

Kapitel 6

Die Umsetzung der Digitalen Baustelle

**Tobias Baumgärtel, Tim Horenburg, Yang Ji, Mathias Obergrießer,
Claus Plank, Markus Schorr, Bernhard Strackenbrock
und Johannes Wimmer**

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die vom Forschungsverbund ForBAU in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern erarbeiteten Konzepte der *Digitalen Baustelle* vorgestellt. In allen Projektphasen wurden die Anforderungen, Konzepte und Ergebnisse an realen Pilotbaustellen validiert. Dabei wurden die den Konzepten zugrunde liegenden Annahmen überprüft und die Praxistauglichkeit der Entwicklungen an den bestehenden Anforderungen der täglichen Baupraxis getestet, weiter optimiert und so in der Realität umgesetzt.

Als Pilotbaustelle zur durchgängigen Umsetzung der Digitalen Baustelle wurde ein Teilstück eines vierspurigen Neubaus einer Bundesstraße ausgewählt. An dieser Pilotbaustelle „Bundesstraße“ wurde die Zusammenführung der Teilmodelle mittels des ForBAU-Integrators realisiert. Das vom Integrator erzeugte parametrische Volumenmodell wurde für die trassengebundene 3D-Brückenmodellierung sowie für Ablaufsimulationen der Erdbauprozesse verwendet. An der Pilotbaustelle „Bundesstraße“ wurde weiterhin die baubegleitende Vermessung mittels terrestrischem Laserscannings umgesetzt. Für die Verwaltung der Modelle wurde ein PDM-System eingesetzt. Die an dieser Pilotbaustelle gewonnenen Ergebnisse und Erfahrungen sind im nachfolgenden Abschn. 6.1 beschrieben.

Beispiele zur weiteren Nutzung digitaler Modelle während des Ausführungsprozesses sind in Abschn. 6.2 dargestellt. An der Pilotbaustelle „Tunnelquerschlag“ wurden neue Methoden zur modellbasierten Qualitätssicherung bei der Dichtblockherstellung untersucht, die auch bei weiteren Tiefgründungsarten Anwendung finden. Zur Evaluierung von Baugrundmodellen anhand von Informationen aus der Bauausführung wurden an der Pilotbaustelle „Bohrpfahlgründung“ umfangreiche Auswertungen durchgeführt. An der Pilotbaustelle „Flussquerung“ wurde zudem der geometrische Soll-Ist-Abgleich mittels Augmented Reality durchgeführt. Die Erstellung eines 3D-Baustellenmodells aus Airborne-Photogrammetrie-Daten wurde an der Pilotbaustelle „Autobahnbrücke“ demonstriert.

T. Baumgärtel (✉)

Zentrum Geotechnik, Technische Universität München, Baumbachstraße 7, 81245 München, Deutschland

E-Mail: t.baumgaertel@bv.tum.de

6.1 Pilotbaustelle „Bundesstraße“

Bei der untersuchten Trasse handelt es sich um ein ca. zwölf Kilometer langes Teilstück eines vierspurigen Neubaus einer Bundesstraße. Die erforderlichen Erdbauarbeiten in diesem Abschnitt umfassen das Auffahren von 16 Einschnitten und die Herstellung von 17 Dammschüttungen. Die Trasse wird höhenfrei von zahlreichen Straßen und Wegen gekreuzt. Für Detailbetrachtungen wurde ein 1,1 km langer Abschnitt, in dem ein Einschnitt und zwei Dammschüttung herzustellen waren, herangezogen. Im Einschnittbereich kreuzt ein Wirtschaftsweg auf einer zweifeldrigen Brücke die Bundesstraße.

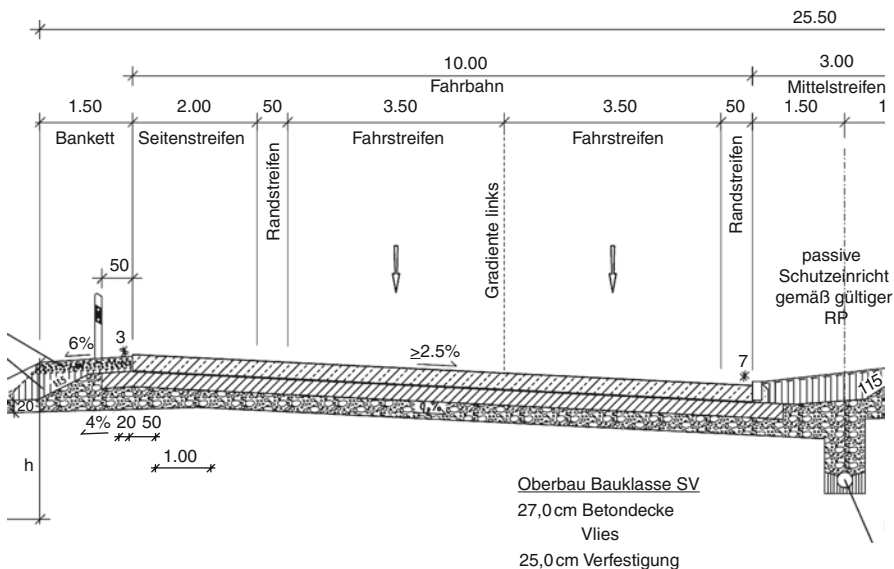
6.1.1 Einsatz des Integrators

Yang Ji

Für die Pilotbaustelle „Bundesstraße“ war ein vollständiges 3D-Modell der Trasse zu erzeugen. Das 3D-Modell wurde als Grundlage zur trassengebundenen 3D-Modellierung einer Brücke (s. Abschn. 6.1.2) verwendet. Weiterhin wurden anhand des 3D-Modells die Eingangsdaten für die Simulation des Erdbaus (s. Abschn. 6.1.3) gewonnen.

Das Urgelände mit einer Fläche von 2,37 km² lag bereits in Form eines digitalen Geländemodells vor, das aus 11.815 Dreiecken bestand.

Die Bundesstraße wurde nach dem Regelquerschnitt 26 (RQ 26) konstruiert (Abb. 6.1). Die Trassenplanung selbst wurde in Form eines LandXML-Files zur



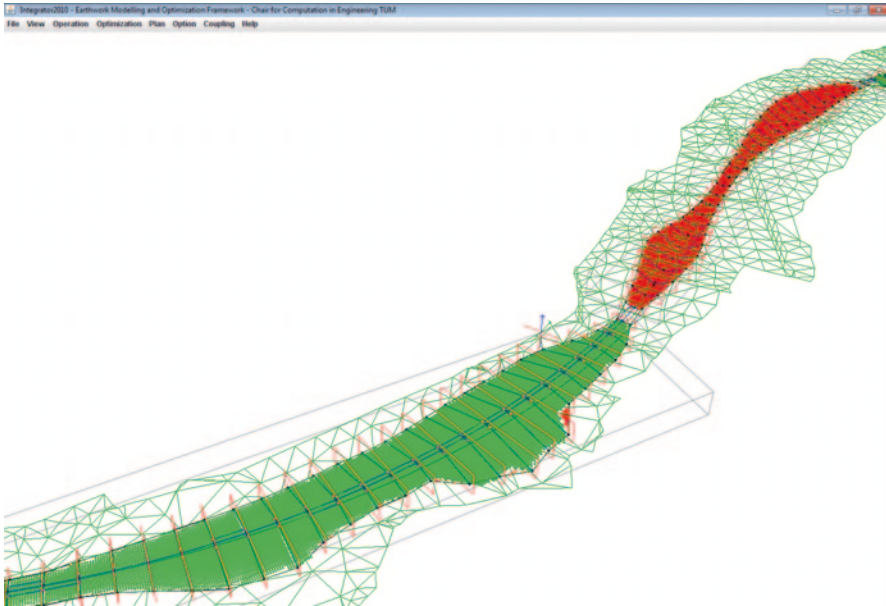


Abb. 6.2 Teil des 3D-Trassenmodells im ForBAU-Integrator

Verfügung gestellt. Zur Erstellung des 3D-Gelände- und Trassenmodells wurden die im Rahmen des ForBAU-Projekts entwickelten Technologien, die im Abschn. 2.3.3 vorgestellt wurden, angewendet.

Das in Abb. 6.2 dargestellte integrierte 3D-Modell wurde vom *ForBAU-Integrator* (s. Abschn. 2.3.6) erstellt. Die zu erstellenden Erdbauwerke, 16 Einschnitte und 17 Dammschüttungen, wurden mit Hilfe des Voxelisierungsalgorithmus in ca. zwei Millionen Voxel-Objekte zu je 16 m^3 ($4 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 1 \text{ m}$) diskretisiert. Jedes Voxel-Objekt enthält die Bodeneigenschaft, die 3D-Position sowie den Typ der Erdbauarbeit (Auftrag oder Abtrag). Trotz dieser sehr hohen Zahl von Voxel-Objekten, nimmt der Voxelisierungsvorgang nur etwa 20 min bei Nutzung eines handelsüblichen Computers in Anspruch.

Das Geländemodell sowie das Trassenmodell wurden anschließend im CAD-Programm *Siemens NX* für die Visualisierung der Ablaufsimulation und für die 3D-Brückenmodellierung zur Verfügung gestellt (Abb. 6.3).

6.1.2 Trassengebundene 3D-Brückenmodellierung

Mathias Obergrießer

Die trassengebundene Brückenmodellierung war zentraler Bestandteil im Forschungsprojekt ForBAU und wird nachfolgend anhand der Überführung eines Wirtschaftsweges detailliert beschrieben. Die hierfür benötigten theoretischen Grundlagen sowie die neu entwickelten Modellierungskonzepte wurden bereits im Abschn. 2.3.4 vorgestellt und bilden die Basis für die nachfolgende Umsetzung.

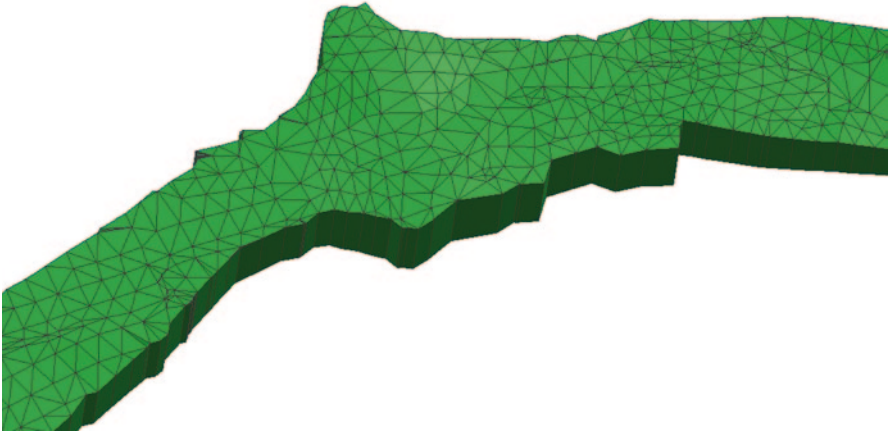


Abb. 6.3 Teil des 3D-Trassenmodells in *Siemens NX*

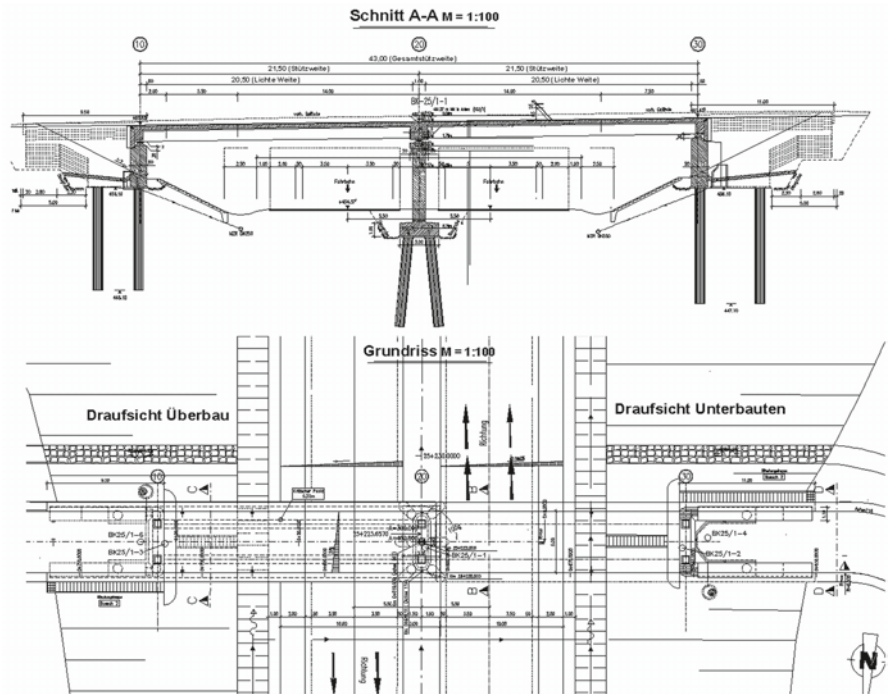


Abb. 6.4 Ansicht, Längsschnitt und Grundriss des Bauwerksentwurfsplans. (Quelle: Autobahndirektion Südbayern)

Bei dem zu modellierenden Bauwerk handelt es sich um eine zweifeldrig gelagerte Plattenbalkenbrücke, welche auf Großbohrpfählen mit einem Durchmesser von 75 cm und Längen zwischen acht und zehn Metern gegründet wurde. Im Bereich der Pfeilerachse werden die Bohrpfähle mit einer Neigung von 10:1, in den Widerlagerachsen senkrecht konzipiert. Der Überbauquerschnitt setzt sich aus zwei Fertigteil-Plattenbalken (FT-PlaBa) mit anschließender Ortbetongergänzung zusammen und besitzt eine Spannweite von 43,0 m. Die Einzelstützweiten der beiden Felder betragen jeweils 21,5 m. Die Lagerung des 6,5 m breiten Überbaues erfolgt durch sechs Elastomerlager, die im Bereich der Widerlager und des Pfeilers angeordnet werden. Die Widerlager selbst werden direkt an die Bohrpfähle ohne Pfahlkopfplatte angebunden, was eine kostengünstige Variante darstellt. Die Gründung des Pfeilers erfolgt konventionell mittels Pfahlkopfplatte. Weitere geometrische Informationen, die das Bauwerk bzw. die Trassengeometrie betreffen, können aus dem Bauwerksentwurfsplan in Abb. 6.4 entnommen werden. Neben dem Übersichtsplan liegen als Entwurfsplanung weitere Detailzeichnungen, beispielsweise zum Überbauquerschnitt wie in Abb. 6.5 dargestellt, vor.

Modellierung der Brücke

Der Trassierungsverlauf der Brücke stellt eine wichtige Grundlage für die 3D-Modellierung dar und bestimmt die geometrische Form sowie die Positionierung der Brücke im Trassierungsnetz. Der Verlauf der Trasse wurde mit Hilfe der Schnittstelle „Integrator2NX“ (s. Abschn. 2.3.6) in die CAD-Umgebung integriert und anschließend in einer Master-Skizze abgelegt. Die integrierten Referenzlinien (Abb. 6.6) spiegeln den rechten, linken und mittleren Verlauf der Trasse wider und

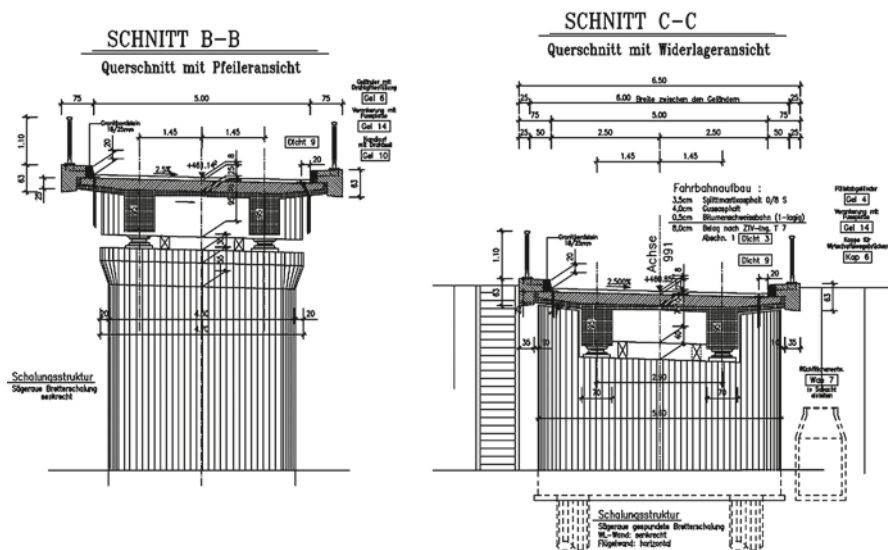


Abb. 6.5 Querschnitt des Bauwerksentwurfsplans. (Quelle: Autobahndirektion Südbayern)

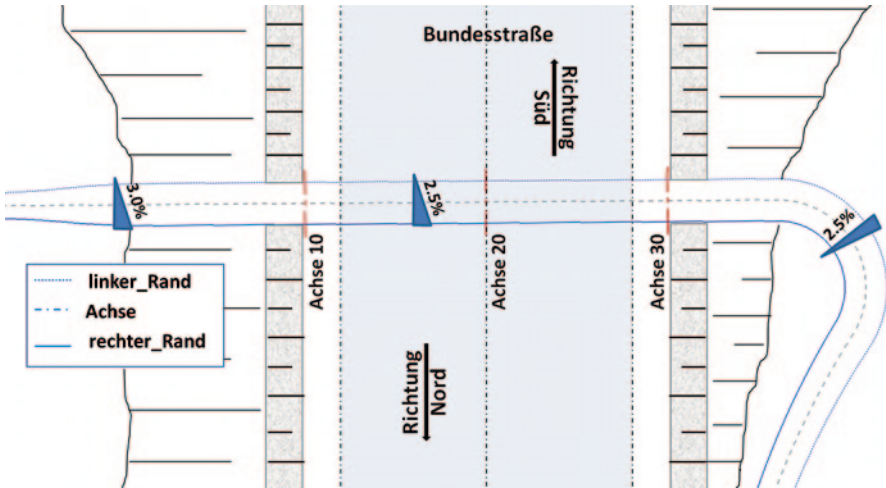


Abb. 6.6 Referenzlinien und Systemachsen der Brücke und der Straße

gewährleisten eine korrekte Modellierung des Brückenbauwerks in Abhängigkeit der Längs- und Querneigung sowie des Verlaufs der Trasse in Lage und Höhe.

Im nächsten Modellierungsschritt wurden die Brückenlagerachsen zu den Referenzlinien aus der Masterskizze hinzugefügt. Zur Sicherstellung einer assoziativen Kopplung der Lagerachsen an die Referenzlinien wurden diese in einer Skizzenebene, welche entlang eines Pfades (Referenzlinien) definiert ist, erzeugt (Abb. 6.7). Dieser Vorgang ermöglicht zum einen eine frei wählbare Positionierung der Unterbauten und zum anderen eine Definition der Stützweite des Überbaues. Die technische Umsetzung der Positionierung der Lagerachsen erfolgte durch die Angabe eines Abstandes bzw. der Bogenlänge der Skizzenebenen zum Startpunkt der Referenzlinie. Durch die tangentielle Abhängigkeit der Lagerachse (Skizzenebene) zur

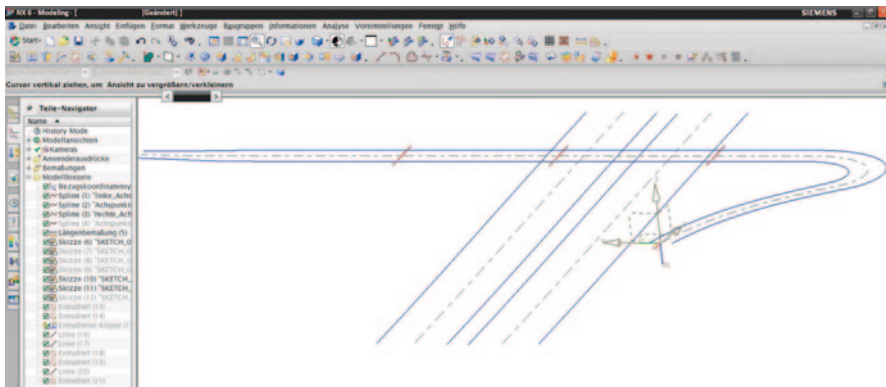


Abb. 6.7 Referenzlinien und Systemachsen der Brücke in Siemens NX

Brückennachse (Referenzlinie) kann zu einem beliebigen Zeitpunkt eine Modifikation der Positionierung bzw. der Stützweite der Brücke erfolgen.

Nachdem die Hauptgeometrien des Bauwerks definiert wurden, konnte mit der Modellierung der einzelnen Bauteile begonnen werden. Hierzu wurden im ersten Schritt, entsprechend der im Abschn. 2.3.4 bereits angesprochenen Strukturdefinitionen, die Hauptbaugruppen wie z. B. Brücke, Baugrund, Trasse angelegt. Anschließend wurden diese Hauptbaugruppen in weitere Unterbauteile zerlegt, sodass eine einfache und bauteilorientierte Navigation durch die Modellierungshierarchie möglich war. Am Beispiel der Brückenbaugruppe erfolgte eine erneute Unterteilung des Bauteils in die Unterbaugruppen Überbau und Unterbau. Dies erlaubt anschließend eine noch kleinteiligere Organisation. Die neu erzeugten Unterbaugruppen beinhalten sämtliche geometrischen Modellierungselemente und -vorgänge, die zur Erstellung des Bauteils nötig waren. Die feingranulare Einteilung der Bauwerksstruktur ermöglicht während bzw. nach Abschluss des Modellierungsprozesses eine einfache Nachverfolgung der einzelnen Arbeitsschritte und vereinfacht die Lösung von Problemen sowie nebenläufige Modifikationen durch unterschiedliche Benutzer (Concurrent Engineering).

Nachfolgend werden anhand des Brückenüberbaus die erforderlichen Modellierungsschritte exemplarisch aufgezeigt. Der Brückenüberbau sollte wenn möglich zuerst modelliert werden, da er zum einen die Form der Unterbauten sowie die Lage der Damm- bzw. Einschnittbereiche definiert. Begonnen wurde mit der Verlinkung der Referenzlinien bzw. der Brückennachsen mit dem Überbau-Bauteil. Dieser Vorgang gewährleistet eine assoziative und redundanzfreie Kopplung des Bauteils an die Elemente aus der Masterskizze. In einem nächsten Schritt wurde eine Skizze erzeugt, die den Querschnitt des zweistegigen Plattenbalkens entlang eines Pfades (mittlere Referenzlinie) definiert. Sämtliche geometrische Informationen, die den Überbauplattenquerschnitt betreffen, konnten aus dem Bauwerksentwurfsplan (Abb. 6.5) entnommen und anschließend in die Skizze in Abb. 6.8 integriert werden.

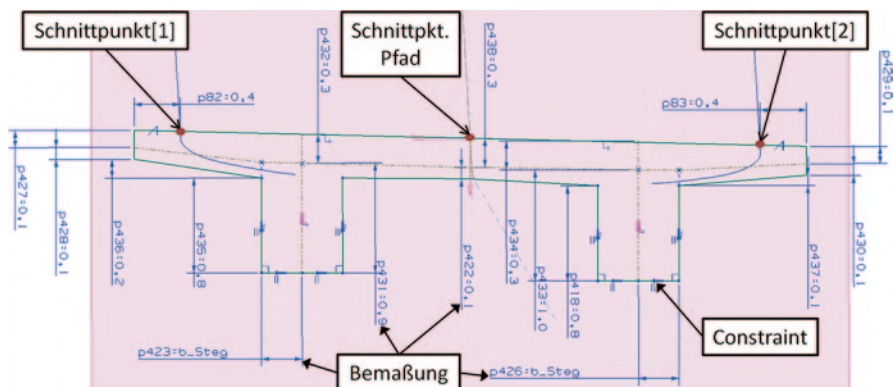


Abb. 6.8 Querschnittsskizze des Brückenüberbaues

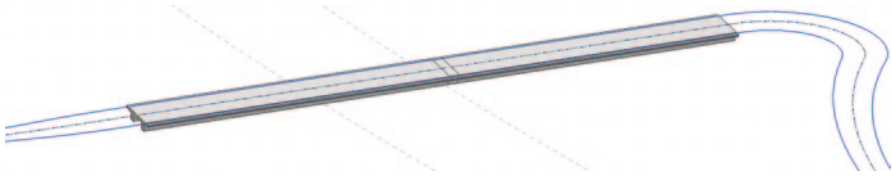


Abb. 6.9 Extrudierter Überbaukörper der Brücke

Durch den Einsatz einer Schnittpunktermittlungsfunktion zwischen der Skizzen-ebene und den beiden äußeren Referenzkurven konnte eine Kopplung umgesetzt und ein trassengebundener Modellierungsverlauf des Plattenbalkenquerschnittes gewährleistet werden.

Die Parametrisierung und somit die Modifizierbarkeit des Querschnittes erfolgt durch den Einsatz von parametrisch definierbaren Vermaßungsketten bzw. geometrischen Zwangsbedingungen (Constraints). Die Verwendung eines allgemein gültig definierten Parameter „b_Steg“, welcher mit der Vermaßungskette des Plattenbalkensteges aus der Skizze (p423 und p426 in Abb. 6.8) verknüpft wurde, ermöglichte zum Beispiel die Umsetzung variabler Stegbreiten des Plattenbalkens. Eine andere Möglichkeit der Parametrisierung bestand darin, die geometrische Beziehung zwischen der Kragarmbreite des Plattenbalkens und der Breite der Kappen mit Hilfe einer mathematisch definierten Abhängigkeit (im Beispiel: $p82 = b_Kappe - 0,35 \text{ m}$) herzustellen. Zudem wurden diese und weitere Parametrisierungstechniken eingesetzt, um komplexe geometrische Beziehungen innerhalb aber auch außerhalb einer Skizzenebene erstellen zu können. Ergaben sich aus der geometrischen Aufgabenstellung bzw. dem Bauwerksentwurfsplan rechtwinklige, parallele oder kollineare Bedingungen, so wurden diese als „Constraints“ mit in die Skizze integriert. Der Parametrisierungsprozess konnte abgeschlossen werden, nachdem alle geometrischen Freiheitsgrade mittels Vermaßungsketten und Zwangsbedingungen festgelegt wurden.

Im Anschluss erfolgte die Extrusion des erstellten Plattenbalken-Skizzenquerschnittes (Abb. 6.9). Hierfür kamen zwei verschiedene Extrusionsarten zum Einsatz. Die „Variable Extrusion“ modelliert den Querschnitt entlang eines definierten Pfades. Die Funktion „Extrudiert“ erzeugt aus mehreren variablen Querschnittsskizzen entlang von maximal drei Führungslinien einen Extrusionskörper. Die Funktion „Variable Extrusion“ eignete sich sehr gut für die Modellierung der einfachen Kappengeometrie. Hier wurde die Funktion „Extrudiert“ für die Umsetzung des Überbauplattenbalkenkörpers eingesetzt, da mit ihr geometrische Extrusionsprobleme im Bereich kleinerer Kurvenradien bzw. der Fahrbahnverengung vermieden werden können.

Nachdem die Extrusion des Überbaukörpers (Plattenbalken und Kappe) abgeschlossen war, wurde in einem nächsten Schritt eine parametrische Abhängigkeit zwischen der Überbaulänge (Spannweite) und den verlinkten Brückenachsen hergestellt. Hierzu wurde, wie in Abb. 6.10 dargestellt, eine assoziativ gekoppelte Bezugsebene in einen Abstand von 0,75 m zur Achsenebene der Widerlager erzeugt. Mit Hilfe dieser beiden Bezugsebenen konnte der Überbaukörper auf die reale Länge getrimmt werden. Die gleichen Modellierungsschritte wurden zur parametrischen Längendefinition der Kappenkörper durchgeführt.

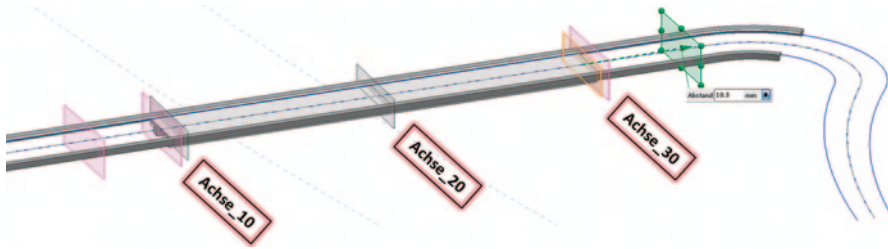


Abb. 6.10 Achsbezogen getrimmter Überbaukörper der Brücke

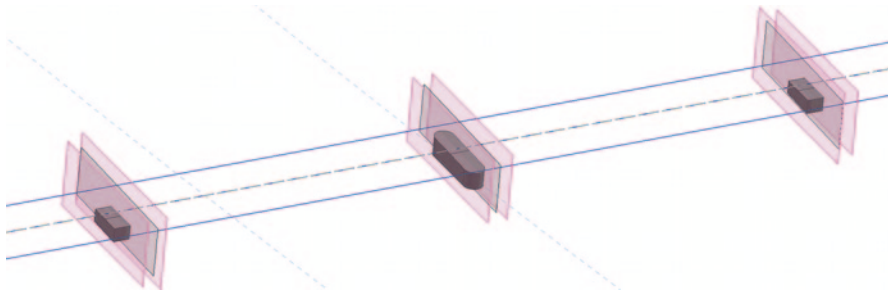


Abb. 6.11 Achsbezogen getrimmter Querbalken der Brücke

Im nächsten Schritt erfolgte die Umsetzung der Querbalken im Bereich der Widerlager bzw. des Pfeilers (Abb. 6.11). Hierzu wurde wiederum der Querschnitt in einer Skizze entlang eines Pfades konstruiert, anschließend extrudiert und mit Hilfe von achsgekoppelten Bezugsebenen auf die erforderliche Länge zugeschnitten. Zusätzlich wurde am Querbalken der Pfeilerachse eine Abrundung der Ecken mit einem Radius von 62,5 cm modelliert. Die Umsetzung erfolgte durch den Einsatz eines vom CAD-System zur Verfügung gestellten parametrisierten Features zur Kantenverrundung.

Nach Abschluss der Querbalkenmodellierung war der Überbau vollständig modelliert (Abb. 6.12), so dass im Anschluss die Umsetzung des Unterbaus (Widerlager, Pfeiler, Gründung, Lager usw.) erfolgen konnte. Aufgrund der Analogie des Modellierungsprozesses zur Überbaumodellierung wird auf eine detaillierte Beschreibung verzichtet. Die vollständig modellierte Brücke ist in Abb. 6.13 dargestellt.

Modellierung der Gründung

Bei der Modellierung der Bohrpfähle kam ein Konzept zum Einsatz, das eine Kopplung der Bohrpfähle an die Widerlager bzw. Pfeilerpfahlkopffundamente ermöglicht und zudem die Neigung der Schrägpfähle berücksichtigt. Die Modellierung der Bohrpfähle im Bereich der Widerlager erfolgte mit Hilfe von zwei Skizzen, die über eine assoziativ gekoppelte Bezugsebene mit einander verlinkt sind. Dieser Kopplungsansatz ermöglichte die Modellierung einer variablen Pfahllänge, welche

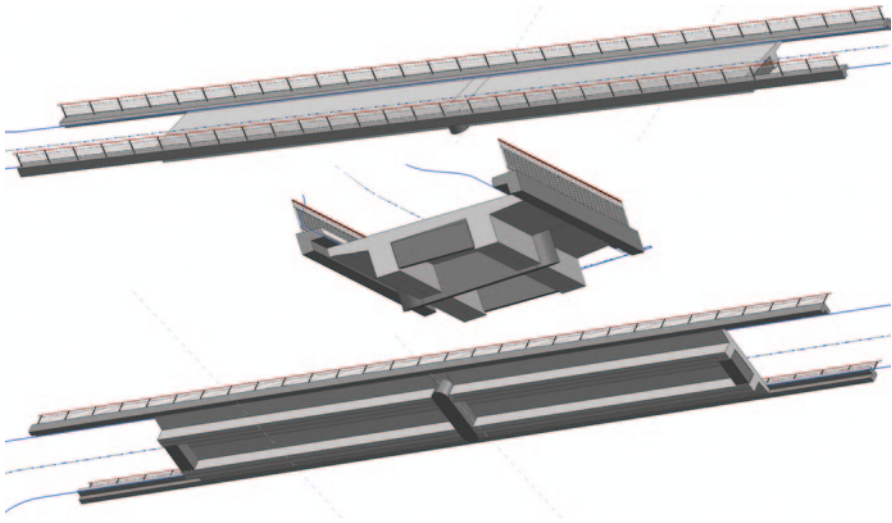


Abb. 6.12 Vollständiges Überbaumodell der Brücke

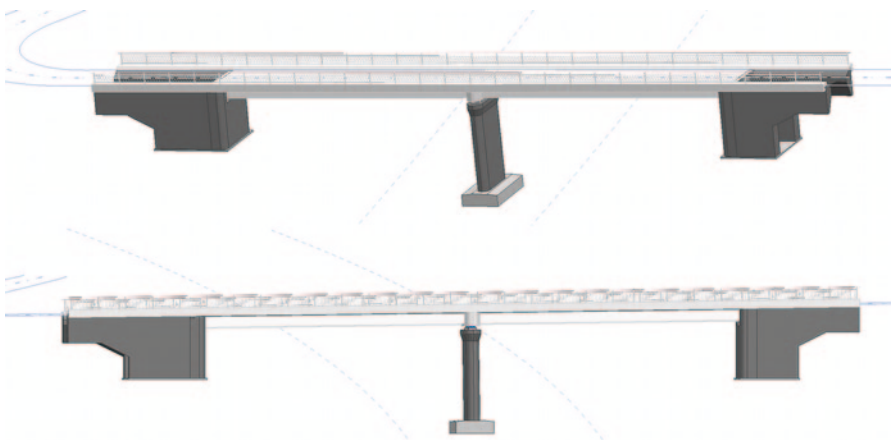


Abb. 6.13 Vollständiges Unterbaumodell der Brücke

durch den Abstand zwischen den beiden Ebenen definiert wurde. Außerdem besitzen die Pfahlskizzen eine vermaßungsgekoppelte Beziehung zu den Widerlageraußenkanten, sodass eine Verschiebung der Widerlagerposition eine Verschiebung der Bohrpfähle bewirkt. Die in Abb. 6.14 dargestellten Schrägpfähle unter dem Brückenpfeiler wurden nach dem gleichen Prinzip wie bei den Widerlagerpfählen modelliert. Zusätzlich wurde das Neigungsverhältnis der Schrägpfähle von 10:1 mit Hilfe des Verhältnisses Mittelpunktabstand der oberen Pfahlskizze zur unteren Pfahlskizze ($X=Z/10$ mit Z =Abstandsparameter der Ebenen) parametrisch integ-

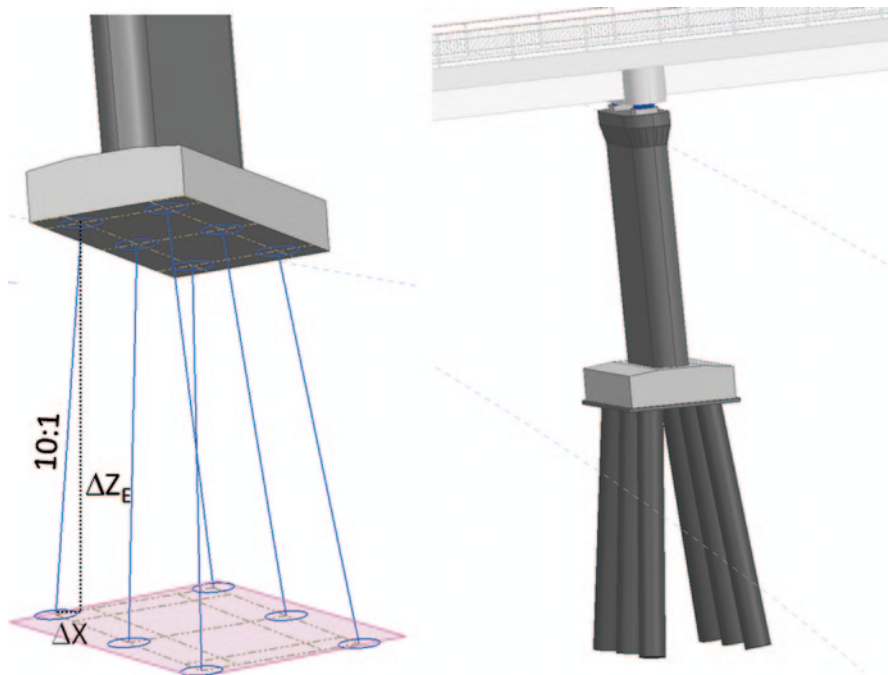


Abb. 6.14 Schräge Bohrpfähle unter Pfeilerachse

riert. So bewirkt eine Verlängerung des Pfahles bzw. des Abstandes der Bezugsebene eine Längenänderung des Pfahlschaftes bei gleichbleibender Neigung.

Vollständig parametrisches 3D-Brückenmodell

Am Ende dieses Modellierungsprozesses erhielt man ein parametrisches, trassengebundenes Brückenmodell (Abb. 6.15).

Durch eine Modifikation der Elemente aus der Masterskizze wird eine einfache Anpassung an neue Randbedingungen aus der Trassen- bzw. Brückenplanung

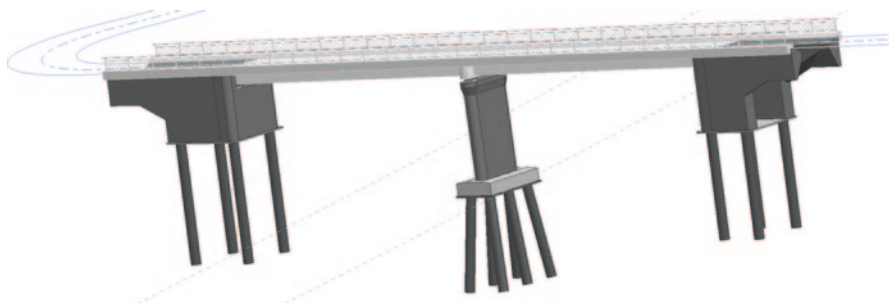


Abb. 6.15 Vollständiges Unterbaumodell mit Pfählen

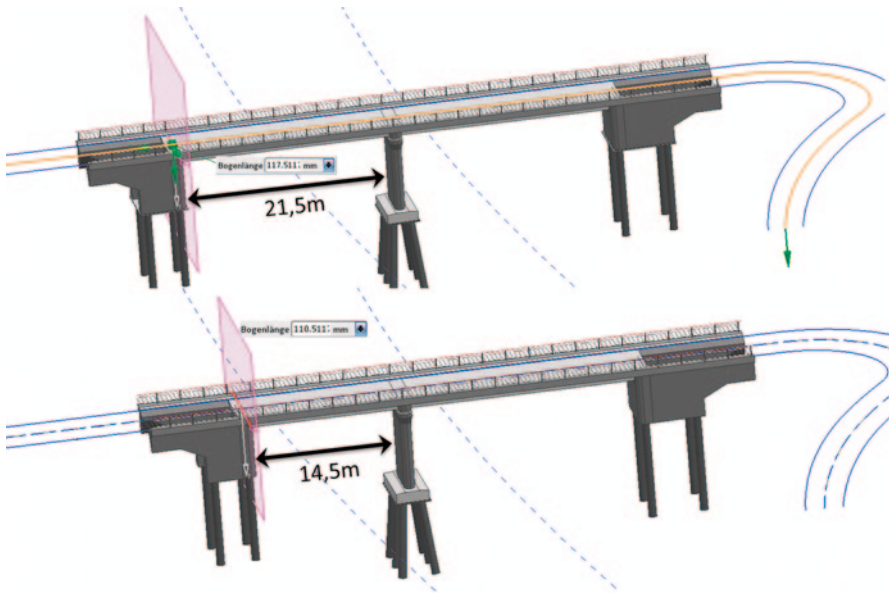


Abb. 6.16 Parametrisierte Modelländerung der Stützweite

ermöglicht. Sollte sich zum Beispiel aus der Finite-Elemente-Struktursimulation die Notwendigkeit zur Änderung der Stützweite ergeben, so kann der Brückenkonstrukteur dies durch eine Neupositionierung der Widerlagerachsen, beispielsweise von der Position 117,5117 m auf die Position 110,5117 m (Stützweitenreduktion $\Delta L_s = 7,0$ m) in der Masterskizze umsetzen, ohne dabei weitere Modellierungsprozesse durchführen zu müssen. Die Auswirkungen entsprechender Anpassung sind in Abb. 6.16 gegenübergestellt.

Anbindung weiterer 3D-Modelle

Zur Fertigstellung der gesamten 3D-Modellierung des Bauvorhabens wurden noch weitere Modellierungsschritte zur Anbindung des Baugrund- und Trassenmodells aus Abschn. 6.1.1 durchgeführt. Hierbei wurden Skizzen entwickelt, die die Geometrie der jeweiligen Objekte wie Straße, Damm oder Einschnitt mit ihren Parametern Böschungsneigung, Straßenbelaghöhe und -breite widerspiegeln. Die Einschnitts- bzw. Dammkörper wurden anschließend mit Hilfe von booleschen Operationen erzeugt. Aus den erhaltenen Erdkörpern kann man Informationen über die geplanten Massen ermitteln. Die Navigation durch die komplexe Modellierungsstruktur samt der beinhalteten Modellierungsprozesse konnte mit Hilfe eines bauteilorientierten Konzeptes auf einfache Art und Weise beherrscht werden. Die Modellhierarchie der einzelnen Bauteile ist in Abb. 6.17 dargestellt.

Anhand der Bildsequenz in Abb. 6.18 kann der Modellierungsprozess der Erdbauwerke nachverfolgt werden. Im oberen Bild wurde das 3D-Baugrundmodell im Bereich des Brückenbauwerks erzeugt. Das mittlere Bild zeigt die anschließend

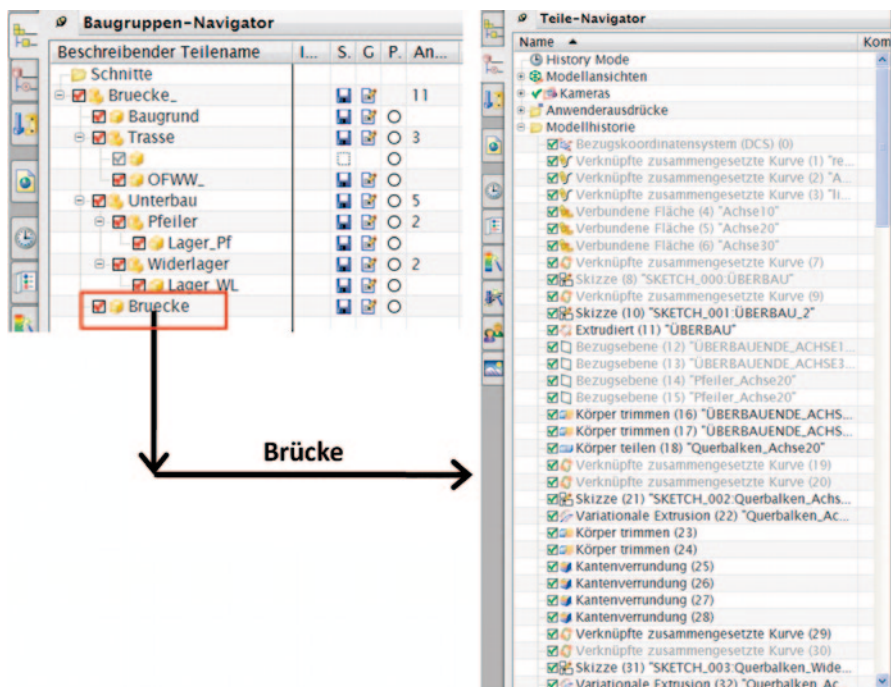


Abb. 6.17 Modellhierarchie der einzelnen Bauteile

modellierten Einschnitte im Bereich des Brückenbauwerks. Vervollständigt wird das Baugrund-Trassen-Brückenmodell durch das Hinzufügen der Dammgeometrie.

Selbstverständlich werden für die baupraktische Umsetzung des Bauwerkes immer noch ausgeplottete 2D-Ausführungspläne auf der Baustelle gefordert. Diese Pläne können durch das Ableiten von Ansichten und Schnitten aus dem 3D-Modell generiert und anschließend durch das Hinzufügen von Vermaßungsketten bzw. Beschriftungen an die Ansprüche der jeweiligen Gewerke (Schalungsbauer, Betonbauer, etc.) angepasst werden. Das bidirektionale Kopplungskonzept zwischen den 2D-Plänen und dem 3D-Modell ermöglicht eine redundanzfreie und zeitverkürzte Planungsänderung, indem die Modifikationen des Bauteils entweder am 3D-Modell direkt oder in der 2D-Zeichnung umgesetzt werden.

Mit dem hier beschriebenen Konzept kann jedes beliebige Brückenbauwerk modelliert werden. Durch die Kopplung der Brücke an den Trassierungsverlauf können bereits während der Entwurfs-, aber auch noch in der Ausführungsphase Planungsprozesse optimiert und redundante Vorgänge reduziert werden. Die Planung eines 3D-Brückenbauwerks, welches zugleich in die Trassierungs- und Baugrundumgebung integriert ist (Abb. 6.19), bringt daher wesentliche Vorteile im gesamten digitalen Planungsprozess.

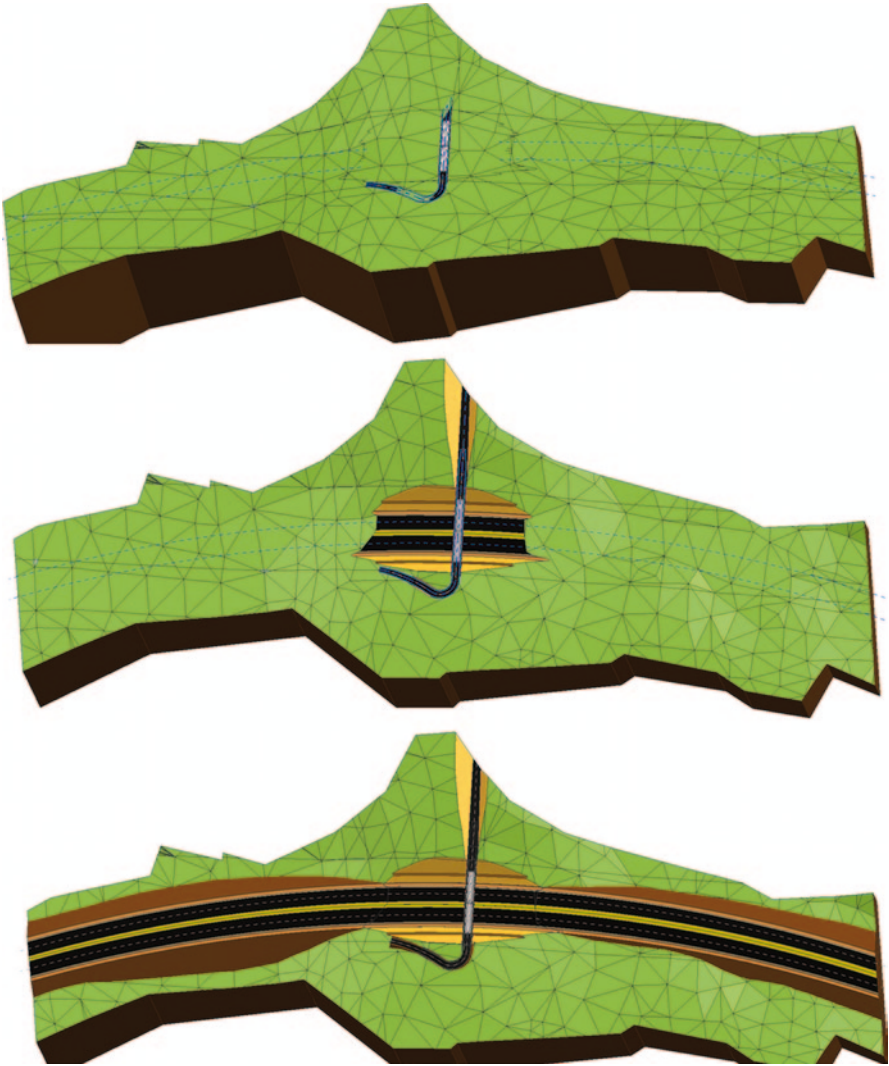


Abb. 6.18 Entwicklungsszenario des Baugrund-Trassierungsmodells. Zunächst wird das 3D-Baugrundmodell erzeugt, die Einschnitte im Bereich des Brückenbauwerks modelliert und schließlich die Dammgeometrie hinzugefügt

6.1.3 Ablaufsimulation

Tim Horenburg, Johannes Wimmer, Yang Ji

Die Planung im Bereich des Erdbaus ist, gerade im Trassenbau, eine komplexe, vielschichtige Aufgabe: Es gilt Geräte und Maschinen zu disponieren, das Baustel-

Digitale Baustelle- innovativer Planen, effizienter
Ausführen

Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21.
Jahrhundert

Günthner, W.A.; Borrmann, A. (Hrsg.)

2011, XXVI, 351 S. 200 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-642-16485-9