

Rechnerische Methoden zur Heissbemessung am Beispiel einer Stahlkonstruktion eines Abspannportals im Projekt SBB in Mendrisio

Autoren: Matthias Stamm, Fabian Brinzel, Prof. Dr.-Ing. Dirk Lorenz

IBC Ingenieurbau-Consult GmbH, Januar 2021

Frank Bosler, JOSEF MEYER Stahl und Metall AG

Tags: Stahlbau, Brandschutz, Heissbemessung, Rechenverfahren, Naturbrand, baulicher Brandschutz

Die steigenden Wettbewerbsanforderungen, vor allem bei Grossprojekten, erfordern schnelle und kosteneffiziente Ausführungen von geplanten Bauprojekten. Im Brandschutz sind die Anforderungen speziell für den Schutz der konstruktiven Ausführung im ersten Schritt einfach formuliert. In der Ausführungsphase sind diese Anforderungen mit erhöhten Aufwendungen der einzelnen Gewerke (Haustechnik, Elektrotechnik, Klima, etc.) verbunden. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, setzen Planungs- und Ausführungsbüros verstärkt Simulationen zur Berechnung von brandschutztechnisch ungeschützten Tragwerkssystemen ein. Diese können die konstruktive Ertüchtigung aus brandschutztechnischer Erfordernis in die normale Tragwerksberechnung als Lastfall Brandfall einbinden. Gleichfalls können auch bauliche Brandschutzmassnahmen berücksichtigt werden, so dass im Bauablauf keine Verzögerungen oder Kollisionen mit anderen Gewerken entstehen. Am Ende entsteht eine tragende Konstruktion, die brandschutzsicher ist und unkompliziert in der Ausführung umgesetzt werden kann.

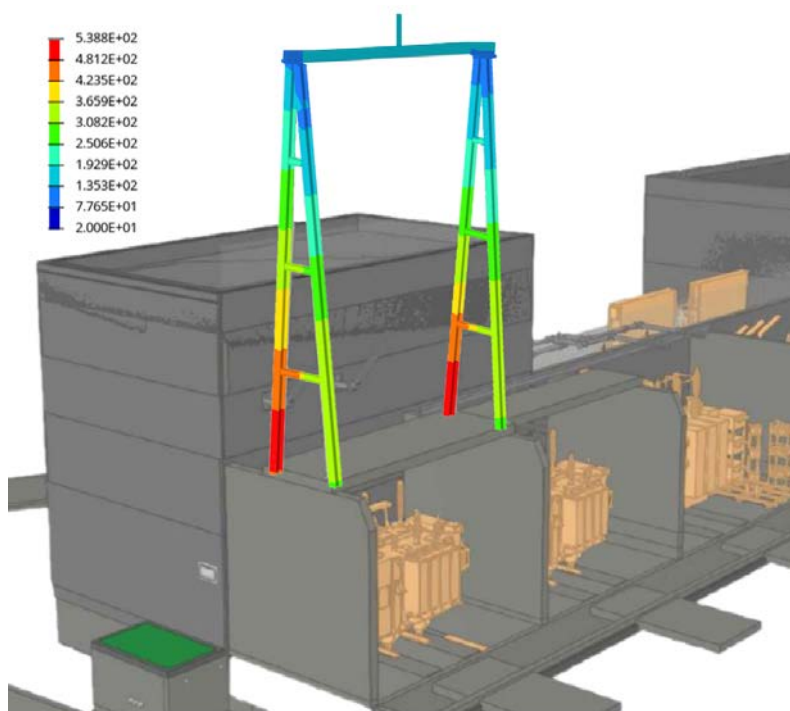


Abbildung 1 Numerisches Modell einer Stahlkonstruktion in der Verformungsansicht

Grundlagen

Für den Stahlbau ist die Anwendung des baulichen Brandschutzes grundsätzlich geregelt und effektiv ausführbar. Plattenbekleidung oder dämmschichtbildender Anstrich sind unkompliziert und kostengünstig zu realisieren. Im weiteren Ausführungsablauf können sie aber eine schwierige Hürde für die nachfolgenden Ausbaumassnahmen darstellen, da die feuerfesten Schutzschichten nur partiell unterbrochen oder gestört werden dürfen. Somit können Sekundärkonstruktionen für Haus-, Elektro- oder Klimatechnik nur mit grossem Aufwand an der verdeckten Primärkonstruktion angeschlossen werden. Um den Aufwand des passiven Schutzes zu reduzieren, haben sich vor allem verstärkt in den letzten Jahren rechnerische Verfahren etabliert. Der Brandfall wird mit mathematischen Simulationsmethoden beschrieben, um das Strukturverhalten von Stahlkonstruktionen realitätsnah für Hochtemperaturlastfälle nachzuweisen. In der Praxis ist aber die beste Lösung für den Kunden eine Kombination aus baulichen Massnahmen und rechnerischem Ansatz. Auch mit modernen Rechenverfahren, die mit nichtlinearen Solvern, leistungsstarken Rechenkernen und KI-gestützten Datenauswertungen den Planungsprozess von Bauvorhaben auch tatsächlich zeitnah begleiten können, sind nicht alle Schutzziele des Brandschutzes allumfassend rechnerisch nachzuweisen. Bauliche Brandschutzmassnahmen werden auch in Zukunft fester Bestandteil des Stahlbaus bleiben. Die Möglichkeiten der Ingenieurmethoden können die Anwendungen des Brandschutzes allerdings effizienter gestalten, diese ergänzen und die Ausführung des Bauablaufes insgesamt vielfach vereinfachen.

Die Simulationsmethoden für die Heissbemessung durchlaufen eine ähnliche Entwicklung wie numerische Berechnungsmethoden in der Fahrzeugbranche. Vor den computergestützten Entwicklungen wurden Fahrzeuge als Hardware-Prototypen gebaut und in Crashtests geprüft, wobei sie dadurch zerstört wurden. Mit Einführung der CAD wurde der Konstruktionsprozess verbessert und mit Einführung der CAE konnten auch die Prototypen eingespart werden. Mit dem Einzug der computergestützten Konstruktion und Berechnung wird vom Entwurf bis hin zum Prototyp nur ein digitales Modell entworfen, berechnet und getestet. Damit wird der Zeit- und Materialaufwand um ein vielfaches reduziert. Der Vorteil in der digitalen Methodik liegt darin, dass die Modelle leicht angepasst werden können und der Aussagewert der Ergebnisse höher ist als in tatsächlich getesteten zerstörten Modellen. In der Bauindustrie, speziell im Brandschutzbereich, bedeutet das, dass virtuelle Tragkonstruktionen brandschutztechnisch am Computer dimensioniert und getestet werden und so der Aufwand für die Schutzmassnahmen auf der einen Seite und der Aufwand für die Ausbaugewerke und damit des gesamten Bauablaufes auf der anderen Seite minimiert werden.

Projektbeispiel

Im Folgenden soll ein kurzes Beispiel für die Anwendung von numerischen Verfahren gezeigt werden. Im Auftrag der SBB wird der Neubau eines Unterwerkes in Mendrisio realisiert. In einer Heissbemessung für die Stahlrahmenkonstruktion eines Abspannportals in Mendrisio im Kanton Tessin, wurde mit einem Naturbrandverfahren der Nachweis für die ungeschützte bzw. teilgeschützte Ausführung erbracht.

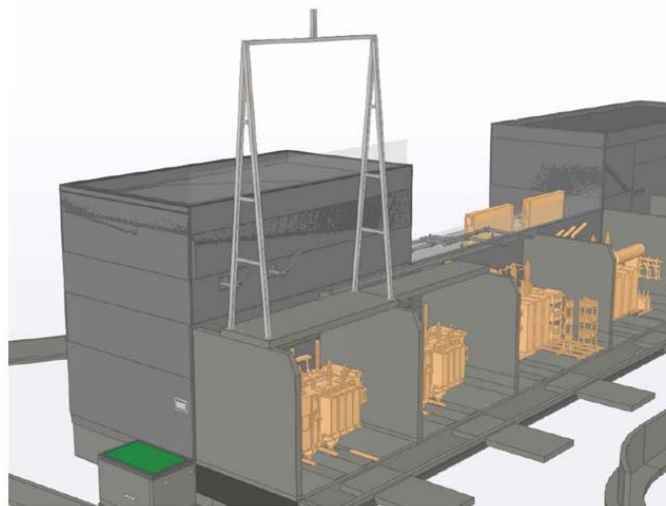


Abbildung 2 Trafobuchten des Unterwerkes mit Abspannportal

Mit Eröffnung des Basistunnels Gotthard steigt auch die SBB-Bahnverkehrsleistung. Um den elektrischen Leistungsbedarf zu decken werden verschiedene Stromversorgungsprojekte realisiert. In der Stadt Mendrisio ist der Bau eines Unterwerkes geplant. Die Firma Repower AG übernimmt die Generalplanung und das Stahlbauunternehmen Josef Meyer Stahl und Metall AG führt Teile der Konstruktionen aus. Für einen Stahlrahmen eines Abspannportals mit den Brandschutzanforderungen R60 ist eine rechnerische Ermittlung des Feuerwiderstandes in teilgeschützter Ausführung in Zusammenarbeit zwischen Brandschutz und Stahlbau erfolgreich realisiert worden. Im Ergebnis konnte die Rahmenkonstruktion nach technischen Vorgaben des Stahlbauunternehmens umgesetzt und der Nachweis der Feuerwiderstandsfähigkeit rechnerisch erbracht werden.

Die Trafotechnik ist in Gebäudebuchten untergebracht, die im Aussenbereich angeordnet sind und die einzelnen Trafos brandschutztechnisch voneinander baulich abtrennen (siehe Abbildung 2). Oberhalb eines Trafos werden die Stromkabel in bzw. aus der Anlage des Unterwerkes geführt. Um einen grossen Abstand zwischen Trafo und Stromkabel zu gewährleisten, wird ein 14 m hoher Stahlrahmen angeordnet, der die Leitungen dann zu weiteren technischen Anlagen führt. Dieses Abspannportal ist das Objekt der brandschutztechnischen Untersuchung. Um die Brandschutzanforderung von R60 zu erfüllen, muss der Rahmen entweder baulich geschützt oder rechnerisch nachgewiesen werden. Aufgrund der geometrischen Randbedingungen (Eingerüsten mittels Flächengerüst), der Korrosionsschutzanforderungen (Aussenbereich C3 mässig) sowie der grossen Höhe bzw. Entfernung zur Brandlast ist der Weg der rechnerischen Nachweismethoden gewählt worden.

Temperaturermittlung

Die generelle Anforderung an erweiterte rechnerische Verfahren unter Brandbeanspruchung werden laut Eurocode wie folgt definiert: „Allgemeine Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Feuerwiderstandsfähigkeit müssen eine realistische Analyse der Konstruktion bei Brandbeanspruchung ermöglichen. Sie müssen unter Berücksichtigung des grundlegenden physikalischen Verhaltens zu einer verlässlichen Näherung des zu erwartenden Verhaltens der massgebenden Konstruktionsteile unter Brandbeanspruchung führen.“ Der realitätsnahe Ansatz ist die Naturbrandbetrachtung, in der mit Hilfe einer Strömungssimulation die Heissgase eines Brandes in Nähe der zu untersuchenden Bauteile berechnet werden. Da eine exakte Vorhersage des Brandes nicht möglich ist, werden worst-credible Szenarien (glaubhaftestes Szenario auf der sicheren Seite liegend) mit allen benötigten Brandkenngrössen konservativ festgelegt. Im vorliegenden Fall wurde der unter dem Abspannportal liegende Trafo mit der Ölmenge von 24,2 Tonnen als Brandlast definiert und die Höhe der möglichen Brandfläche in unterschiedlichen Szenarien variiert. Der Stahlrahmen ist bis zum oberen Rahmenträger 14 m hoch und 15 m bis zur Spitze des Trägerstiels. Der Trafo befindet sich im Aussenbereich und ist nur durch eine 40 cm starke Betondecke vom Abspannportal getrennt. In Abbildung 3 ist das CFD-Modell der Brandsimulation dargestellt. In unmittelbarer Nähe der Rahmenstützen und des Trägers werden die Brandtemperaturen durch Thermo-Couple-Elemente gemessen.

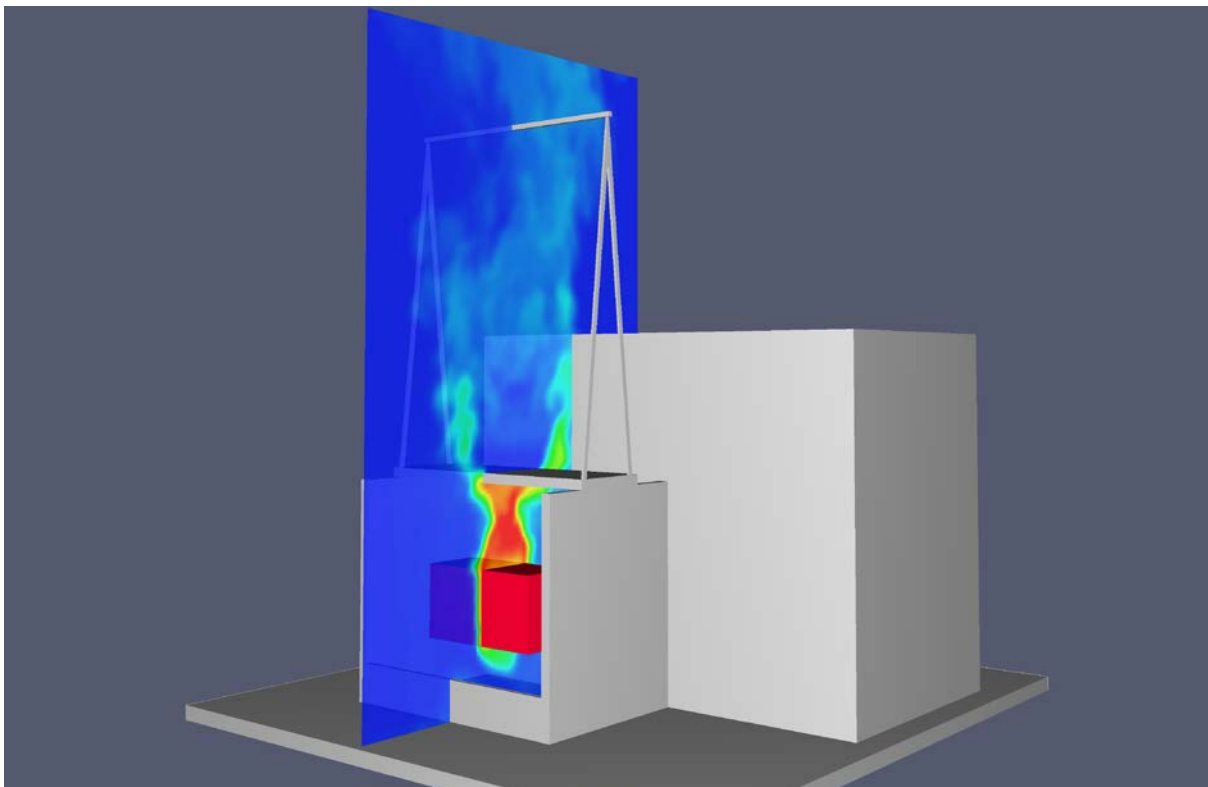


Abbildung 3 CFD-Modell des Brandbereiches

Die Bauteiltemperaturen, beispielhaft in Abbildung 4 dargestellt, zeigen in der rechnerischen Ermittlung erhebliche Unterschiede zwischen nomineller Betrachtung einer Aussenbrandkurve (ABK) und realitätsnahen Naturbrandkurven. Im direkten Vergleich zeigt sich der Vorteil der Simulation sehr deutlich. Die Naturbrandkurven haben eine sehr hohe Sicherheit in der schutzzielorientierten Anwendung bei gleichzeitiger realistischer Dimensionierbarkeit der Konstruktion.

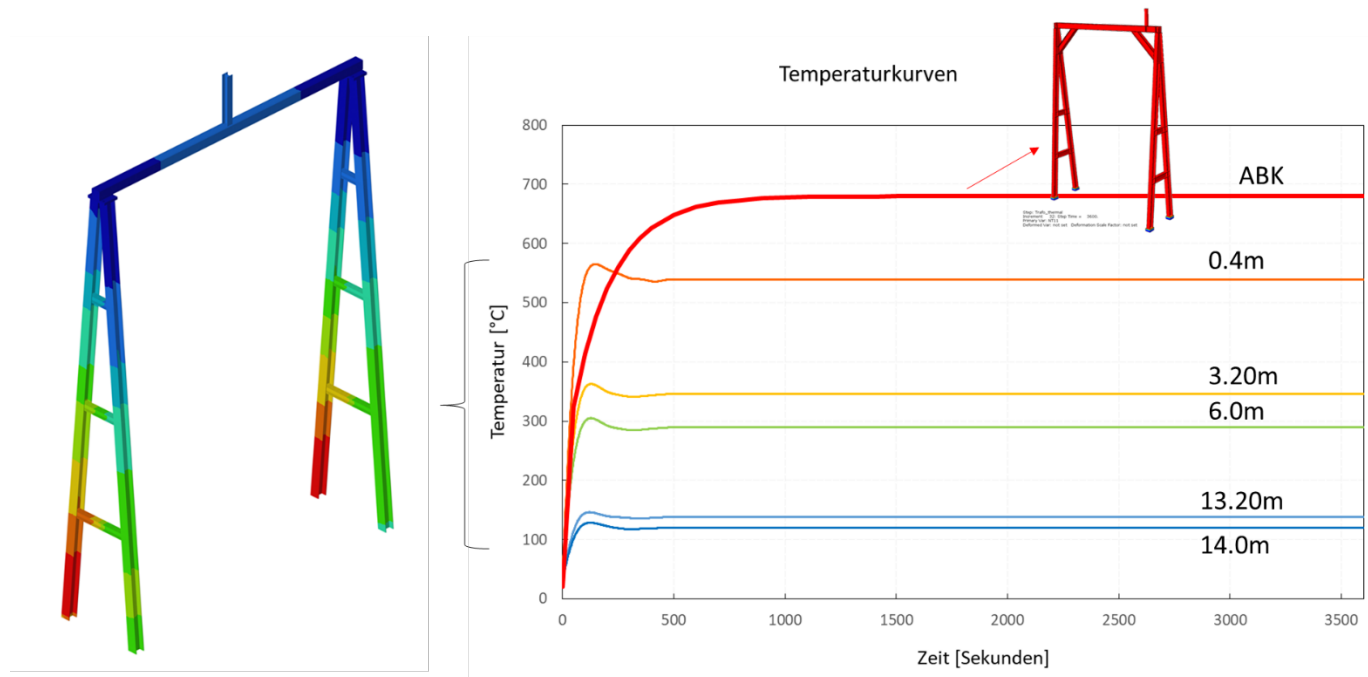


Abbildung 4 Naturbrandkurven und nominelle Brandkurven

In der Brandsimulation entstehen durch die Berechnung der Brandtemperaturen pro Zeitschritt sehr viele Daten, die in der weiteren Verwendung ausgewertet und dokumentiert werden müssen. Hier helfen KI-basierte Algorithmen, die mit Hilfe von Mustererkennung und Clustering für schnelles und genaues Übertragen der Datenmengen zwischen den Simulationsmodellen sorgen.

Mit der Erfassung der Brandtemperaturen ist der Lastfall der Brandeinwirkungen festgelegt. Jetzt kann das numerische Modell der Stahlstruktur beliebig auf die Bedürfnisse der Kunden abgestimmt werden. Variationsrechnungen mit verschiedenen Bauteildimensionen können für die ungeschützte oder teilgeschützte Ausführung angepasst werden.

Strukturanalyse

Mit den gemessenen Temperaturkurven aus der CFD-Analyse sind die Brandtemperaturen erfasst. Mit den normativ geregelten Materialgesetzen für Steifigkeit, Festigkeit und thermischer Ausdehnung, kann die numerische Analyse für die freien Bauteile der Stahlkonstruktion geführt werden.

Die konstruktiven Vorgaben an die Randbedingungen aus der Bauteilgeometrie und der mechanischen Belastung werden seitens des Stahlbaus vorgegeben und in einem FEM-Modell 3-dimensional umgesetzt. Diese Modellkörper können auch über grafische Schnittstellen aus BIM-Formaten eingelesen werden. Mit einem Grundmodell werden statische Analysen durchgeführt, bis eine finale Konstruktion gefunden ist, die dann mit den Brandtemperatureinwirkungen belastet wird. Auch jetzt sind geometrische Anpassungen möglich und neue Strukturstudien können bis zum Schluss als Nachweis der Feuerwiderstandsfähigkeit zur Statik der Konstruktion hinzugefügt werden. Durch die Verwendung der temperaturabhängigen Materialwerte ist eine detaillierte Untersuchung der Verformungen im Brandzustand möglich (siehe Abbildung 5), bis hin zur Analyse der Anschlüsse. Mit diesen Informationen sind nicht nur die Bauteile des Tragwerkes an sich bestimmbar, sondern auch die mögliche Kollision mit anderen Bauteilen der Gebäudestruktur. Eine Rückführung der deformierten Geometrie in ein BIM-Modell kann entsprechende Bauraumuntersuchungen ermöglichen, z.B. die starke Durchbiegung eines Stahlträgers über einer Leichtbauwand mit Brandschutzfunktion. So sind mögliche Funktionsstörungen von sicherheitstechnischen Anlagen während des Brandes prüfbar.

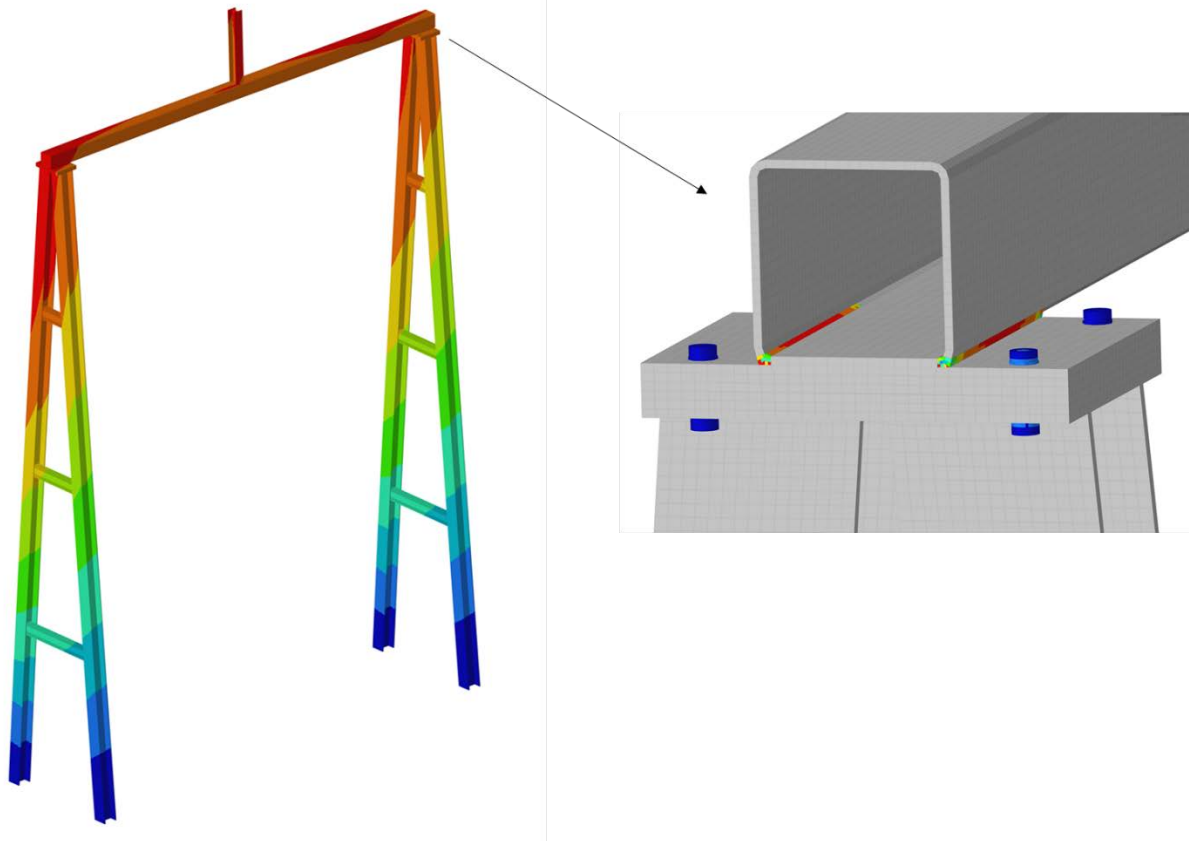


Abbildung 5 Verformungsanalyse nach Brandeinwirkung

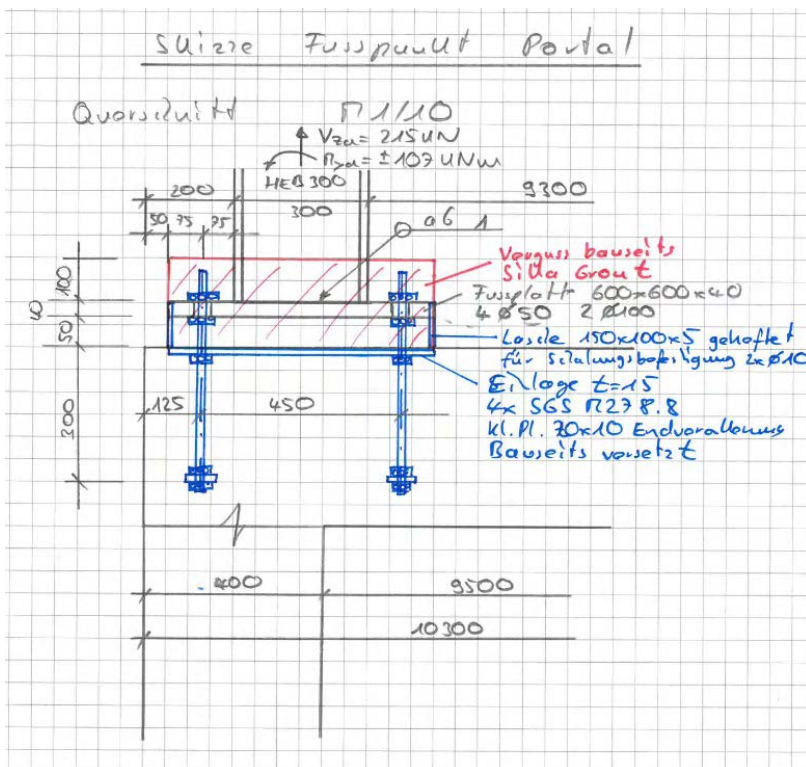


Abbildung 6: Stützenfusspunkt mit Mörtelverguss (rot)

Mittels vereinfachter Methoden ist eine Heissbemessung nur in sehr begrenzten Anwendungsbereichen durchzuführen. Da die thermische Dehnung dabei nicht berücksichtigt wird, ist der Anwender bei gezwängten Bauteilen auf der unsicheren Seite. Ebenso sind lokale Einflüsse und Stabilitätsprüfungen nicht abgedeckt. Entsprechend wird auf die vorsichtige Verwendung in den Eurocodes hingewiesen.

In vielen Fällen ist eine Heissbemessung mit komplett ungeschützter Ausführung nicht möglich. Dafür ist es sinnvoll eine teilgeschützte Konstruktion zu betrachten. In unserem Beispiel des Portals wurde die einbetonierte Ankergarnitur mittels Mörtelverguss geschützt (siehe Abbildung 6). Mithilfe thermischer Kennwerte von baulichen Brandschutzmassnahmen können diese in die Simulationen integriert werden. Damit lassen sich Stahlstrukturen in Konstruktionsbereiche einteilen, die für weitere Sekundärstrukturen nutzbar sind, ohne dass der Brandschutz der Konstruktion eingeschränkt wird. Dazu ist eine Zusammenarbeit zwischen den Planungsbeteiligten der Statik, des Brandschutzes und der Gebäudetechnik von Vorteil.

Fazit / Zusammenfassung

Brandschutzanforderungen im Stahlbau sind durch Verwendung von numerischen Methoden oder baulichen Lösungen anwendungsgerecht umsetzbar. Praxisorientierter als die getrennte Verwendung der Methoden ist eine kombinierte Lösung für eine sichere und kostgünstigere Umsetzung der Brandschutzanforderungen, sowie der baulichen Umsetzung insgesamt, da im weiteren Bauprozess keine Kollisionen mit dem Brandschutz stören. Ziel des Prozesses ist die sinnvolle, wirtschaftliche Kombination von brandschutztechnisch sicheren, individuellen Konstruktionen und ungehinderter Bauausführung. Als technischer Ausblick werden sich die Anwendungen von Simulationsmethoden in Zukunft immer stärker zusammen mit der Digitalisierung entwickeln. Sowohl in der Ausbildung an den Hochschulen und Universitäten, als auch in den technischen Möglichkeiten der Anwendungssoftware. Wie auch in der Automobilindustrie oder im Flugzeugbau werden realitätsnahe Simulationen den Ausführungsprozess vielfach vereinfachen und optimieren. Mit dem derzeitigen Stand der Technik sind in der kombinierten Lösung von baulichem Schutz und rechnerischem Ansatz alle Anwendungsfälle der Praxis lösbar, so dass eine sichere und anwendungsfreundliche Lösung entsteht.

Projektbeteiligte

Bauherr:	SBB Infrastruktur
Generalplanung:	Repower AG Via da Clait 12 CH-7742 Poschiavo
Stahlbau:	JOSEF MEYER Stahl und Metall AG Seetalstrasse 185 CH-6032 Emmen
Heissbemessung	IBC Ingenieurbau-Consult Mainz GmbH Im Niedergarten 12 D-55124 Mainz