

Thomas Hauber, Ali Ismail und Raimar J. Scherer

---

## Zusammenfassung

Um kritische Abläufe in der Produktion frühzeitig zu erkennen und zu vermeiden, müssen schnell Situationsvarianten erstellt und untersucht werden können. Die objektorientierte 3D Planung unterstützt dies schon erheblich, da in der virtuellen Baustelle einfach Baumaschinen platziert und ihre Raum Zeit Konflikte visuell erfasst werden können. Schwieriger ist die Darstellung von Vorgängen. Eine komplette Simulation des gesamten Bauablaufs scheidet aus. Sinnvoll ist eine räumlich und zeitlich begrenzte, dynamische lokale 3D Simulation von einzelnen Vorgängen oder von Vorgangsketten. In dieser im Gegensatz zu den klassischen Montage- und Logistiksimulationen die 3D Darstellung die zentrale Rolle spielt, denn es gilt vor allem, Arbeitsräume, Montageräume, Interaktionen, Behinderungen etc. qualitativ einzuschätzen, um Strategieentscheidungen zu unterstützen. Erst nachgeordnet in weiterführenden Simulationen sind diese auch detailliert quantitativ zu bewerten. Ergebnisse aus der Simulation müssen daher visualisiert und in knapper, aussagekräftiger Form zur Verfügung stehen, ohne den Anwender mit den komplexen Simulationsvorgängen und dem Informationsmanagement zu belasten.

---

## 2.1 Einführung

Bei der modellbasierten Arbeitsweise steht das virtuelle Bauwerk im Zentrum des Entwurfs. Ziel ist ein präzises, fotorealistisches Bauwerks- und Baustellenmodell im Virtual Reality, VR, um punktuelle Details der Bauprozesse erfassen zu können [1–3]. VR ist gut geeignet als räumliches und kommunikatives Medium, um die Zusammenarbeit und

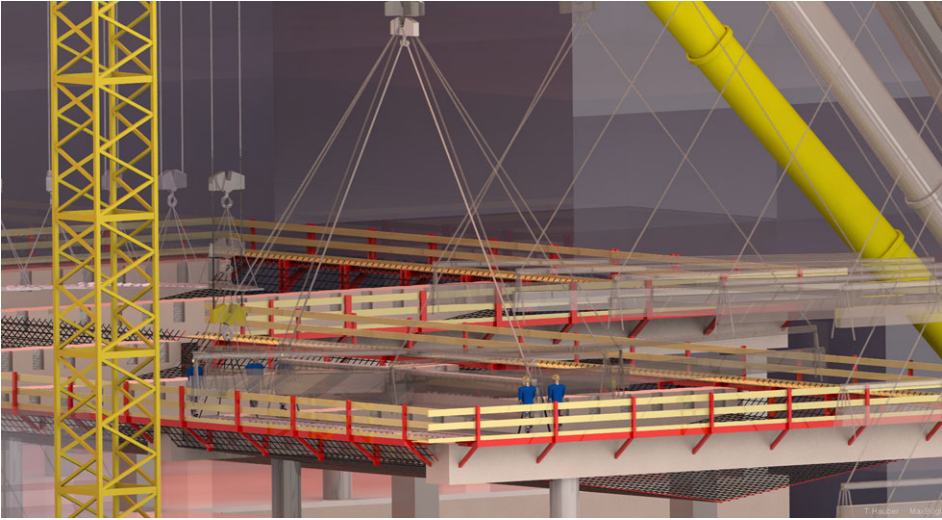
---

T. Hauber (✉)

Max Bögl Bauunternehmung GmbH, Sengenthal, Deutschland

A. Ismail · R.J. Scherer

Institut für Bauinformatik, Technische Universität, Dresden, Deutschland



**Abb. 2.1** Visualisierung einer Montagesituation

das Verständnis der Konstruktion und der Bauprozesse zu erleichtern. In VR zielen alle Anstrengungen darauf, durch Form, Farbe und Eigenschaften die Vision eines Bauwerks zu entwickeln, das noch gar nicht existiert, um funktionelle und logische Abhängigkeiten sichtbar zu machen. Auch die Abbildungen von Arbeitern, wie in Abb. 2.1, ist eine wichtige Komponente und keine übertriebene Spielerei, da sie helfen, Konflikte oder Gefahrenzonen für Arbeiter nicht zu übersehen und die menschliche Dimension bewusst zu halten.

Ein weiteres Ziel bei der Visualisierung von Bauwerken ist ein möglichst realistisches Abbild der Wirklichkeit, um sowohl Konflikte als auch kritische und nicht effiziente Montageprozesse frühzeitig erkennen zu können. Der nächste Schritt ist die Ergänzung des Bauwerksmodells mit ausgewählten Baumaschinenmodellen sowie Modellen für Bauhilfsmittel, wie Schalung oder Sicherungen, oder einzubauender Bauteile. Durch die konsequente Abbildung der Interaktion zwischen Bauwerksmodell und Baumaschinenmodellen kann ein Bauprozess nachgebildet werden und erlaubt äußerst aussagekräftige Einblicke in die Struktur und die komplexen Zusammenhänge innerhalb des geplanten Bauablaufs und Bauwerks. Werden mehrere, sich lokal überlagernde Bauprozesse zusammengefasst und diese lokal und im Detail untersucht, dann wird von einer lokalen 3D Simulation gesprochen.

---

## 2.2 Abgrenzung der lokalen 3D Simulation von der Montage- und Logistiksimulation

Die wesentlichen Unterschiede zwischen den Simulationsuntersuchungen liegen in den Szenarien, die sie beschreiben. Die allgemeinen Montage- und Logistiksimulationen ana-



**Abb. 2.2** Lokale 3D Simulation für das Zusammenspiel der beiden Krane in Bauprozessen beim Hochhaus, z. B. beim Versetzen der Absturzsicherung

lysieren umfangreiche Vorgänge, bei denen alle Prozesse für die Erstellung von Gebäuden untersucht werden und bei denen sich automatisiert Ressourcentabellen und Balkenpläne ableiten lassen. Die lokale 3D Simulation ist das einfachste und somit wichtigste Hilfsmittel einer konsequenten Konfiguration von Bauobjekten und Bauprozessen. Ergebnis ist ein präzises, fotorealistisches Bauwerksmodell, an dem unmittelbar Aktivitätseigenschaften und Bewegungsmöglichkeiten punktuell untersucht, Konflikte erkannt und in ihrer Auswirkung eingeschätzt werden können. Zusätzlich kann eine präzise 3D Visualisierung wesentlich dazu beitragen, Situationsuntersuchungen zu kommunizieren [3]. Alle Bauteile und Prozesse sind vollständig geometrisch repräsentiert. Dies schafft visuell transparente Ein- und Überblicke und schärft die gedankliche Vorstellung der Projektbeteiligten bei Planung und Identifikation von Schwachstellen und Risiken. Der Schwerpunkt der lokalen 3D Simulation liegt auf der Visualisierung der Baustelle zur Unterstützung der gedanklichen Vorstellungswelt des Ingenieurs. Der Gedankenprozess der Projektbeteiligten, in Verbindung mit ihrem Expertenwissen, ist von unschätzbarem Wert. Komplexe Zusammenhänge, die in der Gedankenwelt nicht mehr überblickt werden können, bieten den Anlass für die lokale 3D Simulation (Abb. 2.2). Das betrachtete Problem wird dabei gezielt im Zusammenhang mit den zugehörigen Herstell- und Transportprozessen und dem erforderlichen Platzbedarf auf der virtuellen Baustelle untersucht und simuliert.

Bei der lokalen 3D Simulation ist es nicht das Ziel, alle Bauprozesse zu simulieren und analysieren, sondern nur punktuell solche, die als kritisch identifiziert wurden. Dies ist wichtig, wenn zum einen der Bauablaufprozess erst entworfen wird und zum ande-

ren, wenn Probleme, Behinderungen oder Risiken eintreten und eine schnelle Umplanung erforderlich ist.

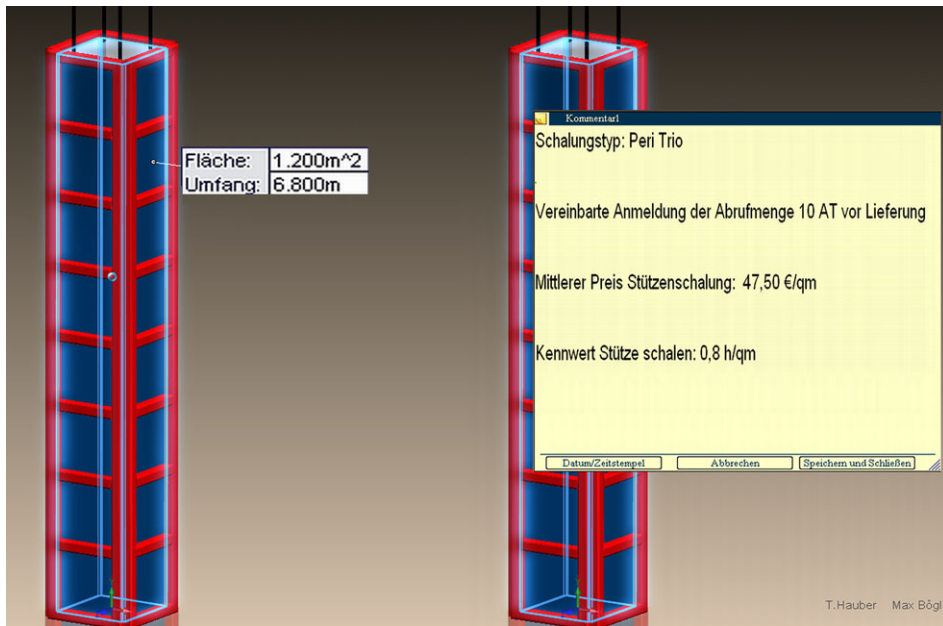
Visualisierungen können wertvolle Einblicke in die Feinheiten der modellierten Bauarbeiten bieten und somit bei der Festlegung der Glaubwürdigkeit der Simulationsmodelle und Ergebnisse hilfreich sein [4]. Das bestmögliche Ergebnis ergibt sich im Zusammenwirken der verschiedenen Simulationmethoden, der Logistik-, der Montage- und der lokalen 3D Simulation.

---

## 2.3 Objektorientierte Modellerstellung mit Wissensmodellen

Im Vordergrund des objektorientierten Entwurfs stehen die Objekte, z. B. einzelne Bauteile oder auch Baumaschinen. Diese Bauobjekte sind gekennzeichnet durch Eigenschaften, die bei der Simulation ausgewertet werden. Diese Informationen werden aus den Fachmodellen des Multimodells zur Verfügung gestellt. Sie sind oft um prozessablaufspezifische Informationen zu ergänzen und meistens weiter zu detaillieren bzgl. geometrischen Details oder Ablauf- und Ressourceneinsatzdetails. Klassische Bau CAD Systeme und Viewer sind für die graphische Darstellung nur begrenzt geeignet, da sie keine kinematische Funktionalität anbieten. Mit der Animationsfunktionalität der Bausysteme kann z. B. noch der Bauwerksentstehungsprozess sinnvoll nachgebildet werden, für Baumaschinenbewegungen wäre der zu erbringende Aufwand viel zu hoch. Deshalb werden hierfür CAD Systeme aus dem Maschinenbau eingesetzt, wie z. B. SolidWorks (Band 1, Teil I, Kap. 7). Zusätzlich bieten diese Systeme sowohl eine Vielzahl an Parametrisierungsmöglichkeiten als auch das Management von Modellen in unterschiedlichen Detaillierungsgraden. Da CAD Systeme aus dem Maschinenbau keine Baudatenmodelle unterstützen, sind hier pragmatische Lösungen gefragt. So wurden IFC Datenmodelle aus Bau CAD Systemen in RIB iTWO übernommen, da für SolidWorks eine Schnittstelle für das RIB iTWO Datenaustauschmodell CPIxml entwickelt wurde (Band 1, Teil II, Kap. 17). Das Baumaschinenmodell bzw. die Bibliothek für Baumaschinen wurde direkt in SolidWorks aufgebaut (Band 1, Teil I, Kap. 7), da hierzu aus dem Bauwesen noch keine objektorientierte Datenbank zur Verfügung steht. Die Baugeräteliste ist nur als elektronisches Dokument, d. h. als Textdokument mit Tabellen und Abbildungen verfügbar oder als einfache relationale Datenbank [5].

Im Interesse einer schnellen Konfiguration von Bauobjekten wurden parametrische Vorlagen, auch als Templates bezeichnet, erstellt, aus denen rasch die benötigten Bauobjekte und Baumaschinen abgeleitet werden können. Durch eine ausgereifte Parametrik, wie sie z. B. SolidWorks bietet, wird die Konfiguration von Bauobjekten aus diesen Objektvorlagen optimal unterstützt. Dies kann für alle Bauteile des Bauwerksmodells erfolgen und wurde im Rahmen des Projekts Mefisto sinnvollerweise auf das Rohbaumodell beschränkt. Entsprechend wurde für die prototypische Testimplementierung diese Vorgehensweise weiter auf die wichtigsten Baumaschinen und Bauhilfsmittel beschränkt. Durch das sinnvolle Zusammenfügen dieser konfigurierten Vorlagen erhält man das Baustellenmodell. Bei der prototypischen Erarbeitung der parametrischen Vorlagen für Bauobjekte

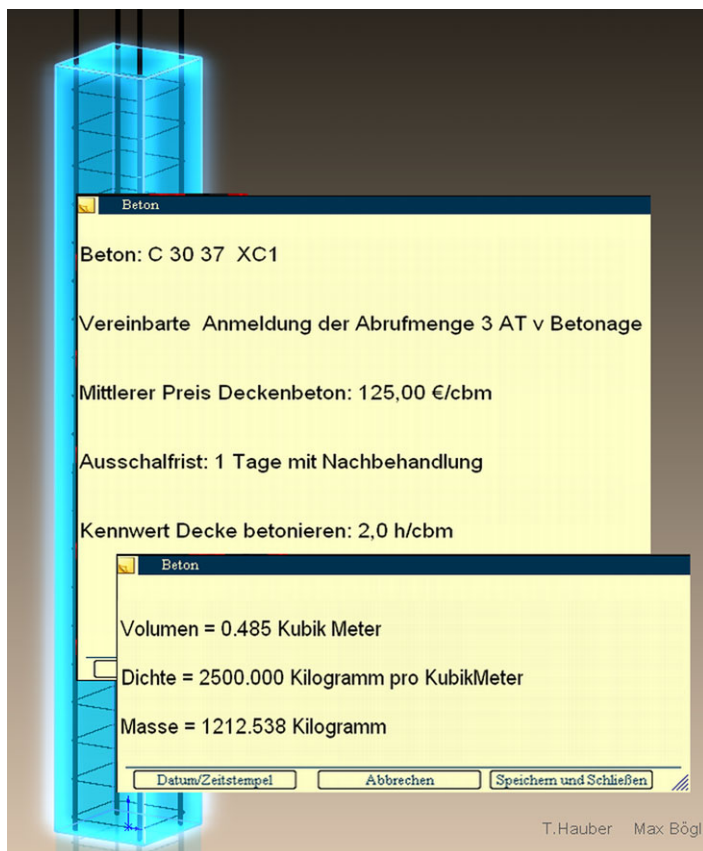


**Abb. 2.3** Wissensmodul Rechteckstütze: Informationen zur Schalfläche

und Baumaschinen wurde erkannt, dass es sinnvoll und auch möglich wäre, diese parametrischen Vorlagen zu Wissensmodulen, z. B. mit Wissen über den Einbau (Band 1, Teil I, Kap. 7), zu erweitern. Dies wäre über eine Erweiterung der signifikanten Objekteigenschaften möglich. Im Ergebnis erhält man schneller konfigurierbare Vorlagen mit umfassender Beschreibung für Bauobjekte und Baumaschinen. Darüber hinaus wird auf die aktuelle Fragestellung zugeschnittenes Wissen zur Verfügung gestellt. Die Erweiterung der parametrischen Vorlagen für Bauobjekte und Baumaschinen zu Wissensmodulen wurde von der Vision getragen, dass das relevante Expertenwissen für ein Bauobjekt sich direkt am beschriebenen Objekt befindet, wie in Abb. 2.3 und in Abb. 2.4 am Beispiel einer Rechteckstütze dargestellt. Im Multimodell ist dies durch das Linkmodell verwirklicht und das Wissen kann durch Softwareanwendungen wie M2A2 (Band 1, Teil II, Kap. 15) objektzentriert und holistisch abgefragt werden.

## 2.4 Expansionsmethoden

Im Zuge der Planung eines Bauprojekts finden verschiedene Modellübergänge statt, z. B. vom Bauwerksmodell zum Baustellenmodell. Jeder Modellübergang steht für eine Vergrößerung der Informationsmenge in Form des Datensatzes. Die systematische Vorgehensweise bei der Ausdehnung und Vergrößerung von Datensätzen wird durch Expansionsmethoden beschrieben. Die Anwendung der Expansionsmethoden dient einer fortschreitenden Verfeinerung, der Detaillierung, Level of Detail, LoD, und fügt den Modellen zielge-

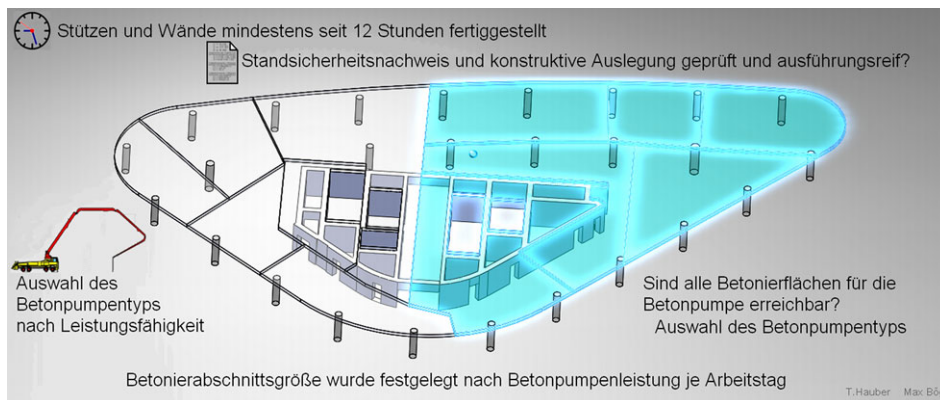


**Abb. 2.4** Wissensmodul Rechteckstütze: Informationen zum Stützenbeton

richtet laufend weitere, prägende Informationen hinzu. Die Modelle erfahren eine Verbesserung ihres Informationsgehalts.

Dieser Abschnitt beschreibt die Expansionsmethoden zur Weiterentwicklung des Angebotsmodells in ein Baustellenmodell. Das Ergebnis ist die zur Bauausführung vorbereitete Bauaufgabe, das Bausoll, repräsentiert durch ein virtuelles Bauwerk mit allen wichtigen bauausführenden Details. Das Bauwerksmodell kann, je nach Erfordernis, in verschiedenen Detaillierungsgraden vorliegen. Es wurde in fünf LoD unterschieden (Band 1, Teil I, Kap. 1). Die Weiterentwicklung des Angebotsmodells erfolgt durch systematische Ausdehnung und Vergrößerung der vorhandenen Datensätze durch Expansionsmethoden. Das Bauwerksmodell unterliegt in der Baustellenplanung laufenden Erweiterungen und Anpassungen der Objekteigenschaften durch den Projektfortschritt und dokumentiert den Stand der aktuellen Planungen. Es ist geprägt durch das Zusammenwirken zahlreicher Projektbeteiligter in der Bauvorbereitung und Baustelleneinrichtungsplanung, Disposition, Kostenplanung, etc. bei der kreativen Vorbereitung eines zu realisierenden, komplexen Bauwerks. Die entwickelten Expansionsmethoden wurden priorisiert und standardisiert.





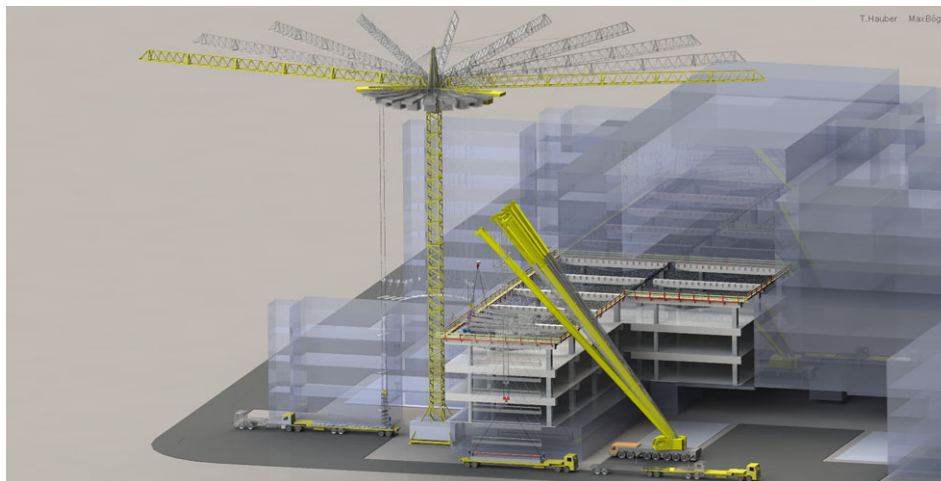
**Abb. 2.5** Organisationsmodul Decken

Die Priorisierung ordnet die Expansionsvorgänge nach Vorrangigkeit oder Wichtigkeit. Es werden zunächst Expansionsvorgänge mit höherer Priorität, dann solche mit niedrigerer Priorität beschrieben. Die systematische Standardisierung der Expansionsmethoden erfolgt über Organisations- und Vorgangsmodule, wobei die Vorgangsmodule auch als Prozessmodule bezeichnet werden. Am Beispiel des Mefisto Hochhauses sollen nun die Expansionsvorgänge beim Übergang vom Angebotsmodell zum Bauwerksmodell skizziert werden. In Vorbereitung der Bauausführung wird das virtuelle Bauwerk in Bauabschnitte unterteilt. Dieser Vorgang wird durch das Organisationsmodul beschrieben. Die Unterteilung der Decke ergibt sich aus der Leistungsfähigkeit der Betonpumpe. Zunächst wird der Betonpumpentyp festgelegt. Aus der Bewertung der Pumpleistung ergibt sich, dass das Betonvolumen der gesamten Decke nicht an einem Arbeitstag bewältigt werden kann. Aus diesem Grund wurde die Decke in zwei Bauabschnitte aufgeteilt (Abb. 2.5).

## 2.5 Ziele der lokalen 3D Simulation

Das wichtigste Ziel der lokalen 3D Simulation ist die Unterstützung von strategischen Managemententscheidungen. Die lokale 3D Simulation kann sowohl als statische lokale 3D Simulation, d. h. mit der Erstellung von statischen Situationen (Band 1, Teil I, Kap. 7) oder als dynamische lokale 3D Simulation mit Bewegungsabläufen, wie hier beschrieben, ausgeführt werden. Zur Vereinfachung wird im Weiteren kurz von der lokalen 3D Simulation gesprochen.

Der hoch veränderliche, nichtlineare Bauprozess ist aufgrund seiner Komplexität in der Vorstellungswelt der Projektbeteiligten oft nicht mehr zu beherrschen. An dieser Stelle ist es die Aufgabe der lokalen 3D Simulation, Entscheidungshilfen anzubieten und, falls erforderlich, Alternativen aufzuzeigen. Die Ergebnisse aus der 3D Simulationsuntersuchung sollen zusammengefasst, visualisiert und in knapper, eindeutiger Form der Managementplattform zur Verfügung gestellt werden. Idealerweise sollte sich ein Regelkreis einstellen,



**Abb. 2.6** Simulation eines Montageszenarios, Anordnung der Bauwerk- und Baumaschinenobjekte zur Überprüfung der Arbeits- und Bewegungsräume der Baumaschinen

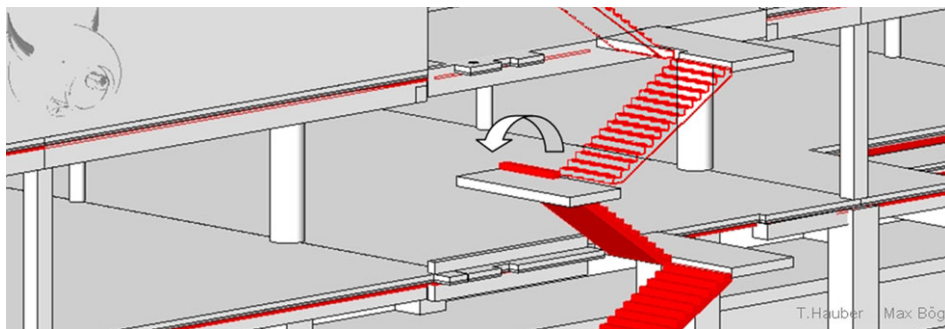
der über eine Analyse der Prozesse eine anstehende Entscheidung absichert, kontrolliert und steuert und zu einer erweiterten Entscheidungskompetenz führt. Risiken und Bauprozesse müssen laufend, auf Basis des vorhandenen Erfahrungswissens, bewertet werden. Die lokale 3D Simulation kann hierzu objektive Bewertungskriterien beitragen. Dies wird durch Simulationsuntersuchungen im Planungsprozess und bei laufendem Baubetrieb sichergestellt. Ein weiteres, wichtiges Ziel der lokalen 3D Simulation ist die Visualisierung der komplizierten Vorgänge und Zusammenhänge im Bauwerk und auf der Baustelle. In der Gedankenwelt der Projektpartner soll das geplante Bauwerk konkrete Form annehmen und die Ableitung von neuen Ideen und Visionen soll wirksam gefördert werden. Die Visualisierung von Bauwerk und Baustelle soll die Gedankenmodelle synchronisieren und deren eindeutige Kommunikation sicherstellen. Alle Projektpartner sollen über denselben Informationsstand verfügen, eine Gesprächsbasis und eine Verständnisebene sollen entstehen (Abb. 2.6).

In den nachfolgenden Abschnitten wird an einem konkreten Beispiel aufgezeigt, was für Vorteile eine lokale 3D Simulation bietet und wie sie mittels einfacher Erweiterungen auch mit vorhandenen Softwareanwendungen erbracht werden kann.

## 2.6 Einfluss der Simulationsziele auf die Konfiguration der Simulationsmodelle

Die Konfiguration der Simulationsmodelle für die lokale 3D Simulation ist geprägt von den Zielen, die im Fokus einer räumlich und zeitlich begrenzten Untersuchung von sich überlagernden und sich beeinflussenden Prozessen, Vorgängen und Fachzielen stehen. Zunächst folgen einige Ausführungen zur Konfiguration der Simulationsmodelle.





**Abb. 2.7** Simulation des Einbauprozesses von Treppenteilen, die Montagebewegungsvorgänge sind durch Pfeile wiedergegeben

Die Modelle, bei denen kritische Prozesse identifiziert wurden, besitzen eine Struktur aus parametrischen Bauobjekten. Hier setzt der Prozess der Konfiguration der Simulationsmodelle an. Alle Eigenschaften und Bewegungsmöglichkeiten werden so konfiguriert, dass alle Bauobjekte und Bauprozesse möglichst wirklichkeitsnah beschrieben werden können, wie das nachfolgende Beispiel verdeutlichen soll.

Durch die lokale 3D Simulationsuntersuchung war zu klären, ob die als Betonfertigteile auf die Baustelle gelieferten Treppenteile effizient eingebaut werden können. Die Geometrie der Treppenpodeste wurde gegen die Geometrie der Treppenteile geprüft. Darüber hinaus wurde die Bewegung untersucht, mit der ein Treppenteil in die Podeste eingeklinkt werden kann. Dadurch ergibt sich eine Aussage zur erforderlichen Montagetoleranz. Sofern der zum Einsatz vorgesehene Krantyp ebenfalls konfiguriert wird, kann die Simulationsuntersuchung feststellen, ob der Kran alle erforderlichen Bewegungen ausführen und die Last des Treppenteils in jeder Lage aufnehmen kann. Eine Prognose der Montagezeit kann ebenfalls ermittelt werden (Abb. 2.7).

Eine Auswahl von möglichen Simulationszielen aus dem Blickwinkel der lokalen 3D Simulation sind:

- Überprüfung und Absicherung von Terminen durch
  - Variation der Herstellungsreihenfolge
  - Variation der zeitlich parallel ausgeführten Tätigkeiten
  - Variation der Detailherstellungsreihenfolge
  - Variation der Krananzahl und anderer Hebezeuge
  - Variation der Kranspiele und Kranreihenfolgen
  - Variation der Krangeschwindigkeiten, z. B. bei starkem Wind
  - Variation der Mannschaftsstärke
  - Variation der Einteilung in Arbeitskolonnen
  - Variation des Schichtplans
  - Variation herstelltechnischer Alternativen, z. B. Fertigteile statt Ortbeton
  - Variation der Lagerflächen
  - Variation der Zwischenlagerflächen

- Variation der Transportwege, z. B. Alternativrouten
- Variation des Transportgutes, z. B. Fertigteile statt Ort beton
- Überprüfung und Absicherung des Herstellprozesses durch
  - Überprüfung der Erreichbarkeit durch Krane und andere Hebezeuge
  - Überprüfung der Hubtragfähigkeit, d. h. das Lastmoment überprüfen
  - Überprüfung der Hub- und Schwenkbereiche
  - Überprüfung der Einbautoleranzen
  - Überprüfung der Arbeits- und Sicherheitsbereiche

Dies ist nur eine grobe Auswahl, die sich bevorzugt mit Montageproblemen beschäftigt und so auch gleichzeitig Bausicherheitsfragen berührt. Werden Kosten und Bauzeit sowie Risiken direkt miteinbezogen, ergeben sich komplexe interagierende Fragestellungen, die weitreichende Konsequenzen auf den gesamten Bauablauf haben können. Je breiter die Fragestellung angelegt ist, umso mehr zuverlässige Informationen werden für die lokale 3D Simulation benötigt, die in der erforderlichen Kürze der Planungs- und Bauvorbereitungszeit und der gewünschten Güte nur durch einen Multimodellansatz erbracht werden kann, da nur durch das Multimodell die erforderlichen Informationen schnell und in der verlinkten Güte bereitgestellt werden können.

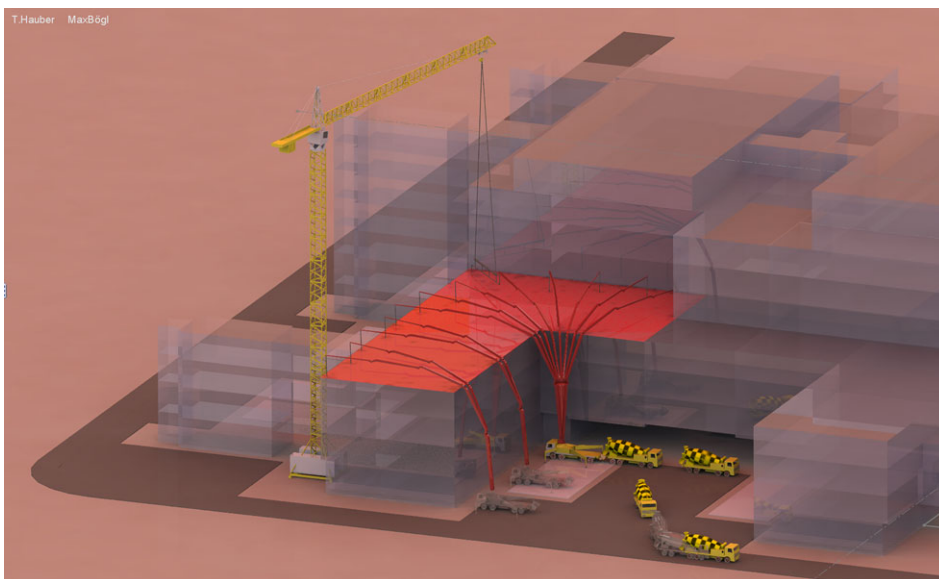
---

## 2.7 Einfluss von Strategiewissen auf die Konfiguration der Simulationsmodelle

Es ist von entscheidender Bedeutung, dass das Simulationsmodell mit dem Expertenwissen und der Erfahrung routinierter Bauingenieure und Bauleiter entwickelt wird. Die Einschätzung der beteiligten Projektpartner zu den Bauprozessen, den Bauverfahren, den Termin- und Kostenansätzen ist unverzichtbar. Ihre Risikoeinschätzungen und ihr Wissen um kritische Bauabläufe liefern die entscheidenden Fragestellungen an die Simulationsuntersuchung.

Erfahrene Bauingenieure und Bauleiter gehen neue Bauaufgaben mit bewährten Strategien an. Das Mefisto Hochhaus wurde von Beginn an konsequent durch dieses Strategiewissen geprägt. Noch vor der Konfiguration des Simulationsmodells wurden die Lagerflächen, die Art der zum Einsatz kommenden Schalung, die Anzahl und der Typ der Krane festgelegt. Zu diesem Zeitpunkt fiel auch die Entscheidung, eine stationäre Betonverteilerpumpe für den Frischbetontransport in die Decken und Wände vorzusehen. Bei der Konfiguration der Simulationsmodelle identifiziert das Strategiewissen kritische Prozesse und Interaktionen, z. B. in Form von parallel ablaufenden Arbeiten, die sich gegenseitig behindern. Idealerweise sollten sich Strategiewissen und lokale 3D Simulation zu einem schlagkräftigen Werkzeug verbinden. Eine explizite Erfassung von Strategiewissen in computerrepräsentierbarer Form wird in Band 1, Teil II, Kap. 11 und Kap. 12 aufgezeigt.

Eine optimale Baustellenlayoutplanung kann die Materialtransportströme und -bewegungen sowie die Materialumsetzungen erheblich reduzieren und so die Bauarbeiten und Arbeitsproduktivität verbessern und damit die Kosten eines Projekts deutlich reduzieren [6]. Bei der Planung und Vorbereitung einer Baustelle sind viele Entwicklungen nur



**Abb. 2.8** Untersuchung der Auslegerreichweite einer Betonpumpe an verschiedenen Standpunkten

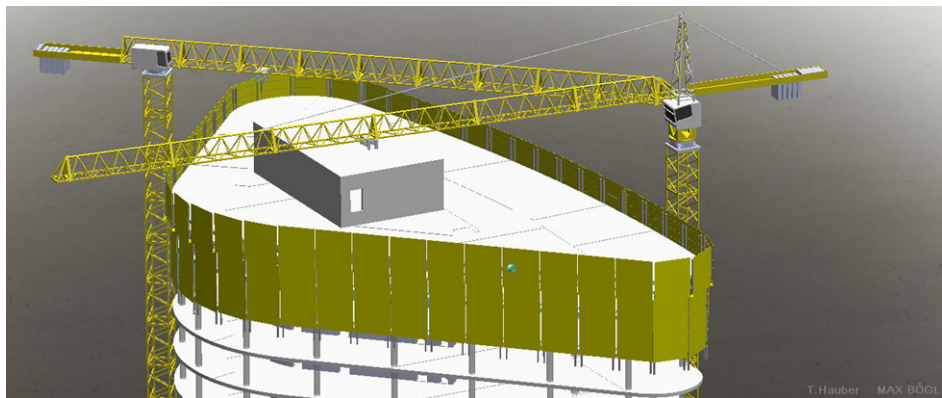
schwer vorhersehbar. Der Bauprozess ist sehr vielschichtig, komplex und zudem hoch veränderlich. Bei Baumaschinen ist die Zugänglichkeit und Erreichbarkeit oft ein Problem, das mit der lokalen 3D Simulation sehr einfach beherrschbar wird (Abb. 2.8).

Wenn es gelingt, unvorteilhafte Prozesse oder Störungen im Bauablauf in der Simulationsuntersuchung zu erkennen, dann gewinnt man wertvolle Zeit, um geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten. Möglicherweise sind mehrere, miteinander konkurrierende Gegenmaßnahmen im Simulationsmodell auf Wirksamkeit und mögliche, unerwünschte Auswirkungen zu untersuchen. Auf diese Weise ist es möglich, die Gegenmaßnahmen zu bewerten und den erfolgversprechendsten Prozess auszuwählen und in die Planung zu integrieren.

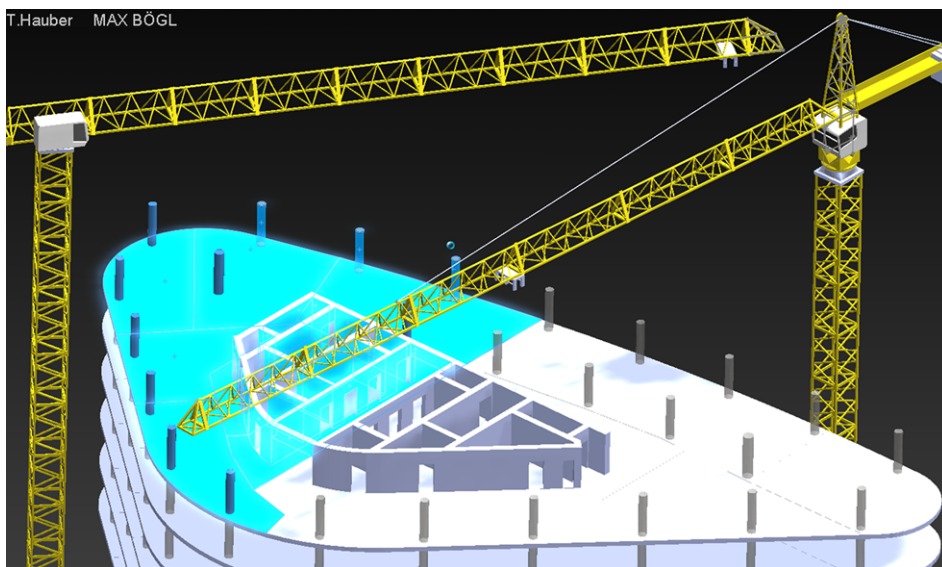
Sehr viele Bauteile auf sehr engem Raum führen in aller Regel zu geometrischen Konflikten, zumindest zu Behinderungen (Teil I, Kap. 4). Das Simulationsmodell der lokalen 3D Simulation ist in diesem Fall so zu konfigurieren, dass die geometrischen Randbedingungen der Baustelle ausreichend genau erfasst werden. Die von den Experten erwarteten Risiken können im 3D Simulationsmodell untersucht werden, indem der Herstellprozess unter Einbeziehung der Aktionseigenschaften aller vorgesehenen Baumaschinen nachvollzogen wird.

## **2.8 Expansionsmethoden zur Überführung des Baustellenmodells in ein Simulationsmodell**

Für die Untersuchung der Expansionsmethoden zur Überführung des Baustellenmodells in ein Simulationsmodell zur lokalen 3D Simulation wurde das Mefisto Hochhaus aus-



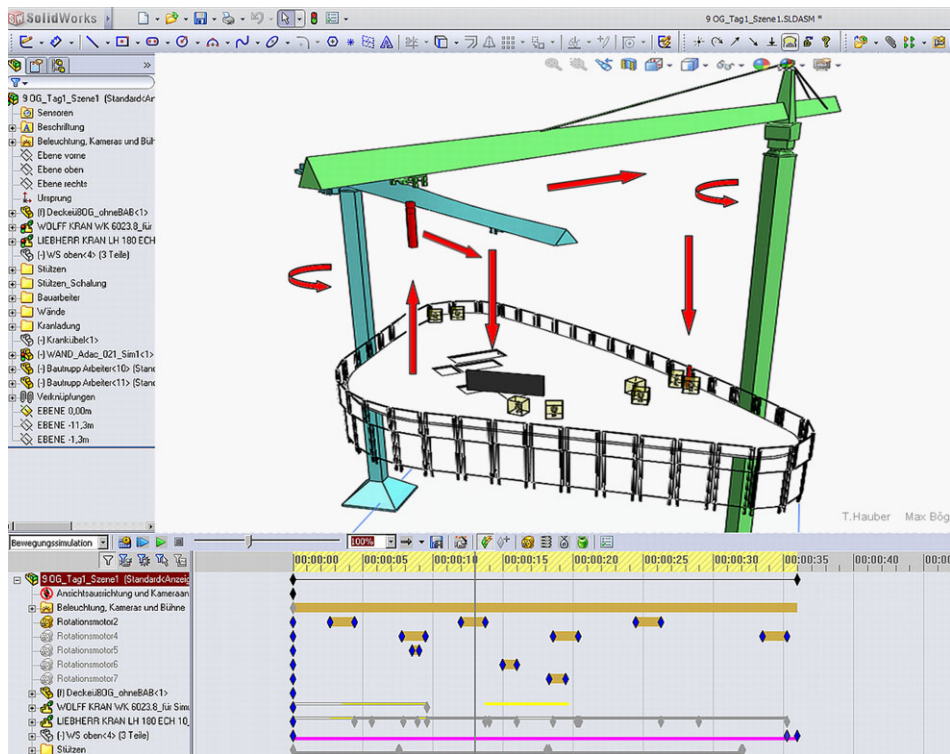
**Abb. 2.9** Baustellenmodell des Mefisto Hochhauses mit hervorgehobener Absturzsicherung



**Abb. 2.10** Baustellenmodell des Mefisto Hochhauses, Filtern nach Bauabschnitten mit hervorgehobenem Bauabschnitt Deckenabschnitt 1

gewählt. Alle prägenden Arbeitsabläufe wiederholen sich auf der Hochhausbaustelle von Geschoss zu Geschoss. Insgesamt sind 18 Hochhausgeschosse zu errichten und die hohe Wiederholungshäufigkeit würde allen Optimierungen eine besondere Effizienz verleihen. Vor diesem Hintergrund erschien der derzeit noch hohe Aufwand für eine Simulationsuntersuchung gerechtfertigt.

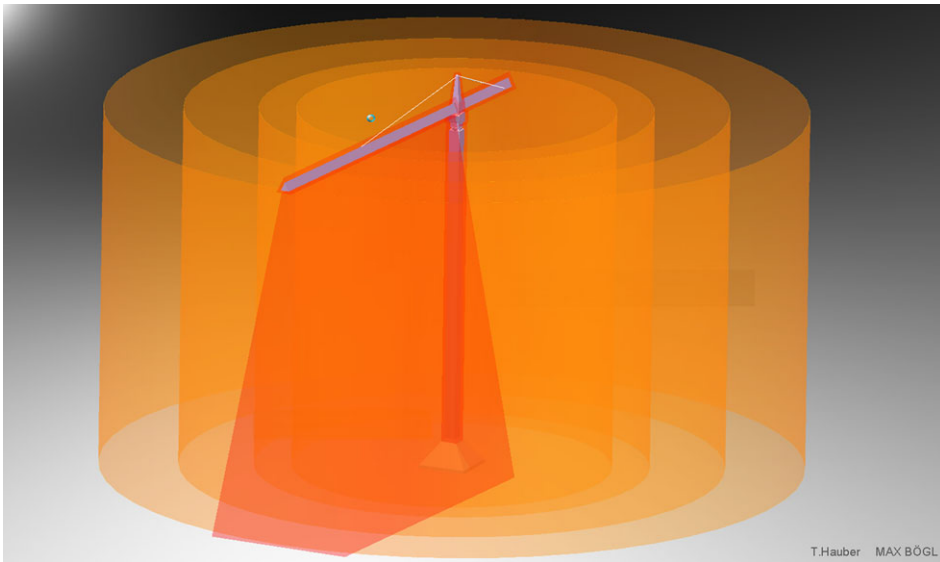
Am Beginn steht eine Analyse des Baustellenmodells (Abb. 2.9) und eine Bestandsaufnahme der Daten, die dieses Multimodell schon beinhaltet. Das Baustellenmodell stellt die Geometrie als Ausgangsbasis für die Simulation zur Verfügung. Änderungen und An-



**Abb. 2.11** Dynamische lokale 3D Simulation mit Bewegungsdefinitionen (unteres Fenster) in der Multimodelloberfläche von SolidWorks

passungen können durch die Anwendung der extensiven Parametrik, die viele CAD Systeme des Maschinenbaus bieten, vorteilhaft durchgeführt werden. Das Baustellenmodell kann damit leicht entsprechend dem Produktionsmodell strukturiert und angesprochen werden, in dem es in einzelne Bauabschnitte, z. B. nach Tagen oder Wochen, eingeteilt wird (Abb. 2.10). Bauwerksmodelle bringen durch ihre 3D Darstellung mehr Transparenz in die ablaufenden Planungsprozesse.

Bei der Konfiguration des Simulationsmodells (Abb. 2.11) wurde die fotorealistische zugunsten einer prägnanteren technischen Visualisierung gezielt zurückgenommen und es wurde auf die Fotorealitätsstreuung verzichtet, während die Funktionalitätsdarstellung der Baumaschinen hervorgehoben wurde. Dies geschah, um eine bessere Performance für die Simulationsberechnung zu erreichen. So sind die Krane im Simulationsmodell vereinfacht dargestellt, verfügen aber über die volle Funktionalität beim Anheben, Katzfahren und Drehen. In vielen CAD Programmen, die kinematische Funktionen unterstützen wie beim hier verwendeten Produkt SolidWorks, können Bewegungsabläufe in einem separaten Fenster eingegeben werden, sodass ein Animationsablauf erzeugt werden kann, der in einer internen, numerischen Simulation ermittelt wird.



**Abb. 2.12** Lastmomentbereiche und Sicherheitsräume Turmdrehkran

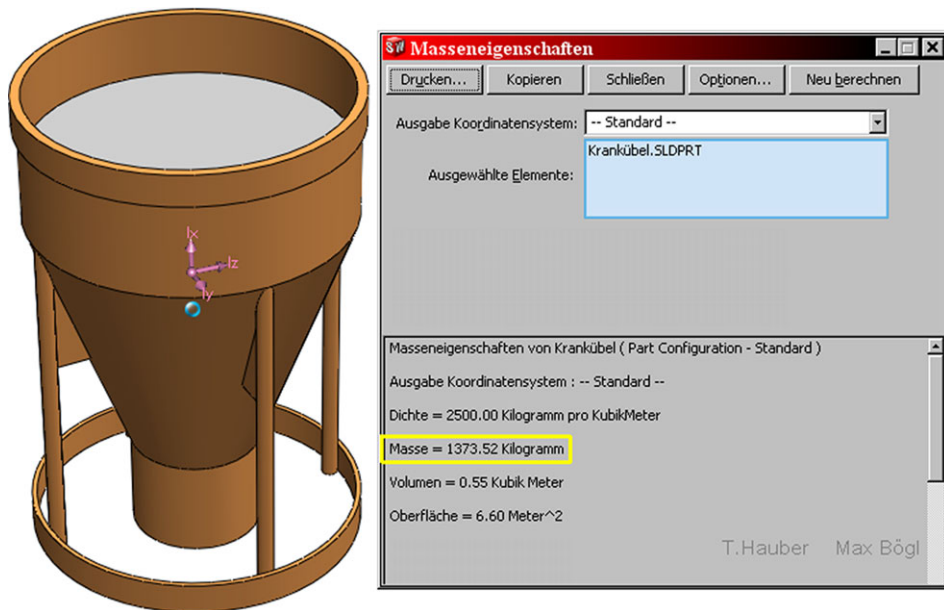
Zum Baustellenmodell werden zahlreiche Objekteigenschaften neu hinzugefügt und so das Modell expandiert. Informationen für folgende Punkte, die im Mittelpunkt des Interesses stehen, wurden hinzugefügt:

- Bereitstellen der Leistungsansätze aus der Kalkulation mit direktem Bauteilbezug
- Zuordnung zu Mindestarbeitsabschnitten als kleinsten sinnvollen Herstelleinheiten
- Definieren der Bewegungspfade
- Ergänzen von Schalung und Bewehrung
- Ergänzen der Mannschaft
- Ergänzen der Rechenprozessmodule
- Ergänzen der Lastmomentbereiche für die Krane
- Ergänzen der Sicherheitsräume

Die zugefügten Lastmomentbereiche und Sicherheitsräume sind in Abb. 2.12 visualisiert.

Das Baustellenmodell wird zur vertieften lokalen 3D Simulationsanalyse durch Expansion und Validierung in ein präzises, fotorealistisches Simulationsmodell überführt, an dem unmittelbar Aktivitätseigenschaften und Bewegungsmöglichkeiten untersucht werden können. Expansion meint in diesem Zusammenhang, das Anfügen von Daten und 3D Modellen, wie z. B. detaillierte Informationen über den Betonkübel (Abb. 2.13). Validierung beschreibt den Prozess der Überprüfung, inwieweit das Simulationsmodell die gestellten Anforderungen erfüllt und Daten angepasst oder konkretisiert werden müssen. Alle Bauteile und Prozesse sind im Simulationsmodell mit ihrem erforderlichen Platzbe-





**Abb. 2.13** Betonkübel mit Hublast und Füllmenge

darf vollständig geometrisch repräsentiert und alle Herstell- und Transportprozesse können im erforderlichen Maße untersucht werden. Eine manuelle Neueingabe für jedes neue Bauprojekt ist sehr aufwendig. Sie hat sich für das Mefisto Hochhaus jedoch schon gelohnt. Der Modellierungsaufwand wurde durch Baukosteneinsparung mehrfach ausgeglichen. Bei Bauwerken mit geringerem Wiederholungsgrad als bei dem 18 geschossigen Mefisto Hochhaus lässt sich ein Nutzungseffekt durch das einmalige Anlegen und wiederholte Nutzen von Bibliothekselementen bei verschiedenen Bauprojekten erzielen. Diese Bibliothekselemente sind ständig optimiert und können zusätzlich zu Schulungszwecken eingesetzt werden.

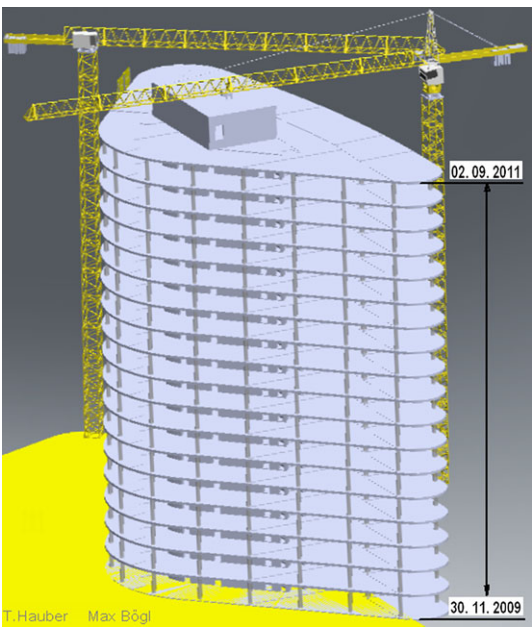
## 2.9 Optimierung der Personalplanung

Das Ziel der Personalplanung ist die Termin- und Kostenoptimierung. Die Einhaltung der Termine bei möglichst geringem Personaleinsatz würde die Zielvorgaben optimal erfüllen. Im vorliegenden Beispiel (Abb. 2.14) wurde das Szenario mit einer Analyse der Terminalsituation eröffnet:

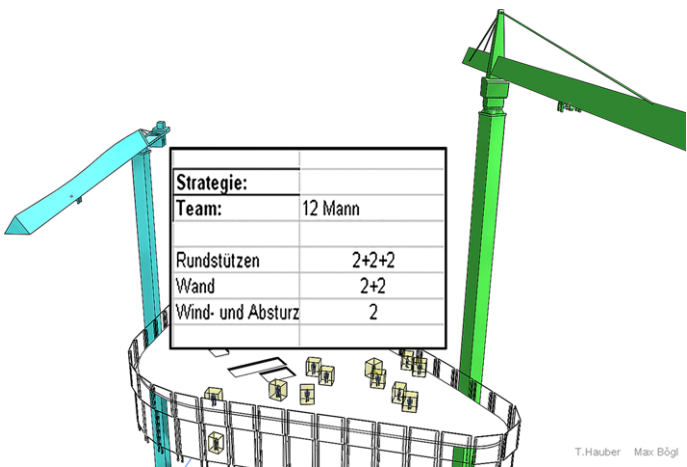
Bauphase Rohbau: Baubeginn am 30.11.2009, Fertigstellung am 02.09.2011.

Nach Abzug von Feiertagen und den statistischen, durchschnittlichen Krankheitstagen ergibt sich eine Zeitdauer von maximal 23 Arbeitstagen für ein Geschoss.

**Abb. 2.14** Rahmentermine  
Mefisto Hochhaus



Die Personalplanung wurde zunächst nur nach den Kosten ausgerichtet und ein sehr kleines Baustellenteam zusammengestellt. Die Bauaufgabe mit diesem kleinen Team (Abb. 2.15) zu bewältigen, wäre für die Kostenseite optimal. Es stellte sich jedoch die Frage, ob der gesetzte Terminrahmen mit diesem minimalen Personaleinsatz einzuhalten wäre. Bei der Herstellung der Wände und beim Anheben des Wind- und Absturzschatzes gab es keine Bedenken.



**Abb. 2.15** Minimales Baustellenteam für das Mefisto Hochhaus mit 12 Arbeitern, dargestellt mit ihren Bauarbeitsraumwürfeln

Die Herstellung der Stahlbetonstützen wurde jedoch als kritisch eingeschätzt. Die Stützen stellen beim Mefisto Hochhaus das Bauteil mit der höchsten Stückzahl dar. Insgesamt sind 468 Stahlbetonstützen herzustellen. Die hohe Stückzahl und die allgemein kritische Einschätzung des Herstellungsprozesses führten zu der Entscheidung, eine lokale 3D Simulation durchzuführen. Die relevanten Parameter, wie die Schalungsfläche von 6,90 qm, das Gewicht der Schalung von ca. 173 Kilogramm und das Gewicht der Bewehrung von ca. 260 kg, können direkt aus dem Bauteilmodell abgeleitet werden.

Der erforderliche Zeitaufwand für Stütze schalen und bewehren ergibt sich durch eine Überschlagskalkulation zu 9,26 h. Ein Zeitaufwand von mehr als ca. 9 h ist jedoch durch den vorgegebenen Schichtplan nicht möglich. Der Schichtplan sieht eine Arbeitsdauer von 9.00 h Mo.–Do. und 4.00 h am Fr. vor. Um den angestrebten Termin einhalten zu können, wird das klassische Herstellungsverfahren geändert, um den Zeitaufwand auf der Baustelle zu reduzieren. Die Bewehrung der Stütze soll nun komplett vorgefertigt und vom Kran geliefert werden. Der vorgefertigte Bewehrungskorb soll vor Ort nur noch montiert werden. Das übliche Herstellungsverfahren sah vor, dass die Bewehrung vor Ort komplettiert wird. Für das geänderte Herstellungsverfahren kommt ein reduzierter Kennwert von 0,03 h/kg zur Anwendung. Die Kostenauswirkung war zweitrangig. Die Vorfertigung des Bewehrungskorbs erlaubt die Prognose, dass ein Baustellenteam mit zwei Personen in 6,66 h eine Stütze schalen und bewehren kann. Damit wäre der vorgegebene Zeitrahmen eingehalten.

Die Stahlbetonstützen beim Mefisto Hochhaus stellen ein hoch belastetes Bauteil dar. Aus diesem Grund ist der vorgefertigte Bewehrungskorb mit ca. 260 kg sehr schwer. Auch die Stahlschalung für die Stützen erreicht, bedingt durch die Stockwerkshöhe von 3,65 m, mit ca. 173 kg ein beträchtliches Gewicht. Bei Einsatz eines Baustellenteams mit nur zwei Personen muss der Kran für die Montage der Bewehrung und der Schalung unbegrenzt zur Verfügung stehen. Dies bedeutet, dass durch die Voranalyse zur lokalen 3D Simulationsuntersuchung ein weiterer, kritischer Herstellungsprozess identifiziert wurde. Als Konsequenz wurde deshalb auch das Kranzusammenspiel einer lokalen 3D Simulation unterworfen.

---

## 2.10 Optimierung der Herstellungsreihenfolge

Die Optimierung der Herstellungsreihenfolge erfolgt durch eine Variation der aufeinander folgenden Herstellungsprozesse. Gesucht wird die Variante mit der größten Zeitersparnis, auch die Senke genannt. Ein weiteres Ziel ist die Vermeidung sich gegenseitig behinderender Prozesse. Die Aufrechnung verschiedener Herstellungszeiten entlang verschiedener Produktionsreihenfolgen bedingt eine aufwendige Berechnung, die idealerweise durch ein IT System erfolgen sollte. Für eine lokale 3D Simulationsanalyse ist es oftmals ausreichend, ein Tabellenkalkulationsprogramm zu verwenden, wie es in Abb. 2.16 dargestellt ist. Es wurden insgesamt acht verschiedene Herstellungsreihenfolgen untersucht. Nicht untersucht wurden alle Herstellungsvariante, bei denen auf dem visualisierten 3D Simulationsmodell erkennbar war, dass die Herstellungsprozesse sich gegenseitig behindern würden. Berechnet wurde die Herstellungsreihenfolge für den ersten Produktionstag, im Sinne

Arbeiten	ID	Mengen			Schalung	2 Mann	Bewehrung	2 Mann
Beschreibung	ST= Stützenschalung	qm cbm	kg	Materialart	Kennwert	Zeitaufwand	Kennwert	Zeitaufwand
Rundstütze 60cm schalen	ST001	6,90 qm	ca. 100kg	Stahl	0,80 h/qm	2,76 h		
Rundstütze 60cm schalen	ST002	6,90 qm	ca. 100kg	Stahl	0,80 h/qm	2,76 h		
Rundstütze 75cm schalen	ST004	8,60 qm	ca. 25kg	Karton	0,80 h/qm	3,44 h		
SB=Stützenbewehrung								
Rundstütze 60cm bewehren	SB001BA1G09		260,00 kg	Baustahl			0,03 h/kg	3,90 h
Rundstütze 60cm bewehren	SB002BA1G09		260,00 kg	Baustahl			0,03 h/kg	3,90 h
Rundstütze 75cm bewehren	SB003BA1G09		260,00 kg	Baustahl			0,03 h/kg	3,90 h
SC=Stützenbeton C-Concrete (Beton)								
Rundstützen betonieren 3 Stück	SC001BA1G09	3,5 cbm		C 50/60	2,00 h/cbm	3,60 h		
WS=Wandschalung								
Wand 50cm schalen	WS001BA1	30,00 qm	ca. 100kg	Stahl/Holz	0,43 h/qm		6,38 h	
Wand 50cm schalen	WS002BA1	21,00 qm	ca. 100kg	Stahl/Holz	0,43 h/qm		4,46 h	
Wand 50cm schalen	WS003BA1	21,00 qm	ca. 100kg	Stahl/Holz	0,43 h/qm		4,46 h	
Wand 50cm schalen	WS004BA1	29,00 qm	ca. 100kg	Stahl/Holz	0,43 h/qm		6,16 h	
Wand 35cm schalen	WS005BA1	29,00 qm	ca. 100kg	Stahl/Holz	0,43 h/qm		6,16 h	
Wand 50cm schalen	WS006BA1	11,00 qm	ca. 100kg	Stahl/Holz	0,43 h/qm		2,34 h	
Wand 50cm schalen	WS007BA1	11,00 qm	ca. 100kg	Stahl/Holz	0,43 h/qm		2,34 h	
WA=Wind- und Absturzschutz								
Wind- und Absturzschutz	WA001BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA002BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA003BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA004BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA005BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA006BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA007BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA008BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA009BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA010BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA011BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA012BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA013BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz		Team 1	8,64 h	0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA014BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz		Team 2	10,16 h	0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA015BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz		Team 3	9,00 h	0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA016BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz		Team 4	8,93 h	0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA017BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz		Team 5	8,50 h	0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA018BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz		Team 6	8,86 h	0,30 h

**Abb. 2.16** Zweitbeste Optimierung der Herstellungsreihenfolge, Programm SiteSimulation

einer lokalen 3D Simulation. Die beiden numerischen Analysen der Herstellungsreihenfolgen mit dem jeweils geringsten Zeitbedarf sind in Abb. 2.16 und Abb. 2.17 dargestellt.

Während die zuvor geschilderten Untersuchungen noch durch manuelle Kalkulation zu erbringen waren in Verbindung mit einer 3D bzw. 4D Animationsdarstellung in einem CAD Programm, sind in der jetzigen Fragestellung zu komplexe Abhängigkeiten zu berücksichtigen und vor allem mehrere bzw. viele Variantenuntersuchungen durchzuführen. Für diese Art von lokalen 3D Simulationen bieten CAD Programme, wie z. B. SolidWorks, Schnittstellen für Berechnungserweiterungen mit Tabellenkalkulationsfunktionalität. Dieser Weg wurde zuerst beschritten. Es stellte sich jedoch sehr schnell heraus, dass diese Erweiterung nur für die Nutzung weniger Objekte sinnvoll ist, denn die Programmpormanz nahm sehr schnell ab. Daher wurde entschieden, ein externes Tabellenkalkulationsprogramm zu erstellen, in dem die Logik dieser Aufgabenstellung abgebildet und so verallgemeinert wurde, dass die Interaktion von bis zu 4 verschiedenen Arbeitsvorgängen mit dem Zusammenspiel von Kranen untersucht werden kann (Abb. 2.16–2.22). Die Implementierung in ein Tabellenkalkulationsprogramm mit einem Datenaustausch mit einem

Arbeiten	ID	Mengen			Schalung	2 Mann	Bewehrung	2 Mann
Beschreibung	ST= Stützenschalung	qm cbm	kg	Materialart	Kennwert	Zeitaufwand	Kennwert	Zeitaufwand
Rundstütze 60cm schalen	ST001	6,90 qm	ca. 100kg	Stahl	0,80 h/qm	2,76 h		
Rundstütze 60cm schalen	ST002	6,90 qm	ca. 100kg	Stahl	0,80 h/qm	2,76 h		
Rundstütze 75cm schalen	ST004	8,60 qm	ca. 25kg	Karton	0,80 h/qm	3,44 h		
SB=Stützenbewehrung								
Rundstütze 60cm bewehren	SB001BA1G09		260,00 kg	Baustahl			0,03 h/kg	3,90 h
Rundstütze 60cm bewehren	SB002BA1G09		260,00 kg	Baustahl			0,03 h/kg	3,90 h
Rundstütze 75cm bewehren	SB003BA1G09		260,00 kg	Baustahl			0,03 h/kg	3,90 h
SC=Stützenbeton C-Concrete (Beton)								
Rundstützen betonieren 3 Stück	SC001BA1G09	3,5 cbm		C 50/60	2,00 h/cbm	3,60 h		
WS=Wandschalung								
Wand 50cm schalen	WS001BA1	30,00 qm	ca. 100kg	Stahl/Holz	0,43 h/qm	6,38 h		
Wand 50cm schalen	WS002BA1	21,00 qm	ca. 100kg	Stahl/Holz	0,43 h/qm	4,46 h		
Wand 50cm schalen	WS003BA1	21,00 qm	ca. 100kg	Stahl/Holz	0,43 h/qm	4,46 h		
Wand 50cm schalen	WS004BA1	29,00 qm	ca. 100kg	Stahl/Holz	0,43 h/qm	6,16 h		
Wand 35cm schalen	WS005BA1	29,00 qm	ca. 100kg	Stahl/Holz	0,43 h/qm	6,16 h		
Wand 50cm schalen	WS006BA1	11,00 qm	ca. 100kg	Stahl/Holz	0,43 h/qm	2,34 h		
Wand 50cm schalen	WS007BA1	11,00 qm	ca. 100kg	Stahl/Holz	0,43 h/qm	2,34 h		
WA=Wind- und Absturzschutz								
Wind- und Absturzschutz	WA001BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA002BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA003BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA004BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA005BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA006BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA007BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA008BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA009BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA010BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA011BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA012BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz				0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA013BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz		Team 1	8,84 h	0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA014BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz		Team 2	10,16 h	0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA015BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz		Team 3	9,00 h	0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA016BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz		Team 4	8,93 h	0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA017BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz		Team 5	8,50 h	0,30 h
Wind- und Absturzschutz	WA018BA1		ca. 1200kg	Stahl/Holz		Team 6	8,86 h	0,30 h

Abb. 2.17 Beste Optimierung der Herstellungsreihenfolge, Programm SiteSimulation

CAD Programm wurde bewusst gewählt, um zu zeigen, dass für lokale 3D Simulation nicht notwendigerweise aufwendige Softwareanwendungen erforderlich sind, sondern, da die 3D Darstellung im Mittelpunkt der Kontrolle steht, ein gängiges CAD Programm mit entsprechenden Schnittstellen und die Bedienung eines Tabellenkalkulationsprogramms für viele baupraktische Fälle oftmals ausreichend ist, eine lokale 3D Simulation zu ermöglichen.

Die beiden besten der aufgrund der 3D Darstellung der Bauobjekte, Baumaschinen, Bauhilfsmittel, Bauarbeiter und des zugehörigen Arbeitsraums identifizierten, sinnvollen 8 Varianten wurden in dem Tabellenkalkulationsprogramm StbMontageSimu untersucht. Die beiden besten Varianten sind in Abb. 2.16 und Abb. 2.17 dargestellt. Das Tabellenkalkulationsprogramm ist in vier Blöcke unterteilt, die mit Bau- oder Bauhilfsmittelobjekten von 4 unterschiedlichen Gruppen belegt werden können. Die einzelnen Objekte können nur durch Zellenfunktionen zu einer sequentiellen und parallelen Abfolge verknüpft werden, woraus sich die aufsummierten Zeitaufwandswerte ergeben. Die Anzahl sowohl der Bauteams als auch des Hebewerkzeugs Kran sind noch implizit, während in der erweiter-

ten Version (Abb. 2.20 bis Abb. 2.22) der Kran explizit dargestellt ist. In der Untersuchung wurde für die Bauteams die in Abb. 2.15 angezeigte Aufteilung angesetzt. Dies zeigt auch die Grenzen der Nutzung von Tabellenkalkulationsprogrammen auf. Zum Beispiel ist die maximale Anzahl der unterschiedlichen Objektklassen fest vorgegeben. Falls Programmierer und Nutzer eine Person sind, ist dies nicht weiter von Belang.

Bei beiden Szenarien kann das vom Terminrahmen vorgegebene Arbeitssoll nicht vollständig erfüllt werden. Das Mindestzeitdefizit beträgt immer noch 7,58 h und entspricht einer Abweichung von mehr als 10 % bezogen auf den vorgegebenen Zeitrahmen. Eine weitere Optimierung der Herstellungsprozesse ist somit erforderlich.

---

## 2.11 Optimierung des Herstellungsprozesses

Durch die hohe Stückzahl erscheint eine Optimierung der Stahlbetonstützen besonders vorteilhaft. Aus diesem Grunde wurde ein neuer Herstellungsprozess für die Bewehrung der Stahlbetonstützen entwickelt und am lokalen 3D Simulationsmodell untersucht:

Die Bewehrungskörbe der Stützen werden komplett vormontiert. Dieser Vorgang läuft unabhängig von den Montagevorgängen am Hochhaus ab. Der komplette Bewehrungskorb wird nach Abruf durch die Hochhausbaustelle durch einen Kran zur Einbaustelle gefördert. Ohne Zeitverlust wird der Bewehrungskorb an dem bereitstehenden Montagebock fixiert (Abb. 2.18). Damit ist der Kran wieder frei für nachfolgende Fördertätigkeiten. Der zuvor gewählte Montageprozess ohne Montagebock, d. h. der Bewehrungskorb hätte während der gesamten Montage durch den Kran in Position gehalten werden müssen, hätte zu einem enormen Kranbedarf geführt, der durch die beiden Krane nicht zu erfüllen war. Der in Abb. 2.18 vorgeschlagene Montagebock wurde dann in modifizierter Form auf der Baustelle durch vorhandene Bauhilfsstoffe verwirklicht.

Für den beschriebenen Vorgang gibt es keine Leistungsansätze. Eine Abschätzung der benötigten Montagezeit wurde ermittelt, indem der Montagevorgang in einer lokalen 3D Simulation durchgeführt und untersucht wurde. Für diese Untersuchung wurde das Simulationsmodell um den Montagebock erweitert

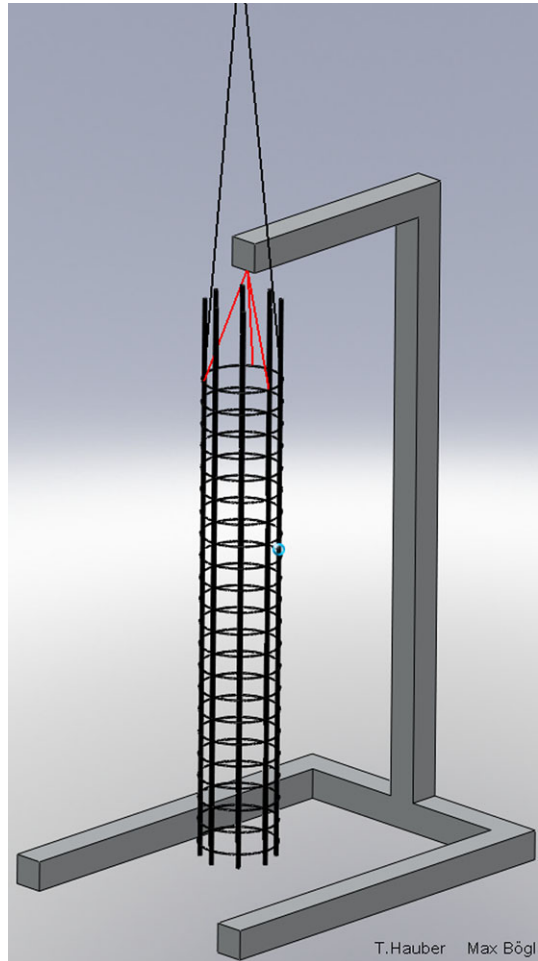
---

## 2.12 Optimierung des Kranzusammenspiels

Turmdrehkrane sind die teuersten und häufig gemeinsam genutzten Ressourcen auf der Baustelle. Die effiziente Nutzung von Turmdrehkranen hängt stark von Erfahrungen, einer Reihe von technischen Faktoren sowie finanziellen Mitteln ab [7]. Die Optimierung des Kranzusammenspiels setzt zweckmäßigerweise mit der Überprüfung der Hubtragfähigkeit an. Die Tragfähigkeit des Krans ist umso kleiner, je weiter die aufzunehmende Last vom Kranturm entfernt ist. Die jeweils zulässige Last wird durch die Angabe von Lastmomenten beschrieben (Abb. 2.12). Die Tragfähigkeit des Krans kann im Simulationsmodell überprüft werden, indem die Lastmomentbereiche eingeblendet werden. Jeder der in Abb. 2.12 rot transparent dargestellten Zylinderoberflächen beschreibt eine zuläs-

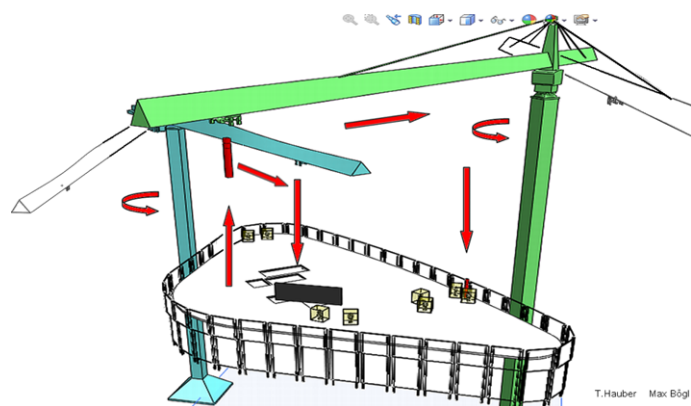


**Abb. 2.18** Bewehrungskorb  
am Montagebock fixiert



sige Hubtragfähigkeit. Das Gewicht der anzuhebenden Bauteile kann aus der Parametrik des Bauteils abgerufen und mit dem Lastmomentbereich optisch verglichen werden. Im Falle des Mefisto Hochhauses sind alle Bauteile nur so schwer, dass die Krane die Lasten problemlos aufnehmen können. Die Vorauswahl der Krane war zielführend.

Das Kranzusammenspiel beschreibt alle Aktionen und Bewegungen der Krane (Abb. 2.19) im Zusammenhang mit den zugehörigen Herstellungs- und Transportprozessen und dem erforderlichen Platzbedarf. Bspw. kann man in einer realistischen 3D Umgebung überprüfen, ob die Krane alle Bauteile erreichen können. Die Überprüfung des Tragvermögens der eingeplanten Krane wurde bereits beschrieben. Wichtige Aussagen erhält man durch die Drehbewegung eines Krans über den anderen Kran hinweg. Diese Bewegungsaktion ist möglich, solange das Kranseil den tiefer stehenden Kran nicht berührt. Immer wenn eine beabsichtigte Kranbewegung nicht möglich ist oder wenn alle Krane ausgelastet sind, müssen andere Prozesse auf die Kranunterstützung warten. Dies



**Abb. 2.19** Kranspiel beim Mefisto Hochhaus, Bewegungsabläufe sind durch Pfeile wiedergegeben, die einzelnen Bauarbeiter durch maßstabgerechte Arbeitsraumwürfel dargestellt

Arbeiten	Zeit	Schalung		Bewehrung		Kran pro Mindesteinheit			Fehlbetrag
		Beschreibung	balanzierte Zeit	Kennwert	pro Mindesteinheit	Zeitaufwand	Kennwert	pro Mindesteinheit	
Rundstütze 60cm schalen	3,76 h	0,60 h/qm	5,52 h	2,76 h				0,19 h	1,19 h
Rundstütze 60cm schalen	3,95 h	0,60 h/qm	5,52 h	2,76 h				0,19 h	1,37 h
Rundstütze 75cm schalen	4,81 h	0,80 h/qm	6,88 h	3,44 h				0,19 h	1,56 h
Rundstütze 60cm bewehren	1,00 h			0,05 h/kg	2,00 h	1,00 h		0,19 h	0,19 h
Rundstütze 60cm bewehren	1,19 h			0,05 h/kg	2,00 h	1,00 h		0,19 h	0,37 h
Rundstütze 75cm bewehren	1,37 h			0,05 h/kg	2,00 h	1,00 h		0,19 h	0,56 h
Rundstützen betonieren 3 Stück	7,26 h	0,40 h/qm	7,00 h	3,50 h			X	warten	7,26 h
Wand 50cm schalen	6,38 h	0,43 h/qm	12,75 h	6,38 h				0,19 h	0,19 h
Wand 50cm schalen	8,41 h	0,43 h/qm	8,93 h	4,46 h				0,19 h	4,13 h
Wand 50cm schalen	9,28 h	0,43 h/qm	8,93 h	4,46 h				0,19 h	5,00 h
Wand 50cm schalen	13,42 h	0,43 h/qm	12,33 h	6,16 h				0,19 h	7,45 h
Wand 35cm schalen	12,36 h	0,43 h/qm	12,33 h	6,16 h				0,19 h	6,39 h
Wand 50cm schalen	8,71 h	0,43 h/qm	4,68 h	2,34 h				0,19 h	6,57 h
Wand 50cm schalen	10,75 h	0,43 h/qm	4,68 h	2,34 h				0,19 h	8,60 h
Wind- und Absturzschutz	0,49 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	0,49 h
Wind- und Absturzschutz	0,79 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	0,79 h
Wind- und Absturzschutz	1,09 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	1,09 h
Wind- und Absturzschutz	1,39 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	1,39 h
Wind- und Absturzschutz	1,69 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	1,69 h
Wind- und Absturzschutz	1,99 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	1,99 h
Wind- und Absturzschutz	2,29 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	2,29 h
Wind- und Absturzschutz	2,59 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	2,59 h
Wind- und Absturzschutz	2,89 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	2,89 h
Wind- und Absturzschutz	3,19 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	3,19 h
Wind- und Absturzschutz	3,49 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	3,49 h
Wind- und Absturzschutz	3,79 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	3,79 h
Wind- und Absturzschutz	4,43 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	4,43 h
Wind- und Absturzschutz	4,73 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	4,73 h
Wind- und Absturzschutz	5,30 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	5,30 h
Wind- und Absturzschutz	5,60 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	5,60 h
Wind- und Absturzschutz	5,90 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	5,90 h
Wind- und Absturzschutz	6,20 h			0,60 h	0,30 h	X		0,19 h	6,20 h

**Abb. 2.20** Kranzusammenspiel: Zeitdefizit 9,52 h: Simulationsmodul SiteSimulation

ist ein alltäglicher Vorgang auf allen Baustellen. Hinter diesen Kranwartezeiten verbergen sich komplexe Zusammenhänge, die in der Gedankenwelt nicht mehr ausreichend beherrscht werden können. Mithilfe der lokalen 3D Simulation können Kranwartezeiten ermittelt und die Bauzeiten besser prognostiziert werden.

Die lokale 3D Simulation und das zugehörige Simulationsmodul SiteSimulation sind modular aufgebaut. Die Berechnung des Kranzusammenspiels ist eine Erweiterung der

[illegible]

**Abb. 2.21** Kranzusammenspiel: Zeitdefizit 8,79 h: Simulationsmodul SiteSimulation

Berechnung zur Optimierung der Herstellungsreihenfolge. Ergänzend ermittelt das Simulationsmodul, ob ein Kran für den Herstellungsprozess zur Verfügung steht. Wenn das nicht der Fall ist, wird die entsprechende Wartezeit erfasst und bilanziert. Durch den modularen Aufbau können grundlegende Fragen schnell untersucht werden. Wenn ausreichend Zeit zur Verfügung steht, können die Module aufeinander aufbauen und das Szenario für die Simulation kann fortschreitend erweitert werden. Es wurden mehrere Szenarien für das Kranzusammenspiel am ersten Produktionstag untersucht. Die drei Szenarien mit dem jeweils geringsten Zeitbedarf wurden aufgearbeitet und sind in Abb. 2.20, 2.21 und 2.22 dargestellt. Die roten Pfeile, die in Abb. 2.20 bis Abb. 2.22 nachträglich in die Abbildung eingefügt wurden, visualisieren den sonst nicht sichtbaren Ablauf der einzelnen Tätigkeiten, d. h. der feingranularen Vorgänge. Die 12 Bauarbeiter (Abb. 2.15) sind in 4 Teams aufgeteilt. 3 Teams haben die Aufgabe zu schalen und zu bewehren. Diese 3 Teams teilen sich auf in 1 Team Rundstützen bearbeiten und 2 Teams Wand bearbeiten. Das 4. Team ist durchgehend mit dem Umsetzen der Absturzsicherung beschäftigt. Die Starttätigkeit ist Rundstütze bewehren.

Die Durchführung der lokalen 3D Simulation mit Kranzusammenspiel hat ergeben, dass die vorgenommene Optimierung des Herstellungsprozesses der Stahlbetonstützen erfolgreich war. Alle Bauteile können nun für den ersten Produktionstag vollständig hergestellt werden. Das Zeitdefizit wurde auf 1,33 h verkleinert. Um das Zeitdefizit vollständig abzubauen, sind noch weitere Verbesserungen am Herstellungsprozess notwendig.

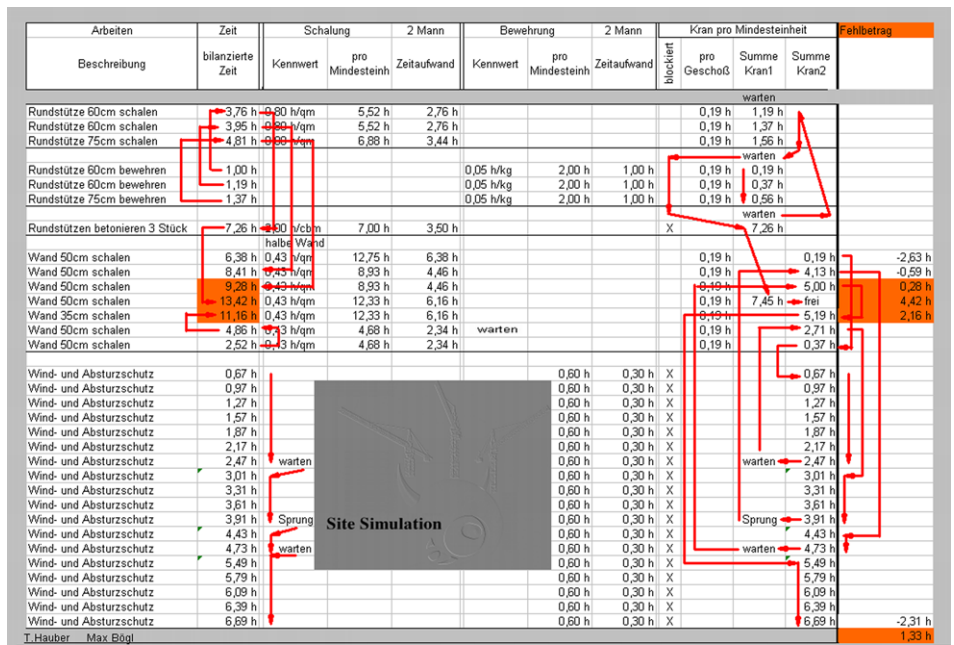


Abb. 2.22 Kranzusammenspiel: Zeitdefizit 1,33 h: Simulationsmodul SiteSimulation

### 2.13 Zusammenfassung

Jeder Projektbeteiligte entwickelt in seiner Vorstellung Gedankenmodelle über das geplante Bauwerk. Diese Gedankenmodelle werden laufend weiterentwickelt und die zugehörigen Bauprozesse in der Vorstellung durchgespielt. Die Vorstellungskraft reicht, in aller Regel, auch bei routinierten, erfahrenen Projektbeteiligten nicht aus, um die Komplexität von Bauwerken vollständig und vor allem fehlerfrei zu erfassen. Um die Gedankenmodelle zu überprüfen und zu perfektionieren, entstehen Skizzen, Pläne und auch Modelle aus Pappe und Holz. Sofern dieser ungemein bedeutende und unverzichtbare Gedanken- und Ideenprozess an einem virtuellen Bauwerk auf diese Weise entwickeln werden könnte, ist zu erwarten, dass die gedankliche Vorstellungskraft auf ein höheres Qualitätsniveau angehoben wird. Durch Präzision und Detailtreue werden interaktive 3D Bauwerksmodelle in der Hand von routinierten und erfahrenen Projektbeteiligten zu mächtigen Planungsinstrumenten und weisen den Weg in die Zukunft des Bauwesens. Die Möglichkeit, kreative Gedankenabläufe aller planenden Projektbeteiligten an einem visualisierten 3D Model abzustimmen, hilft, Entscheidungen schneller und sicherer treffen zu können. Eine Qualitätsverbesserung bei gleichzeitiger Zeitersparnis ist zu erwarten. Für die lokale 3D Simulation gibt es keine fertigen Softwareanwendungen. Daher wurde ein Weg aufgezeigt, wie mit bestehenden CAD Programmen mit kinematischen Funktionen und ergänzenden Tabellenkalkulationsprogrammen eine lokale 3D Simulationsanwendung, mit zwar erheblichen manuellen Anteilen, aber schon effizient für den praktischen Einsatz, erzeugt werden kann.

## Literatur

1. Whyte J (2003) Industrial applications of virtual reality in architecture and construction. *Electron J Inf Tech Constr* 8:43–50. Special issue virtual reality technology in architecture and construction. <http://www.itcon.org/2003/4>
2. Woksepp S (2007) Virtual reality in construction: tools, methods and process. Luleå University of Technology, Luleå. <http://epubl.ltu.se/1402-1544/2007/49/LTU-DT-0749-SE.pdf>
3. Kamat VR, Martinez JC (2003) Validating complex construction simulation models using 3D visualization. *Syst Anal Model Simul* 43(4):455–467
4. Kamat VR, Martinez JC (2001) Visualizing simulated construction operations in 3D. *J Comput Civ Eng* 15(4):329–337
5. Baugeräteleiste (2007) Bauverlag BV GmbH, Gütersloh
6. Ning X (2008) A development of dynamic construction site layout planning decision-making system. PhD thesis, City University of Hong Kong
7. Al-Hussein M, Athar Niaz M, Yu H, Kim H (2006) Integrating 3D visualization and simulation for tower crane operations on construction sites. *Autom Constr* 15(5):554–562

Informationssysteme im Bauwesen 2

Anwendungen

Scherer, R.J.; Schapke, S.-E. (Hrsg.)

2014, XIV, 341 S. 190 Abb., 61 Abb. in Farbe.,

Hardcover

ISBN: 978-3-662-44759-8