

Ingenieurtheoretische Probleme bei der Projektierung von Spezialbauwerken

E. Hampe

Im Zusammenhang mit der Industrialisierung des Bauwesens konnten bedeutende Fortschritte in der Rationalisierung der Projektierungsprozesse für Standardbauwerke des Wohnungs-, Hoch- und Industriebaus erreicht werden. Kataloge, Rechenprogramme, fotomechanische und andere Projektierungshilfsmittel erleichtern und beschleunigen die Projektierungsarbeit und sichern den rationellen Einsatz von Arbeitszeit, Arbeitsmitteln und Baustoffen. Der damit verbundenen Gefahr einer Beeinträchtigung des kreativen Handelns beim Projektieren und der Stagnation der technischen Entwicklung bzw. der Entwicklung der Gebrauchswerte wird entgegen gewirkt, wenn auch nicht immer mit vollem Erfolg.

Im Gegensatz zur Situation auf diesen Standardgebieten des Bauwesens ist die Projektierung von Spezialbauwerken weit mehr individueller Entwurfs- und Entscheidungsprozeß. Dieser Prozeß ist stark vom Wissen und Können und auch vom persönlichen Mut und vom Verantwortungsgefühl des Spezialprojektanten abhängig.

Da die Spezialbauwerke quantitativ nur einen geringen Anteil der Bauproduktion darstellen, waren und sind sie weit weniger Gegenstand zentraler Aufmerksamkeit und zentraler Bemühungen um die Sicherung technisch-wissenschaftlichen Höchststandes durch das Projekt. Diese Aufgabe verblieb im Verantwortungsbereich der mehr oder weniger konkret beauftragten Spezialprojektanten bzw. Erzeugnisverantwortlichkeiten. Die Wahrnehmung dieser Verantwortung entscheidet über die Qualität der Spezialbauwerke. Diese Qualität wurde und wird bestimmt durch:

- die funktionsgerechte Gestaltung der Spezialbauwerke
- die wirklichkeitsgerechte Erfassung der Einwirkung auf die Spezialbauwerke
- die Gewährleistung der Tragsicherheit und Zuverlässigkeit der Spezialbauwerke unter extremen Einwirkungen und
- die Möglichkeit der Abschätzung von Risiken, die bei Ausfall des Spezialbauwerkes für das übergeordnete volkswirtschaftliche Versorgungssystem oder auch für das Leben und die Gesundheit der Menschen entstehen können.

Für die Projektierung solcher Spezialbauwerke ist es deshalb erforderlich, zusätzlich zur Sicherung des allgemeinen technischen Niveaus im Bauwesen folgende Problemkreise zu beherrschen:

- Zuverlässigkeitsbetrachtungen hinsichtlich der Erfüllung der nutzertechnologischen Funktion im Betriebs- und im Havariezustand
- Sicherheitsbetrachtungen hinsichtlich der Erfüllung der Tragfunktion unter Einhaltung vorgegebener Risikogrenzen.

Im vorliegenden Beitrag werden ingenieurtechnische Probleme diskutiert, die sich aus den Anforderungen zur Erfüllung der Tragfunktion ergeben.

1. Volkswirtschaftliche Bedeutung der Spezialbauwerke

Die weitere Entwicklung der Spezialbauwerke ist – wie die Entwicklung des gesamten Bauwesens – u. a. durch folgende Merkmale geprägt:

- zunehmende gesellschaftliche Verantwortung für die Sicherung der materiell-technischen Basis der Volkswirtschaft
- Reduzierung des gesellschaftlichen Aufwandes bei optimaler Sicherung der geforderten Funktion
- Sicherung des technisch-wissenschaftlichen Fortschrittes als Basis für die Erfüllung wachsender funktioneller, ökonomischer und umweltbedingter Forderungen und von Anforderungen aus dem Anlagenexport
- Sicherung bzw. Erhaltung der Umweltqualität.

Diese Forderungen wirken sich für Spezialbauwerke insofern besonders aus,

- weil Spezialbauwerke nicht nur schlechthin Bauwerke sind, sondern in der Regel unmittelbar an der Erfüllung spezieller nutzertechnologischer Funktionen beteiligt sind,
- weil funktionelles oder bautechnisches Versagen von Spezialbauwerken in der Regel nicht nur zum Ausfall des jeweiligen Bauwerkes führen, sondern den Ausfall des übergeordneten Systems nach sich zieht,
- weil Spezialbauwerke in der Regel Einwirkungen unterliegen, deren Erfassung spezielle Kenntnisse und Fähigkeiten des Projektanten erforderlich macht,
- weil die Vorschriftensituation auch im internationalen Vergleich dem Projektanten kein ausreichendes und oft auch kein zuverlässiges Werkzeug zur Lösung seiner Probleme bereitstellt.
- weil Spezialbauwerke in der Regel infolge ihrer Abmessungen besondere Probleme hinsichtlich der Einordnung in die natürliche und gebaute Umwelt aufwerfen.

Im Zusammenhang mit ausgewählten ingenieurtheoretischen Problemen, die sich für den Projektanten von Spezialbauwerken ergeben, werden einige Aspekte der gegenwärtigen Situation dargestellt. Dies erscheint auch deshalb erforderlich, weil zur Lösung dieser Probleme erhebliche Mittel im Rahmen zentraler und dezentraler Forschungsaufgaben bereitgestellt und verbraucht werden, die ohne eine klare Orientierung und Abstimmung nicht den gewünschten Effekt bringen.

2. Ausgewählte ingenieurtheoretische Probleme

Vergleicht man die Spezialbauwerke der verschiedenen Volkswirtschaftszweige bzw. Versorgungssysteme, so sieht man sich zunächst einer Fülle von Bauwerken, Bauwerksformen, Bauwerksaufgaben und Bauwerkseinwirkungen gegenüber. Die isolierte Behandlung der daraus abzuleitenden Aufgaben der Bauwerksberechnung führt zu einer Zersplitterung vorhandener Kapazitäten, zu ungenügendem Tempo bei der Lösung von Problemen und zu einem nicht vertretbarem Aufwand. Dies verstößt gegen die Notwendigkeiten und Möglichkeiten einer wirksamen Gesamtstrategie, die eine multivalente Nutzung von Forschungsergebnissen und eine wirkungsvolle Überführung solcher Ergebnisse im Projektierungsprozeß zu sichern hat. Analysiert man die spezifischen Bedingungen der verschiedenen Spezialbauwerke, so lassen sich die wichtigsten Probleme der Berechnung von Spezialbauwerken auf wenige Problemkreise zurückführen. Einige davon werden nachfolgend diskutiert.

2.1. Erfassung der Einwirkungen auf Spezialbauwerke

Es ist zwischen den Einwirkungen zu unterscheiden, die aus der Erfüllung der vorgesehenen Funktion des Spezialbauwerkes resultieren und denen, die sich aus Havariebedingungen ergeben. Die speziellen Einwirkungen aus der vorgesehenen Funktion sind vor allem:

- stationäre Temperatureinwirkungen
- instationäre Temperatureinwirkungen
- dynamische Einwirkungen aus kontinuierlichen dynamischen Vorgängen
- dynamische Einwirkungen aus diskontinuierlichen dynamischen Vorgängen bekannten Ablaufes
- dynamische Einwirkungen aus Vorgängen mit nicht exakt voraussagbarem Verlauf und nicht voraussagbarer Größe der Einwirkungen.

Beispiele für diese Einwirkungen sind:

- *Temperatureinwirkungen*
 - für Behälter
 - extreme Temperaturen der Flüssigkeiten
 - tages- und jahreszeitlich bedingte klimatische Temperatureinwirkungen
 - Temperatureinwirkungen aus Bränden bei brennbaren Flüssigkeiten (risikoabhängig)
 - für Silos
 - Temperatureinwirkungen aus heißem Füllgut mit zeitlich-räumlicher Veränderlichkeit
 - für Schornsteine
 - Temperatureinwirkungen aus Rauchgas mit Veränderlichkeit in Abhängigkeit vom Kraftwerksbetrieb
 - für KKW-typische Bauwerke
 - Temperatureinwirkungen aus Havariebedingungen
- *Dynamische Einwirkungen*
 - Behälter für gefährliche Flüssigkeiten
 - Erdbebenwirkungen (standortabhängig)
 - Explosionsdruck (risikoabhängig)
 - Silobauwerke

- Dynamische Brückenbildung beim Entleeren von Silozellen
- Kühltürme
 - Windeinwirkungen mit böenartiger zeitlich-räumlicher Veränderlichkeit des Winddruckes
 - Erdbebenwirkungen (standortabhängig)
- Schornsteine
 - Schwingungserscheinungen aus Karmanwirbelablösungen
 - Erdbebenwirkungen (standortabhängig)
- KKW-typische Bauwerke
 - Erdbebenwirkungen (standortabhängig)
 - Prallstoß, Druckwelle (risikoabhängig)

Ein Überblick über die Bedeutung der Einwirkungen für ausgewählte Spezialbauwerke ist in Tabelle 1 gegeben. Eine Bewertung des derzeit in der DDR erreichten Standes anhand des internationalen Höchststandes enthält Tabelle 2.

2.2. Erfassung des Tragverhaltens von Spezialbauwerken

Die Besonderheiten der Einwirkungen auf Spezialbauwerke haben Auswirkungen auf Art und Umfang der Nachweise zur Tragsicherheit der Spezialbauwerke. Die Kriterien zur Einschätzung und Bewertung der Tragsicherheit erweitern sich.

Die klassischen Nachweise der Einhaltung von Grenzspannungen, Grenzfestigkeiten und Grenzformänderungen sind der Spezifik der Einwirkung anzupassen. Darüber hinaus erlangen weitere Nachweise erhöhte Bedeutung.

Zu ausgewählten Problemkreisen wird eine Charakterisierung vorgenommen:

– *Tragverhalten temperaturbeanspruchter Bauwerke*

Bei gegebener Temperatureinwirkung ist der Temperaturverlauf im Bauwerk i. a. genügend genau erfassbar. Hilfsmittel zur Berechnung des räumlich-zeitlichen Temperaturverlaufs stehen zur Verfügung, wenn sie auch dem Projektanten nicht immer genügend vertraut sind.

Die Überführung dieser Temperaturverläufe in Spannungen und Formänderungen des Tragwerkes ist vor allem für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetontragwerke problematisch. Ungenügende Kenntnisse über die Wechselwirkung zwischen Rißbildung und Temperaturbeanspruchung führen zur Überschätzung von Temperaturschnittkräften und auch zu Unterschätzungen von Temperaturformänderungen. Möglichkeiten zum ökonomischen Einsatz der Baustoffe werden nicht immer voll ausgeschöpft. Vorhandene, aber nicht genügend aufbereitete wissenschaftliche Erkenntnisse sind dem Projektanten nicht so geläufig, daß er die oft durch allgemeine Vorschriftenregelungen gezogenen Grenzen im Sinne einer technisch richtigen und ökonomisch optimalen Entscheidung überschreiten kann. Dies trifft vor allem auf die Flächentragwerke zu, die Haupttragelemente der Spezialbauwerke sind.

Eine Reihe von Problemen für solche Tragwerkselemente sind noch in der Diskussion und bedürfen noch einer für die Praxis nutzbaren Aufbereitung. Dazu gehören:

Tabelle 1

Überblick über die Bedeutung spezieller Einwirkungen für ausgewählte Spezialbauwerke

Spezialbauwerk	Temperatureinwirkungen				Dynamische Einwirkungen		
	naturbedingt	funktionsbedingt	havariebedingt	naturbedingt	funktionsbedingt	havariebedingt	
Großbehälter Durchmesser über 40 m Höhen über 15 m	<ul style="list-style-type: none"> • standortabhängig 	<ul style="list-style-type: none"> • füllgutabhängig 	<ul style="list-style-type: none"> • abhängig vom Risikopotential bei flüssigen Energieträgern 			<ul style="list-style-type: none"> • Explosionswirkungen (füllgutabhängig und standortabhängig) 	
Silos Durchmesser über 15 m Höhen über 60 m	<ul style="list-style-type: none"> • in Wechselwirkung mit Behinderung der Temperaturverformung durch das Silogut 	<ul style="list-style-type: none"> • silogutabhängig (vor allem für Zementklinker) 			<ul style="list-style-type: none"> • betriebsabhängig (Entleerungs- und Umlagerungsvorgänge) • silogutabhängig (Brückenbildung und -einstürze) 		
Großschornsteine Höhen über 200 m		<ul style="list-style-type: none"> • Rauchgase mit betriebsbedingtem instationärem Temperaturverlauf 		<ul style="list-style-type: none"> • Windeinwirkungen mit Höhenveränderlichkeit • Erdbebenwirkungen (standortabhängig) 			
Großkühltürme Höhen über 120 m	<ul style="list-style-type: none"> • standortbedingt 			<ul style="list-style-type: none"> • Windeinwirkungen mit zeitlich-räumlicher Veränderung • Erdbebenwirkungen (standortabhängig) 			
Kernkraftwerke – typische Bauwerke			<ul style="list-style-type: none"> • abhängig vom Risikopotential 	<ul style="list-style-type: none"> • Erdbebenwirkungen (standort- und risikopotentialabhängig) 		<ul style="list-style-type: none"> • Explosionswirkungen • Prallstöße (standort- und risikopotentialabhängig) 	

Bewertung des in der DDR erreichten Standes in der Erfassung von speziellen Einwirkungen im Vergleich zum internationalen Höchststand	
Spezielle Einwirkung	<ul style="list-style-type: none"> • Produktive Mitwirkung bei der Lösung von Problemen • Rezeptive Verarbeitung des internationalen Höchststandes
	<p>Problemkreis: Temperatureinwirkungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • naturbedingte Temperatureinwirkungen <ul style="list-style-type: none"> • Messungen an Behältern zur Feststellung lager- und jahreszeitlicher Temperaturschwankungen • Messungen von Temperaturverteilungen an Behältern bei Feuereinwirkung • funktionsbedingte Temperatureinwirkungen <ul style="list-style-type: none"> • Rauchgas- und Bauwerksmessungen an Großschornsteinen mit durchgehendem Stahlbetonfutter • havariebedingte Temperatureinwirkungen <ul style="list-style-type: none"> • Messungen am Großmodell von Sicherheitsbehältern für Kernkraftwerke
	<p>Problemkreis: Dynamische Einwirkungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • naturbedingte dynamische Einwirkungen <ul style="list-style-type: none"> • Windkanalmessungen zur Windbelastung von Großkühltürmen • Entwicklung von objektgebundenen Festlegungen zu Größe und Verlauf von Windwirkungen • funktionsbedingte dynamische Einwirkungen <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung von silogutabhängigen Festlegungen zu dynamischen Silodrücken • havariebedingte dynamische Einwirkungen <ul style="list-style-type: none"> • Stoßversuche zur Ermittlung von Impulswirkungen • Parameterstudien für unterschiedliche Impulsverläufe
	<ul style="list-style-type: none"> • objektorientierte Auswertung internationaler Spezialliteratur • problemorientierte Auswertung internationaler Spezialliteratur zu Erdbebeneinwirkungen • bauwerksorientierte Auswertung internationaler Spezialliteratur und Vorschriften zur Erfassung von Windeinwirkungen • bauwerksorientierte Auswertung internationaler Spezialliteratur zu dynamischen Silodrücken • objektorientierte Überführung von internationalen Untersuchungsergebnissen und Vorschriftenregelungen

- das Verhalten temperaturbeanspruchter Bauwerke unter zeitlich-räumlich instationären Temperatureinwirkungen
- die Kombination von Temperatur- und Lasteinwirkungen unter Berücksichtigung der durch Rißbildung veränderten Steifigkeiten
- die Berücksichtigung zeitabhängiger und temperaturabhängiger Baustoffeigenschaften und die Auswirkung ihrer Veränderungen auf das Tragverhalten der Tragwerke
- die Umlagerungen von Spannungen und Schnittkräften infolge temperatur- und lastabhängiger Rißbildung in zweidimensionalen Tragwerken
- der Einfluß von Steifigkeitsänderungen durch Temperatureinwirkungen auf das Stabilitätsverhalten und das dynamische Verhalten von Spezialbauwerken.

Nicht unerhebliche Schäden bei temperaturbeanspruchten Bauwerken zeigen Konsequenzen aus Nichterkennen oder Nichtberücksichtigen der vorhandenen Probleme.

– *Dynamisches Verhalten von Spezialbauwerken*

Die zunehmende Bedeutung dynamischer Untersuchungen von Spezialbauwerken ist einerseits auf die infolge größerer Schlankheiten erhöhte dynamische Empfindlichkeit, andererseits auf die bei Bauwerken erhöhten Risikopotentials zu berücksichtigenden Einwirkungen zurückzuführen.

Schornsteine mit 300 m Höhe, Kühltürme mit 150 m Höhe sind Windwirkungen ausgesetzt, die nicht mehr durch statische Ersatzlasten berücksichtigt werden können. Turmtragwerke großer Höhe mit hohen Kopflasten, hohe Silozellen mit starken Massekonzentrationen aus dem Silogut, KKW-typische Bauwerke mit erhöhtem Risikopotential, Großbehälter für gefährliche Flüssigkeiten lassen eine vereinfachte quasistatische Erfassung von standortbedingten Erdbebenwirkungen nicht mehr zu.

Folgende Feststellungen können getroffen werden:

- Dynamische Untersuchungen von Spezialbauwerken sind vor allem für Bauwerke mit hohem Risikopotential und großen Abmessungen erforderlich.
- Dynamische Untersuchungen von Spezialbauwerken erfordern eine sorgfältige Modellbildung zur Erfassung der Einwirkungen und zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens des Bauwerkes.
- Für die praktische Berechnung sind durch Grundlagenuntersuchungen und Parameterstudien Bewertungsmöglichkeiten zur Aussagekraft und zu den Grenzen vereinfachter Berechnungsverfahren zu schaffen, die dem Projektanten eine sichere Aussage bei zumutbarem Aufwand gestattet.
- Der Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Baugrund ist auch bei dynamischen Untersuchungen besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Dabei sind die dynamischen Charakteristiken des Baugrundes wirklichkeitsnah zu berücksichtigen oder durch Vergleichsuntersuchungen abzuschätzen.
- Bei den dynamischen Untersuchungen sind die tatsächlich vorhandenen bzw. zu erwartenden geometrisch-stofflichen Eigenschaften des Bauwerkes und ihre möglichen zeitabhängigen, temperaturabhängigen oder rißabhängigen Veränderungen zu berücksichtigen.

– *Stabilitätsverhalten von Spezialbauwerken*

Die Zunahme der Hauptgeometrie einiger Spezialbauwerke und die relative Abnahme ihrer Querschnittsabmessungen sind Merkmale technisch-wissenschaftlichen Fortschrittes. Die erreichten Werte haben für einige der Bauwerke das Stabilitätsverhalten zum wichtigsten Kriterium der Tragsicherheit gemacht. Dazu gehören vor allem Großkühltürme, aber auch die unteren Bereiche von Großschornsteinen, die Wand- und Dachbereiche von Großbehältern, die Wandbereiche von hohen Silos. Der große Einfluß, den die Herstellungsgenauigkeit auf das Beulverhalten von solchen Tragwerken haben kann, verbindet diesen Problemkreis besonders eng mit den Möglichkeiten und Besonderheiten der Herstellungsverfahren. Annahme idealer Geometriewerte, Vereinfachungen der Baustoffkennwerte und der Größe und Verteilung der Einwirkungen führten zu erheblichen Diskrepanzen zwischen Ergebnissen von Beulberechnungen und dem wirklichen Beulverhalten. Sie waren Ursache für spektakuläre Einstürze.

Folgende Feststellungen können getroffen werden:

- Stabilitätsberechnungen von Spezialbauwerken setzen eine wirklichkeitsnahe Erfassung der Größe und Verteilung der Einwirkungen voraus. Für Havarieeinwirkungen ist dies nur mit Wahrnehmung eines großen Ermessensspielraumes durch den Projektanten und unter Stützung auf internationale Erfahrungen möglich. Als Beispiel sei das Überstreichen einer Druckwelle über ein Behälterdach genannt.
- Einige Einwirkungen sind durch Eigenschaften des Bauwerkes selbst stark beeinflusst. Dazu gehört die Abhängigkeit des Winddruckes und der Winddruckverteilung von der Bauwerksform und die abschirmende oder verstärkende Wirkung der Umgebungsbebauung auf Wind- oder Explosionsdruckgröße und -verteilung. Den Unregelmäßigkeiten der Druckverteilungen ist besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Die Annahme rotationssymmetrischer Verteilung kann zu gefährlichen Trugschlüssen führen.
- Bei den Stabilitätsuntersuchungen von Spezialbauwerken sind die zu erwartenden geometrischen Imperfektionen sorgfältig abzuschätzen. Vernachlässigung von Imperfektionen bei Stabilitätsuntersuchungen führt zu gefährlichen Überschätzungen der Beulsicherheit und gefährdet die Standsicherheit des Bauwerkes.
- Bei Stabilitätsuntersuchungen von Stahlbeton- und Spannbetonbauwerken sind die Steifigkeitsreduzierungen durch Rißbildung aus Last- und Zwangsbeanspruchungen zu berücksichtigen. Vernachlässigungen dieser Steifigkeitsreduzierungen führen zu gefährlichen Überschätzungen der Beulsicherheit.
- Umlagerungen von Schnittkräften und Spannungen im Bauwerk durch Veränderungen der Steifigkeiten oder aus der Wechselwirkung zwischen Bauwerk und Baugrund sind zu beachten bzw. abzuschätzen.
- Für Einwirkungen wie Druckwellen, Prallstöße, Erdbeben u. a. ist auch beim Stabilitätsnachweis der dynamische Charakter der Einwirkungen zu beachten.

Bewertung des in der DDR erreichten Standes in der Erfassung des Tragverhaltens von ausgewählten Spezialbauwerken		
Problemkreis	Produktive Mitwirkung bei der Lösung von Problemen	Rezeptive Verarbeitung des internationalen Höchststandes
<ul style="list-style-type: none"> Erfassung des Tragverhaltens unter Temperatureinwirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> Entwicklung von Rechenhilfsmitteln zur Ermittlung der Temperaturbeanspruchung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Entwicklung von Grundlagen zur Berücksichtigung stochastischer Betonzugfestigkeiten bei Ermittlung des Rißeinflusses auf das Temperaturverhalten Entwicklung von Hilfsmitteln zur Ermittlung betriebsabhängiger instationärer Temperaturbeanspruchungen 	<ul style="list-style-type: none"> Problemorientierte Auswertung und Nutzung der Spezialliteratur zum Temperaturverhalten von Behältern, Silos, Schornsteinen und KKW-typischen Bauwerken
<ul style="list-style-type: none"> Erfassung des dynamischen Verhaltens 	<ul style="list-style-type: none"> Modellentwicklung zur Erdbebenberechnung von Spezialbauwerken Parameterstudien zum Studium des Einflusses von Last- und Geometrievariationen auf das dynamische Verhalten von Spezialbauwerken Vorbereitung zur stochastischen Erfassung von Erdbeben- und Windwirkungen auf ausgewählte Spezialbauwerke Entwicklung von Rechenhilfsmitteln 	<ul style="list-style-type: none"> Bauwerksorientierte Auswertung und Nutzung der Spezialliteratur zum Tragverhalten von Kühltürmen unter Windeinwirkungen Problemorientierte Auswertung und Nutzung der Spezialliteratur und der internationalen Vorschriften zum Tragverhalten von Spezialbauwerken unter Erdbebenwirkung
<ul style="list-style-type: none"> Erfassung des Stabilitätsverhaltens 	<ul style="list-style-type: none"> Bauwerksorientierte Modelluntersuchungen 	<ul style="list-style-type: none"> Tragwerksorientierte Auswertung und Nutzung internationaler Spezialliteratur und Vorschriftenregelungen zum Stabilitätsverhalten von Schalentragwerken

Tabelle 4

Klassifikation von Vorschriften		
Vorschriftenklasse	Charakteristiken	Bemerkungen
Basisvorschriften	<ul style="list-style-type: none"> Erfassung relativ gesicherter Sachverhalte wie <ul style="list-style-type: none"> Baustoffkennwerte Standardlastannahmen bauweisspezifische Berechnungsgrundlagen Nachweis- und Bemessungsvorschriften für Standardtragwerke und Tragwerkselemente 	<ul style="list-style-type: none"> i. a. verbindliche Vorschriften längere Gültigkeitsdauer Verallgemeinerung von gesicherten Einzelerkenntnissen und -erfahrungen
Problemorientierte Vorschriften	<ul style="list-style-type: none"> Erfassung von anspruchsvollen Sachverhalten Empfehlungen zur Erfassung spezieller Einwirkungen Empfehlungen zur Erfassung spezieller Komponenten des Tragverhaltens 	<ul style="list-style-type: none"> oft nur orientierende Empfehlungen nur parallel mit den international zunehmenden Erkenntnissen aus Versuchen und theoretischen Untersuchungen zu nutzen
Bauwerksorientierte Vorschriften	<ul style="list-style-type: none"> Erfassung der nutzertechnologischen Besonderheiten der Spezialbauwerke Empfehlungen zur Erfassung des Tragverhaltens der Spezialbauwerke Empfehlungen zur Erfassung der speziellen Einwirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> Gültigkeitsdauer kann durch neue Erkenntnisse und Erfahrungen begrenzt sein

Ein Überblick und eine Bewertung ausgewählter Problemkreise zur Erfassung des Tragverhaltens von Spezialbauwerken ist in Tabelle 4 gegeben.

3. Welche Hilfe geben Vorschriften dem Projektanten von Spezialbauwerken?

Konzentriert man sich auf die ingenieurtheoretische Seite der Projektierung von Spezialbauwerken, so kommt man bei der Beantwortung dieser Frage zu folgender Feststellung:

Für die Projektierung von Spezialbauwerken sind objekt- und problemorientierte Ergänzungen bzw. Präzisierungen der vorhandenen Vorschriften unerlässlich.

Dies ist auch Grundlage und Zielsetzung umfangreicher Forschungsarbeiten, wie sie auch in der DDR zur Gewährleistung der Sicherheit der Bauwerke durchgeführt werden.

Diese Antwort bedarf der Erläuterung und Begründung. Eine Reihe der im Abschnitt 2 genannten Problemkreise hat sich im Zusammenhang mit der Entwicklung der Spezialbauwerke bzw. der Anforderungen an die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Bauwerke erst in den letzten Jahrzehnten ergeben. Ihre Lösungen sind teilweise noch Gegenstand der aktuellen Forschung, teilweise sind sie noch nicht so aufbereitet, daß sie in der erforderlichen Vereinfachung in Vorschriften verankert werden konnten. Internationale Vergleiche zeigen, daß das gleiche Bauwerk unter den gleichen Bedingungen eine völlig unterschiedliche Tragsicherheit zu haben scheint, je nachdem, in welchem Lande es steht, je nachdem, nach welcher Vorschrift es gerechnet wurde. Oft ist es so, daß gerade dort, wo der projektierende Ingenieur die größte Hilfe braucht, die geringste Unterstützung gegeben werden kann.

Er befindet sich in Entscheidungssituationen, die er dann oft durch unökonomische Lösungen zu bewältigen versucht.

Dazu kommt noch, daß die Verbindung zwischen dem Auftraggeber bzw. Nutzer und dem Bauprojektanten nicht in jedem Fall so inhaltsreich ist, daß alle für die Untersuchung des Bauwerksverhaltens wichtigen Sachverhalte in der notwendigen Klarheit und Verbindlichkeit bewußt sind.

Zur Verdeutlichung der nationalen und internationalen Vorschriftensituation ist es nützlich, folgende Vorschriftensklassen zu unterscheiden: (vgl. auch Tabelle 4)

- Basisvorschriften
- Problemorientierte Vorschriften
- Bauwerksorientierte Vorschriften.
- Die *Basisvorschriften* regeln i. a. die Verbindlichkeiten der Bauweisen, die Kennwerte der Baustoffe, die Bedingungen, unter denen die Standardbauwerke des Wohnungsbaues, des Industrie- und Hochbaues zu projektieren sind. Sie haben national und international einen hohen Stand erreicht und erweisen sich i. a. als ein zuverlässiges Werkzeug zur Bewältigung der Standardaufgaben der Berechnung und Konstruktion. Initiativen zur Schaffung internationaler Vorschriften und Richtlinien haben dank der Bemühungen der Länder des RGW und der internationalen Vereinigungen des Bauwesens (z. B. FIP, CEB) zu internationalen Empfehlungen geführt. Veränderungen dieser Basisvorschriften finden mit der Weiterentwicklung

des allgemeinen technisch-wissenschaftlichen Standes in der Regel nur in größeren zeitlichen Abständen statt. Die Entwicklung des ETV Beton ist derzeit ein solcher, für die Ingenieure der DDR spürbarer, Vorgang.

- *Problemorientierte Vorschriften* haben sich im Zuge der Entwicklung für Sondergebiete herausgebildet. Vorschriften für die Stabilitätsuntersuchung, für Erdbebenuntersuchungen, für Windannahmen sind dazu zu zählen. Sie sind stärker mit den wachsenden Erkenntnissen und Erfahrungen verbunden, also stärker Wandlungen unterworfen und haben deshalb oft auch nur empfehlenden Charakter, der die Notwendigkeit, objektgebundene Besonderheiten zu berücksichtigen, einschließt.
- Den fortgeschrittensten Stand für Spezialbauwerke verkörpern die *bauwerksorientierten Vorschriften* und Empfehlungen. Dazu gehören z. B. die von der IASS in mehreren Etappen erarbeiteten Empfehlungen für Kühltürme, die im Rahmen der FIP und der IASS erarbeiteten Empfehlungen für Behälter und Containments, die derzeit noch national begrenzten Silovorschriften und Vorschriften für kernkraftwerkstypische Bauwerke. Bemühungen um internationale Angleichung und Verarbeitung der ständig wachsenden technisch-wissenschaftlichen Informationen bestimmen derzeit die mit Vorschriften befaßten nationalen und internationalen Gremien.

Wie notwendig dies ist, soll an einigen Beispielen verdeutlicht werden:

- Beispiele von Vorschriften oder Empfehlungen zur Erfassung von Einwirkungen auf Spezialbauwerke
 - Vorschriften und Empfehlungen zur Erfassung des Silodruckes. Der im Silo herrschende Druck hängt u. a. von folgenden Sachverhalten ab:
 - Eigenschaften des Silogutes (Reibungswinkel, Eigenlast u. a.)
 - Fließzustand des Silogutes (Füllen, Entleeren, Umlagern)
 - Geometrie der Silozelle (Schlankheit, Querschnittsform)
 - Geometrie des Siloauslaufes (Trichterform, Trichterneigung)
 - Exzentrizität der EntleerungsöffnungDie nationalen Vorschriften berücksichtigen diese Einflüsse teilweise nicht, teilweise mit unterschiedlicher Wichtung. Berechnungsergebnisse, die sich für gleiche Verhältnisse nach unterschiedlichen Vorschriften ergeben, können bis zu 50 % voneinander abweichen. Unterschätzung des Silodruckes und Schäden oder Überdimensionierungen sind die Folge. Fakten zur Erfassung des Silodruckes in Vorschriften sind in Tabelle 5 zusammengestellt.
 - Vorschriften zur Erfassung des Winddruckes. Der auf Spezialbauwerke extremer Abmessungen wirkende Winddruck hängt u. a. von folgenden Sachverhalten ab:
 - Standortbedingungen mit Einschluß der unmittelbaren gebauten und natürlichen Umwelt
 - Form und Oberflächenbeschaffenheit der Bauwerke

Ausgewählte Vorschriftenfestlegungen zur Ermittlung des Silodruckes			
Abweichungen von Festlegungen zu den Siloguteigenschaften			
Eigenschaft	Extremwerte		Abweichungen (Minimalwert = 100 %) %
	min	max	
Eigenlasten /kN/m ³ /			
• Getreide	7,36	9,90	134
• Getreidemehl	6,00	9,00	150
• Zement	13,44	17,00	126
Winkel der inneren Reibung /in Grad/			
• Getreide	23°	37°	160
• Getreidemehl	20°	40°	200
• Zement	24°	30°	125
Wandreibungsbeiwert			
• Getreide / Beton	0,29	0,50	172
• Getreidemehl / Beton	0,26	0,84	323
• Zement / Beton	0,27	0,60	222
Abweichungen von berechneten Silodrücken /kN/m ² / bei gleicher Geometrie			
• Getreide (Durchmesser 6m; Höhe 30 m)			
max. horizontaler Fülldruck	27,5	33,1	120
max. horizontaler Entleerungsdruck	31,5	56,5	179
• Zement (Durchmesser 21m; Höhe 55 m)			
max. Fülldruck	157,00	255,00	162
max. Entleerungsdruck	207,00	270,00	130

-- dynamische Charakteristiken der Bauwerke

Die von der IASS entwickelten Empfehlungen zur Berücksichtigung des Windeinflusses für Kühltürme tragen diesen Sachverhalten Rechnung, lassen jedoch für den Projektanten Ermessensspielraum und damit Entscheidungsnotwendigkeit z. B. beim Ansatz der Zeitmittelung zur Erfassung des maximalen Winddruckes, bei der Festlegung der Wiederholungsperiode und bei der Interpretation der dynamischen Wechselwirkung zwischen Windwirkung und Bauwerksverhalten. Erkenntnisse aus Versuchen, theoretische Auseinandersetzungen und Grundsatzdiskussionen zur Frage der Notwendigkeit, den Wind mit stochastischen Betrachtungen zu erfassen, relativieren bestehende Vorschriftenregelungen.

- Vorschriften zur Erfassung von Erdbebenwirkungen

In der DDR wurde der Erfassung von Erdbebenwirkungen im Zusammenhang mit Forderungen aus dem Anlagenexport und mit der Errichtung von Bauwerken hohen Risikopotentials in letzter Zeit Aufmerksamkeit geschenkt. Die Vorschriftenbasis, auf die zurückgegriffen werden konnte, war im wesentlichen auf Standardbauwerke orientiert, die Vereinfachungen in der Modellierung der Einwirkungen und der Bauwerke ermöglichten.

International wird die Vorschriftensituation zur Erfassung der Erdbebenwirkungen durch nationale Vorschriften der Länder bestimmt, die Zonen hoher Erdbebenaktivität in ihrem Zuständigkeitsbereich zu berücksichtigen hatten. Unterschiede bestehen schon in grundlegenden Festlegungen, wie der Zuordnung von Bodenbeschleunigung und Erdbebenintensität (vgl. auch Tabelle 6). Für Spezialbauwerke ist die Festlegung von Größe und Verlauf des anzunehmenden Erdbebens nicht nur standortbedingt, sondern häufig auch durch das Risikopotential beeinflusst, das das jeweilige Spezialbauwerk verkörpert. Dieser Einfluß reicht von der Beschreibung des Erdbebens selbst über die Modellierung des Systems Bauwerk – Baugrund bis zur Bewertung der aus der Erdbebenwirkungen errechneten Bauwerksbeanspruchungen.

- Beispiele zu Vorschriften oder Empfehlungen zur Erfassung des Tragverhaltens von Spezialbauwerken
Zur Beurteilung dieses Sachverhaltes sind sowohl problemorientierte als auch bauwerksorientierte Vorschriften heranzuziehen.

- Vorschriften und Empfehlungen zur Erfassung des dynamischen Verhaltens von Spezialbauwerken
Unterschiede in der Erfassungsnotwendigkeit und der Untersuchungsmethode zur Erfassung des dy-

Ausgewählte Vorschriftenfestlegungen zur Erfassung der Erdbebenwirkung				
Sachverhalt				
<ul style="list-style-type: none"> Zuordnung von Bodenbeschleunigung und Erdbebenintensität (auch abhängig von Art der Berechnungsverfahren) 	Bodenbeschleunigung			
	Intensität	min b	max b	Abweichung %
	6	0,13	0,9	
	7	0,25	2,2	
	8	0,5	3,0	
	9	1,0	7,0	
<ul style="list-style-type: none"> Zuordnung von vertikaler zu horizontaler Bodenbeschleunigung 	<ul style="list-style-type: none"> in der Regel keine Festlegung in Einzelschriften $b = 0,5 b_n$ objektorientierte Festlegungen $b_v = (0 \dots 1,0) b_n$ 			
<ul style="list-style-type: none"> Klassifizierung der Erdbeben (Entwurfserdbeben E_E, Havarieerdeben E_H) 	<ul style="list-style-type: none"> Definitionen in Abhängigkeit <ul style="list-style-type: none"> vom Abstand Erregungsherd – Standort oder von Eintrittshäufigkeit Verhältnis der festgelegten Bodenbeschleunigungen <ul style="list-style-type: none"> in der Regel keine Festlegung objektorientierte $b_H = (1,5 \dots 3,0) b_E$ 			

Tabelle 7

Ausgewählte Vorschriftenfestlegungen zur Erfassung des dynamischen Verhaltens von Spezialbauwerken	
Beispiel: Verhalten unter Erdbebenwirkungen	
<ul style="list-style-type: none"> in der Regel Orientierung auf modale Analyse unterschiedliche Vorgaben von Response-Spektren zur modalen Analyse hinsichtlich <ul style="list-style-type: none"> der Berücksichtigung der Dämpfung (frequenz-, bauwerks- bzw. baugrundabhängig) der Normierung der durch das Spektrum abgedeckten Zeitverläufe unterschiedliche Vorgaben zur Überlagerung von Erdbebenwirkungen hinsichtlich <ul style="list-style-type: none"> der Berücksichtigung des gleichzeitigen Auftretens von <ul style="list-style-type: none"> horizontalen und vertikalen Komponenten der Erdbebenerrregung Maxima der einzelnen modalen Anteile unterschiedliche Vorgaben von Faktoren zur globalen Berücksichtigung <ul style="list-style-type: none"> des Baugrundes des Risikopotentials des Spezialbauwerkes der Dämpfung 	<ul style="list-style-type: none"> Vorschriften und Empfehlungen zur Erfassung des Stabilitätsverhaltens von Spezialbauwerken <p>Das Stabilitätsverhalten der Flächentragwerke, der Hauptbestandteile der Spezialbauwerke, wird beeinflusst durch</p> <ul style="list-style-type: none"> die Hauptgeometrie, vor allem die Krümmung der Tragwerke die Querschnittsgeometrie die Baustoffkennwerte in Abhängigkeit von der Beanspruchung Größe und Verteilung der Einwirkungen. <p>Alle diese Einflussfaktoren weichen bei dem realen Bauwerk von den idealen Festlegungen im Projekt ab. Wirklichkeitsnahe Stabilitätsvorschriften müssen folgende Faktoren berücksichtigen (am Beispiel von Stahlbetontragwerken)</p> <ul style="list-style-type: none"> geometrische Imperfektion der Hauptgeometrie
<p>dynamischen Verhaltens von Spezialbauwerken können auftreten durch (vgl. auch Tabelle 7)</p> <ul style="list-style-type: none"> den spezifischen Zeitverlauf der Einwirkung das Eigenschwingverhalten des Spezialbauwerkes die Plastifizierung von Teilbereichen des Bauwerkes unter dynamischen Einwirkungen die Wechselwirkung mit Anlagen innerhalb oder außerhalb des Spezialbauwerkes die Wechselwirkung zwischen Spezialbauwerk und Baugrund. <p>Festlegungen in den bauwerksorientierten Vorschriften erfassen einfache Fälle und geben weiten Ermessens- bzw. Entscheidungsspielraum gerade für solche dynamische Wirkungen und Verhältnisse, die sich im Havariefall katastrophal auswirken können.</p>	

- beanspruchungsabhängige Veränderungen der Hauptgeometrie durch Kriecherscheinungen
- geometrische Imperfektionen der Querschnittsgeometrie
- beanspruchungsabhängige Veränderungen der Querschnittsgeometrie durch Ribbildung
- zeit- und Belastungsabhängige Veränderungen der Baustoffeigenschaften
- zeit- und ortsabhängige Veränderung der Einwirkungen.

Die vorliegenden nationalen und internationalen Vorschriften berücksichtigen nur in Ausnahmefällen und mit unterschiedlichem Gewicht

- mögliche Veränderungen der Hauptgeometrie
- mögliche Reduzierungen der Querschnittsgeometrie und damit der Steifigkeit
- die zeitlichen und örtlichen Veränderlichkeiten von Einwirkungen.

4. Empfehlungen zur Unterstützung der Spezialprojektanten

Die getroffenen Feststellungen zu ausgewählten Problemkreisen und zur Vorschriftensituation sind Grundlage für einige Schlußfolgerungen.

Diese Schlußfolgerungen werden auf die Möglichkeiten und Notwendigkeiten konzentriert, die sich für die wissenschaftlichen Einrichtungen ergeben, die an der Lösung ingenieurtheoretischer Probleme beteiligt sind. Dabei wird auf folgende Komplexe orientiert:

- Komplex 1:
Erarbeitung der ingenieurtheoretischen Grundlagen für ausgewählte Problemkreise
- Komplex 2:
Überführung der Grundlagen in Projektierungshilfsmittel (Entwurfs- und Berechnungshilfsmittel) und Richtlinien für ausgewählte Spezialbauwerke
- Komplex 3:
Qualifizierung von Spezialprojektanten (problemorientiert und bauwerksorientiert)

4.1. Erarbeitung der ingenieurtheoretischen Grundlagen für ausgewählte Problemkreise

Dieser Komplex hat Grundlagencharakter. Sein Inhalt ist abzuleiten aus:

- der zu erwartenden Entwicklung von nutzertechnologischen Anforderungen an die Spezialbauwerke
- der zu erwartenden Entwicklung auf dem Baustoff- und Energiesektor
- der zu erwartenden Entwicklung vorhandener Tragwerke und Bauwerke und der Nutzung neuer Tragprinzipien
- der Entwicklung von Kriterien zur Beurteilung der Effektivität, Sicherheit und Zuverlässigkeit der Spezialbauwerke

Folgende Empfehlungen werden gegeben:

- Sicherheitsbetrachtungen der Spezialbauwerke sollten unter Einfluß nutzertechnologischer Kriterien

und Risikoabschätzungen durch Zuverlässigkeitsbetrachtungen ergänzt werden

- Analyse und Nutzung des internationalen Vorlaufes auf den Gebieten
 - des dynamischen Verhaltens
 - des Stabilitätsverhaltens
 sollten zum Hauptinstrument der Forschungsarbeit auf diesen Gebieten gemacht werden.
- Trendanalyse auf internationalem Niveau sollten im Abstand von etwa 2 Jahren Auskunft über wichtige neue Entwicklungslinien der Baustoffe und Bauwerke sowie der Verfahren und Methoden zur Lösung ingenieurtheoretischer Probleme erarbeitet werden.

Die Realisierung dieser Empfehlungen sollten Schwerpunkt koordinierter Forschungsplanung der zuständigen wissenschaftlichen Einrichtungen sein. Trendanalysen sollten auch von den zuständigen Sektionen und Arbeitsgruppen der Bauakademie der DDR angefertigt werden.

Trend- und Zustandsanalysen der Sektion Industriebau und ihrer Arbeitsgruppen zeigen die Zweckmäßigkeit und Nützlichkeit solcher Bemühungen.

4.2. Überführung der Grundlagen in Projektierungshilfsmittel

Dieser Komplex ist anwendungsorientiert.

Folgende Empfehlungen werden gegeben:

- Entwurfshilfsmittel sollten aus Parameterstudien entwickelt werden, die die Wechselwirkungen zwischen Entwurfsentscheidungen und der Erfüllung der nutzertechnologischen und der Tragfunktion der Spezialbauwerke erkennen lassen.
- Rechenhilfsmittel sollten einerseits die Lösung ingenieurtheoretischer Probleme auf dem Niveau vereinfachter Ingenieurbetrachtungen ermöglichen, andererseits auch qualitative Kontrollmöglichkeiten für kompliziertere, mit EDV-Programmen gelöste Probleme geben.
- Problem- und bauwerksorientierte Richtlinien sollten auf die Nutzung solcher Hilfsmittel orientieren.

Die Realisierung dieser Empfehlungen sollte Schwerpunkt der Zusammenarbeit der Forschungsabteilungen der Spezialprojektanten und den anwendungsorientierten wissenschaftlichen Entwicklungen sein. Beispiele dieser Art sind im Zuge der Richtlinienarbeit von KKW-typischen Spezialbauwerken geschaffen worden.

4.3. Qualifizierung von Spezialprojektanten

Die problemorientierte Qualifizierung soll die Arbeitsfähigkeit von Spezialprojektanten wissenschaftlich stärker fundieren und die Meinungsbildung zu anspruchsvollen Problemkreisen auf ein solches Niveau heben, daß die bei unterschiedlichen Spezialbauwerken auftretenden Probleme erkannt, in Aufgabenstellungen überführt und gelöst werden können. Sie hat Analogerscheinungen bei unterschiedlichen Spezialbauwerken bewußt zu machen und den allgemeinen

technisch-wissenschaftlichen Stand in der Projektierung von Spezialbauwerken zu heben.

- Die bauwerksorientierte Qualifizierung hat die in einer Gruppe von Spezialbauwerken auftretenden unterschiedlichen Problemkreise bewußt zu machen und deren Lösung unter Beachtung ihrer Wechselwirkung zu unterstützen.

Dieser Komplex ist anwendungsorientiert. Sein Inhalt ist aus den ersten beiden Komplexen abzuleiten.

Folgende Empfehlungen werden gegeben:

- *Problemorientierte Weiterbildung* von Spezialprojektanten sollte sich orientieren auf
 - die Entwicklung von Fähigkeiten zur Beurteilung des Risikopotentials von Spezialbauwerken und der Möglichkeiten seiner Beeinflussung
 - die Entwicklung von Fähigkeiten zur Untersuchung des Tragverhaltens von Spezialbauwerken unter speziellen statischen Einwirkungen
 - die Entwicklung von Fähigkeiten zur Untersuchung des Tragverhaltens von Spezialbauwerken unter extremen Einwirkungen (extreme Temperatureinwirkung, extreme dynamische Einwirkungen)
- *Bauwerksorientierte Weiterbildung* von Spezialprojektanten sollte sich in einer ersten Etappe auf
 - Spezialbauwerke der Energiewirtschaft
 - Spezialbauwerke der Lager- und Speicherwirtschaftorientieren.

- Die Weiterbildungsmaßnahmen sollten sich auf einen streng begrenzten Personenkreis begrenzen. Sie sollten die Kader erfassen, die unmittelbar an der Entwicklung und Projektierung von Spezialbauwerken beteiligt sind.

- Die Weiterbildungsmaßnahmen sollten Belange der Spezialbauwerke des Anlagenexportes vorrangig berücksichtigen. Sie sollte auch die Analyse und Wertung der internationalen Vorschriftensituation enthalten.

Die Realisierung dieser Maßnahmen sollte einer der Schwerpunkte der Arbeiten der zuständigen Wissenschaftszentren sein, die vom Ministerium für Hoch- und Fachschulwesen auf der Grundlage der Wissenschaftskonzeption für die Bauingenieursektionen geschaffen wurden. Die Weiterbildung zur Erdberechnung am Wissenschaftszentrum „Industrie- und Spezialbau“ an der HAB Weimar ist ein erster Schritt auf diesem Weg.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. habil. E. Hampe
Hochschule für Architektur und Bauwesen
Sektion Bauingenieurwesen
5300 Weimar
PSF 546