

Bogenbrücke mit Straßenlasten nach Eurocode

Dipl.-Ing. Günther Mayrhofer

KMP ZT-GmbH, Linz/Donau, Österreich

Zusammenfassung:

In Österreich sind seit 2009 die vereinheitlichten europäischen Normen im Bauwesen (Eurocodes) anzuwenden. Einige damit verbundene Änderungen werden am Beispiel einer Bogenbrücke dargestellt. Weiters werden die ersten Erfahrungen mit der neuen Normenserie und deren Umsetzung mit SOFiSTiK präsentiert.

Summary:

Since 2009 the harmonized European standards in civil engineering (Eurocodes) are in use in Austria. Some of the related changes are shown using the example of an arched bridge. Furthermore, first experiences related to this new series of standards and their implementation using SOFiSTiK are presented.

1 EINLEITUNG

1.1 Allgemeines

Mit der Zurückziehung der nationalen Last- und Materialnormen des Bauwesens im Juni 2009 endete in Österreich die Koexistenzperiode von nationalen Normen und Eurocodes. Seither sind für alle Bereiche des Bauwesens die Eurocodes anzuwenden. Im Brückenbau wird schon seit Jänner 2009 nach Eurocodes bemessen. Die Umstellung der Belastungsannahmen und der Kombinationsregeln sowie die neuen Bemessungsregeln und Nachweise bedeuteten sowohl für die planenden Ingenieure als auch die Hersteller von Statik-Softwareprodukten immense Herausforderungen. Eine Vielzahl von Normenvorschriften war zu interpretieren, Erfahrung mit neuen Nachweisen musste gesammelt werden und neue Programmteile mussten entwickelt werden.

Derzeit werden in den österreichischen Normungsgremien die ersten Erfahrungen aus der Anwendung verarbeitet. Im Zuge einer Überarbeitung aller Eurocode-relevanten Normen werden Fehler beseitigt und entdeckte Lücken in den Regelungen geschlossen. Die intensive Phase dieser Überarbeitung wird bis ins Jahr 2011 andauern.

1.2 Projektübersicht

Das vorliegende Projekt stellt ein Entwurfsprojekt nach aktuell in Österreich gültiger Normenlage dar. Das Brückentragwerk mit einer Länge von ca. 260 m soll eine 12,10 m breite Fahrbahn tragen. Als Tragsystem wurde eine Bogenbrücke mit einer Bogenstützweite von 145 m und einer Stichhöhe von 28 m geplant. Sowohl der zweizellige Hohlkasten des Bogens als auch das Plattentragwerk sind als schlaff bewehrte Stahlbetonkonstruktionen ausgelegt. Die Stützenscheiben sind in der Tragsachsachse angeordnet und stehen wegen der Grundrisskrümmung der Straßenachse exzentrisch auf dem Bogen. Die Herstellung des Bogens erfolgt im Freivorbau mit temporären Seilabspannungen.

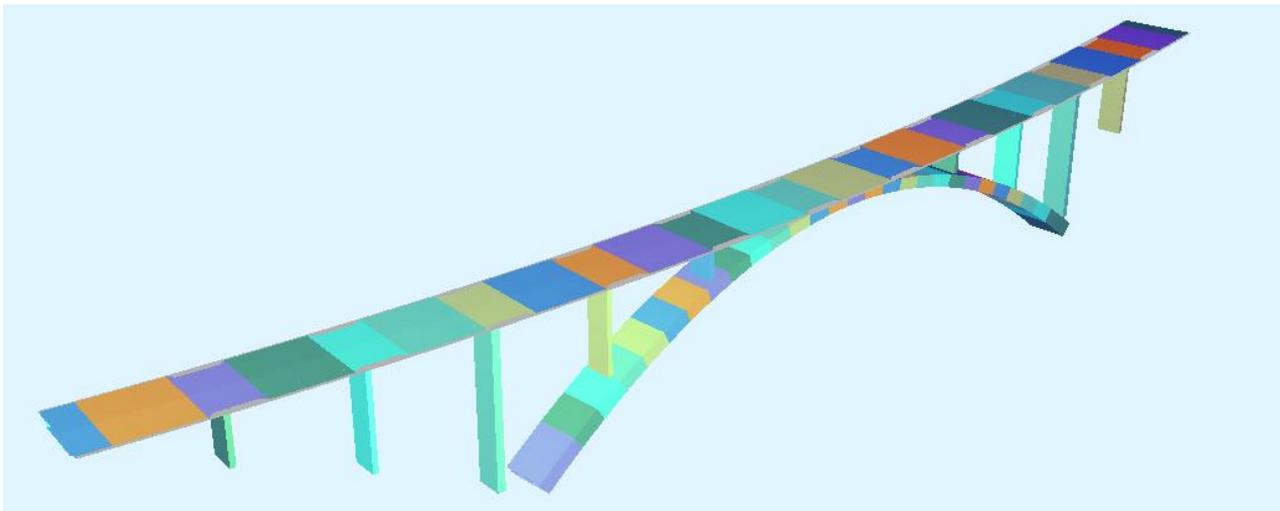


Abbildung 1: Übersicht Tragwerk (mit Farbwechsel je Gruppe)

2 EUROCODES IM ÜBERBLICK

2.1 Allgemeines

Die Normenserie zu den Eurocodes im Bauwesen gliedert sich in 10 Teile. Jeder dieser Teile besteht aus mehreren europaweit einheitlichen Normen und den dazugehörigen nationalen Anwendungsdokumenten, die spezielle Bestimmungen für das jeweilige Land enthalten. Die nationalen Regelungen sind in Österreich in einer ÖNORM der Serie B veröffentlicht, die die gleiche Nummer wie die zugehörige EN Norm besitzt. Z.B. ÖNORM B 1991-2 gehört zur ÖNORM EN 1991-2.

Im Eurocode 0 sind die Grundlagen zum semiprobabilistischen Sicherheitskonzept beschrieben. Es sind Anforderungen an Berechnungsverfahren festgelegt und wichtige Begriffe wie Zuverlässigkeit und Dauerhaftigkeit näher erläutert.

Alle Bemessungsverfahren in den Eurocodes basieren auf Grenzzuständen und Bemessungssituationen. Die Grenzzustände beziehen sich entweder auf die Tragfähigkeit oder die Gebrauchstauglichkeit. Die Bemessungssituationen werden in ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Situationen

Eurocode 0	EN 1990	Grundlagen der Tragwerksplanung
Eurocode 1	EN 1991	Einwirkungen auf Tragwerke
Eurocode 2	EN 1992	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlbetonbauten
Eurocode 3	EN 1993	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlbauten
Eurocode 4	EN 1994	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahl-Beton-Verbundbauten
Eurocode 5	EN 1995	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten
Eurocode 6	EN 1996	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Mauerwerksbauten
Eurocode 7	EN 1997	Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik
Eurocode 8	EN 1998	Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben
Eurocode 9	EN 1999	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Aluminiumkonstruktionen

Tabelle 1: Übersicht Eurocodes [1]

eingeteilt. Je nach Grenzzustand und Bemessungssituation sind unterschiedliche Kombinationsvorschriften und Zahlenwerte für Teilsicherheitsfaktoren und Kombinationsbeiwerte zu verwenden. In den Anhängen A.1 und A.2 zur EN 1990 sind die Zahlenwerte der einwirkungsseitigen Teilsicherheitsfaktoren und Kombinationsbeiwerte definiert. Materialspezifische Werte und Verfahren sind in den spezifischen Eurocodes zu finden.

Essentiell für die Kombination von veränderlichen Einwirkungen ist die Unterscheidung in eine Leiteinwirkung und mehrere Begleiteinwirkungen. In fast allen Kombinationsvorschriften wird dieses Konzept angewendet. Die begleitenden veränderlichen Einwirkungen werden mit geringeren Kombinationsbeiwerten multipliziert und dadurch geringer gewichtet als die Leiteinwirkung. Beispielsweise wird in der charakteristischen Kombination die Leiteinwirkung mit ihrem charakteristischen Wert addiert, während die Begleiteinwirkungen mit dem Kombinationsbeiwert ψ_0 abgemindert berücksichtigt werden.

2.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Die Grenzzustände der Tragfähigkeit beschreiben (Last-)Zustände, die die Sicherheit von Personen und/oder Tragwerken betreffen. Der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit erfolgt mit dem Vergleich der Bemessungswerte von Einwirkung und Widerstand.

$$E_d \leq R_d \quad (6.8)$$

Die Kombination von Einwirkungen für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen, auch Grundkombination genannt, wird aus den Bemessungswerten inkl. Teilsicherheitsbeiwerten der ständigen Einwirkungen und der Vorspannung gebildet. Von den veränderlichen Einwirkungen wird von der Leiteinwirkung der Bemessungswert addiert, während jede Begleiteinwirkung auf den Kombinationswert mit Teilsicherheitsbeiwert abgemindert wird.

2.3 *Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit*

In den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit werden die Funktion des Tragwerks oder von Tragwerksteilen, das Wohlbefinden der Nutzer und das Erscheinungsbild des Bauwerks betrachtet. Der Nachweis wird erbracht durch den Vergleich des Bemessungswertes der Einwirkung mit einem Bemessungswertes der Grenze des Gebrauchstauglichkeitskriteriums.

Bei der Kombination von Einwirkungen werden drei Arten unterschieden. Für nicht umkehrbare Auswirkungen wird die „Charakteristische Kombination“ verwendet. Die „Häufige Kombination“ wird für umkehrbare Auswirkungen angewendet und die „Quasiständige Kombination“ beschreibt meist Langzeitauswirkungen.

Weiters ist eine „Nicht-häufige Kombination“ vorgesehen. Diese ist aber in den Eurocodes für keinen Nachweis vorgesehen. Sie kann im nationalen Anwendungsdokument verwendet werden. In Österreich wird davon aber nicht Gebrauch gemacht. Es kommen nur charakteristische, häufige und quasiständige Kombinationen zum Einsatz.

2.4 *Bemessung der Lager*

Die Kombinationsvorschriften der Eurocodes gelten nicht für die Lagerbemessung. Die Anwendung der EN 1990/A1 auf Lagerkräfte und Verschiebewege ist dezidiert nicht vorgesehen. In der aktuellen Überarbeitung des Eurocodes in Österreich werden in den nationalen Anwendungsdokumenten für Lager relevante Kombinationsvorschriften und Nachweise ergänzt, um die Lücke zu den Normen für die Lagerbemessung (EN 1337 Serie) zu schließen.

Beispielsweise soll für Bemessungswerte der Lagerwege eine Grundkombination mit Teilsicherheitsbeiwerten verwendet werden. Für die maßgebenden Einwirkungen aus Temperatur wird der Teilsicherheitsbeiwert für diese Kombination von 1,5 auf 1,35 reduziert. Die nach früheren Normen ermittelten Verschiebewege haben in der Vergangenheit keine Probleme bereitet. Zusammen mit den neuen Temperaturansätzen und -zuschlägen wird wieder ein ähnliches Niveau erreicht.

Weiters werden fehlende Nachweise für Lager wie die Sicherheit gegen Abheben ergänzt. Hier soll wie bisher üblich ein Sicherheitsniveau von 1,20 erreicht werden. Eine Anpassung an das Kombinationskonzept der EN 1990 wird noch durchgeführt.

3 EINWIRKUNGEN NACH EUROCODE

Die Einwirkungen sind im Eurocode 1, Normenserie EN 1991 festgelegt. Die wichtigsten ständigen Einwirkungen sind in EN 1991-1-1 enthalten. Materialspezifische Einwirkungen wie Kriechen und Schwinden oder Imperfektion sind im Eurocode 2 definiert.

3.1 Ständige Einwirkungen

Einwirkungen werden als ständig klassifiziert, wenn sie während der gesamten Nutzungsdauer wirken und in dieser Zeit nur eine geringe Größenänderung erfahren (z.B. Eigengewicht) oder die Änderung nur bis zu einem Grenzwert zunimmt (z.B. Setzungen).

3.1.1 Eigengewicht und Ausbaulasten

Die Wichten und die Vorschriften für Ausbaulasten sind der EN 1991-1-1 zu entnehmen. Die nationalen Regelungen erlauben den Ansatz der Nenndicken für Belag und Abdichtung. Die im Eurocode vorgesehenen Mehr-/Minderstärken für Beläge von Straßenbrücken sind daher nicht verpflichtend. Mehrere öffentliche Auftraggeber in Österreich fordern jedoch für ihre Projekte eine Berücksichtigung von Mehr- und Minderstärken. Die Regelungen schreiben meist eine Belagstoleranz von $\pm 20\%$ vor, so wie dies auch in EN 1991-1-1 vorgesehen ist. Für dicke Belagsaufbauten, z.B. bei Betonfahrbahnen, wird aber die Toleranz auf $\pm 3\text{cm}$ eingeschränkt um realistische Werte zu erhalten. Speziell bei Brückenherstellung im Freivorbau kann durch eine Ausgleichsgradienten eine erhebliche Mehrstärke des Belages notwendig sein. In diesen Fällen sind gesonderte Ansätze zu treffen.

3.1.2 Setzungsdifferenzen

Ungleiche Bauwerkssetzungen sind gemäß EN 1990/A1 als ständige Einwirkung zu deklarieren. Die angesetzten Werte entsprechen den wahrscheinlichen Setzungen nach EN 1997.

3.1.3 Schwinden und Kriechen

Die Einflüsse aus Schwinden und Kriechen sind materialabhängig und daher in Eurocode 2 definiert. Für den üblichen Ansatz eines linearen Kriechens ist ein zusätzlicher Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit zu führen. Unter quasiständiger Kombination darf die Betondruckspannung im Bauteil $0,45 f_{ck}$ nicht überschreiten.

3.1.4 Imperfektion

Mögliche Abweichungen der Tragwerksgeometrie oder der Laststellungen werden durch sogenannte „Imperfektionen“ abgedeckt. Hingegen sind Querschnittsabweichungen in der Regel durch die Material Sicherheitsfaktoren abgedeckt. Imperfektionen ist nur im Grenzzustand der Tragfähig-

keit zu berücksichtigen und können für Gebrauchstauglichkeitsnachweise vernachlässigt werden. Maßgebend sind diese Einflüsse nur für Bauteile mit Normalkraft. Für Stützen wird die Neigung durch eine Ersatzhorizontalkraft nachgebildet. Für das Bogentragwerk legt der österreichische nationale Anhang vereinfachende Ansätze für den maßgebenden Einfluss fest, aus denen die Imperfektionen des Bogens ermittelt werden. Die Modellierung erfolgt durch Ersatzgleichlasten, die vom Bogenschub abhängen.

3.1.5 Lagerreibung

Der Roll- oder Gleitwiderstand von beweglichen Lagern ist in den Eurocodes nicht definiert und wird nach der Normenserie für Lager im Bauwesen, EN 1337, bestimmt. Die Belastung aus der Lagerreibung auf Bauteile des Tragwerks ist abhängig von der Auflast.

3.2 Einwirkungen aus Verkehr

3.2.1 Lastmodell 1

Dieses Lastmodell besteht aus einer Gleichlast und einer Doppelachse und deckt den üblichen Verkehr auf Brücken ab. Es sieht eine Einteilung in Fahrstreifen vor. Für jeden rechnerischen Fahrstreifen sind unterschiedliche Zahlenwerte für die beiden Lastkomponenten vorgesehen.

Die Fahrstreifen sind meist 3,00 m und sie sind so aufzuteilen, dass die ungünstigste Auswirkung für den betrachteten Nachweis gegeben ist. Für Stabmodelle ist es üblicherweise ausreichend die Lasten einmal am rechten Fahrbahnrand auszurichten und alternativ auch am linken Rand. Für Flächentragwerke oder mehrstegige Plattenbalkentragwerke können aber auch andere Aufstellungsvarianten maßgebend sein. Mit ingenieurmäßiger Erfahrung können meist die maßgebenden Fahrstreifeneinteilungen gefunden werden und damit der Rechenaufwand gegenüber der Berechnung aller möglichen Varianten deutlich reduziert werden.

Für die Lasten aus Tabelle 2 sind in EN 1991-2 Anpassungsfaktoren vorgesehen. Diese sind in Österreich alle mit 1,0 definiert. Für Einzelprojekte darf der Bauherr jedoch auch andere Werte vorgeben.

<i>Fahrstreifen</i>	<i>Achslast der Doppelachse</i>	<i>Gleichlast</i>
Fahrstreifen 1	300 kN	9,0 kN/m ²
Fahrstreifen 2	200 kN	2,5 kN/m ²
Fahrstreifen 3	100 kN	2,5 kN/m ²
weitere Fahrstreifen	keine Doppelachse	2,5 kN/m ²
Restfläche	keine Doppelachse	2,5 kN/m ²
Gehweg	keine Doppelachse	5,0 kN/m ²
Randbalken (kein Gehweg)	keine Doppelachse	2,5 bis 3,0 kN/m ²

Tabelle 2: Lastansätze für Lastmodell 1

3.2.2 Lastmodell 2 - Einzelachse

Eine Einzelachse mit 400 kN ist nur für lokale Nachweise, z.B. Bemessung einer Fahrbahn- oder Kragplatte aufzustellen. Dabei dürfen aber andere veränderliche Einwirkungen vernachlässigt werden.

3.2.3 Lastmodell 3 – Sonderfahrzeuge

Mit diesem Lastmodell werden Lasten beschrieben wie sie bei Brücken auf Schwertransportrouten auftreten. In Österreich sind Brücken im Zuge von Autobahnen und Schnellstraßen sowie wichtigen Verbindungsstraßen auf ein 300 to Fahrzeug mit 20 to Achslast im Schritttempo bei 5 km/h auszuliegen. Damit sind die meisten Transporte abgedeckt. Sonderfahrzeuge mit geringerer Last können die Brücke auch mit größerer Geschwindigkeit passieren. Die erlaubte Geschwindigkeit hängt vom dynamischen Beiwert ab und beträgt maximal 70 km/h.

Das Sonderfahrzeug im Lastmodell 3 tritt gleichzeitig mit den häufigen Werten des Lastmodells 1 auf. Dabei ist aber eine Lücke von 25 m vor und nach dem Sonderfahrzeug frei von Lasten. Die Breite eines Sonderfahrzeuges entspricht einer Fahrstreifenbreite. Eine Ausnahme bilden Fahrzeuge mit Achslasten von 240 kN. Hier sieht der Eurocode eine Verteilung auf zwei Fahrstreifen vor. Ein solches Fahrzeug ist derzeit im österreichischen Anwendungsdokument noch enthalten. Es ist in Diskussion dieses Fahrzeug in Zukunft nicht mehr anzuwenden.

3.2.4 Bremsen und Fliehkraft

Die Horizontalkräfte ermitteln sich aus den Vertikallasten des Lastmodells 1. Die Brems- und Anfahrkräfte dürfen über die gesamte Brückenlänge verteilt in der Mitte des ungünstigsten Fahrstreifens angesetzt werden. Die Größe der Fliehkraft ist zusätzlich noch abhängig vom Radius und tritt als Einzellast an ungünstiger Position in Fahrbahnoberkante auf. Schräges Bremsen oder Schleudern ist in Österreich nicht anzusetzen [2].

3.2.5 Lastgruppen

Die einzelnen Lastmodelle der Verkehrseinwirkungen treten nicht unabhängig von einander auf. Sie werden in sechs Lastgruppen zusammengefasst, die das gleichzeitige Auftreten von Verkehrslasten beschreiben. Die Ergebnisse der einzelnen Lastgruppen werden dann als eine Einwirkung weiterverarbeitet.

Eine Änderung gegenüber früheren Normen stellt die Tatsache dar, dass es im Regelfall keine quasiständigen Anteile aus Verkehrslasten mehr gibt. Nur im Extremfall einer Brücke unter kontinuierlich fließendem Schwerverkehr ist ein quasiständiger Anteil für die Gleichlast des Lastmodells 1 anzusetzen. Das Handbuch [2] legt hierzu einen Beiwert von 0,20 für einen durchschnittlichen täglichen Verkehr (DTV) von mehr als 50.000 KFZ/24 h je Richtung fest.

3.3 *Andere veränderliche Einwirkungen*

3.3.1 *Wind*

Windeinwirkungen sind im EN 1991-1-4 geregelt. Für Brücken steht ein eigenes Kapitel zur Verfügung. Im Anhang und im nationalen Anwendungsdokument sind auch spezielle Verfahren zur Abschätzung von dynamischen Auswirkungen wie Flatterschwingungen oder wirbelerregte Querschwingungen. Da für Bogenbrücken keine speziellen Angaben vorhanden sind, wurde ein analoger Ansatz gewählt, der eine Kombination aus Windeinwirkungen auf allgemeinen Brücken und auf Tonnendächer darstellt.

3.3.2 *Temperatur*

In EN 1991-1-5 sind Einwirkungen aus Temperatur festgelegt. Auch hier beschäftigt sich ein Kapitel mit speziellen Regelungen für Brücken. Die Temperatureinwirkung besteht aus zwei Anteilen. Ein Anteil ist die gleichmäßige Erwärmung bzw. Abkühlung, der zweite Anteil ist eine über den Querschnitt veränderliche Temperaturänderung (Temperaturgradient). Beide Anteile sind gleichzeitig zu berücksichtigen, wobei jeweils ein Anteil abgemindert werden darf. Daraus ergeben sich acht mögliche Kombinationen. Diese werden, wie im SSD-Task „Bogenbrücke“, vorgeschlagen als getrennte, einander ausschließende Lastfälle abgebildet.

National geregelt sind die extremen Außenlufttemperaturen sowie die Angaben für die ungleichmäßige Temperaturänderung.

3.3.3 *Anheben für Lagerwechsel*

Für das Anheben der Lagerachsen für den Lagerwechsel wird in ÖNORM B 1992-2 ein Mindestwert von 10 mm festgelegt. In EN 1337-1 wird für Lager ihre Auswechselbarkeit bei einem Anheben von maximal 10 mm gefordert. Der Ansatz dieses Wertes ist somit auch für das Tragwerk ausreichend. In Ermangelung an Normenregeln werden für diese Einwirkung ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,35 und ein Kombinationsbeiwert von 1,0 in einer vorübergehenden Bemessungssituation angesetzt.

3.3.4 *Einwirkungen während der Bauzeit*

Für Einwirkungen aus Bautätigkeiten und Instandsetzungsarbeiten stehen in EN 1991-1-6 Angaben zur Verfügung. In einer Detailbemessung sind die angegebenen Bemessungssituationen und Einwirkungen zu berücksichtigen. Im vorliegenden Projektstadium wurden diese noch nicht berücksichtigt.

3.4 Kombination von Einwirkungen

Für ständige Einwirkungen ist die Kombination klar. Bei veränderlichen Lasten hingegen spielen mehrere Faktoren eine Rolle. Es wird zwischen führenden und begleitenden Einwirkungen unterschieden. Diese Unterscheidung kann aber für jede Kombination oder jede Nachweisstelle verschieden sein. Führende Einwirkungen werden mit einem anderen Kombinationsbeiwert versehen als die Begleiteinwirkung. Die Wahl der Leiteinwirkung hat so zu erfolgen, dass die ungünstigste Summe erreicht wird. Für die Berechnung in SOFiSTiK wird diese Suche vom Modul MAXIMA erledigt. Diese Suche kann auf den Vergleich der Einwirkungsergebnisse reduziert werden. Leiteinwirkung ist jene Einwirkung, die die größte Differenz zwischen dem Lastwert für führende und begleitende Einwirkung aufweist.

Etwas schwieriger zu verarbeiten sind Kombinationsfaktoren, die für einzelne Komponenten einer Einwirkung unterschiedlich sind. Dies ist bei der Gleichlast und der Doppelachse des Lastmodells 1 der Fall. Grundsätzlich kann das Modul MAXIMA solche Fälle auch mit Hilfe von sogenannten Kategorien – Teile von Einwirkungen – behandeln. Gleichzeitig mit einander gegenseitig ausschließenden Einwirkungen ist dies leider nicht so leicht möglich.

Besonders aufwendig in einem automatisierten Berechnungsschema zu implementieren sind die Sonderbedingungen der Eurocodes, die die Kombination von Einwirkungen mit einzelnen anderen ausschließt. Beispielsweise brauchen Wind und Temperatur nicht gleichzeitig angewendet werden. Windlasten müssen nicht mit einzelnen Verkehrslastgruppen kombiniert werden. Das Lastmodell 1 muss nicht als Begleiteinwirkung des Windes auftreten, umgekehrt ist dies jedoch sehr wohl zu betrachten.

In diesen Fällen ist es nur möglich, geeignete Zwischenüberlagerungen zu verwenden und von Fall zu Fall sinnvolle Vereinfachungen zu treffen. Durch geschickte Einteilung der Lastfälle in Einwirkungen (SOFiSTiK: act) können die Funktionen von MAXIMA optimal ausgenutzt werden und so auf einfachem Weg die Kombinationen für viele Nachweise erzeugt werden. Die Einwirkungen für die Verkehrslastfälle wie in [1] beschrieben erleichtern die Arbeit.

Das Modul MAXIMA unterstützt auch die folgende Einwirkungsdefinition aus SOFILOAD:

```
+PROG SOFI LOAD
KOPF Ei nwi rkungen
ECHO voll nei n
ECHO act ja
ACT GR   GAMU 1. 35 0. 00 PSI 0 0. 00 0. 00 0 PART Q EXEX BEZ "Lastgruppen"
ACT GR_1 GAMU 1. 35 0. 00 PSI 0 0. 75 0. 75 0 PART Q EXEX BEZ "gr 1a LM1"
ACT GR_B GAMU 1. 35 0. 00 PSI 0 0. 00 0. 75 0 PART Q EXEX BEZ "gr 1b Ei nzel achse"
ACT GR_2 GAMU 1. 35 0. 00 PSI 0 0. 00 0. 00 0 PART Q EXEX BEZ "gr 2 Hori zont al kr"
ACT GR_3 GAMU 1. 35 0. 00 PSI 0 0. 00 0. 00 0 PART Q EXEX BEZ "gr 3 Gehweg"
ACT GR_4 GAMU 1. 35 0. 00 PSI 0 0. 00 0. 75 0 PART Q EXEX BEZ "gr 4 LM4 Menschen"
ACT GR_5 GAMU 1. 35 0. 00 PSI 0 0. 00 0. 00 0 PART Q EXEX BEZ "gr 5 LM3 SFZ"
ACT GR_R GAMU 1. 50 0. 00 PSI 0 0. 75 0. 75 0 PART Q COND BEZ "Erddruck-Verkehr"
ENDE
```

Hier werden nicht nur ausschließende Einwirkungen für die Verkehrslastgruppen definiert, es wird zusätzlich auch noch die Möglichkeit geschaffen, einen Erddruck aus Verkehr gleichzeitig zu berücksichtigen, beispielsweise für Rahmentragwerke. Üblicherweise sind die Lastfälle in den Einwirkungen GR_x das Ergebnis einer Zwischenüberlagerung und daher ausschließlich zu verwenden. Die Lastgruppen können gemäß Eurocode nicht gleichzeitig auftreten, daher sind die Überlagerungen mit EXEX gekennzeichnet. Eine Ausnahme bilden die Lastfälle des Verkehrserddrucks, diese wirken bedingt (COND, nur ungünstig wirkend) und können auch gleichzeitig mit den anderen Lastgruppen auftreten.

Diese Vorgehensweise ermöglicht es, den Verkehr einfach mit anderen Einwirkungen zu überlagern. Entweder wirkt der gesamte Verkehr als Leiteinwirkung, dann gilt dies auch für den Verkehrserddruck, oder für alle Komponenten des Verkehrs wirken als Begleiteinwirkung.

Praktisch ist auch die hier angewendete Funktionalität, dass für einzelne Kategorien einer Einwirkung andere Teilsicherheits- und Kombinationsbeiwerte verwendet werden können. Ein kleiner Nachteil bleibt, für die Gleichlast und die Doppelachse in der Lastgruppe GR_1 kann nur ein gemeinsamer Kombinationsbeiwert verwendet werden. Die Wahl des Größeren liegt auf der sicheren Seite und bringt nur im Fall, dass der Verkehr begleitend wirkt, etwas zu große Werte.

Zur Kontrolle und als Übersicht über die Lastfälle einer Einwirkung ist die Ausgabe mit SOFILOAD praktisch:

```
+PROG SOFI LOAD
KOPF Ei nwi rkungen mi t Last f ä l l en
ECHO ACT VOLL
ENDE
```

4 NACHWEISE IN DEN EUROCODES

4.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Der Bemessungswert der Betondruckfestigkeit wird im österreichischen Brückenbau durch einen Beiwert für Langzeitauswirkungen $\alpha_{cc} = 0,90$ abgemindert. Im Hochbau wird dieser Wert mit 1,0 angesetzt.

Im Brückenbau sind üblicherweise nur hochduktiler Betonstähle (Klasse B) zu verwenden. Nur bei massiven Widerlagern oder Pfeilern darf auch normalduktiler Betonstahl der Klasse A eingebaut werden.

Für die Bemessung auf Querkraft, Torsion und Durchstanzen stehen Formelapparate zur Verfügung. Zur Bemessung von Druckgliedern, wie zum Beispiel Stützen, sind im Eurocode zwei Näherungsverfahren vorgesehen. Zum einen ist das Nennkrümmungsverfahren vorhanden. Dieses ist

ähnlich dem Modellstützenverfahren. Zum anderen gibt es das Nennsteifigkeitsverfahren. Beide Verfahren sind abhängig von der Bewehrung im Bauteil und daher iterativ anzuwenden.

4.2 *Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit*

Bei diesen Nachweisen gibt es einige Änderungen zur alten ÖNORM B 4700 Serie. Die meisten Begrenzungen der Spannungen in Beton und Betonstahl waren früher nur im Spannbetonbau zu führen. Der Eurocode verlangt diese Nachweise aber auch für Stahlbeton ohne Vorspannung. Die empfohlenen Werte für Rissbreitennachweise und Dekompression wurden in Österreich nicht vom Eurocode übernommen sondern hinsichtlich der anzuwendenden Kombination verfeinert und auf zusätzliche Expositionsklassen erweitert.

5 KONSTRUKTIVE DETAILS

5.1 *Stabstahl und Bewehrungsmatten*

In Österreich wurden einige allgemeine Bewehrungsregeln, die sich in der Vergangenheit bewährt haben, national ergänzt, weil sie im Eurocode nicht vorhanden sind. Es sind im Brückenbau nach wie vor nur gerippte Bewehrungsstäbe mit Mindestdurchmesser 10 mm erlaubt. Allerdings sind jetzt neu auch Bewehrungsmatten ab 8 mm zulässig, falls die Bewehrungsspannung aus der charakteristischen Verkehrslast unter 80 N/mm^2 liegt. Bei Eisenbahnbrücken gibt es zusätzliche Einschränkungen für Matten in ermüdungsbeanspruchten Bauteilen. Andere nationale Regelungen betreffen Mindestwerte für Bauteilabmessungen, Maximalwerte für Stababstände und mehr.

5.2 *Stöße und Verankerung*

Bei Stößen von Bewehrungsstäben dürfen nach Eurocode bis zu 100% der Stäbe in einem Querschnitt gestoßen werden. Im Brückenbau ist national geregelt, dass von der Hauptbewehrung maximal 25% in einem Querschnitt gestoßen werden dürfen.

Die Mindestverankerungslänge, und in der Folge auch die Übergreifungslänge, kann teilweise mit dem Verhältnis erforderliche Bewehrung zu vorhandener Bewehrung abgemindert werden. Bisher waren diese Mindestwerte nicht durch Überbewehrung reduzierbar.

6 MODELLIERUNGSDETAILS

Der Berechnungsablauf mit SOFiSTiK gestaltet sich derart, dass mit dem SSD-Task „Bogenbrücken“ ein Grundsystem erstellt werden kann, das dann Schritt für Schritt erweitert und angepasst werden kann. Die Modellierung erfolgt des Systems mit SOFIMSHA. Zusätzlich werden externe Schnitte mit SIR ergänzt. Die Berechnung der Lastfälle erfolgt mit ASE am jeweils vorhandenen System. Für die bauabschnittsweise Herstellung wird CSM als Präprozessor verwendet. Die Eingangs-

ben für die Nachweise werden vorab auch mit CSM erzeugt, dann aber manuell überarbeitet um den Normvorgaben und Spezialfällen in diesem Projekt gerecht zu werden.

6.1 Modell mit SOFIMSHA

SOFIMSHA wird zur Modellierung herangezogen, weil zum einen das Grundsystem aus dem SSD-Task auch dieses Modul verwendet und mit SOFIMSHC eine etwas andere Nummerierung der Elemente erfolgt. Zum anderen stand zu Beginn der Modellierung das CABD-Konzept noch nicht zur Verfügung.

Die Modellierung des Bogens erfolgt unter Ausnutzung einer sehr mächtigen CADINP Funktionalität für Variablen-Felder. In Tabellen kann nicht nur linear interpoliert werden, sondern durch Vorgabe der Steigung an bestimmten Stellen kann auch entlang von beliebigen Kurven gerechnet werden. Die Parabel für den Bogen ist damit leicht zu definieren. An den Kämpferpunkten und am Scheitel ist die Höhe bekannt. Durch die Vorgabe einer Steigung von 0 am Scheitel wird eine waagrechte Tangente erzeugt und die Zwischenpunkte folgen exakt einer quadratischen Parabel:

```
LET#HO      31.00      $ Höhenlage des Kämpfers
LET#BoSt    28.00      $ Stich des Bogens
LET#Lst     145.00     $ Bogenstützwerte

DEL#Parabel *  $ Fel der löschen
DEL#Zbo       $ Fel der löschen

LET#Parabel Werte  0.0, #Lst/2, #Lst
LET#Parabel ZWerte #HO, #HO- #BoSt, #HO
LET#Parabel Zabl   -, 0, -      $ Ableitung: in der Mitte 0 =>
Parabel
LET#zBo        'TAB(Parabel Werte, Parabel ZWerte, Parabel Zabl) '
$ #zBo(#x)     liefert die Höhe der Bogenachse an der Stelle #x
```

Die Erfahrung hat gezeigt, dass es wichtig ist, die Feldvariablen vor der Verwendung zu löschen, um eventuell definierte Werte aus anderen Berechnungsdurchläufen zu eliminieren. Interessant ist auch die Verknüpfung der Variable #zBo mit den Eingabefeldern #Parabel *. Jeder Zugriff auf #zBo verwendet die aktuellen Werte in #Parabel *. Wichtig ist, dass die Werte nicht unbeabsichtigt verändert werden. Andererseits kann man durch diese Funktionalität auch noch nachträglich z.B. die Höhenlage des Bogens verändern, um die Höhen der Seilanschlussknoten zu bestimmen.

Speziell in der Entwurfsphase bietet eine durchgängig parametrisierte CADINP Eingabe viele Vorteile. Es können rasch Änderungen durchgeführt und Varianten untersucht werden.

Zur Berücksichtigung der zeitlichen Abfolge bei der Errichtung mit dem Bauphasenmanager CSM ist es wichtig, die erzeugten Elemente in Gruppen einzuteilen. Später können mit CSM die einzelnen Bauzustände einfach durch die Auswahl der aktiven Gruppen beschrieben werden. Temporäre Bauteile wie Hilfsfesthaltungen oder Abspannseile können ebenso wieder ausgebaut werden.

6.2 Externe Schnitte mit SIR

Die Grundrisskrümmung des Tragwerks bewirkt am Bogen stark ausmittige Lasten. Eine Abtragung ausschließlich über die Torsionssteifigkeit des Bogens vernachlässigt wichtige Effekte. Daher wird der zweizellige Hohlkasten des Bogens in drei Stabzüge zerteilt, die durch Querstäbe verbunden werden. Jeder Stabzug repräsentiert einen Steg des Hohlkastens und übernimmt die Kraftableitung in Längsrichtung. Die Steifigkeit der Boden- und Deckplatte wird mit den Querstäben simuliert. Diese Nachgiebigkeit lässt auch unterschiedliche Belastungen auf die einzelnen Längsträger zu und stellt somit ein realistischeres Modell dar.

Für die Endauswertung sind aber auch die Gesamtkräfte in einem Bogenquerschnitt relevant. Bei Überlagerungen gehen die zugehörigen Kräfte zwischen den Trägern verloren. Mit dem Modul SIR können Querschnittsergebnisse für Einzellastfälle aufsummiert werden. Üblicherweise wird SIR für die Integration von Schnittkräften über Flächentragwerke verwendet. Die Funktionalität ist aber auch für reine Stabtragwerke voll einsatzfähig.

Nach der Systemgenerierung werden einmalig die Schnitte generiert und nach jeder Berechnung von Lastfällen werden die Schnittergebnisse von SIR aufaddiert. Dies gilt für alle Einzellastfälle am Endsystem genauso wie für die Lastfälle in den Bauzuständen.

Bei den Überlagerungen mit MAXIMA können die Ergebnisse der externen Stabschnitte ebenso überlagert werden. Da die Schnittergebnisse mit klar definierten Lastzuständen ermittelt wurden, beinhalten die Überlagerungsergebnisse die korrekten zugehörigen Schnittkräfte.

6.3 Verkehrslastauswertung mit ELLA und Laststellungen

Die Auswertung der Verkehrslastmodelle stellt große Anforderungen an ein Statikprogramm. Einerseits müssen für unzählige Nachweisstellen die maßgebenden Laststellungen gefunden werden. Andererseits sind aber auch mehrere Lastmodelle zu untersuchen und zu vergleichen.

SOFiSTiK bietet sowohl die Möglichkeit von expliziten Laststellungen als auch Einflusslinienauswertungen mit dem Modul ELLA. Beide Varianten haben Vor- und Nachteile, im vorliegenden Projekt wird eine Kombination aus beiden Berechnungen verwendet.

Für Verkehrslasten bieten Lastenzüge eine große Vereinfachung. SOFiSTiK stellt eine Vielzahl von vorgefertigten Lastenzügen zur Verfügung. Neben einfachen Lastenzügen wie eine Doppelachse des Lastmodells 1 stehen auch komplexe Lastenzüge wie das Lastmodell 3 mit den erforderlichen Anteilen aus dem Lastmodell 1 zur Auswahl. Auch Spezialvarianten wie Sonderfahrzeug über zwei Fahrstreifen werden inzwischen mit den Standardmodellen abgedeckt. Die kontinuierliche Weiterentwicklung durch SOFiSTiK hat in diesem Bereich einige bedeutende Erleichterungen gebracht.

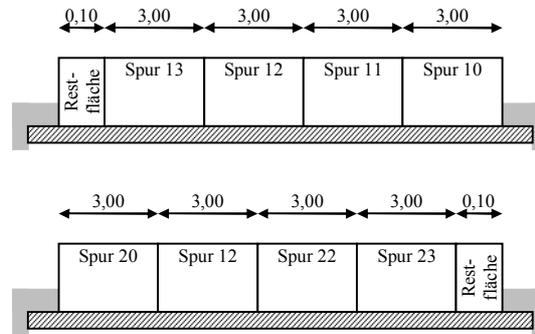


Abbildung 2: maßgebende Fahrstreifenteilungen

Die zur Aufbringung auf das Tragwerk nötigen Lastspuren können entweder manuell definiert werden oder automatisch von einer Achse mit der Fahrbahnbreite abgeleitet werden. Der Spurtyp EC erstellt links- und rechtsbündige Spurausrichtungen sowie eine zentrierte Spurteilung:

SPUR AXI S EC WR 6. 05 WL - 6. 05

Nach den Vorbereitungen der Lastenzüge und Lastspuren ist die Entscheidung zwischen Laststellungen und Einflusslinien zu treffen. Der Vorteil einer Einflusslinienauswertung liegt in der detaillierten Untersuchung vieler möglicher Laststellungen. Für jedes Element wird für jedes Schnittkraftergebnis eine Einflusslinie aufgestellt und mit den vorgegebenen Lastenzügen ausgewertet. Dadurch kann bei passender Wahl der Fahrstreifenteilung für jedes Schnittkraftergebnis ein Maximum und Minimum gefunden werden. Ein Nachteil liegt aber auf der Hand, dieses rechenintensive Verfahren benötigt viel Zeit. Selbst bei relativ geringer Elementzahl steigt der Rechenaufwand rasant an. Während die Rechenzeit für ein Brückenobjekt – von der Systemgenerierung bis zu den Nachweisen, jedoch ohne ELLA – bei ca. 20 Minuten liegt, so sind für die Verkehrslastauswertung mit ELLA zusätzlich ein bis zwei Stunden zu veranschlagen.

Eine weitere Einschränkung von ELLA betrifft spezielle Elemente wie externe Schnitte, Pfahl- oder Plattenbettungen. Für diese Elemente können mit ELLA keine Einflusslinien ausgewertet werden. Da bleibt nur die Berechnung mit expliziten Laststellungen. Aber auch für diese können mit dem Satz COPY die Lastenzüge komfortabel entlang von Spuren erzeugt werden. Eine Herausforderung stellt das Lastmodell 3 unter gleichzeitiger Anwendung des Lastmodells 1 dar. Hier ist im Bereich des Sonderfahrzeuges eine Lücke in der Gleichlast zu berücksichtigen und außerhalb dieses Bereiches für die Doppelachse die ungünstigste Position zu suchen. Wir haben dieses Problem mit einer eigenen Zwischenüberlagerung für jede Stellung des Sonderfahrzeuges gelöst.

Für die Bogenbrücke haben wir versucht die Vorteile beider Berechnungsvarianten zu vereinen. Für das Plattentragwerk (als Stabsystem) und die Stützen wurden mit ELLA die maximalen Biegemomente M_y , die Querkräfte V_z sowie die Normalkräfte ausgewertet. Durch die Einschränkung der Elementanzahl blieb die Rechenzeit überschaubar. Für das Bogentragwerk, die Lager sowie die Gründungskräfte sind die maßgebenden Laststellungen leicht zu ermitteln. Diese wurden als expli-

zite Lastfälle berechnet. Für das Ergebnis ist es ausreichend, die Einzellasten über den Stützen sowie alternativ jeweils in Feldmitte zu konzentrieren. Der feldweise Ansatz der Gleichlasten liefert hier eine hinreichende Genauigkeit.

Die Laststellungen ermöglichen zusätzlich auch die Berechnung der SIR-Schnitte, da hier einzelne Lastfälle zur Verfügung stehen. In den nachfolgenden Kombinationen wurde der jeweilige Maximalwert aus beiden Berechnungen weiterverwendet:

```
$Lastfälle:
SLF 921 TYP GR_1 BEZ "max My ELLA"
SLF 922 TYP GR_1 BEZ "min My ELLA"
SLF 941 TYP GR_1 BEZ "max My Verk"
SLF 942 TYP GR_1 BEZ "min My Verk"

+PROG MAXIMA
KOMB 31 RARE . . .
ACT GR_1
```

6.4 Bauablauf mit CSM

Für ein Bauwerk mit zahlreichen Bauabschnitten, wie es diese Bogenbrücke darstellt, ist ein Hilfsmittel wie CSM zur Berechnung des Bauablaufs äußerst wertvoll. Der Bau des Bogens erfolgt im seilgestützten Freivorbau. Jeder einzelne Vorbautakt wird getrennt berechnet. In Summe sind für die gesamte Brücke 31 Takte geplant. Jeder Takt besteht zumindest aus zwei CSM-Bauabschnitten, die berechnet werden müssen. In CSM muss jeder Bauabschnitt definiert werden und für jede Gruppe ein Aktivierungsbauabschnitt festgelegt werden. Für die temporären Baumaßnahmen, wie zum Beispiel die Abspannseile, ist zusätzlich auch noch der Zeitpunkt der Demontage anzugeben. Das gleiche gilt auch für Lasten zusätzlich zum Eigengewicht, wie zum Beispiel Ausbaulasten oder Anhängelasten aus einem Lehrgerüst. Durch die Angabe geeigneter Bauabschnitte mit Zeitdifferenz werden von CSM die Schwind- und Kriecheinflüsse mitberücksichtigt. Die Eingabe mit Schleifen erleichtert die Eingabe auch hier deutlich.

Da die Abspannseile nur Zugkräfte übertragen können und ausreichender Zug nicht in allen Zuständen sichergestellt werden kann, sind alle Bauzustände mit Seilen iterativ zu berechnen. Bei dieser Iteration werden die Seile mit theoretischen Druckkräften aus dem System entfernt. Diese Art der nichtlinearen Berechnung kann auch über CSM gesteuert werden. Mit der Angabe von STEU PROB NONL wird die nichtlineare Iteration aktiviert und in alle Bauzustände ohne Seile kann mit BA 10 PROB LINE wieder eine lineare Berechnung erzwungen werden.

+PROG CSM

...

STEU PROB NONL \$ Nichtlineare Rechnung aktivieren

BA 10 typ G_1 **PROB LINE** bez 'G_1 Vorlandtragwerk + Stützen'

BA 12 typ B **PROB LINE** bez 'Lehrgerüst anhängen'

BA 15 typ C_1 **PROB LINE** bez 'Kriechstufe' T 14 RH 80 TEMP

20

...

BA 40 typ G_1 bez 'G_1 Bogen + Seile' **\$ mit**

Iteration

BA 45 typ C_1 bez 'Kriechstufe' T 14 RH 80 TEMP

20

...

BA 270 typ G_1 **PROB LINE** bez 'G_1 Tragwerk'

BA 272 typ B **PROB LINE** bez 'Lehrgerüst anhängen'

BA 275 typ C_1 **PROB LINE** bez 'Kriechstufe' T 14 RH 80 TEMP

20

...

ENDE

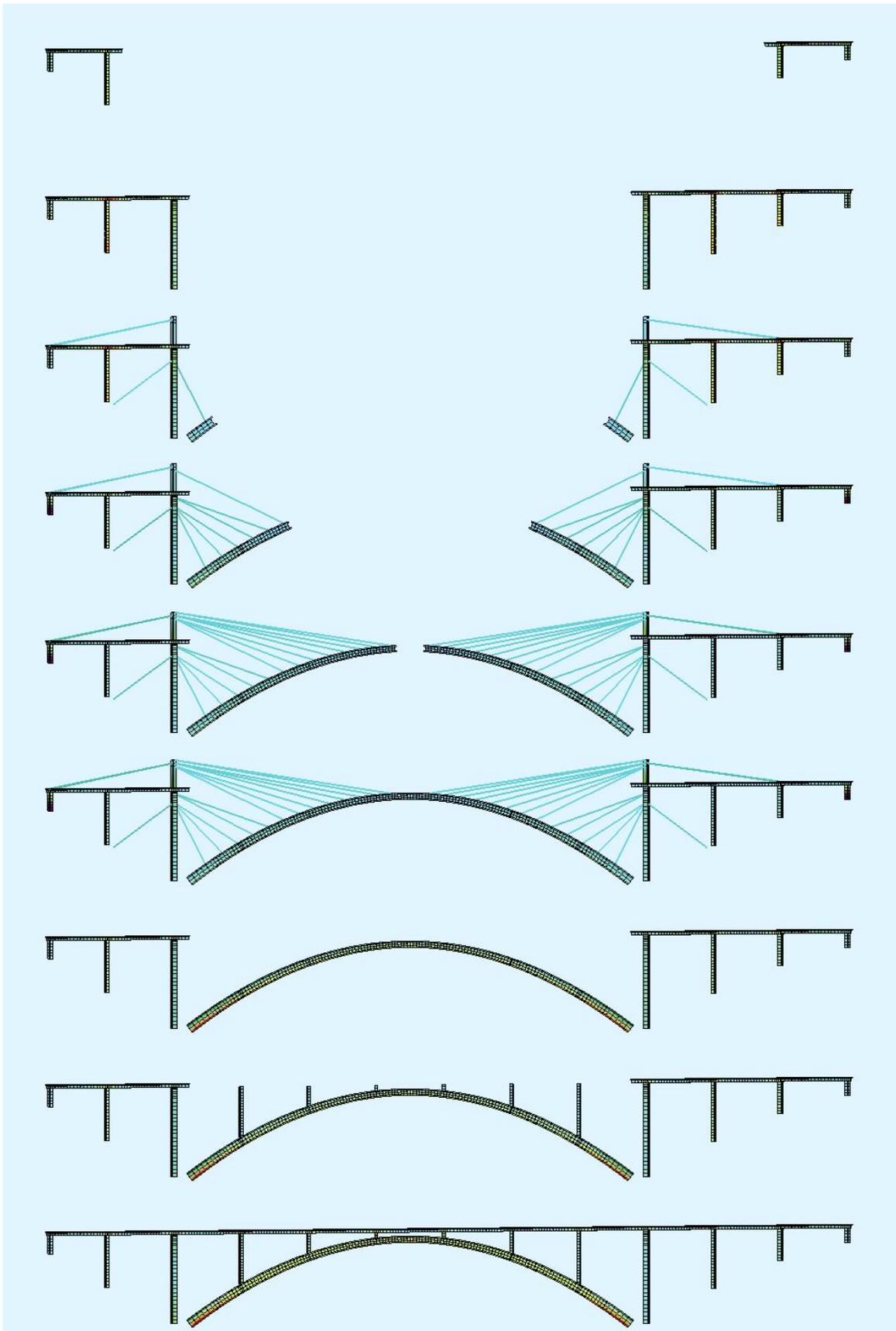


Abbildung 3: Auswahl einiger Bauabschnitte

6.5 Überlagerungen mit MAXIMA

Mit dem Satz DESI in CSM können Überlagerungsvorschriften und Nachweise generiert werden. Der so erzeugte Vorschlag liefert einen wertvollen Ansatz für die Überlagerungen im Endzustand. Alle veränderlichen Einwirkungen werden in einer Vorüberlagerung zusammengefasst und dann in einer Endüberlagerung mit den ständigen Einwirkungen aus dem Bauablauf wie Eigengewicht, Vorspannung und Kriechen&Schwinden (kurz: GPC) addiert. Durch die unterschiedlichen Kombinationswerte der veränderlichen Einwirkungen sind für jeden Kombinationstyp getrennte Vorüberlagerungen notwendig. Wie im Eurocode vorgesehen, schlägt CSM die Kombinationsvorschriften für die charakteristische (RARE), häufige (FREQ) und quasiständige (PERM) Kombination vor. Die nicht-häufige Kombination (NONF) wird in Österreich nicht verwendet. Die Bemessungswerte werden mit der Grundkombination (DESI) erzeugt. Die von CSM automatisch erzeugten Kombinationsvorschriften decken nur einfache Regelfälle vollständig ab. Für komplexere Einwirkungssituationen sind die Vorschriften entsprechend anzupassen

Durch den Einsatz von Vorüberlagerungen ist es auch möglich, die speziellen Vorschriften in den Eurocodes zu berücksichtigen und beispielsweise Wind und Temperatur getrennt voneinander mit den anderen veränderlichen Einwirkungen zu kombinieren (vgl. Abschnitt 3.4.). Zusätzlich besteht auch die Möglichkeit spezielle Bemessungssituationen wie Belagssanierungen oder Lagertausch zu berücksichtigen. Dazu werden für jede Bemessungssituation eine oder mehrere Vorüberlagerungen mit den jeweils anzusetzenden Einwirkungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Vorüberlagerungen werden dann einander ausschließend in der Endüberlagerung kombiniert.

Eine notwendige Voraussetzung für die Weiterverwendung von Überlagerungsvorschriften in anderen Projekten ist die konsequente Verwendung von Einwirkungen. Damit können die Kombinationsregeln unabhängig von konkreten Lastfallnummern erstellt werden und daher leicht in ähnlichen Projekten weiterverwendet werden.

6.6 Nachweise mit AQB

Die Gebrauchstauglichkeitsnachweise werden wie die Bemessung mit AQB durchgeführt. Die mit CSM-DESI generierten Eingaben für Bemessung und Nachweise können auch bei komplexen Projekten als Grundlage für Anpassungen verwendet werden. Notwendige Anpassungen betreffen meist den Nachweis der Rissbreite. Hier ist die anzuwendende Kombination fallabhängig zu adaptieren. Gegebenenfalls kann auch der Wert der Rissbreite oder das Berechnungsverfahren verändert werden.

In den neueren Versionen von CSM werden einige zusätzliche dat-Dateien erzeugt, die projektspezifische Eingaben wie Lastfallnummern von Bauabschnitten oder Bezeichnungen Einwirkungen enthalten. Diese können verwendet werden, um eine gewisse Unabhängigkeit der CADINP-

Eingaben vom konkreten Projekt zu erhalten. Eine Weiterverwendung in verwandten Projekten wird dadurch erleichtert und der Aufwand einer Eingabe auf mehrere Projekte verteilt.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Die Grundideen der Eurocodes, die konsequente Trennung von Einwirkung und Widerstand in den Nachweisen und eine europäische Angleichung der Standards und Verfahren, sind aus Anwendersicht zu begrüßen.

Bei der Anwendung der Eurocodes hat Österreich eine Vorreiterrolle übernommen. Die Anwender befinden sich in einer schwierigen Umstellungsphase bis wieder Erfahrungswerte vorhanden sind. Erschwert wird dies durch eine Reihe von Fehlern, Mehrdeutigkeiten und Unstimmigkeiten in den Normenwerken, die erst in der praktischen Anwendung auftreten. Deren Behebung kann aber nicht national erfolgen, sondern muss in den europäischen Gremien koordiniert werden. Dadurch kann eine Korrektur nicht so rasch, wie von den Anwendern gewünscht, durchgeführt werden.

In dieser Zeit bildet eine verlässliche Unterstützung durch die Softwarehersteller den Anwendern eine wichtige Basis für die tägliche Arbeit. Fehlerfreie Programme, die die neuen Kombinations- und Nachweisverfahren unterstützen, stellen eine große Erleichterung dar. SOFiSTiK hat darauf schon früh reagiert bereits eine Vielzahl von Neuerungen implementiert. Zusätzliche Anwenderwünsche werden rasch aufgegriffen und bearbeitet. Auch bei speziellen Problemen ist stets ein kompetenter Ansprechpartner verfügbar.

8 PROJEKTANT



KMP ZT-GmbH
A - 4040 Linz, Kapellenstraße 13
Tel.: +43 732 730555 - 0 Fax: DW-38
office@kmp.co.at www.kmp.co.at

9 LITERATUR

- [1] Bridge Design CABD-Concept SSD Version 2010-4, Unterlagen zu 10. SOFiSTiK Fachgespräch - Brückenbau, Linz, 2009
- [2] *Eichinger-Vill E., Glatzl J. (Hrsg.):* Einwirkungen auf Straßen-, Fußgänger- und Radwegbrücken gemäß Eurocode - Handbuch für die Praxis, Austrian Standards plus Publishing, Wien, 2009
- [3] Handbuch MAXIMA, SOFiSTiK, 2010
- [4] www.eurocode.at, ASI Austrian Standards Institute