

G. Barkhausen

# Die Forth-Brücke



DIE  
**F O R T H - B R Ü C K E .**

VON

**G. BARKHAUSEN,**  
PROFESSOR AN DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE IN HANNOVER.

MIT IN DEN TEXT GEDRUCKTEN FIGUREN UND 9 LITHOGRAPHIRTEN TAFELN.



SPRINGER-VERLAG BERLIN HEIDELBERG GMBH

1889.

**Additional material to this book can be downloaded from <http://extras.springer.com>**

ISBN 978-3-642-50598-0      ISBN 978-3-642-50908-7 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-642-50908-7

aus der

**Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure**

1888.

Softcover reprint of the hardcover 1st edition 1888

## Inhaltsverzeichnis.

---

|   | Seite |
|---|-------|
| Einleitung . . . . .  | 1     |
| I. Lage und kurze Vorgeschichte des Baues . . . . .                         | 1     |
| II. Lage und Beschaffenheit der Baustelle im Einzelnen . . . . .            | 2     |
| III. Belastungsannahmen, Baustoffe, Beanspruchungen und Eigenlast . . . . . | 2     |
| A. Belastungsannahmen . . . . .   | 2     |
| B. Die Baustoffe und deren Beanspruchungen . . . . .                        | 3     |
| IV. Gesamtanordnung des Bauwerkes . . . . .                                 | 3     |
| V. Die Steinpfeiler . . . . .   | 6     |
| A. Die Gründung der Steinpfeiler . . . . .                                  | 6     |
| B. Die Pfeileraufbauten der Zufahrtsbrücken . . . . .                       | 8     |
| VI. Der stählerne Ueberbau . . . . .  | 8     |
| A. Die Wahl der Querschnitte . . . . .                                      | 8     |
| B. Die Ausbildung der Knoten . . . . .                                      | 11    |
| C. Die Auflager . . . . .   | 13    |
| VII. Die Fahrbahn . . . . .   | 17    |
| VIII. Die Ausführung des Stahlüberbaues . . . . .                           | 18    |
| A. Allgemeines . . . . .  | 18    |
| B. Die Herstellung der Stahlteile . . . . .                                 | 18    |
| C. Die Errichtung der Brückenträger . . . . .                               | 20    |
| IX. Die Aufstellung der Mittelträger . . . . .                              | 25    |
| Schlussbetrachtungen . . . . .  | 28    |

---

Ueber die Ueberbrückung des Firth of Forth bei Queensferry, die bisher grofsartigste Leistung des Bauingenieurwesens auf dem Gebiete des Brückenbaues, giebt es bereits eine Zahl von Veröffentlichungen (vgl. Zeitschr. d. Ver. deutscher Ingenieure 1882 S. 585; 1884 S. 792; 1885 S. 364 u. 463; 1887 S. 703), wie sie bisher wohl kaum einem Bauwerke gewidmet wurde. Alle aber fassen nur eine mehr oder weniger grofse Menge losgelöster Einzelheiten ins Auge, so dass es an einem Gesamtbilde des grofsartigen Unternehmens bisher fehlt. Ein solches zu bieten, ist Zweck dieses Aufsatzes, dessen Erreichung freilich die abermalige Wiedergabe schon veröffentlichter Dinge unumgänglich macht.<sup>1)</sup> Doch hofft der Verfasser, in dem während eines mehrwöchentlichen Aufenthaltes auf der Baustelle im Sommer 1887 unter manchen Mühen gesammelten Stoffe auch vielen noch etwas neues über das neue Weltwunder mitteilen zu können.

#### I. Lage und kurze Vorgeschichte des Baues.

Unter den von Westen und Osten tief in den Körper Schottlands einschneidenden zahlreichen Buchten hat der den Norden von Edinburgh und den fruchtbaren Berwick trennende Firth of Forth (vergl. Plan Figur 6 Tafel I) von alters her ein sehr fühlbares Verkehrshindernis gebildet und eine grofse Zahl von Fähren besessen, unter denen heute am Westende die von Kincardine, am Ostende bei Edinburgh die zwischen Granton und Burntisland und zwischen beiden nahe der Brückenbaustelle die zwischen Port-Elgar und North-Queensferry besondere Bedeutung, letztere beiden als Eisenbahnfähren, haben. Genau an der Baustelle befand sich die aus Walter Scott's »The Antiquary« bekannte Fähre von Hawes Inn, und dieses Gasthaus erfreut sich, beinahe unter die südliche Zufahrtsbrücke gedrängt, unter dem starken Zuspruche seitens der Arbeiter und Besucher der Brücke eines neuen Aufschwunges. Die Brücke soll die Lücke füllen, welche der Firth of Forth heute (Plan Figur 6 Tafel I) in der bei Ratho von der nördlichen Hauptlinie von Edinburgh über Falkirk nach Glasgow abzweigenden Linie nach Dunfermline im Norden des Firth of Forth bildet. Zugleich soll aber neben dem kurzen Anschlusse bis Inverkeithing an der Linie nach Dunfermline die Küstenstrecke von North-Queensferry nach Burntisland ausgebaut werden, um eine thunlichst kurze Verbindung mit Dundee zu erreichen. Den Erfolg der Ausführung der Brücke nach dieser Richtung kann man etwa aus den beiden nachfolgenden Zusammenstellungen entnehmen.

Die Entfernung von Carlisle (Plan Figur 6 Tafel I) nach Dundee über Carstairs, Airdrie, Stirling und Perth ist jetzt rund 267 km; demnächst wird die Verbindung Carlisle, Riccarton, Melrose, Edinburgh, Ratho, Queensferry, Burntisland, Thornton, Dundee rund 226 km ergeben. Im engeren Umkreise ist jetzt die Fahrt Ratho, Stirling, Dunfermline, Thornton 104 km lang; sie wird demnächst durch die Verbindung Ratho, Queensferry, Burntisland, Thornton auf etwa 66 km abgekürzt. Wenn man bedenkt, dass in weiterer Umgebung manche Wege-

<sup>1)</sup> Benutzt wurden: Engineer, Engineering, Mechanical World, Le Génie Civil, American Engineer, Minutes of Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Railroad Gazette, Dingler's Polytechnisches Journal.

kürzung durch Einlegung kleiner Verbindungsstrecken auch so zu erreichen wäre, so muss man schliesen, dass die Beteiligten diesem Gewinne von etwa 40 bzw. 38 km einen sehr hohen Wert beigelegt haben, um daraus den Bau eines solchen Riesenwerkes als vorteilhaft nachweisen zu können, zumal die Dampffährverbindungen recht gute sind.

Wiederholte Versuche der beteiligten Bahngesellschaften, einen Entwurf für die unmittelbare Verbindung Edinburgh's mit dem Norden zu gewinnen, führten schlieslich im Jahre 1873 zu einem Parlamentsbeschlusse, durch welchen die Errichtung einer Hängebrücke mit zwei grofsen Spannungen<sup>1)</sup> an der jetzigen Baustelle nach dem Plane des verstorbenen Sir Thomas Bouch, des Erbauers der älteren Taybrücke, genehmigt wurde, nachdem die Anlage eines Tunnels wegen der grofsen Wassertiefe — bis 67 m — als unausführbar erkannt war. Man schloss die Bauverträge ab, errichtete die nötigen Arbeitsschuppen und hatte auch die Pfeilergründungen bereits in Angriff genommen, als am 29. Dezember 1879 die Taybrücke von einem der überaus heftigen Stürme der schottischen Küsten zu Falle gebracht wurde. Dieser Sturm brachte auch das bis dahin starke Vertrauen auf die Richtigkeit von Sir Thomas Bouch's Berechnungen für das neue Unternehmen ins Wanken und stürzte seinen Entwurf trotz der auf grund desselben bereits gemachten erheblichen Aufwendungen.

Die beteiligten (North Eastern, Midland und Great Northern) Eisenbahngesellschaften beauftragten nun sofort ihre Ingenieuranwälte F. E. Harrison, W. H. Barlow und Sir John Fowler mit der Untersuchung, ob ein nach allen Richtungen durchaus verlässlicher Entwurf für den beabsichtigten Brückenbau zu gewinnen sei, und schon am 4. Mai 1881 erging der einstimmig gutgeheifene Bericht, dass ein von Sir John Fowler und Benjamin Baker inzwischen ausgearbeiteter Plan allen Anforderungen in vollstem Mafse entspreche, zugleich die denkbar billigste Anordnung ergebe und somit für die Ausführung dringend zu empfehlen sei. Den genannten beiden Ingenieuren wurde daraufhin die endgiltige Fertigstellung des Entwurfes sowie die Durcharbeitung aller Einzelteile und die Bauleitung von der oben genannten Vereinigung von Eisenbahngesellschaften übertragen.

Inzwischen war auch von anderen Seiten selbstverständlich eine ganze Reihe von Vorschlägen gemacht, von denen als besonders beachtenswert der Entwurf einer äufserst kühnen Bogenbrücke von zwei Oeffnungen mit Fahrbahn etwa in halber Pfeilhöhe von unserem Landsmanne Max am Ende<sup>2)</sup> erwähnt werden möge.

Die Eisenbahngesellschaften, zu denen noch die North British hinzutrat, brachten die erforderlichen Mittel allein auf, erwirkten die Genehmigung des Baues durch das Parlament im Juli 1882, und schon im Dezember desselben Jahres waren die vorbereitenden Arbeiten soweit gediehen, dass die Ausführung des Bauwerkes an die Unternehmer, Sir Th. Tancred, W. Arrol, Falkiner und Philipps, erfolgen konnte, welche unter der Firma Tancred, Arrol & Co., Glasgow vereinigt, die Ausführung übernahmen. Ihre Vertreter auf der Baustelle sind Andrew Biggart und Scott, während die Bauleitung durch den Ingenieur (resident engineer) Cooper vertreten wird.

<sup>1)</sup> In einfachen Linien dargestellt: Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereines zu Hannover 1883 S. 26.

<sup>2)</sup> Centrabl. d. Bauverw. 1881 S. 276.

## II. Lage und Beschaffenheit der Baustelle im Einzelnen.

Ueber die Wahl der genauen Lage der Baustelle konnten Zweifel nicht herrschen, weil der Firth of Forth nur eine einzige scharfe Einziehung, etwa 1 km östlich von South-Queensferry, grade vor Hawes Inn, aufweist. Westlich wird die Breite nach Ausweis der Figur 6 Tafel I beinahe bis Stirling hinauf beträchtlich gröfser; auch wurde der erzielte Gewinn bei westlicherer Lage immer geringer, und ältere Versuche hatten hier schlechten Untergrund ergeben. Nach Osten beginnt von diesem Punkte aus die eigentliche Meeresbucht sich rasch zu entwickeln.

Es kommt hinzu, dass sich ausserdem an dieser Stelle, fast genau mitten im tiefen Wasser, ein kleines Felseneiland mit den Resten einer alten Befestigung, Inch Garvie, erhebt, welches die Erbauung eines Mittelpfeilers ermöglichte.

Die Sohle des Flusses fällt am südlichen Ufer mit lehmigem Schlicker bedeckt auf etwa 400 m ganz flach von dem bis zu etwa 35 m über Wasser steil ansteigenden Ufer aus ab und enthält in tieferer Lage das bekannte englische Thonkonglomerat (boulder clay). An diesen flachen Hang, auf dem sich der 5,486 m (18') betragende Flutwechsel in beträchtlicher Breite bemerkbar macht, schließt sich das südliche etwa 500 m breite Tiefwasserbett, dessen Tiefe bis 60 m unter Ebbe steigt, und innerhalb dessen das Thonkonglomerat in Kalksteinfelsen (whinstone) mit nach Süden ziemlich steil einfallenden Bänken übergeht. Die Brückenlinie trifft dann die Insel Inch Garvie an der äufsersten westlichen Spitze in schon nicht mehr wasserfreier Lage. Das nördliche, 67 m tiefe und wieder etwa 500 m breite Tiefwasserbett fällt von beiden Seiten steil ab, so dass am Nordufer (Grafschaft Fife) ein flacher Ebbestrand nicht vorhanden ist. Ein schmales über Flut liegendes Vorland wird hier in etwa 300 m Entfernung vom Ufer durch den steilen Abfall der Fifeshirehügel begrenzt. Diese Verhältnisse sind aus Figur 1 Tafel I ersichtlich.

Es ergab sich somit die Wahl dreier Stützpunkte für die Tiefwasserüberbrückung von selbst; solche konnten nur auf dem Südrande des Südarms noch im Wasser, dann auf Inch Garvie und auf dem steilen Nordufer gefunden werden. Das breite Flutgebiet und der Uferhang im Süden sowie das Vorland im Norden konnten in beliebiger Weise überbrückt werden, so wie es der aus den Bedürfnissen des Verkehrs der Seeschiffe mit dem oberhalb liegenden Hafen Grangemouth sich ergebenden Höhenlage der Brücke entsprach. Doch lag der Gedanke nahe, diese doch erforderliche Ueberbrückung, soweit nötig, zur Gewinnung eines Gegengewichtes bezüglich der beiden Uferstützpunkte für die von der Weite der Tiefwasserarme bedingten Trägermassen auszunutzen, so eine Trägeranordnung für die beiden großen vorbezeichneten Spannungen überhaupt zu ermöglichen und die äufserst schwierig zu überwindende ungewöhnlich große wagerechte Kraft einer Bogen- oder Hängebrücke zu vermeiden. So ist denn der Grundgedanke der in Figur 1 Tafel I dargestellten Gesamtanordnung der Träger als ein unmittelbares, folgerichtiges Ergebnis der vorgefundenen Bodenverhältnisse anzusehen.

Bezüglich der Gesteinsarten mag noch hervorgehoben werden, dass brauchbare Bausteine nur für untergeordnete Zwecke gefunden wurden, dass daher die meisten Steine zu Schiffen von der Ostküste Nordschottlands, namentlich aus der Gegend von Aberdeen und Arbroath, hergefahren sind.

## III. Belastungsannahmen, Baustoffe, Beanspruchungen und Eigenlast.

### A. Belastungsannahmen.

Infolge des ausserordentlich starken Wechsels der Momente in den großen Spannweiten musste das Eigengewicht als nicht gleichförmig verteilt in die Rechnung eingeführt und daher durch wiederholte Annäherungsrechnung für alle Glieder genau ermittelt werden; es wechselt abgesehen vom Gleisgewichte von 43,3 t auf 1 m über den Hauptstützpunkten, bis zu 6,7 t in der Mitte der Oeffnungen.

Neben der Eigenlast hat bei der Gröfse der Abmessungen der Wind den stärksten Einfluss auf die Beanspruchungen. Nach den am Firth of Tay gemachten Erfahrungen ist in die

Rechnung ein seitlicher Druck von 273,5 kg für 1 qm (56 Pfd. auf 1 Quadratfuß) der Fläche aller Glieder und eines auf der Brücke befindlichen Zuges eingeführt. Dabei sind alle ebenen Glieder, deren Flächen mit Gitterwerk versehen sind, sowie der Fahrbahnträger als ganz volle Wände und für beide Hauptträger in verdoppelter Flächengröfse, alle runden Glieder für beide Hauptträger in einfacher Aufrissansichtsfläche in Rechnung gestellt. Da ausserdem die Beobachtung vorlag, dass die heftigen Stürme jener Gegend selbst in verhältnismäfsig kleinen Teilen der Strömungsquerschnitte gleichzeitig ganz ausserordentlich verschiedene Pressungen ausüben, so durfte auch der Winddruck nicht gleichförmig verteilt angenommen, sondern musste für die Hauptteile auf die ungünstigste Druckverteilung untersucht werden. So ist z. B. für die Hauptpfeiler auch der Fall berücksichtigt, dass zwei benachbarte sich grade gleichzeitig in den Mittelpunkten zweier Wirbelstürme mit gleicher oder entgegengesetzter Drehrichtung befinden. Ebenso sind auch schräge und in der Richtung der Brückenmittellinie wirkende Winddrücke in betracht gezogen.

Auf der Insel Inch Garvie ist im alten Fort zu Beginn des Baues eine Beobachtungsstelle für Winddrücke angelegt worden, deren Ergebnisse mindestens während der Bauzeit dauernd aufgezeichnet werden; sie enthält:

1. Ein großes Druckbrett (Figur 14 u. 15 Tafel V), dessen Ebene lotrecht gleichlaufend zur Brückenachse steht. Es hat 27,87 qm (300 Quadratfuß) Fläche quadratischer Gestalt, enthält aber je ein bewegliches kreisrundes Stück von 0,61 m Dmr. in der Mitte *d* und am Rande *e*, um annähernd übersehen zu können, ob der Winddruck sich über die Fläche des Brettes gleichförmig verteilt. Der Grundgedanke dieser Messvorrichtung ist in Figur 14 u. 15 Tafel V in Seiten- und Vorderansicht dargestellt; ihre Einrichtung ist folgende. Die große Bohlentafel *a* ist durch die langen Hängeeisen *b* genau in der wagerechten Schwerlinie sehr leicht pendelnd in lotrechter Stellung zwischen zwei Gruppen von je vier Schneckenfedern *c* aufgehängt, welche die Tafel bei geringer Bewegung in der Nähe der vier Ecken festhalten, übrigens auch bezüglich ihrer Befestigung so angeordnet sind, dass sie den Wind nicht in erheblicher Weise aufhalten. Diese Federn sind genau abgewogen und so empfindlich, dass sie einen Druck von etwa 20 kg auf 1 qm der Tafelfläche (4 Pfd. auf 1 Quadratfuß) noch scharf angeben. An jeder Seite sind vier leichte Ketten von den Ecken her nach der Spitze einer vierseitigen Pyramide geführt, hier vereinigt und nun gemeinsam über eine Rolle *f* nach einem langen Eisengewichte *g* geführt, dessen quadratischer Querschnitt von oben nach unten allmählich zunimmt, und dessen Länge mit einer dem Widerstande der Federn entsprechenden Teilung versehen ist. Dieses Gewicht ist mittels ganz schwacher Federn zwischen die für gewöhnlich auf den festen Stützen *i* ruhenden Latten *h* eingeklemmt, welche demnach das nach unten gehende Gewicht beinahe ohne Widerstand zwischen sich hindurchgleiten lassen, vom ansteigenden aber bei sehr geringem Eigengewichte sofort mitgenommen werden. Diese Vorrichtung ist, wie die Federn, auf beiden Seiten der Tafel angebracht. Wird also das Brett von einer Seite gedrückt, so sinkt das Gewicht auf der anderen zwischen den Hölzern nieder, und hebt diese mit an, wenn das Brett in die Ruhelage zurückgekehrt, so dass man aus der Stellung der Klemmhölzer auf dem Gewichte stets ablesen kann, wie tief letzteres seit der letzten Ableseung höchstens gesunken ist, d. h., wie stark der größte Druck war, der in dieser Zeit auf das Brett wirkte. Die Richtung des Druckes folgt aus der Verschiebung der Hölzer auf dem einen oder anderen Gewichte.

Die kleinen beweglichen Ausschnitte *d* und *e* sind mit den Ablesungsvorrichtungen versehen, welche unter 2 beschrieben werden.

2. ein kleines Druckbrett von 0,61 m Dmr. (Fig. 16 Tafel V) zur Prüfung, in wie weit die Gröfse der Fläche etwa von Einfluss auf den Druck ist. Dieses kleine Brett ist zwischen zwei abgewogenen, schlank gebogenen Federn, an zwei festen den Wind thunlichst wenig störenden Stützen befestigt, welche oben je eine wagerechte Hülse für einen genau eingeschliffenen, mit einer Spitze gegen die Platte tretenden und wieder mit der der Widerstandskraft der Federn entsprechenden Teilung versehenen Stift tragen. Die Wirkungs-

weise dieser Anordnung ist an sich klar; das Brett steht auch lotrecht gleichlaufend zur Brückenmittellinie.

3. ein gewöhnliches lotrechtes Windrad mit schrägen Schaufeln und Zählwerk für die Umdrehungen innerhalb bestimmter Zeitabschnitte, welches von einer Schwanzfahne stets gegen den Wind gerichtet wird, während die Druckbretter fest stehen.

Bis zum Sommer 1887 war mit diesen Vorkehrungen noch keine genügende Grundlage gewonnen, um irgendwie gesetzmäßige Ergebnisse erkennen zu können, zumal man anfangs an den Brettern zum Ablesen Zeigerwerke angebracht hatte, welche aber in folge der Trägheit der Zeiger bei heftigen Windstößen überschlugen und daher viel zu hohe Werte anzeigten. Es ergab sich die ganze Reihe der an den Zeigern gemachten Beobachtungen als wertlos.

Die Ablesungen der größten Werte erfolgen alle 2 Stunden; dabei liefert selbstverständlich das Windrad in der Regel die höchsten Werte, dann folgt das kleine Brett, hierauf die Ausschnitte im großen und schließlich das große Brett. Nur bei kurzen heftigen Stößen quer zur Brücke liefert das kleine Brett höhere Werte als das Windrad, wenn dieses sich erst in die Richtung einstellen muss. Abgesehen von den fehlerhaften Zeigerablesungen lieferte bis August 1887 ein Sturm vom 31. März 1886 die höchsten Werte, nämlich:

|        |          |          |               |                            |
|--------|----------|----------|---------------|----------------------------|
| 152 kg | auf 1 qm | (31 Pfd. | auf 1 Q.-Fuß) | am kleinen festen Brette,  |
| 127 »  | » 1 »    | (26 »    | » 1 »         | ) am Windrade,             |
| 139 »  | » 1 »    | (28½ »   | » 1 »         | ) am Ausschnitte in der    |
|        |          |          |               | Mitte des großen Brettes,  |
| 108 »  | » 1 »    | (22 »    | » 1 »         | ) am Ausschnitte in der    |
|        |          |          |               | Ecke des großen Brettes,   |
| 93 »   | » 1 »    | (19 »    | » 1 »         | ) am ganzen großen Brette. |

Diese Verhältnisse zeigen deutlich die Schwierigkeit der Ermittlung zuverlässiger Angaben über Winddruck.

Es verdient noch hervorgehoben zu werden, dass die sich für die Hauptöffnungen der ganzen Brücke nach der oben erläuterten Berechnungsweise ergebende Druckfläche 3,035 ha und somit die ganze seitliche Windlast auf die Hauptöffnungen rd. 8300 t beträgt.

Verkehrslast. Die ungünstigsten Laststellungen mussten nach Bestimmung des Board of Trade ermittelt werden unter Einführung eines endlosen Zuges von 3,330 t Gewicht für 1 m und 1 Geleis auf beiden Geleisen oder von Zügen, welche aus zwei Lokomotiven von zusammen 142 t und 60 Kohlenwagen von je 15 t bestehen.

Hiernach ist die größte auf die Brücke zu bringende Gesamtverkehrslast rd. 10800 t, der ganze mögliche Winddruck 8300 t; da das ganze Eigengewicht der Hauptöffnungen rd. 50000 t beträgt, so erkennt man, wie wenig hier im Gegensatze zu kleineren Bauwerken die Verkehrslast Ausschlag giebt.

#### B) Die Baustoffe und deren Beanspruchungen.

Der wichtigste der in frage kommenden Baustoffe ist der Stahl, aus welchem alle nicht aus Stein bestehenden Teile hergestellt werden. Es wird ausschließlich Siemens-Martinstahl in Form von Platten, Walzstücken und Gusskörpern und zwar allein aus den beiden Werken der Steel Company of Scotland in Newton und Blochairn bei Glasgow sowie aus dem Siemens'schen Werke in Landore bei Swansea in Süd-Wales verwendet. Die Stücke werden von den Werken auf Einzelbestellung sämtlich genau in den dem Entwurf entsprechenden Größen, Formen, bzw. Längen angeliefert.

Bezüglich der zulässigen Inanspruchnahme des Stahles hatte das Board of Trade nur bestimmt, dass Zug und Druck höchstens ein Viertel der Bruchfestigkeit erreichen dürfen, ohne auf den Wechsel oder die Art der Spannkraft Rücksicht zu nehmen.

Die entwerfenden Ingenieure Fowler und Baker haben dagegen folgende Grundsätze für die Berechnung aufgestellt. Die Bruchfestigkeit des Stahles in gezogenen Gliedern wird 1) unter einer ruhenden Last zu 4700 kg für 1 qcm, 2) unter einer von 0 bis zu irgend einer Größe wechselnden Last bei seltenem Wechsel zu 3600 kg, bei häufigem zu 3100 kg für 1 qcm, 3) unter einer zwischen Zug und Druck

wechselnden Last bei seltenem Wechsel zu 2370 kg, bei häufigem zu 1700 kg für 1 qcm angenommen; die tatsächlichen Beanspruchungen dürfen aber höchstens ein Drittel dieser Werte erreichen, betragen also höchstens 1567 kg, 1200 kg, 1033 kg, 790 kg bzw. 567 kg für 1 qcm.

Für gedrückte Glieder wurde nach Maßgabe eigener Versuche diejenige gleichförmig verteilt gedachte Beanspruchung  $s'$ , welche zuerst ein Ausknicken hervorruft, auf grund folgender Formeln ermittelt:

$$s' = (0,44 - 0,002n)(s + 2835) \text{ kg/qcm für Rohre,}$$

$$s' = (0,4 - 0,004n)(s + 2835) \text{ kg/qcm für vergitterte Glieder.}$$

Hierin ist  $n$  das Verhältnis der Länge zur kleinsten Breitenabmessung, und  $s$  bedeutet die mit Rücksicht auf die größere Festigkeit des für gedrückte Glieder verwendeten Stahles nach dem Verhältnisse  $\frac{5350}{4725}$  (vergrößerten unter 1), 2) und 3) vorstehend angegebenen Werte der Bruchfestigkeit für Zugglieder. Von den obigen Werten  $s'$  wurden dann vier Zehntel als zulässige Beanspruchung in Rechnung gestellt.

In den Laschungen beträgt der Scheerquerschnitt der Niete bei Zuggliedern das 1½fache, bei stumpfen Stößen gedrückter Glieder das ½fache des Nutzquerschnittes des Gliedes.

Die Bestimmungen für die Stahlprüfungen sind die folgenden: Für die gedrückten Teile soll die Bruchfestigkeit 5350 bis 5830 kg/qcm und die Reckung des 203 mm langen Probestabes vor dem Bruche 17 pCt., für Zugglieder die Festigkeit 4725 bis 5200 kg/qcm und die Reckung 20 pCt. betragen.

Der Stahl zu den Nietten soll 4250 kg/qcm Zugfestigkeit, 3470 bis 3780 kg/qcm Scheerfestigkeit haben und sich 30 pCt. recken. Der Stahl in Gussstücken soll bei 8 bis 10 pCt. Reckung 4725 kg/qcm Zugfestigkeit besitzen.

Die Steine werden im wesentlichen vier Bezugsquellen entnommen.

An den Stellen, wo das Mauerwerk dem Wasser oder Wetter ausgesetzt ist, also in allen Verkleidungen, Abdeckungen usw., auch zu allen Lager- oder Ankerquadern und Bandschichten kommt der beinahe weiße, sehr harte und dichte Granit von Aberdeen, in den Verkleidungen mit ziemlich rauhem Bossen ohne Kantenschlag zur Verwendung. Im Inneren der Pfeiler an Stellen, wo erhebliche Beanspruchungen stattfinden, wird Bruchsteinmauerwerk aus Sandstein von Arbroath aufgeführt. Dieser dunkelblaue, feinkörnige, ganz gleichmäßige Stein ist so vorzüglich lagerhaft und bricht in solchen Stärken, dass das daraus hergestellte Mauerwerk einem mäfsigen Quadermauerwerke nichts nachgiebt. Es erscheint daher auch die Verkleidung in ziemlich hohen Granitschichten (40 bis 50 cm) mit engen Fugen unbedenklich.

An Stellen, wo besonders sorgfältige Schichtung erwünscht erschien, wie in einzelnen Bandschichten, unter Lagerquadern, im Kopfe der Steinunterbauten der Hauptpfeiler, sind die bekannten Staffordshire blue bricks, außerordentlich harte, fast schwarze kleine Klinker verwendet.

Der an Ort und Stelle gefundene Kalk (whinstone) ist nur an den mindest belasteten Stellen, so in den Gründungen, wo er gewonnen wurde, als Steinschlag zum Beton, in den Flügeln und wenig belasteten Stirnmauern der Dammabschlusspfeiler an beiden Enden usw. verwendet.

Den einzigen Mörtelstoff bildet Portlandzement, rein oder mit scharfem Sande, und das erzielte Mauerwerk muss daher als ein in jeder Beziehung mustergiltiges bezeichnet werden. Es macht in allen Teilen, namentlich den schlanken Pfeilern der Zufahrtbrücke, einen in hohem Maße Vertrauen erweckenden Eindruck.

#### IV. Gesamtanordnung des Bauwerkes.

Die Längenanordnung der Träger für die Ueberbrückung der beiden tiefen Flussarme ergab sich zunächst aus der Bestimmung, dass in beiden Armen eine Durchfahrts-

<sup>1)</sup> Siehe die folgenden Bestimmungen über Stahlprüfung.

höhe von 45,819 m (150') über der höchsten Flut auf eine Breite von 152,397 m (500') frei bleiben sollte. Da ferner die drei Stützpunkte ziemlich unabänderlich festlagen, und es behufs Erreichung eines thunlichst tief gelegenen Ausgangspunktes für den Windverband empfehlenswert erschien, den Stahlüberbau an den Stützpunkten möglichst nahe über Hochwasser beginnen zu lassen, so war die Gestaltung der unteren Begrenzung des Tragwerkes in sehr enge Grenzen eingeschlossen.

Weiter sollten, wie oben hervorgehoben, wagerechte Schübe auf die Stützpunkte thunlichst vermieden, daher in den Seitenöffnungen aufserhalb der beiden äußeren Stützpunkte Gegengewichte für die Trägermassen der beiden Hauptöffnungen geschaffen werden; um die Mittelstütze halten sich letztere naturgemäß selbst das Gleichgewicht. Wenn nun aber die Stützen wirklich möglichst frei von wagerechten Kräften bleiben sollten, so durften auch diejenigen nur mittels der Reibung, nicht unmittelbar, auf sie wirken, welche sich aus Längenänderungen der Hauptöffnungen infolge von Wärmeschwankungen ergeben; bei der bedeutenden Reibung unter der Last der Träger konnte man das aber nicht allein durch verschiebliche Lager erreichen, sondern musste bewegliche Gelenke in die Öffnungen selbst legen.

Aus diesen Ueberlegungen ergab sich der Plan, auf den drei Stützpunkten je einen Stahlurm zu errichten, von diesen aus 6 ganz gleiche Kragarme ausgehen zu lassen und auf die Enden der zwei Kragkörper, welche in die beiden Hauptöffnungen ragen, je einen die Lücke schließenden, gewöhnlichen Träger beweglich aufzulagern. Was von den Seitenöffnungen durch den in sie hineinragenden Kragarm nicht gedeckt wurde, blieb dann durch besondere Zufahrtsbrücken für sich zu überbrücken. Die Belastung der Enden der inneren Kragarme durch den Mittelträger hätte an den Enden der äußeren Kragarme durch Verankerung in den letzten Steinpfeiler der Zufahrtbrücken ausgeglichen werden können; der Wunsch aber, diese wesentlich von einander verschiedenen Teile des ganzen Baues auch unabhängig von einander zu halten, führte dazu, die Enden der äußeren Kragstücke mit großen Blechkästen zu umgeben (Figur 1 Tafel II und Figur 1 bis 6 Tafel V), in welche so viele Gussbarren gepackt werden (etwa 2000 t), dass sie nicht allein das gegenüber wirkende Eigengewicht des Mittelträgers, sondern auch die auf letzteren und den an ihn anschließenden Kragarm kommende Verkehrslast auszugleichen im stande sind. Die Endpfeiler der Zufahrtbrücken erfahren daher wohl eine zwischen 0 und dem Gewichte der Gussbarren, vermehrt um den Auflagerdruck der Verkehrslast auf den äußeren Kragarmen, schwankende Belastung durch die letzteren, niemals aber einen nach oben gerichteten Zug, und eine lotrechte Verankerung des Kragarmendes fehlt daher hier.

Um nun aber die Gleichgewichtsverhältnisse des aus einem solchen Armpaare nebst zwischenliegendem Turme bestehenden einheitlichen Stückes des Tragwerkes nicht allzu empfindlich zu machen, musste der Turmfuß eine solche Breite erhalten, dass möglichst schiefe Belastung der Turmgruppe — d. h. Verkehrslast auf dem Mittelträger und einem anschließenden Arme — an dem der Last abgewendeten Turmfuß noch kein Bestreben zum Aufkippen erzeugt. Diese Gefahr war an dem bezüglich der Eigenlast genau im Gleichgewichte befindlichen Mittelpfeiler größer als an den von den künstlichen Belastungen der Enden der äußeren Arme günstig beeinflussten Endpfeilern, daher denn der Mittelpfeiler eine größere Breite erhalten musste, als diese. Thatsächlich ist die Breite der Pfeiler so bemessen, dass bei der ungünstigsten Belastung noch eine gewisse Sicherheit gegen Aufkippen, d. h. eine nach unten gerichtete Belastung des abgewendeten Pfeilerfußes, verbleibt.

Da die Weite der beiden Hauptöffnungen mit 521,198 m (1700') festlag, so waren auch für diese Untersuchung sichere Grundlagen gegeben, und mit Rücksicht auf die Standfestigkeit der Pfeiler sowie möglichst leichten Bau sind die Gelenke 207,260 m (680') von den Pfeilerfüßen entfernt angeordnet, so dass für den Mittelträger 106,678 m (350') übrig bleiben. Die außerordentlich weite Verschiebung der Gelenke nach

der Mitte zu entsprang namentlich auch aus dem Wunsche, bei der ohne Rüstung zu vollziehenden Aufstellung möglichst lange Trägereile in fester Verbindung mit den Pfeilern herstellen zu können. Die Gleichheit der Momente über den Stützen und im Mittelträger ist völlig aufgegeben und daher denn auch die Trägerhöhe über den Stützen ungewöhnlich gesteigert. Bei dieser Anlage der Hauptöffnungen wurden die beiden Seitentürme zwischen den Fußmitten 44,195 m (145'), der Mittelurm 79,247 m (260') breit gemacht.

In den Zufahrtsbrücken sind dann ferner am Südende 10, am Nordende 5 Oeffnungen von 51,205 m (168') Stützweite und im Anschlusse an den Damm südlich zwei, nördlich drei kleine gewölbte Oeffnungen angeschlossen.

Die so gewonnene Längsanordnung ist in Figur 1 Tafel I dargestellt, und eine Zusammenstellung der Teile ergibt folgendes:

|   | Meter   | Fuss Zoll |
|---|---------|-----------|
| 1. Südliche Endmauer mit der ersten gewölbten Oeffnung bis Pfeilermitte . . . . .       | 14,020  | 46 —      |
| 2. Zweite Oeffnung bis Mitte des ersten Trägerpfeilers . . . . .                        | 11,277  | 37 —      |
| 3. Erste Trägeröffnung von 168' von Pfeilermitte bis Pfeilermitte . . . . .             | 52,729  | 173 —     |
| 4. bis 11. 8 Trägeröffnungen von 168' Stützweite 8 · 51,205 m . . . . .                 | 409,644 | 134 4     |
| 12. Letzte Trägeröffnung der Zufahrtsbrücke bis Mitte Trennungspfeiler . . . . .        | 54,558  | 179 —     |
| 13. Südlicher äußerer Kragarm bis Mitte Trennungspfeiler . . . . .                      | 210,232 | 689 9     |
| 14. Breite d. südlichen Turmes (Queensferry-Pfeiler) . . . . .                          | 44,195  | 145 —     |
| 15. Südliche Hauptöffnung (2 · 207,260 + 106,678 m) (2 · 680 + 350') . . . . .          | 521,198 | 1710 —    |
| 16. Breite des Mittelurmes (Inch Garvie-Pfeiler) . . . . .                              | 79,247  | 260 —     |
| 17. Nördliche Hauptöffnung (2 · 207,260 + 106,678 m) (2 · 680 + 350') . . . . .         | 521,198 | 1710 —    |
| 18. Breite des nördlichen Turmes (Fife-Pfeiler) . . . . .                               | 44,195  | 145 —     |
| 19. Nördlicher äußerer Kragarm bis Mitte Trennungspfeiler . . . . .                     | 210,232 | 689 9     |
| 20. Erste Oeffnung der nördlichen Zufahrtbrücke bis Mitte Trennungspfeiler . . . . .    | 54,558  | 179 —     |
| 21. bis 23. Drei Trägeröffnungen der Zufahrtbrücke von 168' Stützweite . . . . .        | 153,615 | 504 —     |
| 24. Letzte Trägeröffnung mit 168' Stützweite von Pfeilermitte zu Pfeilermitte . . . . . | 52,729  | 173 —     |
| 25. Südliche gewölbte Endöffnung von Pfeilermitte zu Pfeilermitte . . . . .             | 11,277  | 37 —      |
| 26. Mittlere gewölbte Endöffnung von Pfeilermitte zu Pfeilermitte . . . . .             | 9,449   | 31 —      |
| 27. Nördliche gewölbte Endöffnung einschliesslich Damm - Abschlussmauer . . . . .       | 14,020  | 46 —      |

Im ganzen 27 Oeffnungen zusammen von 2468,373 m 8098' 6"

Bezüglich der Höhenanordnung ist zunächst hervorzuheben, dass die Schienenoberkante mit Rücksicht auf die Höhenlage der Ufer und die Schifffahrt auf + 51,063 m festgelegt wurde; Nullpunkt der Messung ist die englische Nulllinie (ordnance datum) vom Pegel in Greenwich. Niedrigwasser liegt auf — 2,134 m (7'), Hochwasser auf + 3,353 m (11'), bei Hochwasser steht also für die Fahrbahnausbildung über der Oberkante der freien Durchfahrt nur das Mafs von 51,063 — 45,819 — 3,353 = 1,891 m (rund 6') zur Verfügung.

Der Mittelträger ist mit  $\frac{1}{7}$  Pfeilverhältnis ziemlich niedrig gehalten; seine Mittelhöhe beträgt 15,240 m (50'), die Endhöhe nur 12,192 m (40') zwischen den Gurtschwerlinien. Um nun

von dem so festgelegten Ausgangspunkte das obere Zugband des Kragarmes noch so steil ansteigen lassen zu können, dass seine Wirksamkeit eine befriedigende und der Querschnitt nicht übermäßig groß wurde, musste zu der ganz ungewöhnlichen Höhe von 100,582 m (330') für die Türme über den Stützpunkten, zwischen den Anschlüssen der Schwerlinien der Gurte gemessen, gegriffen werden. Mit Rücksicht auf die Höhenlage des Fife-Ufers musste der Endknoten des Untergurtes auf + 10,805 m (35' 5<sup>3</sup>/<sub>8</sub>") gelegt werden; der erste Knoten des Obergurtes liegt somit auf + 111,387 m (Fig. 5 Tafel I) und das Pfeilverhältnis des Kragarmes bezüglich der großen Oeffnung ist beinahe 1:5. Der Endknoten des Untergurtes befindet sich  $10,805 - 3,333 = 7,472$  m über Hochwasser; die Oberkante der Steinunterbauten liegt auf + 8,839 m (29'), folglich  $8,839 - 3,333 = 5,506$  m über Hochwasser.

Die Höhenlage der Träger der Zufahrtsbrücken folgte aus der Höhenlage der Schienenoberkante und der Anordnung der Fahrbahn über den Trägern.

Die Breitenanordnung (Figur 5 Tafel I) des Tragwerkes für die großen Oeffnungen musste behufs Erzielung des nötigen Widerstandes gegen den Winddruck dem Grundgedanken nach der Höhenanordnung ähnlich werden, d. h., auch die Breite musste an den Stützpunkten größer sein, als in den Oeffnungsmitten. Die Stützenbreite ist so bestimmt, dass, wenn der heftigste Wind die leere Brücke trifft, das Eigengewicht ohne Berücksichtigung der Verankerung in den Steinunterbauten noch doppelte Sicherheit gegen Umkippen liefert. Die hiernach ermittelte Breite ergab sich zu 36,575 m (120') zwischen den Fußmitten.

Um diese unten erforderliche Breite aber nicht durch die ganze Höhe führen zu müssen, sind sowohl die Kragarme wie die Wände der Pfeilertürme so geneigt gestellt, dass die Knoten der Obergurte an den Türmen nur noch 10,058 m (33') und am Beginne des Mittelträgers 6,782 m (22' 3") von einander abstehen. Die Wände der Pfeilertürme sind somit nach  $\frac{36,575 - 10,058}{2 \cdot 100,582} = 1:7,5$  geneigt. Bis zum Mittelträger ziehen die Untergurte sich auf 9,600 m (31' 6") zusammen, und da das Armende wie das Mittelträgerende 12,192 m (40') hoch ist, so beträgt hier die Neigung nach innen  $\frac{9,600 - 6,782}{2 \cdot 12,192} = 1:8,65$ . In letzterer Neigung sind nicht allein die Wände der Kragarme durchweg schräg gestellt, sondern der leichteren Gelenkausbildung wegen auch die Tragwände der Mittelträger.

Die Pfeilertürme haben bei den Mafsen von  $36,575 \times 44,194$  m zwischen den vier Stützpunkten am Queensferry- und Fife-Pfeiler, und von  $36,575 \times 79,247$  m am Inch Garvie-Pfeiler keine volle Untermauerung, sondern jeder vier kreisrunde Steinfüße (Figur 6 und 7 Tafel II) erhalten, welche in der Oberkante (Ordinate + 8,839) bei 14,935 m (49') Dmr. die 4 Pfeilergrundplatten von je  $4,877$  m (16')  $\times$   $10,668$  m (35'), also rund 52 qm Grundfläche, aufnehmen.

Diese Steinpfeiler stehen nicht gerade unter den Pfeilerrohren, sind vielmehr  $47,243$  m (155') im Queensferry- und Fife-Pfeiler und  $82,295$  m (270') im Inch Garvie-Pfeiler von einander entfernt. In jeden dieser Steinfüße ist einer der vier Eckpfosten mit 48 Stück 64 mm starker Stahlanker  $7,315$  m (24') tief verankert.

Als Beispiel der im wesentlichen gleichen Pfeiler ist in Figur 4 u. 5 Tafel I der Queensferry-Pfeiler dargestellt. Er besteht zunächst aus vier in der Ansicht lotrechten, nach der Brückenmitte, wie oben gesagt, geneigten Eckpfosten, deren Füße durch einen rechteckigen wagerechten Rahmen mit zwei Kreuzsteifen vollständig gegen einander versteift sind; ein ähnlicher wagerechter Rahmen, jedoch ohne Kreuz, versteift die oberen Pfostenenden gegen einander, Figur 2 Tafel I, und die in den Außenflächen gleichlaufend mit der Brückenachse liegenden Glieder dieser Rahmen bilden Teile des Ober- und Untergurtes der ganzen Kragträger. In den Außenflächen sind die Eckpfosten noch durch zwei Kreuzstreben versteift, deren Durchkreuzung bei allen drei Pfeilern noch durch ein wagerechtes, am Inch Garvie-Pfeiler auch durch ein lotrechtes Hilfsglied abgefangen wird. Schliesslich sind je zwei in der Ansicht hinter einander stehende Eckpfosten durch ein dop-

pertes Netzwerk von vier Kreuzen sowie eine Quersteife unter der Fahrbahn (Figur 5 Tafel I) gegen einander abgesteift.

Der Untergurt hat aus den früher erläuterten Gründen, tiefe Herabführung des Windverbandes, Schiffsdurchfahrtsöffnung und Aussehen, eine sechsseitig geknickte Gestalt erhalten, liegt aber mit dieser Krümmung ganz in der Ebene der Wand der Kragarme, in der auch der Pfeilereckpfosten liegt, welcher übrigens nach innen geneigt liegt und mit der Brückenachse nicht gleichläuft (Figur 2 Tafel I). Die Weite zwischen den Untergurten zieht sich von 36,575 m (120') an den Pfeilern auf 9,600 m (31' 6") am Mittelträgerende ein. In den Hauptknoten und in den Durchkreuzungen der Wandglieder trägt der Untergurt starke, zum teil aus vielen Gliedern zusammengesetzte Joche (Figur 9 Tafel VII), auf denen die im Innern des Traggerüstes ganz selbständig ausgebildete Fahrbahnbrücke ruht.

Der Untergurt ist mit einem durchlaufenden, als doppeltes Netzwerk ausgebildeten Windverbande nach Figur 2 Tafel I ausgestattet, dessen Knoten mit den Hauptgurtknoten zusammenfallen, und welcher am Kragarmende am letzten Querträger in eine Spitze ausläuft (Figur 11 Tafel VI), um hier ein Bolzgelenk für den Mittelträger aufzunehmen. Dieser Windverband bildet die Fortsetzung des wagerechten Kreuzes im unteren Pfeilerrahmen.

Der Obergurt fällt von den Köpfen der Pfeilereckpfosten als Fortsetzung des oberen Rahmens geradlinig nach dem Obergurte des Mittelträgers ab; der Abstand zwischen den Achslinien vermindert sich dabei von 10,058 m (33') am Pfeiler auf 6,782 m (22' 3") am Mittelträgerende. Zwischen den Obergurten ist kein Windverband, vielmehr nur je eine Quersteife in den Hauptknoten (Figur 2 Tafel I) angebracht, um die Pfeilerköpfe nicht mit Winddruck zu belasten, welcher durch die Wandanordnung unmittelbar an den Windverband des Untergurtes abgegeben wird.

Die Wand jedes Kragarmes, mit Ober- und Untergurt sowie dem Pfeilereckpfosten genau in einer Ebene liegend, besteht aus sechs immer flacher werdenden Netzwerk Kreuzen, deren Kreuzpunkte durch Hängglieder mit dem Untergurte verbunden sind, welche zugleich die eine Gruppe von Fahrbahnjochen bilden; die Netzwerkknöten dienen also unmittelbar als Lastknöten für die Fahrbahn. Jedes Kreuz besteht aus einem nach dem Armende ansteigenden Druckcylinder und einem nach dem Armende zu fallenden Zuggliede. Zwischen je zwei in der Ansicht hinter einander liegende solche Druckglieder der Wand ist dann wieder ein doppeltes Windnetzwerk aus vier Kreuzen eingelegt (Figur C, S. 9), welches dem zwischen den Pfeilerpfostenpaaren (Figur 5 Tafel I) bis auf die wegfallende Quersteife unter der Fahrbahnbrücke vollkommen entspricht. Diese Netzwerke der Drucksteifen sind überall so angeordnet, dass die Fahrbahnbrücke durch die zweitunterste oder unterste Masche hindurchgeht, ohne einen Teil zu berühren. Der Zweck dieser Netzverkreuzungen der Drucksteifen ist, die Winddrücke, welche sich in den Knoten des Obergurtes oder auch in den Kreuzknöten der Wand ansammeln, durch die Seitensteifigkeit der so entstehenden Joche unmittelbar nach dem Untergurte zu führen und so die hochgelegenen Teile thunlichst zu entlasten. Die Zugglieder der Kreuze haben keine andere Queraussteifung, als die durch die Gurtungen und die Druckcylinder.

Der Mittelträger ist ein Halbparabelträger mit wenig gekrümmtem Obergurte,  $106,678$  m (350') Stützweite,  $12,192$  m (40') Endhöhe und  $15,240$  m (50') Mittelhöhe; die Wand besteht aus 8 Kreuzen doppelten Netzwerkes, von dessen Kreuzknöten aus die Mitten der Untergurte behufs Aufnahme von Fahrbahnquerträgern nochmals aufgehängt sind, so dass 16 Felder von je  $6,667$  m Länge entstehen. Das einzige Bemerkenswerte ist, dass die Tragwände in diejenige Neigung gestellt sind, welche auch die Enden der Kragarme besitzen, um die Lager bequemer anordnen zu können. Windverband ist unten in Form von Tonnenblechen, zwischen den Obergurten auch hier als Netzwerk angebracht.

Als Eigenschaften, welche das so entstandene Tragwerk vor anderen auszeichnen, werden von den Erfindern namentlich die folgenden hervorgehoben:

1. Das Eigengewicht ist in solchem Maße unmittelbar über den Stützen vereinigt, wie es bei keiner anderen Anordnung möglich wäre. Daraus ergeben sich vergleichsweise kleine Momente bei großer Standfestigkeit.

2. Die einfachen Formen, welche ein sehr spitzwinkliges Zusammenführen vieler Glieder in einem Punkte thunlichst vermeiden, ergeben einfache klare Verbindungen, daher vergleichsweise billige Arbeit.

3. Alle wagerechten Kraftwirkungen in der Längsachse, welche bei der Hängebrücke eine schwierige Verankerung, bei der Bogenbrücke mächtige Widerlagsmassen verlangen, sind vermieden.

4. Die Angriffsfläche für den Wind wird in den Oeffnungsmitten so gering, wie bei keiner anderen Anordnung; auch ist die größte Höhe dieses Entwurfes wesentlich geringer, als die der übrigen Vorschläge (Bouch's Hängebrücke 182 m über Hochwasser), so dass die Beanspruchung durch Wind vergleichsweise sehr günstig ist; zugleich liegt der Hauptwindverband sehr tief, während sich aus der hohen Lage bei der Hängebrücke eine sehr ungünstige Wirkung auf die Pfeiler ergab.

5. Die Aufstellung ist einfach und gefahrlos, da die Trägerform ein Vorbauendes Glied für Glied gestattet, wobei kein Glied anders beansprucht wird, als im fertigen Bauwerke.

Die Zufahrtsbrücken haben, abgesehen von fünf ganz kleinen gewölbten Oeffnungen, Träger von unveränderlicher Höhe, 6,096 m (20'), mit oben liegender Fahrbahn. Die Wand zeigt wieder acht Kreuze doppelten Netzwerkes, von dessen Kreuzpunkten je zwei kleine Steifen nach den Drittelpunkten der Obergurttfelder hinauflaufen. Diese Steifen wie die Hauptknoten tragen Querträger in 2,134 m (7') Teilung. Die Träger für je zwei benachbarte Oeffnungen von je 51,205 m (168') Stützweite sind, soweit es möglich war, zu einem durchlaufenden Träger vereinigt, welche auf Steinpfeilern ruhen. Die beiden Hauptträger liegen genau unter den beiden äußeren Schienen der beiden Geleise, so dass die Schienenträger gleich den Obergurt bilden und die Fußwege ausgekragt sind. Oben bildet die Fahrbahn den Windverband, unten sind besondere Windkreuze und zwischen die Hauptknoten noch lotrechte Querversteifungskreuze eingelegt. Die 15 Oeffnungen der Zufahrtsbrücken würden, für sich allein stehend, ein Aufsehen erregendes Bauwerk ergeben; hier werden sie freilich von den ungeheueren Abmessungen der Hauptöffnungen erdrückt.

## V. Die Steinpfeiler.

Die wichtigsten Teile der Steinpfeiler der Brücke sind in Figur 1 bis 9 Tafel II dargestellt.

A) Die Gründung der Steinpfeiler hatte bezüglich der Pfeiler der Zufahrtsbrücken keinerlei besondere Schwierigkeiten, wenn die Abmessungen der Baugruben auch z. t. außergewöhnliche waren. Die Pfeiler erreichten z. t. in trockener Baugrube, z. t. auf der Südseite im flachen Wasser mittels Thonfangedamm (Figur 2, 3 und 5 Tafel II) den festen Untergrund (boulder clay); bei den letzten Pfeilern der südlichen Brücke war man zur Vermeidung allzu großer Höhen gezwungen, die Fangedämme (für den Trennungspfeiler 38,404 m (126') lang, 22,860 m (75') breit, bei 0,914 m (3') Dicke des Thonkörpers) nur bis Mittelwasser zu führen und sich auf Tide- (Ebbe-) Arbeit zu beschränken. Diese Pfeiler reichen nirgends mehr als 10,668 m (35') unter Hochwasser.

Die vier Turmfüße des Fife-Pfeilers, welche in der Unterfläche 18,288 m (60') Dmr. haben, sind in zwei Gruppen gegründet. Bei den beiden landseitigen versuchte man zunächst, den mit 1 1/2 : 1 nach dem Wasser zu fallenden Kalkfelsen durch Bohren und Sprengen unter Wasser von eisernen Gerüsten aus so abzutreten, dass wagerechte Standflächen gewonnen würden. Als diese Arbeit aber zu langsam vorrückte, stellte man einen trocken zu legenden Holzfangedamm her. Für die beiden wasserseitigen Turmfüße wurden von vornherein der Felsenfläche thunlichst angepasste eiserne Mäntel abgesetzt, welche bis Niedrigwasser und mittels eines aufgesetzten zeitweiligen Mantels bis Mittelwasser reichten. Die Abdichtung gegen den Felsen wurde erreicht, indem man zunächst die Standfläche unter Wasser thunlichst einebnete, dann

erst Beton und später einen niedrigen inneren Plattenmantel einbrachte, hinter welchen Thon oder Beton gestampft wurde. Wegen der Tide- (Ebbe-) Arbeit schritten diese Arbeiten langsam vor, obwohl es sich nicht um einen Aushub, sondern mehr um eine bloße Einebnung handelte.

Für den Inch Garvie-Pfeiler wurden die beiden nördlichen Füße ebenso behandelt, wie die südlichen des Fife-Pfeilers, wobei man sich der gewölbten Rückenfläche des Inselfelsens durch Anschneiden von wagerechten Stufen in verschiedenen Höhen in weitgehender Weise anschloss.

Mit den beiden südlichen Füßen kam man schon in tiefes Wasser, musste hier die Standfläche in 24,689 m (81') Tiefe unter Hochwasser an den mit 1 : 4 1/2 abfallenden Felsenhang anschneiden und griff daher zur Luftdruckgründung unter einer kreisrunden Glocke. Diese Gründungskästen (in Figur 6 Tafel VII) wurden von den Unternehmern in Glasgow hergestellt, auf den Hellingen Nr. 52 (Plan Fig. 7 Tafel I) am Südufer zusammengesetzt, dann soweit mit Beton beschwert, dass sie aufrecht im Wasser schwammen, mit Wasserdruckpressen von Stapel gelassen, an Ort und Stelle geschleppt und hier an Eisengerüsten mit Leitpfählen festgelegt.

Die Kästen sind große Cylinder aus Eisenblech von 21,336 m (70') unterem Dmr. und 1 : 46 Anlauf, welche bis 0,305 m (1') über Niedrigwasser reichen und hier auf 18,288 m (60') Dmr. eingezogen sind. Unten ist die Schneide durch ein 45 cm breites, 25 mm dickes Stahlband verstärkt. In 2,134 m (7') Höhe ist durch ein wasserdichtes Deck die ganze Grundfläche bedeckende Arbeitskammer abgesondert, in deren Höhe die Schneide und Wand durch Eckstützen gegen die Decke abgesteift sind. Die Decke wird von vier 5,486 m (18') hohen Gitterträgern zwischen der äußeren Blechwand getragen, zwischen welche eine zweite Blechhülle in 2,134 m (7') Abstand von der äußeren eingesetzt ist. Kleinere Gitterquerträger von 0,914 m (3') Höhe unterstützen die Decke zwischen den vier großen Trägern und der inneren Blechwand in 1,219 m (4') Teilung. Durch entsprechendes Ausfüllen des durch lotrechte Querwände in mehrere Einzelräume geteilten Ringes zwischen den beiden Hüllen mit Beton und Klinkerverkleidung wurde die Dichtigkeit der Wände erhöht und zugleich ein Mittel geboten, die Schneide ungleichmäßig zu belasten. Die innere Blechhülle hört 7,315 m (24') vom oberen Ende der äußeren auf, und von hier an wird der Betonmantel allein durch Klinkerringe ersetzt. Der Beton, welcher zur Stetigung des Kastens im Wasser vor dem Stapellaufe eingebracht werden musste, wurde gleichmäßig über das Dach der Arbeitskammer verteilt. Während man dann die an Ort und Stelle verankerten Kästen durch Einbringen weiterer Betonlager absenkte, wurde oben auf den Rand behufs Gewinnung einer trockenen Grube auch bei Hochwasser eine zeitweilige Erhöhung in Ringen von 3,048 m (10') Höhe aufgebracht, welche nach vollständiger Absenkung bis 0,305 m (1') über Niedrigwasser hinunterreichend vom fertigen Pfeiler wieder entfernt werden konnte. Gleichzeitig wurden in den Kasten Holzbühnen mit Kränen, Betonmischern, Winden usw. eingebaut, welche zur Versteifung der Wand und als Arbeitsbühnen zugleich dienten. Diese Einrichtung ist aus Fig. 6 Tafel VII zu erkennen. Auf der Arbeitskammer wurden 3 Schächte *S* von je 0,914 m (3') Dmr. errichtet, von denen zwei mit Luftschiele *L* nach Figur 4 Tafel VII versehen zur Bodenförderung dienten, der dritte mit gewöhnlicher Zweikammerschiele von den Arbeitern benutzt wurde.

Die Luftpumpe wurde auf dem Gerüste aufgestellt, an welchem der Kasten verankert war.

Am Inch Garvie-Pfeiler entstand eine nicht unerhebliche Schwierigkeit daraus, dass die Schneide auf den stark abfallenden Felsen ganz schief aufsetzen musste. Sobald die Schneide bei Niedrigwasser den Felsen in einem Punkte berührte, wurde Luft eingedrückt, die Arbeitskammer frei geblasen und nun eine doppelte Reihe von Sand- und Zementsäcken an der tieferen Seite aufgestapelt, auf welche sich der Kasten mittels vorher unter der Decke befestigter Holzpfeiler von 2,75 m Quadratseite aufsetzte, so dass er nun einerseits mit der Schneide auf dem Felsen, andererseits auf den Säcken ruhte. Anfangs liefs man den Kasten nur bei Niedrigwasser wirklich aufsetzen, hielt ihn sonst schwimmend, bis ein län-

geres Stück wagerechter Sitzfläche für die Schneide angearbeitet war; erst dann belastete man ihn so, dass er auch bei Hochwasser fest aufstand. Mit Hilfe kleiner Drehbohrer wurde nun der Felsen abgearbeitet bis etwa 1,25 m über derjenigen Höhe, in welcher die ganze Grundfläche ein wagerechtes Bett gefunden haben würde. Die nun auf der tieferen Außenseite noch verbliebene Brücke zwischen dem Felsen und der Schneide wurde mit Blechen zugestellt und erst mit einem Betonfangdarme, später mit voller Betonschüttung, bis zur Schneide ganz geschlossen, so dass also diese Pfeiler an ihrer Außenkante schließendlich unmittelbar auf dem geneigten Felsen ruhen. In dem tiefer gegründeten dieser beiden Pfeiler, wo bei der freien Lage der Schneiden selbstverständlich der Luftdruck der äußeren Wassersäule voll entsprechen musste, stieg der Luftdruck bei Hochwasser bis auf 2,32 Atm. Ueberdruck, wobei die Schichten auf 4 Stunden verkürzt werden mussten. Die Erleuchtung der Arbeitskammer erfolgte durch Elektrizität.

Die vier 20,726 m (68') bis 27,432 m (90') unter Hochwasser abzusenkenden Turmfüße des Queensferry-Pfeilers kamen in das an Stärke rasch wechselnde schlammige Lager von lehmigem Schlick zu stehen, welches das hier anstehende Bett von Thonkonglomerat (boulder clay) überlagert. Die Kästen für diese Pfeiler (Fig. 7 Tafel VII) weisen gegenüber den oben beschriebenen nur die Abweichungen auf:

1. dass in Höhe der Arbeitskammer ein schräger Blechkegelmantel von der Schneide nach der Decke läuft, wo er grade mit der inneren Blechhülle zusammentrifft, so dass nun auch die Arbeitskammer von außen mit Beton umhüllt werden konnte. An den beiden Inch Garvie-Kästen war der untere Teil dieses Blechmantels weggelassen, um unmittelbar an der Schneide freier mit den Bohrern arbeiten zu können;

2. dass die innere Blechhülle wie die äußere bis Niedrigwasser hochgeführt wurde;

3. dass außer dem Steigschachte und den zwei Fördereschächten noch drei enge Blasrohre aus dem Arbeitsraume durch die Decke nach außen führten, welche oben vor dem Stapellaufe durch Hähne verschlossen wurden.

Nachdem die Kästen hier an Ort und Stelle bis auf den Grund versenkt waren, fand man die ganze Kammer mit dem schlammigen Lehme gefüllt, welcher den Beginn des Aushubes durch Arbeiter unmöglich machte. Es wurde daher in den Luftzuführungsschacht ein Wasserrohr eingesetzt, dessen Wasserstrahl unten eine flüssige Mudde erzeugte; ein oben offenes, gleichfalls in den Luftschacht eingesetztes zweites Rohr diente dann als Steigrohr für diese Mudde, welche vom Luftdrucke herausgeworfen wurde. Durch diesen Betrieb gelang es bald, auch die drei Blasrohre so weit frei zu machen, dass sie der Pressluft zugänglich wurden, und nun ging das Auswerfen des künstlich mit Wasser verrührten Schlickes sehr schnell von statten. Bei 12 bis 15 m Wassersäule genügte dabei ein Ueberdruck von 1,9 bis 2,0 Atm.; der Flutwechsel von 5,486 m (18') bedingte 0,14 Atm. bis 0,25 Atm. Wechsel der Pressung.

Wenn der Kasten sich während dieses Vorganges schief zu stellen suchte, wurde dem durch ungleichförmige Verteilung des Betons in dem Ringe zwischen den beiden Blechmänteln entgegengewirkt. Auch musste behufs Ueberwindung der Reibung wiederholt das Mittel des langsamen Abblasens bei niedrigster Ebbe angewendet werden.

Als das dichte Thonkonglomerat erreicht war, konnte die höchste Luftpressung andauernd selbst bei 24 m Wassersäule auf 1,5 At. ermäßigt und die Schichtdauer auf 6 Stunden bemessen werden; trotzdem schritt die Senkung wegen der außerordentlichen Zähigkeit des Thonkonglomerates nur langsam vor. Hier schaffte der Unternehmer Arrol Abhilfe durch den in Figur 5 Tafel VII dargestellten Presswasserspaten. Der Stiel  $T$  trägt unten den Spaten, oben einen Kolben  $P$ , welcher sich in einem Cylinder  $C$  bewegt. Mittels des Hahnes  $R$  kann man durch  $E$  Druckwasser zugleich über und unter den Kolben lassen, wobei der Kolben infolge des Unterschiedes der Druckflächen aus dem Cylinder tritt; eine zweite Stellung von  $R$  öffnet den Raum über dem Kolben nach  $C$  hin und lässt Presswasser nur in den Ringraum von  $C$  treten; dann wird der Spaten eingezogen. Am oberen Ende des Cylinders ist noch ein Stückchen Rohr  $t$  zum Abstützen des Spatens angebracht. Drei Mann setzen den mittels Gummischlauch an die Wasserleitung angeschlossenen Spaten etwa

12 bis 15 cm vor den Rand einer angearbeiteten kleinen Bank von 0,35 m Höhe, lassen dann durch  $R$  Wasser oben und unten zu und führen das kleine Rohr  $t$  auf dem sich nunmehr hebenden Cylinder etwa auf einen Nietkopf der Kastendecke als Halt, so dass der Spaten nun zwischen Boden und Decke eingekeilt unter dem Wasserdrucke die Bank abstechen muss. Mit 27 Arbeitern und 4 Spaten wurde 0,3 m Fortschritt im Tage erreicht, was einer Leistung von etwa 4,0 cbm auf den Mann entspricht. Mit der Schaufel sind die beiden Ostfüße in je 72 Tagen 11,27 m, bzw. 13,10 m gesenkt, während der erste mit reiner Handarbeit gesenkte in 99 Tagen 11,9 m niederging. Das Abwasser des Spatens ging nicht in den dichten Untergrund, musste vielmehr ausgeblasen werden, wobei wegen des geringen Luftdruckes die Mischung mit Luft in Anwendung kam.

Die beiden Förderschächte waren nach dem Entwurfe von Baker und Arrol mit von den gewöhnlichen Formen abweichenden Luftschleusen (Figur 4 Tafel VII) versehen, welche als Schieberschleusen bezeichnet werden können. Die Förderkammer oben auf dem Schachte hat oben und unten je einen wagerechten Schieber  $DD^1$ , welche geöffnet in die Nebenräume  $E$  treten; zwischen letzteren befindet sich der Raum für eine Kettentrommel, auf welche die Windekette über eine Rolle am oberen Schieber geführt ist. Die Trommelwelle ist mittels Stopfbüchse  $B$  durch die Wand geführt und wird außen mittels Schneckenradvorgeleges  $V$  durch eine kleine umzusteuende Dampfmaschine  $M$  mit zwei Cylindern bewegt. An jedem Schieber ist eine mit Stopfbüchse in die Wand eingesetzte Stange  $e$  befestigt, welche entweder vom Presswassercylinder  $HH^1$  oder von Hand durch Zahnrad und Zahnstange bewegt wird. Die Presswassercylinder sind, wie bei  $H^1$  eingezeichnet, in geringem Maße doppelwirkend. Der Ringraum um den Kolben steht, auch wenn die Ventilträder  $hh^1$  die Zuleitung abschließen, mit dieser in Verbindung, so dass die Kolben eingeschoben und  $D$  und  $D^1$  geschlossen sind. Die Ventilträder  $hh^1$  lassen geöffnet das Druckwasser hinter den Kolben und öffnen so die Schieber; die Gestaltung von  $h$  und  $h^1$  schließt aber gleichzeitige Bewegung beider aus, so dass auf diesem Wege von den Schiebern stets nur einer geöffnet werden kann. Bei Handbetrieb kann ein Riegel mittels Hebels  $L$  nur frei bewegt werden, wenn beide Schieber geschlossen sind; sobald einer sich zu bewegen beginnt, hemmt er die Bewegung des Riegels und macht so das gleichzeitige Öffnen des zweiten Schiebers unmöglich.

Die gefüllten Blecheimer werden durch die Winde in die Kammer gehoben. Eine Pressluftpfeife zeigt die Ankunft mittels des Hebels  $s$  an. Der untere Schieber  $D$  wird geschlossen und vorläufig mittels zweier Stangen  $T$  und Hebels  $L^1$  unter den Rand der Förderkammer gedrückt, bis aus dieser die Luft durch den Hahn  $Q$  ausgeblasen ist. Nach Oeffnung des oberen Schiebers  $D^1$  kann der Eimer dann mittels Kranes ausgehoben werden. Das Ausschleusen eines Eimers dauerte 45 Sekunden.

Die Arbeiterschleusen besaßen 2 Schleusenammern mit Raum für je 7 Mann. Die beiden Kammern legten sich als Ring von 2,134 m (7') äußerem Durchmesser um den unerweiterten Schachtkopf.

Unfall am vierten Gründungskasten des Queensferry-Pfeilers. Als der vierte Kasten des Queensferry-Pfeilers an Ort und Stelle gefloßt, mit den unteren Teilen des zeitweiligen Aufbaues und soviel Betonlast versehen war, dass der Rand 3,962 m (13') über Wasser schwamm, trat am 31. Dezember 1885 eine besonders tiefe Ebbe ein, während welcher der Kasten sich derart in den Schlick senkte, dass ihn die Flut am Neujahrstage nicht wieder hob, sondern überflutete. Da die vorgesehenen Auslasshähne nicht voll geöffnet werden konnten, so blieb bei der nächsten Ebbe der Wasserstand im Innern höher als außen; unter der Last des Wassers stellte sich der Kasten im Winkel von 25° gegen das Lot schieb, glitt außerdem etwa 4,5 m weit flusswärts, und der tiefste Punkt des Randes lag nun etwa 1,8 m unter Niedrigwasser. Man erhöhte nun zuerst den zeitweiligen Aufbau, pumpte aus und steifte im Innern nach Maßgabe der Spiegelsenkung thunlichst ab. Die Hülle wurde dabei aber doch vom Wasserdrucke verletzt, so dass dieser Weg abgeschnitten wurde. Man schritt nun dazu, in neunmonatlicher, mühevoller Arbeit den ganzen Kasten mit einem innen stark

abgesteiften Holzmantel aus 30 cm starken kalfaterten Pfählen zu umgeben, und es gelang so, den Kasten im Laufe des Jahres 1886 wieder aufzufölsen, auszubessern und in regelmässiger Weise abzusenken.

Die Ausfüllung der abgesenkten Kästen erfolgte mit Beton, welcher in dem Mischungsverhältnisse von 27 cbm Steinschlag, 7 cbm Sand und 5,5 cbm Zement auf 27 cbm Beton aus dem am Inch Garvie- und Fife-Pfeiler anstehenden Kalkfelsen gewonnen wurde, durch zwei in die Förderschächte eingesetzte und durch je eine Deckel- und Bodenklappe selbst zu Schleusen gemachte Rohre. Nachdem ein dem Wasserdrucke gewachsenes Lager geschaffen war, wurde der Rest durch die freien Schächte abgestürzt. Unter Zuhilfenahme von Nachschichten erforderte die Füllung eines Kastens eine Woche. Inzwischen wurde auch über der Decke der ganze Kasten bis 0,305 m (1') über Niedrigwasser mit Beton gefüllt, wo der Durchmesser noch 18,288 m (60') beträgt. Besondere Massnahmen zum dichten Anschlusse an die Decken, ausser dem Aufgiefisen von dünnem Zement unter Luftdruck, sind nicht getroffen.

Der Beton besitzt eine Bruchfestigkeit auf Druck von 54,7 kg/qcm und auf Zug beim Zerbrechen von Balken von 11 bis 13 kg/qcm. Die ganze Belastung eines Pfeilerfusses bei ungünstigster Windbeeinflussung ist rund 24 000 t; auf 1 qcm der Grundfläche von 21,336 m (70') Dmr. somit 6,7 kg, also mit Rücksicht auf die in Frage kommenden Fels- und Betonarten niedrig zu nennen.

Da die englischen Unternehmer an Arbeiten unter Luftdruck wenig gewöhnt sind, so übernahmen Couvreur, Hersent & Coisseau mit Arbeitern von Antwerpen den grössten Teil in Unter-Unternehmung.

B. Die Pfeileraufbauten der Zufahrtsbrücken haben eine 61 cm im Durchschnitt starke Verkleidung aus Aberdeen-Granit, mit Hintermauerung aus Arbroath-Sandstein in Zementmörtel 1 : 2, an den minder belasteten Stellen aus dem oben beschriebenen Beton erhalten. Sie sind in Figur 1 bis 5, 8 und 9 auf Tafel II mit Ausnahme der kleinen gewölbten Endöffnungen dargestellt. Sowohl die Bruchstein- wie die Betonmauerung hat in 3,658 m (12') durchschnittlicher Teilung Bandschichten aus starken Granitquadern erhalten.

Die Mittelpfeiler der Träger der Auffahrtsbrücken, Figur 8 und 9 Tafel II, sind voll und enden unter den Trägern; dagegen ist der letzte Pfeiler am Ende des äusseren Kragarmes (Figur 1 bis 5 Tafel II) eine höchst beachtenswerte Zellenanordnung aus verhältnismässig schwachen Mauerkörpern, welche in mehreren Höhenabschnitten durch kleine Gewölbekappen und Verankerungen mittels starker Walzeisen verbunden sind. Obwohl diese beiden Pfeiler daher in der Ansicht als Bauwerke bedeutender Abmessungen erscheinen, enthalten sie doch vergleichsweise wenig Mauerwerk.

Die bis auf einige nur aus Hängeplatten bestehenden Gesimse und die Abschlüsse der niedrigen Vorköpfe schmucklosen Pfeiler geben infolge der zweckmässigen Durchbildung des Anlaufes ein gefälliges Bild, und selbst die niedrigeren machen einen schlanken Eindruck.

Die Endpfeiler erhalten von dem Ende des Kragarmes, wie oben gesagt, nur Last und enthalten keine Verankerung, abgesehen von einer bei der Lageranordnung zu besprechenden schwachen, welche bestimmt ist, eine Seitenverschiebung und Verdrehung des Kragarmes um die wagerechte Längsachse zu verhindern. Der Uebergang von dem über der Fahrbahn liegenden Kragarmende zu dem unter der Fahrbahn angeordneten Träger der Zufahrtsbrücke ist durch einen gleichfalls höchst einfach gehaltenen Thorautbau mit Halbkreisöffnung vermittelt, dessen Seitenpfeiler wieder hohl sind und Leitern zum Besteigen des Kopfes enthalten. Der Platz für den Belastungskasten am Kragarmende ist durch Einlegen von vier Blechträgern unter den obersten Gesimsplatten frei gemacht. (Figur 3 Tafel II.)

Die 12 Steinfüsse der drei Hauptpfeiler sind auch bezüglich des Aufbaues in zwei Gruppen zu zerlegen. Die im flachen Wasser stehenden (Fife sowie Inch Garvie Nordost und Nordwest) sind, allerdings unter sehr grossen Schwierigkeiten, welche aus dem Anschlusse der eisernen bzw. hölzernen Fangedämme an den Felsen und aus den Rissen

in letzterem entstanden, sämtlich mit dem der Höhenlage der Unterkante entsprechenden Durchmesser — meist 18,288 m (60') — unmittelbar aus Arbroath-Sandstein mit Granitverkleidung auf den Felsen gemauert, und erhielten unmittelbar über der höchsten Stufe der abgetreppten Standfläche je einen Eisenreifen von 914 (3')  $\times$  38 mm (1½") Querschnitt. Die Aufmauerung erfolgte unter Anlage eines ausgiebigen Höhenverbandes in der Bruchsteinhintermauerung so, dass der Dmr. 0,305 m (1') über Niedrigwasser in Ord. — 1,829 (— 6') noch 16,764 m (55'), in Pfeileroberkante, 5,486 m (18') über Hochwasser in Ord. + 8,839 (+ 29') noch 14,935 m (49') beträgt. Die obere Decke der Pfeiler wird durch eine 0,533 m (1'9") starke Lage von Granitplatten und eine darunter liegende 1,981 m (6'6") starke Schicht Mauerwerk aus blauen Staffordshireklinkern in Zementmörtel 1 : 2 gebildet, um eine thunlichst feste Ebene und dichte Schicht für die Auflagerung der grossen Stahlgrundplatten der Türme zu gewinnen. Die obersten 7,315 m (24') dieses Pfeilerkopfes werden von 48 Rundstahlankern von 64 mm Dmr. in vier Reihen, welche von der Mitte 0,838 m (2'9") bzw. 2,134 m (7') beiderseits abstehen, durchdrungen (Figur 6 und 7 Tafel II). Um auch die Seitenteile der runden Pfeiler thunlichst auszunutzen, sind die vier mittelsten Anker *cc* der beiden äusseren Reihen auf 4,267 m (14') Länge von unten so nach aussen gebogen, dass die unteren Enden 3,658 m (12') von der Pfeilermitte abstehen. Der am Knickpunkte entstehende Zug nach aussen ist durch eine den Knick aufnehmende Gussplatte (Fig. 10, 12 und 13 Tafel II) und quer von Aussenreihe zu Aussenreihe laufende an diese Gussplatten gebolzte Winkelleisenpaare aufgehoben. Die Ankergrundplatten sind in Fig. 11 Tafel II dargestellt. Uebrigens dient diese Verankerung nur zur Erhöhung der Sicherheit; sie wird selbst bei der ungünstigsten Angriffsweise eines Winddruckes von 273,5 kg/qm (56 Pfd. auf 1 Quadratfuss) thatsächlich noch nirgends in Anspruch genommen.

Am oberen Rande und in Ord. + 2,438 (+ 8') sind in die Pfeiler abermals zwei Eisenringe von 457 mm (1'6")  $\times$  38 mm (1½") bzw. 457 mm (1'6")  $\times$  19 mm (¾") Querschnitt eingemauert.

Bei den tief gegründeten Pfeilerfüssen (Queensferry sowie Inch Garvie Südost und Südwest) endet der mit eisernen Pressluftkästen in einseitiger Eisenummantelung hergestellte Betonklotz von 18,288 m (60') Dmr., 0,305 m (1') über Niedrigwasser in Ord. — 1,829 (— 6'). Hier beginnt mit 16,764 m (55') unterem Dmr. und 10,668 m (35') Höhe genau derselbe gemauerte Kopf mit den beiden oberen Eisenreifen und den 48 Ankern, welcher vorstehend beschrieben ist (Figur 6 und 7 Tafel II).

Obwohl die Mauerwerksmassen in der Erscheinung der Brücke eine durchaus nebensächliche Rolle spielen, beträgt ihr gesamtter Inhalt doch etwa 92 000 cbm (120 000 cbyards). Die Beanspruchung unter den ungünstigsten Lastannahmen an den schwerstbelasteten Stellen beträgt, soweit Berechnung möglich ist, — namentlich in den Köpfen der Steinfüsse der Hauptpfeiler — 9,8 bis 13 kg/qcm (9 bis 12 Pfd. für 1 Quadratfuss), welche für die Betonkörper noch eine vierfache Sicherheit belassen würde. Da aber an den fraglichen Stellen Beton nicht verwendet ist, so kann diese Belastung mit Rücksicht auf die ausschliessliche Verwendung von Zementmörtel und die vorzüglichen Eigenschaften der Steine als niedrig bezeichnet werden.

## VI. Der stählerne Ueberbau.

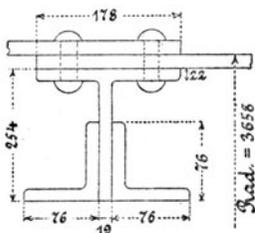
Die Gesamtanordnung des Ueberbaues ist bereits oben erläutert. Es bleiben hier die Wahl der Querschnitte, die Ausbildung der Knoten und die Anordnung und Wirkungsweise der Lager zu besprechen.

A) Die Wahl der Querschnitte ist kurz dahin zusammen zu fassen, dass für alle gedruckten Hauptteile der Pfeiler und Kragarme der Rohrquerschnitt (Figur 1 bis 4 Tafel VIII, Figur 6 Tafel III und Figur 10 Tafel I), für alle gezogenen Hauptteile sowie für die gesamtten Windverkreuzungen ein Kastenquerschnitt mit Ecken aus 4 T-Querschnitten und Wänden aus Winkelleisen-Netzwerk (Fig. 8 und 9 Tafel I) oder mit Ecken aus 4 Winkeln und Winkelnetzwerk (Figur B und C, s. unten), für alle Träger (Mittelträger, innere Fahrbahnbrücke und Anfahrtbrücke) Netzwerkträger

mit Trog- bzw. Kastengurt und Abstützung der in den Feldern liegenden Querträger nach den Kreuzpunkten des Netzwerkes zur Verwendung gelangt sind.

Der Rohrquerschnitt besteht aus gebogenen Stahlplatten, welche im Ringe herum durch Ueberlappung gestoßen sind; jede Ueberlappung trägt innen eine versteifende Rippe vom Querschnitt der Fig. A, und die Innenseite dieser Rippen trägt an jedem Längsstoß einen Winkelring (Figur 6 Tafel III). Die Längsstöße sind stumpf, in den Plattenreihen um die halbe Plattenlänge versetzt, durch doppelte Bandlaschung gedeckt und innen auch mit einem Winkelringe verstärkt, welcher mit dem grade gegenüber sitzenden inneren Versteifungsringe mittels eingelegter Bleche einen

Fig. A.



inneren versteifenden Ringträger vom  Querschnitt bildet.

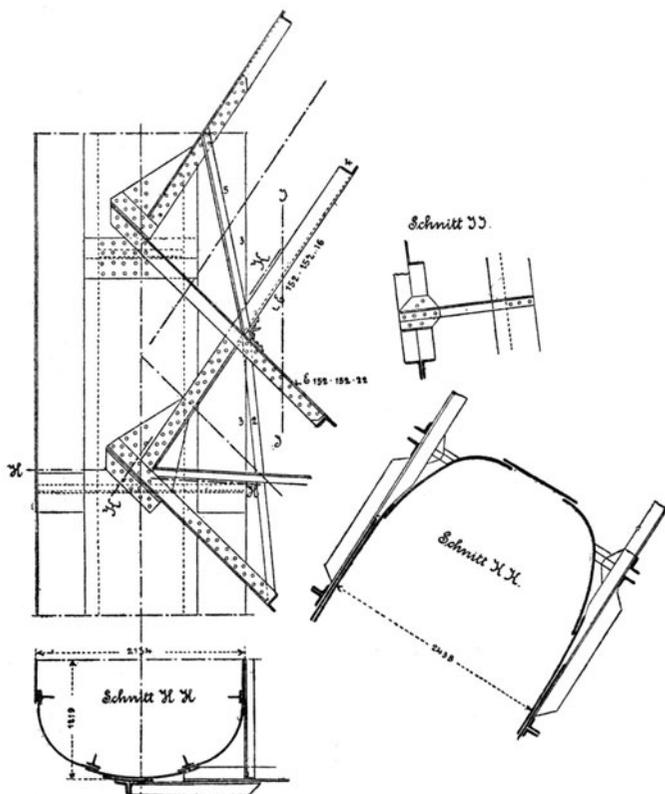
Die Eckpfosten der großen Pfeilertürme haben 3,658 m (12') Dmr. in der Ueberlappungsfläche, sind im Umfange aus 10 1,327 m (4' 4 1/4") breit gehobelten Platten von je 4,877 m Länge und dementsprechend 10 inneren Längsrippen vom Querschnitt der Fig. A zusammengesetzt; die Teilung der Ringsteifen ist danach 2,438 m (8'). Die Plattenstärke fällt von unten nach oben von 19 mm auf 13 mm; der ganze Rohrquerschnitt beträgt 3019 qcm (468 Quadrat Zoll) unten und 2374 qcm (368 Quadrat Zoll) oben.

Die unteren Verbindungsrohre der Eckpfosten, welche zugleich die Untergurte je zweier Kragarme gegen einander abstützen, sind ebenso mit 3,658 m (12') Halbmesser des Ueberlappungs cylinders, mit 10 Längsrippen und -Nähten aus 4,877 m (16') langen, im Verbande gestoßenen, hier aber 28 mm (1 1/8") starken Platten zusammengesetzt und haben 5548 qcm (860 Quadrat Zoll) Querschnitt.

Das untere Druckglied der Kragarme beginnt an der Wurzel mit vorstehend angegebenem Querschnitte der unteren Verbindungsrohre, verläuft von Knoten zu Knoten ganz gerade, erfährt somit an jedem Knoten einen plötzlichen Knick und zugleich eine Verschwächung, so dass es am Ende

Fig. B.

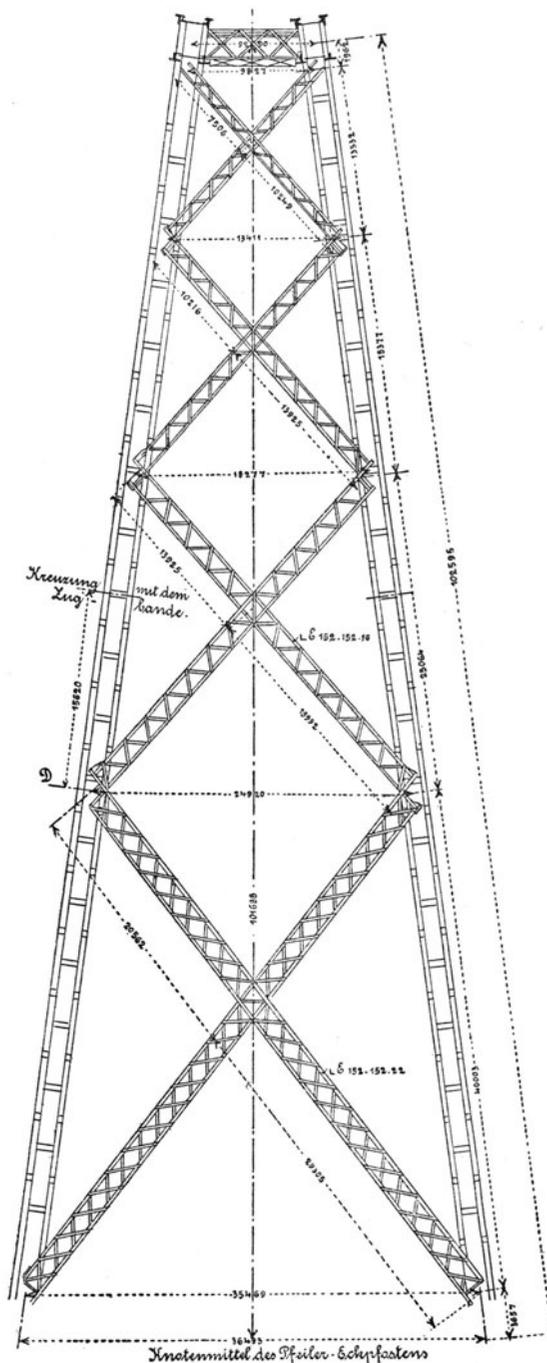
Knoten bei D Fig. A.



des Kragarmes nur noch 1,524 m (5') Dmr. in der Ueberlappungsfläche, 13 mm (1/2") starke Platten und 774 qcm (120 Quadrat Zoll) Querschnitt besitzt.

Das Steifenkreuz der Pfeilertürme sowie die Druckstreben der Kragarme haben ebenfalls Rohrquerschnitt von 2,438 m (8') Dmr. in der Ueberlappungsebene, sind jedoch vorn und hinten so abgeplattet (Figur 7 Tafel IV, Figur 10 Tafel I), dass die Breite zwischen den entstehenden Ebenen nur 2,134 m (7') beträgt. Diese Gestalt ist gewählt, um in der Ueberkreuzung mit den Zuggliedern der Kragarme, bzw. des Steifenkreuzes in den Türmen sowie auch in den Endanschlüssen bequemere Verbindungen zu erhalten. Die Plattenstärke dieser Glieder beträgt 13 mm bis 19 mm; die äußeren Abmessungen der Rohre fallen bis zur letzten Steife am Ende des Kragarmes auf 0,914 m (3') bzw. 0,762 m (2' 6"), und die Querschnittsgröße von 1277 qcm (198 Quadrat Zoll) bis auf 471 qcm (73 Quadrat Zoll). Die erste derartige Steife des Kragarmes ist in Fig. C in rechtwinklig zu ihrer Richtung der Quere der Brücke nach gemommener Ansicht dargestellt.

Fig. C.



Der obere Zuggurt besitzt zwischen den Köpfen der Pfeilereckpfosten sowie im Ansätze des schrägen Zugbandes der Kragarme an diese Köpfe den in Figur 8 Tafel I dargestellten, entsprechend der Neigung des ganzen Kragarmes nach innen geneigt liegenden Kastenquerschnitt von 3,658 m (12') Höhe und 3,048 m (10') Breite bei einem nutzbaren Querschnitte von 4258 qcm (660 Quadratzoll) in den vier aus zusammengesetzten T-Trägern gebildeten Eckleisten. Die Abmessungen nehmen bis zum Ende des Kragarmes auf 1,524 m (5') Höhe, 0,914 m (3') Breite und 503 qcm (78 Quadratzoll) Querschnitt ab.

Die Zugglieder der Kragarme haben einen ganz ähnlichen Kastenquerschnitt mit Winkelleisenkreuzen in den vier Seiten (Figur 9 Tafel I), welcher nach dem Ende des Kragarmes zu allmählich von 2,438 m (8') auf 0,914 m (3') Höhe und von 1051 qcm (163 Quadratzoll) auf 432 qcm (67 Quadratzoll) Querschnitt abnimmt. Die Breite entspricht der Breite der Druckstrecken in der Weise, dass die Stähle der vier T-Ecken die abgeplatteten Seiten der Steifenrohre gerade berühren, also mittels doppelter Laschung an Knotenbleche angeschlossen werden können, welche auf diese Abplattungen genietet sind.

Der dem Untergurte und der unteren Verbindung der Pfeilereckpfosten folgende Hauptwindverband hat gleichfalls den in Figur 9 Tafel I dargestellten Querschnitt, welcher auch in Figur 1 Tafel III erkennbar ist. Die Höhe dieser Glieder nimmt von 3,353 m (11') auf 1,067 m (3' 6") und der Querschnitt von 568 qcm (88 Quadratzoll) an den Eckpfosten auf 129 qcm (20 Quadratzoll) am Kragarmende ab.

Der aufrechte Windverband zwischen den hinter einander stehenden Eckpfosten der Pfeilertürme und den Drucksteifen der Kragarme hat gleichfalls Kastenquerschnitt, aber mit Ecken aus vier Winkeln (Fig. B und C) in den Flächengrößen von 542 qcm (84 Quadratzoll) bis 180 qcm (28 Quadratzoll). Die Breite dieser Kästen schließt sich derjenigen der Drucksteifen zwischen den runden Seiten bzw. dem Durchmesser der Eckpfosten an; die Höhe liegt zwischen 1,448 m (4' 9") und 0,762 m (2' 6").

Sämtliche Glieder der ausschließlich in doppelter Netzwerkform ausgeführten Windverbände sind in den Ueberkreuzungen fest mit einander verbunden.

Von hervorragendem Einfluss auf die Wahl dieser Querschnitte war die Rücksicht auf den Winddruck, für welchen die runden Glieder mit ihrer halben, die vergitterten Kästen mit der vollen Ansichtsfläche, jedoch für zwei hinter einander liegende Träger für jeden, besonders in Rechnung gestellt sind. Die zwischenliegenden Glieder, z. B. der aufrechte Windverband zwischen den Drucksteifen, sind in diesen Flächen mit enthalten. Dieser Berechnungsweise liegt eine lange Reihe von Versuchen zugrunde, welche bei völligem Mangel an sicheren Grundlagen für die Beurteilung des Winddruckes unter den vorliegenden und bei dem außerordentlichen Schwanken der vorhandenen Ermittlungen unter einfacheren Verhältnissen (die neueren Angaben aus Valencia und Alwick gehen bis 550 kg Druck auf 1 qm) von den Erbauern der Brücke angestellt sind. Unmittelbare Versuche mit Probestücken in Stürmen erschienen bei den fragwürdigen Ergebnissen des Windrades und der Druckbretter in Inch Garvie zu unzuverlässig; man schlug daher folgenden Weg ein, um alle Arten von Glieder auf die Größe einer geschlossenen ebenen Fläche zurückzuführen: An einem Drahte wurde ein Wagebalken aufgehängt, an dessen einem Ende ein Stück des zu untersuchenden Gliedes, an dessen anderem Ende ein der Größe nach verstellbares Druckbrett befestigt und dem Gewichte nach mit jenem genau ausgeglichen wurde. Brachte man den Wagebalken nun unter Verdrehung des Drahtes aus der Ruhelage, so konnte das Zurückschwingen in diese erst dann ohne gleichzeitiges Entstehen von Pendelschwingungen des Drahtes erfolgen, wenn durch richtiges Einstellen der Größe des Druckbrettes der Luftdruck auf die beiden Körper ganz gleich gemacht war. Versuche mit gleichen Körpern an dieser Vorrichtung, von verschiedenen Personen angestellt, ergaben höchstens 4 pCt. Abweichung, so dass das Verfahren sehr zuverlässig erscheint. Einige Ergebnisse der Versuche sind die folgenden: Wurden zwei Platten in Entfernungen

gleich der 1, 1,5, 2, 3 und 4fachen Breite hinter einander gestellt, so wuchs dadurch der Druck auf das 1, 1,25, 1,4, 1,6 und 1,8fache desjenigen gegen das einfache Brett. Zwischen-gesetzte Bretter änderten daran wenig; wurde der Abstand auf die 3,6fache Breite gebracht, so ergab sich bei Einsetzen einer Zwischenplatte wieder der 1,8fache Widerstand, und bei 3,5 Breitenabstand mussten vier Zwischenplatten eingesetzt werden, um denselben Widerstand zu erzielen. Das Ergebnis ist von Bedeutung für Anordnungen, in denen viele Wände oder Gitterwerke hinter einander liegen.

Eine wesentliche Verminderung der Pressung tritt aber ein, wenn man zwei hinter einander stehende Platten in ihren Kanten durch Ebenen zu einem Würfel verbindet; selbst wenn nur eine dieser vier Ebenen (die dichte Fahrbahn einer Blechträgerbrücke) eingesetzt wurde, ging der Druck auf das 0,9fache der einfachen Platte herunter, so dass also bei einer Blechträgerbrücke, deren Träger um die vierfache Höhe von einander abstehen, der Druck je nach der Dichtigkeit der Fahrbahndecke vom 0,9fachen bis zum 1,8fachen des auf die einfache Trägerfläche kommenden schwanken kann.

Für hinter einander stehende Gitterwerke ergab sich folgendes:

| Offene Fläche des Gitterwerkes | Entfernung der Gitterwerke von einander in Breitenabmessungen | Druckvergrößerung durch das zweite gegenüber dem einfachen Gitterwerke |
|--------------------------------|---|--|
| pCt.                           |   | pCt.   |
| 25                             | 1   | 8  |
| 25                             | 2   | 40   |
| 50                             | 1   | 30   |
| 50                             | 2   | 66   |
| 50                             | 4   | 94   |

Wenn eine kleine flache Scheibe vor oder hinter ein Gitterwerk gestellt wurde, so ergab sich bei einem Abstände von vier Breiten der Widerstand genau so groß, wie die Summe der Einzelwiderstände beider Körper.

Bei einem vollständigen Modell eines Obergurtes mit den vier Gitterwänden der beiden Gurte hinter einander zeigte sich der Einfluss der beiden mittleren Wände verschwindend klein, und das ganze Feld ergab das 1,75fache des Widerstandes der einfachen vollen Ansichtsfläche. Für diese hochliegenden Glieder ist der Winddruck somit unter Einführung der doppelten Ansichtsfläche reichlich hoch gerechnet.

Ein Feld des Untergurtes aus zwei Rohren in einem Abstände von 7 m Durchmesser mit der Windverkreuzung dazwischen lieferte dagegen den 1,1fachen Widerstand der glatten Ansichtsfläche, wozu die Windverkreuzung nur 0,05 betrug, und auch wenn die letztere aus vollen Blechträgern bestand, erhob sich der Widerstand nur auf 1,25. Immerhin ist die Berechnung bei dem Rohre mit der einfachen Ansichtsfläche etwas niedrig.

Bei einem Modelle der Träger der Anfahrtsbrücken und der inneren Fahrbahnbrücke mit dichtem Geländer und Eisenbahnzug erwies sich der Widerstand nur gleich 0,93 desjenigen der vollen Ansichtsfläche, wonach also die üblichen Berechnungsweise derartiger Anordnungen zu starke Ergebnisse liefern.

Auch ein vollständiges Modell der beiden am Inch Garvie Pfeiler hängenden Kragarme nebst Pfeiler, Quersteifen, Windverkreuzung und innerer Fahrbahnbrücke wurde im Wasser und in der Luft geprüft, um den Einfluss so vieler zusammengesetzter Teile auf einander zu erkennen. Das Ergebnis war, dass sich ein um 9 pCt. höherer Druck ergab, als der nach dem angegebenen Flächenansätze berechnete. Da aber die hochliegenden Glieder zu hoch, die niedrig liegenden zu niedrig eingeführt sind, so erregte diese geringe Abweichung kein Bedenken.

Die Gesamtspannkräfte der stärkst belasteten Glieder der verschiedenen Hauptgruppen sowie die Beanspruchungen auf 1 qcm in diesen Gruppen sind für die als die ungünstigsten gefundenen Lastzustände in der nachstehenden Zusammenstellung aufgeführt. Danach sind die früher als zulässig bezeichneten Beanspruchungen nirgends voll erreicht.

| Gliedergruppen                | Eigenlast  |               | Verkehrslast |               | Wind       |               | Insgesamt  |               |
|-------------------------------|------------|---------------|--------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|
|                               | Spannkraft | Beanspruchung | Spannkraft   | Beanspruchung | Spannkraft | Beanspruchung | Spannkraft | Beanspruchung |
|                               | t          | kg/qcm        | t            | kg/qcm        | t          | kg/qcm        | t          | kg/qcm        |
| Untergurtrohr . . . . .       | 2330       | 440           | 1060         | 190           | 2970       | 550           | 6360       | 1180          |
| Obergurt . . . . .            | 2280       | 692           | 1015         | 315           | 552        | 173           | 3897       | 1180          |
| Eckpfosten der Türme . . .    | 1575       | 518           | 716          | 236           | 1040       | 346           | 3331       | 1100          |
| Drucksteifen . . . . .        | 815        | 644           | 170          | 126           | 421        | 330           | 1406       | 1100          |
| Zugbänder . . . . .           | 765        | 724           | 190          | 188           | 197        | 188           | 1152       | 1100          |
| Windverband im Untergurte .   | 81         | 142           | 5            | 16            | 269        | 472           | 355        | 630           |
| Aufrechter Windverband . . .  | 43         | 80            | 172          | 316           | 110        | 204           | 325        | 600           |
| Mittelträger, Obergurt . . .  | 343        | 377           | 308          | 346           | 185        | 221           | 836        | 945           |
| Mittelträger, Untergurt . . . | 335        | 362           | 306          | 330           | 251        | 283           | 892        | 975           |

Die Einzelgewichte des Ueberbaues, abgesehen von den Geleisen, sind:

Mittelträger 710 t; 3,66 t für 1 m.

Kragarm 5180 t; 3,66 t bis 43,3 t für 1 m.

Nord- und Südturm je 3050 t; 64,6 t für 1 m.

Inch Garvie-Turm 4060 t; 49,3 t für 1 m.

Gewicht der Hauptbrücke  $2 \cdot 710 + 6 \cdot 5180 + 2 \cdot 3050 + 4060 = 42\ 660$  t; bei der Gesamtlänge von 1630,5 m (Oeffnungen No. 13 bis 19 S. 916) ist also das Durchschnittsgewicht der Hauptbrücke  $\frac{42\ 660}{1630,5} = 26,16$  t für 1 m.

Gewicht einer Oeffnung der Auffahrtsbrücke 234,5 t; 4,58 t für 1 m.

Gesamtes Stahlgewicht einschliesslich der 15 Anfahrtsöffnungen  $42\ 660 + 15 \cdot 234,5 =$  rund 46180 t.

#### B) Die Ausbildung der Knoten.

Die Knotenlösungen ergaben da keine besonderen Schwierigkeiten, wo Glieder vom Kastenquerschnitt und Gitterwerk mit einander zu verbinden waren. Dagegen führte der für die gedrückten Hauptglieder gewählte Rohrquerschnitt zu teilweise äusserst verwickelten Lösungen, welche nur durch wiederholte Herstellung grosser Modelle endgültig festzustellen waren.

Um die Rohrglieder wirksam anschliessen zu können, sind sie an den Enden in rechteckigen oder quadratischen Kastenquerschnitt in der durch Figur 5 Tafel III und Figur 1 Tafel IV verdeutlichten Weise übergeführt. Kurz vor der Stelle, wo der rechte Winkel vorhanden sein soll, wird eine doppelt verlaschte Längsnaht eingelegt, wenn an der Stelle nicht schon eine Naht liegt. Die beiden in der Naht zusammenstossenden Platten werden nun allmählich breiter und der Breitenzunahme entsprechend in doppelt gekrümmter Fläche nach aussen gebogen, so dass sie einen von  $180^\circ$  bis  $90^\circ$  abfallenden Winkel mit einander bilden. Die an einem Ende dem Kreise angepassten Laschen erhalten die Gestalt einer immer schärfer werdenden Rinne, bis am anderen Ende der rechte Winkel erreicht ist. Zugleich erhält der Querschnitt eine Verstärkung dadurch, dass die Lücken der äusseren Lage der mit Ueberlappung gestossenen Rohrplatten durch eingelegte Platten ganz ausgefüllt werden. Die inneren Längsrippen und Aussteifungsringe werden in der Uebergangsstelle durchgeführt, wie in Figur 2 Tafel III und Figur 1 Tafel IV für den Fuss und Kopf einer Schrägsteife dargestellt ist.

In der Durchkreuzung zweier Rohre, welche nur in dem Strebenkreuz der drei Türme vorkommt (Figur 4 Tafel I), sind die abgeplatteten Seiten der Steifenrohre benutzt, um grosse Knotenplatten aufzulegen, zwischen welche die vier vorher in das Rechteck überführten Rohrenden eingefügt sind.

Auch die Ueberkreuzungen der Zugglieder mit den Drucksteifen sind vergleichsweise einfach gelöst, indem auch hier die platten Seiten der Steifenrohre Knotenbleche aufnehmen, an welche die Enden des aufgelösten Zuggliedes sowie die oberen Enden des in der Ansicht lotrechten Hängeliedes anschliessen, welches als Teil des Joches für die innere Fahrbahnbrücke nach dem Untergurtrohre läuft.

Noch weniger Schwierigkeiten bieten die Durchkreuzungen der aufgelösten Windglieder, deren Einzelteile mittels Knotenbleche und Winkeleisen so aneinander geschlossen sind, dass das Gitterwerk der Wände wenig gestört durchgeführt werden kann. (Figur 5 Tafel I und Textfigur C.)

Die Verbindung der Windglieder mit den Steifenrohren ist in den Textfiguren B und C dargestellt. Es sind hier eben vorragende Knotenlappen auf die Rundung der Rohre genietet, an welche die vier Ecken der Kastenglieder nebst den ersten Gitterstäben anschliessen.

Der schwierigste von allen Knoten ist die Verbindung der Glieder am Fusse der Pfeilereckpfosten, welche in Figur 1 bis 4 Tafel III dargestellt ist. Hier sind zu vereinigen:

1. das untere wagerechte Steifenrohr des Pfeilers 3,658 m (12') Dmr.;
2. der Pfeilereckpfosten, Rohr von 3,658 m (12') Dmr. nach innen geneigt;
3. das Untergurtrohr 3,658 m (12') Dmr., ansteigend und nach innen geneigt;
4. die wagerechte Steife nach dem hinterliegenden Pfeilerfusse, Kastenquerschnitt mit vier  Ecken;
5. das wagerechte Schrägband nach der diagonal gegenüberliegenden Ecke des Pfeilers, Kastenquerschnitt wie No. 4;
6. die schräge Drucksteife des Pfeilerkreuzes, abgeplattetes Rohr von 2,438 m (8')  $\times$  2,134 m (7');
7. die erste Schrägsteife des Kragarmes, Rohr wie No. 6;
8. das erste Glied der aufrechten Windverkreuzung zwischen den Pfeilereckpfosten, Kastenquerschnitt mit vier  Ecken;
9. das erste Glied der liegenden Windverkreuzung zwischen den Untergurtrohren, Kastenquerschnitt mit vier  Ecken;
10. das erste Glied der aufrechten Windverkreuzung zwischen den ersten Drucksteifen der Kragarme, Kastenquerschnitt mit vier  Ecken (Textfig. B u. C).

Der Grundgedanke der Lösung der Zusammenführung dieser 10 Glieder in einen Punkt ist der folgende. Zunächst ist das Untergurtrohr 3 mit dem wagerechten Steifenrohre des Pfeilers in unmittelbare Verbindung gebracht, indem es in wagerechter Rich-

tung abgelenkt die unmittelbare Fortsetzung von diesem bildet. Der Knick ist aber von der theoretischen Knotenmitte nicht unbeträchtlich nach außen — nach dem Kragarme zu — verschoben (Figur 2 Tafel III), um in voller Länge der Knotenentwicklung ein wagerechtes Auflager des unteren Rohres auf dem Steinfuße zu erhalten. Folge dieser nicht genauen Zusammenführung der Schwerlinien der Hauptglieder ist eine schiefe Belastung des Steinfußes unter allen Umständen; auch ist die Verschiebung des Knickes beträchtlich genug, um dem Auge in der Brückenansicht unangenehm aufzufallen. In ihr ist zugleich auch der Grund zu suchen, welcher zu der Längsverschiebung der Mitten der Steinfüße gegen die der Eckpfosten um 1,524 m (5') nach außen (Figur 4 Tafel I) geführt hat; diese Mängel wären vielleicht nicht unvermeidlich gewesen.

In der Auflagerstrecke ist von dem Rohrquerschnitte nur das obere äußere Viertel beibehalten (Fig. 3 und 4 Tafel III); die drei übrigen sind vor der Auflagerstrecke in der oben beschriebenen Weise (Figur 5 Tafel III) in den rechten Winkel übergeführt. Die ebene Unterfläche dieses Lagerkörpers ist durch Unternieten einer die ganze Fläche und einer den größten Teil der Fläche bedeckenden Platte (Fig. 2 u. 4 Tafel III) zur Lagerfläche gemacht, welche, abgesehen von den darauf stehenden Blechwänden der verschiedenen Rohre,

durch 8 **I**-Längsträger mit 11 Querwänden, aus gepressten Blechen, nach Art der Kesselböden mit vier umgebogenen Rändern die erforderliche Steifigkeit erhält. Auf dieser sehr steifen Bodenplatte erheben sich innen und außen mitten zwischen den beiden äußersten Längsträgern, selbst deren zwei ersetzend, die beiden Seitenwände des in einen Kasten verwandelten Rohres, deren äußere oben an die verbliebene Rundung anschließt, deren innere unten lotrecht steht, nach oben hin aber in zwei Knicken in die Neigung des Eckpfostens übergeht.

Zwischen dem zweiten und dritten Längsträger von jeder Seite, wieder je einen solchen ersetzend, erheben sich abermals zwei lotrechte Blechwände, welche gegen die äußeren und gegen einander durch 14 volle, durch **I**- und **T**-Stäbe versteifte Querblechwände abgesteift sind. Diese beiden Bleche sind im oberen Teile wieder so abgelenkt, dass sie in die Richtung der Schrägsteife des Pfeilers 6 und des Kragarmes 7 kommen und zugleich einen solchen Abstand erhalten, dass die Seitenwände der rechteckigen Kästen, in welche diese beiden Drucksteifen unten übergeführt sind, grade dazwischen hineinpassen und auf diese Weise angeschlossen werden (Fig. 1 Tafel III). Zwischen diesen vier Blechwänden ist die obere Decke des wagerechten Rohres größtenteils krumm, nur in der äußersten Abtheilung nach der Brückenmitte zu wagerecht und gerade nach Figur 4 Tafel III durchgeführt. Die 14 Querblechwände reichen bis unter diese Decke.

Von den vier Wänden des unten in das Quadrat überführten Eckpfostens 2 berührt die äußere den rund gebliebenen Teil des unteren Rohres (Figur 1 u. 4 Tafel III), ist aber über die Berührungslinie hinaus geradlinig verlängert, so dass sie schließlich auf die Wand des äußersten Längsträgers der Grundplatte stößt und den Rand der letzteren absteift. Die innere Wand bildet einen Teil der inneren Seitenwand des unteren Rohres, und die beiden Seitenwände des Eckpfostens quer zur Brücke treffen gerade auf zwei der inneren Querwände des unteren Kastens, so dass also der ganze Druck sowohl des Eckpfostens wie der beiden Schrägsteifen des Pfeilers und des Kragarmes mittels der 5 in Figur 4 Tafel III sichtbaren Längswände und zweier der 14 Querwände unmittelbar an die Grundplatte abgegeben wird, ohne dass dadurch der Spannungsausgleich zwischen dem Untergurte des Kragarmes und dem unteren wagerechten Rohre des Pfeilers gestört oder mittelbar gemacht würde. Durch drei oberhalb der Rohrdecke in den Fußkasten von 2 eingesetzte Doppelfußbänder (Figur 4 Tafel III) werden auch die drei darunter befindlichen Querwände des Lagerkastens zur Druckübertragung herangezogen.

Die wagerechte Kastenquersteife 4, das wagerechte Schrägband 5 und das erste Glied der Windverkreuzung des Untergurtes 9 schliessen nach Ausweis der Figur 1 Tafel III alle drei in gleicher Höhe wegen ihrer Breite so an den Lagerkasten seitlich an, dass die Schwerlinien nicht völlig genau

in das Knotenmittel treffen, und zwar mit den beiden oberen und unteren Ecken zwischen zwei weit nach innen vorspringende Blechplatten, deren untere eine Erbreiterung der doppelten Bodenplatte, deren obere eine Fortsetzung der Rohrdecke durch die innere Seitenwand des Kastens hindurch bildet (Figur 4 Tafel III).

Das erste Glied 8 der aufrechten Windverkreuzung zwischen den Eckpfosten 2 schließt wieder in gleicher Höhe mit 4, 5 und 9 zwischen lotrechten Blechen an, welche in der Verlängerung der Seitenwände des Fußkastens des Eckpfostens zwischen die vorerwähnten wagerecht nach innen vorragenden Knotenplatten eingesetzt sind. Das Glied erhält dadurch eine dem Durchmesser der Eckpfosten grade entsprechende Breite, so dass der Anschluss an das runde Rohr am anderen Ende mittels die Rundung berührender Anschlussplatten (Fig. 5 Tafel I) erfolgen kann. Zugleich ist das Zusammentreffen mit der wagerechten Quersteife 4 dadurch vermieden, dass diese schmal genug gemacht ist, um zwischen die Teile von 8 hineintreten zu können (Figur 1 Tafel III).

Schließlich ist das erste Glied 10 der aufrechten Windverkreuzung zwischen den ersten Drucksteifen der Kragarme 7 in der bereits oben beschriebenen, in Fig. C dargestellten Weise an die Rundung dieser Steife soweit vom Knoten angeschlossen, dass die Anschlussteile mit keinem der sonstigen Knotenteile in Berührung kommen.

Die ganze Zusammenfügung, namentlich der Hauptteile, ist eine äußerst innige und trotz der außerordentlich schwierigen Verhältnisse einfach und klar, und es muss anerkannt werden, dass die Ingenieure der Brücke bei der Ausarbeitung dieses Knotens einen hohen Grad von Scharfsinn bewiesen haben.

Es ist noch hervorzuheben, dass die sämtlichen Teile sowie die Querwände mit Mannlöchern versehen sind, um nieten und die Innenräume unter Aufsicht und in Anstrich erhalten zu können; in stark beanspruchten Teilen sind diese Mannlöcher durch aufgenietete Verstärkungsbleche versteift (Figur 1 Tafel III).

Im Gegensatz zu diesem Fußknoten ist der in Fig. 1 bis 7 Tafel IV dargestellte Kopfknoten der Eckpfosten vergleichsweise einfach zu nennen. In den Kopf des Eckpfostens sind nach der Längenrichtung der Brücke aufrechtstehende Knotenbleche eingesetzt und mit den teilweise rund belassenen, teilweise in Ebenen übergeführten Rohrwänden vernietet, deren Abstand dem Wandabstande des oberen Zuggliedes des Pfeilers, des Zuggurtes des Kragarmes bzw. der Breite der zu Kastenquerschnitt umgeformten Steife des Pfeilers und des ersten Zuggliedes des Kragarmes entspricht. Die Schrägsteife des Pfeilers wird zwischen die Knotenbleche eingesetzt, und die vier Ecken der drei Glieder mit Kastenquerschnitt sind angelascht. Der Anschluss der oberen Pfeilerquersteife und des letzten Gliedes der Windverkreuzung der Eckpfosten, welche in Figur 1 bis 7 Tafel IV, weggelassen sind, erfolgt hier zwischen seitlich angesetzten wagerechten und lotrechten Knotenplatten ganz ähnlich, wie es beim Fußknoten besprochen wurde.

Dieser Knoten vereinigt nur 7 Glieder, darunter 2 Rohre, während im Fußknoten 10 Glieder, darunter 5 Rohre, zusammentrafen.

Der Zwischenknoten des Untergurtes eines Kragarmes ist in den wesentlichsten Teilen in Fig. 8 und 11 Tafel IV dargestellt. An der Knickstelle durchsetzen zwei lotrechte Bleche das Rohr, mit dessen Wandung sie fest verbunden sind. Der Abstand dieser Bleche entspricht sowohl der Breite des von oben herkommend hier endigenden Zuggliedes von offenem Kastenquerschnitt, wie auch der Breite des wieder rechteckig gestalteten unteren Fußes der von hier aus nach außen ansteigenden Drucksteife. Außerdem schliessen zwei Glieder der liegenden Windverkreuzung des Untergurtes zwischen am Rohre befestigten seitlich vorspringenden Blechen wie im Fußknoten des Eckpfostens an, während das erste Glied der Windverkreuzung der im Knoten beginnenden Schrägsteife soweit außerhalb des Knotens an das Steifenrohr angeschlossen ist, dass es mit den übrigen Teilen überhaupt nicht in Berührung kommt.

Die Hängeglieder, welche von den Kreuzpunkten der Wandglieder nach dem Untergurtrohre laufen, sind mit diesem durch Winkeleisen verbunden, welche um die Rundung des Rohres gebogen sind (Figur 14 Tafel IV).

### C) Die Auflager.

Eine äußerst wichtige Frage bildet bei den ungeheueren Abmessungen die Beweglichkeit der Auflager. Es bestand anfangs die Absicht, die Lager auf den Steinfüßen der drei Türme vollkommen fest zu machen, dabei dem unteren wagerechten Steifenrohre so viel Anfangsspannung zu geben, dass dadurch der Schub des Kragarmuntergurtes aus dem Eigengewicht ausgeglichen und jeder Steinfuß nur durch die der Verkehrslast und dem Winde entsprechende Kraft schief beansprucht wurde. Dabei sollte der ganze untere Pfeilerrahmen in Kieselguhr gepackt und mit Beton ausgekleidet werden, um die Bewegungen in Folge von Wärmeänderungen klein zu halten. Was diese Wärmeschwankungen anlangt, so sind die äußersten Thermometerstände in der Regel  $-3,9^{\circ}$  und  $+21,1^{\circ}$  C.; für den zu erwartenden höchsten Wechsel sind jedoch  $39,3^{\circ}$  C. angenommen.

Der angedeutete Plan wurde aufgegeben, weil man fürchtete, die riesigen Glieder behufs Erteilung von Anfangsspannungen nicht genügend in der Gewalt zu haben und so nicht zu beurteilende Unklarheiten in die Beanspruchung der Pfeilerfüße zu bringen.

In der That sind von den 16 Lagern auf den Steinpfeilern nur drei fest gemacht, und auch diese sind um eine lotrechte Achse drehbar. Die Art der Bewegung ist in allgemeiner Uebersicht in Figur 11 Tafel I und genauer mit Angabe der Maße für den Fife- und den Inch Garvie-Pfeiler in Figur 10 Tafel V dargestellt.

Die drei festen Lager sind Queensferry N.-O., Inch Garvie N.-O., Fife S.-O.; die Lager der Mittelträger sind auf den Kragarmenden des Inch Garvie-Pfeilers verschieblich und verdrehbar, an den inneren Kragarmen der Queensferry- und Fife-Pfeiler nur verdrehbar befestigt. Die Längsverschiebungen in den Lagern verteilen sich hiernach für  $39,3^{\circ}$  C. Wärmeänderung wie folgt:

Auf den beiden Endpfeilern der Anfahrtsbrücken für die Länge der äußeren Kragarme und die Breite des Queensferry- bzw. Fife-Pfeilers (210,232 + 44,195 m) 127 mm (5"),

in der Auflagerung des südlichen Mittelträgers auf den südlichen Kragarm des Inch Garvie-Pfeilers für den Nordarm am Queensferry-Pfeiler und den Mittelträger (207,260 + 106,678 m)  $102 + 50 = 152$  mm ( $4'' + 2'' = 6''$ ) und für den südlichen Kragarm und die Breite des Inch Garvie-Pfeilers (207,260 + 79,247 m) 140 mm ( $5\frac{1}{2}''$ ), zusammen also 292 mm ( $11\frac{1}{2}''$ );

in der Auflagerung des nördlichen Mittelträgers auf das Ende des nördlichen Kragarmes am Inch Garvie-Pfeiler für diesen Kragarm (207,260 m) 102 mm ( $4''$ ) und für den Mittelträger sowie den südlichen Kragarm des Fife-Pfeilers wie oben  $50 + 102 = 152$  mm ( $2'' + 4'' = 6''$ ), zusammen also 254 mm ( $10''$ ).

Die Summe der Längsverschiebungen ist also 800 mm ( $27\frac{1}{2}''$ ).

Eine zweite Gruppe von Verschiebungen ergab sich aus der Drehung der Pfeilertürme um ihre lotrechte Achse unter der Wirkung des an sich ganz ungleichmäßig verteilten Winddruckes sowie des einseitig wirkenden Druckes gegen den Mittelträger. Um diese Verdrehungen zu begrenzen, sind die äußeren Kragarme auf den Endpfeilern der Anfahrtsbrücken seitlich unverschieblich gelagert, und aus dem somit hier aufzunehmenden sehr beträchtlichen wagerechten Seitendruck erklärt sich die den übrigen Steinpfeilern gegenüber beträchtliche Längsentwicklung des Grundrisses dieser Pfeiler. Die inneren Kragarme der Queensferry- und Fife-Pfeiler können sich somit um die Lager Queensferry N.-O. und Fife S.-O. nur soweit verdrehen, wie es der elastischen Verbiegung der beiden Türme mit ihren Kragarmen unter einseitiger Windlast entspricht. Dabei sind die landwärts liegenden Lager dieser beiden Pfeiler, also Queensferry S.-O. und S.-W. sowie Fife N.-O. und N.-W., auch der Breite nach verschieblich gemacht, damit sie nicht etwa den dem Endpfeiler der Zufahrtsbrücke zugewiesenen Widerstand beim Angriffe verdre-

hender Kräfte am inneren Kragarme gegen Drehen übernehmen. Dieser Widerstand würde bei dem geringen Hebel, welchen die Pfeilerbreite gegenüber dem Angriffshebel am Kragarme bietet, sehr groß werden, also die Steinfüße seitlich stark auf Kippen beanspruchen. Anders liegt die Sache am Inch Garvie-Pfeiler, weil hier die Möglichkeit der seitlichen Festlegung eines Kragarmendes fehlt. Hätte man auch hier die Lager der Breite nach beweglich gemacht, so ergäbe sich daraus die Möglichkeit einer bleibenden Schiefstellung des Pfeilers um die lotrechte Achse nach schiefen Windangriffen. Man konnte auch nicht von zwei hinter einander liegenden Lagern je eines der Breite nach fest, das andere beweglich machen; denn dann hätte ein Steinfuß allein den ganzen zur Aufhebung des wagerechten Drehmomentes aus schiefem Windangriff erforderlichen Widerstand leisten müssen, und es wäre eine höchst ungleichmäßige Kraftverteilung auf die Steinfüße entstanden. Es erschien daher richtiger, hier alle Lager der Breite nach unverschieblich zu machen, obwohl in Folge davon die Wärmespannungen der Quersteifen zwischen den Pfeilerfüßen nun voll auf die Steinpfeiler wirken. Bei der geringen Länge, der geschützten Lage und dem vergleichsweise geringen Querschnitte dieser Quersteifen sind die entstehenden wagerechten Schübe aber klein genug, um diese Anordnung als die bessere erscheinen zu lassen.

Selbstverständlich sind die drei nicht festen Lager jeder Pfeilergruppe so anzuordnen, dass die Längsverschiebungen in Folge von Wärmeänderungen innerhalb der Pfeilertürme zum Austrage kommen können.

Schließlich führen die Pfeilereckpfosten bei der seitlichen Verbiegung der Kragarme nicht unbeträchtliche Verdrehungen um ihre lotrechte Achse aus, und deshalb müssen selbst die festen Lager auf den Pfeilersteinfüßen verdrehbar sein.

Besonders wichtig für die Anordnung der Lager und die Ermittlung der Spankräfte in den Pfeilerteilen und Steinfüßen ist die richtige Beurteilung der Größe der Reibungskräfte. Wie unten beschrieben wird, ruhen in den Lagern ausgedehnte Stahlflächen auf einander, zwischen welche ein Schmiermittel, bestehend aus dickflüssigem Rohpetroleum mit ganz feinen Gusseisenfeilspänen in etwa 3 mm ( $\frac{1}{8}''$ ) dicker Lage eingebracht ist. Das Petroleum soll das Rosten der Teile verhindern und als Schmiermittel wirken, während von den mehr oder weniger kugelförmigen Gusseisenfeilspänen eine rollenartige Wirkung erwartet wird. Nach Morin beträgt die Reibungsziffer für geschmierte Eisenflächen unter etwa 30,0 kg/qcm Druck 0,09 bis 0,115, wächst aber nach Beseitigung der Schmiere auf 0,16 bis 0,19. Bei Beginn des Stapellaufes des Great-Eastern betrug in Uebereinstimmung mit vorhergehenden Versuchen die Reibungsziffer der Ruhe für Eisen auf Eisen 0,125 die der Bewegung 0,067. Nach Galton's Bremsversuchen fällt die von der Geschwindigkeit abhängige Reibungsziffer für Radreifen auf Schienen unter Umständen bis 0,05, während die Reibung der Triebräder auf trockenen Schienen 0,2 bis 0,25, auf feuchten Schienen 0,15 bis 0,2, bei sehr ungünstigen Verhältnissen 0,1 beträgt. Hiernach sind die Berechnungen aller Teile einmal mit der Wertziffer 0,1 und einmal mit 0,25 durchgeführt.

Die entwerfenden Ingenieure schreiben den gewählten freien Reibungslagern die folgenden Vorteile zu. Zunächst wird durch sie für die Entstehung von Wärmespannungen in den Gliedern und von entsprechenden Kippmomenten für die Steinfüße eine ziemlich sichere obere Grenze festgelegt, so dass die Lager in dieser Beziehung nach Art einer Sicherheits-Reibungskupplung wirken. Sodann werden durch heftige Windstöße entstehende Bewegungen in einer Weise gehemmt, welche man mit dem Bremsen eines Zuges im Gegensatze zum Auflaufen auf einen Prellbock vergleichen könnte. Schliesslich ist es möglich, etwa wünschenswerte Verschiebungen herzustellen, da man die Reibung durch Entlastung nach Belieben aufheben, also die von den Spannungen angestrebten Bewegungen zur That werden lassen kann. Während des Baues braucht man zu diesem Zwecke nur den von den zu entlastenden Lagern abgewendeten Kragarm weiter vorzutreiben als den anschließenden, und später kann man bezüglich der überhaupt der Länge nach verschieblichen Lager das gleiche durch Aufbringen künstlicher Lasten erreichen.

## Anordnung der Lager auf den 12 Steinfüßen.

Auf die Granitdecke des Steinfußes sind zunächst Stahlplatten in Zement gelegt, deren Grundform wegen des Knickes des Kragarmuntergurtes gegen das untere Pfeilerrohr eine gekrümmte ist (Figur 7 Tafel II); ihre mittlere Länge beträgt 11,278 m (37'), die Breite durchweg 5,385 m (17' 8"). Diese Platten bestehen (Figur 7 und 8 Tafel V) aus 5 der Reihe nach von unten nach oben 19 mm ( $\frac{3}{4}$ "), 31 mm ( $1\frac{1}{4}$ "), 25 mm (1"), 25 mm (1") und 13 mm ( $\frac{1}{2}$ ") starken Lagen, welche durch Vernietung mittels versenkter Niete verbunden und in fertigem Zustande auf den Pfeilern mittels besonderer Maschine abgeschmirgelt sind. Die Plattenfugen laufen in der untersten und dritten Lage der Länge, in der zweiten und vierten Lage der Quere nach, um thunlichst gleichartiges Gefüge der vier — zusammen 102 mm (4") starken — Platten zu erhalten; die fünfte Platte hat, wie gleich erläutert wird, keine Fugen. Von den vier Lagen erstrecken sich nur die beiden unteren über die volle Ausdehnung der angegebenen Flächen; in den beiden oberen oder allein in der obersten sind große Ausschnitte angebracht, deren Mitte genau unter dem theoretischen Knotenmittel liegt, und welche die in Figur 11 Tafel I, genauer in Figur 10 Tafel V dargestellten Formen: Kreis von 3,658 m (12') Dmr. (Queensferry N.-O., Inch Garvie N.-O., Fife S.-O.), Kreis mit rechteckigen Ansätzen (Queensferry N.-W., Inch Garvie S.-W., S.-O. und N.-W., Fife S.-W.), oder Rechteck (Queensferry S.-O. und S.-W., Fife N.-O. und N.-W.), besitzen; in Figur 10 Tafel V gehören die ausgezogenen Linien der unteren Grundplatte, die — — — Linien der gleich zu besprechenden Deckplatte, die — · — · — Linien beiden gemeinsam an. Von diesen Ausschnitten erstrecken sich nur die vier rechteckigen in Queensferry S.-O. und S.-W. sowie Fife N.-O. und N.-W. durch die oberste, alle anderen auch durch die zweite Platte. Die einfache Kreisform entspricht einem festen, nur verdrehbaren Lager, der Kreis mit rechteckigen Ansätzen einem verdrehbaren Lager mit Längsverschiebung, das Rechteck einem verdrehbaren und nach allen Seiten verschieblichen Lager.

Die fünfte Lage der Grundplatte besteht bloß aus einem schmalen, 13 mm ( $\frac{1}{2}$ ") starken aufgenieteten Blechrande, welcher die Aufgabe hat, das Schmiermittel, welches in den durch ihn gebildeten flachen Kasten gegossen wird, am seitlichen Abfließen zu verhindern. Diese fünfte Lage gehört also nicht zur tragenden Grundplatte.

Auf der geschilderten Grundplatte liegt nun die unter dem Lagerkasten am Fuße des Eckpfostens befestigte Deckplatte. Diese besteht zu oberst aus einer 19 mm ( $\frac{3}{4}$ ") starken Platte (Figur 2 und 4 Tafel III und Figur 7 und 8 Tafel V), welche unter die versteifenden Längsträger und die gepressten Querbleche des Kastens genietet nach innen vorspringt, um so ein unteres Knotenblech für den Anschluss des Querverbandes zu bilden (Figur 4 Tafel III); dieses Blech streicht gerade über den erhöhten Rand der Grundplatte hin. Weiter folgt ein Blech, dessen Dicke mit 13 mm ( $\frac{1}{2}$ ") der Dicke dieses Randes gerade entspricht, und welches mit 10,668 m (35') mittlerer Länge und 4,877 m (16') Breite den Innenraum des vom Rande gebildeten flachen Kastens, abgesehen von den für die Beweglichkeit erforderlichen Spielräumen, gerade ausfüllt. Die Mafse dieser Platte geben zugleich die Größe der eigentlichen Tragfläche des Lagers an, welche somit 52 qm (560 Quadratfuß) beträgt. In diesen Blechen fehlen grade unter der Knotenmitte Teile, welche für die festen Lager (Queensferry N.-O., Inch Garvie N.-O. und Fife S.-O.) kreisförmige Fläche von 3,658 m Dmr. (12'), für die Grundplatten mit rechteckigen Aussparungen (Queensferry S.-O. und S.-W., Fife N.-O. und N.-W.) rechteckige Fläche von 2,438 m (8')  $\times$  3,658 m (12'), für alle übrigen von 0,610 m (2')  $\times$  4,267 m (14') haben. In diese Vertiefungen des zweiten Bleches der Deckplatte sind nun plattenförmige Dollen von genau gleicher Größe eingesetzt (Figur 11 Tafel I, Figur 10 Tafel V, Figur 2 und 4 Tafel III) und festgenietet, welche in sich aus mehreren Platten zusammengesetzt für Queensferry S.-O. und S.-W. und Fife N.-O. und N.-W. 38 mm ( $1\frac{1}{2}$ "), für alle übrigen 64 mm ( $2\frac{1}{2}$ ") stark gemacht sind, in Queensferry S.-O. und S.-W. und Fife N.-O. und N.-W., somit nur durch das oberste, sonst überall durch die beiden obersten Bleche der

Grundplatte greifen. Die Aussparungen in den obersten bzw. den beiden obersten Blechen der Grundplatte umgreifen diese Dollenvorsprünge der Deckplatte (25 mm (1") bzw. 51 mm (2")) nach der Darstellung in Figur 10 Tafel V derart, dass an den Rändern die dort eingeschriebenen Spielräume für die Verschieblichkeit frei bleiben. So würde jedoch die oben als unzulässig bezeichnete endgiltige Schiefstellung des Inch Garvie-Pfeilers durch Drehung um Inch Garvie N.-O. ermöglicht sein; daher sind in Inch Garvie S.-O., S.-W. und N.-W., sowie auch in Queensferry N.-W. und Fife S.-W. die Vertiefungen in den beiden oberen Blechen der Grundplatte über das langgestreckte Dollenrechteck hinaus nach dem Kreise von 3,658 m (12') erweitert, und in die beiden so neben dem Dollen entstehenden, nach Kreisabschnitten gestalteten Lücken sind genau an die Wandungen und den Dollen anschließende Füllplatten von 51 mm (2") Dicke lose — d. h. weder mit der Grundplatte noch mit der Deckplatte verbunden — eingelegt. So liegen Grund- und Deckplatte, abgesehen von den kleinen Spielräumen um die Dollen der Deckplatte, in der ganzen Ausdehnung der letzteren druckübertragend mit Schmiermittel satt, jedoch so aufeinander, dass alle Füße sich um die lotrechte Mittellinie verdrehen; die neun Füße: Queensferry S.-O., S.-W. und N.-W., Inch Garvie S.-O., S.-W. und N.-W. und Fife S.-W., N.-O. und N.-W. der Länge nach, die vier Füße: Queensferry S.-O., S.-W. und Fife N.-O. und N.-W. auch der Breite nach sich verschieben können. Dazu ist noch zu bemerken, dass die Verschiebungsspielräume im Queensferry-Pfeiler so angeordnet sind, wie in Figur 10 Tafel V für den Fife-Pfeiler dargestellt.

Durch diese Anordnung ist offenbar den oben allgemein entwickelten Grundbedingungen für die Auflagerung der drei Pfeilertürme in vollstem Mafse genügt.

Zu diesen Lagerteilen tritt nun die Verankerung der 12 Füße in die Steinpfeiler, welche der allgemeinen Anordnung nach (Figur 6, 7, 10, 11, 12 und 13 Tafel II) bereits oben besprochen, und von welcher namentlich hervorgehoben wurde, dass ihre Beanspruchung unter den nach menschlichem Ermessen denkbar ungünstigsten Verhältnissen noch mit doppelter Sicherheit vermieden ist. Die Anker sind daher so eingerichtet, dass sie, trotzdem ihre Wirkung bei dem geringsten Bestreben des Fußes, aufzukippen, zur That wird, doch die Reibung der Deckplatte auf der Grundplatte nicht durch Anfangsspannung erhöhen und auch sonst die Verschieblichkeit nicht beeinträchtigen. Die Anker sind nach Fig. 7 und 8 Tafel V unter der Grundplatte durch einen in die Quader eingelassenen Bleiring mit etwas Spielraum umgeben, um die Auflagerung der Grundplattenränder ganz sicher zu machen. Gemäß Figur 7, 8 und 10 Tafel V sind die Löcher für die 64 mm ( $2\frac{1}{2}$ ") starken Anker in der Grundplatte thunlichst genau passend gemacht, in der Deckplatte der vorgesehenen Beweglichkeit angepasst und daher mit den verschiedensten Mafsen und Gestalten ausgestattet. An den festen Lagern, z. B. Inch Garvie N.-O. und Fife S.-O., findet sich Kreisform von 178 mm (7") Dmr., in Inch Garvie, wo nur Längsbewegung vorgesehen ist, haben die größten Löcher ausgerundete Rechteckform bis 178 mm (7")  $\times$  279 mm (11"), und in Fife N.-W. sowie Queensferry S.-W., wo Längs- und Querbewegung vorgesehen ist, steigt die Lochgröße bei ausgerundeter Rechteckgestalt auf 267 mm ( $10\frac{1}{2}$ ")  $\times$  292 mm ( $11\frac{1}{2}$ "). Die Anker o (Figur 7 und 8 Tafel V) sind über der Grundplatte mit gussstählernen Hülsen  $n$  von 140 mm ( $5\frac{1}{2}$ ") äußerem Durchmesser versehen, welche mutterartig auf die Bolzen geschraubt sind, bis sie die Bleche der Grundplatte fest auf den Stein drücken, und welche somit den Bolzen die zur Vermeidung lockeren Sitzens erforderliche Anfangsspannung geben, ohne die Lagerreibung zu erhöhen. Diese Mutterhülsen greifen also durch die erweiterten Löcher der oberen Grundplatte bzw. der kreisabschnittförmigen Füllungsbeilagen hindurch und haben sonach verschiedene Länge, je nachdem sie im stärkeren Aufsenteile der Grundplatte, so weit diese aus vier Blechen besteht, oder in einer der Dollenplatten bzw. einer Füllungsbeilage sitzen; im ersteren Falle (Fig. 8 Tafel V) beträgt ihre Höhe für alle Füße 135 mm ( $5\frac{1}{16}$ "), im letzteren Falle (Figur 7 Tafel V) schwankt sie zwischen 160 mm ( $6\frac{5}{16}$ ") in den rechteckigen Dollen (Queensferry S.-O. und S.-W. und Fife N.-O. und N.-W.) und 186 mm ( $7\frac{5}{16}$ ") in

den kreisförmigen Dollen der festen Lager sowie den kreisabschnittförmigen Beilagen der Dreilager mit Längsbewegung.

So angeordnet finden die Anker aber keinen Angriff an den Füßen der Stahlpfeiler. Zu diesem Zwecke sind sie über die Mutterhülsen hinaus verlängert und von weiten rechteckigen bzw. quadratischen Unterlagerungen  $r$  umfasst (Fig. 7 und 8, Grundriss Figur 9 Tafel V), welche sich mit zwei Rändern auf die unteren Winkelschenkel der Versteifungslängsträger der Lagerdeckplatte legen. Ihre Höhe, 82 mm ( $3\frac{1}{4}$ "), ist so bemessen, dass eine breite Mutterscheibe  $m$ , von oben fest auf die inneren Mutterhülsen niedergedreht, sich der Oberfläche der Unterlagsringe bis auf 5 mm ( $\frac{3}{16}$ ") nähert. Nur um diesen Weg kann sich somit die Deckplatte beim Kippen eines Pfeilers von der Grundplatte abheben, und da die Anker durch festes Andrehen der inneren Mutterhülsen beträchtliche Anfangsspannung besitzen, so kann diese Bewegung nicht infolge Losrüttelns der Anker bei plötzlicher Belastung vergrößert werden.

Wird im Falle des Kippens die Belastung der Anker mit 1000 kg/qcm zugelassen, so beträgt die Leistung der ganzen Verankerung eines Steinfußes  $48 \cdot \frac{6,4^2 \cdot 3,14}{4} = \infty 1550t$ .

Die Auflagerung der äußeren Kragarmenden auf die Endpfeiler der Zufahrtsbrücken ist der allgemeinen Anordnung nach aus Figur 1, 2, 3 und 5a Tafel II, im besonderen aus Figur 1 bis 6 Tafel V ersichtlich. Die Auflagerbedingungen sind hier nach den obigen Auseinandersetzungen 127 mm ( $5$ ") Längsverschiebung, welche nach Figur 2 Tafel V durch 10 Rollen in jedem der beiden gewöhnlichen Rollenlager ermöglicht ist;

künstliche Belastung bis zu solchem Grade (etwa 2000 t), dass dadurch der Belastung des inneren Kragarmes durch den Mittelträger und die Verkehrslast das Gleichgewicht gehalten und lotrechte Verankerung unnötig gemacht wird. Der hierzu angebrachte Blechkasten ist seiner Gesamtausdehnung nach in Figur 1 Tafel II, in seinem unteren Ansatz in Figur 1, 2 und 6 Tafel V angegeben. Die lotrechte Belastung des Pfeilers wird durch diese Gewichtsanzordnung eine beträchtliche, wenn nur der äußere Kragarm Verkehrslast trägt; es ist daher die unter den Lagerplatten des Kragarmes liegende Pfeilerseite beträchtlich stärker als die das Ende der Zufahrtsbrücke aufnehmende (Fig. 3 Tafel II).

Die Verhinderung jeder Querverschiebung, welche zur Vermeidung der Schiefstellung der Queensferry- und Fife-Pfeiler als notwendig nachgewiesen ist, ist erzielt, indem auf eine Granitaufmauerung zwischen den beiden den Abschluss der Fahrbahn am Kragträger bildenden Querträgern mittels 12 Stück 64 mm ( $2\frac{1}{2}$ ") starker Anker (Fig. 1 und 3 Tafel II, Figur 1 und 6 Tafel V) eine quer durchlaufende Stahlplatte von 102 mm ( $4$ ") Dicke und 914 mm ( $3$ ') Breite niedergebolzt ist, welche an jedem Ende ein genau abgehobeltes gussstählernes Bufferstück (Figur 1 Tafel V) trägt. Dieses legt sich wieder ohne Spielraum gegen einen gleich großen seitlichen Bufferansatz der Rollendeckplatte der Lager, so dass eine seitliche Verschiebung des Trägerendes erst möglich ist, wenn die von den 12 Ankern erzeugte Reibung überwunden ist und diese selbst abgeschoren sind. Diese eigentümliche, auf Abscheerung von Ankern beruhende Festlegung ist gewählt, um bei allen Wärmeschwankungen, welche ein geringes seitliches Verschieben der Trägerenden auf den Lagern bedingen, in den seitlichen Bufferflächen stets vollkommenes Anliegen zu wahren. Es ist das hier besonders erwünscht, da durch stärkste Entlastung der Lager bei großer Wärme ein geringes seitliches Schlottern der Kragarmenden entstände, wenn der Seitenanschlag, etwa bei Anordnung steinerne Anschlagflächen, nicht ganz scharf schlösse.

Die Verdrehung des ganzen Kragarmes um seine wagerechte Längsachse in folge von Seitendurchbiegungen der Pfeilertürme, welche in den beiden Hauptöffnungen wegen allmählichen Ueberganges in den Mittelträger unschädlich ist, musste hier verhindert werden, da sie einen Querbruch in die Fahrbahn bringen würde. Es sind deshalb auch an den Außenseiten des Trägers zwei Ankerplatten von 127 mm ( $5$ ") Dicke und 1067 mm ( $3' 6$ ") Breite mittels je 5 64 mm ( $2\frac{1}{2}$ ") starker Anker auf den Pfeiler niedergebolzt (Fig. 1

und 6 Tafel V), welche mittels Bleizwischenlage über einen an der Trägersaußenseite durch einen kastenartigen Anbau unterstützten stählernen Druckklotz fassen. Diese Anker werden mittels Schraubenschlösser angespannt, und in der inneren 3 Anker umfassenden Reihe dienen diese Schlösser zugleich zum Niederhalten eines Ansatzes der Rollen Grundplatte der Lager (Figur 1 Tafel V).

Kippen in folge von Durchbiegungen des äußeren Kragarmes ist durch Anordnung eines unvollkommenen Kippagers über den Rollen (Figur 2 Tafel V) bis zu gewissem Grade gestattet. Die äußeren Ankerplatten gegen Verdrehung um die wagerechte Längsachse bilden für diese Bewegung kein völliges Hindernis, weil die Bleizwischenlager und die unvermeidlichen kleinen Spielräume die auf 1067 mm ( $3' 6$ ") Länge unbedeutende Verdrückung gestatten.

Die Gelenklager zwischen den inneren Kragarmenden und dem Mittelträger. Diese vier Lager müssen sämtlich eine Drehung des Mittelträgers um das Kragarmende in wagerechtem Sinne, die beiden an den Kragarmenden der Inch Garvie-Gruppe außerdem eine Längsverschiebung von 292 mm ( $11\frac{1}{2}$ ") am Südende und von 254 mm ( $10$ ") am Nordende gestatten; überall muss aber jede seitliche Verschiebung der Träger gegen einander verhindert sein. Die diesen Zwecken dienenden Teile sind in zwei Gruppen zerlegt. Die erste, in die Hauptträgerwände eingeschaltet, vermittelt die lotrechte Stützung der Mittelträger, dabei Längsverschiebung, Verdrehung und Seitenverschiebung frei lassend; sie ist in Fig. D, E, F, G und H dargestellt. Die zweite, mit den Endquerträgern des Kragarmes und des Mittelträgers in der Mitte der Brückenbreite verbunden, ermöglicht die Verdrehung, regelt bzw. verhindert die Längsverschiebung und macht Seitenabweichungen unmöglich; sie ist in Figur 11 bis 15 Tafel VI dargestellt.

Die erste Gruppe der Auflagerteile umfasst zwei, oben und unten mit Kugelkappe und Schale versehene, aus

Stahl genietete -förmige Pendelsäulen, welche in der Umhüllung durch zwei in einander geschobene, dreiseitig geschlossene, die Endpfosten des Kragarmes bzw. des Mittelträgers bildende Blechkästen aufgestellt sind (Fig. H). Jede Pendelsäule findet unten ihren Aufstand auf einem durch vier Querblechwände versteiften Kasten (Fig. F), welcher das Ende des vorher in Kastenquerschnitt übergeführten Untergurtrohres des Kragarmes bildet. Ein gleicher Kasten, welcher die Endigung des Mittelträger-Obergurtes bildet, ruht auf dem Säulenkopfe, und von hier läuft außer den zugleich die eine Gehäusehälfte und den Endpfosten des Mittelträgers bildenden drei Blechen noch auf jeder Seite ein mit der Seitenwandung des Gehäuses auf die ganze Länge vernietetes schräges Hängeband nach dem Ende des Mittelträger-Untergurtes. Die Aufhängung der Mittelträger erfolgt somit ohne besondere Inanspruchnahme der Endpfosten, welche bezüglich des Tragens durch die Pendelsäulen ersetzt sind. Kippen beider Säulen nach der Brückenlänge in gleicher Richtung ergibt Längsverschiebung, Kippen nach verschiedener Richtung Verdrehung des Mittelträgers um die lotrechte Achse, Kippen beider Säulen nach der Quere der Brücke lässt die Seitenverschiebung des Mittelträgers unter gleichzeitiger Verdrehung um die wagerechte Längsachse soweit frei, wie sie der Querspielraum der Säulen in den Gehäusen zulässt.

Die zweite Gruppe der Teile des Auflagergelenkes zwischen Kragarm und Mittelträger ist in Fig. 11 bis 15 Tafel VI dargestellt. Quer durch die beiden Blechwände des -förmigen Endquerträgers sind zwei große wagerechte Knotenbleche gesteckt, welche rückwärts die in der Mitte des Querträgers in eine Spitze zusammenlaufenden letzten Glieder der Windverkreuzung des Kragarmuntergurtes zwischen sich aufnehmen (Figur 11 und 12 Tafel VI), und welche nach vorn über die Breite des gleichfalls kastenförmigen Endquerträgers des Mittelträgers hinausreichend diesen mittels zweier großer rechteckiger, ringsum mit Winkelleisen gesäumter Öffnungen in den beiden Blechwänden durchdringen (Figur 13 Tafel VI), ohne mit ihm verbunden zu sein. Auch an die Mitte des Endquerträgers vom Mittel-



träger schließt die Spitze der unteren Windverkreuzung des Mittelträgers an (Figur 11 und 14 Tafel VI). Zwischen die beiden großen Platten am Ende des Kragarmes, welche nach mehrfachen Verstärkungen (Figur 12 Tafel VI) noch 0,406 m (1' 4") lotrechten Lichtabstand haben, sind nun der Brückenlänge nach in 0,737 m (2' 5") wagerechtem Lichtabstände mittels innerer Winkeleisen zwei lotrechte Blechwände eingesetzt (Figur 11 und 13 Tafel VI), und diese dienen zwei gussstählernen Gleitstücken (*a a* Fig. 11 und 13 Tafel VI) als Stütze. Letztere greifen nach Figur 13 Tafel VI oben und unten mit Zapfenansätzen durch die wagerechten Platten und sind somit unverschieblich. Zwischen diese Gleitstücke passt genau eine quadratische Gussstahlhülse von 0,445 m (1' 5 1/2") Seite mit einer 0,229 m (9") weiten Bohrung hinein, und dieser Bohrung entsprechen ebenso weite kreisrunde Löcher in der Kopf- und Fußplatte des Endquerträgers am Mittelträger, welche noch durch aufgenietete Bleche und in die Gurtungströge dieses Querträgers eingebolzte — die Bolzen sind nicht gezeichnet — Hülsenplatten (Figur 13 und 15 Tafel VI) verstärkt sind. Schließlich ist ein 0,229 m (9") starker Stahlbolzen durch die Querträgergurte, deren Hülsenplatten und die Hülse zwischen den Gleitstücken *a a* gesteckt und von unten mittels Mutter festgehalten. Bei der geschilderten Anordnung kann die Drehung des Mittelträgers um den Bolzen und die Längsverschiebung durch Gleiten der quadratischen Hülse zwischen den Gleitstücken *a a* ungehindert stattfinden, Querverschiebung ist durch den Bolzen und weiterhin auch durch das Eingreifen der großen Bleche am Kragarme in den Endquerträger des Mittelträgers verhindert. In den Abbildungen ist die Stellung bei mittlerer Wärme gezeichnet; die die Bewegung freilassenden Räume *b, b* (Figur 11 Tafel VI) sind so bemessen, dass nach jeder Seite eine äußerste Verschiebung von 0,305 m (1') möglich ist. Werden nun aber in den Ausschnitt der wagerechten Platten vor und hinter der quadratischen Bolzenhülse in die mit *b* bezeichneten Räume zwischen den Gleitstücken *a* (Figur 11 Tafel VI) noch zwei Gussstahlklötze eingesetzt, so ist die Verbindung eine völlig feste, nur noch verdrehbare. Nach den früheren Ausführungen fehlen somit die Klötze *b* in den Mittelträgerlagern an beiden Enden der Inch Garvie-Kragarme.

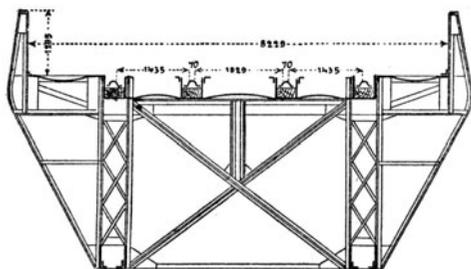
Die Trägerlager der Zufahrtsbrücken, welche für die Mittelstützen der durch zwei Oeffnungen gehenden Träger fest, für die Endstützen beweglich sind, bieten nichts außergewöhnliches.

## VII. Die Fahrbahn.

Darstellungen der Fahrbahnordnung finden sich in Figur 5 Tafel I, Figur 8 Tafel II, Figur 8 und 9 Tafel VII und Textfig. J.

In den Anfahrtsbrücken liegt die Fahrbahn über den Trägern; in die großen Träger der Hauptöffnungen ist, abgesehen von den beiden Mittelträgern, eine besondere innere

Fig. J.



Fahrbahnbrücke mit durchlaufenden Trägern eingebaut, für welche jedesmal in den Hauptknoten des Untergurtröhres, in den Kreuzknoten der Wandglieder der Kragarme sowie in der Mitte des Inch Garvie-Pfeilers Querjoche bzw. in der Nähe der Armenden Querträger eingefügt sind. Das Joch der Fahrbahn des ersten Hauptknotens der Kragarme ist mit seiner sehr kräftigen Versteifung in Figur 9 Tafel VII dargestellt; die Joche in den Wandknoten unterscheiden sich von diesem hauptsächlich dadurch, dass sie seitlich von den

vom Kreuzknoten in der Ansicht lotrecht nach dem Untergurte laufenden Hängegliedern begrenzt nach oben nicht auf die Breite der Fahrbahn zusammenlaufen; die Fahrbahnträger ruhen vielmehr in diesen Jochen mittels längerer starker Querträger ähnlich, wie in Figur 5 Tafel I. Joche und Fahrbahnträger sind durch Nietung fest mit einander verbunden, da nur aus verschiedener Erwärmung verschiedener Teile Wärmespannungen entstehen können, und man die so entstehenden auch in den übrigen Teilen des Bauwerkes doch nicht beseitigen kann.

Die Fahrbahn hat keine Bettung, es ist vielmehr für jede Schiene ein rechteckiger Trog ausgebildet (Fig. 8 Tafel VII). Die beiden äußeren Tröge bilden gleichzeitig die Obergurte der Fahrbahnträger sowohl in der Zufahrtsbrücke wie in der inneren Fahrbahnbrücke und sind daher entsprechend stärker ausgebildet, als die Tröge der beiden inneren Schienenstränge (vergl. Figur 8 Tafel VII mit Figur 3 Tafel VI). Diese Tröge sind im unteren Teile mit Beton ausgestampft, auf welchen eine hölzerne Langschwelle gebolzt wird. Die Schienen selbst sind Brückenschienen und werden auf die Langschwelle genagelt. Da die Schienenoberkante noch beträchtlich — 45 mm — unter der Trogkante liegt, so ist ein äußerst wirksamer Schutz gegen die Folgen von Entgleisungen entstanden, weil ein entgleistes Rad auf der Langschwelle durch die Trogwände sicher weiter geführt wird; die Tröge sind zu dem Zwecke so breit gemacht, dass ein Einklemmen des Rades zwischen Schiene und Trog nicht möglich ist. Die Querträger sind in der Mitte vom Querstreifenkreuze aus nochmals gestützt (Fig. 5 Tafel I, Figur 8 Tafel II und Textfigur J), daher schwache Walzträger, und reichen nur von Aufsentrog bis Aufsentrog. Die Fußwege ruhen beiderseits auf Kragträgern in Trog-oberkante und sind so bemessen, dass der Lichtraum zwischen den zum Schutz der Bahnbeamten gegen Wind sehr dichten Geländern 8,29 m (27') beträgt. Die Decke zwischen den Trägern auf den Fußwegen besteht aus Tonnenblechen mit Asphaltbeton, welche zwischen den Trögen an die seitwärts vorragenden Bodenplatten nach oben gewölbt, auf den Fußwegen an die oberen Tragwinkeleisen nach unten gewölbt (Figur 3 Tafel VI), an den Aufsenswänden an besondere Längsträger angeschlossen und etwas verschieblich sind.

Besonders wichtige Punkte sind die Brüche über den beweglichen Lagern, wo bei den bedeutenden Längenänderungen ausgedehnte Vorkehrungen für den Längenausgleich erforderlich wurden.

Ueber den beweglichen Lagern zwischen Kragarm und Mittelträger ist bezüglich der Schienen ein größtes Bewegungsmaß von 610 mm (2') vorgesehen, entsprechend der Verschieblichkeit der Lager. In Fig. 1 Tafel VI, welche den Grundriss des Schienenstosses darstellt, sind überall diese äußersten Verschiebungsgrenzen mit 1 und 5, die Mittellage mit 3, die wahrscheinlich zu erwartenden Verschiebungsgrenzen mit 2 und 4 bezeichnet. An der Stosstelle sind die Brückenschienen durch doppelfüßige Weichenzungen-Schienen ersetzt. Die Schiene im Troge des Mittelträgers ist nach der Neigung 1:63 etwa vom vorletzten Querträger des Mittelträgers an nach außen abgelenkt, und in den so zwischen der Fahrkante und der Kante der abgelenkten Schiene entstandenen Raum schiebt sich die nach Art einer Weichenzunge spitz zugehobelte Schiene *f*, welche vom Troge des Kragarmes auf den des Mittelträgers übergreift (Figur 1 und 3 Tafel VI). Die geknickte Backenschiene des Mittelträgers ist vom Knicke an auf einer Bodenplatte *g* befestigt, welche von hier bis zur Aufsensseite des letzten Querträgers am Mittelträger, d. h. bis zum Trogende des letzteren reicht; auf dieser Platte ruht auch die Spitzschiene des Kragarmes, jedoch so, dass sie gleiten kann, nämlich durch die Klemmplatte *d* am Trogende, die Klemmplatte *h* am vorletzten Querträger und zwei weitere — nicht gezeichnete — zwischen diesen niedergehalten. Bei der äußersten vorgesehenen Ausdehnung stoßen, wie auch aus Figur 11 und 12 Tafel VI zu ersehen ist, die Endquerträger an Kragarm und Mittelträger und damit auch die Trogende grade zusammen. Wenn nun ohne weitere Vorkehrungen die Zusammenziehung der Träger erfolgte, dann würde sich die Spitzschiene des Kragarmes einfach von der

geknickten des Mittelträgers abziehen, und es würde bei der größten vorgesehenen Zusammenziehung von 610 mm (2') eine offene Fuge zwischen Spitze und Backenschiene von  $\frac{1}{63} \cdot 610 = 9,7$  mm entstehen. Um nun die Spitze zu stetem festem Anliegen an der Backenschiene zu zwingen, ist ihr Fuß, soweit sie über das Trogende des Kragarmes hinausragt, in vier Stufen gleichlaufend mit der Neigung der Backenschiene abgetrept, und diese Stufen werden von vier Klemmplatten wie *d* und *h* gehalten (Figur 4 und 9 Tafel VI), deren lotrechte Anlageflächen am Zungenfusse gegen die Längsachse gleichfalls um 1:63 geneigt sind. Diese Klemmplatten werden, wenn sich der Trog des Mittelträgers von dem des Kragarmes wegzieht, bestrebt sein, die Spitze stets in genauer Berührung mit der geknickten Backenschiene zu halten. Um die Wirkung dieser schrägen Klemmplatten aber überhaupt zu ermöglichen, müsste die Spitzschiene am Trogende des Kragarmes ein Zungenwurzelgelenk haben, da ihre Biegung sonst unter Einwirkung der nahe diesem Trogende angreifenden Platte *d* zu plötzlich erfolgen würde. Dieses Gelenk einzulegen, hat man Anstand genommen, vielmehr ist die Spitzschiene als der steife festliegende Teil behandelt und die Backenschiene entsprechend beweglich gemacht. Da diese aber in folge der festen Verbindung mit der Grundplatte *g* auch mit dem Troge unabänderlich fest verbunden ist, so war diese Beweglichkeit nur dadurch zu erzielen, dass man den Trog des Mittelträgers erst auf dem vorletzten Querträger festnietete, ihn dagegen auf den Endquerträger lose auflagerte und durch entsprechende Keilanordnung zu seitlichem Federn zwang. Diese Vorrichtung besteht aus den beiden auf dem Endquerträger des Kragarmes fest vernieteten und über den des Mittelträgers weggreifenden Winkeleisenabschnitten *bb*, deren aufrechte Schenkel den Trog des Mittelträgers mit beträchtlichem Zwischenraume umfassen, und welche durch die auf den Endquerträger des Mittelträgers genieteten Klemmplatten *cc* zugleich niedergehalten und vor seitlicher Verbiegung durch den Keildruck geschützt werden. An diese aufrechten Winkelschenkel sind nun nach dem Troge des Mittelträgers zu Keilklötze *aa* (Figur 1 und 2 Tafel VI) mit versenkten Nietten in solcher Längenausdehnung befestigt, dass bezüglich der Neigung 1:63 ihnen entsprechende Keilklötze *a<sub>1</sub>a<sub>1</sub>* an den Aufsenseiten des Troges des Mittelträgers selbst bei den stärksten Verschiebungen immer genügendes Anlager behalten. Diese Anordnung muss offenbar das Ende des Mittelträgertroges zu solchem Hin- und Herfedern zwingen, wie es der steten genauen Anlage der geknickten Backenschiene an der Spitzschiene entspricht.

Die Bearbeitung der Schienen und ihre Befestigung auf der Bodenplatte *g* ist in den Figur 4 bis 10 Tafel VI in allen Einzelheiten dargestellt, und zwar bezieht sich die gezeichnete Stellung der Schienen zu einander auf mittlere Wärme.

Im Anschlusse der äußeren Kragarme an die Zufahrtsbrücken ist die Vorkehrung zum Ausgleich der Schienenlängen genau die oben beschriebene; nur ist hier entsprechend der geringeren Länge der in frage kommenden Bauteile: Kragarm und ein Aufsengeißler die Beweglichkeit geringer gemacht.

### VIII. Die Ausführung des Stahlüberbaues.

#### A) Allgemeines.

Was zunächst die Stellung der Behörden zu einem derartigen Bauwerke betrifft, so beschränkt sich die Genehmigung auf die Bauerlaubnis durch das Parlament nach Prüfung der Vorlage durch einen Ausschuss, welche jedoch naturgemäß in erster Linie die wirtschaftliche, minder die technische Seite berührt. Die höchste Baubehörde Englands, eine Abteilung des Board of Trade, hat zwar einige allgemeine Grundsätze, namentlich seit dem Einsturze der Taybrücke, über Annahme der Belastungen, des Winddruckes und der Beanspruchungen erlassen, über deren Einhaltung sie wacht; diese Vorschriften lassen dem Ingenieur aber freies Vorgehen in sehr weiten Grenzen, und da eine andere Vorlage behufs Genehmigung als die der allgemeinen Anordnung beim Parlamente nicht erfolgt, so ist der Ingenieur

in seiner Thätigkeit fast völlig frei; ihn trifft aber auch die alleinige Verantwortung. Die Regierung hat grade bei den Verhandlungen über den Bau der Forthbrücke ausgesprochen, dass Prüfung und Genehmigung eines Bauentwurfes im einzelnen nicht Sache einer Staatsbehörde sein könne, weil dadurch der Ingenieur einerseits in der freien Entwicklung seines Gedankens gehemmt, andererseits aber auch von der Verantwortung befreit werde. Für derartige großartige Bauten hat sich das Board of Trade nur insofern das Recht einer gewissen Beaufsichtigung durch seine Ingenieure — in diesem Falle durch den Major-General Hutchinson — vorbehalten, als regelmässig vierteljährlich eine Prüfung an Ort und Stelle bezüglich des regelrechten Fortschrittes, etwaiger augenfälliger Abweichungen von dem vom Parlamente genehmigten Entwürfe und Einhaltung der Bauzeit stattfindet. Die Berichte über den Befund werden dann veröffentlicht, z. B. in Engineer und Engineering, und es besteht die Ansicht, dass der auf diesem Wege nötigenfalls zu schaffende Druck der öffentlichen Meinung ein besonders wirksames Mittel zur Anspornung der Bauleitenden und Ausführenden sei.

Die Ausarbeitung des Entwurfes bis in alle Einzelteile haben die Ingenieure Sir. J. Fowler und B. Baker in London ganz in der Hand behalten, wo an den ausgedehnten Berechnungen namentlich der Ingenieur Mr. Allan Stewart beteiligt ist; der für einen solchen Bau auffallend schwache Beamtenstand des bauleitenden Ingenieurs Cooper hat nur die Abrechnung, die Bauüberwachung, den Geschäftsverkehr mit den Unternehmern und kleinere Nebenarbeiten, wie die Vorarbeiten für die kurzen Anschlussstrecken nach Dalmeny und Inverkeithing, zu leisten. Sämtliche Werkzeichnungen haben die Unternehmer zu fertigen, zur Genehmigung vorzulegen und der Bauverwaltung zu liefern; ihr Bestand an Ingenieuren und Hilfstechnikern ist daher ein beträchtlicher.

Die Festlegung des Bauwerkes war bezüglich der Lage und Richtung der Mittellinie durch die örtlichen Verhältnisse in sehr enge Grenzen eingeschlossen; die Absteckung der Pfeilertürme erfolgte mittels eines ausgedehnten, ausgeglichenen Dreiecknetzes auf grund der Messung einer Grundlinie am Ufer. Zur Versicherung wurde jedoch auch eine unmittelbare Längenmessung ausgeführt, welche bei der Tiefe des Wassers, dem Wechsel des Spiegels und dem vielfach unruhigen Wetter besondere Schwierigkeiten bot. Man errichtete in den abgesteckten Pfeilermitten ziemlich hohe Messgerüste, welche genau gegen die Absteckung abgelotet wurden, suchte dann am Ufer zwei hochgelegene Punkte mit zwischenliegender Senkung, welche genau den verlangten wagerechten Abstand und eine Höhenlage über der Senkung hatten, welche der Höhe der Messgerüste über Flut annähernd entsprach. Es wurde nun ein Stahldraht mit starkem Pfeile daher geringer Spannung zwischen diese Punkte gehängt, im Scheitel einnivellirt, auf den Punkten mit Längenmarken versehen, auch wurde die Luftwärme gemessen. An einem recht ruhigen Tage derselben Luftwärme wurde dieser Draht nun zwischen die vorher gegen einen Pegel einnivellirten Messgerüste gehängt, am einen Ende mit der Marke genau über das Messzeichen gebracht und durch Anziehen bzw. Nachlassen am anderen so lange im Pfeile verändert, bis die Messung des Abstandes des Scheitels vom Wasserspiegel von einem Kahne aus genau den am Lande gefundenen Pfeil ergab; dann musste die zweite Endmarke den Abstand mit großer Genauigkeit angeben. In der That ergab dieses Verfahren eine so geringe Abweichung gegen die mittelbare Messung, dass sie ganz belanglos erschien.

Den Unternehmern wurden nur die Pfeilermitten und an jedem Ende der Brücke die Mittellinie und die Höhenlage der Schienenoberkante angegeben; für alles weitere sind sie allein verantwortlich.

B) Die Herstellung aller Stahlteile erfolgt, abgesehen von den Trägern der Zufahrtsbrücken, welche von Maclellan in Glasgow in Unter-Unternehmung und den Senkkästen der Pfeiler, welche vom Unternehmer Arrol in Glasgow hergestellt sind, an Ort und Stelle; jedoch werden die Platten und Walzeisen thunlichst in richtigen Abmessungen aus Blochairn und Landore angeliefert. Von den erforderlichen Arbeiten wurde eine ausgedehnte Werkstatanlage bedingt. Diese Anlage — in Figur 7 Tafel I dargestellt — liegt auf der

Höhe des Südufers von der Linie Ratho-Dalmeny-South-Queensferry der North British Eisenbahn durchschnitten und mit dieser durch ein von einem Ausziehkopfe ausgehendes Geleis verbunden. Das Ausziehgeleis dient auch zur Vermittlung des Morgen- und Abendverkehrs eines großen Teiles der Arbeiter mit der Umgegend, namentlich mit Edinburgh, mittels besonderer Züge. Der Werkplatz hat allmählich eine Ausdehnung von über 20 ha erreicht und ist mittels schiefer Seilebene (45, 53, Figur 7 Tafel I) für die Bauteile und Fußweg mit Treppe für die Arbeiter über die Landstraße von Edinburgh weg mit einem die Fluthöhe um etwa 2,0 m überragenden Pfahlgerüste verbunden, welches bis zum Fuße des Queensferry-Pfeiler ausgedehnt etwa 670 m lang ist und neben der Anlage von Fördergeleisen zur Einrichtung von Ladestellen für Schiffe, Lagerstellen für Steine, Werkplätzen für Hausteine, Errichtung von Hilfsschmieden, Wächter- und Arbeiterbuden u. dergl. benutzt ist.

Auf Inch Garvie, wie am Fife-Ufer befinden sich nur untergeordnete Anlagen, wie Eisengerüste für die Pfeilergründung und das Anlegen von Schiffen, Schuppen für Wächter, Arbeiter und Materialien, Schmieden u. dergl.

Unmittelbar am Südufer neben der Wurzel des langen Gerüsts befinden sich noch eine Sägemühle (50), ein großes Zementlager (51) und zwei Hellinge (52), auf denen die Zusammenfügung, erste Betonfüllung und der Stapellauf der Gründungskästen erfolgte.

Der Hauptarbeitsplatz musste unter Aufwendung nicht unerheblicher Erdarbeiten in mehreren Stufen an dem Hang abgeschnitten werden und besteht, abgesehen von den Amtsräumen der Bauleitung und Unternehmung (10 und 11) am Ostende, einer großen Zahl von Wohnhäusern für Arbeiter und Ingenieure auf der Höhe an der Südgrenze, im wesentlichen aus vier Gruppen.

Die erste, höchstgelegene, am Südrande umfasst eine Kantine, den sehr ausgedehnten Reifsboden mit Modelltischlerei und einen offenen Teich.

Hierauf folgt, etwas niedriger liegend, der Werkplatz für die Herstellung der gedrückten Rohrglieder mit den Pfeilerfüßen und sonstigen Rohrknotten, mit dem Schuppen *A* für die hierzu nötigen Arbeitsmaschinen. Der Werkplatz ist quer durch drei versenkte Schiebebühnen in zwei Hälften von je 90 m Länge geteilt und besteht aus 6 gleichlaufenden Hellingungen aus je vier wagerechten, zum Teil mit Schienen beschlagenen Holzlangschwelen, von denen jeder beiderseits durch je ein (gestricheltes) Maschinen- und Krangeleis eingefasst ist. Diese Geleise sind durch die Schiebebühnen auch kleinen Förderwagen zugänglich. An den beiden Langseiten sowie in einem der Zwischenräume der 6 Hellinge sind noch besondere Fördergeleise (gestrichelt) angelegt; übrigens dienen die vorhandenen Zwischenräume als Lagerplätze für fertig vorbereitete Stahlplatten. Der Arbeitsschuppen *A*, nach Ausweis des Planes mit ausgiebigen Geleisverbindungen versehen, welche, soweit die Geleise schräg gestrichelt sind, auch von den Lokomotiven der Hauptbahnen befahren werden können, ist in den Thoren und im Innern mit 13 kleinen Presswasserkränen nach Figur 1 Tafel VII so ausgestattet, dass alle Lade- und Bewegungsgeschäfte von diesen besorgt werden können.

In diesem Schuppen *A* erfolgt die Herrichtung der Stahlplatten zu den Rohrgliedern in nachstehend beschriebener Weise. Zunächst erfolgt die Biegung nach dem vorgeschriebenen Halbmesser. Das Bestreben, das richtige Verfahren der Biegung zu finden, ergab zunächst einige Misserfolge; die größten Platten von  $4,877 \times 1,372 \times 0,031$  m ( $16' \times 4'6'' \times 1\frac{1}{4}''$ ) nach dem Halbmesser von 1,829 m (6') kalt zu biegen, hätte nach Berechnung Pressen von 10000 t Kraft erfordert, während schwerere Pressen als von 1600 t, höchstens 2000 t, nicht wohl zu beschaffen waren. Aufserdem brachen gleich anfangs einige 28 mm ( $1\frac{1}{8}''$ ) starke Platten bei dem Versuche, sie kalt zu biegen, wie Gusseisen, was selbstverständlich einigen Schrecken erregte. Probestäbe aus diesen Platten, ausgeglüht und in  $27^\circ \text{C}$  warmem Wasser gekühlt, ergaben 6020 kg Zugfestigkeit bei 21 pCt. Reckung und in der Luft gekühlt 5770 kg bei 21 pCt. Reckung, also einen erheblich besseren Stahl, als den verlangten (vgl. S. 3). Eine nicht ausgeglühte Probe gab 5250 kg Festigkeit, aber

25 pCt. Reckung. Weitere Versuche ergaben, dass diese Neigung zum Brechen verschwand, wenn die mit der Scheere beschnittenen Kanten knapp 2 mm ( $\frac{1}{16}''$ ) abgehobelt wurden; daraus darf aber nicht auf Kantenhaarrisse infolge des Scheerens geschlossen werden; denn die Neigung zum Brechen verlor sich auch durch Ausglühen bei nicht behobelten Kanten völlig, und die Erscheinung ist ihrer Ursache nach völlig unaufgeklärt geblieben.

Thatsächlich werden nun beide Mittel verwendet. Die Platten werden in Gasöfen (14, 15 Figur 7 Tafel I) durch Verteilung der Gaszuführung thunlichst gleichmäßig bis Rotglut erhitzt und dann mittels der in Figur 14 bis 16 Tafel VIII dargestellten Pressen von 70 Atm. und einem Gesamtdrucke von 800 t (15a, 16 Figur 7 Tafel I) gekrümmt, welche man durch Einsetzen verschieden geformter Gusskästen *BB* zwischen Stempel *CT* und oberem Querbaum *F* leicht allen Plattenformen, auch den doppelt gekrümmten, für den Uebergang aus dem Kreise in das Quadrat an den Rohrenden anpassen kann. Beim Abkühlen verzogen sich die Platten stark; sie werden jetzt mit Zwischenlagen heißer Asche aufgestapelt, so dass sie langsam kühlen, und wenn sie ganz kalt sind, in den Pressen nochmals nachgerichtet. Es wird angenommen, dass sie so alle von der Erzeugung herrührenden inneren Spannungen verlieren. Weiter werden die Platten dann an allen vier Kanten mindestens 2 mm abgehobelt, wozu besondere Hobelmaschinen (18 Figur 7 Tafel I) erbaut sind. Um die geraden Kanten der Tafeln zu hobeln, wird die Maschinenanlage Figur 13 und 14 Tafel IX benutzt, welche mit festem beiderseitigem Schneidsupporte und beweglichem Plattentische ausgestattet das genaue Abrichten der Platten auf gleiche Breite sowohl für verschiedene Plattenbreiten als auch verschiedene Krümmungshalbmesser ermöglicht. Die Anordnung ist an sich verständlich.

Der Hobel für die gekrümmten Platten ist in Fig. 10 bis 12 Tafel IX dargestellt. Hier liegt die Platte, fest in ihrer Gestalt entsprechenden Gussplatten eingespannt, unbeweglich auf dem Tische *B*, während der Schneidstahl in einem am Pendel *P* hängenden Support *T* eingesetzt ist. Am Pendelende greift eine anderseits in dem durch eine Schraube bewegten Schlitten *S* befestigte Lenkstange an. Da der feste Punkt des Pendels durch Umstecken des Achsbolzens in weiten Grenzen geändert werden kann, so können hier Platten von sehr verschiedener Krümmung abgerichtet werden.

Beide Hobel steuern sich selbst um und schneiden beim Vor- und Rückgange.

Die so vorgerichteten Platten gehen nun hinaus auf die Hellinge. Ueber diesen ist nach Figur 3 und 4 Tafel VIII auf schmiedeisernen Böcken ein Hilfsrohr *M* von 1,5 m Dmr. gelagert, auf welches dem Durchmesser des herzustellenden Rohres entsprechende Lappen *P*, durch inneren Ring *R* verbunden, aufgeschoben werden können. An diese Lappen wird zuerst der innere Versteifungswinkelring *A* mit den Ringblechen *W* (vergl. Figur 5 und 6 Tafel III) angebolzt; diese

nehmen dann die -förmigen Längssteifen gleichfalls mittels Verbolzung auf, und um diese legen sich schliesslich die äusseren Winkelringabschnitte *J*, nach deren Anbolzung ein vollständiges Gerippe für das Rohr hergestellt ist. Nunmehr werden die 4,877 m (16') langen Platten mit um die halbe Länge versetzten Stößen nebst allen Laschen aufgelegt und am Gerippe festgeklammert und das Rohr auf völlige Geradheit der Achse mit dem Theodolit eingerichtet. Hierauf tritt die mit vier Rädern auf den beiden den Helling seitlich eingrenzenden Geleisen laufende Ringbohrmaschine in Thätigkeit, welche aufser den in Figur 9 bis 11 Tafel VIII dargestellten Teilen noch einen Dampfkessel und vollständige Einbaung trägt. Das Bohrgestell besteht im wesentlichen aus zwei die weitesten Rohre noch mit Spielraum umfassenden Gussringen *CC* in 2,438 m (8') Abstand, welche, auf dem Bohrwagen *A* festgebolzt, aufsen einen Zahnkranz *R* tragen. Auf dem glatten Teile dieser Ringe gleiten je 5 Schlitten durch die Schrauben ohne Ende *W* nach Bedarf bewegt; je zwei einander gegenüber liegende Schlitten tragen zwischen sich einen -förmigen Kastenträger *P*, in welchem eine Welle *a* mit beweglichem Kegelrade läuft, und unter welchem eine Zahnstange *n* angebracht ist. Der eine der beiden den

Träger *P* tragenden Schlitten nimmt außerdem zwei Seilrollen  $b_1$   $b_2$  auf, von denen  $b_1$  nur zur Herstellung einer großen Umfangsberührung auf  $b_2$ ,  $b_2$  zur Bewegung der Bohrwelle *a* dient. Ein von der Dampfmaschine bei *E* umgetriebenes endloses Band *cc*, welches von der in einen mittels Gewichtes *Q* nach hinten gezogenen Hebel *d* gelagerten Spannrolle *e* straff gehalten wird, bewegt die Rollen  $b_1$   $b_2$  in allen fünf Schlitten gleichzeitig. Je ein Kegelradvorgelege setzt von der Welle *a* aus die Bohrspindeln *f* in Umdrehung, welche selbstthätig oder mit der Hand bei *g* nachgestellt werden. Die zwei Lagergehäuse für die Bohrspindeln werden von Hand mittels Kurbel *m* an der Zahnstange längs des Trägers *P* bewegt; es kann somit jeder der 10 Bohrer fast unabhängig von den anderen an jeder beliebigen Stelle des Rohres angestellt werden, da die Veränderung der Abstände der fünf Schlitten die Thätigkeit der Maschine in keiner Weise stört.

In einer Länge von 4,877 m (16') sind bei 3,658 m (12') Dmr. 1600 Löcher jedes durch 64 mm ( $2\frac{1}{2}$ ") bis 89 mm ( $3\frac{1}{2}$ ") Stahl zu bohren, was die Maschine nach Figur 9 bis 10 Tafel VIII in zehn Punkten des Umfanges gleichzeitig angreifend in 52 Arbeitsstunden besorgt.

Die kleinen Teile der Rohre, namentlich die Längssteifen, werden vor der Anbolzung auf der in Figur 12 Tafel VIII dargestellten drehbaren Kranbohrmaschine (20 Figur 7 Tafel I) in den inneren Winkeleisen und dem Stegende fertig gebohrt, während die Bohrung der mit den Ringblechen in Berührung tretenden Flanschen der Längssteifen und Ringwinkel auf den Hellingen durch die Ringbohrmaschine erfolgt. Ueberhaupt wird der allgemeine Grundsatz auf das strengste durchgeführt, Löcher in zusammengehörigen Teilen nur nach genauer Zusammenfügung durch alle Teile auf einmal zu bohren, und es wird so eine geradezu bewundernswerte Uebereinstimmung der Löcher in den Teilen des Riesenbaues erreicht, obwohl die Teilungen in den meisten Stücken ziemlich flüchtig mit Kreide vorgezeichnet werden.

Die stumpfen Enden der Walzstücke werden auf der Kaltsäge genau abgelängt. In den Längssteifen sind die Stöße der Winkel und der T-Rippen um rund 40 cm versetzt, und bis auf diese Ueberlappung werden diese Teile vor dem Einbaue behufs Bohrung des Rohres fertig vernietet. Ein fertig gebohrtes Rohrstück ist in Figur 1 u. 2 Tafel VIII dargestellt; es ruht auf Holzklötzen, durch welche die schmiedeeisernen Böcke beim Fortschritte der Bohrmaschine allmählich ersetzt werden. Die Teile des Rohres werden dann wieder auseinander genommen, mit Mennige gestrichen, nach vorher aufgestellten Verzeichnissen ausgezeichnet und aufgestapelt bezw. mittels der Seilebene auf Rollwagen zur Verwendungsstelle geschafft. Nietungen kommen nach dem gesagten bei diesen Arbeiten nur sehr wenig, z. B. in den Längssteifen der Rohre vor.

Figur 7 Tafel I zeigt die Hellinge in einem ziemlich frühen Stande der Arbeit, nämlich während der Herstellung der Fußknoten der Pfeilertürme mit den zwischen diesen liegenden wagerechten und den auf ihnen stehenden lotrechten Rohren der Türme.

Einfacher sind die Einrichtungen und Arbeitsvorgänge in der dritten Gruppe, im Schuppen *B*, welcher zur Herstellung aller vergitterten Glieder, d. h. der Obergurte, der Wandzugglieder, der Quersteifen und Windverkreuzungsglieder, der Träger der inneren Fahrbahnbrücke sowie schliesslich der großen auf die Steinfüße zu lagernden Grundplatten dient. Auch dieser Schuppen ist reichlich mit 8 Presswasserkränen nach Figur 1 Tafel VII ausgestattet und enthält 8 drehbare Kranbohrmaschinen wie Figur 12 Tafel VIII zum Bohren der unregelmässigen kleineren Teile, z. B. der Gitterstäbe. Die großen Platten, welche zu den Eckquerschnitten dieser Glieder oder zu den Lagerplatten Verwendung finden, werden hier zuerst mittels Pressen kalt gerichtet wie auch die stabförmigen Körper. Letztere werden hier auch kalt mit der Säge abgelängt; die Platten werden auf einer im Grundrisse winkelförmig gestalteten Hobelbank (Figur 5 bis 7 Tafel IX, bei 36 Figur 7 Tafel I) ringsum genau auf Maß abgehobelt und zwar immer zwei Kanten zugleich mittels der beiden Supporte *E* und *E*<sub>1</sub> mit den Schneidezeugen *T* und *T*<sub>1</sub>, nachdem die Platte auf dem Winkelstische *P* festgeklammert und mittels großer Druckschrauben

festgeklammert ist. Verstellbare Anschläge auf dem Tische geben die genauen Plattengrößen an. Auch diese Hobelbank steuert sich selbst um und schneidet beim Vor- und Rückgange. Die zusammenzunietenden Teile der Querschnittsgruppen werden nun zeichnungsgemäss zusammengeklammert, mit dem Vorriss der Nietteilung versehen, auf einer Reihe von Holzunterklotzungen gelagert und scharf abgeschnürt, wobei die Lagerflächen durch dem auszubildenden Querschnitte genau entsprechende Gussstücke gebildet werden. In Figur 5 und 7 Tafel VIII ist z. B. eine Ecke des stärksten Teiles des Zuggurtes (vergl. Figur 8 Tafel I) in der angegebenen Weise sicher gelagert dargestellt. Zu beiden Seiten der Klotzreihe läuft ein Schienengeleis, auf welchem nun die in Figur 5 bis 8 Tafel VIII dargestellte Bohrmaschine am Gliede entlang fährt und die erforderlichen Löcher durch alle Teile zugleich bohrt. Diese Maschine ist an der Vorderseite *AA* mit drei lotrechten, vier wagerechten Bohrern von einer und zwei wagerechten von der andern Seite ausgestattet, welche am Gestelle so befestigt sind, dass sie allen Lagen der regelmässigen Nietreihen der richtig aufgeklotzten Glieder angepasst werden können. Sie werden alle gemeinsam mittels Kegelradvorgelege gedreht und stellen sich selbst nach; die lotrechten Spindeln sind um eine halbe Nietteilung gegen die wagerechten verschoben. Auf der Rückseite *CC* sind vier Bohrer in Schwingarmen angebracht, von denen sich zwei um lotrechte Achsen drehen und lotrechte Bohrer enthalten, zwei um wagerechte Achsen beweglich und mit wagerechten Bohrern ausgestattet sind. Von den Schwingarmen mit wagerechter Achse und Bohrspindel ist in Fig. 7 Tafel VIII nur der linke gezeichnet. Diese vier Bohrer sind bestimmt, alle ausserhalb der regelmässigen Teillinien sitzenden Löcher für Laschen, Anschlüsse, Gitterwerk u. dgl. nachzubohren. Sie machen jeden Punkt des Gliedes für einen Bohrer zugänglich; die Bewegung ihrer Spindeln erfolgt durch bewegliche Kegelradvorgelege, die Nachstellung von Hand.

Genietet werden auch diese einfacheren Teile erst im Bauwerke selbst.

Der Schuppen *B* liegt wieder etwas tiefer als *A*; vor seinem Westende in gleicher Höhe liegt noch der Malerschuppen (42), die Anlage zur Gewinnung des für die Schuppen erforderlichen Presswassers (43 und 44) und die Winde der geneigten Ebene (45).

Zwei Brücken führen über den Bahneinschnitt zu Arbeitsgeleisen der vierten Gruppe auf der anderen Seite, an welchen der Zusammenbau der unregelmässigeren Teile, namentlich der Knoten vieler Gliederdurchkreuzungen usw. erfolgt. Bei Anwesenheit des Verfassers im August 1887 standen hier grade die vier Kopfknoten des Inch Garvie-Pfeilers auf dem Kopfe, jeder für sich ein stattliches Bauwerk. Werkstätten sind hier nicht angelegt; die Bearbeitung der Einzelteile der hier zusammengebauten Körper erfolgt in den Schuppen *A* u. *B*.

Alle fertigen Teile gehen auf Rollwagen die schiefe Ebene (53 Figur 7 Tafel I) hinunter und durch Pferde gezogen über das Pfahlgerüst entlang der Osteite der Zufahrtsbrücke nach dem zwischen bezw. um die Steinfüße des Queenferry-Pfeilers errichteten Arbeitsgerüste, welches zum Schutze vor fallenden Werkzeugen, Nieten u. dgl. mit einem starken Drahtnetze überspannt ist, um entweder in den Dampfseilauflügen (58 Figur 7 Tafel I) auf die obere Arbeitsbühne dieses Pfeilers oder von der Ladestelle 60 aus durch kleine Kräne in Dampfer oder Schleppschuten und so nach den Lagerplätzen am Inch Garvie- bzw. Fife-Pfeiler geschafft zu werden; zu letzterem Zwecke sind 14 Dampffahrzeuge in Thätigkeit.

Die ganze Anlage besitzt eine Leistungsfähigkeit von 1300 t fertiger Stahlteile für den Monat.

C) Die Errichtung der Brückenträger bedingte eine Reihe beachtenswerter und aussergewöhnlicher Massnahmen, deren Hauptgrundzug die Vermeidung von Rüstungen in den Oeffnungen bildet.

Die Träger der Anfahrtsbrücken wurden, nachdem die Steinpfeiler eben über Hochwasser aufgeführt waren, auf einer entsprechenden Rüstung völlig fertig mit Querverband hergestellt und an jedem Ende und in der Mitte durch einen von zwei Wasserpressen getragenen Querträger gegen das Mauerwerk abgestützt. Ausserdem hing man an jedem Pfeiler

eine diesen umgebende eiserne Hängerüstung an den Trägern auf, legte auch auf dem Windverbände in Höhe des Untergurtes eine zweigeleisige Förderbahn für Rollwagen an, welche durch einen dicht am Endpfeiler der Zufahrtsbrücke gelegenen Dampfseilauzug (58 Figur 7 Tafel I) auf das Pfahlgerüst gesenkt wurde, um hier mit Steinen, Mörtel und Stahlteilen nach Bedarf beladen zu werden. Dieser Aufzug besteht wie der an den Pfeilertürmen (vergl. Figur 13 Tafel V) aus einer unten aufgestellten Dampfwinde, an deren Drahtkabel ein an vier lotrechten straffen Kabeln geführter Käfig hängt. Für den Fall eines Seilbruches sind vier Sicherheitsklauen für die vier Führungskabel eingeschaltet. Ueber jedem Pfeiler wurde eine Winde zum Herablassen der Materialien aufgestellt, für deren Betrieb eine Dampfmaschine über jedem zweiten Pfeiler mit Seilübersetzung in die Träger eingebaut wurde.

Von den Hängerüstungen aus wurden zunächst die von einer Druckwasserleitung mit 270 Atm. (34 cwts. auf 1 Quadrat Zoll) gespeisten Wasserpressen bedient, so dass sie die 5 Träger der 10 Oeffnungen bezw. die 3 der 5 Oeffnungen der Zufahrtsbrücken zugleich um drei Mauerschichten etwa 1,2 bis 1,5 m anhoben; dabei wurden die Lagerquerträger unterklotzt und schliesslich das Mauerwerk um einen solchen Hub höher geführt; letzteres wurde jedoch erst 48 Stunden nach der Herstellung belastet. Die sämtlichen Träger gelangten bei einer monatlichen Hebung von etwa 3 m im Juli 1887 in die endgiltige Höhenlage, nachdem 1883 mit der Einrichtung des Werkplatzes und der Pfeilergründung begonnen war.

Die drei Pfeilertürme mit den Kragarmen boten erheblich grössere Schwierigkeiten. Während der Gründung und Aufmauerung der Steinfüsse im Laufe des Jahres 1885 — für den verunglückten Fuß des Queensferry-Pfeilers bis Ende 1886 — waren die Lagergrundplatten bei Nr. 27 bis 32 Plan Figur 7 Tafel I genau abgerichtet und durch lotrechte Bohrmaschinen mit 8 Bohrern Nr. 29 vorgebohrt. Jede Platte enthielt rund 305 m (1000') Lochlänge bei 28 mm ( $1\frac{1}{8}$ ") Dmr. und wurde in 18 Tagen gebohrt. Ausserdem mussten die Dollentvertiefungen und Ankerbolzenlöcher mittels vom Unternehmer Arrol zu diesem Zwecke besonders entworfener Maschinen hergestellt werden.

Diese vorgerichteten Platten wurden dann über den Granitdecken der Steinfüsse auf einstweiligen, mittels Muttern aufgesetzten Verlängerungen der 48 Ankerbolzen gelagert und durch Doppelmutter so zusammengepresst, wie es in Fig. 3 Tafel VII dargestellt ist. Hierauf wurden noch besondere Stützen untergesetzt und nun ein die ganze Platte der Breite nach umfassender, mit Rädern auf Holzlangschwelen beweglicher Rahmen aufgestellt, dessen oberer und unterer Querbaum je einen Schlitten mit Kegelradvorgelege und Schraubmutter und einen zweiten mit an der Schraubenspindel befestigter Nietpresse trug. Durch Bewegung der Pressen entlang den Querbäumen wurden die einzelnen Querreihen der doppelt versenkten Niete hergestellt, bei der folgenden Längsverschiebung des ganzen Rahmens mussten dann Stützen- und Bolzenverlängerungen nach Bedarf ausgewechselt werden. Nach vollständiger Vernietung der Platte und Beseitigung des Nietrahmens, der Stützen- und Bolzenverlängerung wurde erstere dann mit Winden in ihr Zementbett gelegt und oben durch eine besondere Maschine mit Schmirgelscheiben von allen kleinen Unebenheiten befreit. Nachdem die inneren Muttern der Anker (Figur 7 und 8 Tafel V) fest niedergedreht waren, begann dann ein ähnliches Verfahren bezüglich der Lagerplatten mit den gleich darauf festzunietenden Längsträgern und Querverstärkungen. Nach Einbringung einer 3 mm ( $\frac{1}{8}$ ") dicken Schmiermittellage in den flachen Kasten der Grundplatte wurde dann auch die Deckplatte niedergelassen, und es konnte nun die Errichtung der Pfeilertürme beginnen.

Die zur Gewinnung des Presswassers für die Nietpressen erforderlichen Pumpen wurden auf den Gerüsten zwischen den Steinfüssen aufgestellt und lieferten 70 Atm. (1000 Pfd. auf 1 Quadratfuß) Druck.

Die Nietpresse ist in Figur 2 Tafel VII im einzelnen dargestellt. Das Wasser wird durch dünne, mit Gelenken versehene Eisenrohre zugeführt und für thunlichst grosse Gebiete, wie z. B. Figur 3 Tafel VII, durch gemeinsame Zwei-

weghähne *a* zugelassen. Die Verbindung der Pressen mit den Leitungen erfolgt durch starke Schläuche, und es ist eine gesonderte Leitung für das Abwasser angelegt. An den Haupthahn *a*, Figur 3 Tafel VII, schliessen 6 Rohre an: das Druckwasser- und das Ablassrohr dann vereinigt zwei Druckrohre nach den beiden Pressen und auch vereinigt zwei Ablassrohre von beiden Pressen. Der Kolben jeder Presse ist doppeltwirkend (Figur 2 Tafel VII), der enge Ringraum *A* steht durch *C* fortdauernd mit dem Druckrohre in Verbindung, während durch *B* mittels des Ventiles *Q* der Raum unter dem Kolben bald mit dem Druck- bald mit dem Ablassrohr in Verbindung zu bringen ist. Wird *B* durch *Q* an die Druckleitung angeschlossen und nun der Haupthahn *a* auf die Druckleitung gestellt, so überwiegt der Druck unter dem Kolben den in *A* und die Kolben beider Pressen treten aus; jedoch sind die Ventile *Q* zweier zusammengehöriger Pressen derart in gegenseitige Abhängigkeit gebracht, dass die den Setzkopf fassende Presse zuerst angreifen muss. Ist das Niet fertig, so wird *B* durch *Q* mit dem Ablassrohre verbunden, und wird nun auch *a* auf das Ablassrohr gestellt, so wird dabei das Druckrohr zu den Pressen nicht abgeschlossen. Folglich herrscht in *A* auch jetzt noch der volle Druck, und da *B* ohne Pressung ist, wird der Kolben eingezogen. Bei der wechselnden Richtung des Druckes auf den Kolben sind 2 Dichtungsringe *L* erforderlich. Die etwas umständliche Steuerung ist nötig, damit beide Pressen genau zusammenarbeiten.

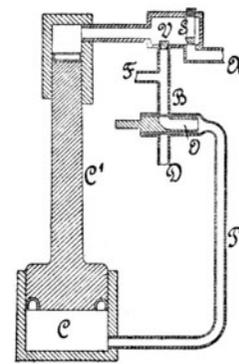
Für die Nietung leicht von beiden Seiten zugänglicher Teile z. B. die Aufsensränder der Fußkästen der Eckpfosten werden zwei Arten von Bügelpressen verwendet. Bei ganz freiem Raume kommt die Presse Figur 13 Tafel VIII mit unbeweglichen, durch Drucksteife und Zugband verbundenen Armen zur Verwendung, da, wo kein Platz für den Presscylinder über dem Niete ist, die in Figur 17 Tafel VIII gezeichnete gegliederte Presse mit zwei Doppelhebeln *L*, Zugverbindung *T* und Presscylinder am Hinterende. Beide sind in Figur 3 Tafel IX im Angriffe dargestellt. Die Steuerung der Cylinder ist dieselbe wie in Figur 2 Tafel VII mittels Ventiles *Q*; der Haupthahn *a*, wie in Figur 3 Tafel VII, fällt hier selbstverständlich weg.

In vielen Fällen kann aber wegen der Rohr- und Zellenanordnung keine Bügelpresse angreifen; man verwendet dann wieder die gesonderten Pressen, deren eine durch die Mannlöcher eingebracht wird, welche nötigenfalls Gegenlager aus Holzklötzen erhalten, für die Druckleitungen durch noch offene Nietlöcher zugänglich sind und, wie oben beschrieben, gemeinsam gesteuert werden. Auch eine derartige Anbringung ist in Figur 3 Tafel IX dargestellt.

Um ohne Spannungsvergrößerung in den Leitungen durch Mehraufwand von Wasser nötigenfalls einen höheren als den angegebenen Druck herstellen zu können, ist die in Fig. 3 Tafel IX bei *a* und im einzelnen in Figur 4 Tafel IX sowie der Wirkungsweise nach in Textfigur K dargestellte Vorrichtung zur Druckvergrößerung eingeführt, welche eine Pressung von 472 Atm. (3 t auf 1 Quadratfuß) erzeugt. Das Druckwasser der Hauptleitung tritt bei *F* mit 70 Atm. ein und gelangt mit dieser Pressung durch das Ventil *V*, den Hahn *S* und Rohr *A* zur Nietpresse, wenn nur der gewöhnliche Druck verlangt wird. Stellt man aber den Hahn *O* so um, dass das Druckwasser durch *B* und *P* unter den grossen Kolben in *C* gelangen kann, so entsteht nun über *C*<sup>1</sup> ein Druck, welcher zu 70 Atm. im Verhältnisse der grossen zur kleinen Kolbenfläche steht, und das durch *V* früher über *C*<sup>1</sup> gelangte

Wasser geht nun mit dieser Spannung durch *S* zur Presse. Die Umstellung von *O* auf das Ablassrohr *D* entlastet den Raum *C* und stellt überall wieder 70 Atm. her. Diese Vorrichtung zur Druckvergrößerung wurde durch die kleinen Zellenräume bedingt, da für diese der Presscylinder

Fig. K.



durch Mannlöcher von höchstens  $457 \times 330$  cm ( $1' 6'' \times 1' 1''$ ) einzubringen, innen durch einen Mann zu handhaben und für die Rohre durch die Nietlöcher zugänglich sein musste. Es wurden daher an solchen Stellen Pressen von nur 102 mm ( $4''$ ) Dmr., 254 mm ( $10''$ )  $\times$  152 mm ( $6''$ ) größter Außenabmessung und 18,15 kg (40 Pfd.) Gewicht verwendet, welche nun sehr hoher Pressung bedurften. Die Rohre zwischen der Vorrichtung zu der Erhöhung des Druckes und den Pressen sind der Zähigkeit und Biegsamkeit halber aus Kupfer hergestellt und mit Gelenken und Federwindungen ausgestattet.

Während der Fertigstellung der Lager und Füße der Eckpfosten wurden zugleich auf niedrigen Rüstungen, für welche die Arbeitsbühnen zwischen den Steinfüßen die Unterstützung abgaben, die wagerechten Längs- und Querverbindungen, d. h. die großen Druckrohre und die Quer- und Schrägträger zwischen den Auflagern eingebaut und fertig vernietet, so dass ein wagerechter Rahmen mit zwei Schrägbändern auf den vier Füßen lag, und nun begann man den untersten Schuss der Eckpfosten von 4,877 m ( $16'$ ) Länge sowie der Pfeilerschrägsteifen mittels kleiner Dampfkräne aufzusetzen, wobei aber die in einer winkelrecht zur Brückenachse durch die Eckpfosten gehenden Ebene liegenden Platten der vier Eckpfosten vorläufig ausgelassen wurden; die Rohre der Schrägsteifen wurden gleich ringsum geschlossen.

In den vier Stümpfen wurde dann die in Fig. 1 und 2 Tafel IX dargestellte Vorrichtung zur Unterstützung einer mit dem Wachsen der Eckpfosten ansteigenden Arbeitsbühne angebracht. Diese Bühne besteht nach Fig. 10 Tafel VII aus zwei Laufbrücken 1 von Eckpfosten zu Eckpfosten in der Brückenlängsrichtung, in deren Bohlenbelägen die erforderlichen Aussparungen für die Eckpfosten und die Schrägsteifen angebracht wurden. Der Aufbau der Bühnen ist folgender:

In dem Stumpfe der Eckpfosten wurde zunächst ein starker Kastenlängsträger  $F^1$  (Figur 1 und 2 Tafel IX) mit Bolzen an die Steifenrippen des Rohres angeschlossen, welcher mittels Kugelschale den Cylinder einer starken Wasserpresse  $A$  für 236 Atm. (30 cwts. auf 1 Quadratzoll) Druck in besonderer Leitung aufnimmt. Der Kopf des Presskolbens trägt mittels Gelenkes und entsprechender Schrägstücke das Ende eines großen Kastenquerträgers  $B$ , welcher in der Brückenquere von Eckpfosten zu Eckpfosten reicht und in der Breite der einen vorläufig ausgelassenen Plattenbahn Platz findet. Unter diesem Querträger ist im Rohre mittels entsprechender Schrägstücke ein zweiter Längsträger  $F^2$ , mit  $F^1$  bis auf die Löcher für die Presse in Kopf- und Fußplatten genau übereinstimmend, aufgehängt, welcher gleichfalls an die Steifenträger des Rohres angebolzt werden kann. Oben ruhen auf  $B$  dicht neben jedem Eckpfosten der Länge nach zwei Gitterträger  $G$ , Teile der oberen Quersteifen zwischen den Köpfen der Eckpfosten, und auf diesen ist der Bohlenbelag  $D$  der Bühne angebracht; auch liegen zwischen den Trägern Schutzhütten für die Arbeiter auf dem unteren Belage  $H$ .

Um die Bühnen zu heben, setzt man zuerst die vier Pressen der vier Eckpfosten aus besonderer Hochdruckleitung in den Rohren unter Druck, soweit, dass die Befestigungsbolzen von  $F^2$  von der Last der Bühnen befreit und die Träger  $F^1$  durch diese belastet werden, zieht die Bolzen von  $F^2$  aus und hebt nun  $F^2$  um den halben oder ganzen Pressenhub (152 mm [ $6''$ ] oder 305 mm [ $1'$ ]) an, wobei die Bolzenlöcher wieder grade vor neue Nietlöcher des Steifenträgers treten. Nachdem die Bolzen eingesetzt sind, entfernt man die aus  $F^1$  und zieht nun den etwa doppelt wirkenden Kolben mittels derselben Steuerung ein, welche schon bei dem Presswasserspaten (Figur 5 Tafel VII) und bei den Nietpressen (Figur 2 Tafel VII) erläutert wurde, und welche den engen Ringraum um den Kolben stets unter Druck hält. Da der Cylinder mit  $F^1$  verbunden ist, so hebt der Kolbenrückgang diesen Träger nach, und nachdem die Bolzen auch in  $F^1$  wieder eingesetzt sind, kann das Spiel von neuem beginnen. In der Regel erfolgt die Hebung um einen Rohrschuss von 4,877 m ( $16'$ ) auf einmal, und die Schrägsteifen werden in gleichem Fortschritte von den Bühnen aus hochgeführt. Da die Pressen schiefwinklig unter den Querträgern  $B$  stehen, so müssen beim Heben die

Schrägstücke des Kolbenkopfes und des Trägers  $F^2$  am Untergrunde des Querträgers  $B$  hingleiten und auch die Längsträger  $G$  allmählich nach der Mitte zu auf  $B$  verschoben werden. Oben angelangt werden die Träger  $G$  dann gleich an ihrem endgiltigen Platze eingebaut.

Um die Rohre nieten zu können, wird nach der erstmaligen Hebung der Bühnen ein die Rohre umfassender kreisförmiger Käfig von 6,604 m ( $21' 8''$ ) Höhe aus Winkelgestell und Drahtnetzen unter jene gehängt, dessen nutzbare Länge gleich der Schusslänge ist (Figur 8 und 9 Tafel IX). Der Käfig schließt unten und oben mit dem nach jeder Hebung der Bühnen mit Holz gegen das Rohr abzukeilenden Blechringe und Ringträger  $W$  ab; auf den Ringträgern  $W$  gleitet mittels der zwei wagerechten Presscylinder  $A$  (Fig. 9 Tafel IX) verschieblich der oben und unten in Klauen geführte lotrechte Kastenträger  $G^1$ . An dessen Innenseite ist abermals mit Klauen und durch den lotrechten Presscylinder  $E_1$  verschieblich die Nietpresse  $R^1$  und zugleich ein kleiner Käfig für die Nietarbeiter befestigt; Presse und Käfig können somit beliebig auf und nieder und im Kreise herum bewegt werden. Im Innern wird in gleicher Höhe mit dem großen Käfige an zwei gegen die Steifen  $B$  verklammerte Speichengerüste  $F$  je ein wagerechtes Blech befestigt, welche die Lager für die Zapfen des um eine lotrechte Achse drehbaren Kastenträgers  $G^2$  aufnehmen. Mittels des lotrechten Presscylinders  $E^2$  kann auch hier die Nietpresse  $R^2$  mit kleinem Käfige für Arbeiter gehoben und somit  $R^2$  stets  $R^1$  genau gegenübergestellt werden. Die Drehung von  $G^2$  um den oberen und unteren Zapfen erfolgt vom kleinen Käfige aus mittels Kurbel und Schnecke  $D$  durch die lotrechte Welle  $HH$ , welche unten mit Zahnrad in einen festen Kranz mit Innenverzahnung greift. Kurbel und Schnecke  $D$  bewegen sich mit dem Arbeiterkäfige auf der Welle  $HH$  auf und nieder.

Die Druckwasserzuführung und Steuerung ist auch hier eine ziemlich verwickelte. Aus der im Innern des Rohres liegenden Zuleitung  $J$  geht das Druckwasser nach Oeffnung des Zulasshahnes unmittelbar nach dem Steuerventile  $K$ , da bei dem hier möglichen großen Durchmesser der Nietpressen keine Vorrichtung zur Druckvergrößerung erforderlich ist. Durch die Rohre  $L^1$  und  $L^2$  geht das Druckwasser bei allen Stellungen von  $K$  nach den engen Ringräumen  $A$  (Fig. 2 Tafel VII) um den Kolben der Pressen  $R^1$  und  $R^2$ , und je nach Stellung des Steuerventiles an  $R^1$  und  $R^2$  auch unter den Kolben, diesen vortreibend, oder aus dem unteren Cylinderraum nach Drehung von  $K$  auf das Ablassrohr  $M$  in dieses, so dass der Kolben zurückgeht;  $M$  ist für  $R^1$  in Fig. 9 Tafel IX nur teilweise gezeichnet. Die Pressen  $E^1$  und  $E^2$  zum Heben und Senken von  $R^1$  und  $R^2$  erhalten ihr Druckwasser mittels besonderen Hahnes aus dem stets unter Druck stehenden Ringraume, also aus  $L^1$  und  $L^2$ . Die beiden im Käfige feststehenden Presscylinder  $A$  zur Bewegung von  $G^1$  im Ringe herum haben besondere Zuleitung  $N$  und sind durch die mehrfach erwähnte Ventilsteuerung doppeltwirkend gemacht, um durch den Kolbenrückgang den Cylinder mit seiner Klauenklemme auf  $W$  um einen Hub nachziehen bzw.  $R^1$  mit dem Arbeiterkäfige nach Bedarf auch rückwärts verdrehen zu können. Sämtliche — zum teil nicht gezeichnete — Ableitungen sind außerhalb  $K$  mit  $M$  zu einer einzigen verbunden. Auch eilt die den Setzkopf fassende Presse stets etwas vor.

Der Stempelkopf der Presse  $R^2$  ist so geformt, dass er auch die vom Innengurte des Steifenträgers verdeckten Niete in deren Aufsenгурte fassen kann.

Die Niete werden in einem Oelofen erhitzt; die Leistung der Vorrichtung ist 800 Niete in 10 Stunden.

Der Hub des großen unter die Bühnen gehängten Käfigs ergibt sich aus der Bewegung dieser von selbst und beträgt also auch grade eine Rohrschusslänge, kann durch Aufhängung des Käfigs in Drahtseilen aber auch beliebig geändert werden (vergl. Figur 13 Tafel V).

Die Nietkäfige für die abgeplatteten Schrägsteifenrohre unterscheiden sich von dem in Figur 8 und 9 Tafel IX dargestellten nur dadurch, dass die Grundrissgestalt der Führungsringe  $WW$  der der Rohre angepasst ist, und dass auch der innere Pressenträger  $G^2$  bei der Drehung dieser

Gestalt so nachgeführt wird, dass die Presse in stets gleichem Abstände von der Außenwand bleibt.

Die vergitterten Teile der Pfeilertürme, d. h. das obere Zugglied, die Quersteifen und die Windverkreuzung zwischen den Eckpfosten und die lotrechten und wagerechten Hilfsglieder für die Kreuzknoten der Schrägsteifen boten bei der Herstellung zum Teil von den beiden Bühnen zum Teil von auf diese gelegten Querrüstungen aus keine Schwierigkeiten, da hier alle Teile mit den gewöhnlichen Bügelpressen Figur 13 und 17 Tafel VIII genietet werden konnten.

Die Fertigstellung der drei Pfeilertürme erfolgte nicht für alle genau zugleich; der Inch Garvie-Pfeiler blieb wegen der größeren Ausdehnung etwas zurück; er erhielt seinen Kopf im September 1887.

Die wichtigsten Teile der Bauausstattung des Fife-Pfeilers sind aus Figur 13 Tafel V zu ersehen. Die Materialaufzüge haben hier, wie an den Zufahrtsbrücken, in vier Drahtseilen geführte Käfige und Dampftrieb. In der Windverkreuzung der Eckpfosten sind außerdem sichere Holztreppe (Nr. 59 Figur 7 Tafel I) angelegt, deren Besteigung in dem meist heftigen Luftzuge und bei mehr als 100 m Höhe freilich beschwerlich ist.

Während der Errichtung der Türme mussten die mit bedeutenden Längen in geneigter Richtung frei in die Luft ragenden Glieder wiederholt durch Steifen und Bänder gegen einander abgesteift werden.

Die Aufstellung der Kragarme bedingte ganz selbstständige Anlagen für den Untergurt, den Obergurt und die Wand.

Das Untergurtrohr wurde wieder vom Fusse des Eckpfostens mittels Dampfkranes in einer Schusslänge von 4,877 m (16') vorgebaut, und dann der in Figur 11 Tafel VII dargestellte Gitterkäfig von trapezförmigem Querschnitte mit hölzerner Bühne auf den Untergurten um den Stumpf gebaut, welcher das Rohr wieder mit abzukeilenden Ringen umfasst. Schienen auf der Oberseite nehmen die Räder eines Presswasserkranes auf, welcher sich mittels Presscylinders mit Flaschenzug im Untergestelle über die ganze Länge des Käfigs bewegen, mittels zweier wagerechter Cylinder um 360° schwingen und mittels lotrechten Cylinders und Flaschenzuges die Stahlteile heben kann. Der ganze Käfig besteht aus zwei wechselweise vor einander zu setzenden Längen, deren Umsetzung von hinten nach vorn gleichfalls der Kran derartig besorgt, dass das Vorderende des Käfigs stets vor dem des Rohres bleibt. Unter den fertigen Rohrteilen wird ein Laufsteg aufgehängt, welcher den Käfig vom Pfeiler aus zugänglich erhält; außerdem trägt das Rohr eine L-Schiene mit Laufkatze, welche, von einem Drahtseile und Winde bewegt, die Stahlteile für das Rohr an diesem entlang in das Bereich des Presswasserkranes bringt.

Bis zur endgültigen Ausrichtung eines Feldes des Rohres in der unten zu beschreibenden Weise wurden die Teile nur mit Bolzen in allen Nietlöchern verbunden, um beim Ausrichten kleine Verschiebungen möglich zu machen. Später wurde nach dem Ausrichten für die Nietung des Rohres dieselbe Vorrichtung angebracht, welche für die Pfeilereckpfosten früher zu Figur 8 und 9 Tafel IX ausführlich beschrieben und in Figur 11 Tafel VII mit dargestellt ist. In dieser Weise konnte das Rohr zunächst bis zum lotrechten Hängegliede im ersten Kreuzknoten der Wand vorgekragt werden, ohne übermäßige Durchbiegungen anzunehmen. Da dieses Hängeglied aber vom Rohre aus aufgebaut werden musste, so hätte es eine gefährliche Belastung für das Rohr abgegeben, wenn man nicht dieses zunächst durch das einstweilige Hängeband z (Figur 1 Tafel I und Figur 13 Tafel V), aus Bandeisen für 500 t Last eingerichtet, nach den Pfeilereckpfosten hin abgefangen hätte. Die oberen Enden zweier solcher von beiden Seiten an einen Pfeiler angreifenden Bänder wurden zwischen den Eckpfosten noch durch ein wagerechtes Band z grade unter der wagerechten Aussteifung des Strebenkreuzknotens verbunden, um die Eckpfosten lediglich in ihrer Längsrichtung zu belasten.

Immerhin war die Höhenlage des erreichten Rohrendes nun schon ungenau genug, um eine Berichtigung zu erfordern, und da diese nur mittels des Hängegliedes im ersten Kreuzknoten der Wand erfolgen konnte, so muss zu ihrer Klar-

stellung nun erst der Bau des Obergurtes und der Wand bis zu diesem Punkte verfolgt werden.

Die Baueinrichtung für den Obergurt ist in Fig. 11 und 12 Tafel V dargestellt. Der erste Stumpf dieses Gliedes wird gleichzeitig mit dem Pfeilerkopfknoten aufgebracht und nimmt dann ein Rahmenwerk aus Stahl auf, welches beide Gurte mit mehreren Querrahmen umfasst und unten auf vier Längsträgern eine hölzerne Bühne von 13,716 m (45') Breite und 23,165 m (76') Länge mit den erforderlichen Oeffnungen zum Durchheben der Stahlteile von unten trägt. Die Rüstung ist oben wagerecht, unten für die Bühne dem Obergurte gleichlaufend geformt, und die somit verschiedenen hohen Rahmen gleiten mittels Klauen auf dem Obergurte. Auf dem Vorderende der Oberseite steht ein 10,668 m (35') ausladender und um 115° nach jeder Seite der Mittellinie schwingender Dampfkrane, welcher die Stücke von unten herauf hebt und die vier Wände des Gurtes mit Platten und Gitterwerk (Figur 8 Tafel I) vorbaut. Das Rückende der Rahmen trägt einen dem am Untergurte arbeitenden gleichen, nur fest stehenden Presswasserkrane, welcher die Winkeleisen der vier Eckgurte nachholt und die Bügelnietspressen bei der Vernietung bedient. Je nach Bedarf werden die Rahmen mit Bühne und Kränen durch Wasserdruckpressen vorwärts, d. h. bergab, geschoben. Der Vorbau des Obergurtes erfolgt in dieser Weise ganz frei bis über den ersten Kreuzknoten der Wand, von welchem aus als Verlängerung des nach dem Untergurte gehenden Hängegliedes eine zeitweilige Abstützung mittels vier vergitterter Winkeleisen vorgenommen wird (Figur 13 Tafel V).

In der Wand ist der Vorgang für die ersten Druckstreben nebst Windverkreuzung folgender. Nachdem die Untergurtrohre bis zum ersten Hängegliede vorgestreckt und hier nach dem Pfeiler aufgehängt waren, wurden auf ihnen je zwei Gitterträger der Länge nach hergestellt, welche einerseits den Pfeilereckpfosten, andererseits das Hängeglied umfassten und eine den im Pfeiler verwendeten ähnliche schmale Bühne bildeten (Figur 13 Tafel V). Ihr Pfeilerende wurde durch Bänder an Wasserpressen aufgehängt, welche auf Kragträgern am oberen Teile der Eckpfosten standen, und nun hob man dieses Ende soweit an, dass die Bühne in die wagerechte kam und zum Weiterbau des frei vorgestreckten Rohrstumpfes der ersten Schrägstrebe benutzt werden konnte. Für das äußere Bühnenende wurde in das lotrechte Hängeglied ein kleiner Längsträger eingebolt, welcher eine Wasserdruckpresse, mittels dieser einen nach der anderen Seite hinüberlaufenden Querträger und auf diesem das Bühnenende trug. Die beiden Pressen in dem nach Bedarf höher geführten Hängegliede hoben nun das äußere Bühnenende in demselben Wechselbetriebe, wie er für die Pfeilerbühnen in deren Eckpfosten zu Figur 1 und 2 Tafel IX beschrieben ist, indem wechselweise die kleinen Längsträger und der große Querträger in dem Hängegliedstumpfe festgebolt wurden. Die Stahlteile für die Aufführung des Hängegliedes und der Druckstrebe von dieser Bühne aus wurden vom Dampfkrane auf der Obergurtrüstung mit gehoben.

Für das erste Schrägband der Wand wurde nur eine kleine, es umfassende Holzbühne mit Drahtseilen und Flaschenzügen an einem in den obersten Teil gesteckten Querbaume aufgehängt und je nach Fortschritt des Gliedes an den Seiten nachgelassen. Die Stahlteile auch hierfür hob der Dampfkrane des Obergurtes. Das zarte vergitterte Glied wurde in kurzen Abständen gegen den Pfeilereckpfosten mit Holz abgesteift.

Nachdem beide Wandglieder ihren Kreuzpunkt überschritten hatten und hier mit einander und mit dem ersten lotrechten Hängegliede fest vernietet waren, wurde das Schrägband in der alten Weise mittels an Seilen hängender Holzrüstung weitergeführt. Für die erste Druckstrebe gab man dagegen die Benutzung der jetzt nicht mehr ausreichten Hebebühnen auf, setzte vielmehr nun auch hier Käfige mit drei Holzbühnen um das Rohr, welche mit der bekannten Nietenrichtung ausgestattet auf einstweilig an das Rohr gebolzten Kragstücken ruhten und nach Bedarf mittels Drahtseilen durch den Dampfkrane des Obergurtes gehoben wurden. Die Arbeitsrüstungen wurden somit mit dem Fortschritte der Kragarme immer leichter.

Obergurt und Untergurt wurden, nachdem ersterer durch das einstweilig verlängerte Hängeglied im ersten Kreuzknoten der Wand gegen diesen gestützt, letzterer durch das einstweilige Schrägband im Fusse des ersten Hängegliedes nach dem Pfeilereckpfosten abgefangen war, in der früher beschriebenen Weise soweit weiter geführt, bis in beide die Knotenbleche des ersten Hauptknotens eingeschaltet werden konnten.

Die gleichfalls bis dicht an den Hauptknoten geführten beiden Wandglieder konnten wegen der Möglichkeit ausgiebiger Abspreizung bis zum Schlusse des Kreuzknotens gegen den Pfeilereckpfosten, später gegen einander, bei der steileren Lage und dem vergleichsweise geringen Gewichte genau in der Richtung gehalten werden; dagegen bedurften die Gurtungen vor Schluss des Hauptknotens einer Berichtigung.

Die Berichtigung des Obergurtes erfolgte leicht vom oberen Ende der Drucksteife aus, indem man auf deren Ende eine Wasserpresse setzte, welche in der Richtung des Steifenrohres wirkend den Obergurt bis zur verlangten Höhe anhob.

Schwieriger war die Berichtigung des Untergurtes welche gleichzeitig im unteren Anschlusse des ersten lotrechten Hängegliedes und im ersten Hauptknoten vom ersten Schrägbande aus und zwar in folgender Weise vorgenommen wurde.

Die Vorkehrungen im Fusse des ersten lotrechten Hängegliedes sind in Figur 13 und 14 Tafel IV dargestellt.

In einiger Höhe über dem Fusse des Hängegliedes wurde beim Aufbau ein Stofs nur einstweilig mit Zwischenraum verbolzt, nicht genietet; dem entsprechend wurde auch ein offener Stofs im unteren Ende der zum Joche für die innere Fahrbrücke gehörenden schrägen Querglieder gelassen. Oberhalb und unterhalb dieses Stofses in dem doppelt

-förmigen Gliede wurden in jeder Wand je zwei kräftige Längsblechträger so eingebolzt, dass die Oberkante des obersten 5,677 m (18' 7 1/2") über der Unterkante des untersten sich befand. Je zwei unmittelbar über einander liegende Blechträger wurden durch Eiseneinlagen so fest gegen einander gekeilt, dass sie gemeinsam wirken mussten. Auf die Mitte jedes der obersten Längsträgerpaare wurde unter Einlegung eines Keiles ein Presswassercylinder von 0,343 m (1' 1 1/2") Außendmr. gesetzt, um über die Kolben dieser beiden Cylinder einen -förmigen Querträger strecken zu können. Zu beiden Seiten jeder Hälfte des Hängegliedes wurden in den offenen Schlitz dieses Querträgers mittels Blechwand und je zweier Anschlusswinkel je zwei Winkel eingesetzt, welche bis unter den Unterrand des unteren Längsträgerpaares hinabreichten. Hier nahmen die 8 Winkel einen dem obigen gleichen Querträger mittels gleicher Befestigung auf, und gegen diesen wurde nun das untere Längsträgerpaar so abgekeilt, dass die Hängewinkel Spannung erhielten. Geringer Druck in den beiden Pressen entlastete hierauf die Bolzen im Stofse des Hängegliedes, die Last auf die 8 Hängewinkel bringend, so dass die Bolzen nun gelöst werden und die stumpfen Enden des Hängegliedes mittels weiteren Pressenhubes behufs endgiltiger Vernietung mittels an Ort und Stelle durch Laschen und Glied gebohrter Löcher einander beliebig genähert werden konnten. Der Hub der Pressen konnte wegen der führungslosen Stellung nicht weit ausgenutzt werden; nach Anhebung um eine Teilung der vorgesehenen Bolzenlöcher wurden daher Bolzen in die Laschen der Gliedenden gesteckt, die Pressen zurückgezogen, mit Blechen von entsprechender Dicke über dem Keile unterlegt und neu angekeilt, worauf die Hebung von neuem beginnen konnte.

Die Berichtigungsvorrichtung im ersten Hauptknoten bestand in der Anbringung von vier Wasserpressen von 0,235 m (9 1/4") Kolbendmr. unter jedem Untergurtrohre in der Richtung des ersten Schrägbandes, also nach dem Pfeilerkopfe; sie ist in Figur 8 bis 12 Tafel IV dargestellt. Zwischen die Blechplatten je zweier in der Brückenlängsrichtung einander gegenüberliegender Vierte! des nach Figur 9 Tafel I geformten Zugbandes wurde ein -förmiger

Längsträger *a* (Figur 8, 9 und 10 Tafel IV) eingebolzt, an dessen glatte Seite je zwei Hängebleche *b* angenietet wurden. Diesen entsprachen vier weitere Hängebleche *d*, welche mittels doppelter Verlaschung, Verbolzung und offenen Spielraumes *c* von 0,203 m (8") an jenen befestigt wurden und ihrerseits mittels Vernietung vier Hängewinkel *e* aufnahmen. Die Bleche *b* wurden in Unterkante der Längsträger *a* so geknickt, dass, obwohl die Blechwände der Viertel des Schrägbandes in ihrer Verlängerung nach den in 2,134 m (7') Breitenabstand in das Gurtrohr eingesetzten Knotenblechen (Fig. 11 Tafel IV) hinweisen, die vier Hängewinkel doch schräg aufsen am Rohre vorbei streichen konnten. Unterhalb wurden sie der Brückenlänge nach wieder zu beiden Seiten des Hauptrohres paarweise durch -förmige kleine Längsträger *f* verbunden (Figur 8, 11 und 12 Tafel IV) und nahmen mittels dieser zwei Paar -förmiger Walzquerträger *g*<sup>1</sup> und *g*<sup>2</sup> zwischen sich auf, welche mit dem Stege in der Richtung des Schrägbandes quer unter dem Rohrknoten durchgingen und vier Wasserpressen von 0,235 m (9 1/4") Kolbendmr. enthielten. Es konnte nun das in Holz gegen die Träger *g*<sup>2</sup> abgeklotzte Rohr mit den Pressen gehoben werden, wobei sich der nicht gezeichnete, an die Knotenbleche im Rohre gebolzte unterste Teil des Schrägbandes weiter zwischen die Laschen schob. Nach Erreichung der richtigen Höhe wurden die Anschlusslöcher hier passend gebohrt. Uebrigens konnte man unter vorläufigem Einbolzen des Querträgers *g*<sup>2</sup> zwischen die Hängewinkel *e* oder unter einstweiliger Abklotzung desselben gegen *g*<sup>1</sup> und Erhöhung der Pressen durch Unterlagsbleche den Hub dieser nötigenfalls auch wiederholen.

Es möge nun die Benutzung dieser beiden Ausrichtungsvorkehrungen so beschrieben werden, wie sie sich für das nordwestliche Untergurtrohr am Queensferry-Pfeiler stellte. An jede der Pressen des unteren Endes des ersten lotrechten Hängegliedes wie des ersten Schrägbandes wurde ein Mann zum pumpen gestellt, zusammen also sechs Mann, nachdem Vorkehrungen getroffen waren, um nicht allein die Bewegungen des Untergurtrohres sondern auch des ganzen Pfeilers in allen Teilen zu beobachten. Der offene Stofs in den Schräggliedern des Joches der inneren Fahrbrücke wurde völlig frei gemacht und die unteren Enden dieser Schrägglieder durch Aufhängung in Drahtseilen am Durchhängen verhindert.

Nun begann das Pumpen, bis die Pressung am lotrechten Hängegliede 118 Atm. (15 cwts. auf 1 Quadratzoll) und am ersten Hauptknoten 94,5 Atm. (12 cwts. auf 1 Quadratzoll) betrug; die zugehörigen Spannkräfte sind 218 t für das erste lotrechte Hängeglied und 164 t für das erste Schrägband. In diesem Augenblicke hatte sich der offene Stofs im lotrechten Hängegliede 75 mm (2 15/16") geschlossen, das Rohr hier aber nur 64 mm (2 1/2") gehoben, so dass also das Hängeglied 22 mm (7/8") nachgegeben hatte. Der offene Stofs im Schräggliede war geschlossen, und da das untere Rohr hier nun die vorgeschriebene Höhe hatte, so wurden die Laschen der offenen Stöße hier nun endgiltig festgemacht.

Die Hebung am ersten Hauptknoten betrug nun 192 mm (7 9/16"), und es zeigte sich, dass die Bolzen im Untergurtrohre zwischen dem Fusse des Hängegliedes und dem Hauptknoten angefangen hatten, ihre Spannung zu verlieren; auch war der nordwestliche Eckpfosten des Pfeilers an der Anschlussstelle des zeitweiligen Hängebandes *z* (Figur 1 Tafel I und Figur 13 Tafel V) durch Entlastung des letzteren 11 mm (7/16") nach Süden gewichen. Die Bolzen auf der bezeichneten Strecke wurden nun etwas losgeschraubt und die Hebung im ersten Hauptknoten noch 70 mm (2 3/4") fortgesetzt, so dass sie nun im ganzen 262 mm (10 5/16") betrug, wobei die Pressung der Pressen auf 102 Atm. (13 cwts. auf 1 Quadratzoll) und die Spannkraft im ersten Schrägbande auf 178 t stieg. Da die Bolzen im Untergurtrohre hierbei lose waren, so hatte diese Hebung keinen Einfluss mehr auf das erste lotrechte Hängeglied. Das erste Schrägband hatte sich dabei um 13 mm (1/2") gereckt. Der erste Hauptknoten wurde nun um 17 mm (11/16") in die genaue Lage wieder gesenkt, wobei der Druck in den Pressen unverändert 102 Atm. und die Bolzen des Rohres lose blieben. Nunmehr wurde auch das erste

Schrägband endgiltig mit den Knotenblechen des ersten Hauptknotens verbunden und dann mit der Ersetzung der Bolzen im Gurtrohre durch Niete mittels der bekannten Nieteinrichtung für Rohre (Figur 8 und 9 Tafel IX) begonnen.

Am Nordost-Rohre des Queensferry-Pfeilers betrug der Schluss des offenen Stofses am ersten lotrechten Hängegliede bei 118 Atm. (15 cwts. auf 1 Quadratzoll) in den Pressen hier (218 t Spannkraft), und 78,7 Atm. (10 cwts. auf 1 Quadratzoll) (134 t Spannkraft) am ersten Hauptknoten 59 mm ( $2\frac{3}{16}$ " ), die Reckung des Hängegliedes 16 mm ( $\frac{5}{8}$ " ), so dass das Rohr hier 43 mm ( $1\frac{11}{16}$ " ) gehoben war. Die Bolzen des Rohres waren am Hängegliede etwas lose geworden, und die Hebung im ersten Hauptknoten betrug 126 mm ( $4\frac{15}{16}$ " ). Der Hauptknoten musste nun um 24 mm ( $\frac{15}{16}$  mm) wieder gesenkt werden, wobei die Pressung auf 67 Atm. ( $8\frac{1}{2}$  cwts. auf 1 Quadratzoll) (115 t Spannkraft) fiel, und nun konnte auch hier die endgiltige Befestigung des ersten Schrägbandes am Rohre sowie die Nietung des letzteren beginnen.

In folge der Hebung dieser beiden Nordglieder war der ganze Queensferry-Pfeiler im Kopfe um 10 mm ( $\frac{3}{8}$ " ) nach Norden übergewichen; als jedoch die Hebung auch der Südglieder erfolgt war, hatte er sich wieder genau in die lotrechte gestellt.

### IX. Die Aufstellung der Mittelträger.

In Fig. L sind die Enden der beiden Kragarme einer Öffnung dargestellt, wie sie durch das früher beschriebene Aufstellungsverfahren entstehen, die linke Seite zeigt noch die Arbeitsbühne des Obergurtes (top traveller) Figur 11, 12 u. 13 Tafel V mit ihren Kränen in der Endstellung. Diese Bühnen sollen beim Vorbau des Mittelträgers auch auf dessen Obergurt übergehen, bis sie die in der rechten Hälfte der Fig. L angegebene Endstellung an der Trägermitte erreichen. Es steht jedoch noch nicht fest, ob sie für diesen Zweck nicht noch eine Umänderung erfahren, da ihr erhebliches Gewicht — 50 bis 60 t — auf dem freien Ende des vorgekragten Mittelträgers bedeutende Beanspruchungen verursacht.

Die Gestalt des Mittelträgers geht aus Figur 1 Tafel I und Fig. L hervor. Die von den Kreuzpunkten der Wandglieder nach dem Untergurte geführten Lotrechten gehören zu den endgiltig herzustellenden Teilen und bezwecken die Aufhängung der in den Feldmitten liegenden Querträger an den Wandgliederkreuzen; sie stellen in dem 106,678 m (350') zwischen den Stützpunkten auf den Kragarmenden langen Träger 16 Felder von je 6,668 m her. Die oberen Hälften dieser Lotrechten werden wie in den Kragarmen nur zeitweilig eingebaut, um die von der Aufstellungsbühne im Obergurt erzeugten Biegungsspannungen abzumindern, in den Endfeldern zugleich, um die während der Ausführung erforderliche Rückverankerung des Mittelträgers am Kragarmende zu verstärken. Die endgiltige Stützung des Mittelträgers auf dem Kragarmende mittels Pendelsäulen ist auf S. 15 beschrieben und in Fig. D bis H auf S. 16 und in Figur 11 bis 15 Tafel VI dargestellt.

Die endgiltige Stützung des Mittelträgers ist aber offenbar nicht geeignet, als Ankerung während des Vorkragens der Trägerhälften zu dienen; für diesen Zweck müssen vielmehr die in Fig. L angegebenen Hängebänder *AB* zeitweilig angebracht und am Fusse des Mittelträgers bei *D* (Fig. L u. M) die in Fig. N im einzelnen dargestellten Doppelkeile eingesetzt werden. In Fig. M sind diejenigen Spannkkräfte in den dem Kragarmende benachbarten Gliedern eingeschrieben, welche im letzten Augenblicke der Vorkragung durch die Eigenlast, das Gewicht der Aufstellungsbühne und einen Winddruck von 146,5 kg/qm erzeugt werden können. Die übliche Berechnungsweise liefert für diese Belastungen an einer Hälfte des Mittelträgers eine Versackung in der Mitte des Mittelträgers von 203 mm (8"), welche sich aber in folge der vielen vorläufig mit Schraubenbolzen herzustellenden Verbindungen thatsächlich nicht unbedeutend vergrößern wird. Um diesem Umstande von vorn herein zu begegnen, wird der Endposten des Mittelträgers nicht lotrecht, sondern mit dem Kopfe um ein Maß nach dem Kragarmende hin geneigt aufgehängt, welches naturgemäß nur geschätzt werden kann,

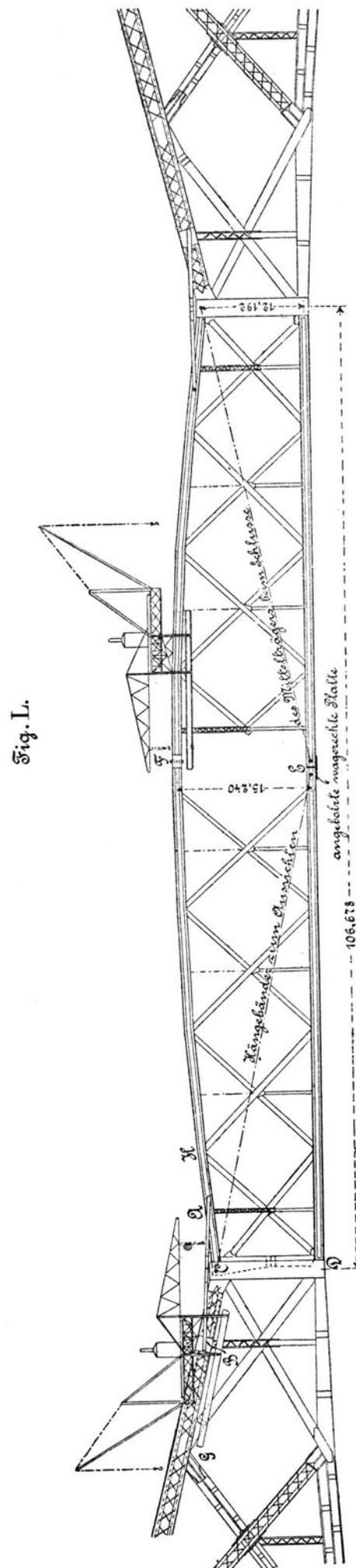
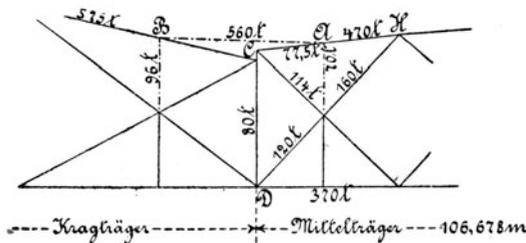
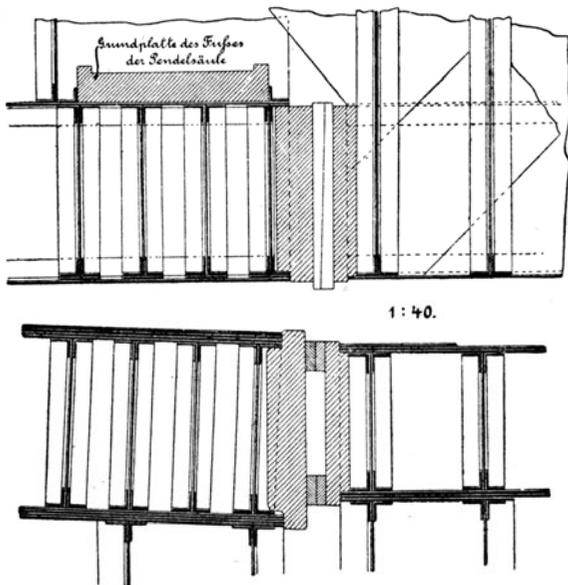


Fig. L.

jedenfalls aber wenigstens  $203 \frac{12,192}{0,5 \cdot 106,687} \approx 47 \text{ mm}$  betragen muss. Diese etwas schiefe Aufstellung des Endpfostens wird durch die Art der Stützung auf Pendelsäulen ohne weiteres ermöglicht.

Fig. M.

Detail bei D.  
Fig. N.

Dem Bestreben des Winddruckes, den vorgekragten Teil des Mittelträgers seitlich auszubiegen, wird durch das auf der Windseite liegende Hängeband  $AB$  (Fig. L), die auf der entgegengesetzten Seite unten bei  $D$  eingefügten Doppelkeile (Fig. N) und das vorläufig unbeweglich gemachte Auflagergelenk am ersten Querträger des Mittelträgers (Fig. 11 bis 15 Tafel VI) entgegengewirkt.

Die Querschnitte der Glieder, an welche jedes Hängeband  $AB$  anschliesst, sind nach Anordnung und Größe die folgenden: Glied  $GB$  (Fig. L u. M) zeigt den letzten Ausläufer des Querschnittes des Kragarmobergurtes, dessen stärkste Ausbildung in Figur 8 Tafel I dargestellt wurde. Die Anordnung ergibt sich aus nebenstehender Skizze; die Größe ist nach Abzug der Nietlöcher für ein Viertel: 3 Winkelisen 53,2 qcm, 1 wagerechtes Blech 25,8 qcm, ein lotrechtes Blech 48,49 qcm, für den ganzen Querschnitt also: 510,4 qcm; diese Zahl zeigt eine geringe Abweichung gegen die ältere Angabe auf S. 10, wo der schwächste Obergurtteil der Kragarme mit 503 qcm angegeben wurde. Die Beanspruchung ist hier also  $\frac{575000}{510,4} = 1120 \text{ kg}$ .

Glied  $AH$  hat den in Fig. P, Schnitt  $c-d$  zu Fig. O, dargestellten Querschnitt, und zwar nach Abzug der Nietlöcher in 6 Winkelisen 155 qcm, in 2 Platten 310 qcm, zusammen 465 qcm, die ungünstigste Beanspruchung ist hier also  $\frac{470000}{465} = 1010 \text{ kg}$ ; diesem endgiltigen Querschnitte ist aber während des Vorkragens des Mittelträgers noch die in Fig. P gestrichelte Platte von  $724 \times 13 \text{ mm}$  vorläufig durch

Aufbolzen auf die Winkelisen hinzugefügt, um die Querschnittshälften inniger zu verbinden und eine Verstärkung des Gliedes  $AC$  (Fig. L u. M) einzuleiten.

Das Band  $AB$  besteht aus vier lotrechten Platten von  $711 \times 19 \text{ mm}$  (Fig. L, M und O) und hat nach Abzug von vier Löchern für zöllige Bolzen 463 qcm Querschnitt. Die Spann-

Fig. O.

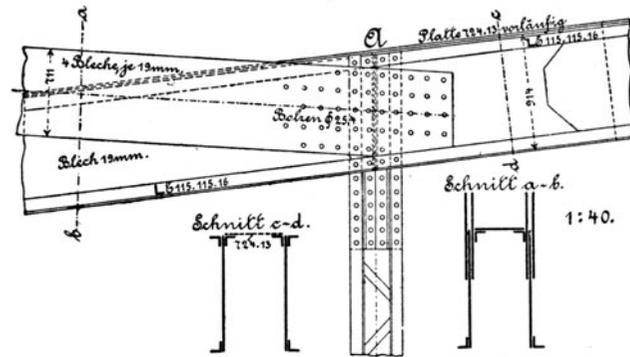


Fig. P.

Fig. Q.

kraft beträgt 456 t aus der Trägerlast, 104 t aus dem Winddrucke, die Beanspruchung also  $\frac{456000 + 104000}{463} = 1210 \text{ kg}$ .

Das Band wird zuerst an beiden Enden mit den Trägern verbunden, dann die Verbindung nach genauer Einstellung des Endpfostens des Mittelträgers durch Verbolzung der Stoflaschen in der Bandmitte hergestellt; die Bolzenlöcher werden hier nach genauem Zusammenpassen der Bandenden und Laschen gebohrt. Die Löcher werden auf einer Stofsseite außerdem länglich aufgeweitet, damit später bei Anhebung der Mitte des fertigen Mittelträgers behufs Schlusses des letzteren das Lockerwerden der Bolzen in den Bändern erleichtert wird.

Das Glied  $AC$  (Fig. L und M), welches im endgiltigen Ausbaue denselben Querschnitt haben soll, wie  $AH$  (Fig. P), muss zunächst so abgeändert werden, dass die vier Flachbänder von  $AB$  leicht angeschlossen werden können. Zu dem Zwecke lässt man die oberen äußeren Winkelisen in  $A$  ganz endigen, was bei der vorläufig geringen Spannkraft in  $AC$  von 77,5 t unbedenklich geschehen kann; auch die inneren oberen Winkelisen hören etwas außerhalb  $A$  vorläufig auf, und nun werden die vier Platten von  $AB$  zu beiden Seiten der durchlaufenden Stehbleche  $CH$  angelegt. Ueber diese Platten weg wird dann innen nach Fig. O u. Q ein Laschkwinkel gestreckt und angebolt, um das vor  $A$  aufgehörnde innere Winkelisen mit dem vor  $C$  aufserhalb der Kreuzung mit dem Bande  $AB$  angebrachten verlaschen und um die von  $AH$  herkommende vorläufige Deckplatte (Fig. P) anbolzen zu können.

Die Anschlüsse von  $AB$  in  $A$  und  $B$  erfolgen mittels zölliger Schraubenbolzen, in  $B$  an zwei Bleche, welche auf die äußeren lotrechten Bleche des oben skizzierten Querschnittes  $BG$  beiderseits aufgebolt werden.

Sind dann noch die Druckstücke mit beiden Doppelkeilpaaren bei  $D$  nach Fig. N eingesetzt, so kann die Vorkragung des Mittelträgers mittels der Aufstellungsbühnen auf dem Obergurt von beiden Enden her durchgeführt werden, und zwar geschieht das nach Fig. L von einer Seite (links) etwas über den Mittelknoten hinaus, von der anderen (rechts) nicht ganz bis zum Mittelknoten, so dass die Aufstellungsbühnen zuletzt über den zeitweiligen Stützen in den der Mitte zunächst liegenden Wandgliederdurchkreuzungen stehen und der Schlusspunkt  $E$  rechts vom Mittelknoten erreicht wird. Die Zeichnung N weist in der Einzelausbildung des Fußknotens am Endpfosten des Mittelträgers einige nebensächliche Abweichungen von den Fig. D bis H S. 16 auf, welche bei der endgiltigen Entwurfsfeststellung entstanden sind.

Den Schluss der Aufstellung wird dann die endgiltige Verbindung der beiden vorgekragten Mittelträgerhälften bilden, welche dadurch schwierig wird, dass durch sie zugleich die Ausrichtung des Mittelträgers in der Wagerechten behufs Erzielung guter Geleislage erfolgen muss.

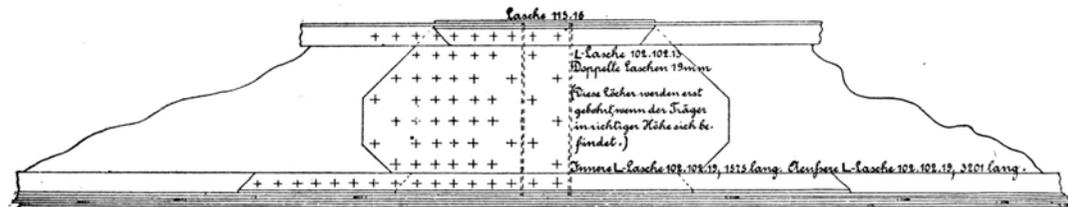
Diesen Teil der Arbeit hofft man im August 1889 mittels der täglichen etwa  $17^{\circ}\text{C}$ . betragenden Wärmeschwankungen zu erledigen.

Die Durchbiegung der vorgekragten Trägerhälften wird zwar sicher wegen der vielen Schraubenverbindungen beträchtlich größer als die berechnete von 203 mm, jedenfalls aber bei sorgfältiger Arbeit an beiden Seiten der Schlussstelle  $EF$  annähernd gleich sein. Die Anhebung in die rich-

tige Höhe geschieht dann in der Weise, dass man zwischen den Kopf jedes Mittelträgerendpfosters  $C$  und jedes Ende des Mittelträgeruntergurtes bei  $E$  starke Zugbänder thunlichst straff einsetzt, wie sie in Fig. L — — — angedeutet sind. Hierauf werden die Gurtenden bei  $E$  bei einem gewissen der höchsten Wärme nahe liegenden Wärmegrade nach Fig. R, S und T in unten zu beschreibender Weise vorläufig mit einander so verbunden, dass eine Gurtspannkraft von 418 t

Detail bei H.

Fig. R.



1:40.

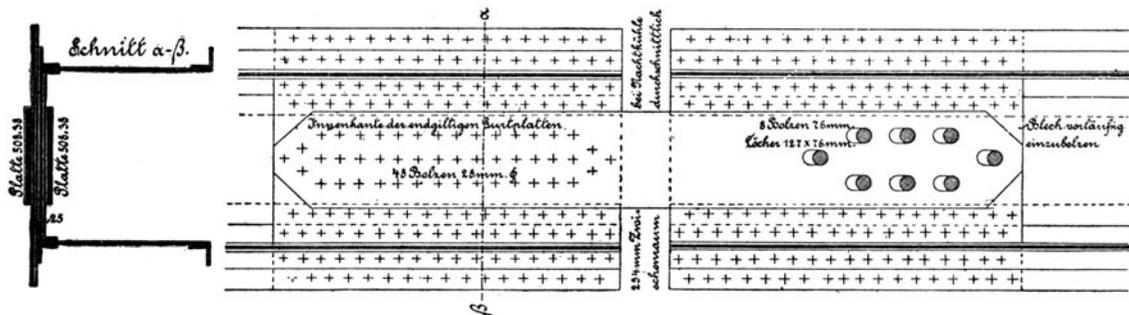


Fig. T.

Fig. S.

(382 t für Eigenlast, 36 t für Wind) durch diese Verbindung aufgenommen werden kann. In diesem Zustande des Trägers wartet man die größte Nachabkühlung — wie oben gesagt um  $17^{\circ}\text{C}$ . — ab, und das dabei eintretende Zusammenschrumpfen der großen Kragarme um je  $207260 \cdot 17 \cdot 0,0000123 = 43 \text{ mm}$  in Verbindung mit der Zusammenziehung der Bänder  $CE$  ruft dann eine Hebung des Punktes  $E$  um 260 mm hervor. Sollte diese der erforderlichen Hebung noch nicht entsprechen, so werden im Augenblicke der größten Abkühlung in den Obergurt bei  $F$  die in Fig. U, V und W angegebenen Doppelkeile in der unten zu beschreibenden Weise eingesetzt, und die Obergurteile so vorläufig zum Schlusse gebracht. Die Doppelkeile bei  $D$  sind während dieses Vorganges vor dem Herausfallen zu sichern. Tritt nun wieder höhere Wärme ein, so werden die Bänder  $AB$  und  $CE$ , durch die Verbindungen bei  $E$  und  $F$  auf Zug bezw. Druck außer Thätigkeit gesetzt, schlaff und können im Augenblicke höchster Wärme nachgespannt zu einem zweiten Hube der Punkte  $E$  und  $F$  benutzt werden; sollte nun dieser oder auch schon der erste bei voller Abkühlung über das gewünschte Maß der Hebung hinausgehen, so treibt man die Keile bei  $F$  nicht im Augenblicke größter Abkühlung fest an, sondern wartet damit, bis die Trägermitte bei wieder beginnender Erwärmung auf die herzustellende Höhenlage abgesunken ist. Man hat also im Wärmewechsel ein Mittel, um den Mittelträger in jede Höhenlage mit ziemlich großer Genauigkeit einzustellen. Ist der Träger richtig eingestellt, so werden die vorläufigen Verbindungen bei  $E$  und  $F$  gegen die endgiltigen ausgewechselt, ferner die Doppelkeile bei  $D$  bei größter Abkühlung und die Bänder  $AB$  und  $CE$  bei größter Wärme in lastlosem Zustande herausgenommen. Zugleich mit Herstellung des vorläufigen Schlusses bei  $E$  mussten die Mittelgelenke bei  $D$  (Figur 11 bis 15 Tafel VI) beide beweglich gemacht werden; nach Wegnahme der Hilfsbänder bringt man nun den Mittelträger, wenn er nicht genaue Längstellung haben sollte, wieder durch Ausnutzung der Wärmeänderungen mittels wechselweisen Festlegens des Trägers am einen und anderen Ende in die richtige Längseinstellung zu den Kragarmenden, und macht schliesslich

eines der beiden Gelenke bei  $D$  in der Weise unverschieblich, wie es auf Seite 17 beschrieben ist. Damit ist die Arbeit der Aufstellung erledigt.

Die Verbindung bei  $E$  wird vorläufig und endgiltig nach Fig. R, S und T hergestellt. Von dem Gurtquerschnitte, welcher, auf den Kopf gestellt, dem in Fig. P dargestellten gleicht, mit je drei Fußplatten der in Fig. S gestrichelt angegebenen Breite unter jeder Hälfte, werden in der Nähe von  $E$  diese in Fig. R in endgiltiger Anordnung gezeichneten sechs Fußplatten auf größere Länge weggelassen und durch zwei dem Gurte einen vollen Boden gebende breite Platten (Fig. T) ersetzt, welche mit den Enden der endgiltigen Fußplatten mittels Bolzung verlascht, außerdem mit den Winkeleisen und untereinander verbolzt werden. Zugleich wird ein Füllblech auf diese Platten zwischen die wagerechten Winkelschenkel und eine dritte Verbindungsplatte auf die letzteren gelegt und verbolzt. Die so ausgestatteten Gurtenden werden so abgelängt, dass sie bei durchschnittlicher Nachkühle 254 mm ( $10''$ ) offenen Zwischenraum haben. Behufs vorläufiger Verbindung der Gurtenden werden auf der einen Fugenseite zwei starke Platten von 508 mm  $\times$  38 mm ( $1'8'' \times 1\frac{1}{2}''$ ) Querschnitt mit 48 Bolzen von 28 mm ( $1\frac{1}{8}''$ ) Dmr. auf und unter die drei Bodenplatten nebst Füllblech gebolzt; auf der anderen Seite der Fuge werden 8 Löcher für 76 mm ( $3''$ ) starke Bolzen in die drei Bodenplatten gebohrt, welchen in den beiden Verbindungsblechen 8 längliche Löcher von 127 mm  $\times$  76 mm ( $5'' \times 3''$ ) entsprechen. In dem Augenblicke, in welchem man den Wärmegrad für geeignet hoch zur Erzielung der beabsichtigten Hebung hält, werden diese 8 Bolzen eingesetzt und gegen Verschiebung in den länglichen Löchern der Verbindungsbleche durch Beilagekeile gesichert. In diesem Zustande des Untergurtes geht die Hebung vor sich. Ist die richtige Höhenlage durch Schließung des Obergurtes mittels Einsetzung der Keile bei  $F$  gesichert, so kann die endgiltige Verbindung bei  $E$  ausgeführt werden. Zu dem Ende werden zuerst die oberen Wandwinkel mittels innerer Winkelasche und äußerer Flachlasche durch Nietung verbunden, wobei ein Passtück in die offene Fuge

gesetzt wird; dann werden die lotrechten Blechwände mittels doppelter Laschbleche vernietet, wobei die Nietlöcher auf einer Seite nach Anpassen an Ort und Stelle gebohrt werden; auch in die Wände werden Passstreifen gefügt. Weiter können auch die Winkelaschen der äußeren Winkelleisen im unteren Teile jeder Querschnittshälfte in endgültiger Lage festgebolt werden, und damit ist der Querschnitt kräftig genug, um das Trägergewicht und mälsigen Wind aushalten zu können. Es ist somit nun möglich, die großen Verbindungsplatten nebst den drei Bodenblechen mit Einlage loszunehmen, dafür die fehlenden Stücke der drei Fußplatten mit einem vierten Laschstreifen sowie die inneren Winkelaschen mit den Passstücken der unteren Winkel einzusetzen und endgiltig so zu vernieten, wie es in Fig. R dargestellt ist.

Die Verbindung des Obergurtschlusses bei *F* (Fig. L) wird folgendermaßen ausgeführt. Auf einer Seite der hier nur schmalen Lücke in den 25 mm starken Blechwänden (in Fig. U und V links) wird mittels versenkter Niete eine doppelte Verstärkung von je 13 mm Dicke aufgenietet; dieselben Verstärkungen werden auf der anderen Seite (rechts) mit 30 Bolzen von 25 mm Dmr. nur aufgebolt, und zwar zugleich mit zwei 19 mm dicken Laschen, welche die Verstärkungen der anderen Seite (links) umgreifen und über diese noch so weit hinausragen, dass außerhalb Platz für ebenfalls 30 Bolzen bleibt. Damit diese Laschen links nicht abklaffen können, bevor sie befestigt sind, werden zwei Platten von der Breite der Wandverstärkung durch zwei lotrechte Winkelleisen versteift übergelegt und unter Einlage kleiner Füllstücke auf die oberen und unteren Gurtwinkel festgebolt; die beiden langen Laschen können also hinter diesen Deckeln gleiten.

In diesem Zustande erfolgt die oben geschilderte Hebung des Mittelträgers in die vorgeschriebene Höhe, und wenn diese im Augenblicke größter Wärme oder bei Wärmeabnahme erreicht ist, so erfolgt der vorläufige Schluss durch Eintreiben von Doppelkeilen zwischen die verstärkten Blechwände und die großen Laschen. Sind mehrere Hebungsstufen zur Erreichung der richtigen Höhenlage erforderlich, so müssen die Keile eben so oft nachgetrieben werden.

Ist die richtige Höhenlage hergestellt, so erfolgt der endgiltige Schluss, indem die 30 Löcher in die freien

Detail bei *F*.

Fig. U.

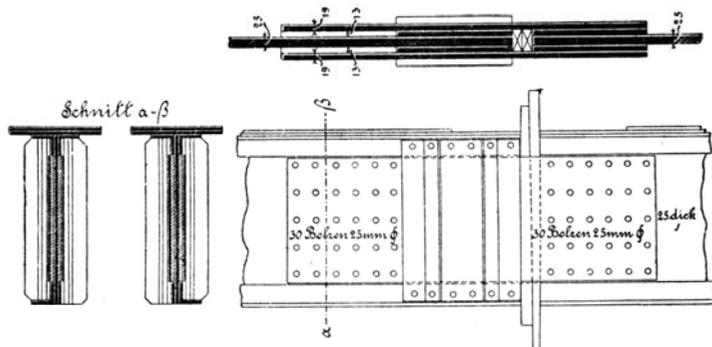


Fig. W.

Fig. V.

Enden der Laschen (links), die darunter liegenden Füllstücke und die Blechwand gebohrt und die Befestigung zunächst durch Bolzen bewirkt wird. Die Keile werden nun bei größter Abkühlung entfernt und durch Passstücke von der Höhe der Blechwand ersetzt; gleichzeitig werden die 60 Bolzen der Laschen durch Niete ausgewechselt, schliesslich die Winkelleisen unter Einsetzung von Passstücken und ebenso die oberen Kopfplatten verlascht. Hierauf sind, nachdem die Keile bei *D* (Fig. L) schon bei der ersten Anhebung beseitigt wurden, bei höchster Wärme die Bänder *AB* und *CE* zu beseitigen.

Diese Darstellung entspricht dem augenblicklichen Stande des Entwurfes, welcher jedoch noch nicht in allen Punkten völlig durchgearbeitet ist. Ein naheliegendes anderweites

Mittel zur Ausrichtung des Mittelträgers: Wasserdruckpressen bei *D* (Fig. L) einzusetzen, wurde nicht weiter durchdacht, weil für die erforderlichen starken Pressen von 400 t Leistung an jedem Fuße eines Mittelträgerendpfostens nur sehr schwer Platz zu schaffen ist.

Die Baustelle kann in ganzer Ausdehnung elektrisch und durch Lucigen-Fackeln erleuchtet werden, und ihre sämtlichen Teile haben Telephonverbindung mit den Verwaltungsmittelpunkten. Die Zahl der Arbeiter schwankt je nach der Jahreszeit zwischen 3000 und 4000.

Die Gesamtkosten belaufen sich nach dem Vorschlage auf 34 Millionen Mark.

Zum Schlusse mag noch erwähnt werden, dass der Bau inzwischen rüstig vorwärts schreitet. Im Monate September sind 2240 t Stahl bearbeitet und eingebaut, eine Zahl, welche in den folgenden Monaten noch überschritten ist. Jetzt (Mitte November) sind in den Kragarmen die drei ersten Wandgliedkreuze fertig gestellt, also Ausladungen von 134 m von den Pfeilereckpfosten erreicht, und nach diesen Fortschritten ist mit Sicherheit anzunehmen, dass die Uebergabe des Bauwerkes an den Betrieb im Oktober 1889 erfolgen wird. Wer den Bau also noch im Entstehen sehen will, der eile!

Obwohl die vorstehende Beschreibung beträchtliche Länge erreicht hat, berührt sie doch nur die wichtigsten Teile des Bauwerkes und der Arbeitsvorgänge. Auch nach Durchsicht der Beschreibung wird der die Baustelle besuchende Ingenieur noch eine überaus reiche Ausbeute an neuen zweckmäßigen Maßnahmen und Einzelanordnungen, sowohl bezüglich des Baues selbst wie der Hilfseinrichtungen, erzielen können; es kann daher ein längerer Aufenthalt an Ort und Stelle nicht dringend genug empfohlen werden.

Den englischen Fachgenossen müssen wir zu der rücksichtslosen Thatkraft und geistvoll schöpferischen Leistungsfähigkeit, welche sie bei der Ueberwindung der der Ausführung dieses Bauwerkes entgegenstehenden bisher beispiellosen Schwierigkeiten gezeigt haben, in neidloser Anerkennung Glück wünschen, wenn auch das mitgenommene Bild der Entstehung des Werkes dem Besucher den Wunsch erwecken muss, dass die so lebhaft fortschreitende Entwicklung unseres Vaterlandes auch den deutschen Fachgenossen durch die Stellung ähnlicher Aufgaben Gelegenheit zur Bethätigung ihres Wissens und Könnens gewähren möge.

### Schlussbetrachtungen.

Ein abschließendes Urteil über das Bauwerk heute zu fällen, erscheint bei dem völligen Mangel an Erfahrungen über Zweckmäßigkeit und Wert eines solchen Baues vermessen. Dieser hat sich, trotzdem seine Fertigstellung erst in etwa Jahresfrist zu erwarten steht, bereits ebenso entschiedene Gegner wie Freunde erworben, doch dürfte beider Urteil fürs erste kaum als maßgebend anzusehen sein, bis die Erfahrung auch hier als untrügliche Lehrmeisterin auftritt.

Einige Punkte, welche besonders naheliegend dem Urteile zugänglich und auch bereits mehrfach besprochen sind, mögen hier noch kurz berührt werden.

Die äußere Gestaltung der Brücke wird von vielen als das Schönheitsgefühl verletzend hingestellt. Es muss in dieser Beziehung zugegeben werden, dass sich die strengen, durch die riesenhaften Glieder gebildeten, eckigen, geometrischen Gebilde und Linienzüge der landschaftlich recht schönen Umgebung mit den eigenartigen Umrisslinien der Schottischen Hochlande im Hintergrunde nicht einheitlich einfügen; das Bauwerk will an sich betrachtet sein, und eine Verschönerung der Gegend, wie sie z. B. die Coblenzer Bogenbrücken bilden, giebt die Forth-Brücke nicht ab. Aber auch an sich betrachtet gewinnt die Aufsicht entschieden, wenn man die obere Hälfte bis zur Oberkante der Mittelträger wegschneidet und durch einen wagerechten Abschluss ersetzt, so dass die Gestalt eines Bogens mit versteifendem Obergurte

entsteht; auch könnte man zur Vermeidung des hässlichen Umrisses, welcher aus den vom Mittelträgerbogen und den Wagerechten über den Pfeilertürmen unterbrochenen langen Geraden des Obergurtes entsteht, zum Vorschlage eines nach unten gekrümmten Obergurtes als Gegenbild des Untergurtes und so zur Gestalt der vereinigten Hänge- und Bogenbrücke gelangen. Beide Gestaltungen sind auch bei den Vorarbeiten wohl ins Auge gefasst, aber aufgegeben, weil sie der Ausführung zu große Schwierigkeiten entgegengesetzten. Die Gestalt des versteiften Bogens ergab, nachdem man einmal die Notwendigkeit der Vermeidung von Scheitelschüben behufs Ermöglichung der Anordnung von Kragträgern mit Gelenken erkannt hatte, zu geringe Höhe über den Stützpunkten und Querschnittsgrößen an dieser Stelle, deren Ausführung Bedenken erregte. Auch wäre der gerade Obergurt des versteiften Bogenträgers zum teil Druckspannungen ausgesetzt, während er bei der Aufstellung als Zugband hätte dienen müssen, wenn man nicht zu kostspieligen Hilfsbauten greifen wollte, und so wäre der jetzt durchgeführte, als vernünftig anzuerkennende Grundsatz durchbrochen, jedem Gliede schon bei der Aufstellung diejenige Art von Beanspruchung zu geben, der es auch später ausgesetzt sein sollte. Die Aufstellungsarbeit mit leichten Hilfsbauten von der Mississippi-Brücke bei St. Louis und der Douro-Brücke führt jedenfalls zu bedeutenderen Formänderungen während der Aufstellung, als die endgültige Einbauung und Benutzung jedes Gliedes von vorn herein, und die schließliche Beseitigung dieser Fehler hat selbst bei kleineren Bauten zu Gewaltmaßregeln geführt, welche man vom Standpunkte des Verlangens sorgsamer Behandlung für alle Teile nicht durchweg loben kann.

Minder gewichtige Bedenken stehen dem Vorschlage der Krümmung des Obergurtes nach unten entgegen; hier kann nur die wesentliche Verteuerung der Herstellung durch die verwickeltere Lösung der Knoten aufgeführt werden, welche namentlich mit Rücksicht auf die Querneigung der Tragwände nicht gering anzuschlagen ist. Der Verfasser ist überzeugt, dass man auch für das Untergurtrohr die gerade Form gewählt haben würde, wenn dieser bei der tiefen Lage der Fußpunkte nicht die geforderte Größe der Durchfahrtsöffnung für Seeschiffe entgegengestanden hätte.

Man erkennt, dass die gewählte Form ihren Ursprung lediglich der rücksichtslosen Betonung der statischen und Kostenermittlungen verdankt, und von diesem Standpunkte aus wird man sich auch mit ihr befreunden können.

Dass die Krümmung des Untergurtes nicht in den unteren Eckpunkt des Pfeilerrahmens einschneidet, sondern zu weit aufsen ansetzt, ist oben erwähnt. Diese Unregelmäßigkeit fällt an Ort und Stelle noch mehr in die Augen als auf der Zeichnung und muss entschieden als Fehler bezeichnet werden, dessen Entstehung um so unerklärlicher bleibt, als die Gewinnung hinreichender Lagerfläche und die Lösung des Fussknotens durch richtige Zusammenführung der jetzigen Ausführung gegenüber kaum erschwert wären.

Die Errichtung steinerner Pfeiler in den drei Hauptstützpunkten, welche mehrfach befürwortet ist, würde entschieden manche Härten der Erscheinung beseitigt, weiter unten zu berührende Bedenken bezüglich der Dauerhaftigkeit zum teil gehoben, vielleicht sogar die Aufnahme der Schübe einer Bogenanordnung ermöglicht haben. Der dadurch bedingte Aufwand an Zeit und Kosten lässt aber das Nichteingehen auf diesen Gedanken bei einem aus den Mitteln von nur vier Eisenbahngesellschaften errichteten Bauwerke durchaus gerechtfertigt erscheinen.

Die Wahl der Querschnitte, insbesondere die Ausbildung der Druckglieder als Rohre, ist gleichfalls angefochten worden. Durch Vermehrung der Anzahl der Glieder und Verringerung der Einzelquerschnitte in den Tragwänden hätte man sicher den freilich eigenartigen und ungewohnten Anblick der klaren, riesigen, geometrischen Formen vermieden, vielleicht auch gewisse Erleichterungen in der Ausbildung der einzelnen Glieder und Knoten namentlich durch Umgehung der Rohrform erzielt. Damit wäre aber die erhebliche Ersparung geschwunden, welche durch die Sammlung des Stahles in wenige große Glieder liegt, und welche die Mehrkosten der schwierigen Verbindungen überwiegt. Ähnliches ist betreffs der Wahl des Rohrquerschnittes zu sagen, deren Un-

zweckmäßigkeit aus den Schwierigkeiten der Knotenverbindungen gefolgert wird. Auch hier verschlagen die den Verbindungen von Kastenquerschnitten gegenüber entstehenden Mehrkosten der Knoten bei der ungewöhnlichen Länge der Glieder weniger, als die Ersparung an Stahl und die Vereinfachung der Herstellung, welche durch die Rohrform ermöglicht werden. Hinzu kommt noch, dass die geschlossenen Rohre anderen Querschnitten an Steifigkeit wegen gleichmäßiger Verteilung der Herstellungsfehler noch mehr überlegen sind, als die theoretische Nachrechnung ergibt. Wie aus der Beschreibung der Knoten hervorgeht, ergaben sich beträchtliche Schwierigkeiten auch nur in den wenigen Knoten, wo Rohre mit Rohren zu verbinden waren; die Verbindung der Rohre mit den Zuggliedern hatte nennenswerte Schwierigkeiten nicht zur Folge. Die Ueberführung der Rohre an den Verbindungsstellen in das Quadrat oder Rechteck ist freilich keine »schöne Lösung«, bedingt erhebliche Verstärkungen und setzt eine Geschicklichkeit und Hilfsmittel bei der Ausführung voraus, wie sie nicht überall zu finden sind; nimmt man aber hinzu, dass die Rohre vom Winde beträchtlich weniger in Anspruch genommen werden als andere Formen, so liegen genügend überwiegende Vorteile auf Seiten der ersteren, um ihre Wahl begründet erscheinen zu lassen.

Aus der Erwärmung durch die Sonnenstrahlen lassen sich wesentliche Vorzüge der Rohrform oder aufgelöster Querschnitte nicht ableiten; denn während das geschlossene Rohr Spannungen durch einseitige Erwärmung am besten ausgleicht, die bedeutende eingeschlossene Luftsäule auch im ganzen abkühlend wirkt, liegt bei dem aufgelösten Querschnitte wenigstens zeitweise die Möglichkeit vor, dass alle Teile ziemlich gleichmäßig erwärmt werden. Schiefe Beanspruchungen bei Sonnenschein werden im Rohre dauernd, aber in minderem Grade, im aufgelösten Querschnitte vorübergehend bei gewissen Richtungen der Sonnenstrahlen, dann aber in bedeutenderem Maße auftreten.

Augenblicklich liegt ein Entwurf des Ingenieurs Lindenthal für die Ueberbrückung des Hudson in New-York mit einer Hauptöffnung von etwa 860 m Weite für 10 Eisenbahngleise zu 6 und 4 übereinandergelegt vor, welcher freilich völlig abweichende und in der äußeren Erscheinung wesentlich gefälliger Formen zeigt. Das Tragwerk wird hier von zwei Paaren durch Netzwerk gegen einander versteifter Stahldrahtkabel von 1219 mm (4') Dmr. gebildet, und die Gesamtanordnung ist die einer Hängebrücke auf zwei Türmen mit zwei halben Seitenöffnungen. Ob es aber gelingen wird, einem solchen Bauwerke die nötige Seitensteifigkeit zu geben und die Drähte wie bei der East-River-Brücke hinreichend gleichmäßig zu spannen, dürfte noch zweifelhaft erscheinen; jedenfalls kann dieser Versuch heute noch nicht als eine Widerlegung der Annahme der Notwendigkeit unbeweglicherer Fügung für die Forthbrücke aufgeführt werden.

Zwei Punkte sind es namentlich, welche dem Verfasser ernstere Bedenken erregen als die oben aufgeführten; diese sind der Rost und die Anordnung des Windverbandes.

Der Rost tritt in der Nähe der Meeresoberfläche, namentlich im Bereiche des Wellengichtes, in ungewöhnlich starkem Maße auf; der Verfasser beobachtete in dieser Beziehung, dass auf den hinteren Teilen der noch im Bau befindlichen Molen von Tynemouth die auf der Brustwehr liegenden Schienen stärksten Querschnittes für den Mammutkran zum Versetzen der Betonblöcke seit Beginn des Baues, also in wenigen Jahren, bis auf unbedeutende Reste, welche die Lage erkennen ließen, weggerostet waren, und größere Teile der Brücke, so z. B. die Köpfe der Pfeilereckpfosten für Inch-Garvie, hatten sich schon während der Zusammenfügung auf dem hochgelegenen Werkplatze trotz des Mennigeanstriches mit einer dichten Rostschicht bedeckt. Ob es gelingen wird, die ungeheuren Oberflächen, welche an den gefährlichsten Stellen, den Pfeilerfüßen, sehr schwer zu prüfen und höchst unbequem zu bedienen sind, genügend in Reinigung und Anstrich zu erhalten, unterliegt gerechten Zweifeln. Dieses Bedenken würde durch höhere Erhebung der Stahlteile über die Wasseroberfläche, also namentlich durch die oben erwähnte Errichtung von Steinpfeilern, abgeschwächt sein.

Der Windverband ist nach den obigen Schilderungen nur zwischen den Pfeilereckpfosten und den gedrückten Wandgliedern aufrecht, sowie zwischen den Untergurtrohren liegend eingefügt mit der Begründung, dass man die Windkräfte thunlichst unmittelbar, nicht zum teil auf dem Umwege durch den Obergurt nach den tiefsten Punkten, den Köpfen der Steinpfeiler, führen wolle, um die Gefahr seitlichen Kippens, also die Verankerung, thunlichst schwach zu halten. Nun hat aber die Einfügung bestimmter Arten von Queraussteifung gar keinen Einfluss auf die Lage des Angriffspunktes der Mittelkraft aus den Winddrücken, also auch nicht auf die Standfestigkeit des räumlichen Fachwerkes und die Stärke der Verankerung, und es ist also durch die beschränkte Anordnung des Windverbandes keine gröfsere Widerstandsfähigkeit sondern nur eine lockerere Fügung erreicht als die mit durchgeführter Windverkreuzung namentlich auch im Obergurte. Die Wandsteifen ragen wie eine unten eingespannte, oben ganz freie Stütze in die Luft und werden so eines oberen Stützpunktes entbehrend durch die Winddrücke

die Fahrbahn, Wand und Obergurt in ungünstiger Weise beeinflussen; sie befinden sich sämtlich in der schlimmen Lage des Pfostens einer Fachwerkbrücke mit unten liegender Fahrbahn, an welchem der obere Windverband aufhört. Ausserdem wird das Rohrpaar des Untergurtes durch die seitliche Biegung der frei aufragenden Wandsteifen in ungünstiger Weise auf Verdrehen in Anspruch genommen; hätte man dem Obergurte Windverband gegeben, so hätten freilich die Pfeilereckpfosten und deren Queraussteifungen etwas kräftiger werden müssen, dafür hätten aber die Verkreuzungen der Wandglieder schwächer sein können, die Verdrehung der Untergurte wäre entfallen und die Festigkeit des Gefüges des ganzen Bauwerkes wesentlich erhöht worden.

Der Verfasser hofft, durch die Beschreibung der Forthbrücke wie auch die angeschlossenen Bemerkungen den Fachgenossen Anlass zu weiteren Aeufserungen über das für die Entwicklung des Brückenbaues so überaus wichtige Bauwerk gegeben zu haben.

*Additional material from Die Forth-Brücke,*  
ISBN 978-3-642-50598-0, is available at <http://extras.springer.com>

