

# Die Ursache für den Totalverlust der Betonplattform Sleipner A

Es werden der spektakuläre Schadensfall und Totalverlust der Beton-Offshore-Plattform Sleipner A geschildert und die Ursachen genannt. In einem Kommentar wird erläutert, daß dieser Schadensfall auf Probleme und Mängel grundsätzlicher Art in Normen aber auch in der Praxis hinweist.

**Cause for the total loss of the concrete platform Sleipner A.** *The spectacular damage and total loss of the concrete Offshore-platform Sleipner A is reported and the technical causes described. A commentary illustrates, that this damage reveals problems and deficiencies of basic nature in codes as well as in practice.*

**La cause de la perte totale de la plate-forme en béton „Sleipner A“.** *L'exposé décrit le cas spectaculaire entraîné par la perte totale de la plate-forme de forage „Sleipner A“, et en énumère les causes. Un commentaire explicatif dénonce la carence fondamentale aussi bien des normes que de la pratique – problèmes et déficiences mis en lumière par le sinistre.*

## 1 Der Schadensfall

Am 23. August 1991 brach in Gandsfjord bei Stavanger eine Zellenwand der Betonplattform Sleipner A bei einer Prüfung zum Tiefenabsenken, wenige Tage bevor das Deck aufgeschwommen werden sollte. Das Leck war so groß, daß die Plattform innerhalb von 18 Minuten sank. Glücklicherweise konnten alle 14 Personen die Plattform rechtzeitig verlassen, und es kam niemand zu Schaden. Die Betonplattform implodierte während des Sinkens wahrscheinlich vollständig, bevor durch den Aufprall auf dem Meeresboden schließlich nur noch ein Trümmerhaufen übrig blieb [1]. Der Aufprall wurde von mehreren seismologischen Stationen registriert, und danach wurde eine Magnitude von etwa 3 auf der Richterskala errechnet. Über die Schadensursachen berichtete *Jakobsen* in [2] sowie eine norwegische Zeitschrift [1] unter der Überschrift „Von der Ingenieur-Kathedrale zum Betonschutt“; im folgenden sollen diese zusammengefaßt und abschließend kurz kommentiert werden.

Die Betonstruktur wurde als herkömmliche Condeep-Plattform für eine Wassertiefe von 82 m entworfen [3]; sie besteht aus 24 Zellen mit vier Türmen mit einer Gesamthöhe von 110 m (Bild 1). Der Horizontalschnitt im Bild 2 zeigt die Anordnung der Zellen mit je 24 m Durchmesser und die Zwickelzellen, die sog. „tricells“ (Detail A). Diese tricells sind oben offen und stehen unter dem vollen äußeren Wasserdruck, während die Zellen nur teilweise mit Ballast und Wasser gefüllt sind. Auch war der Bohrschaft D3 neben der tricell T23 leer, um den Auftrieb der Plattform sicherzustellen, so daß beim Auftreten des Bruchs dieser Zelle ein Überdruck von etwa 0,67 MPa, entsprechend 67 m Wassersäule, wirkte. Die internen Untersuchungsausschüsse der Baufirma Norwegian Contractors (NC) sowie des Bauherrn STATOIL gaben folgende zwei Hauptursachen für das Versagen dieser tricell an:

- ein Fehler in der Finite-Element-Analyse,
- mangelhafte Bewehrungsführung im Knotenbereich der Zellwände.

Die Berechnung und Bemessung sowie die Darstellung der Bewehrung wurden offenbar vollständig mit der EDV durch-

geführt. Die Spannungen und Schnittgrößen wurden mit der Finite-Element-Methode unter Annahme eines linear-elastischen Baustoffverhaltens ermittelt. Bild 3 zeigt das globale FE-Modell für ein Viertel der Struktur [1]. Das Detail A (Bild 2) wurde dabei mit dem im Bild 4 gezeigten FE-Netz modelliert. Dieses Modell für die tricell war so ungünstig, daß die Schnittgrößen der Wände erheblich unterschätzt wurden, z. B. die Querkraft am Anschnitt um ungefähr 45%. Bei der Bewehrungsführung waren besonders die sich unter Innendruck öffnenden „Rahmenecken“ der tricell völlig unzureichend (Bild 5). Der sog. „T-headed bar“ ist viel zu kurz. In [1] heißt es: „Ein erfahrener Konstrukteur würde, ohne viel nachzudenken, den Stab bis in die Druckzone auf beiden Seiten verlängern“. Darüber hinaus fehlen im Versagensbereich Bügel in den Wänden, die in anderen Bereichen und bei anderen Plattformen immer eingebaut wurden.

Folgender Ablauf des Versagens wird in [1], [2] für wahrscheinlich gehalten (Bild 6): Hinter der Verankerung des „T-bars“ bilden sich Risse; der Stab wird herausgezogen. Der Riß hinter der Verankerung schreitet in den Knotenbereich fort, schließlich bricht die Zellenwand ab, und es öffnet sich das gezeigte Leck.

Die Verfasser konnten in ihrem späteren ausführlichen Gutachten diese Feststellungen nur noch bestätigen und vertiefen.

## 2 Kommentar

Auf den ersten Blick handelt es sich um einen offenkundigen Fehler, denn bereits eine schlichte Gleichgewichtsbetrachtung (Bild 7) und vollends die Skizze eines einfachen Stabwerkmodells für die Lastabtragung in den Wänden der Tricell und

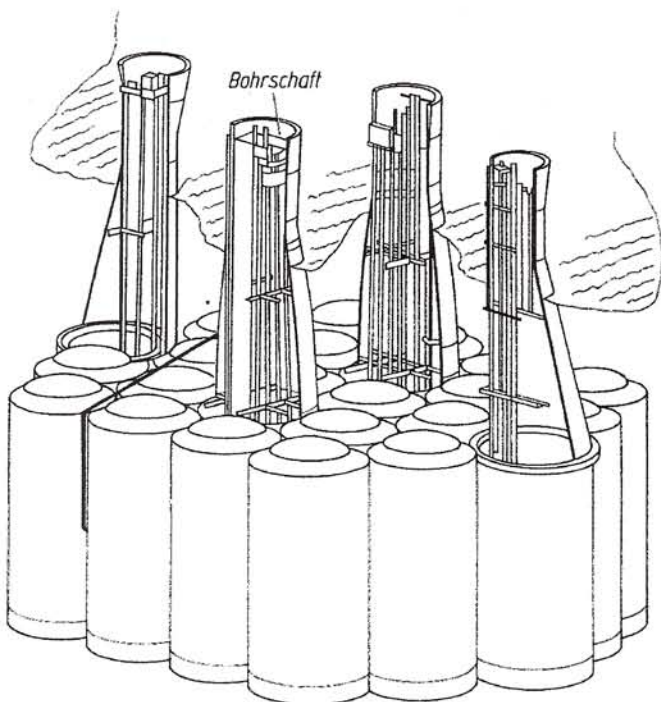
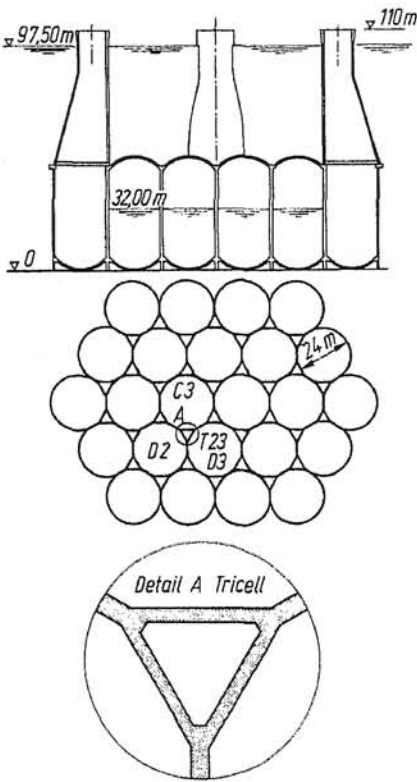


Bild 1. Schnitte der Plattform Sleipner A

Fig. 1. The concrete offshore-platform Sleipner A

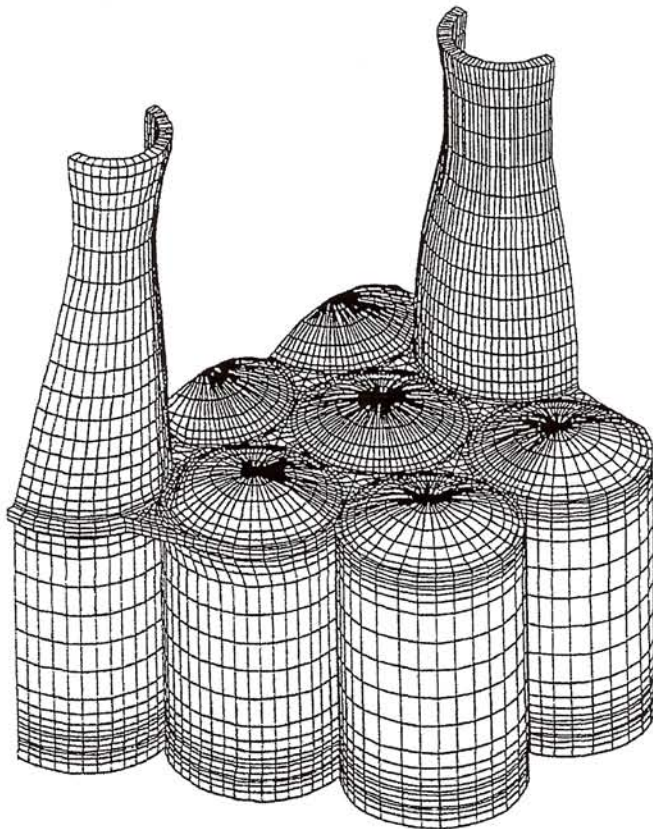
Fig. 1. Vues en coupe de la plate-forme Sleipner A



**Bild 2.** Schnitt und Grundriß der Plattform; Schnitt durch Zwickelzelle (tricell)

**Fig. 2.** Main dimensions of the concrete offshore-platform Sleipner A

**Fig. 2.** Coupe et plan général de la plateforme; coupe au travers des pendentifs (tricell)



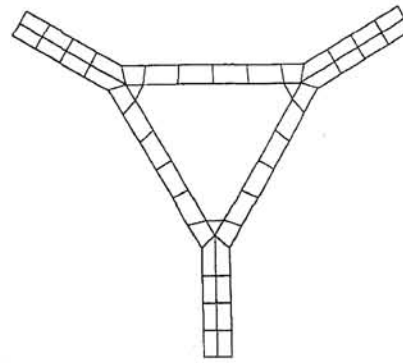
**Bild 3.** FE-Modell für ein Viertel der Struktur

**Fig. 3.** Global finite-element model

**Fig. 3.** Modèle FE pour un quart de la structure

in dem Knotenbereich (Bild 8) zeigen, daß jede Zellwand rückgehängt und mit der gegenüberliegenden verbunden werden muß.

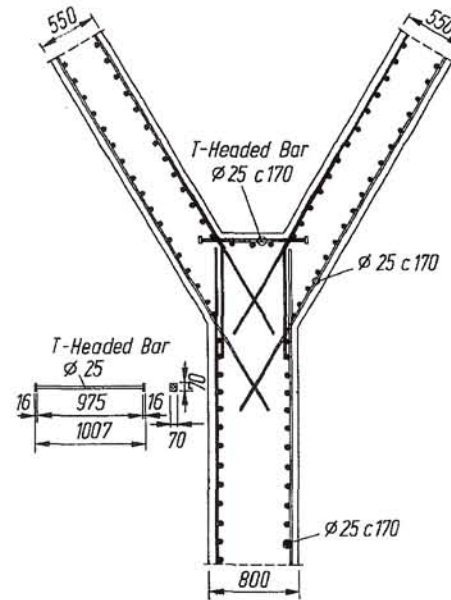
Können aber nun wirklich Tragwerksplaner, Bauausführende und Normenmacher in Deutschland oder in anderen



**Bild 4.** FE-Netz der Zwickelzelle

**Fig. 4.** Finite element mesh for detail A

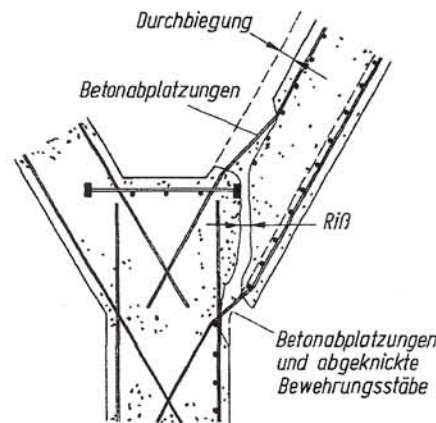
**Fig. 4.** Choix du modèle pour la méthode des éléments finis



**Bild 5.** Bewehrung der Zwickelzellen-Ecke

**Fig. 5.** Reinforcement layout for detail A

**Fig. 5.** Armature des angles des pendentifs



**Bild 6.** Bruchvorgang in der Zellen-Ecke

**Fig. 6.** Possible failure mechanism acc. to ref. [1], [2]

**Fig. 6.** Dégradation par ruptures dans les angles des pendentifs

Ländern guten Gewissens sagen, daß „uns das nicht passieren kann!“?. Es gilt doch das norwegische Qualitätssicherungssystem als „legendär“ [1], und fanden doch diese Bauwerke auch internationale Anerkennung [4]. Wenn also trotz jahrelanger Erfahrung und geballtem Know-How aller Beteiligten,

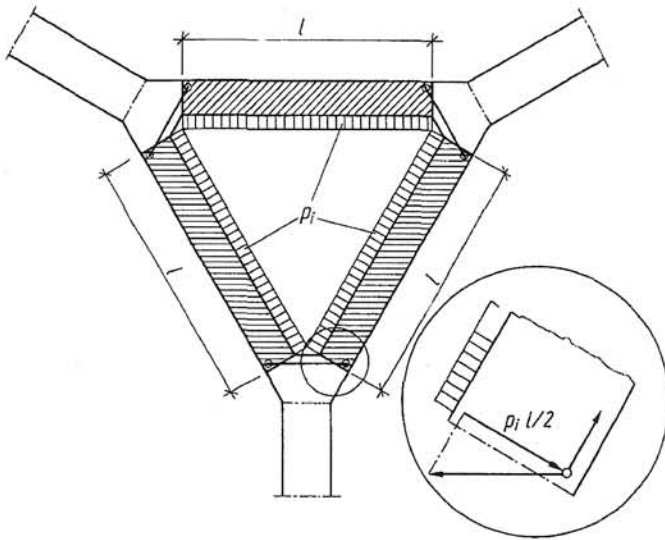


Bild 7. Gleichgewichtsbetrachtung an der Zwickelzelle

Fig. 7. Static equilibrium of the tricell-walls for internal pressure  $p_i$  in the tricell

Fig. 7. Evaluation de l'équilibre statique des pendentifs

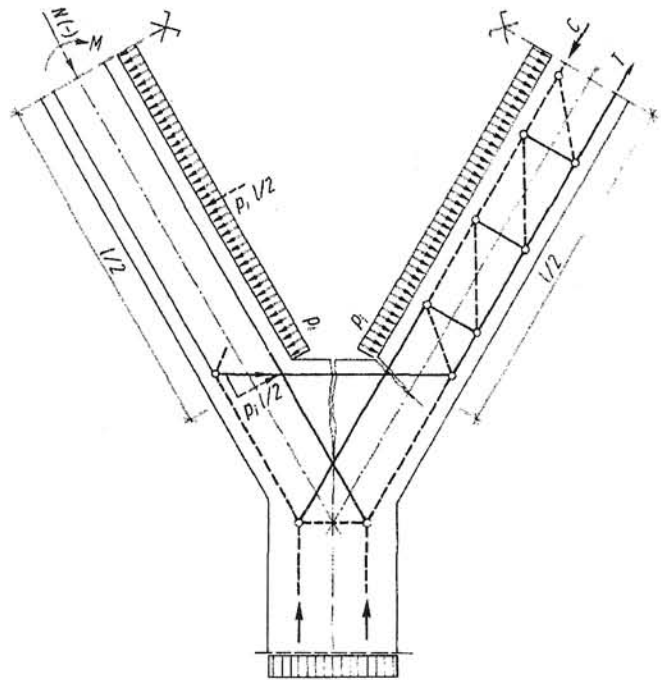


Bild 8. Stabwerkmodell der Zwickelzelle

Fig. 8. Simple strut-and-tie model for the joint and the tricell-walls

Fig. 8. Modèle basé sur l'analogie du freillis pour les pendentifs

trotz bzw. gerade wegen aufwendiger FE-Modellierung der gesamten Struktur mit nachfolgender selbsttätiger Auswertung und Bemessung, sowie schließlich trotz Berücksichtigung des neuesten Kenntnis- und Normenstands ein solch schwerwiegender Schaden eintreten kann, dann weist dies auf Probleme und Mängel grundsätzlicher Art hin, die wahrlich Grund zum Nachdenken sind.

Auf dem IABSE-Colloquium „Structural Concrete“ im April 1991 in Stuttgart [5] wurden gerade solche grundsätzlichen Fragen erörtert und in einem Schlußbericht zusammengefaßt [6]. Insbesondere haben folgende der dort in 20 Punkten aufgestellten Schlußfolgerungen und Forderungen mit den Ursachen des Totalverlustes der Slepner-Plattform zu tun:

- 7.: „Das Hauptaugenmerk des Tragwerkplaners sollte darauf gerichtet sein, das Gesamttragverhalten besonders sorgfältig zu betrachten ... und den Kraftfluß im Tragwerk durch den Entwurf günstig zu beeinflussen“. Einem unbefangenen Beobachter stellt sich die Frage nach dem Zweck der so ungünstig beanspruchten „tricells“.
- 9.: „Schäden an Bauwerken zeigen sehr nachdrücklich, daß die Standsicherheit und Tauglichkeit der Tragwerke insgesamt sehr stark von der sorgfältigen Bemessung und konstruktiven Durchbildung insbesondere der Bereiche mit geometrischen oder lastbedingten Diskontinuitäten (D-Bereiche) sowie der Knoten abhängt. ...“ Diese Erkenntnis berücksichtigen sämtliche Normen, dabei auch der neue EC2, immer noch unzureichend. Die Addition konstruktiver Regeln und Vorschriften zur Bewehrungsführung ergeben kein Bemessungskonzept für D-Bereiche.
- 10.: „In allen Phasen der Berechnung und Bemessung sollte das gewählte Tragwerk bzw. sein Berechnungs- und Bemessungsmodell unter globalen, regionalen und lokalen Gesichtspunkten untersucht werden, um sein zufriedenstellendes Verhalten sicherzustellen“. Offensichtlich wurde weder eine regionale Analyse der tricell geschweige denn eine lokale Berechnung und Bemessung der Knotenbereiche durchgeführt.

- 11.: „Der Anspruch der verwendeten Berechnungsverfahren sollte in ausgewogenem Verhältnis zu den Annahmen und den gewünschten Ergebnissen stehen. ... Besonderer Wert sollte auf zweckmäßige und anschauliche Modelle gelegt werden, die das Tragverhalten veranschaulichen und nicht unnötig kompliziert sind, aber die wahre Versagensursache widerspiegeln“.

Eine aufwendige globale Analyse der gesamten Betonplattform mit einem FE-Modell kann nicht alleine als Grundlage der Berechnung und Bemessung angesehen werden, zumal sie ja im allgemeinen wie auch bei Slepner A nur mit linear-elastischem Materialgesetz erfolgt. Die Knoten und Verankerungen erfordern auf jeden Fall gesonderte Betrachtungen mit Hilfe von Stabwerkmodellen. Weiterhin können die riesigen Datenmengen auch durch ein noch so gutes post-processing kaum in anschauliche und übersichtliche Ergebnisse aufbereitet werden, wie es bei Handrechnungen und einfachen Modellen der Fall ist, die zumindest zum Entwurf und zur Kontrolle durchgeführt werden sollten.

12. „... Für die Bemessung sollten besonders anschauliche Modelle benutzt werden, die den Kraftfluß verdeutlichen“.

Eine linear-elastische Spannungsberechnung wird dem Kraftfluß und dem Tragverhalten von gerissenen D-Bereichen wie dieser „sich öffnenden Rahmenecke“ nicht gerecht. Bekannte und in Normen festgehaltene Konstruktionsregeln zur Bewehrungsführung können nicht alle in der Praxis vorkommenden Fälle abdecken. Hingegen bieten Stabwerkmodelle ein konsistentes Bemessungskonzept unter Einschluß der D-Bereiche.

Es bedarf wohl keiner weiteren Ausführungen mehr um festzustellen, daß die Ursachen des Totalverlustes der Slepner-Plattform die Sorgen der Initiatoren des IABSE-Colloquiums Stuttgart 1991 bestätigen und die Bedeutung der Schlußfolgerungen unterstreichen.

**Literatur:**

- [1] *Farøyick, F.*: Von der Ingenieurkathedrale zum Betonschutt (in norwegisch; Übers. I. Hastö). Technisches Wochenblatt 138 Nr. 38, 24. 10. 1991.
- [2] *Jakobsen, B.*: The loss of the Sleipner A platform. Proc. of the 2nd Int. Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, 14-19 June 1992. V. 1, S. 1-8.
- [3] *Gudmestad, O. T. G.*, und *Coker, J. W. A.*: The Sleipner Platform: an efficient gas and condensate installation. SPE-Europ. Petroleum Conf. London 1988, S. 111-126.
- [4] FIP: Ölplattform Gullfaks C. Beton- und Stahlbetonbau 86 (1991), H. 6, S. 139-140.
- [5] IABSE-Colloquium Stuttgart 1991: Structural Concrete. IABSE Report V. 62, 1-872, Zürich 1991.
- [6] IABSE-Colloquium Stuttgart 1991: Structural Concrete – Summarizing statement. In: – Structural Engineering International V. 1 (1991), No. 3, S. 52-54; – Concrete International 13 (1991), No. 10, Oct., 74-77; – PCI-Journal 36 (1991), Nov.-Dec., S. 60-63; und: IVBH-Kolloquium „Konstruktionsbeton“-Schlußbericht. In: – Beton- und Stahlbetonbau 86 (1991), H. 9, S. 228-230; – Bautechnik 68 (1991), H. 9, S. 318-320; – Schweizer Ingenieur und Architekt Nr. 36, 5. Sept. 1991; – Zement und Beton 1991, H. 4, S. 25-28.

**Qualitätssicherung; DBV-Anleitung zur Aufstellung von Qualitätssicherungshandbüchern für die Anwendung in der Bauwirtschaft**

In der Bauwirtschaft wird, besonders vor dem Hintergrund der Öffnung des Europäischen Bauplatzes ab 1993 und der zunehmenden Aufteilung der Bauleistung in Teilleistungen, die durch Nachunternehmer erbracht werden, vom Auftraggeber zunehmend die Darlegung der qualitätssichernden Maßnahmen eines Unternehmens verlangt. Man bezieht sich dabei in der Regel auf einschlägige Normen, die branchenübergreifende Grundmodelle für eine systematische Qualitätssicherung (abgekürzt: QS) beschreiben. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Normen der Reihe DIN ISO 9000 bis 9004.

Allerdings kann es, wie bereits im DBV-Merkblatt „Qualitätssicherung“ von 1985 [1] festgestellt, ein genormtes Qualitätssicherungs-System nicht geben; die

Wahl der qualitätssichernden Maßnahmen eines Unternehmens wird geprägt durch zahlreiche interne und externe Einflüsse und Festlegungen, z.B. durch die individuellen Firmenziele, die Haupttätigkeitsfelder, die spezifischen organisatorischen Abläufe, durch die Größe des Unternehmens und seine Struktur.

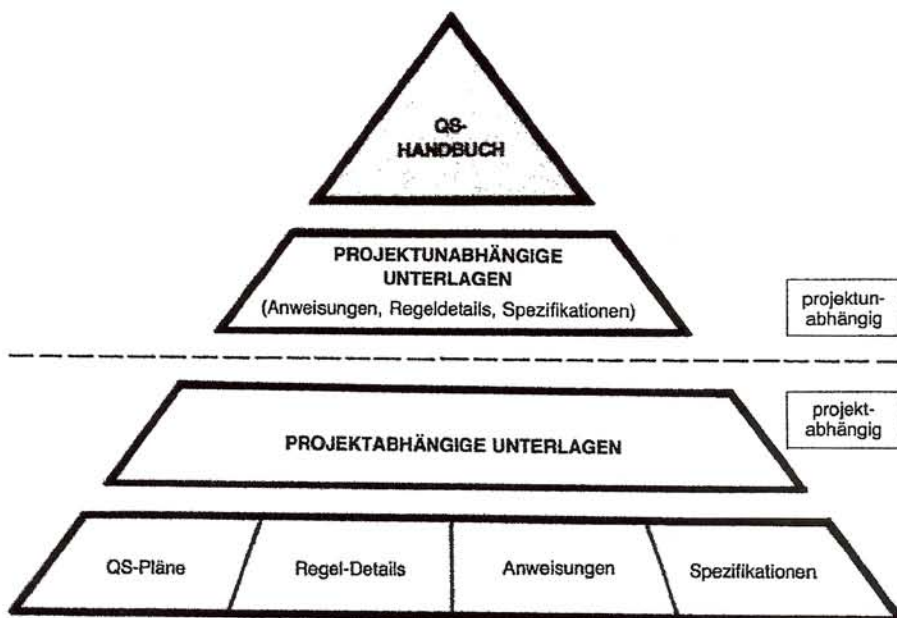
Dennoch lassen sich allgemeine Anregungen für den Aufbau eines firmeninternen QS-Systems angeben. Eine dieser Empfehlungen ist, Qualitätssicherungshandbücher (Bild 1) zu entwickeln, in denen für die Mitarbeiter des Unternehmens die projektunabhängigen Teile des QS-Systems beschrieben sind. Zu diesem Zweck hat ein Arbeitsausschuß des Deutschen Beton-Vereins die oben genannte Anleitung zusammengestellt. Sie ist als

Hilfsmittel für die Erarbeitung firmeneigener QS-Handbücher gedacht, stützt sich auf die genannten DIN ISO-Normen, besonders auf DIN ISO 9002, ab und beschreibt deren Hauptelemente. Ihr Inhalt selbst ist wie folgt aufgebaut: Zunächst ist der Text der Norm DIN ISO 9002 zur Information des Lesers wiedergegeben. In einer „Erläuterungsspalte“ wird der Wortlaut der Norm, sofern erforderlich, in kurzer Form „in die Sprache der Bauwirtschaft“ übersetzt. Zu diesem Zweck sind erläuternde Hinweise oder Anschauungsbeispiele gegeben, die jedoch noch nicht den Charakter eines QS-Handbuchtexthes haben.

Dies geschieht vielmehr in einer Spalte „Beispieltext für die praktische Umsetzung“: sie enthält Vorschläge für Textformulierungen, die u.U. vollständig oder teilweise unmittelbar in ein firmeneigenes QS-Handbuch übernommen werden können. Zudem wurden meist von DIN ISO 9002 abweichende Abschnittüberschriften gewählt, die den Gegebenheiten in der Bauwirtschaft eher als die internationale Bezugsnorm Rechnung tragen.

Die Anleitung wurde vom DBV-Ausschuß „Qualitätssicherung“ in Zusammenarbeit mit namhaften Fachleuten zusammengestellt; sie ist für die Stellen in einem Unternehmen gedacht, die mit der Entwicklung von QS-Systemen befaßt sind. Sie kann bei der DBV-Geschäftsstelle (6200 Wiesbaden, Postfach 2126) zum Preis von DM 50,- bezogen werden.

*H.-U. Litzner*



**Bild 1.** Art und Verknüpfung von QS-Unterlagen zur Darlegung des QS-Systems

**Literatur:**

- [1] Deutscher Beton-Verein E.V.: Merkblatt Qualitätssicherung (Fassung Dezember 1985). Abgedruckt in: DBV-Merkblatt-Sammlung. Ausgabe 1991. Wiesbaden: Selbstverlag 1991.