



Technischer Koordinierungs-Ausschuss

Ausgabedatum	27.03.2024	Revision	Status Freigegeben
		VPI 01	Seite 1/23

Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

Revisionsindex

Rev.	Datum	Beschreibung
01	27.03.2024	Erste Veröffentlichung

Autoren:
Dr.-Ing. M. Andres
Dipl.-Ing. M. Bernhard
Dr.-Ing. U. Breuninger
Dr.-Ing. F. Lüddecke
Prof. Dipl.-Ing. F. Prietz

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

Inhaltsverzeichnis

1	Anlass	4
2	Hinweise zur Modellbildung	5
a.	Allgemeines	5
b.	Gründung	6
c.	Stahlbau	7
d.	Stahlverbundbau	9
e.	Massivbau	10
f.	Holzbau	11
g.	Allgemeine Hinweise zur Nachweisführung zur Stabilität (Baustoffübergreifend, Allgemein)	12
3	Lastannahmen und Einwirkungskombinationen	13
4	Plausibilisierung von software-gestützten Berechnungen insbesondere mittels 3D-Gesamtmodellen ..	14
5	Anforderungen an eine prüffähige statische Berechnung	16
6	Beispiele	18
6.1	Beispiel 1 - Holzbau	18
6.2	Beispiel 2 – Wandartige Träger	19
6.3	Beispiel 3 – Knotendetails im Stahlbau	20
6.4	Beispiel 4 – Bauzustände	20
6.5	Beispiel 5 – Nachgiebigkeit von aussteifenden Wandscheiben	21
7	Weiterführende Literatur	23

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

1 Anlass

Der Einsatz leistungsfähiger Hard- und Software hat in den letzten Jahrzehnten auch im Bauwesen stetig zugenommen und ist aus der Praxis des Planens und Prüfens nicht mehr wegzudenken. Insbesondere in der Tragwerksplanung sind vermehrt eine Modellierung und Berechnung räumlicher Tragwerke bis hin zu ganzen Bauwerken zu beobachten. Die damit verbundene Komplexität der Systeme, der Einwirkungen und Einwirkungskombinationen sowie der Berechnungsergebnisse stellt die Planerin oder den Planer aber auch die Prüferin oder den Prüfer vor große Herausforderungen. Berechnungen am 3D-Gesamtmodell sind in vielen Fällen hilfreich.

Eine 3D-Berechnung sollte jedoch nur dann angestellt werden, wenn es bereits eine ingenieurtechnisch durchdachte Grundkonzeption zum Tragwerksentwurf und zur Tragwirkung gibt. 3D-Programme eignen sich nicht als Entwurfswerkzeug.

Der vorliegende Leitfaden stellt praxisrelevante typische Schwierigkeiten einzelner Bauweisen des Hochbaus zusammen und versucht die Mindestanforderungen an eine Berechnung aus Sicht der Prüferinnen oder Prüfer zu definieren. Ergänzend werden anhand von Beispielen Lösungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Dieser Leitfaden gilt gleichermaßen für Stabwerke wie auch für flächige Tragwerke (Platten, Scheiben, Schalen)

Nicht berücksichtigt werden folgende Konstruktionstypen:

- Seilkonstruktionen
- Brückenbauwerke
- Hinweise zur Heißbemessung, die nicht Bestandteil dieses Papiers sind
- Tief- und Ingenieurbauten
- Einwirkungen infolge Erdbeben

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

2 Hinweise zur Modellbildung

a. Allgemeines

Die fortschreitende Entwicklung der Berechnungsmethoden und Leistungsfähigkeit von Hard- und Software - insbesondere der BIM-Methodik führt neben der Änderung der Abläufe in der Aufstellung statischer Berechnungen sowie den Erfordernissen an ihre Dokumentation gleichwohl zu geänderten Anforderungen und Vorgehen ihrer baustatischen Prüfung.

Obwohl Tragwerke in der Regel dreidimensionale Strukturen sind, war ihre Modellierung in der Tragwerksplanung angesichts der Durchführbarkeit der Berechnungen in der Vergangenheit auf zwei Dimensionen reduziert. Berechnungen am 3D-Modell bieten den Vorteil, auch komplexe Tragstrukturen abzubilden, z.B. räumliche Stabilitätsfälle und Schwingungseigenformen zu berechnen, sowie Lagesicherheitsnachweise, Bauzustände und Aussteifungssysteme ganzheitlich, sprich realitätsnäher zu betrachten. 3D-Modelle verlangen weitaus größere Aufwendungen und Anforderungen an das Ingenieurverständnis hinsichtlich der Definition des Tragwerks und des Lastabtrags. Die richtige Zuweisung von Steifigkeiten, sowie die Rand- und Übergangsbedingungen zur Erzielung eines realistischen Modells sind komplexer als in ebenen Abbildungen und erfordern häufig vorangestellte Betrachtungen (Validierungen, Parameteruntersuchungen, Sensitivitätsanalysen, etc.). Darüber hinaus müssen ergänzend zur Erstellung eines räumlichen Tragwerkmodells 2D-Modelle zur Plausibilisierung des Tragverhaltens verwendet werden. Derartige Zwischenschritte und Zusatzbetrachtungen sollten in die Dokumentation Eingang finden, um die Nachvollziehbarkeit der Berechnung zu unterstützen.

Ein Bestandteil der Qualitätssicherung von Berechnungen am 3D-Gesamtmodell könnte der Einsatz einer nach VDI-Richtlinie 6201 (softwaregestützte Tragwerksberechnung) validierten Software sein.

Es ist bauaufsichtlich erforderlich, dass die Prüfsachverständigen und Sachverständigen eine unabhängige Vergleichsrechnung durchführen. Somit besitzen die statischen und numerischen Kenntnisse und Erfahrungen des Anwenders sowie ein sicherer Umgang mit der Software durch entsprechende Schulungen einen besonderen Stellenwert in der Durchführung softwaregestützter Tragwerksberechnungen am 3D-Modell. Die Nachweisführung ist hierbei nicht auf ein 3D-Gesamtmodell beschränkt. Details können differenzierte Modelle erfordern.

Die Nachweismöglichkeiten mittels numerischer Modelle sind verschiedentlich begrenzt. Eine Grenze stellen zum Beispiel empirische oder durch Versuche begründete Nachweisverfahren dar, deren Abbildungen nicht hinreichend möglich oder auf konservativerem Niveau angesiedelt sind, sodass die Numerik Ergebnisse auf der normativ unsicheren Seite liefert. Das betrifft z.B. Stabilitätsnachweise von Schalen mit Imperfektionseinfluss oder Schraubenverbindungen. Davon abzugrenzen sind wiederum Modelle, die unter Beachtung aller Einflussgrößen einen Erkenntnisgewinn und damit eine wirtschaftliche Bemessung ermöglichen. Damit sind hohe Anforderungen an die Durchführung und Dokumentation verbunden.

Als kritisch sind außerdem Modelle zu bezeichnen, deren numerische Ergebnisse eine Genauigkeit vorgeben, die im Widerspruch zur Bandbreite der Variabilität der Randbedingungen steht. So entstehen scheinbar hochgenaue Ergebnisse, die jedoch sensitiv auf Änderung der Randbedingungen reagieren, die wiederum ebenso zu untersuchen und darzustellen sind.

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

b. Gründung

Die Gründung bildet das Bindeglied zwischen Baugrund und Bauwerk und bettet das Bauwerk in den Baugrund ein. Sie muss gewährleisten, dass die Lasten des Bauwerks sicher in den Baugrund eingeleitet werden.

Im Gegensatz zum Bauwerk, inklusive der Gründung, muss der Baugrund in der Art und Weise hingenommen werden, wie er vor Ort angetroffen wird. Die bautechnischen Eigenschaften des vorgefundenen Baugrunds (Sohlwiderstand, Setzungsverhalten, Bettungsmodul, Pfahlmantelreibung, Pfahlspitzendruck, ...) können, auch vom Baugrundgutachter nicht exakt definiert werden und unterliegen immer einer Streubreite. Diese Streubreite ist beim Baugrund wesentlich größer als bei dem vom Planer aktiv gestalteten Bauwerk. Die Lagerungsbedingungen im Baugrund (Bettungsmodul, Pfahlfedersteifigkeiten) sind vom Aufsteller mit dem Bodengutachter abzustimmen.

Bei einer statischen Berechnung am 3D-Gesamtmodell ist vom Tragwerksplaner deshalb die Streubreite der bautechnischen Eigenschaften des Baugrunds zu berücksichtigen. Dies kann zum Beispiel erfolgen durch:

- eine Gründung mittels einer elastisch gebetteten Bodenplatte durch Variation des Bettungsmoduls. Die Auswirkungen auf die Biege- und Querkraftbeanspruchung der Bodenplatte sind zu bewerten.
- Abstimmung mit dem Baugrundgutachter Grenzbetrachtungen mit variierenden Lagerungsbedingungen. Da der Aufsteller diese Grenzbetrachtungen selten anstellt, sollte die Prüfung des PI von den Beteiligten als eine mögliche Grenzbetrachtung akzeptiert werden. Bei einem sehr steifen aufgehenden Bauwerk mit hoher statischer Unbestimmtheit im Falle einer Flachgründung erfolgt dies durch Ansatz von Setzungsdifferenzen des Baugrunds.
- durch Ansatz von Setzungsdifferenzen der Tiefgründung bei einem sehr steifen aufgehenden Bauwerk mit hoher statischer Unbestimmtheit im Falle einer Tiefgründung.

Folgende Hinweise zur Modellierung des 3D-Gesamtmodells sind bezüglich der Gründung von besonderer Bedeutung und vom Tragwerksplaner zu beachten:

- In vielen Fällen ist es sinnvoll, die Steifigkeit des aufgehenden Bauwerks oberhalb des Kellerkastens nicht zur Lastverteilung hinsichtlich der Gründung heranzuziehen. Dies bedingt eine Entkoppelung des 3D-Gesamtmodells an der Oberkante des Kellerkastens. Konkret bedeutet dies, dass das aufgehende Bauwerk nur als schlaaffe Last, ohne Eigensteifigkeit, auf den Kellerkasten gesetzt wird.
- Die Lastdurchleitung von Vertikallasten in aufgehenden Wänden durch, gegebenenfalls dicke, Bodenplatten in Großbohrpfähle ist im Nachgang separat nachzuweisen (Schubbeanspruchung, Durchstanzen).
- Falls an Oberkante des Kellerkastens hohe Horizontallasten und ein hohes Einspannmoment auftreten, so ist die Weiterleitung der Horizontallasten und des Einspannmomentes durch den Kellerkasten bis in den Baugrund gesondert zu untersuchen. Vorab ist zu klären, wo und wie die Beanspruchungen an den Baugrund abgegeben werden. Insbesondere werden Grenzbetrachtungen zur Aufteilung des Einspannmomentes in ein vertikales oder horizontales Kräftepaar erforderlich. Dies kann durch ein separates Ingenieurmodell (z.B. Stabwerksmodell) erfolgen. Die Scheibenkräfte in den Decken und Wänden sind bei der Bemessung zu berücksichtigen.

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

c. Stahlbau

Grundsätzlich müssen die betrachteten stahlbaulichen Tragstrukturen durch den Aufsteller charakterisiert und bewertet werden, um hieraus die notwendigen Ansprüche an die Modellqualität und an den Umfang eines 3D Modells abzuleiten.

Die Art der Beanspruchung, ruhend oder nicht ruhend¹⁾, stellt beispielsweise ein Unterscheidungskriterium für die Art und Qualität des 3D Modells dar.

Ferner kann nach Art des Tragsystems bzw. nach der Repräsentation des Bauteils/Bauwerks unterschieden werden. Mögliche Kriterien z.B. sind Stabsystem, Balkensystem, Hochbauten, Hallen, Räumliche Tragwerke, Dächer, Sprengwerke ^{2) 3) 6)}. Hinzu kommen: Schalenartige Systeme wie Silos, Türme, Membranbauwerke, Kastenträger mit QK4⁴⁾ oder volumenartige Systeme, z.B. Teilbaugruppen, Verbindungen, Kerbdetails in Lebensdauernachweisen⁵⁾, oder auch Gesamtsysteme¹⁾⁶⁾, oder andere Teilsysteme.

Neben den zwei vorgenannten Unterscheidungsmöglichkeiten nach Art der Beanspruchung oder nach Art des Tragsystems kann auch als Unterscheidungskriterium die Art der Berechnungsmethodik herangezogen werden, bspw. nach linear-elastischen Berechnungen (lineares Materialgesetz, Einwirkungen am unverformten System) (elastisch-elastisch) oder nach nicht-linearen Berechnungen (plastisches Materialgesetz, Einwirkungen am unverformten System oder am verformten System, sprich Berücksichtigung der Theorie II. Ordnung und weiterer nicht-linearer Effekte)⁶⁾.

i. Die folgenden Hinweise sollten jeweils zu den oben aufgeführten Methoden bei der Modellumsetzung Berücksichtigung finden:

Zu ¹⁾: Die Anforderungen zur Modellierung bei nicht-ruhend beanspruchten Strukturen orientieren sich an den Nachweisen zur Lebensdauer. Die dafür notwendige Detaillierung und Auflösung lassen sich in der Regel nur als Teilsystem realisieren.

Zu ²⁾: In der Regel muss der Aufsteller von staborientierten Systemen besondere Beachtung auf die korrekte Wiedergabe von z.B. Randbedingungen, Imperfektionen, Konstruktionsdetails und Anschlussverhalten (Steifigkeiten, Schlupf) legen und sollte dies systematisch durchführen und dokumentieren.

Zu ³⁾: Bei der Verwendung der analytischen Verfahren mit Schnittgrößen aus einem 3D-Modell ist auf die korrekte Wiedergabe von Systemlängen, seitlicher Stützung und Anschlussbedingungen zu achten.

Zu ⁴⁾: Für Stabilitätsnachweise am Gesamtsystem sind die jeweiligen einschlägigen technischen Regeln zu beachten, z.B. DIN EN 1993-1-5 und 6.

Zu ⁵⁾: Die Modellierung für Lebensdauernachweise an 3D-Modellen unterliegt konkreten Anforderungen, z.B. DIN EN 1993-1-9, bzw. Empfehlungen des IIW.

Zu ⁶⁾: Verbindungsmodelle als rückgekoppeltes Teilsystem in einem Gesamtsystem sind besonders geeignet, um ihr z.T. nichtlineares Verhalten, insbesondere bei Schraubenverbindungen, im höheren Modell abzubilden.

ii. Allgemeine Hinweise

Der Einsatz von 3D-Modellen erfordert eine erfahrene Ingenieurin oder einen erfahrenen Ingenieur, die oder der zum einen mit der Software vertraut ist (Anwenderschulungen, Qualifizierung) als auch mit der Erfahrung ausgestattet ist, die notwendigen Abstraktionen korrekt umzusetzen, relevante Modellparameter zu erkennen und entsprechend abzubilden sowie das geeignete Modell für den jeweiligen Nachweiszweck auszuwählen.

Kapitel:	Hinweise zur Modellbildung	Seite: 7/23
----------	----------------------------	-------------

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

Modelleinflüsse und Randbedingungen, die einer unbekannten Streuung unterliegen, müssen durch eine Parameterstudie mit mindestens drei Elementen, z.B. untere und obere Grenze, sowie beste Schätzung untersucht werden, um deren Einflüsse zu erkennen.

Eine empfehlenswerte Plausibilitätskontrolle ist die überhöhte Darstellung der Systemverformung, da auf diese Weise in der Regel Modellfehler, falsches Verhalten von Randbedingungen und System deutlich sichtbarer sind im Vergleich zu Spannungsdarstellungen oder numerischen Eingaben („Zahlenkolonnen“). Weiterhin empfehlen sich in der Literatur dokumentierte analytische Nachweise für relevante Kombinationen von Bauteilen und Lasten, insbesondere für Stabilitätsnachweise von Stäben.

Die bisherige Praxis zeigt oft eine unzureichende Dokumentation von höherkomplexen 3D-Modellen. Die Dokumentation sollte mindestens den folgenden Umfang umfassen:

- Beschreibung des Problems und Lösungsansatzes
- Verwendete Eingangswerte, Annahmen (mit Begründung) und ggf. Vorgaben z.B. hinsichtlich der Bauabläufe
- Charakterisierung nach o.g. Kriterien, und zum vorliegenden Problem begründete Wahl des statischen/dynamischen Systems
- Beschreibung der Modellierung und Erfassung von Randbedingungen und Zwischenzuständen
- Rechenweg (ggf. exemplarisch)
- EDV-Ausgabe aller relevanten System- und Berechnungsvorgaben (s.o.) sowie der Rechenergebnisse in aussagefähiger Form
- Ergebnisübersicht (maßgebende Einwirkungen, Versagensfall, Gebrauchstauglichkeitskriterium)

Bauzwischenzustände sind im gleichen Sinne zu bewerten, zu modellieren und auszuwerten.

Bei Verwendung von getrennten Modellen sind die Schnittstellen und die korrekte Übergabe von Steifigkeiten und Schnittlasten/Verformungen sicherzustellen und zu dokumentieren.

Insgesamt bietet die Verwendung von 3D-Modellen Chancen auf ein besseres Verständnis des Gesamtverhaltens, auf eine softwaregestützte Abbildung von umfangreichen Lastkombinationen und die systematischen Nachweise über alle Bauteile, ohne die Notwendigkeit für die Ingenieurin oder den Ingenieur, eine Auswahl von nachweiskritischen Stellen zu treffen. In dieser Hinsicht ist deren Einsatz empfehlenswert.

Im Sinne der Kosten/Nutzen-Betrachtung ist nicht für jedes Bauwerk eine umfangreiche 3D-Betrachtung zielführend. Der aufgezeigte (Mehr-)Aufwand für Modellierung, Dokumentation und Prüfung ist resultierenden (Mehr-)Kosten gegenüberzustellen. Die Entscheidung hat in Bezug auf den Einzelfall zu erfolgen.

iii. **Besondere Hinweise zur Nachweisführung**

Nachweise zur Bestimmung der Lebensdauer stellen besondere Anforderungen an die Modellierung, namentlich an die Anwendung des Struktur- oder Kerbspannungskonzepts. Konkrete Anforderungen an die Modellierung und deren Auswertung werden in der IIW [L8] sowie einschlägiger Literatur benannt und sind zu beachten. Einen Grenzfall stellt der Übergang vom Grenzzustand der Tragfähigkeit zu Lebensdauernachweisen mit wiederholenden GZT-nahen Lastgrößen dar (low-cycle-fatigue, siehe auch LS2 in DIN EN 1993-1-6).

Die Modellierung von Schraubverbindungen mittels 3D-Modellen ermöglicht eine numerisch genaue Abbildung des Schraubenverhaltens, z.B. von Hebeleffekten, wie sie regelmäßig in Stirnplatten- und Flanschstößen auftreten, siehe DIN EN 1993-1-8:2010 Pkt. 3.11. Allerdings sind für eine ausreichende Bewertung auch die Wirkung von Toleranzen, Vorspannungsstreuung und Setzungen erforderlich, was bei hochbelasteten

Kapitel:	Hinweise zur Modellbildung	Seite: 8/23
----------	----------------------------	-------------

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

Verbindungen umfangreiche numerische Arbeiten nach sich ziehen kann. Bei vorgespannten Schrauben wird zu selten ein Nachweis geführt, dass die Schrauben bei Auftreten der maßgeblichen Belastung nicht plastizieren, was zum Verlust der Vorspannwirkung führen würde (derzeit nicht normativ verankert).

Stabilitätsnachweise von Schalen und Platten mittels numerischer Methoden sind bereits im Eurocode 3 hinlänglich spezifiziert. Hier ist dennoch großes Augenmerk auf ausreichende Plausibilitätsprüfungen zu legen, sowohl bei einfachen Systemen, für die analytische Lösungen existieren (hier sollten nur geringe Unterschiede auftreten) als auch bei komplexen Systemen, die nur numerisch erfassbar sind (hier steht eine generelle Plausibilitätsprüfung im Vordergrund). Bei Verwendung von Modellen mit Toleranzeinfluss ist neben der korrekten Modellierung insbesondere die Rückkopplung mit dem Fertigungsprozess, z.B. durch die Definition von zulässigen Toleranzen, einzeln und in Kombination, zu suchen und ggf. eine nachlaufende Überprüfung des Modells durchzuführen.

Stabilitätsnachweise von Einzelstäben sollten bei komplexeren Modellen nach Möglichkeit mittels der Software auch nach analytischen Verfahren, z.B. Ersatzstabverfahren durchgeführt werden und nicht ausschließlich als spannungsbasierter Nachweis erfolgen. Der Nachweis der Stabilität von stabartigen Gesamtsystemen muss mögliche Imperfektionen in Kombination mit der Belastung hinreichend abbilden, um die maßgebliche Versagensform zu finden.

Numerische 3D-Modelle bieten darüber hinaus die Möglichkeit, mit geringem Aufwand das dynamische Verhalten des Systems in Form von Eigenfrequenzen festzustellen und damit mögliche Resonanzeffekte bei der Nutzung auszuschließen. Davon betroffen sind naturgemäß schlanke oder gestreckte Bauwerke mit Verkehrs-, Maschinen- und/oder Windeinflüssen. Hierbei sind relevante Massebelegungen und Steifigkeitsvariationen abzubilden, z.B. Vereisung, Bauzustände, Streuungen von Elastizitäts- und Bettungsmodulen.

Allgemein kann festgestellt werden, dass zu numerischen Untersuchungen von Spezialfällen regelmäßig Literatur publiziert wird, siehe die Zeitschrift „Stahlbau“, so dass sich im Vorfeld eines solchen Falles eine Literaturrecherche anbietet.

Es haben sich verschiedene Softwarepakete mit unterschiedlichem Leistungsspektren für die Berechnung und Nachweisführung im Stahlbau etabliert. Bei komplexen Systemen kann die geometrische Modellierung durch die Prüferingenieurin oder den Prüferingenieur unverhältnismäßig großen Aufwand und Zeitbedarf in Anspruch nehmen. Hier sollten im Sinne des BIM die vorhandenen Schnittstellen genutzt werden. Ein Abgleich der Geometrie kann in der Regel mittels Zeichnungsprüfung gut durchgeführt werden. Daher kann eine Übernahme der Modellgeometrie des Aufstellers auf elektronischem Weg sachangemessen sein. Die Prüferingenieurin oder der Prüferingenieur konzentriert sich dann auf die Randbedingungen und Lasten sowie die Nachweisführung im Sinne ihrer/seiner unabhängigen Parallelrechnung.

d. Stahlverbundbau

Stahlverbundbauteile werden im Wesentlichen als Decken, Träger, Stützen und Rahmen eingesetzt. Sie setzen sich im Querschnitt aus Baustahl und Stahlbeton zusammen. Die Querschnittsteile sind durch Verbundmittel gekoppelt.

Im Hochbau erfolgt die Bemessung von Stahlverbundträgern unter Berücksichtigung von plastischen Querschnittswerten. Falls möglich werden zusätzlich plastische Reserven im statischen System (Fließgelenke) genutzt. Es kann voller Verbund oder auch Teilverbund zwischen Baustahl und Stahlbeton angesetzt werden. Die Bemessung von Stahlverbundstützen im Hochbau erfolgt in der Regel mittels des Ersatzstabverfahrens unter Berücksichtigung der plastischen Widerstandswerte des Querschnitts.

Kapitel:	Hinweise zur Modellbildung	Seite: 9/23
----------	----------------------------	-------------

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

Damit kann der Nachweis von Stahlverbundbauteilen im Rahmen eines 3D-Gesamtmodells, das im Allgemeinen keine plastischen Traganteile berücksichtigt, nicht erfolgen. Trotzdem können Stahlverbundbauteile in ein 3D-Gesamtmodell integriert werden. Die Bemessung dieser Stahlverbundbauteile wird im Allgemeinen jedoch im Nachgang gesondert erfolgen.

Bei der Integration der Stahlverbundbauteile in das 3D-Gesamtmodell ist auf eine korrekte Eingabe der Steifigkeit zu achten. Diese ist gegebenenfalls auch mit Grenzwerten anzusetzen, um für die nachlaufende Bemessung Schnittgrößen zu erhalten, die auf der sicheren Seite liegen.

e. Massivbau

Typische und damit grundsätzliche Probleme der Stahlbetonbauweise

Stahlbeton ist eine gerissene Bauweise. Die meisten FEM-Programme rechnen jedoch linear-elastisch und berücksichtigen damit nicht die unterschiedlichen Steifigkeiten in ungerissene und gerissene Bauteilbereiche (Zustand I /II). Dies kann z.B. bei Durchbiegungsberechnungen oder bei Berechnungen nach Theorie II. Ordnung zu Ergebnissen führen, die auf der unsicheren Seite liegen.

Ebenso werden eventuelle Lastumlagerungen durch zeitabhängige Verformungen (Kriechen und Schwinden) nicht berücksichtigt

i. Allgemeines:

Grundsätzlich entbindet eine Berechnung am Gesamtsystem nicht von einer Vorbemerkung in der Statischen Berechnung, die das Tragsystem und seine Besonderheiten beschreibt.

Zusätzlich ist bei der statischen Berechnung am 3D-Gesamtsystem die Benennung des Programmsystems und eine Beschreibung der FE-Modellbildung erforderlich. Insbesondere die Übergangsbedingungen zwischen Decken, Wänden, Stützen und weiteren Bauteilen, sowie die Lagerungsbedingungen des Gesamtsystems sind zu definieren.

Gegebenenfalls ist im Rahmen der bautechnischen Prüfung ein Austausch und eine Detailabstimmung über die Modellierung von einzelnen Tragwerksbereichen zwischen Aufsteller und Prüfer erforderlich.

Die statische Berechnung am 3D-Gesamtmodell muss die Angabe der gewählten Bewehrung in allen Bauteilen beinhalten.

Die Absprache zwischen der Tragwerksplanerin oder dem Tragwerksplaner sowie der Prüfsachverständigenin oder dem Prüfsachverständigen, bei signifikant abweichenden Berechnungsergebnissen jeweils die höhere Bewehrungsmenge einbauen zu lassen, kann nur in besonderen Ausnahmefällen nach Genehmigung durch den Bauherren vereinbart werden.

Der statischen Berechnung am 3D-Gesamtmodell muss vom Aufsteller eine globale Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse beigelegt werden. Diese muss mindestens Summe V und Summe H umfassen.

ii. Besonderheiten bei einer EDV-Berechnung am Gesamtsystem

Bei einer Berechnung des Gesamtmodells können folgende Effekte auftreten, die ggf. untersucht werden müssen, da sie bemessungsrelevant werden können:

1. übliche linear-elastische Berechnung: Hierbei können z.B. Stützenlasten zu klein berechnet werden, da eine Umlagerung zu den steifen Kernen stattfindet

Kapitel:	Hinweise zur Modellbildung	Seite: 10/23
----------	----------------------------	--------------



Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell

Herausgegeben am
27.03.2024

Revision

VPI
01

2. Boden-Bauwerk-Interaktion: Setzungen können zu Zwangsbeanspruchungen in der Konstruktion führen. Insbesondere bei schwierigen Baugrundverhältnissen sind in Abstimmung mit dem Baugrundsachverständigen Setzungsdifferenzen zu berücksichtigen
3. Kriechen: Durch ein Systemkriechen kann es zu weiteren Umlagerungen der Schnittgrößen kommen, insbesondere bei Bauteilen mit unterschiedlichem zeitabhängigem Verformungsverhalten (z.B. Stahlbeton und Stahlstützen)
4. Bauablauf: Die Berücksichtigung des Bauablaufes kann sich günstig auswirken (z.B. bei Pkt. 1), es sind aber auch ungünstige Auswirkungen möglich (z.B. bei temporären Unterstützungen von Bauteilen)

Bei Änderungen von Steifigkeiten (z.B. bei nachträglich eingefügten Durchbrüchen in aussteifenden Wänden oder bei Balken mit nachträglich eingefügten Stegöffnungen) sind die Auswirkungen neu zu bewerten. Dies kann u.U. eine Neuberechnung am Gesamtsystem erforderlich machen. Auch unterschiedliche Betonfestigkeiten innerhalb eines Bauteils verändern die Steifigkeiten und sind bei der Modellierung zu berücksichtigen.

iii. Besondere Bauteile

Bei der Berechnung von Bodenplatten und Flachdecken mittels FEM sind die Durchstanznachweise separat im Nachgang zu führen

Bei der Berechnung von wandartigen Trägern mit FEM-Programmen ist stets eine nachlaufende Bemessung der Knoten erforderlich (Spannungsnachweise, Verankerungslängen). Ansonsten ist die Statik als unvollständig zu bewerten.

Eine Modellierung als Stabwerk ist hilfreich im Hinblick auf die Bewehrungsführung und ist den „erf as“-Plots der Programme überlegen.

f. Holzbau

Die Besonderheit bei der Berechnung von Holzkonstruktionen liegt in den von den Randbedingungen abhängigen Bauteileigenschaften. In den Beiwert k_{mod} gehen u.a. die Klasse der Lasteinwirkungsdauer (KLED) und auch Nutzungsklasse ein.

Wegen der KLED können sich für verschiedene Lastfallkombinationen auch unterschiedliche Beiwerte k_{mod} ergeben. Darüber hinaus sind z.B. Bauteile, also durchaus ganze Balken, denkbar, die in mehrere Nutzungsklassen fallen. Als Beispiel sei etwa ein Dachsparren genannt, der zum Teil in einem beheizten Wohnraum liegt (Nutzungsklasse 1), aber auch als Bereich des Vordachs im Freien unter Dach liegt (Nutzungsklasse 2).

i. Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel

Die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel ist gemäß DIN EN 1995 zu berücksichtigen. Es empfiehlt sich jedoch, diese Nachgiebigkeit erst zu implementieren, wenn die Konstruktion hinsichtlich der Bauteilabmessungen weitgehend feststeht.

ii. Bauteilbemessung

Die Randbedingungen der Bemessungsteile der eingesetzten Software sind genauestens zu beachten. Insbesondere Stäbe mit veränderlichem Querschnitt, also angeschnittener Faser, sind meist gesondert zu bemessen. In der Regel wird im Rahmen einer 3D-Berechnung kein Quersugnachweis geführt.

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

iii. Nachweis der Verbindungsmittel

Verbindungsmittelnachweise im Zuge einer 3D-Berechnung durchzuführen ist zumeist nicht zielführend. In diesem Zusammenhang wird auf den Abschnitt 2.g und dort speziell die auf Torsion verwiesen. Im Holzbau ist die Übertragung von Torsionsmomenten an Verbindungen schwer darstellbar bis unmöglich (z.B. Schlitzblechanschlüsse).

g. Allgemeine Hinweise zur Nachweisführung zur Stabilität (Baustoffübergreifend, Allgemein)

Der Nachweis der Gesamtstabilität eines Bauwerks oder einer baulichen Anlage lässt sich in einem 3D-Modell zumeist recht gut führen.

Ohne eine eingehende Betrachtung zu den anzusetzenden Vorverformungen und Vorverkrümmungen wird der Nachweis der Gesamtstabilität nicht zutreffend sein. Hierbei ist zu bedenken, dass beispielsweise Schiefstellungen mit der jeweiligen Windrichtung korrespondieren müssen. Eine Schiefstellung gegen die Windrichtung würde eine stabilisierende Wirkung haben und damit das Ergebnis zur unsicheren Seite hin verfälschen.

Der Stabilitätsnachweis der Einzelbauteile (Stäbe oder Flächen) kann prinzipiell am Gesamtmodell geführt werden, bedarf jedoch genauester Kontrolle. Bestehen Zweifel an der Richtigkeit der Ergebnisse, sind Einzelnachweise z.B. nach dem Ersatzstabverfahren unabdingbar. Besonders kritisch sind Beulnachweise und Biegedrillknicknachweise zu hinterfragen. Gleiches gilt auch für die Bemessung dünnwandiger Querschnitte und von Verbundkonstruktionen.

Fehlermeldungen mit Textbestandteilen „System instabil . . .“, sind stets kritisch zu hinterfragen. In vielen Fällen lässt sich schlichtweg die Steifigkeitsmatrix rein mathematisch nicht lösen, was die Software als Instabilität bezeichnet. Ursache sind häufig Gelenke mit zu vielen Freiheitsgraden. Mit einem Stabilitätsversagen des Gesamtsystems oder seiner Bestandteile im Sinne von Knicken, Beulen und Biegedrillknicken hat das zumeist nichts zu tun.

In vielen Fällen werden die vorgenannten Fehlermeldungen durch zu viele Freiheitsgrade im Hinblick auf die Torsion ausgelöst. Dann lautet die Meldung etwa so: „Stab frei drehbar in Knoten XY“. In solchen Fällen empfiehlt sich die Definition sehr kleiner Torsionsfeder, um das System lösbar zu machen. Es ist danach zu prüfen, ob sich nennenswerte Torsionsmomente ergeben, weil diese dann für das Gleichgewicht im System erforderlich sind und nicht vernachlässigt werden dürfen. Im Übrigen empfiehlt es sich, grundsätzlich die Torsionsmomente auszugeben, sei es nur, um zu belegen, dass diese nicht relevant werden.

Insbesondere im Hinblick auf die Bemessung einzelner Bauteile empfiehlt sich vor einer umfangreichen Systemberechnung eine Analyse kleinerer (Teil-)Systeme, um die Grenzen der Software erkennen zu können.

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

3 Lastannahmen und Einwirkungskombinationen

Die Eingabe von Einwirkungen für 3D Modelle bedarf einer Tragwerksplaner-seitigen Plausibilisierung, bspw. durch Summenbildung der Einwirkungen und Reaktionskräfte (Aktio = Reaktio). Folgende Eigenprüfungen sollte der Tragwerksplaner vor Abgabe der statischen Berechnungen vornehmen:

- Die Vollständigkeit der Einwirkungen ist zu überprüfen.
- Die Einwirkungsermittlung sowie die sich darauf ggf. aufbauende Last-Herleitung zur EDV-Software-konformen Implementierung im Modell ist auf Vollständigkeit und in Bezug auf Vorhandensein von unterstützenden Erläuterungen zu überprüfen.
- Für triviale Systeme können Handrechnungen in erster Näherung zur Überprüfung der einwirkenden Lasten zu Rate gezogen werden.
- Für komplexere Systeme sind geeignete Methoden zu entwickeln. Bspw. kann die Überprüfung anhand der Bewertung der zu erwartenden resultierenden Auflagerreaktionen durch Gegenrechnung an vereinfachten ingenieurmäßigen Modellen erfolgen.
- EDV-seitige Ausgaben von Lastsummen je generiertem Lastfall sowie die beschriebenen Plausibilisierungen sind zu dokumentieren und mit zur Prüfung einzureichen.

Einwirkungsseitige Besonderheiten bei der Modellierung von 3D Modellen werden nachfolgend zusammengestellt:

- Für komplexere 3D Modelle ist es aufgrund der Komplexität oftmals schwer nachzuvollziehen, ob die Einwirkungen richtig und vollständig angesetzt wurden. Zur Plausibilisierung ist wichtig, für die Eigengewichts- und Verkehrslasten eine überschlägliche Lastvorermittlung über alle Geschosse bis zur Gründung den Lastsummen aus dem 3D Modell gegenüberzustellen. Ferner sind die Lastsummen der Windlastfälle der Gesamtwindlast der jeweiligen Anströmrichtung auf das gesamte Gebäude gegenüberzustellen. Für die Stabilisierungslasten sind die Ersatzhorizontalkräfte den aufgetragenen Imperfektionen vorzuziehen. Dadurch sind die tatsächlich berücksichtigten Aussteifungslasten über die Lastsummen in der Gegenüberstellung mit den Vertikallasten nachvollziehbar.
- Die Auflagersteifigkeiten der einzelnen Bauteile werden bei Berechnungen in 2D Modellen meist über die hohen Steifigkeiten der direkt belasteten Bauteile definiert. In 3D Modellen werden die Auflagersteifigkeiten unter Berücksichtigung der Steifigkeiten aller Bauteile am Gesamtsystem ermittelt. Verformungen aus Lasten in einzelnen Bauteilen des 3D Modells führen zu Stützensenkungen in den Auflagern anderer Bauteile. Dieser Effekt wird verstärkt bei Vorhandensein von nicht grundfesten Stützen und Wänden, die Decken punktuell oder linear koppeln. Dadurch wird das Erkennen, wie die Verkehrslasten auf den einzelnen Teilflächen kombiniert werden müssen, um die maximalen Schnittgrößen zu ermitteln, meist unmöglich. Die Verkehrslasten auf den einzelnen Decken sollten, wie auch bei 2D Berechnungen, in mehrere Lastfälle mit Lasten auf nicht benachbarte Einzelfelder eingeteilt werden. In diesen Lastfällen sollten nur die Lasten einer Decke vorhanden sein, sodass alle Verkehrslasten frei kombiniert werden.
Bei einer großen Anzahl von Geschossen sollte man die Verkehrslastfälle von jedem 2. oder 3. Geschoss zusammenfassen, um nicht zu viele Lastfälle zu generieren. Damit würde man die schachbrettartige Kombination der Teillastflächen in der 3. Dimension fortführen.
- Das 3D Modell trägt die Lasten in der Regel als statisches System des fertiggestellten Gesamtbauwerkes ab. Alle Bauzustände, vor allem aber der Rückbau der Deckenabsteifungen, müssen darauf abgestimmt sein. Alle für den Abtrag der Lasten erforderlichen Teilsysteme müssen zum Zeitpunkt des Aufbringens der Lasten vorhanden und wirksam sein. Dies gilt vor allem für Bauteile, die hochgehängt werden und deren Lasten über darüber angeordnete Bauteile abgetragen werden, wie z.B. bei wandartigen Trägern über mehrere Geschosse. Kann dies nicht gewährleistet werden müssen Belastungen aus Bauzuständen an Teilsystemen berücksichtigt werden, die lokal zu höheren Belastungen an den Bauteilen führen können.

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

4 Plausibilisierung von software-gestützten Berechnungen insbesondere mittels 3D-Gesamtmodellen

Grundsätzlich sollte für die statische Berechnung nur gut erprobte Software eingesetzt werden. Dem Anwender müssen die Funktionsweise, die verwendeten Berechnungsgrundlagen sowie die Anwendungsgrenzen des Programmsystems bekannt sein, damit er die Software fehlerfrei bedienen kann.

Zur Erlangung des benötigten Hintergrundwissens empfiehlt sich neben der Erarbeitung der von den Herstellern zur Verfügung gestellten Programmdokumentation auch die Berechnung verschiedener Fallbeispiele. Hierbei helfen in der Regel die Softwarehersteller durch Anwenderschulungen bzw. Webinare.

Leistungsfähigkeit und Anwendungsgrenzen von Software können mittels Benchmark-Tests bestimmt werden. Hierzu steht dem Anwender eine Vielzahl von Beispielen in der Literatur bzw. in Foren zur Verfügung. Helfen können auch Online-Datenbanken, wie beispielsweise die Plattform Evadat (<https://www.evadat.com/>).

Neben der rein technisch richtigen Anwendung ist auch die ingenieurmäßige Modellierung der jeweiligen Problemstellung von immenser Bedeutung für das Resultat. Dies umfasst unter anderem die Auswahl der richtigen Tragelemente, die Definition von Knotenbedingungen (gelenkig oder biegesteif), sowie die zutreffende Berücksichtigung von Versätzen, Auflagerbedingungen und Steifigkeiten einzelner Elemente.

Das Resultat einer software-gestützten Berechnung ist zwingend durch eine erfahrene Ingenieurin oder einen erfahrenen Ingenieur zu überprüfen. Je komplexer das Berechnungsmodell ist, desto schwieriger gelingt eine Plausibilitätsprüfung außerhalb des Rechenmodells mit herkömmlichen Mitteln.

Die Lastangaben können mit Lastsummen in den Hauptkoordinatenrichtungen vergleichsweise einfach einer ersten Prüfung auf Plausibilität unterzogen werden. Hierzu sollten zur Vereinfachung einzelne Lastfälle mit charakteristischen Einwirkungsgrößen verwendet werden. Knoten und Lagerungsbedingungen können bei Stabtragwerken durch Identifikation von reinen zu erwartenden Zug- oder Druckstäben auf Momentenfreiheit überprüft werden. Auch können anhand erwartender Steifigkeiten Verformungsbilder sowie der Kräftefluss eines Systems auf ihre Plausibilität hin überprüft werden. Das Herauslösen von Teilsystemen (2D- oder 3D-Systeme) ist ein probates Mittel, um eine Überprüfung von Tragwerksreaktionen durchzuführen. Auch Handrechnungen mittels Tabellenwerken können zu Plausibilitätsprüfungen genutzt werden. Diese vereinfachten Modelle sollten in der Regel nur zur Plausibilitätsprüfung genutzt werden.

Ein scharfer Schnittgrößenvergleich von vereinfachten Modellen ist aufgrund der Komplexität von 3D-Berechnungen und deren Lastableitung oft nicht möglich und sollte nur bei berechtigten und nicht auszusräumenden Zweifeln zu einer beide Berechnungsmethoden abdeckenden Ausführungsplanung genutzt werden.

Ein weiteres Mittel zur Überprüfung ist die Verwendung der Darstellung der Verformungsfiguren bzw. Krümmungsfiguren des Gesamtsystems, um mögliche Modellierungsdefizite zu identifizieren. Somit können auch bei komplexen Systemen fehlerhafte Auflagerbedingungen erkannt werden.

In der Ausgabe der Schnittgrößen bzw. Spannungen sollte besonderes Augenmerk auf Spannungsspitzen bzw. Sprüngen in den Schnittgrößenverläufen gelegt werden.

Kapitel:	Plausibilisierung von software-gestützten Berechnungen insbesondere mittels 3D-Gesamtmodellen	Seite: 14/23
----------	---	--------------

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

Grundsätzlich sollte das verwendete Berechnungssystem hinsichtlich seiner Robustheit gegenüber geringfügigen Änderungen am System (Steifigkeiten, Ausmitten, Federsteifigkeiten in den Lagerungen) durch Parameterstudien verifiziert werden. Reagiert ein System auf geringfügige Veränderung vergleichsweise stark, ist das System nicht ausreichend resistent und muss hinsichtlich seiner Robustheit besser abgestimmt werden. Alternativ können ggf. auch Grenzwertbetrachtungen für unscharfe Eingangsparameter zielführend sein.

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

5 Anforderungen an eine prüffähige statische Berechnung

Folgende Inhalte sollten Bestandteil einer prüffähigen statischen Berechnung sein:

Das Bauvorhaben mit seinem Ziel / Zweck sollte ausreichend genau beschrieben werden. Das Gebäudemodell ist detailliert mit seiner Aussteifungsstruktur und seinen unterschiedlichen Tragelementen zu beschreiben. Durch den hohen Detaillierungsgrad und die räumliche Komplexität des Strukturmodells bedarf es einer sehr sorgfältigen Modellgenerierung und Strukturdarstellung sowie einer genauen Last- und Rechenlauferläuterung. Die Gesamtvorleistungen zur Strukturbeschreibung sind essenziell zum Verständnis des erdachten Tragwerkmodells. Die Lastableitung sollte zweifelsfrei und sicher in die Gründung / unterstützende Tragstruktur erfolgen. Steifigkeitsunterschiede sollten dabei begründet und realitätsnah erfolgen. Die Modellberechnung muss nachvollziehbar und vollständig sein. Die Dokumentation des Modells mit seinen Struktureingaben hat in grafischer sowie tabellarischer Form zu erfolgen. Es ist auf eine deutliche, leserliche und nachvollziehbare Art des Modells (ggf. von verschiedenen Blickrichtungen und -winkeln) zu achten.

Die vollständige Dokumentation des Modells, die Beschreibung der Annahmen und möglicher Vereinfachungen ist ausführlich zu erläutern und darzustellen. Die getroffenen Vereinfachungen sind ausreichend zu begründen und zu überprüfen. An dieser Stelle sind verschiedene Flächen- und Stabelemente, Lager- und Koppelbedingungen sowie vorhandene Steifigkeitsunterschiede aus Abmessungs-, Baustoff- und Materialunterschieden darzustellen und zu beschreiben. Eine Layer-Strukturierung und -ausgabe sollte u.a. nach Strukturart (Element oder Stab), Querschnitt, Material (Güte, Baustoff), Funktion (Nutzung, Bereich, Traggliedbedeutung etc.), Lage (Ebene, Geschoß, Position etc.) erfolgen. Die dargestellten Struktureinheiten sollten dabei über ein Bemaßungs-, Raster- und / oder Achsensystem noch der Gesamtstruktur zuzuordnen sein. Eine textliche Beschreibung einzelner Struktureinheiten kann dabei sehr sinnvoll sein.

Bedingt durch die große Komplexität der Strukturelemente, der Materialien und Abmessungen in verschiedenen Ebenen und Niveaus ist eine aufgelöste Darstellung einzelner Layer in einem ausreichend fein dargestellten System unabdingbar. Die System- und Strukturabmessungen, eine Bereichsbeschriftung sowie ein vorhandenes Achsenraster in Verbindung mit einem Nordpfeil erleichtern die Strukturdarstellung, -erfassung und Erläuterung enorm. Die farbliche Zuordnung von gleichen Strukturelementen und Bauteilen sowie die örtliche Erläuterung und Kommentierung von besonderen Modelleingaben, -angaben und -bedingungen erhöht die Verständlichkeit.

Die Herleitung der Lasten (mit Normenbezug bzw. Datenblättern für Geräte, evtl. Bezug von Lastübernahmen mit Verweis) hat eindeutig zu erfolgen. Eine Darstellung der Lastannahmen und Lastbezugsflächen, Parameter für die Lastannahmen, Zwischenrechnungen für die Lastermittlung, Ableitung und Zuweisung der Lasten zu den gewählten Lastfällen, die Bildung der Lastfallkombinationen und Implementierung ist ausführlich für die Nachvollziehbarkeit und Überprüfung aufzustellen, darzustellen und zu erläutern. Die Darstellung der Lasten hat wie beim Strukturmodell grafisch (Bild mit Lasten auf System ggf. aus verschiedenen Ansichten) und numerisch zu erfolgen. Die resultierenden Lastsummen sind überschlägig auf Richtigkeit je Lastfall zu überprüfen (Vergleich aufgebracht Lasten und Lagerreaktionen)

Die Grundlagen des Rechenlaufs sind zu benennen. Dabei sind die genutzten Rechen- und Theoriemodelle zu nennen und zu erläutern. Eventuelle Anwendungsgrenzen zum Strukturmodell, der Nutzung, die Benennung und Erläuterung von bestehenden Richtlinien und möglicher Verträglichkeitsgrenzen sind zu beschreiben und zu bewerten.

Die zuvor genannten Strukturbedingungen sind im Bereich von Bestandstragwerken in Bezug auf den Erhaltungszustand in Verbindung mit den getroffenen Annahmen und Anwendungsgrenzen abzugleichen, zu erläutern und ihre Anwendbarkeit aufzuzeigen.

Kapitel:	Anforderungen an eine prüffähige statische Berechnung	Seite: 16/23
----------	---	--------------

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

Gleiches gilt für den Bereich der temporären Bauzeitenfolge und seiner Auswirkung auf die Tragwerksstruktur mit seinen Ergebnissen von Spannungszuständen und Schnittgrößenverläufen (u.a. sind hier Verbindungsmittel-Nachgiebigkeiten, Bauabschnittsfugen, Erhärtungs- und Verfestigungs-zustände, Umlagerungsmöglichkeiten und ungewollte Kraftflüsse infolge von nicht erfassten Zuständen zu beurteilen. Neben Bauzuständen im Bereich des Neubaus bis zur Fertigstellung sind auch Bauzustände und Eingriffe in das ganzheitliche Tragwerksmodell von bereits bekannten zukünftigen Sanierungs-, Erhaltungs-, Umplanungs- und Änderungsmaßnahmen zu berücksichtigen.

Die Auswertung und Ergebnisdarstellung von Schnittgrößen, Lagerreaktionen und Verformungen sollte pro Lastfall sowie Lastfallkombinationen getrennt erfolgen. Die Ausgabedarstellung sollte wie im Fall der Strukturelemente über einzeln anzusteuernende Ausgabe-Layer erfolgen. Bei der Plausibilität des Tragwerkes mit den ermittelten Verformungen sind grafische Verformungsfiguren eine hilfreiche Darstellungsmöglichkeit. Bei Flächenelementen sind Isolinien-Ausdrucke mit Extremal-Werten numerischen Plots zu bevorzugen. Feinstrukturierte Linienlager sollten nach Möglichkeit auf lineare Linienlasten ausgegeben werden. Für Teil-Strukturen können lokale numerische Plots im Einzelfall sinnvoll erscheinen.

Die Ergebnisdarstellung mit ihrer Einhaltung von normativen Nachweisen, Vorgaben, Richtlinien und besonderen Vereinbarungen ist einheitlich, leicht nachvollziehbar, übersichtlich darzustellen. Eine verbindliche Materialwahl oder eine Bestätigung der gewählten Querschnitte und-Baustoffauswahlen sollte am Ende der Nachweise erfolgen.

Die gesamte Dokumentation hat in deutscher Sprache zu erfolgen ggf. ist eine Übersetzung dem Dokument beizufügen.

Zweidimensionale Ausdrucke sind nach Möglichkeit maßstäblich auf den üblichen Papier- und Maßstabsformaten darzustellen. Eine ausreichende Kopierfähigkeit (genügender Kontrast) und Leserlichkeit (ausreichende Schriftgröße und textliche Erkennbarkeit) wird vorausgesetzt.

6 Beispiele

6.1 Beispiel 1 - Holzbau

Am Beispiel eines Kletterturms soll dargelegt werden, dass eine in 3D berechnete und auch berechenbare Konstruktion in der Umsetzung scheitern kann.



Abbildung 6-1 Kletterturm im fertigen Zustand



Abbildung 6-2 Tragstruktur ohne Bekleidung



Abbildung 6-3 Detailansicht eines Knotenpunktes

- Das System ist in seiner Tragwirkung nicht mehr nachvollziehbar. Man muss auf die Richtigkeit der Berechnungsergebnisse vertrauen.
- Es ist nicht möglich, zu erkennen, ob ein Stab eher „wichtig“ oder eher „unwichtig“ für die Standsicherheit ist.
- Es gibt keine gleichen Knotenpunkte. Eine Zusammenfassung in ähnliche Gruppen ist kaum möglich. Der Versuch, tatsächlich alle Knotenpunkte nachzuweisen, muss scheitern
- Die Verschneidungen sind zum Teil sehr schwer zu realisieren. Dementsprechend sind auch die Detailnachweise nur sehr schwer zu führen.

6.2 Beispiel 2 – Wandartige Träger

Bei der Berechnung von Wandartigen Trägern ist zu beachten, dass diese ihr typisches Tragverhalten erst mit Eintritt in den Zustand II (gerissener Zustand) zeigen. Die in dieser Phase entscheidende Bewehrung muss daher zur Begrenzung der Verformungen und Erlangung eines sicheren Abtragungsverhalten wie hinlänglich bekannt entsprechend den sich einstellenden Hauptzugzonen verteilt und eingelegt werden.

Wandartige Träger werden in 3D-Gesamtmodellen zumeist in Form von Scheiben und Faltwerken abgebildet. Die meist lineare-elastische Spannungsermittlung ohne Berücksichtigung von Rissbildung führt zu einer in dem Bauteil linearen Spannungsverteilung die eine direkte Ermittlung der Bewehrung zwar ermöglicht, allerdings nicht die in dem Zustand II benötigte konzentrierte Bewehrungsverteilung (Ungültigkeit der Bernoulli-Hypothese) darstellt.

Daher ist es bei Stahlbeton-Trägern für die software-gestützten Bemessung von zentraler Bedeutung zu erkennen, wann es sich um Balken und wann um einen wandartigen Träger handelt (Abgrenzungskriterium) und diese dann entsprechend in einer Nachlaufrechnung mittels passender Fachwerkanalogien zu bemessen. Hierbei können die Trajektorienverläufe aus der linear-elastischen 3D-FE-Berechnung zur Findung der richtigen Fachwerkmodelle hilfreich sein.

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

6.3 Beispiel 3 – Knotendetails im Stahlbau

Berechnungen an komplexen Stahlbaumodellen bedürfen einer möglichst genauen Abbildung der Knotenbedingungen, da diese durch die übertragbaren Schnittgrößen sowie ihre Steifigkeit den Lastabtrag im Gesamtmodell stark beeinflussen können.

Werden an einem Stahlbauknoten mehrere Profile verbunden, so erfolgt dies im 3D-Gesamtmodell häufig idealisiert, ohne die Berücksichtigung von geometrischen Versätzen der einzelnen Profile. Die Zulässigkeit dieser Annahme ist in der späteren Detailplanung dahingehend zu überprüfen, ob diese Knoten tatsächlich annähernd versatzfrei ausgebildet werden können, oder ob es zu nennenswerten Ausmitten in dem Verbindungsknoten kommt. Sollten sich gegenüber der statischen Berechnung am Gesamtmodell in der Detailstatik große Unterschiede in den Knotenausmitten bestehen, dann muss mitunter eine Rückspiegelung der Knotenausmitten auf das Gesamtmodell erfolgen.

Für eine größtmögliche Planungssicherheit sollte vermieden werden, dass im Zuge der Detailplanung eine Änderung der Knotenausbildung erforderlich wird. Erreichen lässt sich dies in der Regel durch eine robuste und mit Reserven versehene Globalstatik am Gesamtsystem. Ausnutzungen der Stahlbauprofile sollten in den Knotenpunkten daher bei komplizierten Systemen und Bauteilen möglichst gering (ca. 70%) gehalten werden, um ausreichende Reserven für die in der Regel nachgelagerte Detailstatik vorzuhalten.

6.4 Beispiel 4 – Bauzustände

Bei der Berechnung an 3D-Gesamtmodellen wird häufig nur ein Modell für den Endzustand betrachtet, in dem alle Tragglieder bereits errichtet sind, und auf welches alle Lasten gleichzeitig aufgebracht werden.

Auf diese Weise wird jedoch die unter Umstände maßgebliche Belastungsgeschichte des Bauwerks vernachlässigt.

So entstehen für einzelne Tragglieder in den Bauzuständen oftmals deutlich ungünstigere statische Systeme als im Endzustand, die bei der Bemessung dieser Tragglieder berücksichtigt werden müssen.

Die in den Bauzuständen auftretenden Konfigurationen bedingen ggf. auch, dass während des Bauablaufs bereits wirksame Lasten (z.B. aus Eigengewicht der Bauteile) zu eingprägten Verzerrungszuständen führen, sodass sich auch im Endzustand bei Berücksichtigung der Belastungsgeschichte andere Belastungszustände ergeben als am 3D-Gesamtmodell.

Die Größe des Einflusses der Belastungsgeschichte ist bauwerksspezifisch und stark unterschiedlich ausgeprägt. Es ist daher in jedem Fall ingenieurmäßig zu bewerten, ob die alleinige Betrachtung des Endzustandes am 3D-Gesamtmodell zu vertretbaren Fehlern führt, oder ob maßgeblich Bauzustände über zusätzliche Betrachtungen mit in die Berechnung einbezogen werden müssen.

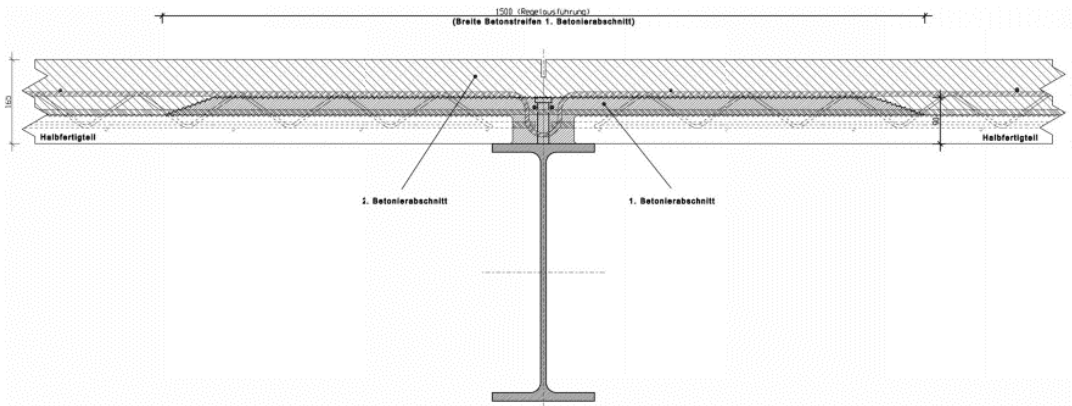


Abbildung 6-4 Verbundträger mit schrittweiser Betonage

Ein Beispiel für die Notwendigkeit der Betrachtung von Bauzuständen ist hier an einem Verbundträger mit nachträglicher Betonage (in zwei Schrittfolgen) abgebildet. Hier wurden in einem ersten Schritt nach der Verlegung der Stahlträger Halbfertigteile verlegt, der unmittelbare Obergurtbereich zur Schaffung eines Verbundträgers vorbetoniert und in einem letzten Betonageschritt die Decke fertiggestellt. Während eine Berechnung am 3D-Gesamtmodell für die Nachweise des Endzustand ausreichend erscheint, sind in diesem Fall noch wesentliche Nachweise zusätzlich für die Bauzustände in den einzelnen Montage- und Herstellphasen maßgebend und zu erbringen.

6.5 Beispiel 5 – Nachgiebigkeit von aussteifenden Wandscheiben

Ein statisch unbestimmtes Aussteifungssystem eines Gebäudes wird am 3-D-Gesamtmodell berechnet. In eine der Wände wird im EG nachträglich eine Türöffnung eingefügt. Wie man an dem rechten Bild erkennt, ändert sich das Verformungsverhalten der Wand deutlich. Da bei einem statisch unbestimmten System die Ergebnisse von den Steifigkeiten (und damit den Verformungen) abhängt, ist die Aussteifungsberechnung des Gesamtsystems erneut durchzuführen. Im vorliegenden Fall ändert sich die Verschiebung oberhalb der Öffnung von 0,5 mm zu 1,6 mm, d.h. um den Faktor 3,2!

Hieraus ergibt sich eine veränderte Verteilung der H-Lasten auf die aussteifenden Wände und damit auch eine veränderte einwirkungsseitige Bemessungsgrundlage der betroffenen Wände.

	Leitfaden zur Aufstellung prüffähiger statischer Berechnungen am 3D-Gesamtmodell	Herausgegeben am 27.03.2024
		Revision
		VPI 01

7 Weiterführende Literatur

- [L1] Rombach, G.: Anwendung der Finite-Elemente-Methode im Betonbau: Fehlerquellen und ihre Vermeidung, Verlag: Ernst & Sohn. 2. überarbeitete Auflage 2006, 336 Seiten
- [L2] Rombach, G.: Probleme bei der Berechnung von Stahlbetonkonstruktionen mittels dreidimensionalen Gesamtmodellen, Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 4
- [L3] Hartmann, F.;Katz, C.: Statik mit finiten Elementen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002
- [L4] Volker Gensichen Prof. Dr.-Ing., Günter Lumpe Prof. Dr.-Ing.: Zur Leistungsfähigkeit, korrekten Anwendung und Kontrolle von EDV-Programmen für die Berechnung räumlicher Stabwerke im Stahlbau (Teil 1-3), Der Stahlbau 2008, Ausgabe 6,7 u. 8
- [L5] Rombach G.: Die Prüfung der Standsicherheit am ganzheitlichen Gebäudemodell, Der Prüferingenieur, Oktober 2008
- [L6] Bischoff M.: Computerstatik und Tragwerksmodellierung - Vorschläge und Impulse für eine moderne universitäre Baustatiklehre, Der Prüferingenieur, Mai 2015
- [L7] Bischoff M.: Statik am Gesamtmodell: Modellierung, Berechnung und Kontrolle, Der Prüferingenieur April 2010
- [L8] A. F. Hobbacher, International Institute of Welding (IIW), Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, Springer Verlag