

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 68 (1950)  
**Heft:** 41

**Artikel:** Grosskühltürme für Kraftwerke, Berechnung und Bauausführung  
**Autor:** Fischer, Albert  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-58093>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 16.05.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Grosskühltürme für Kraftwerke, Berechnung und Bauausführung

Von ALBERT FISCHER, Dipl. Ing. ETH, Paris

## A. EINLEITUNG

Seit Kriegsende steht die Steigerung der Energieerzeugung in Frankreich im Vordergrund des industriellen Aus-

baues des Landes, und zwar aus folgenden Gründen: 1. Bedeutende Steigerung des Strombedarfs in Industrie und Haushalt; 2. Rückstand vor dem Krieg und Stillstand des Ausbaues seit 1939.

Ausser bedeutenden, teils fertiggestellten, teils im Bau begriffenen Wasserkraftwerken sind grosse Dampfkraftwerke notwendig. Ihre Errichtung läuft übrigens parallel zu der im Monnet-Plan vorgesehenen Steigerung der Kohlenförderung. Die gegebenen Standorte dieser Kraftwerke sind deshalb entweder die Kohlengebiete oder die Hüttengebiete, wo die Hochofengase zur Verfügung stehen.

Die Wassermengen, die zum Abführen der Kondensationswärmen notwendig sind, können nur in seltenen Fällen durch örtliche Wasserläufe immer frisch geliefert werden. Deshalb verwendet man stets das gleiche Wasser, das einen Kreislauf durchläuft und dabei in Türmen mit Luft gekühlt wird. Die dabei an die Luft abgegebene Feuchtigkeit ist durch Frischwasser zu ersetzen.

Zur Erzeugung elektrischer Energie verwendet man Turbinen mit Leistungen von 25000 bis 100000 kW. Die dabei im Kühlturm abzuführenden Wärmemengen betragen 45 bis 180 Mio kcal/h, die umlaufenden Kühlwassermengen 9000 bis 36000 m<sup>3</sup>/h. Prinzipiell unterscheidet man zwei Kühlungsarten:

1. *Statische (natürliche) Kühlung.* Der natürliche Luftzug des Kamins wird zur Abkühlung des Warmwassers verwendet. Für die angegebenen Wassermengen werden die Abmessungen der Türme bedeutend. Es sind Höhen zwischen 60, 80 und 100 m notwendig und die Durchmesser liegen zwischen 50 und 60 m. Die Errichtung solcher Bauwerke in Eisenbeton hat neue Berechnungs- und Konstruktionsprobleme aufgeworfen. Es sind Lösungen gefunden worden, die volle Befriedigung sowohl bezüglich der Bauzeit wie der Sicherheit der Bauwerke bieten; sie werden unten beschrieben.

2. *Dynamische (zwangsläufige) Kühlung.* Die Luft wird mechanisch mit Hilfe von grossen Ventilatoren in die Kamine geblasen. Die Höhe der Kamine kann wesentlich herabgesetzt werden, da sie nur noch dazu dienen, den Wasserdampf, der sich bei der Kühlung bildet, so hoch zu treiben, dass er nicht störend auf die Umgebung wirkt. Die Luftgeschwindigkeit kann gesteigert werden, da sie nur von der angesetzten Maschinenleistung abhängt. Die Bauwerke sind einfacher, jedoch ist mit einem bedeutenden Stromverbrauch zum Antrieb der Ventilatorengruppen zu rechnen.

Beide Lösungen finden Anwendung. Die Baukosten für die zwangsläufige Kühlung sind geringer, jedoch entstehen bedeutende Betriebsmittel- und Unterhaltskosten. Dynamische Kühlung wird hauptsächlich dort angewandt, wo der zur Verfügung stehende Platz knapp ist, sowie in den Gegenden mit heissem Klima.

Bei der natürlichen Kühlung sind die Baukosten grösser, jedoch entfallen praktisch jegliche Unterhaltskosten. In den meisten Fällen und besonders in den Industriegegenden mit kühlem Klima wie in Ost- und Nordfrankreich wird die Wahl auf grosse Stahlbetonkühler mit natürlichem Luftzug fallen. Die Erfahrung an den bisher ausgeführten und in Betrieb befindlichen Anlagen zeigt, dass Kühler mit natürlichem Luftzug, welches auch die Abmessungen der Türme seien, die wirtschaftlichere Lösung darstellen.

## B. DIE KÜHLTÜRME VON HERSERANGE

### 1. Allgemeines

Das im Bau befindliche Kraftwerk Herserange (bei Longwy, Dép. Meurthe et Moselle) soll 120000 kW liefern, die durch Turbinen von je 40000 kW erzeugt werden. Als Brennstoff dienen die Hochofengase von drei in der Gegend liegenden Hüttenwerken. Der erste Bauabschnitt umfasst zwei Turbinen. Zur Kühlung sind im ersten Ausbau zwei Kühltürme mit natürlichem Luftzug vorgesehen; ein dritter Turm ist für den späteren

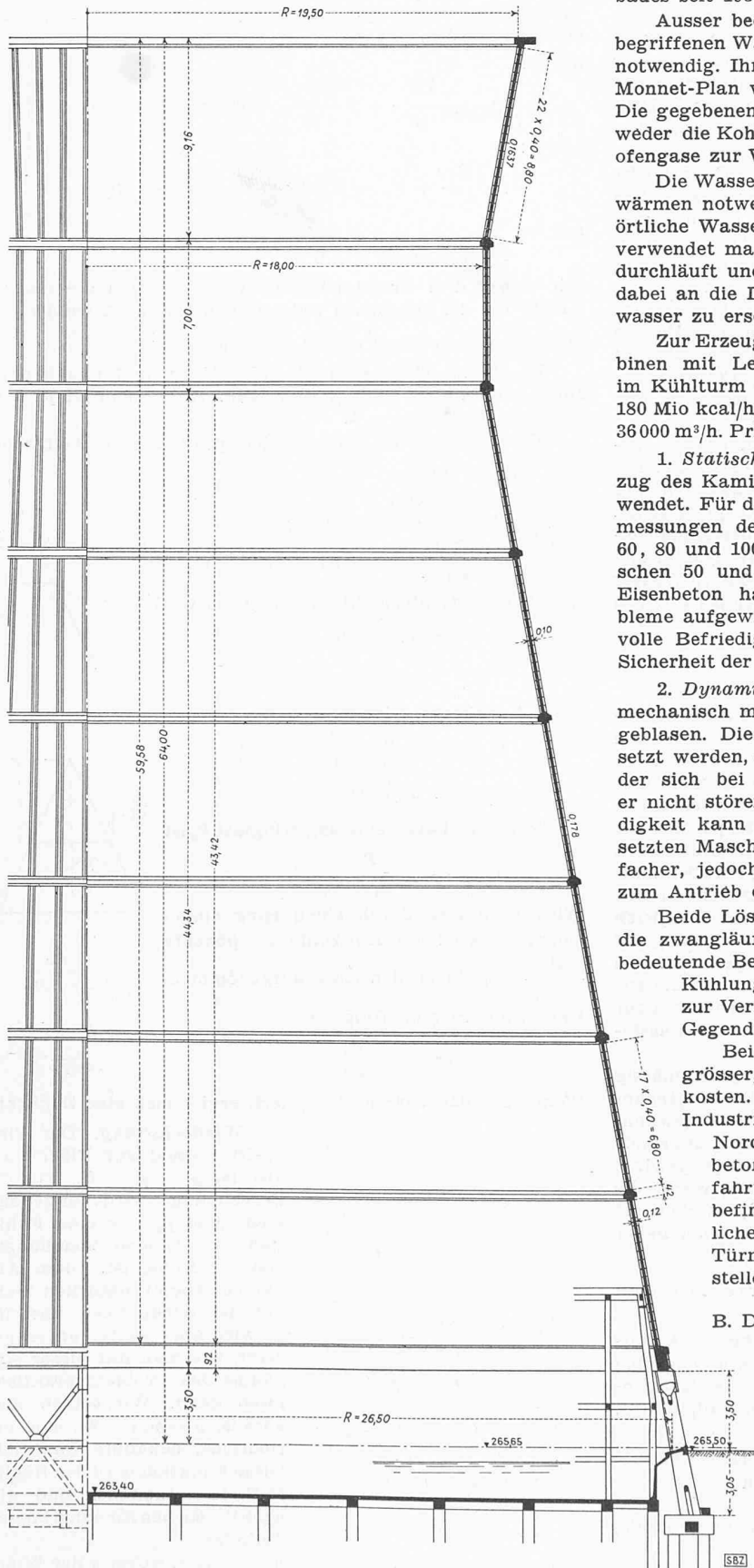


Bild 1. Teilansicht und halber Schnitt des Kühlturms in Herserange, 1:300

Ausbau geplant. Die umlaufende Kühlwassermenge pro Turm beträgt 14200 m<sup>3</sup>/h.

Das Bauwerk (Bild 1) umfasst: den Turm, den Unterbau, das Becken und die Berieselungsanlage. Es hat eine Gesamthöhe von 67,05 m über Fundamentoberkante. Der Turm selbst mit einer Höhe von 59,58 m ist durch einen unteren Kegelstumpf mit einem Fussdurchmesser von 51,52 m und einem Anzug von 0,178 gebildet. Seine Höhe beträgt 43,42 m. Daran angeschlossen ist ein Zylinderteil mit einem Durchmesser von 36,0 m und einer Höhe von 7,0 m. Der obere Teil mit 9,16 m Höhe ist durch einen umgekehrten Kegelstumpf mit einem Anzug von 0,1637 gebildet, so dass der obere Durchmesser 39,0 m beträgt. Acht Ringe sind über dem Haupttragring auf den Turm verteilt, von denen der oberste besonders kräftig ausgebildet ist. Die Wände haben von oben bis zum vierten Ring 10 cm Stärke, darunter 12 cm.

Der Unterbau ist durch einen steifen Ring (92 cm hoch) gebildet, der auf 36 geneigten Pfosten aufsitzt; diese geben die Vertikallasten auf Einzelfundamente ab, die auf vier Pfählen sitzen. Die Pfosten sind durch Diagonalen ausgesteift. Die Einzelfundamente sind durch zwei Fussringe miteinander verbunden, die die Horizontalkomponenten aus Eigengewicht und Wind aufnehmen. Mit Rücksicht auf den schlechten Baugrund hat man Wert darauf gelegt, das 2,25 m tiefe Becken unabhängig vom Kühlturm herzustellen. Der Turm ruht auf einem Pfahlrost. Zwischen Beckenrand und Unterkante Tragring ist eine freie Durchzughöhe von 3,50 m vorhanden. Der Beckenrand fällt mit der Erdoberfläche zusammen.

Die Berieselungsanlage wird durch ein Kanalsystem gebildet; die Kanalsohlen liegen 7,00 m über Beckenrand. Die Stahlbetonkanäle ruhen auf einem Säulennetz, das auf halber Höhe durch ein Netz von Horizontalriegeln ausgesteift ist. Das Wasser fliesst durch kleine Oeffnungen in den Kanalsohlen ab, fällt auf ein aus Holz hergestelltes Lattensystem und wird dadurch zerstäubt. Jeder Turm kann 14200 m<sup>3</sup>/h Wasser von 32° auf 27° kühlen bei einer mittleren Lufttemperatur von 15° und einer Luftfeuchtigkeit von 80 %.

## 2. Berechnung

### Anwendung der Membrantheorie

In Anbetracht der Tatsache, dass die Wandstärken gegenüber den Abmessungen der Bauwerke sehr gering sind, kann der Turm nicht mit den üblichen Berechnungsmethoden der Festigkeitslehre bemessen werden. Wir haben es mit einer Schale zu tun. Diese Bauglieder tragen ihre Lasten vorwiegend durch gleichmässig über die Wandstärke verteilte, parallel zur Mittelfläche wirkende Dehnungskräfte nach den Stützungen ab. Die Voraussetzungen der Schalenberechnung sind bekanntlich folgende: 1. Schalenstärke klein im Vergleich zu den Seitenabmessungen; 2. Durchbiegungen klein im Vergleich zur Schalenstärke; 3. Punkte, die vor der Formänderung auf einer zur Mittelfläche senkrechten Geraden liegen, befinden sich auch nach der Formänderung auf einer Geraden, die zur verformten Mittelfläche senkrecht steht; 4. die senkrecht zur Mittelfläche wirkenden Normalspannungen sind vernachlässigbar klein.

Setzt man nun voraus, dass die Spannungen gleichmässig über die Schalendicke verteilt sind und dass keine Biegespannungen auftreten, so kann die Membrantheorie angewandt werden. Diese Voraussetzungen sind der Berechnung zugrunde gelegt worden. Als Belastungen kommen das Eigengewicht und der Wind in Frage. Für die Windberechnung wurde die Windkurve der französischen Vorschriften (Règles Neige et Vent 1946) angenommen, auf die weiter unten noch näher eingegangen wird.

### Grundgleichungen der Membrantheorie für den Kegel

Wir betrachten ein Element der Mittelfläche der Kegelschale gemäss Bild 2 mit seiner Tangentialebene und wählen ein rechtwinkliges Koordinatensystem  $x, y$  in der Tangentialebene.  $x$  horizontal,  $y$  längs der Erzeugenden, Nullpunkt 0,  $z$  normal zum Flächenelement. Wir setzen:

- $\alpha$  = Winkel der Normalen mit der Kegelaxe ( $\alpha = C^t$ )
  - $d\beta$  = Winkel zwischen den beiden Erzeugenden
  - $r_\alpha$  = Radius des Parallelkreises
  - $R_\alpha$  = Krümmungsradius der Schale im betrachteten Punkt
- Es ist
- $$r_\alpha = y \cos \alpha, \quad y = R_\alpha \operatorname{tg} \alpha$$

$p$  = äussere Belastung pro m<sup>2</sup> Fläche mit ihren Komponenten  $p_x, p_y, p_z$   
 $N_y, N_\beta, N_{y\beta}$  = pro Längeneinheit wirkende innere Kräfte, nämlich  
 $N_y$  längs der Erzeugenden  
 $N_\beta$  längs des Parallelkreises  
 $N_{y\beta}$  Schubkraft

Zugkräfte sind positiv, Druckkräfte negativ. Die Gleichgewichtsbedingungen, die durch Projektion auf die drei Axen erhalten werden, lauten

$$\left. \begin{aligned} \text{auf } x: \quad & \frac{1}{\cos \alpha} \frac{\delta N_\beta}{\delta \beta} + y \frac{\delta N_{y\beta}}{\delta y} + 2 N_{y\beta} + p_x y = 0 \\ \text{auf } y: \quad & y \frac{\delta N_y}{\delta y} + N_y - N_\beta + \frac{1}{\cos \alpha} \frac{\delta N_{y\beta}}{\delta \beta} + p_y y = 0 \\ \text{auf } z: \quad & N_\beta + p_z y \operatorname{ctg} \alpha = 0 \end{aligned} \right\} \text{ I}$$

Mit diesen drei Grundgleichungen können nun die inneren Kräfte für die gegebenen Belastungen bestimmt werden.

### Drehsymmetrische Belastung

In diesem Falle sind  $N_y, N_\beta, N_{y\beta}$  von  $\beta$  unabhängig. Ihre Ableitungen nach  $\beta$  sind Null. Ausserdem ist  $p_x = 0$ , daher ist auch  $N_{y\beta} = 0$ .

**Eigengewicht.** Ist  $g$  das Gewicht pro Flächeneinheit, so ist

$$\begin{aligned} p_z &= g \cos \alpha \\ p_y &= g \sin \alpha \\ N_\beta &= -g \cos \alpha y \operatorname{ctg} \alpha \\ d \frac{(N_y y)}{dy} &= -y p_y - y p_z \operatorname{ctg} \alpha \end{aligned}$$

Ist  $\xi$  die Vertikalprojektion von  $y$ , so wird

$$\begin{aligned} N_\beta &= -g \xi \operatorname{ctg}^2 \alpha \\ N_y &= -\frac{g \xi}{2 \sin^2 \alpha} \end{aligned}$$

Beim Kegelstumpf ist  $N_y = 0$  für  $\xi = \xi_1$ ; sonst ist

$$\begin{aligned} N_y &= -\frac{g \xi}{2 \sin^2 \alpha} \left( 1 - \frac{\xi_1^2}{\xi^2} \right) \\ N_\beta &= -g \xi \operatorname{ctg}^2 \alpha \end{aligned}$$

**Ringlast.** Bei einer Gesamttringlast  $P_0$  ist

$$N_y = -\frac{P_0}{2\pi r_1 \cos \varphi}$$

Wird diese Last durch einen Ring eingeführt, so wird die Horizontalkomponente  $\frac{P_0}{2\pi r_1} \operatorname{tg} \varphi$  durch den Ring aufgenommen.

Die Druckkraft im Ring ist

$$D = p r = -\frac{P_0}{2\pi} \operatorname{tg} \varphi$$

Wenn  $\operatorname{tg} \varphi$  das Vorzeichen ändert, ergibt sich eine Zugkraft.

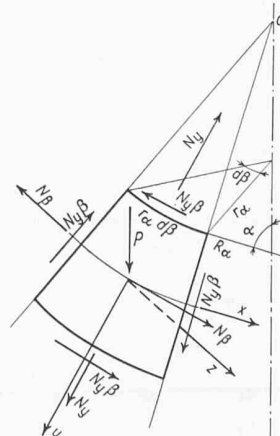
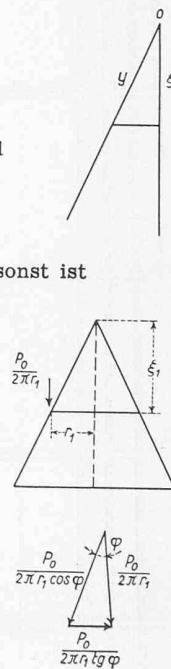


Bild 2. Element einer Kegelschale

**Windbelastung.** Der Wind greift normal zur Fläche an, also ist  $p_x = p_y = 0$ . Für die Berechnung wird angenommen, dass  $p_z$  nur eine Funktion von  $\beta$ , also unabhängig von der Höhe, ist. Diese Annahme stimmt natürlich nicht mit der Wirklichkeit überein; es wird aber weiter unten gezeigt, wie man mit dieser Annahme das Problem praktisch lösen kann. Wir setzen also voraus,  $p = p_z(\beta)$  sei eine periodische, bekannte Funktion. Diese Funktion wird den Règles N.V. 46 entnommen und gilt nach Versuchen für einen langen Zylinder.  
 $p = c(\beta) q$ , wobei  $q$  der Winddruck pro m<sup>2</sup> ist.



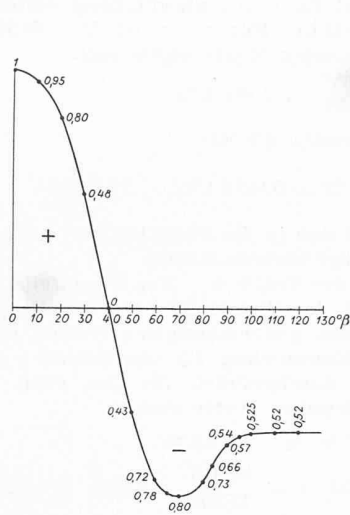
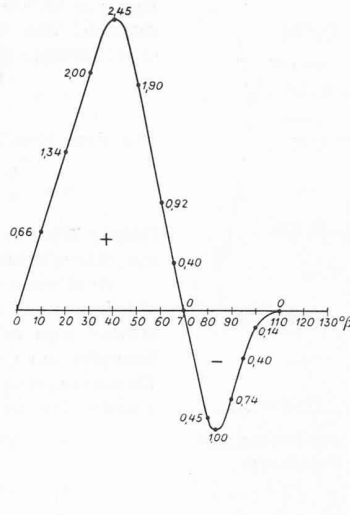
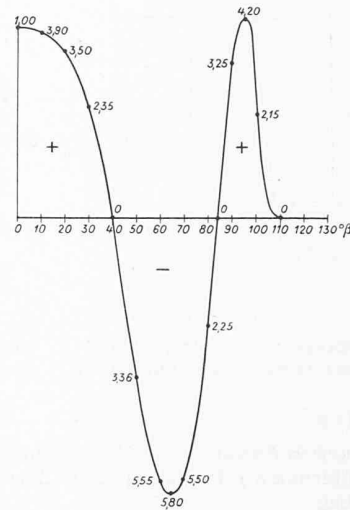
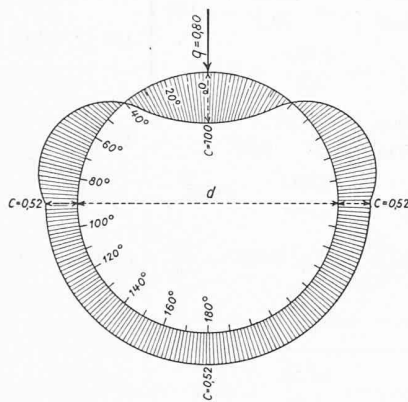
Bild 3.  $p/q$  = Winddruckverteilungskurve für  $q = 1$ Bild 4.  $p'/q$  = erste Ableitung von  $p/q$ Bild 5.  $p''/q$  = zweite Ableitung von  $p/q$ 

Bild 3a. Winddruck-Verteilung

Bild 3 gibt die Werte  $p/q = c(\beta)$  für den abgewinkelten Kreis, Bild 3a die selbe Kurve in radialer Auftragung.

Bemerkenswert ist, dass der Sog sich auf einen viel größeren Teil des Umfanges erstreckt als der Druck, und dass ab  $110^\circ$  der Sog konstant ist. An Hand der Versuchskurve 3 wurden geometrisch die Ableitungen  $p'/q$  und  $p''/q$  bestimmt, die in Bild 4 und 5 wiedergegeben sind. Kennt man also  $p = p_z(\beta)$ ,  $p'$  und  $p''$ , so können die Differentialgleichungen I gelöst werden und man erhält

$$\left. \begin{aligned} N_\beta &= -p y \operatorname{ctg} \alpha \\ N_{y\beta} &= \frac{\Phi}{y^2} + \frac{y p'}{3 \sin \alpha} \\ N_y &= -p y \frac{\operatorname{ctg} \alpha}{2} + \\ &+ \frac{\Phi'}{y^2 \cos \alpha} - \frac{y p''}{6 \sin \alpha \cos \alpha} - \frac{F}{y} \end{aligned} \right\} \text{II}$$

worin  $\Phi$  und  $F$  beliebige periodische Funktionen von  $\beta$  sind. Will man nun, dass für einen speziellen Wert  $y_1$  von  $y$  (Kegelstumpf)  $N_y$  und  $N_{y\beta}$  Null sind, so genügt es, für  $\Phi$  und  $F$  folgende Werte zu wählen:

$$\begin{aligned} \Phi &= -\frac{y_1^3}{3 \sin \alpha} p' \\ F &= -\frac{3 y_1^2}{6 \sin \alpha \cos \alpha} (p'' + p \cos^2 \alpha) \end{aligned}$$

In diesem Fall gehen die Gleichungen II in II' über:

$$\left. \begin{aligned} N_y &= -\frac{y}{6 \sin \alpha \cos \alpha} \times \\ &\times \left[ \left( 1 + \frac{2 y_1^3}{y^3} - \frac{3 y_1^2}{y^2} \right) p'' + 3 \cos^2 \alpha \left( 1 - \frac{y_1^2}{y^2} \right) p \right] \\ N_{y\beta} &= \frac{y}{3 \sin \alpha} \left( 1 - \frac{y_1^2}{y^2} \right) p' \\ N_\beta &= -\operatorname{ctg} \alpha y p \end{aligned} \right\} \text{II'}$$

Um die unendlichen Glieder und unbestimmte Werte zu vermeiden, wenn  $\alpha \rightarrow \pi/2$ , und um Gleichungen zu haben, die für den Zylinder als Grenzfall des Kegels gültig sind, ist es vorteilhaft, folgende Variablenänderung durchzuführen:

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{\pi}{2} - \alpha \\ r_1 &= y_1 \sin \varphi \\ h &= y \cos \varphi - r_1 \operatorname{ctg} \varphi \end{aligned}$$

ferner setzt man  $r/r_1 = \lambda$ , dann erhält man

$$\left. \begin{aligned} N_y &= -\frac{h^2}{2 r_1 \cos^3 \varphi} \frac{2 + \lambda}{3 \lambda^2} p'' - \frac{h \sin \varphi}{\cos^2 \varphi} \frac{1 + \lambda}{2 \lambda} p \\ N_{y\beta} &= \frac{h}{\cos^2 \varphi} \frac{1 + \lambda + \lambda^2}{3 \lambda^2} p' \\ N_\beta &= -\frac{r p}{\cos \varphi} \end{aligned} \right\} \text{II''}$$

Bemerkung. Für das Eigengewicht kann die selbe Umformung durchgeführt werden; man erhält damit

$$\begin{aligned} N_y &= -\frac{g}{2 \cos^2 \varphi} (1 + \lambda) h \\ N_\beta &= -g r \operatorname{tg} \varphi \end{aligned}$$

Sonderfall des Zylinders:

$$\left. \begin{aligned} r &= r_1 \quad \varphi = 0 \quad \lambda = 1 \\ N_y &= -\frac{h^2}{2 r_1} p'' \\ N_{y\beta} &= h p \\ N_\beta &= -r_1 p \end{aligned} \right\} \text{II'''}$$

Die Gleichungen II'' und II''' sind sehr einfache Formeln, mit denen man für ein gegebenes  $\lambda$  und  $h$  die inneren Kräfte schnell bestimmen kann.

Praktische Anwendung auf den Kühlturm

Der beschriebene Kühlturm ist aus mehreren Teilen zusammengesetzt: unterer Kegelstumpf, Zylinder, oberer Kegelstumpf. Die Diskontinuität an den Uebergangsstellen zweier verschiedener Elemente erlaubt es nicht, für den Wind einfach das Superpositions-gesetz anzuwenden, da die Randbedingungen der beiden Teile nicht die selben sind. Für die Berechnung eines bestimmten Schnittes betrachten wir deshalb fiktive kontinuierliche Körper, die das gleiche Drehmoment aufweisen wie der wirkliche Körper, die selbe Höhe und den selben Fussdurchmesser haben, also praktisch nur sehr wenig vom wirklichen Körper abweichen.

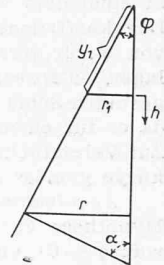


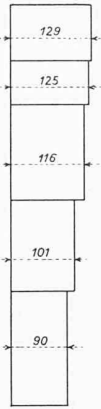
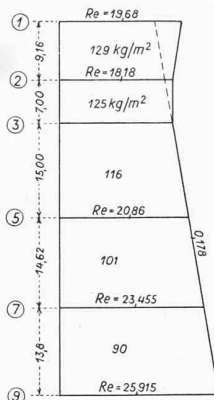
Bild 6. Winddruck  $q$  in Funktion der HöheBild 7. Mittelwertkurve für  $q$ 

Bild 8. Wirkliche und fiktive Turmform

### Windkräfte

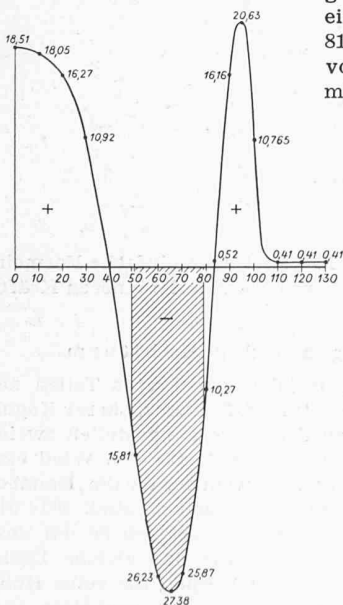
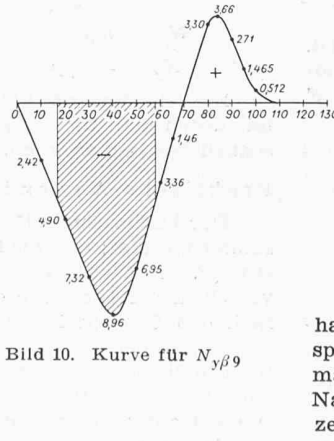
**Winddruck in Funktion der Höhe.** Laut den Règles N.V. 46 ist der Winddruck  $q_H$  in der Höhe  $H$  durch folgenden Ausdruck gegeben

$$\frac{q_H}{q_{10}} = 2,5 \frac{H + 18}{H + 60}$$

wobei  $q_{10}$  für normale Lagen  $50 \text{ kg/m}^2$  beträgt. Da die Türme in einer dem Wind ausgesetzten Gegend liegen, wurde ein Lagekoeffizient von 1,6 vorgeschrieben. Bild 6 gibt die Werte von  $q$  für verschiedene Höhen, die den angegebenen Ringlagen entsprechen. Der Formkoeffizient wurde infolge der geringen Schlankheit  $h/d = 60/45 = 1,33$  zu 0,6 angenommen, da er für einen unendlich langen, rauhen Zylinder 0,8 beträgt. Zur Vereinfachung der Berechnung wurde eine Mittelwertskurve gemäss Bild 7 angenommen.

**Aequivalenter gleichmässig verteilter Winddruck.** Unsere Hypothese zur Ermittlung der inneren Kräfte  $N_y$ ,  $N_{y\beta}$ ,  $N_\beta$  war  $q = C'$  auf die ganze Höhe. Der gleichmässige Winddruck wird folgendermassen bestimmt: 1. Berechnung des Drehmomentes des wirklichen Körpers mit den Druckkräften nach Bild 5 für eine bestimmte Höhenlage. 2. Berechnung des gleichmässigen Winddruckes, der für die selbe Höhe das selbe Drehmoment ergibt für einen fiktiven Kegelstumpf, der gleiche Neigung und gleiche Höhe hat wie der wirkliche Körper. Da die Windverteilungskurve (Bild 3) für einen Formkoeffizienten von 0,8 gilt und wir mit 0,6 rechnen, so wird der ermittelte  $q$ -Wert mit  $0,6/0,8 = 6/8$  multipliziert. Bild 8 zeigt den wirklichen Körper und punktiert den fiktiven, für den der gleichmässige Druck  $q$  bestimmt wird, der zur Bestimmung der inneren Kräfte auf Höhe des Haupttragringes dient. Die Berechnung

gibt für den wirklichen Körper ein Drehmoment von  $M = 8158,80 \text{ mt}$  mit den  $q$ -Werten von Bild 7. Der fiktive Kegel mit  $h = 59,58 \text{ m}$ ,  $R_{\text{Fuss}} = 25,915$ ,

Bild 9. Kurve für  $N_{y9}$ Bild 10. Kurve für  $N_{y\beta 9}$ 

$R_{\text{Kopf}} = 15,305$  hat für  $q = 1$  gleichmässig verteilt ein Drehmoment von  $66960 \text{ tm}$ . Für  $q = q$  ist  $M = 66960 q$ . Durch Gleichsetzen der beiden Werte ergibt sich

$$q = \frac{8158,80}{66960} = 0,122 \text{ t/m}^2$$

Mit dem Koeffizienten  $6/8$  ist

$$q = \frac{6}{8} 0,122 = 0,0915 \text{ t/m}^2 \sim 92 \text{ kg/m}^2$$

Dieser Wert wird nun in die Funktion  $p = c(\beta) q$  eingesetzt zur Berechnung der inneren Kräfte.

**Bestimmung der Kräfte  $N_y$ ,  $N_\beta$ ,  $N_{y\beta}$  infolge Wind.** Diese werden an Hand der Gleichungen II'' für die gewünschten Höhen und mit den gleichmässigen  $q$ -Werten ermittelt. Als Beispiel sei die Bestimmung für den Schnitt 9 oberhalb des Haupttragringes durchgeführt, für den oben  $q$  bestimmt wurde. Die numerischen Werte sind:

$$h = 59,58 \text{ m} \quad q = 92 \text{ kg/m}^2$$

$$r_1 = 15,305 \quad \lambda = \frac{25,915}{15,305} = 1,692 \quad \lambda^2 = 2,865$$

$$r_9 = 25,915$$

$$\text{tg } \varphi = 0,178 \quad \cos \varphi = 0,9844 \quad \sin \varphi = 0,175$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{h^2}{2r \cos^3 \varphi} &= \frac{59,58}{29,2} = 122 \\ \frac{2 + \lambda}{3 \lambda^2} &= \frac{3,692}{8,6} = 0,428 \end{aligned} \right\} 122 \times 0,428 = 52,3$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{h \sin \varphi}{\cos^2 \varphi} &= \frac{59,58 \times 0,175}{0,97} = 10,78 \\ \frac{1 + \lambda}{2 \lambda} &= \frac{2,692}{3,384} = 0,795 \end{aligned} \right\} 10,78 \times 0,795 = 8,56$$

$$N_y = -52,3 \times 0,092 \times \frac{p''}{q} - 8,56 \times 0,092 \times \frac{p}{q}$$

$$N_y = -4,82 \frac{p''}{q} - 0,79 \frac{p}{q}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{h}{\cos^2 \varphi} &= \frac{59,58}{0,97} = 61,5 \\ \frac{1 + \lambda + \lambda^2}{3 \lambda^2} &= \frac{2,692 + 2,865}{8,6} = 0,647 \end{aligned} \right\} 61,5 \times 0,647 = 39,8$$

$$N_{y\beta} = 39,8 \times 0,092 \times \frac{p'}{q}$$

$$N_{y\beta} = 3,66 \times \frac{p'}{q}$$

$$N_\beta = -\frac{r_9}{\cos \varphi} \times \frac{p}{q} = -\frac{25,915}{0,9844} \times 0,092 \frac{p}{q}$$

$$N_\beta = -2,43 \frac{p}{q}$$

Da wir nun  $p/q$ ,  $p'/q$ ,  $p''/q$  für verschiedene Werte von  $\beta$  kennen (Bilder 3, 4, 5), so sind auch die inneren Kräfte bekannt. Die Bilder 9, 10, 11 geben die Werte für den Schnitt 9.

Die Ermittlung ist äusserst einfach. Betrachten wir Bild 9. Wir gelangen zu dem Ergebnis, dass die Verteilung der Kräfte eine andere ist als die, die nach der Berechnung nach Navier auftritt. Bei einer gegebenen Windangriffsrichtung ist der Kegel in Richtung der Erzeugenden nur etwas mehr als über den

halben Umfang beansprucht. Der hintere Teil ist praktisch spannungslos. Wir haben zwei Zugmaxima und ein Druckmaximum auf etwas mehr als dem Viertelumfang. Nach Navier hingegen verteilen sich die Spannungen auf den ganzen Umfang. Die Maximalwerte, die auf dem Angriffsdurchmesser liegen, sind also in Wirklichkeit weniger gross als nach Navier. Bild 10 zeigt, dass die Schubspannungen auf dem hin-

Bild 11. Kurve für  $N_{\beta 9}$

teren Teil vollständig verschwinden. Die Dimensionierung nach Navier würde zu vollständig anderen Ergebnissen führen.

#### Eigengewicht

Auf die Berechnung des Eigengewichtes soll hier nicht weiter eingegangen werden, da sie keinerlei Schwierigkeiten bietet. Das Gesamtgewicht des Turmes oberhalb des Tragringes beträgt 3182 t,  $N_y = -20$  t/m,  $N_\beta = -1,61$  t pro m im Schnitt 9.

#### Spannungsermittlung

Zul. Spannungen: Beton      Stahl  
Eigengewicht  $E$ : 70 kg/cm<sup>2</sup> 1400 kg/cm<sup>2</sup>  
 $E$  plus Wind: 100      1600

Wir betrachten den Schnitt, für den wir die Wind- und Eigengewichtskräfte angegeben haben, also Schnitt 9. Wandstärke  $\varepsilon = 12$  cm; Armierung horizontal 5  $\varnothing 8$  pro lfm aussen und innen; Armierung vertikal 5  $\varnothing 8$  pro lfm aussen und innen.

Richtung  $N_y$ :

Eigengewicht       $-20,0$  t/m }  $-47,38$   
Wind max. Druck  $-27,38$

$$\sigma_y = \frac{47,38 \times 103}{100 \times 12 + 5 \times 15} = -37,2 \text{ kg/cm}^2$$

Eigengewicht       $-20,0$  }  $+0,63 \sim 0$   
Wind max. Zug  $+20,63$

Es treten keine Zugkräfte auf.

Ringspannung nach  $N_\beta$ . Die Werte sind sowohl für Druck wie für Zug gering.

Schubspannungen.  $N_{y\beta}$  max. = 8,96 t/m.

Der Beton allein kann 4 kg/cm<sup>2</sup> aufnehmen.

$$t_n = \frac{8,96 \times 10^3}{100 \times 12} = 7,46 \text{ kg/cm}^2$$

Die Bewehrung muss  $7,46 - 4,0 = 3,46$  kg/cm<sup>2</sup> aufnehmen, das heisst

$$T = 3,46 \times 12 \times 100 = 4,15 \text{ t}$$

daher

$$\sigma'_e = \frac{4,15 \times 10^3}{5,0} = 820 \text{ kg/cm}^2$$

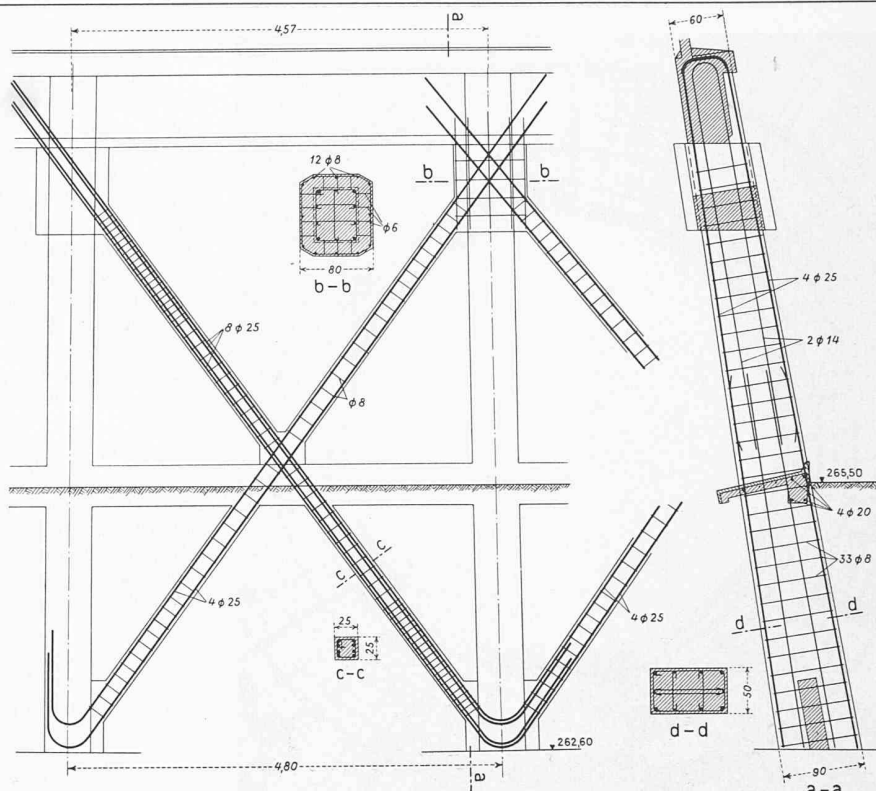
Es zeigt sich, dass die Spannungen sowohl des Betons wie des Stahls nicht sehr hoch liegen. Gemäss den Vorschriften N.V. 46 wurde auch der Fall von Windböen untersucht; die Windkräfte werden mit 5/3 multipliziert. Auch in diesem Fall genügen die Betonstärken und die Stahleinlagen. Die maximale Druckspannung des Betons beträgt in diesem Sonderfall  $\sigma_y = -66$  kg/cm<sup>2</sup>. Die Stahlspannung steigt auf  $\sigma_e = 1940$  kg/cm<sup>2</sup>, was bei diesen ungünstigen Annahmen zulässig ist.

Mit der selben Methode wurden weitere Schnitte untersucht und dimensioniert.

#### Knicken

Die angeordneten Ringe sollen ein Ausknicken der Schale verhindern. Das Knickproblem dünner Schalen ist komplexer Natur und der heutige Stand unserer Kenntnisse erlaubt es nicht, es mit einfachen Formeln zu lösen.

Das Problem kann in unserem Fall verschieden angefasst werden. Neue Untersuchungen, die in Amerika und Deutschland durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass man die kritische Knicklast für einen Zylinder, der axial und horizontal gleichzeitig belastet wird, bestimmen kann. Voraussetzung dafür ist, dass er oben und unten eingespannt ist. Diese Hypothese könnte für den Kühlturm angewandt werden. Die Versteifung der Pfosten durch



Bilder 12 und 13. Bewehrung der Diagonalen und der Pfosten, Masstab 1:80

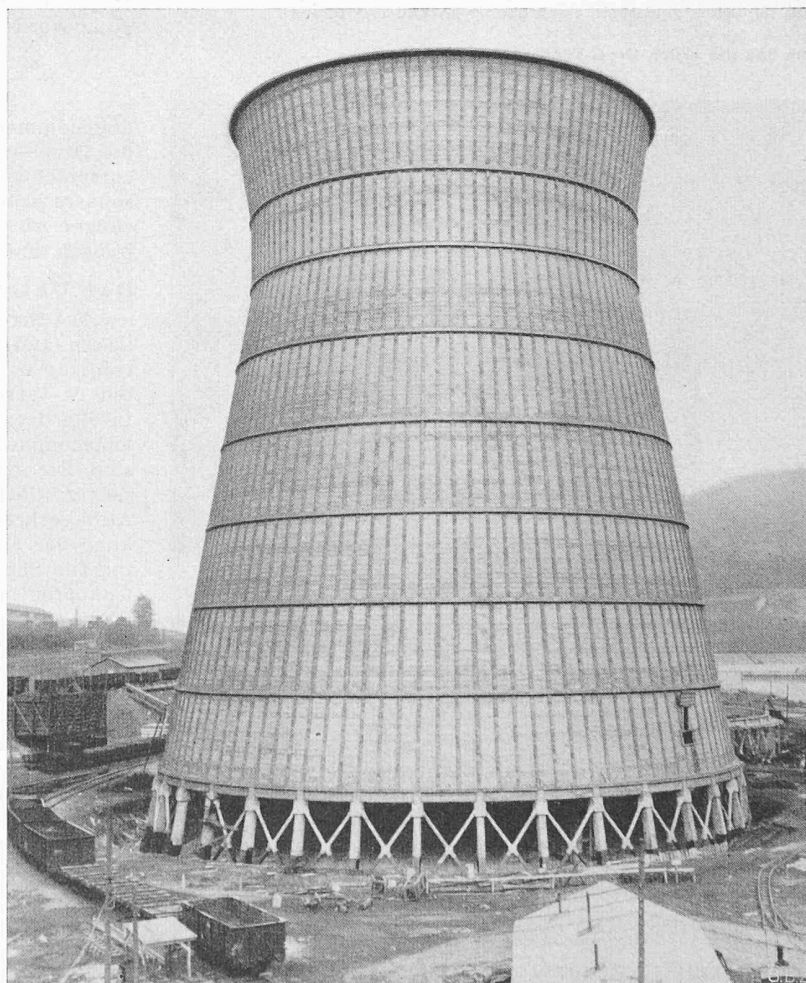


Bild 14. Der erste fertige Kühlturm in Herserange

die Diagonalen verhindert eine Ovalisierung am unteren Rande. Der obere Teil zwischen Ring 1 und 4 bildet eine Art Diavolo, der ebenfalls sehr steif ist, und die Schale oben ein-

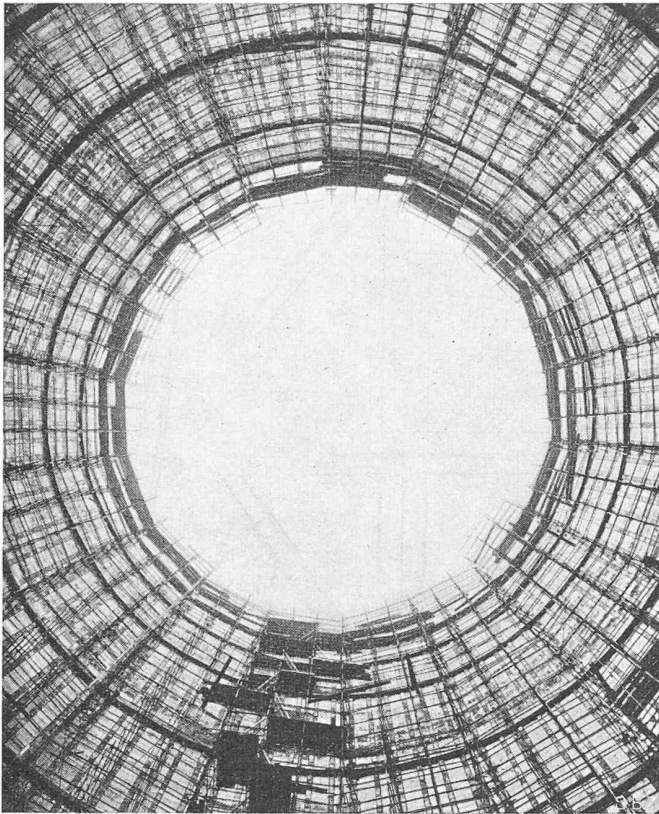


Bild 15. Blick senkrecht nach oben während des Baues

Vom Bau des ersten Gross-Kühlturms in Herzerange

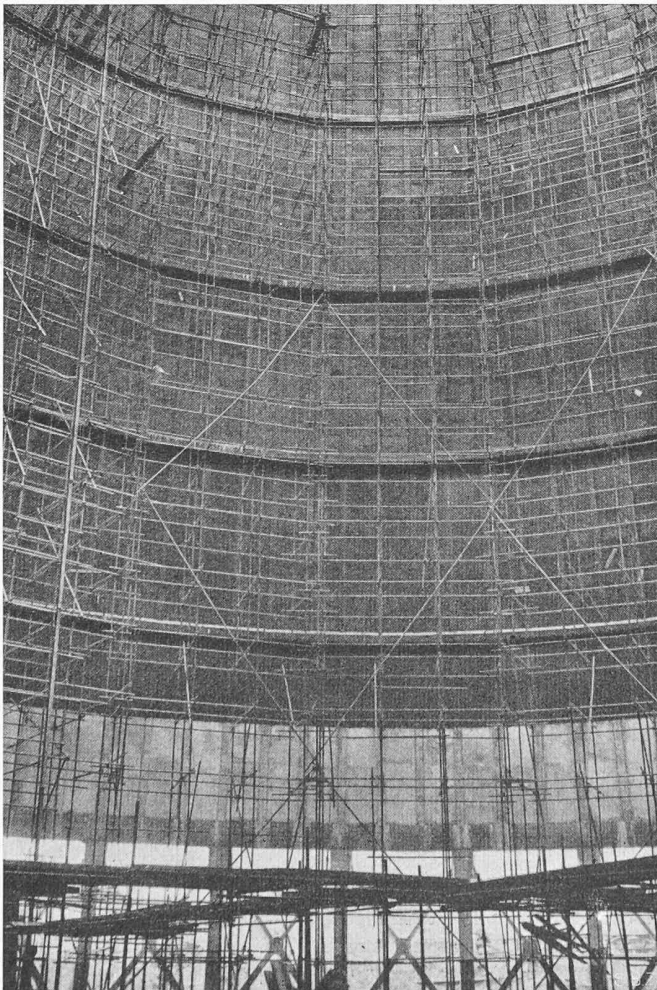


Bild 16. Stahlrohrgerüst, unterer Teil

spannt. Versuchsrechnungen, mit dieser Hypothese durchgeführt, haben gezeigt, dass die Schale allein knicksteif ist.

Aus Sicherheitsgründen ist eine ungünstigere Annahme getroffen worden. Es wurde angenommen, dass die Schale selbst nicht knicksteif sei. In diesem Falle müssen die Ringe die Druckkräfte aufnehmen können, die durch Wind und Eigengewicht von der oberen und unteren Hälfte der anschließenden Turmstücke ausgelöst werden. Da die Bestimmung der Schnittkräfte gezeigt hat, dass die maximalen durch den Wind bedingten Kräfte ungefähr so gross sind wie die des Eigengewichtes, wurde dieses Verhältnis bei der Berechnung der Knicklasten ebenfalls beibehalten.

Für den Elastizitätsmodul des Betons wurden folgende Werte angenommen: bei Eigengewicht  $E_b = 150\,000 \text{ kg/cm}^2$ , bei Eigengewicht plus Wind  $E_b = 250\,000 \text{ kg/cm}^2$ . Die Ringdruckkräfte werden mit der schon angegebenen Formel

$$D = \frac{P_0}{2\pi} \operatorname{tg} \varphi$$

bestimmt, wobei  $P_0$  das Eigengewicht des Ringes und der jeweiligen Hälfte des oberen und unteren, zwischen zwei Ringen befindlichen Turmstückes darstellt. Um den Wind zu berücksichtigen, wurden diese Werte verdoppelt. Die kritische Knicklast eines Ringes mit dem Radius  $R$  beträgt bekanntlich

$$P_{kr} = \frac{3EI}{R^2}$$

und die Spannung

$$\sigma_{kr} = \frac{3EI}{R^2 F}$$

wobei  $F$  den Querschnitt und  $I$  das Trägheitsmoment einschliesslich Eiseneinlagen bezeichnen. Die durch  $D$  hervorgerufene Druckspannung ist  $\sigma = D/F$ . Für die Dimensionierung wurde das Verhältnis

$$\frac{\sigma_{kr}}{\sigma} \geq 2$$

angenommen. In den Ringen, an den Unstetigkeitsstellen, sind die Druckkräfte, die durch den Neigungswechsel entstehen, entsprechend zu berücksichtigen. Der oberste Ring ist besonders kräftig ausgebildet worden, um zu starke Formänderungen zu vermeiden und um dem Bauwerk auch architektonisch einen Abschluss zu geben.

#### Der Unterbau

Die Berechnung des Tragsystems bietet keine Schwierigkeiten und soll deshalb nur angedeutet werden. Der Haupttragring ist als Durchlaufträger gerechnet mit den ermittelten  $N_y$ -Werten für Wind und Eigengewicht als Belastung. Infolge der Höhe und damit der Steifigkeit des Trägers kann angenommen werden, dass drei Felder gleichmässig belastet sind. Die gleichmässige Windbelastung wird aus der schraffierten Fläche von Bild 7 ermittelt. Die Pfosten nehmen die Auflagerkräfte des Trägers auf und leiten sie unter Mitwirkung der Fundamentplatte an die Pfähle ab.

Die Schubkräfte  $N_{y\beta}$  rufen Horizontalkräfte an den Säulenköpfen hervor, und diese Kräfte beanspruchen die Diagonalen auf Zug oder Druck. Infolge der Steifigkeit des Tragringes und seines grossen Durchmessers kann auch hier angenommen werden, dass vier Knoten die gleiche Horizontallast erhalten. Die schraffierte Fläche der Kurve  $N_{y\beta q}$  gibt die Gesamtkraft, die sich gleichmässig auf vier Knoten verteilt. Die Bilder 12 und 13 zeigen Einzelheiten der Bewehrung der Diagonalen und Pfosten. Die Neigung der Pfosten erzeugt Horizontalkräfte an den Pfahlköpfen. Diese werden durch zwei Fussringe aufgenommen, die die Belastung der Pfähle durch Horizontalkräfte verhindern. Dem Einfluss des Windes wurde dadurch Rechnung getragen, dass die Eigengewichtswerte wie beim Knicken verdoppelt wurden.

Die maximalen Pfahllasten betragen pro Pfahl unter Eigengewicht 50 t, Eigengewicht plus Normalwind 83,0 t, Eigengewicht und Windböen 106,0 t. Zugkräfte entstehen in den Pfählen keine.

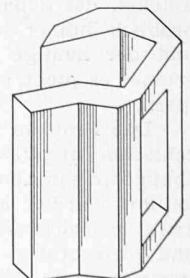


Bild 17. Vorbetonierter Kopf

### 3. Ausführung

Die Ausführung des Turmes geschieht mit dem patentierten *Schalssystem Faye*, auf das hier eingegangen werden soll, da es in seiner Konzeption äusserst einfach und wirtschaftlicher als andere Schalungssysteme ist. Der monolithische Charakter des Bauwerkes wird damit vollständig gewahrt. Als Schalungshalter dienen unarmierte vorbetonierte Köpfe von 40 cm Höhe (Bild 17), die einfach aufgemauert werden und als kleine Längsrippen auf dem Bauwerk in Erscheinung treten. Diese Köpfe bestehen aus zwei Wandungen, die nur durch zwei kleine Horizontalstreben verbunden sind und so einen grossen Hohlraum für den einzubringenden Beton samt Armierung freilassen. Auf diesen Köpfen werden die hölzernen Schaltafeln befestigt, die einfach verschraubt werden. An den senkrechten Kanten der Schaltafeln ist ein schmales Stahlband angebracht, das die Köpfe mit einer Krampe fasst. Bild 18 zeigt die Schalung. Drei Spiele Schaltafeln genügen um hochzubetonieren; die unterste Tafel wird jeweils gelöst und oben aufgesetzt. Dieses System erlaubt mit wenig Arbeitskräften sehr schnell zu arbeiten. In Herse-range hat man 80 cm pro Trag in vollen Ringen betoniert. Als Baugerüst wurde ein Stahlrohrgerüst verwendet, das im Innern des Turmes hochgeführt wurde (Bilder 15 und 16).

Das erste Bauwerk wurde in 15 Monaten erstellt, der Turm selbst in 5 Monaten. Der zweite Turm ist im Bau. Der Zementgehalt beträgt  $350 \text{ kg/m}^3$  Portlandzement der Klasse 250/315 für den Unterbau; für den Turm wurde er auf  $400 \text{ kg/m}^3$  erhöht.

Errichtet werden die Bauwerke im Auftrag der Electricité de France; Herr Teste, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées à l'E. D. F., Directeur de l'équipement des régions Est et Basse Seine, hat die Oberbauleitung.

Die Berechnung und Ausführung des thermodynamischen Teils der Anlage liegt in Händen der Société Hamon, Paris. Es sei hier Ingenieur Fourrault für die Angaben über kühltechnische Fragen, die er uns zur Verfügung stellte, bestens gedankt. Die *Entreprise Générale Industrielle*, Paris, hat die statische Berechnung unter Mitwirkung von Ing. Chambaud aufgestellt und führt den Eisenbetonbau aus. Der Bau des ersten Kühlturmes ging reibungslos und ohne jeglichen Unfall von statten (Bild 19).

### C. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Kühltürme mit solchen Abmessungen sind kühne Ingenieurbauwerke. Herse-range ist nicht die einzige Zentrale, die damit ausgestattet ist, und diese Türme sind auch nicht die allergrössten, die gebaut wurden. Es sind aber unseres Wissens die ersten mit so geringen Wandstärken. Die Verwendung eines Schalungssystems, das an Einfachheit und Wirtschaftlichkeit von den bisherigen Methoden abweicht, ist ebenfalls eine interessante Neuerung.

Die Membrantheorie hat hier ein neues Anwendungsgebiet gefunden und ist mit neuen Gedanken weiter entwickelt worden. Jedoch sind damit nicht alle Probleme gelöst, die sich bei der Berechnung gestellt haben. Es sind Voraussetzungen getroffen worden, die noch näher beleuchtet werden müssen, wenn die Entwicklung weiter gehen soll. Der Einfluss der Nebenspannungen an den Einspannstellen wäre zu untersuchen. Wenn es gelingt, das Knickproblem genauer zu erfassen, könnten Einsparungen an Ringen gemacht werden. Die Theorie allein kann diese Frage nicht klären. Modellversuche und Versuche am fertigen Bauwerk wären am besten geeignet, diese Fragen zu beleuchten. Auch könnte damit nachgeprüft werden, in wie weit die getroffenen Annahmen für den Wind der Wirklichkeit entsprechen.

Die Weiterentwicklung der Technik und die Kühnheit der zu lösenden Probleme stellen auch hier dem Ingenieur als Wissenschaftler und Konstrukteur Aufgaben, deren Lösung Anregung zu neuem Schaffen sein soll.

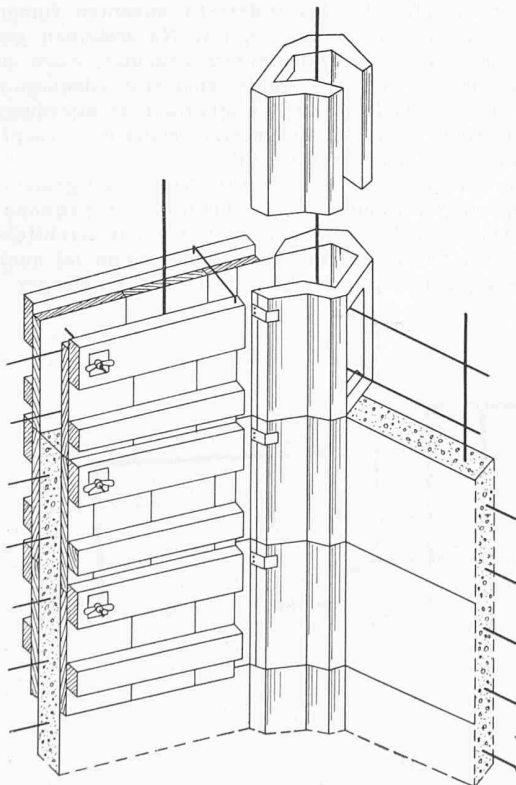


Bild 18. Schalungssystem Patent Faye

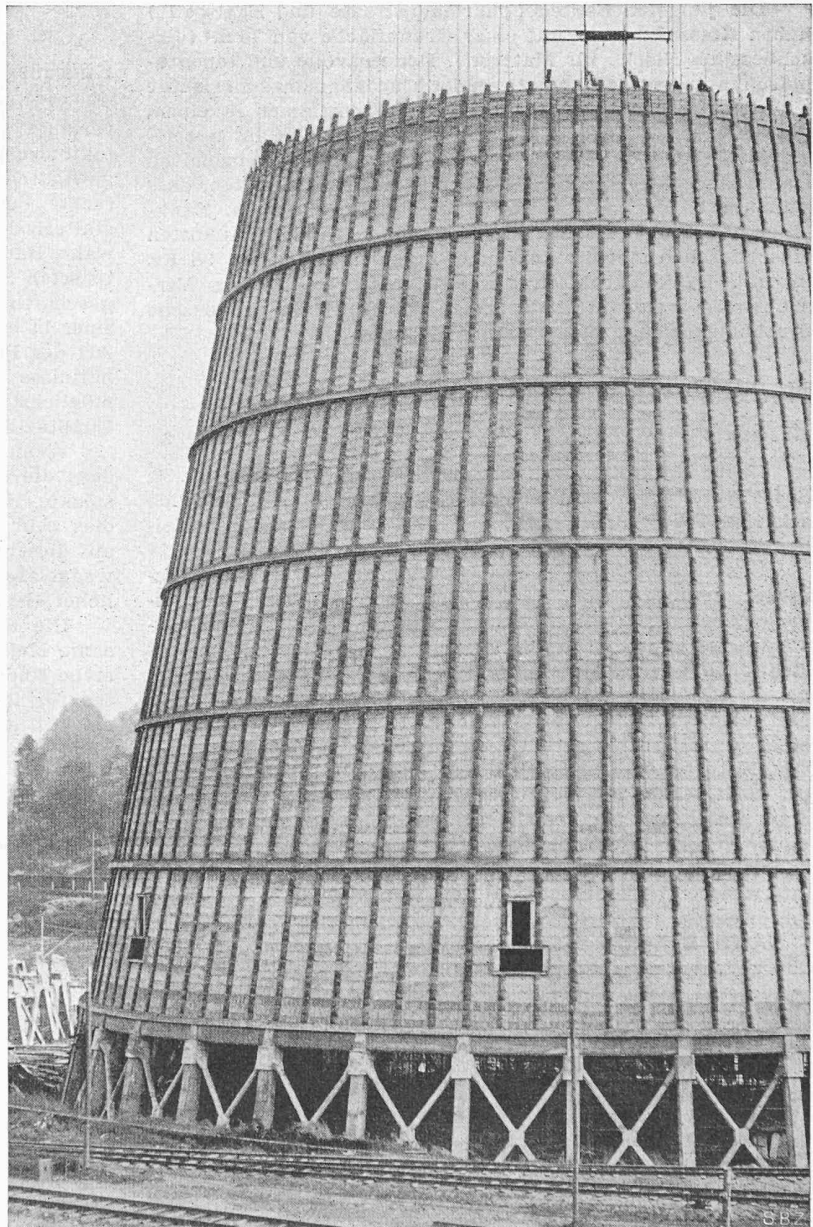


Bild 19. Turm im Bau, oben sind aufgemauerte Köpfe und Schaltafeln sichtbar