

# Zur Berechnung und Konstruktion des Naturzug-Nasskühlturms für das Kernkraftwerk Gösgen-Däniken

Autor(en): **Furrer, Hans / Mischol, Ludvic**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **95 (1977)**

Heft 39

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-73460>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

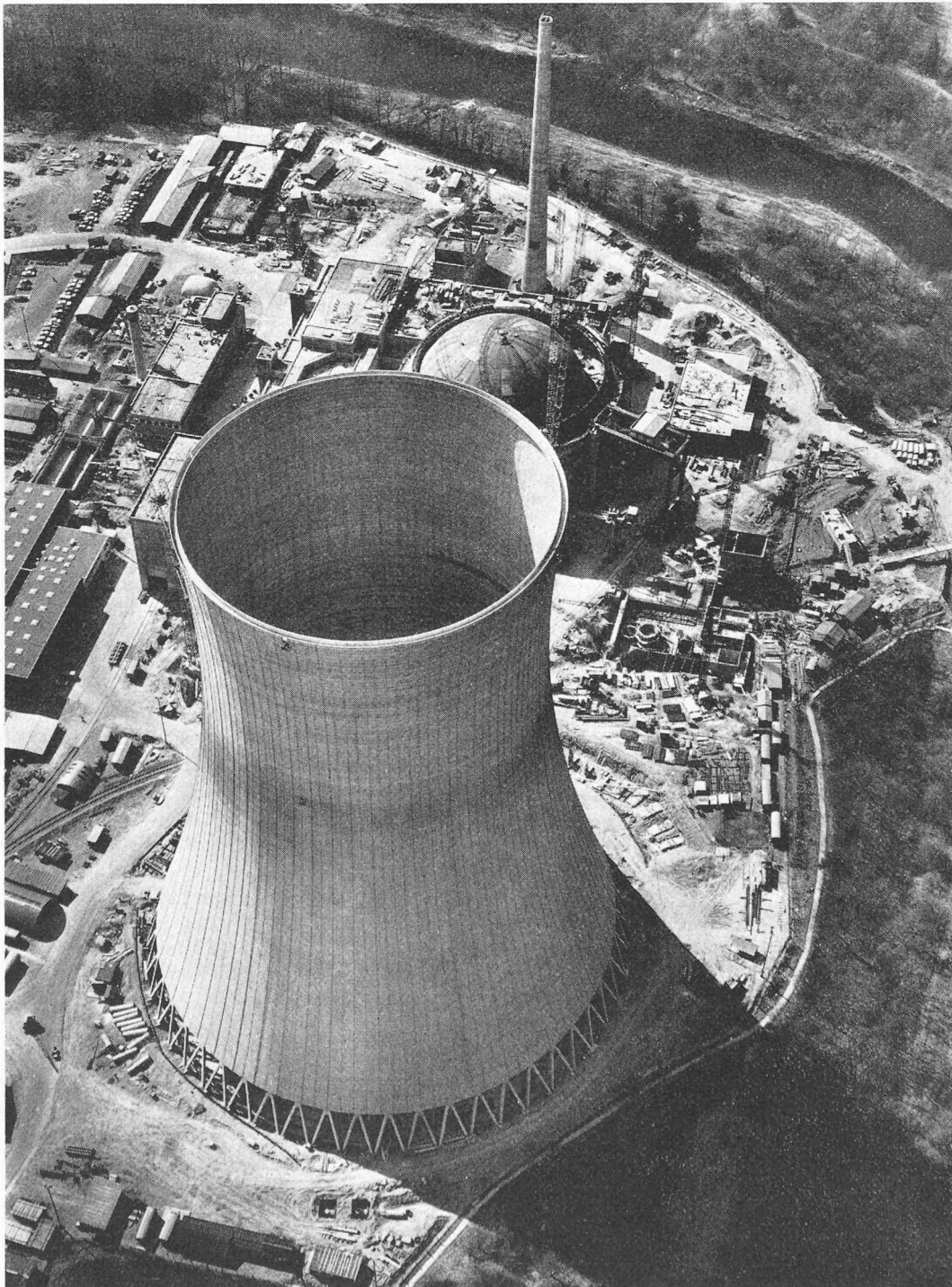
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## Zur Berechnung und Konstruktion des Naturzug-Nasskühl- turms für das Kernkraftwerk Gösgen-Däniken

Von Hans Furrer und Ludvic Mischol, Baden



Die ersten schweizerischen Kernkraftwerke *Mühleberg, Beznau I und II*, werden mit *laufendem Aarewasser gekühlt*. Eine derartige Flusswasserkühlung wurde auch in einer früheren Projektierungsphase für das Kernkraftwerk Gösgen-Däniken vorgesehen. Nachdem der Bundesrat im Mai 1971 jedoch mit Rücksicht auf den *Gewässerschutz* die Auflage machte, das Aare/Rhein-System nicht mehr zur Kühlung grosser Anlagen zu benützen, blieb als Alternative die *atmosphärische Kühlung*.

Untersuchungen von verschiedenen Kühler-Systemen haben ergeben, dass ein *Naturzug-Nasskühlturm* als *optimale Lösung* der anstehenden Kühlaufgabe betrachtet werden darf. So zeigt zum Beispiel dieser Kühlturm-Typ infolge des hohen Schwadenausstrittes wesentlich *geringere meteorologische Auswirkungen als etwa Ventilator-Kühler gleicher Leistung*.

Für den in Gösgen zu erstellenden Kühlturm (Bild 1) hat die Bauherrschaft, die *Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG*, als Beraterin die *Motor-Columbus, Ingenieurunternehmung AG*, beigezogen und mit der Ausschreibung der Prüfung von Statik und Konstruktion sowie mit der Überwachung der Ausführung des Turmes beauftragt.

Im Juni 1974 wurde der Kühlturm als *schlüsselfertiges Bauwerk* an die deutsche Firma *Balcke-Dürr AG* vergeben, in deren Auftrag das Baukonsortium *E. Heitkamp GmbH/Schofir & Mugglin/AG Jäggi* die Stahlbetonarbeiten ausführte. Die statischkonstruktive Bearbeitung erfolgte im Hause *E. Heitkamp GmbH*.

Im folgenden werden wesentliche Entwurfskriterien und konstruktive Merkmale der Stahlbeton-Kühlerschale und deren Fundation behandelt. Nicht beschrieben werden die Funktionsweise der Anlage, die betrieblichen Aspekte, die Kühlereinbauten sowie die Zubehörteile des Turmes wie Aufzug, Korbleiter, Flugbefeuern, Blitzschutz usw.

### Kurzbeschreibung des Bauwerkes

Der für das Kernkraftwerk Gösgen-Däniken erstellte Kühler hat die folgenden hauptsächlichsten Abmessungen (Bild 2):

– Höhe über Tassenrand	150,00 m
– Basis-Durchmesser	113,60 m
– Taillen-Durchmesser	70,16 m
– Kronen-Durchmesser	74,16 m
– Lufteintrittshöhe	10,80 m

Der Lufteintritt wird durch 50 Stützenpaare (in Form von A-Stützen) gewährleistet, die auf Einzelfundamenten abgestellt sind. Die für den Kaminzug verantwortliche, rund 140 m hohe, hyperbolische Stahlbetonschale hat eine minimale Wandstärke von 16 cm und ist am unteren und oberen Rand durch je einen Ringträger ausgesteift. Der untere Ringträger wird durch eine Verdickung der Schalenstärke bis zu 70 cm erzielt, während die obere Versteifung durch eine innenliegende Kreisringplatte bewirkt wird, die gleichzeitig der Begehung der Kühlerkrone dient.

Die beiden Warmwasserzuleitungen werden in vier Steigschächten bis in den Bereich des unteren Schalenrandes geführt, wo das Wasser in einem System von Asbest-Zement-Kanälen gleichmässig über die Grundrissfläche verteilt und mittels Spritzsteller versprüht wird. Die Kanäle und Packungen (Kühlplatten, Tropfenfänger usw.) sind auf vorfabrizierten Stahlbeton-Stützen abgestellt, die in einem Raster von 2,60/7,80 m innerhalb der Wassertasse angeordnet sind. Das von den Packungen herunterfallende, gekühlte Wasser wird in einer Wassertasse von 2,10 m Tiefe gesammelt und in den Kühlwasserkreislauf zurückgeführt. Die Kühlereinbauten und die Wassertasse sind konstruktiv vollständig getrennt von der Kühlerschale und deren Stützung bzw. Fundation.

Bild 1 (S. 689). Schale des Naturzug-Kühlturms (Comet-Photo)

## Entwurfskriterien und Auslegung

### Entwicklung der Berechnungsverfahren in Deutschland und England

Die heute übliche *hyperbolische Form der Kühlerschale* geht auf die technische Entwicklung durch die Holländer *van Iterson* und *Kuyper* zurück. Beide Ingenieure konstruierten 1914 die ersten hyperbolischen Naturzugkühler, die eine Höhe von 35 m aufwiesen. 1930 erreichte die Bauhöhe gegen 65 m und um 1940 wurden 80 m erreicht. 1958 wurde in Grossbritannien beim Kühlturm der *High Marnham Power Station* erstmalig die 100 m Grenze überschritten.

Als 1965 ein Weststurm drei fast betriebsfertige Kühler von 114 m Höhe der *Ferrybridge Power Station* in *Yorkshire* zum Einsturz brachte, wurden die Grenzen der bis anhin erarbeiteten Erkenntnisse drastisch ersichtlich. Die *Central Electricity Research Laboratories* (CERL) entwickelten daraufhin eine *Modelltechnik für Windkanalversuche*, mit der die Vorgänge des Ferrybridge-Unglücks simuliert werden konnten. Eine ausführliche Beschreibung dieser Technik wurde unter anderem am «Symposium on vibration problems in industry» 1973 in *Keswick* vorgetragen [1].

Diese Modelltechnik wird von der *Central Electricity Generating Board* (CEGB), die Entwerferin und Betreiberin der meisten Kühler in England ist, regelmässig herangezogen, um die rechnerisch nach den *British Standards* ausgelegten Kühlerschalen zu überprüfen. Andererseits beschäftigte sich das *Institut für Massivbau* der *TH Hannover* von 1964 bis 1967 und danach das *Institut für Konstruktiven Ingenieurbau* der *Ruhr-Universität Bochum* mit den Problemen beim Bau und bei der Konstruktion von Naturzugkühlern. Diese Untersuchungen, von interessierten Industrieunternehmungen und von der *Deutschen Forschungsgemeinschaft* unterstützt, wurden auf *analytisch-theoretischem* Wege sowie durch *Messungen an Modellen und fertigen Bauwerken* durchgeführt. Besondere Schwerpunkte wurden auf den *natürlichen Wind* als wesentliches Belastungselement und auf die *Schalentheorie* gelegt. Resultate dieser Untersuchungen sind u.a. in Heft 1 «Konstruktiver Ingenieurbau» zusammengestellt [2].

Der natürliche Wind erfordert zur analytischen Ermittlung seiner Wirkungen auf Naturzugkühltürme ingenieurmässige *Idealisierungen*, die zu den *Richtlinien der Vereinigung Industrielle Kraftwirtschaft* (VIK) führten [3]. Wesentliche Forderungen sind darin die Untersuchungen eines *Gebrauchszustandes* und eines *kritischen Zustandes*, der durch eine 1,5-fache Faktorierung der Gebrauchswindlast (DIN 1055) postuliert wird. Die 50prozentige Erhöhung enthält die statistisch grössten Windstaudrücke, die etwa 30 Prozent über den Werten der DIN 1055 liegen und einen 15prozentigen Zuschlag für Abweichungen der Stahlgüte und der Bauausführung.

Wenn der Bemessungsstaudruck als 3-Sekunden-Mittel verstanden wird, so entspricht der Staudruck der DIN 1055 etwa einer Häufigkeit von 20 Jahren und der kritische Staudruck etwa einer Häufigkeit von 200 Jahren.

Im weiteren müssen Annahmen bezüglich der *Druckverteilung über den Turmumfang* gemacht werden. Hier erscheint als wichtiger Parameter neben der *Reynoldszahl*  $Re$  die *Oberflächenrauigkeit*  $k/D$ , die sich durch die Rippenhöhe  $k$  und den Schalendurchmesser  $D$  kennzeichnen lässt. Bild 3 zeigt eine in [2] vorgeschlagene Winddruckverteilung, die häufig als Lastannahme für Naturzugkühler benützt wird. Sie ist gekennzeichnet durch den

– max. Staudruck	max. $c\psi = +1,00$
– max. Unterdruck	min. $c\psi = -1,00$
– Nachstromsog	$c\psi = -0,55$

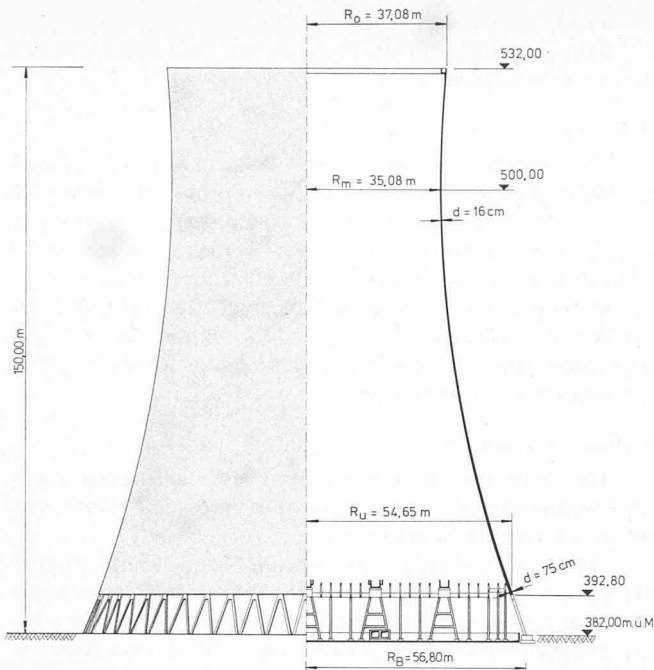


Bild 2 (oben). Hauptabmessungen der Kühlerschale

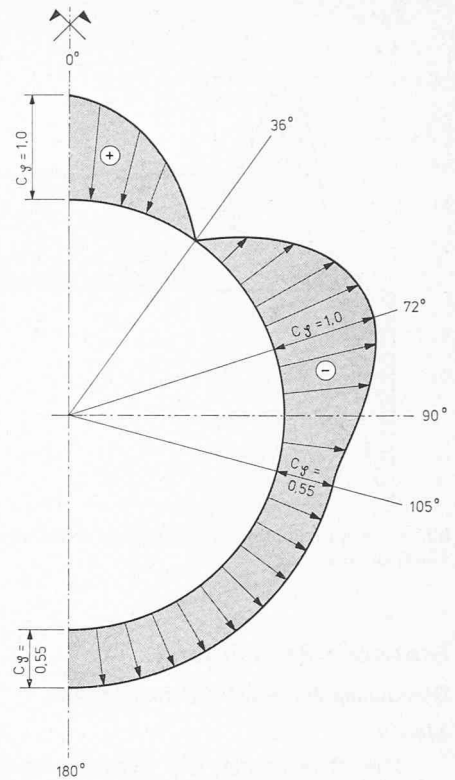


Bild 3 (rechts). Winddruckverteilung über den Turmumfang

Aufgrund verschiedener Modellversuche konnte vor allem im unterkritischen und im kritischen Reynoldsbereich eine günstige Beeinflussung der grössten Unterdruckkoordinate  $\min. c\psi$  beobachtet werden. Für sehr hohe Reynoldszahlen (transkritischer Bereich) strebt  $\min. c\psi$  einem Grenzwert zu, in dem das Druckminimum nicht mehr von  $Re$ , sondern nur noch von  $k/D$  abhängt. Da die heute üblichen Grossausführungen Reynoldszahlen von  $10^8$  bis  $10^9$  aufweisen, werden die in Deutschland gebauten Kühler mit meridionalen Windrippen versehen, die zu einer Oberflächenrauigkeit von etwa  $10^{-3}$  führen.

Die Abhängigkeit von  $\min. c\psi$  im transkritischen Reynoldsbereich ist jedoch nicht weltweit anerkannt. So werden beispielsweise in England alle Kühltürme ohne Windrippe, d. h. mit glatter Schalung gebaut. Konsequenterweise wird jedoch die bedeutend schärfere Winddruckverteilung der British Standards den Berechnungen zugrunde gelegt.

### Auslegung des Kühlturmes des KKW Gösgen-Däniken

#### Normen und Vorschriften

Für die Auslegung dieses ersten grossen Kühlers der Schweiz spezifizierte die Ausschreibung die Einhaltung von Normen und Vorschriften in folgender Reihenfolge:

1. die gesetzlichen und behördlichen Vorschriften einschliesslich Vorschriften der SUVA
2. die Bedingungen der Anfrage-Spezifikation
3. die Normen, Bedingungen und Messvorschriften des SIA (Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein)
4. die Normen und Richtlinien weiterer Fachverbände  
Sofern keine schweizerischen Normen oder Vorschriften vorhanden oder anwendbar sind, müssen ausländische verwendet werden.
  - DIN (Deutsche Industrie-Norm)
  - VIK (Vereinigung Industrielle Kraftwirtschaft)

Für die statische Berechnung und konstruktive Ausbildung von Schale, Stützen und Fundamenten werden somit die Anforderungen der Normen SIA 160 und 162 eingehalten.

#### Lastfälle

##### Gebrauchszustand

- a)  $1,0 \cdot (\text{Eigengewicht}) + 1,0 \cdot (\text{Wind})$
- b)  $1,0 \cdot (\text{Eigengewicht}) + 1,0 \cdot (\text{Wind}) + 1,0 \cdot (\text{Temperatur})$
- c) Im Gebrauchszustand müssen zu einem Lastfall  $1,0 \cdot (\text{Eigengewicht}) + 0,75 \cdot (\text{Wind})$

noch folgende aus Windgeschossen begrenzter Grösse und Intensität herrührende Biegemomente aufgenommen werden:

- Ringbiegemoment  $M_R = \pm 0,004 \cdot (q) \cdot (a^2)$
  - Meridianbiegemoment  $M_M = \pm 0,001 \cdot (q) \cdot (a^2)$
- $q$  = max. Windstaudruck  
 $a$  = Radius der Schale

##### Kritischer Zustand

- d)  $1,0 \cdot (\text{Eigengewicht}) + 1,5 \cdot (\text{Wind})$

##### Betriebserdbeben

- e)  $1,0 \cdot (\text{Eigengewicht}) + 1,0 \cdot (\text{Erdbeben})$

##### Zulässige Spannungen

- Gebrauchszustand gemäss SIA (Haupt- und Zusatzbelastungen)
- Kritischer Zustand gemäss VIK  
für Stahl III:  $\sigma_{ezul} = \sigma_{0,2}$   
für Stahlbeton:  $\sigma_{bzul} = \frac{2}{3} \cdot \beta_{w28}$
- Betriebserdbeben gemäss SIA (Richtlinie 31)

##### Stabilitätsnachweis

Unter Einwirkung von Eigengewicht und Windlast soll die Beulsicherheit der Kühlerschale mit folgenden Faktoren gewährleistet werden:

- Bauzustand 3
- Ausführungszustand 5



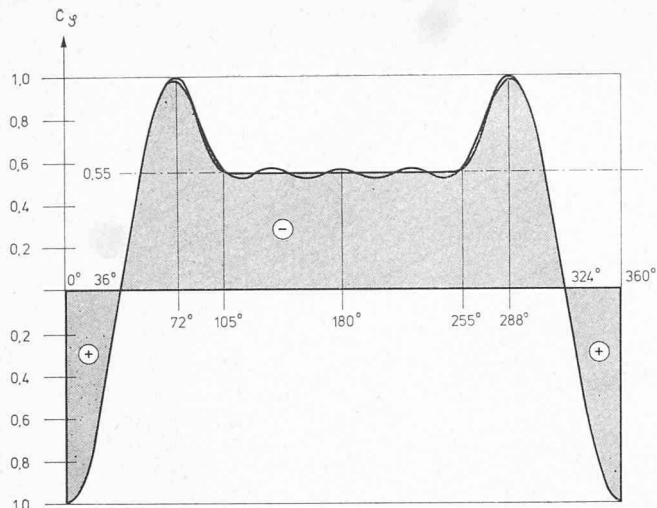


Bild 4. Approximation der Winddruckverteilung mittels sieben Fourier-Koeffizienten

## Statische Berechnung

### Berechnung der Schalen-Schnittkräfte

#### Modell

Die Berechnung der Schalenchnittkräfte erfolgt mit Hilfe eines *Schalenprogramms mit rotationssymmetrischen Elementen*. Das Modell umfasst den *oberen Ringträger*, die *Kühlerschale*, die *A-Stützen* sowie die *elastisch gebetteten Fundamente*. Dabei müssen die A-Stützen und die Einzelfundamente «verschmiert» werden. Dies darf bedenkenlos geschehen, da beide Konstruktionselemente ja nicht Gegenstand dieser Untersuchung sind, sondern lediglich die bestmögliche Abbildung des Einspanngrades des unteren Schalenrandes bewirken sollen. Die «Verschmierung» wird also derart vorgenommen, dass die Verschiebungs- und Drehsteifigkeit der Ringelemente den tatsächlichen Werten des Stützenfachwerkes entspricht. Unerwünschte Einflüsse der *Querkontraktion*

(Schalencharakter der Ringelemente) lassen sich ausschalten durch die geeignete Wahl der Poissonschen Zahl oder des E-Moduls in Ringrichtung.

#### Belastungen

Die rotationssymmetrischen Belastungen wie *Eigengewicht* und *Temperaturgradient* können problemlos behandelt werden. Die Abbildung der Winddruckverteilung muss durch eine *Fourier-Entwicklung* angenähert werden. Wie aus Bild 4 ersichtlich ist, wird bei Berücksichtigung von sieben Harmonischen eine zufriedenstellende Approximation gefunden. Da die Winddruckverteilung eine gerade Funktion darstellt, verschwinden die Sinusglieder, und es sind lediglich sieben Cosinusglieder zu berechnen.

#### Typische Schnittkraftverläufe

Das Eigengewicht des Kühlers wird vollständig durch *Membranspannungen* abgetragen. Die grössten Werte entstehen am unteren Schalenrand.

Der *Lastfall Wind* bewirkt sowohl Normalkräfte als auch Meridian- und Ringbiegemomente. Bild 5 zeigt eine räumliche Darstellung der meridionalen Normalkräfte, die im unteren Schalen-Drittel ein Maximum von + 58 Mp/m aufweisen. Die tangentialen Normalkräfte sind im mittleren und oberen Bereich der Schale am grössten und erreichen bei einem Winkel von 100 bis 120° einen Wert von + 40 bis + 50 Mp/m. Da die Biegemomente weder bei diesem noch beim Lastfall «Temperatur» von Bedeutung sind, werden sie nicht weiter behandelt.

#### Armierung der Kühlerschale

*Meridionale Armierung.* Der für die Bemessung einer Kühlerschale massgebende Lastfall ist

$$1,0 \cdot (\text{Eigengewicht}) + 1,5 \cdot (\text{Wind})$$

Der erforderliche Armierungsquerschnitt  $F_e$  variiert somit im unteren Schalenbereich von 3 bis max. 5 cm<sup>2</sup>/m je Schalenlaibung. Im oberen Bereich wird die von der VIK geforderte Minimalarmierung massgebend. Die gewählten Durchmesser betragen 8–16 mm.

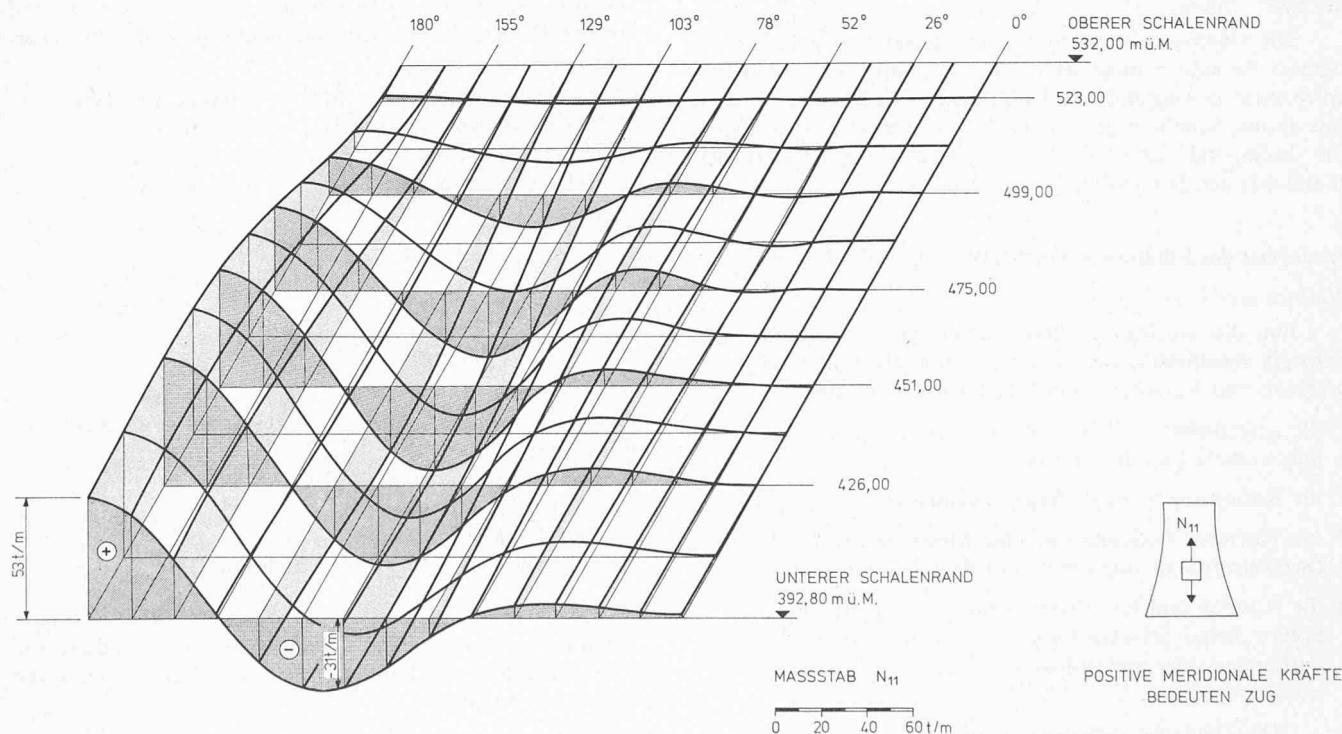


Bild 5. Typischer Verlauf der meridionalen Normalkräfte infolge Windlast

**Tangentiale Armierung.** Die tangentielle Armierung im unteren und mittleren Schalenbereich besteht weitgehend aus  $\varnothing 8$  und  $\varnothing 10$  mm,  $e = 20$  cm sowohl in der äusseren als auch in der inneren Schalenlaibung. Oberhalb der Taille nimmt die Armierung zu bis zu einem maximalen  $Fe_{erf}$  von  $5,5 \text{ cm}^2/\text{m}$  am oberen Schalenrand. Massgebend wird hier der Lastfall  $1,0 \cdot (\text{Eigengewicht}) + 0,75 \cdot (\text{Wind}) + \text{Ringbiegemoment } M_R$

### Berechnung der Kräfte am unteren Schalenrand

Die Fundamente im Bereich der Warmwasserzulaufkanäle und des Auslaufbauwerkes stehen auf Magerbetonsockeln, während die übrigen Fundamente auf einer Austauschschicht gegründet sind (Bild 6). Die unterschiedliche Ausbildung der Fundamentunterlage tendiert zu differentiellen Setzungen der Fundamente, deren Auswirkungen auf die Spannungen im unteren Schalenrand und in den Stützen es zu untersuchen gilt. Das Problem wird mittels einer finiten Element-Berechnung untersucht. Das dazu verwendete Modell ist in Bild 7 gezeigt.

Durch Ausnützung von Symmetriebedingungen genügt es, einen Sektor von  $90^\circ$  abzubilden, der unter Berücksichtigung einer genügenden Abklinglänge des Schalenmeridians mit 24 m Höhe gewählt wird. Für das gesamte Modell werden 230 Plattenelemente, 25 Stäbe und 26 Federelemente verwendet.

Untersucht wird der Lastfall Eigengewicht, wobei dem oberen Modellrand die Schnittkräfte der Schalenberechnung als Randbedingungen auferlegt werden. Die Berechnungen zeigen, dass bei der Annahme eines Bettungsziffern-Verhältnisses von 1 : 2 im unteren Schalenrand Schnittkraftvergrößerungen gegenüber dem Lastfall Eigengewicht bis zu 20 Prozent auftreten.

### Seismische Untersuchung

#### Berechnungsverfahren

Bei der Anregung durch ein Erdbeben erfahren alle Massenelemente der Kühlturmes eine gleichgerichtete translatorische Beschleunigung. Dieser Belastung ist es jedoch nicht möglich, wesentliche Umfangs-Schwingungsformen der Kühlerschale anzuregen. Somit kann die seismische Untersuchung auf die Behandlung der Kragarmschwingung reduziert werden.

Die dynamische Analyse wird an einem Feder-Massen-Modell durchgeführt, das die Kühlerschale sowie die Stützen und Fundamente repräsentiert. Die Struktur-Steifigkeiten werden der Schalenberechnung sowie einer separaten Berechnung des Stützenfachwerkes entnommen. Beachtung wird auch der gegenseitigen Beeinflussung von Bauwerk und Baugrund geschenkt und durch horizontale und vertikale Bodenfedern Rechnung getragen.

Infolge der enormen (translatorischen) Steifigkeit der Kühlerschale erfährt diese weitgehend eine Starrkörperbewegung auf einem relativ weichen Stützenfachwerk. Interessanterweise überlagert sich bei der anfänglich vermuteten reinen Kragarmschwingung eine Art «Pendelschwingung», die ihre Begründung in den kinematischen Verschiebungen des Stützenfachwerkes findet.

#### Schnittkräfte unter seismischer Belastung

Zur Ermittlung der Schnittkräfte wird eine Antwort-Spektrum-Analyse durchgeführt, die für das System eine niedrigste Eigenfrequenz von 1,6 Hz ergibt. In der Kühlerschale werden vorwiegend meridionale Zug- und Druckspannungen erzeugt, die am unteren Schalenrand ein Maximum von  $\pm 30 \text{ Mp/m}$  erreichen. Dies entspricht etwa der Hälfte von den durch das Eigengewicht erzeugten Schnittkräften.

Andererseits erhält dieser Lastfall eine wesentliche Bedeutung für die Bemessung der Stützen. Ein Vergleich der Stützenkräfte mit anderen Lastfällen ergibt folgendes Bild:

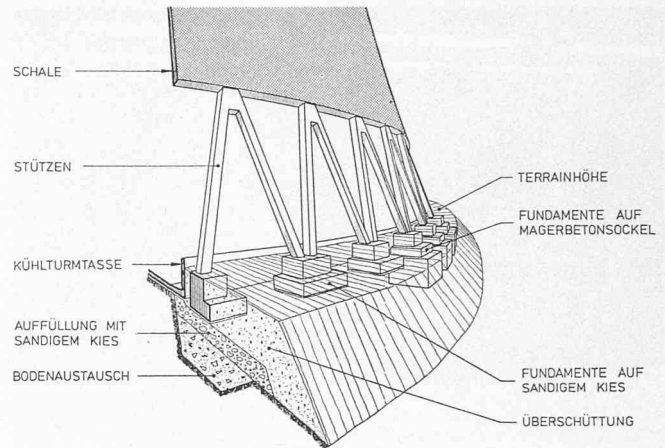


Bild 6. Fundationsarten der Einzelfundamente

Lastfall	max. Stützenkraft (%)
Eigengewicht	100
$1,0 \cdot \text{Wind}$	70
$1,5 \cdot \text{Wind}$	105
Erdbeben horizontal	125
Erdbeben vertikal	10

Eine Gegenüberstellung der vorgängig beschriebenen Lastkombinationen und Spannungsgrenzen zeigt, dass für die Bemessung der Stützen Lastfall  $e$

$1,0 \cdot (\text{Eigengewicht}) + 1,0 \cdot (\text{Erdbeben})$  massgebend wird.

### Der Modellversuch im Windkanal

Im Zuge einer bauherrseitigen unabhängigen Überprüfung der Schalenberechnung wurden die Central Electricity Research Laboratories (CERL) in England mit der Durchführung eines Modellversuches beauftragt (Bild 8).

Die wichtigsten Komponenten des von den CERL entwickelten Verfahrens, das seit 1965 ständig verfeinert wurde, sind:

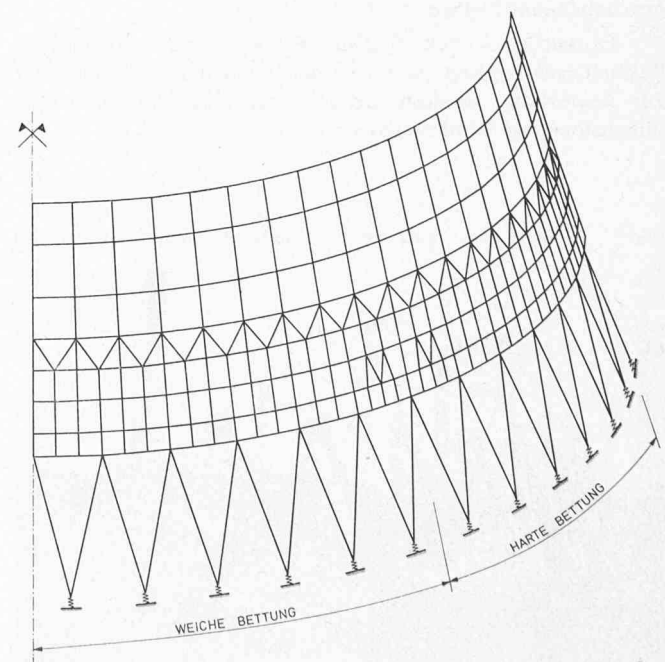


Bild 7. FEM-Modell zur Untersuchung des unteren Schalenrandes

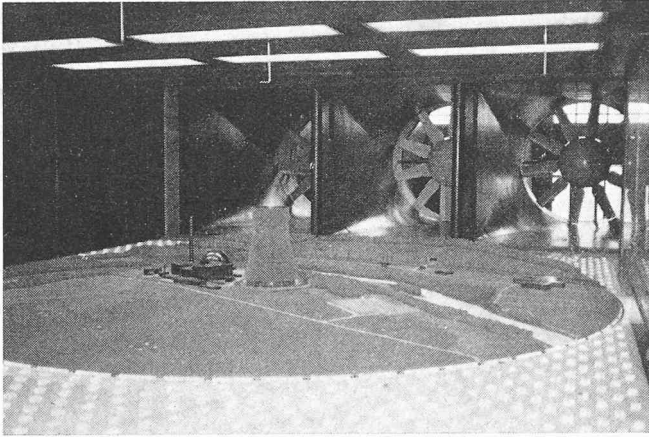


Bild 8. Modell im Windkanal der CERL

- Simulation des natürlichen Windes
- geometrisch ähnliches Modell der Anlage und der näheren Umgebung
- aeroelastisches Modell des Kühlturmes
- Beachtung der Effekte der Reynoldszahl und der Oberflächenrauigkeit
- saubere Verstärkung des Strain Gauges Outputs
- computermässige Handhabung der Daten
- Verallgemeinerung der Messergebnisse bezüglich Windgeschwindigkeit

Bei der gewählten Versuchsanordnung werden im Kanal Turbulenzen erzeugt, die mittels statistischer Betrachtungen bezüglich Frequenzen und Intensitäten auf den natürlichen Wind abgestimmt sind.

Das gesamte Modell umfasst die *Umgebung des Kühlturmes bis zu einem Radius von 600 m*. Aufgrund des Kanalquerschnittes wird ein geometrischer Massstab von 1 : 300 gewählt. Durch die Benützung eines *aeroelastischen Modells* bedient man sich eines *analogen* Datenträgers, der gleichzeitig die Eigenschaften der aerodynamischen als auch der mechanischen Übertragungsfunktion aufweist. Das bedeutet, dass zeitabhängig für eine Windbelastung direkt Spannungen in der Kühlerschale gemessen werden, während die Druckverteilungen unbekannt bleiben.

Es wurden an zwei Stellen die meridionalen Spannungsfuktuationen verfolgt. Somit ist die Versuchsanordnung nicht zur Bemessung, sondern vielmehr zur Überprüfung bereits dimensionierter Kühlerschalen geeignet.

Bild 9. Montage der A-Stützen mittels Autokran (Photo: M. Annoni)

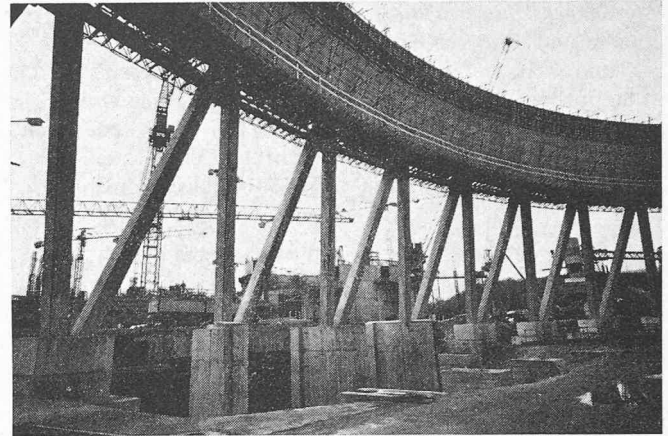
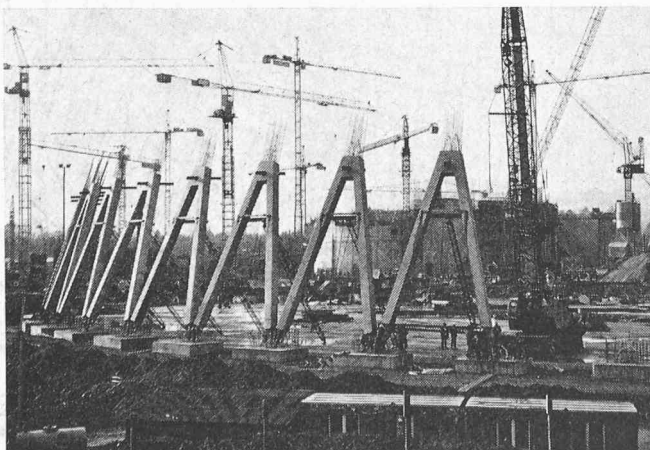


Bild 10. Konventionelle Schalung des unteren Schalenrandes (Photo: Mondo Annoni)

Durch die *drehbare Anordnung* von Gesamtmodell und Kühlturmmodell kann *jede beliebige Anströmrichtung* getestet werden. Der Versuch hat gezeigt, dass allein durch verschiedene Anströmrichtungen Änderungen der maximalen Schalenschnittkräfte bis mehr als 20 Prozent zu erwarten sind, die durch das Relief des Standortes sowie durch grössere vorgelagerte Gebäude bewirkt werden.

Der *Modellversuch* darf als eine *sehr günstige unabhängige Überprüfung* gewertet werden, da er von ganz anderen Voraussetzungen und Vereinfachungen ausgeht als die reine Computerrechnung.

## Fundation und konstruktive Ausbildung

### Baugrundverhältnisse am Standort und Fundation

Die Baugrundverhältnisse am Standort Gösgen sind durch *sandig-kiesige Talböden* charakterisiert, die mit einer Mächtigkeit von etwa 30 m das aus Kalksteinen und harten Mergeln bestehende Grundgebirge überlagern.

Im Rahmen der auf dem Kernkraftwerkareal durchgeführten Sondierkampagnen wurden auch im Bereich des Kühlturmes *Tiefbohrungen bis 50 m* vorgenommen. Ergänzende Schürfungen haben gezeigt, dass den sandig-kiesigen Talböden bereichsweise *schluffige Feinsande* aufliegen, deren Tragverhalten geringer einzuschätzen ist. Somit war es angezeigt, den Oberflächenverlauf der Talböden innerhalb der Grundrissfläche des Bauwerkes durch Sondierungen mit einer leichten *Rammsonde* genauer festzustellen. Aufgrund dieser sowie ergänzender bodenmechanischer Untersuchungen waren nach einem Austausch der schluffigen Feinsande die Voraussetzungen für eine *Flachgründung* gegeben.

Eines der typischen Merkmale der in Gösgen ausführenden Bauunternehmung ist die *Bevorzugung von Einzelfundamenten gegenüber einem Ringfundament*. Diese Bauweise darf, solange die *Gleitsicherheit der Sohlenfuge gewährleistet* ist, bedenkenlos angewendet werden. Als Vorteile bringt sie eine *Reduktion der Aushubarbeiten* sowie eine wesentlich *einfachere Führung der Zu- und Rückflusskanäle*.

Die Fundamente erzeugen im Gebrauchszustand eine Bodenpressung von rund 4,5 kp/cm<sup>2</sup>.

### Konstruktive Gesichtspunkte

Eine Vielzahl von konstruktiven Merkmalen wird bereits durch die Spezifikation der VIK-Richtlinien und SIA-Normen vorgegeben. So sind z. B. für die Kühlerschale folgende Massnahmen einzuhalten:



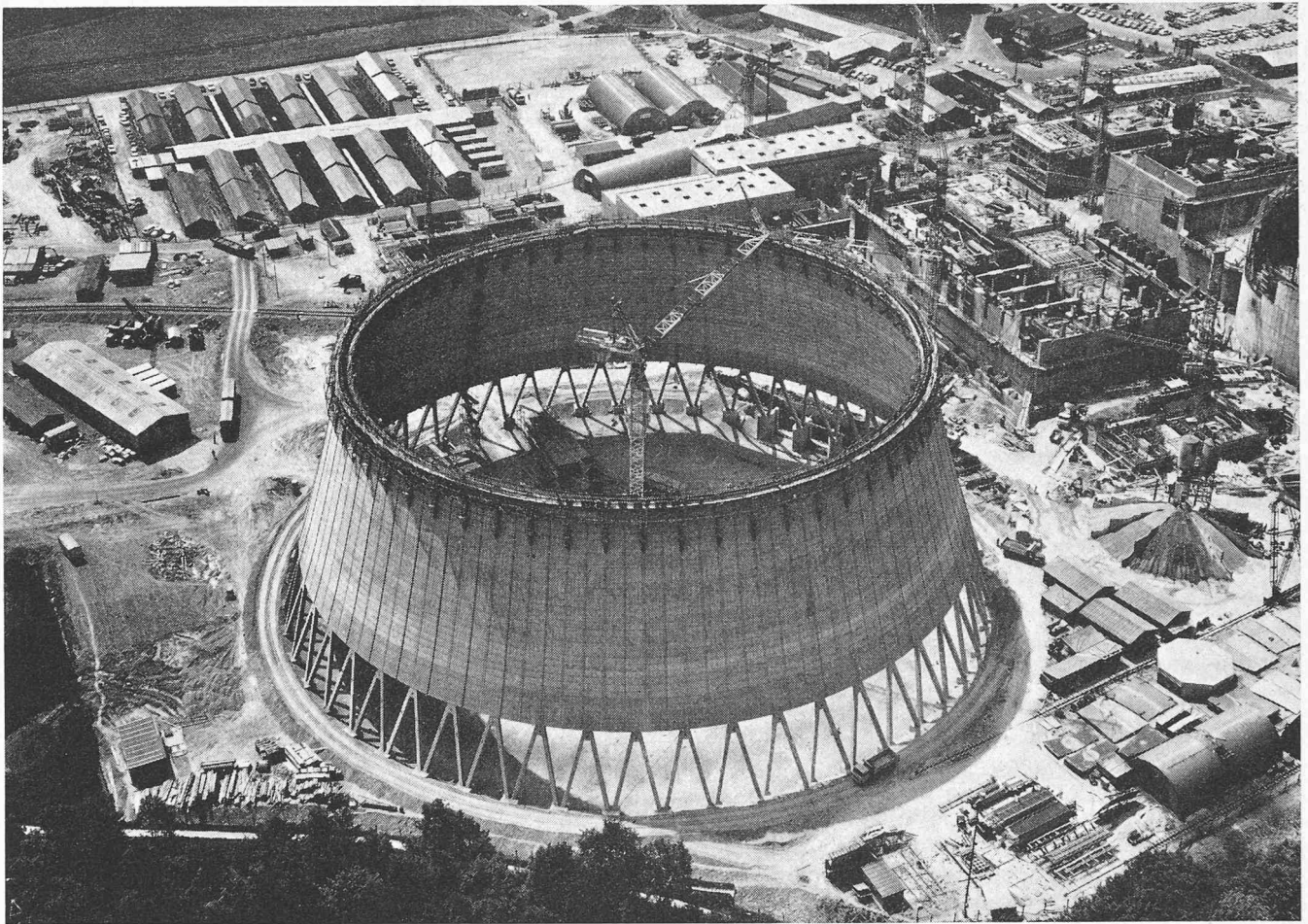


Bild 11 (oben). Kletterschalung und Betonier-  
vorgang mit Hilfe des zentralen Turmdreh-  
kranes (Comet-Photo)

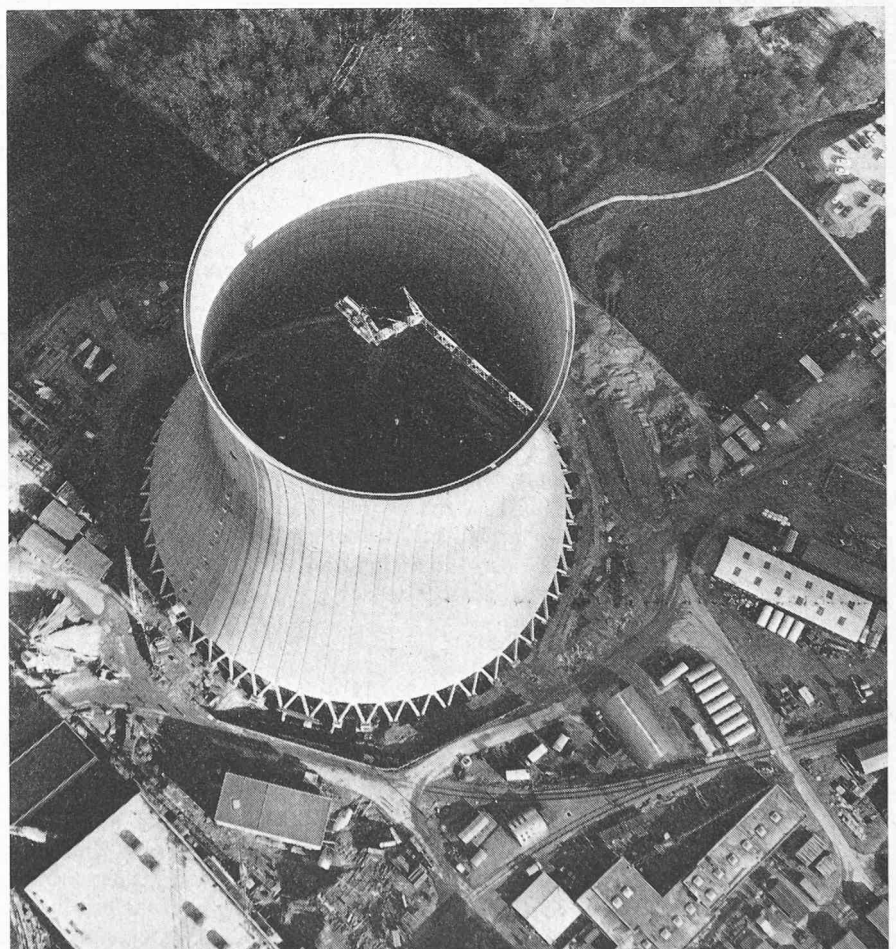


Bild 12 (rechts). Innenliegende obere Ringver-  
stärkung (Comet-Photo)



- min. Schalenstärke 14 cm
- zweiachsige Bewehrung pro Schalenlaibung
- min. Armierungsquerschnitt (pro Richtung und Schalenlaibung) 2 cm<sup>2</sup>/m
- max. Abstand der Stäbe 20 cm
- min. Betonüberdeckung 2 cm
- genügende Aussteifung des unteren und oberen Schalenrandes
- Anordnung von Windrippen

Die einzelnen Konstruktionsteile sind in folgenden Betonqualitäten ausgeführt:

- Fundamente BH 300
- Stützen BS 450
- Schale BH 300

Zur Qualitätssicherung und Qualitätsüberwachung der in Gösigen verwendeten Betonrezepturen wurden *Frostbeständigkeit*, *Wasserundurchlässigkeit* und *Festigkeit* geprüft. Die Prüfungen erfolgten im Zentrallabor der Bauunternehmung, im LPM-Labor, Beinwil, sowie an der EMPA. Massgebend für die Versuchsanordnungen und Bewertungen der Prüfungen waren die SIA 162 sowie die DIN 4226.

### Bauvorgang

Parallel zu den Aushub- und Betonierungsarbeiten für die Einzelfundamente wird im ganzen Bereich der Wassertasse eine *Sauberkeitsschicht* eingezogen, die eine ausgezeichnete Arbeitsfläche ergibt. Auf dieser werden entlang dem Turmumfang die A-Stützen liegend in einigen vorgefabrizierten Schalungen betoniert und sukzessive mit einem Autokran versetzt (Bild 9). Dabei sorgen die an den Stützenfüssen angebrachten Bolzen für eine exakte Zentrierung. Die Stützen werden durch radiale Streben gehalten und in die richtige Neigung gebracht. In die Stützenköpfe werden Montage-Träger verkeilt, welche die Rüstträger der konventionellen Schalung des unteren Schalenrandes aufnehmen. Nach dem Betonieren des unteren Schalenrandes kann die konventionelle Schalung entfernt und die Kletterrüstung angesetzt werden (Bild 10).

Die Kletterrüstung besteht aus den inneren und äusseren Klettertürmen, die mit einer hydraulischen Hubvorrichtung ausgestattet sind, und den Teleskopbühnen, die sich dem ständig ändernden Umfang der Kühlerschale anpassen.

Als Tagesleistung wird das einmalige Umsetzen der Kletterschalung eingehalten, was einen Betonierfortschritt von 1 m ergibt. Die demzufolge täglich erforderliche Betonmenge ist mit 50 bis 100 m<sup>3</sup>/Tag relativ gering, so dass die Verwendung von Transportbeton angezeigt ist. Der Beton wird mit Hilfe des zentralen Turmdrehkranes eingebracht, der wöchentlich einmal aufgestockt wird (Bild 11). Ein besonderes Problem bereitet die Betonierung des oberen Ringträgers, da in respektabler Höhe wiederum auf eine konventionelle Schalung gewechselt werden muss (Bild 12).

Die *Bautoleranzen* betragen für alle Konstruktionsteile  $\pm 1$  cm. Beim Durchmesser der Kühlerschale werden Abweichungen von  $\pm 5$  cm zugelassen.

Die *Bauzeit*, die für den gesamten Kühler etwa 18 Monate beträgt, kann wie folgt gegliedert werden:

- Baustelleninstallationen, Erdarbeiten, Gründung 3 Monate
- Stützenfachwerk mit unterem Randglied und Montage der Kletterschalung 3 Monate
- Kühlerschale mit oberem Randglied 5 Monate
- Wassertasse und Rieselrost 7 Monate

Durch geeignete *Terminplanung* ist es möglich, den Kletturvorgang ins Sommer-Halbjahr zu legen, so dass eine Überwinterung der unvollständigen Schale vermieden werden kann.

### Referenzen

- [1] *Armitt J.*: «Symposium on Vibration Problems in Industry». Keswick, April 1973.
- [2] *Zerna W., Krätzig W., Peters H.L.*: «Konstruktiver Ingenieurbau, Berichte». Heft 1, Essen, April 1968.
- [3] *Vereinigung Industrielle Kraftwirtschaft (VIK)*: «Technischer Leitfaden zum Bestellen von Kühltürmen». Essen, Januar 1971.

Adresse der Verfasser: *H. Furrer*, Ingenieur SIA und *L. Mischol*, dipl. Ing. ETH/SIA, Motor-Columbus Ingenieurunternehmung AG, 5401 Baden.

## Das Raumexperimentier-Laboratorium der ETH Lausanne

Das Raumexperimentier-Laboratorium (LEA) ist ein Hilfsmittel für den Architektorentwurf. Es ermöglicht eine rasche und einfache Simulation von architektonischen Räumen im Massstab 1:1. Mit Hilfe von Kunststoffsteinen, mobilen Decken und Zwischenböden können Teile eines Projektes nachgebildet werden, wie Wohnungen, Klassenzimmer, Seminar- und Bibliotheksräume, Büros, Krankenzimmer, Teile von Museen. Das Laboratorium dient nicht der technischen Prüfung von Prototypen, sondern der Simulation des Architekturraumes mit seinen formalen Eigenschaften.

### Weshalb wurde das LEA geschaffen?

Der architektonische Raum ist eine Hülle unseres täglichen Lebens. Ihre Eigenschaften werden bestimmt von der Geometrie der Gebäudeteile, deren Abmessungen und Proportionen, dem Öffnungs- und Schliessungsgrad der Wände und Decken, der Baustoffe und ihrer Oberfläche, der Farbe und Lichtführung und der Raumakustik. In Wirklichkeit ist die Zahl der Eigenschaften, die das Raumerlebnis beeinflussen, unendlich gross. Bei der Projektierung stellen sich dem Architekten daher jedesmal neue Probleme, und jedes Bau-

objekt, wenn es nicht einfach wiederholt wird, hat einen prototypischen Charakter. Das LEA erlaubt, die Wirklichkeit projektierte Räume zu überprüfen und neue Möglichkeiten zu untersuchen.

Oft entdeckt der Architekt erst, wenn der Bau fertiggestellt ist, was er hätte besser machen können. Jedes Projekt bereitet, wenn es in ein Gebäude umgesetzt ist, nicht nur erfreuliche Überraschungen, sondern auch Enttäuschungen. Mit Versuchen im natürlichen Massstab kann manches im Projektstadium verbessert werden.

Einer besonderen Schwierigkeit steht immer der Architekturstudent gegenüber. Er erlernt das Entwerfen, und seine Projekte werden kritisiert; aber bis zum Diplom hat er normalerweise nie die Möglichkeit, eines seiner Projekte oder Teile davon in der Wirklichkeit zu sehen. Er konstruiert Gedankengerüste, um bei der Ausarbeitung seiner Projekte Entscheidungen treffen zu können. Er kann aber nur ungenügend kontrollieren, wie weit das Gezeichnete mit seiner Vorstellung übereinstimmt. Das Modell in Naturgrösse erlaubt, die vorher projektierten Räume zu durchqueren, sich darin aufzuhalten, in ihnen Tätigkeiten auszuüben, kurz, das Geplante auf sich wirken zu lassen.