge L, der an einer Seite ohne Wölbbehinderung eingespannt sei, anschaulich machen. Zerlegt man das Verdrehmoment in die Kräftepaare $T_1 = Q_1 \cdot l_2$ und $T_2 = Q_2 \cdot l_1$ (Abb. 2) und macht man $T_1 = T_2 = T/2$, so werden mit $Q_1 = \frac{T}{2l_2}$ und $Q_2 = \frac{T}{2l_1}$ die Schubflüsse $t_1 = \frac{Q_1}{l_1}$ und $t_2 = \frac{Q_2}{l_2}$ einander gleich und haben die Größe $t = t_1 = t_2 = \frac{T}{2l_1 l_2} = \frac{T}{2F}$ entsprechend der Bredtschen Formel. Wären die vier Seitenflächen des Zylinders an den Kanten nicht zusammenhängend, so würde jede der Seitenflächen für sich als Kragträger wirken, wenn ein Ende des Zylinders eingespannt gedacht wird. Die Gurtkräfte, die sich aus der Querkraft Q_1 ergeben, sind $S_I' = -S_{II}' = S_{III}' = -S_{IV}' = +\frac{Q_1 L}{l_1}$ und die aus Q_2 sind $S_{II}'' = -S_{III}'' = S_{IV}'' = -S_I'' = +\frac{Q_2 L}{l_2}$. Setzt man für Q_1 und Q_2 die oben gefundenen Werte ein, so erhält man für $S'_{I-IV} = S''_{I-IV} = \pm\frac{TL}{2l_1 l_2} = \pm tL$, ein Ergebnis, das man mit Hilfe des Satzes von der Gleichheit der Schubspannungen und Schubflüsse im rechten Winkel unmittelbar anschreiben kann. Da nun die Seitenflächen an den Kanten zusammenhängen, also ein Gurt immer zwei Seitenflächen angehört, sind die Gurtkräfte der entsprechenden Seitenflächen zusammenzuzählen; es wird $S_I = S_I' + S_I'' = 0 \ldots S_{IV} = S_{IV}' + S_{IV}'' = 0$, die Gurtkräfte verschwinden.

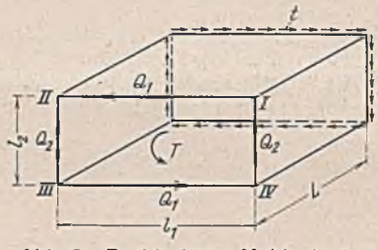


Abb. 2. Rechteckiger Hohlzylinder unter Verdrehbelastung.

Werden Zwischenstege in den Hohlzylinder eingezogen, so lassen sich die Schubflüsse nur aus einer statisch unbestimmten Rechnung bestimmen[6]). Nimmt man von den Stegen der Längsträger der Abb. 1 an, daß sie dieselben Blechstärken wie die Glattbleche an der Ober- und

[1]) O. Eiselin, Stahlbrücken mit Plattengurtungen. Bautechn. 1938, S. 41. — F. Leonhardt, Leichtbau — eine Forderung unserer Zeit. Bautechn. 1940, S. 413.

[2]) Vgl. z. B. H. Ebner, Zur Festigkeit von Schalen und Rohrholmflügeln. Luftfahrtforschung 1937, Bd. 14, S. 179.

[3]) Eine ausführliche, für den Bauingenieur bestimmte Darstellung über die Verdrehung von Stäben ist während der Drucklegung dieses Aufsatzes von K. Marquesse in Bauing. 1940, S. 317, unter dem Titel „Torsion von Voll- und Hohlquerschnitten" erschienen.

[4]) R. Bredt, Studien zur Drehungselastizität, Z. d. VdI 1896, S. 785.

[5]) Stahlbau-Kalender 1940, S. 66.

[6]) H. Lorenz, Technische Elastizitätslehre, S. 105. München 1913, Oldenbourg. — H. Hertel, Verdrehsteifigkeit und Verdrehfestigkeit von Flugzeugbauteilen. Luftfahrtforschung 1931, Bd. 9, Lief. 1, S. 24, und Lief. 2, S. 182.

Unterseite haben, so ergibt die statisch unbestimmte Rechnung, wenn man die Wölbkräfte unberücksichtigt läßt, daß das Verdrehmoment in der Hauptsache von der äußeren Begrenzung des Hohlzylinders aufgenommen wird:

Momentenanteil $T_1 = \frac{2b + 9h}{2(b + 5h)} \cdot T$; für $h = \frac{b}{3}$ wird $T_1 = \frac{15}{16} \cdot T$

und daß die Zwischenstege nur einen geringen Anteil des Verdrehmomentes:

Momentenanteil $T_2 = \frac{h}{2(b + 5h)} \cdot T$; für $h = \frac{b}{3}$ wird $T_2 = \frac{1}{16} \cdot T$

übernehmen. Daher bekommen bei unsymmetrischer Belastung der Brücke nur die äußeren Längsträger und die waagerechten Glattbleche größere zusätzliche Schubkräfte aus dem Verdrehmoment, während die inneren Längsträger nur geringe Schubkräfte aufzunehmen haben. Diese Schubkräfte beanspruchen nur das Stegblech und nicht die Gurte, da sie keine Biegung erzeugen.

Im Gegensatz zu den Trägerrosten könnten daher bei diesen Bauweisen alle Längsträger gleichartig ausgebildet werden, vorausgesetzt, daß die Querträger genügend steif sind. Unterschiedlich werden nur ihre Stegbleche beansprucht. Da diese aber meistens nicht voll ausgenutzt sind, so ist damit kein wesentlicher Gewichtsmehraufwand verbunden. Die Glattbleche in der Fahrbahnplatte und an der Unterseite der Längsträger haben sowohl an der Aufnahme der Gurtkräfte der Quer- und Längsträger mitzuwirken, als auch den Schubfluß aus dem Verdrehmoment weiterzuleiten. Diese zweite Aufgabe können sie nur dann übernehmen, wenn Querträger vorhanden sind, durch die das Verdrehmoment in die Bleche eingeleitet wird. Ohne Querrahmen oder Schotte, darauf sei besonders hingewiesen, können sich die Glattbleche an der Ober- und Unterseite bei der Aufnahme des Verdrehmomentes nicht voll beteiligen und die Verdrehsteifigkeit der Hohlplatte kommt nicht oder nur zum geringen Teil zur Geltung. Die Glattbleche kann man entsprechend den erforderlichen Widerstandsmomenten durch in Längsrichtung verlaufende Aussteifungen, die durch noch zu entwickelnde Leichtstäbe oder durch gepreßte Bleche (z. B. Wellbleche) gebildet werden, verstärken, wodurch auch ihre Beulsteifigkeit vergrößert wird. Die beschriebene mehrfache Aufgabe der Bleche ermöglicht ihre weitgehende Ausnutzung und bewirkt große Gewichtseinsparungen.

Besonders wirtschaftlich lassen sich die meisten Blechtragwerke dieser Art ausführen, wenn man dünne, bisher nicht gebräuchliche Bleche aus Breitbandstahl verwendet. Ob man dann die jetzt in den Vorschriften geforderte Beulsicherheit für Bleche infolge von Belastungen, die während der Lebensdauer eines Bauwerks doch meist nur höchst selten auftreten, aufrechterhalten soll, ist eine Frage, die noch zu klären wäre. Während Sicherheit gegen Knicken bei Druckstäben unumgänglich notwendig ist, da nach Überschreiten der Knicklast die Tragfähigkeit des Stabes erschöpft ist, können bei Blechen, besonders bei dünnen Blechen, je nach der Blechstärke, Belastungsart und den Lagerbedingungen, Lasten aufgebracht werden, die ein Vielfaches der gefährlichen Beullast betragen, ohne daß bleibende Verformungen festzustellen sind oder der Bruch eintritt, vorausgesetzt, daß die Blechumrandungen und Aussteifungen, die meist nicht ausgenutzt werden können, genügend steif sind. Es dürfte daher genügen, wenn man Beulsteifigkeit von Blechen nur für häufig vorkommende Belastungen fordert, hingegen bei den selten auftretenden Spitzenbelastungen eine Überschreitung der gefährlichen Beullast zuläßt. Auf diese Weise wäre es möglich, weitere Einsparungen im Stahlbau zu erzielen, die ein wirtschaftlicheres Bauen mit gleichmäßiger Baustoffausnutzung gestatten, ohne die Standsicherheit der Bauwerke herabzusetzen. Eine Klärung durch Beobachtungen an fertigen Bauwerken und Versuche der hier aufgeworfenen Fragen, die nicht nur für die Einführung des Leichtbaues im Stahlbau, sondern im gesamten Metallbau von Wert sind, wäre notwendig. Die in dieser Hinsicht bereits im Flugzeugbau gewonnenen Erfahrungen wird man sich dabei weitgehend zunutze machen können.

Alle Rechte vorbehalten.

Stromrüttelverfahren.*)

Von Dr.-Ing. Walter Bernatzik.

Die Frage, wie man nicht bindigen Sandboden verdichten kann, spielt in vielen Fällen eine sehr große Rolle; sei es, daß es sich um gewachsenen Sandboden handelt, der an sich locker gelagert ist, sei es, daß es sich um künstliche Schüttungen handelt, die verdichtet werden sollen. Es ist bekannt, daß lockere Sande sich bei einer Beanspruchung auf alle Fälle verdichten, während dicht gelagerte Sande bei Erreichen des Bruchzustandes ein Anschwellen und eine Auflockerung erfahren. Lockere Sande verhalten sich demnach vollständig anders als dicht gelagerte, und sie haben sehr unangenehme Eigenschaften, die manchmal verhängnisvoll werden können. Wird nämlich eine derartig lockere und wassergesättigte Sandschicht aus irgendeinem Grunde so beansprucht, daß das Korngefüge gestört wird und eine plötzliche Verdichtung eintritt, dann schwimmen die Sandkörner einen Augenblick in dem im Überschuß vorhandenen Porenwasser, und die ganze Masse wird plötzlich flüssig. Diese Erscheinung nennt man Setzungsfließen, und sie tritt bei vielen Seeuferrutschungen, Murgängen u. dgl. auf. Die Möglichkeiten zur Verdichtung derartiger Sandlagen spielen also manchmal im Tiefbau eine außerordentlich große Rolle.

Sofern es sich um Sandlagen über Grundwasser handelt, kann eine derartige Verdichtung verhältnismäßig leicht vorgenommen werden. Bei gewachsenen Böden z. B. mit Verdichtungspfählen, bei Schüttungen durch Abstampfen, Walzen usw. Liegen diese Böden unter Grundwasser, wird das Abstampfen unmöglich und das Rammen von Pfählen verhältnismäßig wirkungslos, da der Sand im Zuge der Rammung nicht genügend Zeit hat, sein überschüssiges Porenwasser abzugeben.

Von verschiedenen Seiten ist daher der Versuch unternommen worden, die Sande durch Rüttelwirkung zu verdichten. Man mußte indessen feststellen, daß die Rüttelwirkung von der Oberfläche nach unten zu sehr wenig Erfolg hatte, so daß auch bei sehr großen und schweren Schwingern die Wirkung nicht tiefer ging als $^1/_2$ bis 1 m. Das ist verständlich, denn, damit das Gefüge des Sandes zu Bruch gehen kann, muß bei der Schwingung eine so große nach aufwärts gerichtete Kraft in den Sandkörnern erzeugt werden, daß sie die Schwerkraft fast ganz aufhebt. Eine andere Technik, das sog. Rütteldruckverfahren, arbeitet mit einem ziemlich verwickelten Schwinggerät, das zugleich mit einem Mantelrohr in den Boden eingespült wird, worauf der Boden abschnittweise eingerüttelt wird[1]). Das Rüttelgerät wird dabei gezogen, der im Boden verbleibende Hohlraum dann mit Sand gefüllt und eine Art Sandpfahl gebildet. Allerdings ist das Gerät ziemlich kostspielig.

Um nun größere Sandmassen preiswert und einfach einrütteln zu können, habe ich den Gedanken verfolgt, ein möglichst einfaches Gerät zu verwenden, und zwar das Schwinggerät durch einen rasch fließenden, schwingenden Wasserstrahl zu ersetzen. Es ist aus der Elektrotechnik bekannt, daß für Gleichrichter schwingende Quecksilberstrahlen verwendet werden können, die so in Schwingung gebracht werden, daß die Quecksilbersäule sich staucht und regelrechte Teller ausbildet. Einen ähnlichen Gedanken verfolgend, verwende ich als Rüttelgerät einen Schlauch, der im Sand eingebettet ist und durch den mit möglichst hoher Geschwindigkeit Wasser strömt, wobei dieses Wasser durch eine geeignete Einrichtung in Schwingung versetzt wird. Der Erfolg ist, daß der Schlauch eine sehr kräftige Rüttelwirkung auf den Sand ausübt. Das Gerät zur Erzeugung der Schwingungen steht außerhalb des Bodens, und der schwingende Schlauch ist biegsam und kann in jede Form gebracht werden. Man kann aber auch von diesem Schlauch Abzweigungen vornehmen, in denen sich in Verbindung mit dem Hauptstrang fortschreitende oder stehende Wellen bilden. Der verwendete Baustoff ist dabei außerordentlich billig und leicht herstellbar und der Kraftaufwand besteht lediglich im Antrieb der Pumpe, sofern nicht ein hinreichendes natürliches Gefälle für die Wasserströmung im Schlauch vorhanden ist.

Um über die Wirkung der Rüttelung Aufschluß zu erhalten, habe ich einige Modellversuche vorgenommen. Abb. 1 zeigt eine unter Wasser eingebrachte, an sich sehr dicht gelagerte Sandschüttung. Die waagerechten Streifen wurden durch Einsieben von schwarzem Sand erzeugt. Der Schlauch geht waagerecht durch die Schüttung durch und seine Einmündung durch die Glasplatte hindurch ist auf Abb. 1 ersichtlich.

Zu Beginn der Rüttelung stürzt der Sand knapp oberhalb des Schlauches in sich zusammen und der darüberliegende Boden rutscht langsam in einem schmalen, lotrechten Streifen nach unten. Je länger die Rüttelung fortgesetzt wird, um so mehr verbreitert sich nach oben der nachrutschende Bereich, bis die Stellungslinie im Erddruck erreicht ist. In diesem Augenblick ist bei festliegender Schlauchlage der Vorgang beendet.

Abb. 2 zeigt dagegen die Erscheinungen bei einem lotrecht gerichteten Schlauch. Es tritt augenblicklich eine Wanderung von Sand entlang dem schwingenden Schlauche nach unten ein, so daß dadurch der Bereich des Nachgleitens verringert wird. Denn dieser nach abwärts fließende Sand übt den Seitendruck einer Flüssigkeit aus, so daß der entfernter gelegene, in Ruhe befindliche Sand nicht gegen den Schlauch zu rutschen kann und daher in seiner Lage unverändert bleibt. In diesem Falle kann die Grenze der Verdichtung die Stellungslinie nicht erreichen

*) Die Abhandlung ist in ähnlicher Fassung bereits in den Drucksachen des Internationalen Verbandes für wasserbauliches Versuchswesen (Berichte und Vorträge für die abgesagte Tagung Lüttich 1939) abgedruckt. Da in Deutschland davon aber nur sehr wenige Stücke vorhanden sind, wird der Aufsatz hier nochmals wiedergegeben. Die Schriftleitung.

[1]) Bautechn. 1940, Heft 25, S. 277.

sondern das Verdichtungsgebiet erstreckt sich auf einen schmalen, kegelförmigen Bereich um den Schlauch. Man sieht aus Abb. 1 u. 2, daß die Anordnung eines waagerechten Schlauches für die Reichweite günstiger sein muß. Aber auch für die Raschheit der Verdichtung ist die waagerechte Lage besser, denn bei der lotrechten Anordnung muß der Sand einen sehr langen Weg entlang dem Schlauche zurücklegen, um in die dichteste Lagerung zu kommen.

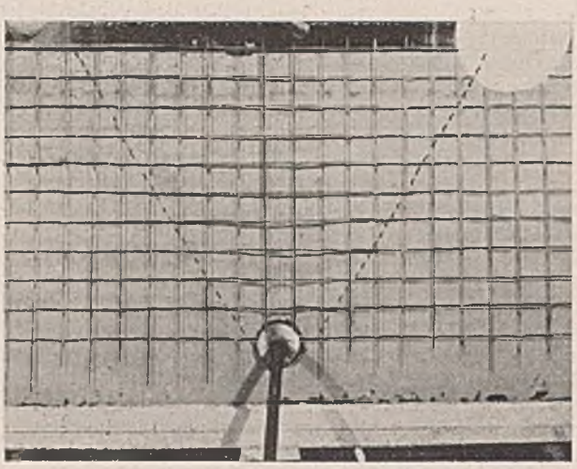


Abb. 1. Waagerechter Schlauch.

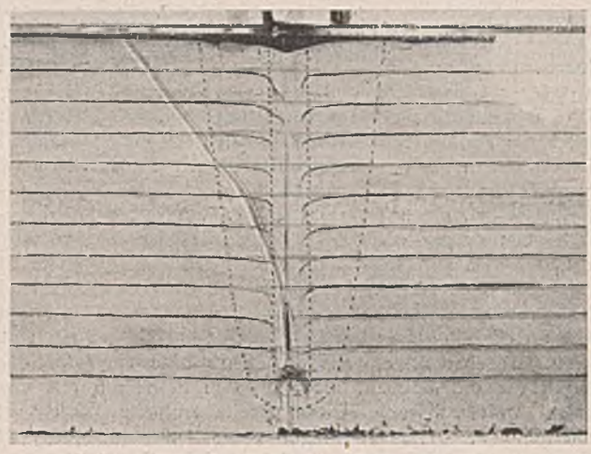


Abb. 2. Lotrechter Schlauch.

Durch die Rüttelung bleibt der Sand in der Umgebung des Schlauches in Bewegung, wodurch er bis zu einem gewissen Grade flüssigkeitsähnliche Eigenschaften erhält. Dadurch wird es möglich, daß man einen waagerechten Schlauch nach oben durch die Sandschicht hindurch ziehen kann, wobei die Rüttelung jeweils den Sand oberhalb des Schlauches lockert, um ihn unten in verdichtetem Zustand abzulagern. Abb. 3 zeigt einen solchen Versuch mit einem Schlauch, der entlang der Glasplatte U-förmig eingelegt wurde, und die gestrichelten Linien zeigen die Zwischenlagen des gezogenen Schlauches. Es ist allerdings zu sagen, daß sich der Schlauch manchmal so festbacken kann, daß die Schwingung nicht mehr stark genug ist, um den Sand in der Schwebe zu erhalten, so daß in diesem Fall zusätzliche Maßnahmen getroffen werden müssen.

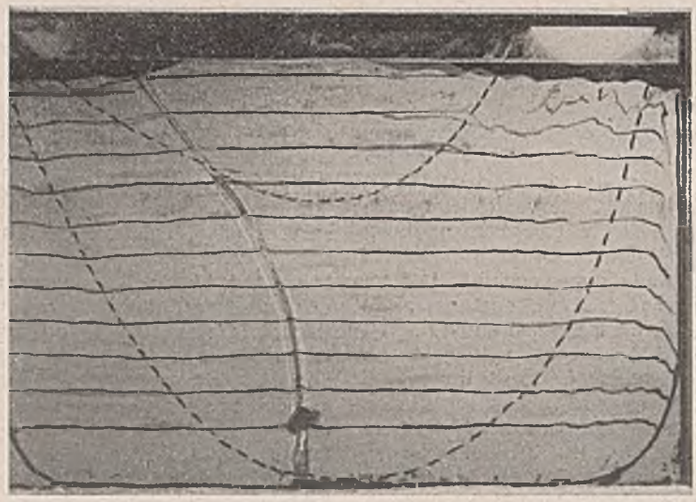


Abb. 3. U-förmiger Schlauch.

Die ersten Versuche in den ersten drei Bildern wurden mit einem Gartenschlauch von 12,5 mm lichter Weite vorgenommen und als Rüttelgerät wurde nach Abb. 4 ein einfacher Hahn verwendet, der durch einen Elektromotor in Drehung gesetzt wurde. Es zeigte sich jedoch, daß die Wirkung, die damit erreicht werden konnte, verhältnismäßig gering war, insbesondere deswegen, weil es schwer war, bei dieser Anordnung (Schlauch und Sandschüttung) die Eigenschwingzahl zu erreichen. Denn diese Eigenschwingzahl ändert sich mit der Verdichtung des Sandes, ferner aber auch mit der Zugspannung, unter der der Schlauch steht. Um daher mit einem geringen Kraftaufwande die größte Wirkung zu erzielen, wurde auf eine Schwingeranordnung übergegangen, die selbsttätig in Eigenschwingzahl arbeiten mußte. Dies ist eine knatternde Düse in der Art der hydraulischen Widder. Abb. 5 zeigt diese Anordnung. Die Schwingdüse besteht aus einem dickwandigen Mantelrohr mit einer Schwingnadel, die ein Kegelventil an der Austrittsstelle des Wassers bildet. Die Nadel wird mit Hilfe zweier Spiralfedern nach beiden Richtungen federnd gelagert und wird durch den Strömungsdruck des fließenden Wassers geschlossen. Hinter dem Schwinggerät ist ein starres Eisenrohr angebracht, in dem die durchströmende Wassersäule durch das plötzliche Schließen des Kegelventils zum Schwingen gebracht wird. Die Schwingung überträgt sich zurück auf die Nadel, so daß das Gerät der durchströmenden Wassersäule Stöße in der Eigenschwingzahl erteilt.

Das Gerät wird nun an den Schlauch angeschlossen und die Federspannung an der Nadel bis zum Anspringen der Schwingung geregelt. Dadurch entsteht im Schlauch eine Welle, die nur durch die Reibung im Schlauchmantel und im umliegenden Boden gedämpft wird. Je länger das starre Rohr hinter dem Schwinger ist, desto langsamer wird die Schwingung und desto größer wird die Schwingkraft der einzelnen Wellen Das gleiche gilt für die Größe des Druckunterschiedes zwischen Eintritts- und Austrittsstelle im strömenden Wasser entlang der ganzen Anordnung.

Wird bei einem längeren Schlauch die Schwingung so stark gedämpft, daß sie am Ende des Schlauches zu gering werden würde, dann kann dort ein zweites Schwinggerät eingebaut werden, das in Rückkoppelung

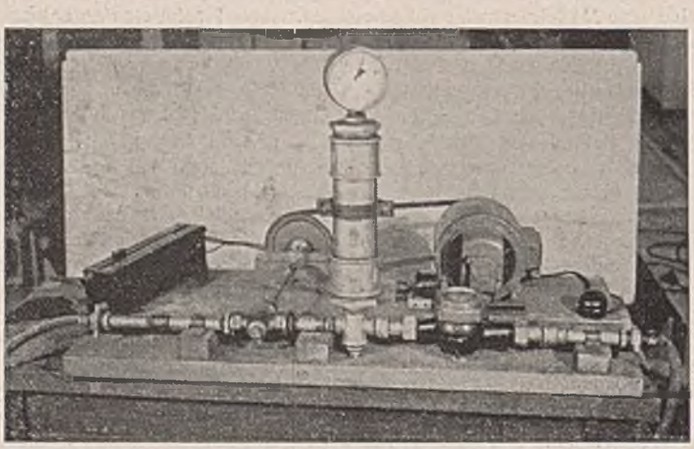


Abb. 4. Hahn zur Erzeuguug von Schwingungen.

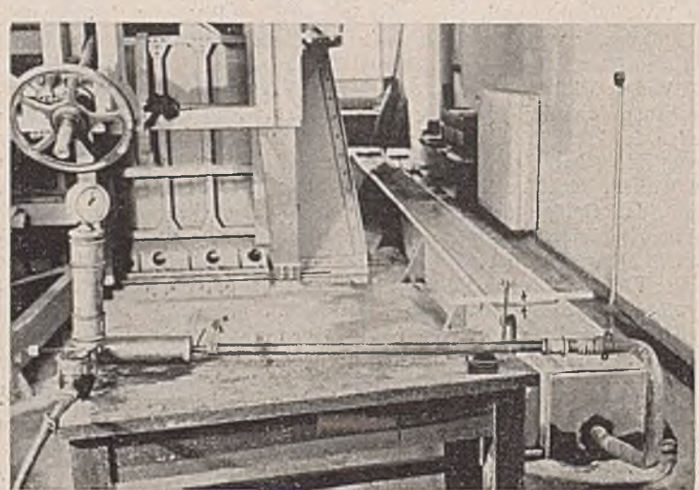


Abb. 5. Versuchsanordnung mit Schwingerdüse.

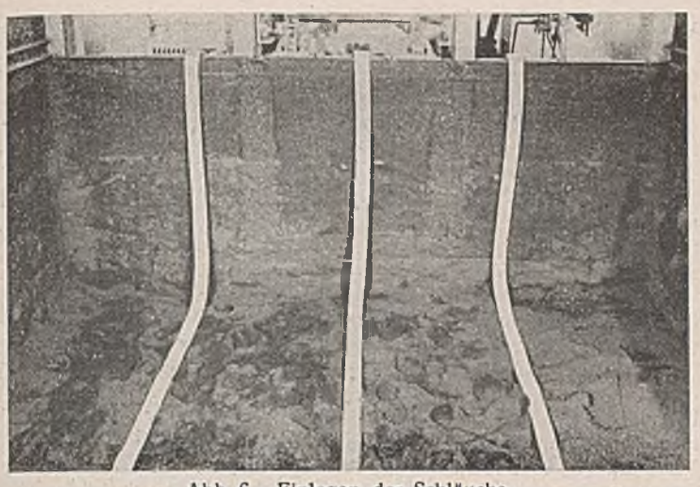


Abb. 6. Einlegen der Schläuche.

mit dem ersten arbeitet. Abb. 5 zeigt ein derartiges Schwinggerät, das für einen Öffnungsdurchmesser von $^1/_2$" gebaut ist; es arbeitet auf einen Schlauch von $^5/_4$" Durchm., der in einer Rinne von 10 m Länge in Sand eingebettet ist. Die übergelegte Latte zeigt die Setzung des Sandes in der Rinne infolge der Rüttelwirkung, und die Setzung verteilt sich vollständig gleichmäßig der ganzen Länge nach. Der zweite Schwinger am Ende der Rinne ist auf Abb. 5 nicht zu sehen.

ist auf Abb. 7 dargestellt, die die Einfachheit der Anordnung zeigt. Im Zuge des Rüttelns wurde nun der Schlauch an dem einen Ende langsam angezogen, Abb. 8 zeigt das Durchfressen des Schlauches durch den Sand im ersten Teil des Versuchs. Abb. 9 zeigt den nächsten Zustand während des Rüttelns und Abb. 10 das Ende, als der Schlauch sich durch die ganze Sandschüttung durchgearbeitet hatte. Die übergelegte Abstrichlatte läßt deutlich das Setzmaß erkennen.

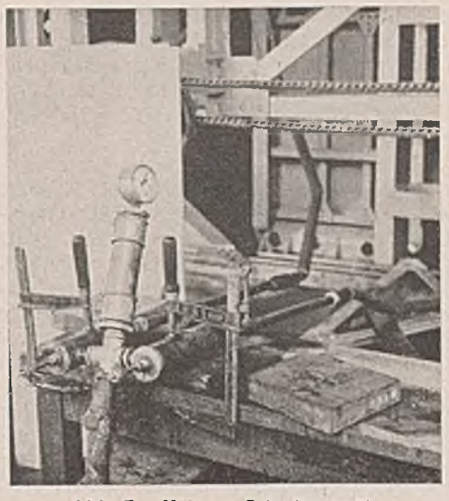


Abb. 7. Kleines Schwinggerät.

Beim zweiten Schlauch wurde ein größeres Schwinggerät mit $^5/_4$" Öffnung verwendet, das auf Abb. 11 wiedergegeben ist. Die auftretenden Schwingkräfte sind bei diesem Gerät schon sehr stark. Abb. 12 zeigt das Setzmaß des Sandes um diesen zweiten Schlauch herum. Der Versuch mußte allerdings aus Zeitmangel vor Beendigung abgebrochen werden.

Man sieht aus den bisherigen Versuchen, daß es ohne weiteres möglich ist, mit meinem Verfahren

Abb. 9. Zustand während des Rüttelns.

Abb. 8. Beginn des Versuches.

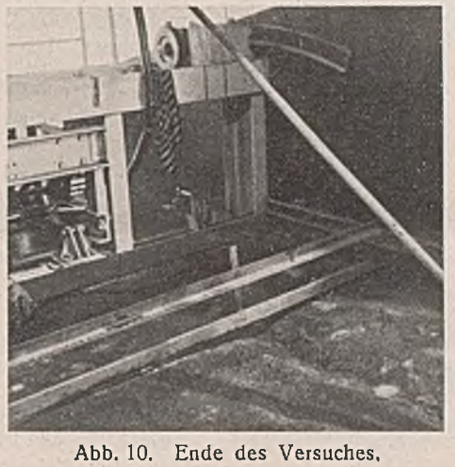


Abb. 10. Ende des Versuches.

Auf Grund dieser Vorversuche wurden Versuche in natürlichem Maßstabe vorgenommen, und zwar stand mir durch Vermittlung der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Degebo) das große Erddruckversuchsgerät der Technischen Hochschule Berlin mit den Abmessungen $3 \times 4 \times 1{,}80$ m zur Verfügung. Es wurden drei Feuerwehrschläuche aus Leinwand von $^5/_4$" Durchm. nach Abb. 6 eingelegt und der Sand eingefüllt. Nach mehrmaligem Steigen- und Fallenlassen des Grundwassers wurde mit dem Einrütteln begonnen, und zwar ebenfalls mit den kleinen Schwinggeräten mit $^1/_2$" Öffnung. Das Schwinggerät

größere, unter Wasser geschüttete Sandmassen zu verdichten. Allerdings ist es in den meisten Fällen notwendig, die Schläuche zu verlegen, bevor die Schüttung eingebracht wird und dies kann nur geschehen, wenn es sich um künstliche Schüttungen handelt. Es bleibt dabei künftigen Versuchen überlassen, ob man die Mühe und das Wagnis des Durchziehens

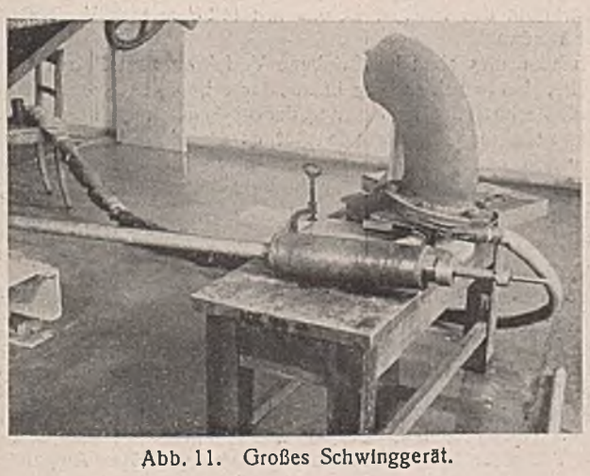


Abb. 11. Großes Schwinggerät.

Abb. 12. Sandoberfläche nach dem Rütteln.

der Schläuche auf sich nehmen will oder ob man im Zuge des Schüttens lieber eine größere Anzahl Schläuche einbringt und sie im Boden verloren gibt. Die aufgewendeten Summen sind auch in diesem Falle sehr gering, und man kann, wenn man will, die Schläuche mit Sand oder Zement verfüllen oder in ihnen Bewehrungen gegen Rutschungen u. dgl. einbringen.

Dieses bisher beschriebene Verfahren eignet sich also für alle Fälle, in denen man ohne große Mühe die Schläuche waagerecht einbringen kann, z. B. in Baugruben, die verfüllt werden, in Dämmen, in denen die Schläuche auch nachträglich waagerecht durchgespült werden können, oder im gewachsenen Boden, in dem die Schläuche auf nicht zu große Tiefe mit gekrümmten Spüllanzen eingespült werden können, wie es bei Kabelverlegungen üblich ist. Es können auch statt der Schläuche elastische Rohrschlangen verwendet werden, die sich von selbst in den Boden einarbeiten, um dann wieder hochgezogen zu werden. Grundbedingung für den Erfolg jeder Rüttelung ist, daß der Sandboden voll mit Wasser gesättigt ist, damit jede Haftung ausgeschaltet wird. Ist dies von Natur aus nicht der Fall, dann muß während des Rüttelns die Sättigung mit Wasser künstlich erzeugt werden.

Abb. 13. Lotrechtes Schwinggerät.

In den Fällen, in denen waagerechte Schläuche nicht eingebracht werden können, z. B. bei gewachsenen Boden in größerer Tiefe, muß von der Form der lotrechten Lanze ausgegangen werden. Eine Anordnung kleinen Maßstabes dieser Art zeigt Abb. 13. Hier ist das Schwinggerät auf ein in der Achse liegendes Rohr aufgesetzt, die schwingende Wassersäule fließt durch das Rohr nach unten und strömt außerhalb des Rohres nach oben zurück, wobei der Schlauch, der den Mantel des Ganzen bildet, in Schwingung gerät. Diese Anordnung arbeitet an sich gut, nur hat sie den Nachteil, der früher bereits erwähnt wurde, daß der sich setzende Sand entlang des Schlauches nach unten wandern muß und daher einen sehr langen Weg zurücklegt, ehe eine wirkliche Verdichtung eintreten kann.

Um rascher zum Ziel zu kommen, ist es daher günstiger, die Bewegung des Sandes senkrecht auf die Achse der Rüttellanze zu richten. In Verfolg dieses Gedankens kommt man zu der Arbeitsweise, daß der Schlauch leer in den Boden eingespült und dann durch die Rüttelwirkung aufgeblasen wird. Dies wird mehrmals wiederholt, indem man das Wasser aus der Lanze jedesmal wieder absaugt, um mit dem Aufblasen bei gleichzeitiger Rüttelung von neuem zu beginnen. Bei diesem Zusammensaugen des Schlauches wird ein ziemlich großer Hohlraum frei, in den der Sand rasch nach unten rieseln kann, so daß die Arbeitsweise wesentlich beschleunigt wird.

Abb. 14 zeigt einen Vorgang dieser Art. Die Lanze ist eingespült und zusammengesaugt. Zur Erhöhung der Rüttelkräfte ist oben ein Kolben eingebaut, auf den mit einer Ramme geschlagen werden kann, falls es nötig ist. Die Rammstöße übertragen sich durch die Schlauchwandung auf den Sand, wodurch der Schlauch kräftig aufgeweitet wird. Eine derartige Arbeitsweise ist natürlich nur in großen Tiefen notwendig, wo der Erdwiderstand möglicherweise durch das einfache Aufrütteln der Lanze nicht mehr überwunden werden kann.

Abb. 15 zeigt die Lanze aufgeblasen, und man sieht deutlich die trichterförmige Setzungsmulde, die sich durch die Verdichtung des Bodens gebildet hat. Es ist natürlich nicht nötig, die Rammschläge unmittelbar auf die Rüttellanze auszuüben, sondern die Ramme kann ebensogut abseits stehen, wobei der Kolben dann an der Zuleitung angebracht ist.

Es ist nicht ratsam, derartige Rüttellanzen zu lang zu machen, denn sie müssen in einem Zuge eingespült werden. Wenn man Schichten von etwa 20 m Mächtigkeit verdichten will, würde das Gerät zu ungefüge und könnte nicht zerlegt werden. Außerdem wächst der Erdwiderstand nach der Tiefe zu rascher als der Druck im Wasser infolge des Eigengewichts. Es ist daher unvermeidlich, daß die Rüttelschläge in den oberen Schichten die Schlauchwandung bereits überbeanspruchen, während in der Tiefe der Erdwiderstand noch nicht überwunden ist. Man müßte daher in einem solchen Fall mit schweren Schlämmen arbeiten, wie sie bei Tiefbohrungen verwendet werden, wodurch das Verfahren an Einfachheit verlieren würde.

Abb. 14. Rüttellanze, leer.

Deshalb wird man die Lanze nur etwa 1 bis $1^1/_2$ m lang machen und sie unter dem Schutze eines Bohr- oder Spülrohres einbringen. Das Rohr wird auf die Länge der Lanze gezogen, worauf dann beide abschnittweise hochgezogen werden. Da bei dieser Anordnung keine großen Schlauchlängen notwendig werden, kann die Wandung der Rüttellanze aus hochwertigem Stoff, z. B. gut dehnbarem Kautschuk, hergestellt werden. Es ist nur darauf zu sehen, daß eine Überbeanspruchung des Schlauches vermieden wird, was aber technisch keine Schwierigkeiten bietet.

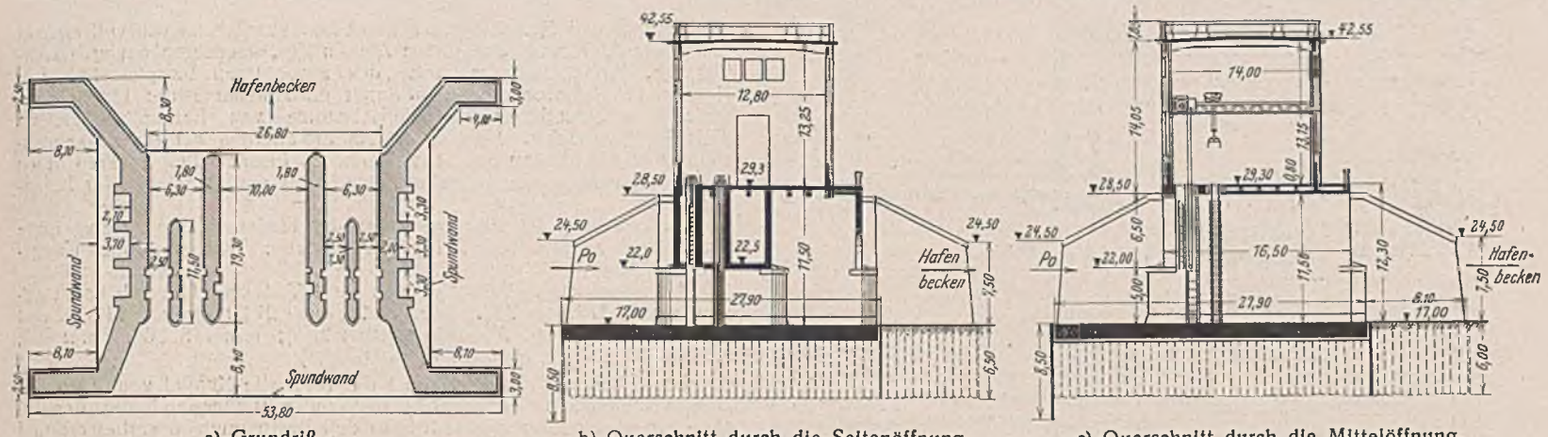
Abb. 15. Rüttellanze, aufgeblasen.

Es ist klar, daß dieses sehr einfache und bestechende Verfahren sich in verschiedenartigster Weise abwandeln läßt. So kann man z. B. bei Preßbetonpfählen, die mit Hilfe von Druckwasser hergestellt werden, den Beton gleichzeitig unter Rüttelwirkung setzen, wenn das Druckwasser in schwingendem Zustand in das Mantelrohr des Pfahles eingepreßt wird. Dadurch wird ein sehr dichter Beton erzeugt und das Verklemmen des Betons in der Eisenbewehrung vermieden, was sonst oft zu einem Hinunterschieben und Stören der Bewehrung führt. Es können auch im Talsperrenbau die Leitungen zum Einrütteln des Betons verwendet werden, die später zur Bekämpfung der Abbindewärme als Kühlschläuche dienen. Auch bei der Herstellung von Formsteinen und im Eisenbetonbau kann das Einrütteln des frischen Betons mit Hilfe meines Verfahrens durchgeführt werden.

Ich habe dies oben beschriebene Verfahren zum Patent angemeldet und hoffe, daß es seinen Weg in der Bautechnik gehen wird. Abgesehen von der Einfachheit der Handhabung, der Biegsamkeit und Formveränderlichkeit der rüttelnden Wassersäule gibt es die Möglichkeit, ohne Sondergeräte ein vorhandenes Wassergefälle in ein Rüttelgerät zu verwandeln. Denn jeder Bestandteil der Einrichtung kann auf der einfachsten Drehbank in ganz kurzer Zeit hergestellt werden.

Vermischtes.

Die Bewässerung von Parmigiana-Moglia. Eins der größten Bewässerungsunternehmen Italiens ist das des etwa 80000 ha umfassenden Gebietes von Parmigiana-Moglia. Durch die alte Römerstraße Emilia, den Gebirgsfluß Crostolo und den Po begrenzt, ist diese überwiegend tief gelegene Gegend häufig durch die Hochwasser des Crostolo und Secchia überflutet worden. Durch zweckentsprechende Bauten, einschließlich neuer Straßen und Siedlungen, ist das solange Zeit unfruchtbare und ungesunde Gebiet nunmehr der Kultur aufs Neue erschlossen worden. Es handelt sich hier um die Ausführung einer planmäßigen und gründlichen Bewässerung, die eine tiefgreifende Umgestaltung und Verbesserung der landwirtschaftlichen und gesundheitlichen Verhältnisse zur Folge hatte. Jede halbe Lösung wurde hier bewußt ausgeschlossen, um von vornherein eine volle Gewähr für die Rechtfertigung dieses bedeutenden Unternehmens, sowohl nach seiner finanziellen als auch nach seiner sozialen Seite hin sicherzustellen. Deshalb wurden auch nur namhafte und erfahrene Techniker mit der Ausführung dieser wichtigen Aufgabe betraut.



a) Grundriß. b) Querschnitt durch die Seitenöffnung. c) Querschnitt durch die Mittelöffnung.

Abb. 2. Einlaßschleuse.

Der größte Teil des bewässerten Gebietes besteht aus sandigen und tonigen alluvialen Ablagerungen der Flüsse Po, Enza und Secchia. Wie in den unmittelbar benachbarten Gebieten der Poebene, so reichen auch hier die Niederschläge zeitweise nicht aus, um den neu geschaffenen Anbauflächen genügend Wasser zuzuführen. Infolgedessen werden dem Po bei Boretto etwa 40000 l/sek entnommen und durch das in Abb. 1

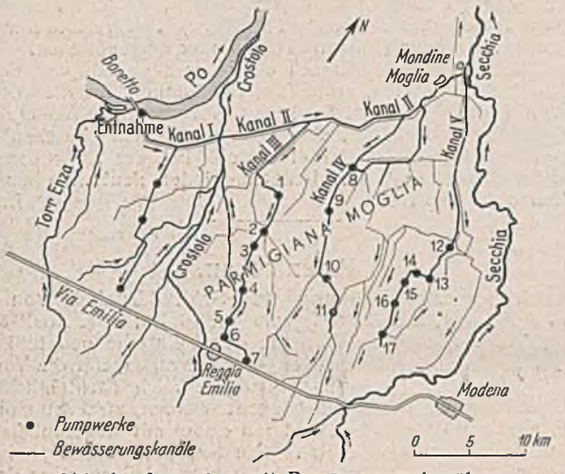


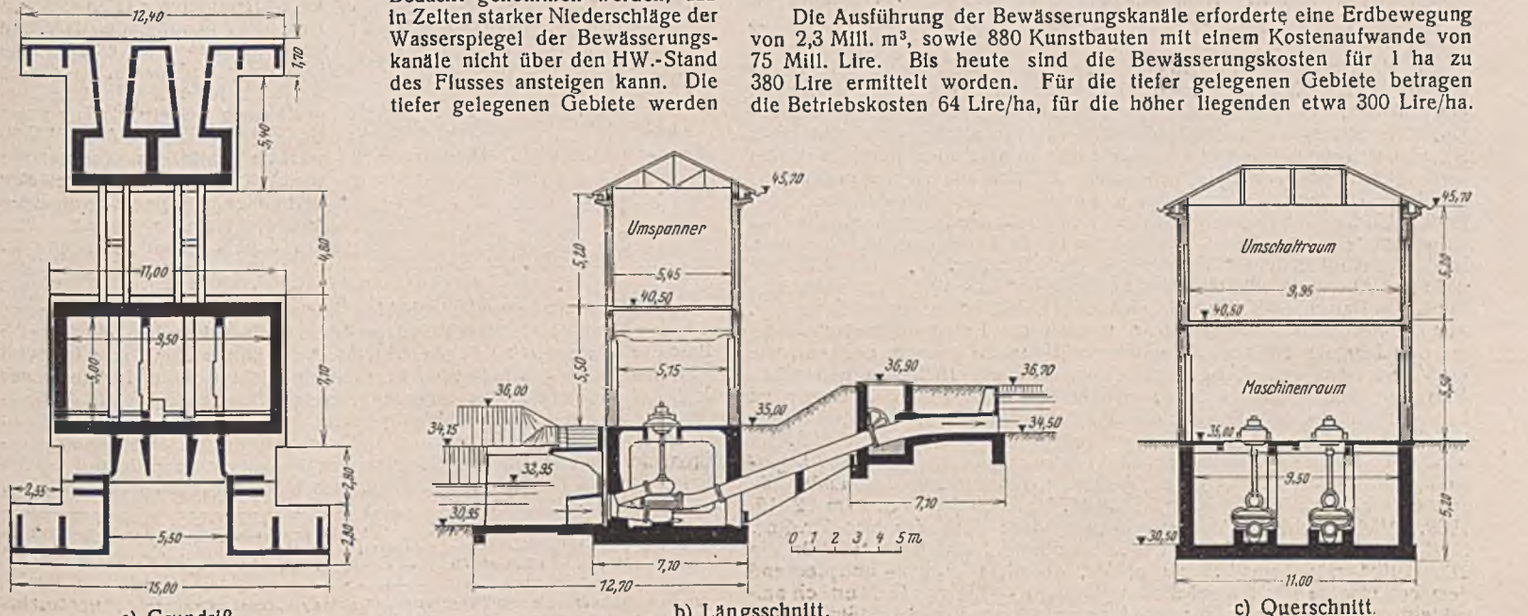
Abb. 1. Lageplan mit Bewässerungskanälen.

dargestellte Kanalnetz den tiefer gelegenen Geländeteilen mit natürlichem Gefälle zugeleitet. Nach den höher gelegenen Gebieten wird das notwendige Wasser durch Hebewerke gefördert. Da dem Po jährlich etwa 250 Mill. m³ Wasser entnommen werden, das durch die vielen in ihn mündenden Gebirgsflüsse stets eine gewisse Trübung aufweist, muß mit einer Ablagerung von jährlich 40000 t Sinkstoffen in den Bewässerungskanälen gerechnet werden. Bei der Planung mußte vor allem darauf Bedacht genommen werden, daß in Zeiten starker Niederschläge der Wasserspiegel der Bewässerungskanäle nicht über den HW.-Stand des Flusses ansteigen kann. Die tiefer gelegenen Gebiete werden durch die Kanäle I und II, die höheren liegenden durch III, IV und V bewässert. Sämtliche Hebewerke sind mit elektrisch betriebenen Kreiselpumpen ausgestattet.

Das bis auf Dammkronenhöhe ganz aus Beton, darüber aus Backsteinmauerwerk hergestellte Einlaßbauwerk mißt im Grundriß 54 × 36 m bei einer Höhe von 26 m. Wände und Spundwände des Maschinenhauses sind unter der Annahme von HW. im Flusse bei leerem Entnahmekanal berechnet. Die verschiedenen Arten der größeren und kleineren Hebewerke haben sämtlich senkrecht stehende Pumpen mit unmittelbar gekuppelten Elektromotoren. Bei dieser Pumpenanordnung steht das Rad stets unter Wasser und ist somit jederzeit, ohne besondere Anlaufzeit, betriebsbereit. In den einzelnen Kanälen sind folgende Hebewerke ausgeführt:

	Errichtete Gruppen	Wassermenge in l/sek	Förderhöhe in m	Leistung KW
A. Kanal III.				
1. Cartoccio . . .	4	13 200	6,00	1 100
2. S. Maria . . .	3	12 000	4,60	750
3. Rotte	3	9 000	5,60	710
4. Mancasale . .	3	6 600	5,60	519
5. Nave	3	5 250	5,10	375
6. S. Maurizio . .	2	2 400	7,40	250
7. Maccagnano . .	2	850	3,50	56
B. Kanal IV.				
8. Brunoria . . .	3	8 600	5,10	650
9. Capri	3	5 000	4,40	320
10. Correggio . .	3	3 000	4,30	190
11. S. Martino . .	2	1 500	3,30	74
C. Kanal V.				
12. Pratazzola . .	3	10 000	3,50	520
13. Magnavacca . .	3	9 000	2,70	375
14. Carpi	3	7 500	3,30	365
15. S. Croce . . .	3	5 100	3,30	255
16. Gargallo . . .	3	3 000	3,10	145
17. Panzano . . .	2	1 700	4,60	130

Die Ausführung der Bewässerungskanäle erforderte eine Erdbewegung von 2,3 Mill. m³, sowie 880 Kunstbauten mit einem Kostenaufwande von 75 Mill. Lire. Bis heute sind die Bewässerungskosten für 1 ha zu 380 Lire ermittelt worden. Für die tiefer gelegenen Gebiete betragen die Betriebskosten 64 Lire/ha, für die höher liegenden etwa 300 Lire/ha.



a) Grundriß. b) Längsschnitt. c) Querschnitt.

Abb. 3. Pumpwerk Cartoccio.

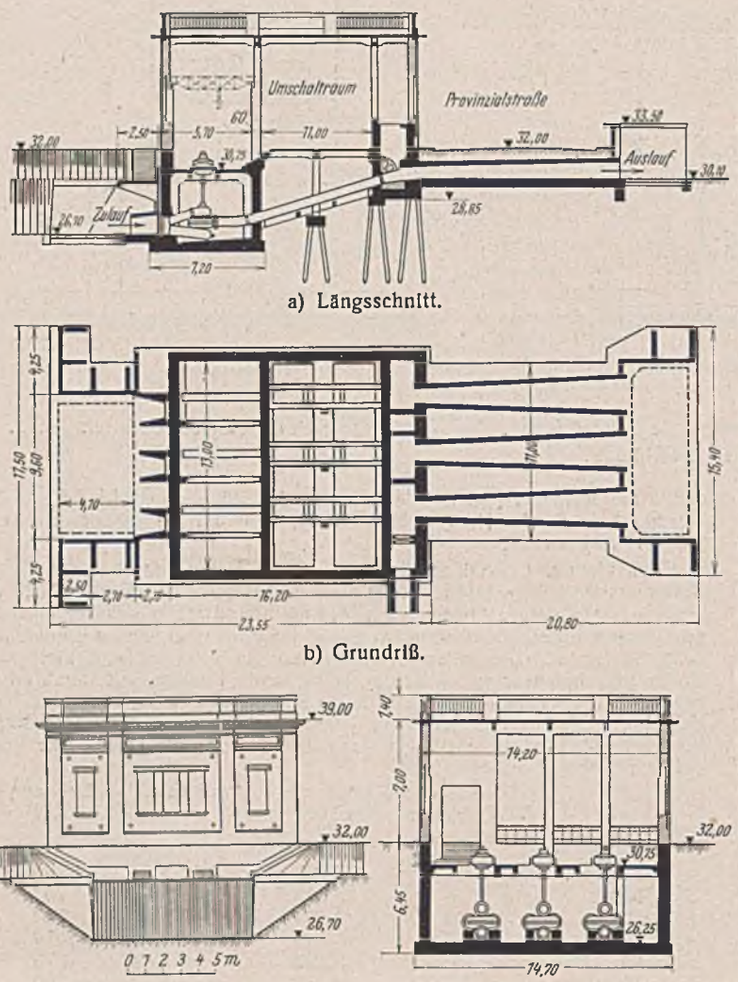


Abb. 4. Pumpwerk Correggio.

Diesem Kostenaufwande steht aber, ganz abgesehen von vielen Vorteilen anderer Art, eine entsprechend erhöhte Rente von etwa 1500 Lire für 1 ha bewässerter Fläche gegenüber. (Le opere per l'irrigazione della bonificazione Parmigiana-Moglia von Azzo Azzini in „L'Ingegnere", Heft 6, Juni 1940, S. 439 bis 443 mit 12 Abb.).

Dr.-Ing., Dr. rer. pol. Haller VDI, Tübingen.

Bücherschau.

Beton-Kalender 1941. Taschenbuch für den Beton- und Eisenbetonbau sowie die verwandten Fächer. Herausgegeben vom Verlag der Zeitschrift B. u. E. XXXIV. Jahrgang. 2 Teile mit 1115 Textabb. Berlin 1940, Verlag von Wilh. Ernst & Sohn. Preis Teil I in Leinen geb., Teil II geh., zus. 6,20 RM.

Pünktlich ist der 34. Jahrgang des jedem Bauingenieur längst bekannten Beton-Kalenders erschienen. Wie seine Vorgänger besteht er aus 2 Teilen, bei denen die bisherige Auswahl und Anordnung des behandelten Stoffes als zweckmäßig und bewährt im allgemeinen beibehalten ist. Im einzelnen jedoch findet der Leser in fast allen Kapiteln wieder wesentliche Verbesserungen, zeitgemäße Zusätze und Neufassungen.

Im I. Teil (Hilfswissenschaften und amtliche Bestimmungen), und zwar in der „Geometrie" sind die wichtigsten Formeln der Trigonometrie wieder aufgenommen, womit den Wünschen mancher Leser entsprochen wurde. In der „Festigkeitslehre" ist der von Prof. Dr.-Ing. Worch bearbeitete bisherige Abschnitt „Platten, Schalen, Behälter" auf eine ganz neue, ausführliche Berechnung der „Schalen und Behälter" beschränkt worden. Für die Berechnung der „Platten" werden die Leser diesmal zunächst auf den Jahrgang 1940 des Kalenders zurückgreifen müssen, doch ist, wie im Vorwort angegeben, beabsichtigt, im Jahrgang 1942 von demselben Verfasser eine ebenfalls neue, ausführliche Theorie der „Platten" zu bringen, wobei dann „Schalen und Behälter" weggelassen werden sollen. Im Kapitel „Gewichts- und Belastungsangaben" sind die mit Min.-Erl. vom 2. 7. 1940 eingeführten neuen „Lastannahmen für Bau- und Lagerstoffe" (Normblatt DIN 1055, Bl. 1) gebracht, in der „Baustoffkunde" die „Gütevorschriften für Bauholz" (DIN 4074 gemäß Min.-Erl. vom 22. 12. 1939. Viele sachliche Verbesserungen bringt auch der von Dr.-Ing. B. Barck bearbeitete Abschnitt „Zementmörtel und Beton". Für die „Baustatik" wäre ernstlich zu prüfen, ob nicht etwa — entsprechend dem von manchen Seiten geäußerten Wunsche — die von G. Mensch aufgestellten älteren Tafeln für durchlaufende Träger zweckmäßig wieder aufzunehmen sein würden. Das von Prof. B. Löser bearbeitete Kapitel „Bemessung und Gestaltung der Eisenbetonbauteile" ist wertvoll ergänzt durch die Einfügung des neuen Abschnitts „Biegezugspannung, Durchbiegung, Probebelastung" sowie des zugehörigen Beispiels 14. Die Normen für Betonrohre wurden durch die Aufnahme der kürzlich erschienenen „Richtlinien für die Abnahme von Betonrohrleitungen" (DIN 4033) vermehrt. Eine erhebliche Erweiterung hat die Zusammenstellung der deutschen und schweizerischen Prüfanstalten erfahren durch das jüngst erschienene amtliche „Verzeichnis von Prüfstellen für Betonversuche".

Zu erwähnen ist noch besonders der in den Titelbogen eingefügte bedeutsame Aufsatz von Fritz Seidenzahl: „Kriegserprobte Kriegswirtschaft".

An notwendigen Berichtigungen im I. Teil sind bisher bekannt geworden: S. 172, Sp. 7 St., Durchm. 20, $F = 21{,}99$ (anstatt 21,91), und Sp. 9 St., Durchm. 6, $F = 2{,}54$ (anstatt 2,64); ferner S. 369, Sp. $n = 8$, $\sigma_c = 1800$, $\phi = 12$, $S_S = 23{,}0$ (anstatt 20,3).

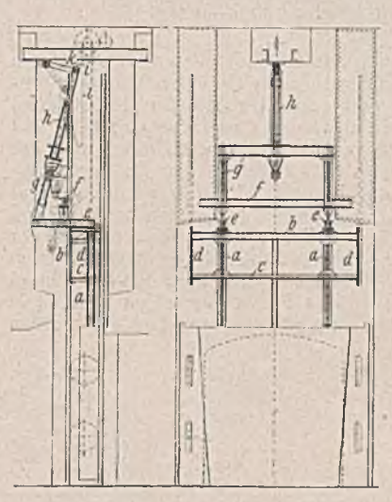
Im II. Teil sind, ebenso wie im I. Teil, alle Kapitel von ihren Bearbeitern eingehend nachgeprüft und unter Berücksichtigung der inzwischen herausgekommenen Erlasse und Bestimmungen verbessert und ergänzt. Das Kapitel „Massive Decken" ist diesmal durch Dipl.-Ing. R. von Halasz neu bearbeitet; es zeigt viele wertvolle Änderungen und Zusätze. Ferner hat — an Stelle von Geheimrat Prof. Dr.-Ing. chr. Brix — der neue Bearbeiter Prof. Dr.-Ing. habil. J. Schlums das wichtige Kapitel „Straßenbau" unter Berücksichtigung der Ziele des Generalinspektors für das deutsche Straßenwesen zweckmäßig umgestaltet und bereichert. Das Kapitel „Mauerwerkbau im Ingenieurbau" hat der Bearbeiter Studien- und Baurat Dipl.-Ing. Greiner auch diesmal wieder durch Einfügung neuer Beispiele an Umfang und Inhalt vergrößert.

Einige kleinere Kapitel sind weggelassen, dafür findet der Leser die Kapitel „Städtischer Tiefbau" (Reinhold), „Wehre und Staumauern" (Maier) und „Bergbau" (Baumstark) wieder aufgenommen.

Alles in allem zeigt hiernach auch der neue Jahrgang des Beton-Kalenders eine zeitgemäße, gründliche Bearbeitung, die dem derzeitigen Stande von Wissenschaft und Erfahrung gerecht wird. Als ein gut ausgestattetes, knapp abgefaßtes, aber doch inhaltreiches Taschenbuch und als bequemes, sicheres Hilfsmittel sowohl bei der Entwurfsarbeit wie auch auf der Baustelle ist seine Benutzung jedem deutschen Bauingenieur aufs wärmste zu empfehlen. Laskus.

Patentschau.

Vorrichtung zur Erhöhung des Schließdruckes von Schützkörpern. (Kl. 84a, Nr. 662571 vom 18. 10. 35; Gg. Noell & Co. in Würzburg.) Um mittels der Vorrichtung auf einfache und billige Weise einen Druck auf das Schütz ausüben und vor allem, um die Vorrichtung unter der Plattform unterzubringen und sie auch nachträglich in vorhandene Anlagen einbauen zu können, werden zwei Stempel *a* aus ⊔-Eisen, die am oberen und unteren Ende mit abgerundeten Lagerplatten versehen sind, aufgesetzt. Die Stempel werden so hoch ausgeführt, daß sie über das Unterwasser reichen und werden mit Querträgern *b* und *c* und diese wieder mit einfachen Gleitstücken *d* verbunden. Mit dem Schütz werden auch die Stempel hochgezogen und abgesenkt. Auf die Stempel *a* drücken zweiarmige, drehbar an einem Querträger *f* gelagerte Hebel *e*, deren freie Enden mit abgerundeten Platten versehen sind. Die anderen Enden der Hebel sind drehbar mit einem Zugrahmen *g* verbunden, in dessen Mitte ein federnd gelagertes Zuggestänge *h* angreift, das am freien Ende der Hubkette *i* des Windwerks angreift. Das Zuggestänge wird mit einem Lenker *k* gelenkig verbunden, der den Zugrahmen *g* und die Hebel *e* steuert. Wird das Schütz geschlossen und ist es etwas vor der tiefsten Lage angelangt, so wird das Zuggestänge *h* angezogen und die beiden Doppelhebel *e* in Tätigkeit gesetzt. Hat das Schütz fast seine Tiefstlage erreicht, dann kommen die Hebel *e* über die Stempel *a* zu liegen. Bleibt das Schütz stehen, so wird beim Weiterlaufen des Windwerks in gleicher Richtung die Hubkette des Schützes schlaff, und das entgegengesetzte Hubkettenende zieht das Zuggestänge *h* und den Zugrahmen *g* hoch, wodurch die Hebel *e* mit ihren freien Enden auf die Stempel *a* und auf das Schütz einen Druck ausüben, der bis zur Größe der Hubkraft oder noch weiter gesteigert werden kann, um das Schütz auch bei größtem Überdruck sicher zu schließen.



INHALT: Ein Autobahnknotenpunkt nach Art der Linienlösung. — Die statische Wirkungsweise der Hohlplatten. — Stromrüttelverfahren. — Vermischtes: Die Bewässerung von Parmigiana-Moglia. — Bücherschau. — Patentschau.

Verantwortlich für den Inhalt: Dr.-Ing. Erich Lohmeyer, Oberbaudirektor a. D., Berlin-Steglitz, Am Stadtpark 2. — Verlag: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin W 9. — Druck: Buchdruckerei Gebrüder Ernst, Berlin SW 68.