

Holger Svensson

Schrägkabelbrücken

40 Jahre Erfahrung weltweit

Inhalt

1	Einführung.....16	2	Entwicklung der Schrägkabelbrücken.....46
1.1	Konstruktive Grundlagen.....17	2.1	Vorläufer.....47
1.1.1	Allgemeines.....17	2.1.1	Einleitung.....47
1.1.2	Gesamtsystem.....19	2.1.2	Geschichtliche Entwicklung.....47
1.1.2.1	Kabelanordnung.....19	2.1.2.1	Historische Entwürfe.....47
1.1.2.2	Kabelsteifigkeit.....20	2.1.2.2	Erste Ausführungen und Fehlschläge.....48
1.1.2.3	Geometrie.....21	2.1.2.3	John Roebling und die abgespannten Hängebrücken...51
1.1.2.4	Lagerung.....21	2.1.2.4	Schwebefähren.....53
1.1.3	Pylonformen.....23	2.1.2.5	Annäherung an die moderne Form.....55
1.1.3.1	Zwei äußere Kabelebenen.....23	2.2	Schrägkabelbrücken mit Stahlbalken.....58
1.1.3.2	Eine mittlere Kabelebene.....24	2.2.1	Einleitung.....58
1.1.3.3	Gespreizte Mittelaufhängung.....24	2.2.2	Anfänge.....58
1.1.4	Balkenquerschnitte.....24	2.2.3	Die Düsseldorfer Brückenfamilie.....60
1.1.4.1	Stahlquerschnitte.....24	2.2.4	Weitere Rheinbrücken.....62
1.1.4.2	Betonquerschnitte.....25	2.2.5	Andere besondere Stahl-Schrägkabelbrücken.....70
1.1.4.3	Verbundquerschnitte.....26	2.2.6	Stahlschrägkabelbrücken mit Rekordspanweiten.....76
1.1.4.4	Hybridquerschnitte.....26	2.3	Schrägkabelbrücken mit Betonbalken.....80
1.1.4.5	Zweistöckige Querschnitte.....26	2.3.1	Einleitung.....80
1.1.5	Kabel.....26	2.3.2	Entwicklung.....81
1.1.5.1	Systeme.....26	2.3.3	Brücken mit Betonabspannungen.....92
1.1.5.2	Kabelverankerung.....28	2.3.3.1	Riccardo Morandis Brücken.....92
1.2	Gestaltungsrichtlinien.....30	2.3.3.2	Neuere Beispiele.....92
1.2.1	Einleitung.....30	2.3.3.3	Betonwände.....94
1.2.2	Gestaltungsgrundsätze.....30	2.3.4	Brücken mit dünnen Betonbalken.....94
1.2.2.1	Erste Regel: Klares Tragsystem.....30	2.3.5	Rekordspanweiten.....98
1.2.2.2	Zweite Regel: Gute Proportionen.....31	2.6	Schrägkabelbrücken mit Verbundbalken.....101
1.2.2.3	Dritte Regel: Gute Ordnung.....33	2.4.1	Einleitung.....101
1.2.2.4	Vierte Regel: Einpassung in die Umgebung.....34	2.4.2	"Querschnitte.....101
1.2.2.5	Fünfte Regel: Wahl der Baustoffe.....35	2.4.3	Sonderformen.....104
1.2.2.6	Sechste Regel: Farbgebung.....36	2.4.4	Wirtschaftliche Spannweiten.....104
1.2.2.7	Siebente Regel: Raum über der Brücke.....38	2.4.5	Anfänge.....105
1.2.2.8	Achte Regel: Erkennbarer Kraftfluss.....40	2.4.6	Rekordspanweiten.....105
1.2.2.9	Neunte Regel: Beleuchtung.....41	2.4.7	Neuere Beispiele.....111
1.2.2.10	Zehnte Regel: Einfachheit.....42	2.5	Sonderformen.....118
1.2.3	Schlussbetrachtung.....45	2.5.1	Reihen von Schrägkabelbrücken.....118
		2.5.1.1	Lastabtragung.....118
		2.5.1.2	Zwischenpfeiler.....118
		2.5.1.3	Biegesteife Pylonen.....118
		2.5.1.4	Abgespannte Pylonen.....118
		2.5.1.5	Rahmen.....121
		2.5.1.6	Aufnahme der Längsverformungen.....121
		2.5.1.7	Beispiele.....121
		2.5.2	Abgespannte Balken.....130
		2.5.2.1	Unterspannte Balken.....130
		2.5.2.2	Überspannte Balken.....130
		2.5.3	Fußgängerschrägkabelbrücken.....133

3	Seile und Kabel	140	3.7	Kabelbemessung	158
3.1	Allgemeines	141	3.7.1	Allgemeines	158
3.2	Vollverschlossene Seile	141	3.7.2	Nachweise mit zulässigen Spannungen	160
3.2.1	System	141	3.7.2.1	Zulässige Spannungen bei statischer Beanspruchung	160
3.2.2	Herstellung	142	3.7.2.2	Zulässige Schwingbreite beim Dauerfestigkeitsnachweis	160
3.2.3	Moderne Korrosionsschutzsysteme	142	3.7.2.3	Seilausbau	161
3.2.3.1	Allgemeines	142	3.7.3	Nachweise nach dem Tragsicherheitskonzept	161
3.2.3.2	Verzinken der Drähte	142	3.7.3.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit	161
3.2.3.3	Verfüllung	143	3.7.3.2	Ermüdung	161
3.2.3.4	Beschichtung	143	3.7.3.3	Seilauswecheln	162
3.2.4	Überprüfung und Unterhaltung	143	3.7.3.4	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	162
3.2.5	Schadensfälle	143	3.7.4	Zusammenfassung	162
3.2.5.1	Köhlbrandbrücke	143	3.8	Kabeldynamik	163
3.2.5.2	Maracaibo Brücke, Venezuela	145	3.8.1	Einleitung	163
3.2.5.3	Rheinbrücke Flehe	146	3.8.2	Ausgangswerte	164
3.2.5.4	Lehren aus Schäden	146	3.8.2.1	Statische Windlast	164
3.3	Parallelstabkabel	146	3.8.2.2	Eigenfrequenzen	165
3.4	Paralleldrahtkabel	147	3.8.3	Dynamische Anregung	165
3.4.1	Systeme	147	3.8.3.1	Gallopingschwingungen	165
3.4.2	Korrosionsschutz	148	3.8.3.2	Fußpunkterregung	166
3.4.2.1	Polyethylen (PE)-Rohre	148	3.8.3.3	Parameterresonanz	168
3.4.2.2	Umwicklungen	150	3.8.3.4	Turbulenzregung	169
3.4.2.3	Zementinjektion	150	3.8.3.5	Wirbelablösung	169
3.4.2.4	Schadensfälle	151	3.8.4	Gegenmaßnahmen	169
3.4.2.5	Petroleumwachs	152	3.8.4.1	Dämpfer	169
3.4.3	Herstellung	152	3.8.4.2	Oberflächenprofilierung	172
3.5	Parallellitzenkabel	153	3.8.4.3	Abspannungen	174
3.5.1	Allgemeines	153	3.9	Kabelmontage	175
3.5.2	System	153	3.9.1	Allgemeines	175
3.5.3	Korrosionsschutz	153	3.9.2	Verschlossene Seile	175
3.5.3.1	Konventionell	153	3.9.2.1	Allgemeines	175
3.5.3.2	Mit trockener Luft	153	3.9.2.2	Beispiel	175
3.5.4	Herstellung	154	3.9.3	Paralleldrahtkabel	178
3.5.5	Versuche zur Dauerhaftigkeit	154	3.9.3.1	Allgemeines	178
3.5.5.1	Zugfestigkeit und Dauerfestigkeit	154	3.9.3.2	Beispiel	178
3.5.5.2	Wasserdichtigkeit	154	3.9.4	Parallellitzenkabel	179
3.5.5.3	Dauerhaftigkeit farbiger PE-Rohre	154	3.9.4.1	Allgemeines	179
3.5.6	Überwachung	154	3.9.4.2	Beispiel	179
3.6	Kabelverankerung	156	3.9.5	Kabelberechnungen	184
3.6.1	Allgemeines	156	3.9.5.1	Seilverformungen	184
3.6.2	Stützung der Köpfe	156	3.9.5.2	Kraftmessungen	184
3.6.3	Verankerung am Pylon	158			
3.6.3.1	Für durchlaufende Kabel	158			
3.6.3.2	Einzelverankerungen für Verbundpylonköpfe	158			
3.6.3.3	Einzelverankerungen in Betonpylonen	158			

4	Vorbereitung von Schrägkabelbrücken	188	4.3.7	Windkanalversuche	242
4.1	Schnittkraftermittlung an Ersatzsystemen	189	4.3.7.1	Allgemeines	242
4.1.1	Einleitung	189	4.3.7.2	Übersicht der wichtigsten Windkanaltestarten	242
4.1.2	Systemgeometrie	189	4.3.8	Erdbebenbelastung	246
4.1.3	Normalkräfte	190			
4.1.4	Biegemomente am Balken	191	UM	Schutz gegen Schiffsanprall	250
4.1.4.1	Balken auf elastischer Bettung	191	4.4.1	Einführung	250
4.1.4.2	Knicken - Theorie II. Ordnung	192	4.4.2	Anprallkräfte	251
4.1.4.3	Vorspannung	194	4.4.3	Schutzeinrichtungen	254
4.1.4.4	Schwinden und Kriechen	194	4.4.3.1	Allgemeines	254
4.1.4.5	Ständige Last	196	4.4.3.2	Außer Reichweite	254
4.1.5	Pylon	196	4.4.3.3	Künstlicheinsein	255
4.1.5.1	In Längsrichtung	196	4.4.3.4	Leiteinrichtungen	257
4.1.5.2	In Querrichtung	197	4.4.3.5	Unabhängige Schutzeinrichtungen	260
4.1.6	Kabel	197	4.4.3.6	Pfeilerverstärkungen	263
4.2	Schnittkraftermittlung am Gesamtsystem	199	4.5	Berechnungsbeispiele	268
4.2.1	Ständige Last	199	4.5.1	Allgemeines	268
4.2.1.1	Allgemeines	199	4.5.2	Typische Betonschrägkabelbrücke	268
4.2.1.2	Bei Betonbrücken	199	4.5.2.1	System und Lasten	268
4.2.1.3	Bei Stahlbrücken	201	4.5.2.2	Normalkräfte am Gelenksystem	269
4.2.1.4	Für Pylonen	202	4.5.2.3	Biegemomente	271
4.2.2	Verkehrslasten	204	4.5.3	Typische Stahlschrägkabelbrücke	272
4.2.3	Kernpunktmomente	206	4.5.3.1	Allgemeines	272
4.2.4	Theorie II. Ordnung	206	4.5.3.2	System	272
4.2.5	Überlagerung von ständiger Last und Verkehr	208	4.5.3.3	Querschnittswerte und Lasten	272
4.2.6	Temperatur	212	4.5.3.4	Balkenmomente aus Verkehrslast	272
4.2.7	Eigenfrequenzen	212	4.5.3.5	Aufnehmbare Balkenmomente	273
4.3	Brückendynamik	213	4.5.3.6	Balkenmomente aus ständiger Last am Gelenksystem	273
4.3.1	Allgemeines	213	4.5.3.7	Ermittlung der Momentenvoreinstellung	273
4.3.2	Übersicht Windeffekte	215	4.5.4	Schrägkabelbrücke mit Seitenöffnungen auf Pfeilern	274
4.3.3	Windprofil, Turbulenz und turbulenzinduzierte Schwingungen	216	4.5.4.1	System und Lasten	274
4.3.3.1	Windangaben	216	4.5.4.2	Kabelkräfte am Gelenksystem	275
4.3.3.2	Bauwerkseigenschwingungen	218	4.5.4.3	Biegemomente Balken	276
4.3.3.3	Schnittkräfte unter Turbulenzerregung	220	4.5.5	Schrägkabelbrücken mit Harfenanordnung	277
4.3.4	Wirbelerregung	222	4.5.5.1	Mit abgespannter Seitenöffnung	277
4.3.5	Selbsterregung und andere bewegungsinduzierte Effekte	226	4.5.5.2	Mit Seitenöffnung auf Pfeilern	278
4.3.5.1	Allgemeine Beschreibung, Hintergründe	226	4.5.6	Schrägkabelbrücken mit A-Pylon in Längsrichtung	278
4.3.5.2	Praktische Beispiele für Biegegalloping	229	4.5.6.1	System und Lasten	279
4.3.5.3	Praktische Beispiele für Torsionsgalloping	230	4.5.6.2	Normalkräfte am Gelenksystem	279
4.3.5.4	Klassisches Flattern	234	4.5.6.3	Kabelbemessung	280
4.3.6	Dämpfungsmaßnahmen	238	4.5.6.4	Biegemomente im Balken	280
4.3.6.1	Allgemeines	238	4.5.6.5	Vorspannung	280
4.3.6.2	Arten künstlicher Dämpfung	238	4.5.7	Weitgespannte schlanke Beton-Schrägkabelbrücke	281
			4.5.7.1	System und Lasten	281
			4.5.7.2	Schrägkabel	282
			4.5.7.3	Balkenschnittkräfte	285
			4.5.7.4	Aerodynamische Stabilität	288
			4.5.7.5	Pylon	289

5	Montage von Schrägkabelbrücken.....	292	6	Ausführungsbeispiele.....	328
5.1	Montagebeispiele.....	293	6.1	Brücken mit Betonfertigteilbalken.....	329
5.1.1	Einleitung.....	293	6.1.1	Allgemeines.....	329
5.1.2	Pylonmontage.....	293	6.1.2	Pasco-Kennewick Brücke.....	329
5.1.2.1	Stahlpylonen.....	293	6.1.2.1	Brückenbeschreibung.....	329
5.1.2.2	Betonpylonen.....	293	6.1.2.2	Bauausführung.....	334
5.1.2.3	Verbundpylonen.....	293	6.1.2.3	Fertige Brücke.....	346
5.1.3	Balkenmontage.....	294	6.1.3	East Huntington Brücke.....	348
5.1.3.1	Allgemeines.....	294	6.1.3.1	Entwicklung des Entwurfs.....	348
5.1.3.2	Betonbalken.....	295	6.1.3.2	Bauausführung.....	348
	Freivorbau.....	295	6.1.3.3	Fertige Brücke.....	351
	Einschieben.....	301			
	Eindreihen.....	301	6.2	Brücken mit Ortbetonbalken	
5.1.3.3	Stahlbalken.....	306		Helgeland Brücke.....	354
	Freivorbau.....	306	6.2.1	Brückenbeschreibung.....	354
	Längsverschub.....	307	6.2.1.1	Einleitung.....	354
	Querverschub.....	307	6.2.1.2	Gesamtsystem.....	355
5.1.3.4	Verbundbalken.....	311	6.2.2	Bauausführung.....	360
	Freivorbau.....	311	6.2.2.1	Umgebung.....	360
	Einschieben.....	312	6.2.2.2	Pylonen.....	360
			6.2.2.3	Balken.....	362
5.2	Montageberechnung.....	312	6.2.2.4	Kabel.....	364
5.2.1	Einleitung.....	312	6.2.2.5	Instrumentierung.....	368
5.2.2	Montageberechnung als Systemabbau.....	312	6.2.2.6	Fertige Brücke.....	369
5.2.2.1	Allgemeines.....	312	6.2.3	Schlussbetrachtung.....	369
5.2.2.2	Abbau von Schwinden und Kriechen.....	315			
5.2.2.3	Abbau der Brücke.....	315	6.3	Brücken mit Stahlbalken	
	Mit Schwimmkran.....	315		Strelasund Brücke.....	371
	MitDerrick.....	316	6.3.1	Entwicklung des Gesamtentwurfs.....	371
5.2.3	Beispiel für Montageberechnungen:		6.3.1.1	Wahl des Systems.....	371
	Rheinbrücke Mannheim Nord.....	318	6.3.1.2	Optimierung der Schrägkabelbrückenlösung.....	373
5.2.3.1	Montageablauf.....	318	6.3.1.3	Ausformung der Bauteile.....	373
5.2.3.2	Montageberechnung.....	318	6.3.2	Die Schrägkabelbrücke.....	373
5.2.3.3	Montagehandbuch.....	322	6.3.2.1	Spannweiten.....	373
5.2.3.4	Kontrollmessungen.....	322	6.3.2.2	Balkenquerschnitt.....	373
5.2.4	Berechnung von Hilfsabspannungen.....	322	6.3.2.3	Windabweisende Verkleidung.....	374
5.2.4.1	Beidseitige Pylonabspannungen.....	323	6.3.2.4	Pylon.....	374
5.2.4.2	Einseitige Pylonabspannung.....	325	6.3.2.5	Kabel.....	375
5.2.4.3	Hilfsabspannungen am Balken.....	325	6.3.2.6	Windberechnung.....	375
5.2.4.4	Ohne Hilfsabspannungen.....	325	6.3.3	Bauausführung.....	377
5.2.5	Hilfsabspannungen für Vorbauwagen.....	326	6.3.3.1	Montageberechnung.....	377
			6.3.3.2	Montage.....	378
			6.3.3.3	Fertige Brücke.....	388

6.4	Brücken mit Verbundbalken	
	Baytown Brücke	389
6.4.1	Brückenbeschreibung	389
6.4.1.1	Gesamtsystem	389
6.4.1.2	Verbundbalken	390
6.4.1.3	Pylonen	392
6.4.1.4	Schräggabel	392
6.4.1.5	Aerodynamische Stabilität	393
6.4.2	Bauausführung	393
6.4.2.1	Gründungen	393
6.4.2.2	Pylonen	394
6.4.2.3	Balken	394
6.4.2.4	Kabel	400
6.4.2.5	Fertige Brücke	400
6.4.3	Schlussbetrachtung	403
6.5	Brücken mit Hybridbalken	
	Normandie Brücke	404
6.5.1	Entwurfsbeschreibung	404
6.5.1.1	Gesamtsystem	404
6.5.1.2	Kabeldämpfung	406
6.5.2	Bauausführung	406
6.5.2.1	Pylon	406
6.5.2.2	Vorlandbrücken	408
6.5.2.3	Hauptspannweite	410
6.5.2.4	Kabelmontage	410
6.5.2.5	Fertige Brücke	412
6.6	Reihen von Schräggabelbrücken	413
6.6.1	<u>Millau Brücke</u>	<u>413</u>
6.6.1.1	Allgemeines	413
6.6.1.2	Entwurf	414
6.6.1.3	Herstellung	414
6.6.1.4	Fertige Brücke	418
6.6.2	<u>Rion-Antirion Brücke</u>	<u>420</u>
6.6.2.1	Allgemeines	420
6.6.2.2	Entwurf	420
6.6.2.3	Herstellung	423
6.6.2.4	Fertige Brücke	427
7	Ausblick	428
	Verzeichnisse	430
	Verzeichnis Brücken	430
	Literatur	433
	Bildnachweis	441
	Inserentenverzeichnis	443
	Anhang: 40 Jahre Erfahrungen mit Großbrücken in aller Welt	444
	Persönliches	445
	Brücken in Deutschland	445
	Schräggabelbrücken im Ausland	447
	Neuentwicklungen durch Wettbewerb	448
	Prüfung von Brücken	451
	Mitarbeit an Vorschriften	453
	Aktuelle Projekte	453
	Fazit	455
	Quellen	455
	Vorlesungen Schräggabelbrücken auf DVD	458