

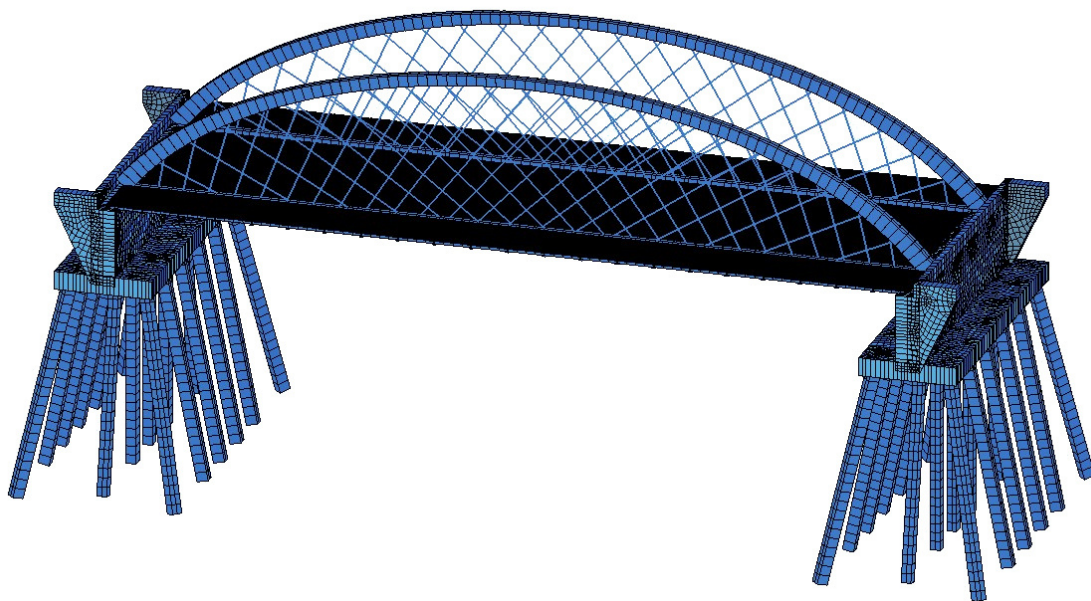


**BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL**

Entwurf einer Netzwerkbogenbrücke aus Stahl

**Thesis zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science (M. Sc.)**

Im Studienfach Bauingenieurwesen



Betreut durch:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Naujoks
Lehr- und Forschungsgebiet Stahlbau und Verbundkonstruktionen
Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
Bergische Universität Wuppertal

Dipl.-Ing. Arndt Meurs
MTM Ingenieure GmbH
Düsseldorf

Vorgelegt von:

Florian Sacher, 1328405

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Stellen der Abschlussarbeit, die anderen Werken dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, in jedem Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung.

Wuppertal, den 17.06.2020

Florian Sacher, 1328405

Aufgabenstellung Master Thesis

Florian Sacher Matr.- Nr.: 1328405

Entwurf einer Netzwerkbogenbrücke aus Stahl

Herr Sacher wird in seiner Masterarbeit eine Ganzstahlbrücke entwerfen. Am Beispiel einer innerstädtischen Straßenbrücke in Düsseldorf, die als Stabbogenbrücke mit Stahlverbundfahrbahnplatte gebaut wird, plant Herr Sacher einen alternativen Entwurf mit gleichem Regelquerschnitt und gleicher Spannweite.

Vorgegeben ist das statische System einer Netzwerkbogenbrücke mit orthotroper Stahlfahrbahnplatte. Zusätzlich soll Herr Sacher untersuchen, ob sich in Teilbereichen der Einsatz von S460 lohnt und ob gegebenenfalls Walzprofilen für Bogen und Versteifungsträger eingebaut werden können.

Nach einer Variantenuntersuchung, insbesondere für die Anordnung der Seile, wird Herr Sacher für die favorisierte Variante eine Entwurfsstatik einschließlich der Nachweise für die Leitdetails erstellen.

Mit einer abschließenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird die Netzwerkbogenbrücke in Ganzstahl mit dem Amtsentwurf Stabbogenbrücke verglichen.

Betreuer:

03.12.2019

Prof. Dr.-Ing. Bernd Naujoks

Dipl.-Ing. Arndt Meurs

Inhalt

1	EINLEITUNG	...1
2	BRÜCKENTYPEN	...4
2.1	Plattenbrücken und Balkenbrücken in Vollwandträgerbauweise	...4
2.2	Fachwerkbrücken	...10
2.3	integrale und semiintegrale Brücken	...13
2.4	Schrägseilbrücken	...17
2.5	Hängebrücken	...23
2.6	Zügelgurtbrücken	...27
2.7	Spannbandbrücken	...30
2.8	Mischbauwerke	...32
2.9	Bogenbrücken	...33
2.9.1	echte Bogenbrücken	...33
2.9.2	unechte Bogenbrücken	...36
2.9.2.1	Stabbogenbrücken	...37
2.9.2.2	Netzwerkbogenbrücken	...39
2.10	Abschließende Beurteilung	...42
3	THEORIE DER NETZWERKBOGENBRÜCKE	...43
3.1	Bogenform	...43
3.2	Bogenquerschnitt	...45
3.3	Hänger und Hängeranschlüsse	...46
3.4	Hängernetz	...51
3.5	Orthotrope Fahrbahnplatte	...55
4	MODELLIERUNG IN SOFISTIK	...60
4.1	Allgemeines	...60
4.2	Versteifungsträger	...61
4.3	Querträger Fahrbahn	...63
4.4	Endquerträger Fahrbahn	...66
4.5	Längssteifen Fahrbahn	...67
4.6	Querträger Geh- und Radweg	...71
4.7	Endquerträger Geh- und Radweg	...73
4.8	Längssteifen Geh- und Radweg	...74
4.9	Bögen	...76
4.10	Hänger	...79
4.11	Einteilung in Stabgruppen	...80
4.12	Lagerbedingungen	...81
5	BEMESSUNGSRUNDLAGEN	...82
5.1	Allgemeines	...82
5.2	Kombinationsvorschriften und Beiwerte für die Bemessung	...82

5.3	Lastansätze	...85
5.4	Ständige Lasten	...85
5.4.1	Eigengewicht (Lastfall 1)	...85
5.4.2	Ausbaulast (Lastfall 2)	...85
5.5	Veränderliche Lasten	...87
5.5.1	Verkehrslasten	...87
5.5.2	Vertikale Verkehrslasten	...88
5.5.2.1	Lastmodell 1	...88
5.5.2.2	Lastmodell 2	...91
5.5.2.3	Lastmodell 3	...91
5.5.2.4	Lastmodell 4	...91
5.5.3	horizontale Verkehrslasten	...91
5.5.4	Lasten auf Fußgänger- und Radwege	...92
5.5.5	Verkehrslast Lagerwechsel	...95
5.5.6	Militärische Lasten	...96
5.5.7	Windlast (Lastfall 10-11)	...96
5.5.8	Schneelast	...102
5.5.9	Lasten aus Temperatur (Lastfall 50-55)	...102
5.5.10	Baugrundbewegungen (Lastfälle 500-501)	...107
5.5.11	Imperfektion	...108
5.5.12	Ermüdung (Lastfall 400-404, 420-424)	...108
5.6	Außergewöhnliche Lasten	...110
5.6.1	Anprall an Schrammbord (Lastfall 300-302)	...110
5.6.2	Anprall an Bogen (Lastfall 310-312)	...111
5.6.3	Hängerausfall	...111
5.6.4	Fahrzeuge auf Geh- und Radweg (Lastfall 320-327)	...112
5.6.5	Geländeranprall	...113
5.6.6	Anprall an Überbau (Lastfall 340-341)	...113
5.6.7	Erdbeben (Lastfall 350-355)	...113
6	NACHWEISE IM GRENZZUSTAND DER TRAGFÄHIGKEIT	...116
6.1	Allgemeines	...116
6.2	Versteifungsträger	...124
6.3	Bogen Scheitel	...127
6.4	Bogen Kämpfer	...139
6.5	Hänger	...146
6.6	Endquerträger Fahrbahn	...146
6.7	Endquerträger Kragarm	...154
6.8	Querträger Fahrbahn	...162
6.9	Querträger Kragarm	...170
6.10	Längssteife Fahrbahn	...173
6.11	Längssteife Kragarm	...180
6.12	orthotrope Platte Fahrbahn (Deckblech Fahrbahn)	...187
6.13	orthotrope Platte Kragarm (Deckblech Kragarm)	...195
6.14	Leitdetail Lagerknoten	...201
6.14.1	Einwirkungen	...203
6.14.2	Auflager	...206
6.14.3	Auflagersteife	...206

6.14.4	Aussteifung des Endquerträgers der Fahrbahn	...209
6.14.5	Aussteifung des Bogenanschlusses	...213
6.14.6	Erkenntnisse aus dem Knotenmodell	...216
6.14.7	Pressenstellplätze und andere Auflager	...216
6.15	Leitdetail Querträgerknoten	...217
6.15.1	Einwirkungen	...218
6.15.2	Anschluss Querträger Kragarm	...218
6.15.3	Anschluss Querträger Fahrbahn	...223
6.15.4	Aussteifung	...228
6.16	Leitdetail Hängeranschluss	...239
6.17	Brückenwiderlager	...242
6.17.1	Geometrie des Widerlagers	...242
6.17.2	Widerstände	...243
6.17.3	Erddruck	...244
6.17.4	Einwirkungen aus den Brückenlagern	...245
6.17.5	überschlägiger Nachweis	...245
7	NACHWEISE IM GRENZZUSTAND DER GEBRAUCHSTAUGLICHKEIT	...247
7.1	Ermüdung	...247
7.1.1	Allgemeines	...247
7.1.2	Versteifungsträger	...252
7.1.3	Bogen	...254
7.1.4	Querträger	...257
7.1.5	Endquerträger	...262
7.1.6	Lager	...268
7.1.7	Hänger	...270
7.2	Verformung	...271
7.3	Überhöhung	...272
7.4	Spannungsbegrenzung	...273
7.5	Blechatmen	...274
7.6	Lichtraumprofil	...274
7.7	Komfortkriterien für Fußgänger	...274
7.8	Ausführungsklassen	...275
7.9	Nachweis der Z-Güten	...275
7.10	Korrosionsschutz	...279
7.11	Fahrzeugrückhaltesysteme	...282
8	WIRTSCHAFTLICHKEITSRECHNUNG	...285
8.1	Vergleich von S355- und S460-Stahl	...285
8.2	Vergleich der geplanten Brücke und der gebauten Brücke	...296
9	FAZIT	...303
10	ANHANG (SIEHE ORDNER)	...305
11	LITERATURVERZEICHNIS	...306

9 Fazit

Zum Abschluss dieser Arbeit sollen die besprochenen Themen noch einmal kurz zusammengefasst werden und anschließend die daraus gewonnenen Erkenntnisse präsentiert werden.

Zunächst wurde im Rahmen der Einleitung die Geschichte der Netzwerkbogenbrücken dargestellt und die Aufgabenstellung erläutert. Anschließend, in Kapitel 2, wurden verschiedene Brückenarten charakterisiert und schließlich die Eignung für den Brückenstandort Heerdter Lohweg in Düsseldorf diskutiert. Es stellte sich heraus, dass mehrere Brückentypen für den Standort geeignet sind. Der Brückentyp „Netzwerkbogenbrücke“ wurde schlussendlich gewählt, weil die Funktionsweise des Tragsystems deutlich von dem einer semiintegralen Stabbogenbrücke abweicht und sich das Tragwerk ästhetisch ansprechend aber zurückhaltend in die Umgebung einfügt. In Kapitel 3 wurden konstruktive Besonderheiten der geplanten Netzwerkbogenbrücke besprochen, darunter das Hängersystem und die Hängeranschlüsse, die Gestaltung des Bogens und die orthotrope Fahrbahnplatte.

Die geplante Netzwerkbogenbrücke wurde schließlich in SOFiSTiK modelliert und berechnet. Kapitel 4 zeigt das dort angelegte System und die verwendeten Querschnitte, Kapitel 5 leitet die angesetzten Lasten her und erläutert diese. Die Bemessung der geplanten Brücke erfolgt anschließend im Kapitel 6 im Grenzzustand der Tragfähigkeit und im Kapitel 7 im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Abschließend wird die geplante Brücke im Kapitel 8 hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit untersucht. Dabei wird zunächst darauf eingegangen, dass die Versteifungsträger und die Bögen als besonders stark belastete Querschnitte in einer höheren Stahlgüte ausgeführt werden könnten, um Material- und Kosteneinsparungen zu erreichen. Danach wird die geplante Brücke mit der gebauten Brücke zuerst anhand einiger konstruktiver Details verglichen, daraus wird danach eine Vergleichsrechnung der zu erwartenden Herstellungskosten abgeleitet.

Die Arbeit zeigt, dass am Standort Heerdter Lohweg in Düsseldorf eine Netzwerkbogenbrücke mit orthotroper Fahrbahn umsetzbar ist.

Im Laufe der Bearbeitung der Aufgabe zeigte sich, dass die Gestaltung des Hängernetzes und des Bogens große Auswirkungen auf das Tragverhalten der Brücke haben. Das Hängernetz wurde von Beginn an mit einer hohen Hängeranzahl konzipiert um zu erreichen, dass die Lasteinleitung der Hängerkräfte in den Bogen und in den Versteifungsträger keine unverhältnismäßig großen Biegemomente erzeugt. Diese Maßnahme kann als gelungen und wirkungsvoll angesehen werden. Die Ausarbeitung eines geeigneten Bogens stellte sich als größere Herausforderung dar. Nach der Literaturrecherche stand fest, dass ein elliptischer Bogen verwendet wird, jedoch musste im Anschluss ausprobiert werden, welche Bogenhöhe genutzt werden soll. Es wurde mit einer Bogenhöhe von $L/5,5$ ein Kompromiss aus ansprechender Optik durch eine flachen Bogen und geringen Verformungen durch einen hohen Bogen erzielt. Dazu angestellte Vorversuche mit den Bogenhöhen $L/6$ und $L/5$ zeigten, dass das Tragwerk empfindlich auf eine Änderung der Höhe des Bogenscheitels reagiert. Daher ist es sinnvoll, eine geeignete Geometrie des Bogens durch Vorversuche herauszufinden.

9. Fazit

Die Verwendung von warmgewalzten HD-Profilen für den Bogen erscheint nach detaillierter Betrachtung nicht sinnvoll für die geplante Brücke und wurde daher nicht weiter berücksichtigt. Warmgewalzte HD-Profile sollten bei schmalere Netzwerkbogenbrücken verwendet werden, bei denen der Bogen durch einen Windverband zusätzlich versteift werden kann.

Die Bemessung zeigt, dass in nahezu allen Querschnitten der Brücke Reserven in der Tragfähigkeit vorhanden sind. Die Querschnittsoptimierung wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Es ist davon auszugehen, dass durch eine Optimierung der Querschnitte die verwendete Stahltonnage und folglich auch die Herstellungskosten der Brücke reduziert werden können. Die Widerlager wurden nur überschlägig berechnet, auch dort besteht im Rahmen einer ausführlichen Nachweisführung die Möglichkeit zur Optimierung und Materialeinsparung. Das Thema Hängerausfälle stellte sich in dieser Arbeit als unproblematisch heraus. Zum einen konnten unter Eigengewicht der Brücke und den üblicherweise auftretenden Lasten aus Verkehr keine Hängerausfälle verzeichnet werden, zum anderen entstehen im Lastfall „Hängerausfall“, bei dem 3 nebeneinanderliegende Hänger aus dem Netzwerk entfernt wurden, keine auffallend hohen Schnittkräfte und Spannungen im Versteifungsträger.

Weitergehend zu betrachten sind die Verformungen am Brückende, da dort die zulässigen Werte von 5 cm für die Übergangskonstruktion laut der Auswertung im Rechenmodell überschritten werden. Es ist zu untersuchen, ob mit den genannten Lösungsansätzen das Problem der zu großen Verformungen auch in der Realität umgangen werden kann.

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsberechnung stellte sich heraus, dass durch Verwendung von S460-Stahl für die Bögen und die Versteifungsträger die Stahltonnage der Brücke verringert werden kann und das Potential besteht, die Herstellungskosten zu senken. Im Vergleich mit der gebauten Brücke wurde überschlägig berechnet, dass die Baukosten für eine semiintegrale Stabbogenbrücke mit Verbundfahrbahnplatte und die einer Netzwerkbogenbrücke mit orthotroper Fahrbahnplatte auf einem ähnlichen Niveau liegen.

Alles in allem zeigen die Erkenntnisse dieser Arbeit, dass die geplante Netzwerkbogenbrücke eine realisierbare und optisch auffällige Entwurfsalternative darstellt, deren Herstellungskosten denen der gebauten semiintegralen Stabbogenbrücke ähnlich sind.