

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 94 (1976)
Heft: 50

Artikel: Naturzug-Trockenkühltürme in Stahlfachwerk-Konstruktion
Autor: Kollar, Lajos / Marosi, Istvan
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-73210>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 30.01.2026

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

Naturzug-Trockenkühltürme in Stahlfachwerk-Konstruktion

Von Lajos Kollar und Istvan Marosi, Budapest

DK 66.045.5:624.014.7

Vorwort

Die Restriktionen bei der Einleitung von aufgewärmtem Kühlwasser in öffentliche Gewässer zwingt die Kraftwerksgesellschaften, auf die sogenannte *Umlaufkühlung* überzugehen. Die Silhouetten der grossen, häufig dampfenden Naturzug-Nasskühltürme gehören vor allem im Ausland zum gewohnten Anblick eines thermischen Kraftwerkes. Bei diesen *Verdunstungs-Kühltürmen* hat sich Stahlbeton als Werkstoff bewährt und durchgesetzt.

Die weitere *Verknappung an Gebrauchswasser* führt früher oder später zum *Übergang auf die wasserverlustlose, trockene Umlaufkühlung*. Bei dieser Art der Kühlung sind die Wasser-/Luft-Wärmeübertrager am Basiskreis des Turmes montiert. Die durch eine Kaminwirkung der Kühlturmschale aufsteigende Warmluft hat einen niedrigeren relativen Feuchtigkeitsgehalt als die Umgebungsluft. Auf dieser Tatsache beruhend, können für den Bau trockener Kühltürme Werkstoffe verwendet werden, deren Anwendung bei nassen Kühltürmen aus *Korrosionsgründen* nicht möglich wäre. Als Beispiel hierzu gilt der kürzlich fertiggestellte Trockenkühlturm des Kernkraftwerkes *Schmehausen* in der Bundesrepublik Deutschland («Schweiz. Bauzeitung», Heft 44, S. 674, 1976),

dessen Mantel aus *Aluminium-ummantelten Stahlseilen* und einer *Aluminiumverkleidung* besteht.

Weniger bekannt sind die vier in der UdSSR vom ungarischen Konsortium Höterv/Iparterv gebauten Trockenkühltürme für luftgekühlte Kondensationsanlagen *System Heller* in *Stahlfachwerkkonstruktion* mit einer Aluminium-Verkleidung als korrosionsbeständige Aussenhaut. Da die Schweizerische Aluminium AG Lizenznehmer für luftgekühlte Kondensationsanlagen *System Heller* ist, wurden auch bei der Tochtergesellschaft der Alesa Aluisse Engineering AG diese Stahlfachwerkkühltürme, unter Einbezug der Formgebung, weiterentwickelt.

Im Rahmen einer Gemeinschaftsarbeit des EIR (Eidg. Institut für Reaktorforschung), der ETH Lausanne (IPEN) und der Alesa für das deutsch-schweizerische HHT-Projekt (Hochtemperaturreaktor mit Helium-Turbine), wurde ein Modell des von Alesa vorgeschlagenen Stahlfachwerk-Kühlturmtyps (Bild 1) im Windkanal des Flugzeugwerkes Emmen und an der ETH Zürich hinsichtlich dem statischen und dynamischen Verhalten unter Windeinfluss geprüft. Dieser Kühlturm besteht aus einer wetterfesten Stahlfachwerkkonstruktion mit einer aussenseitig liegenden Aluminium-Verkleidung und gilt, als Trockenkühlturm verwendet, als wartungsfrei. Eine Veröffentlichung über diese Versuche erfolgt später.

Der folgende Beitrag aus *Ungarn* beschreibt die Projektierung und den Bau der vier in der UdSSR fertiggestellten und in Betrieb befindlichen Trockenkühltürme in Stahlfachwerkkonstruktion mit Aluminium-Verkleidung.

Kühltürme (System Iparterv) in der UdSSR

Einleitung

Der nachfolgend beschriebene Trockenkühlturm wurde in den Jahren 1971 bis 1974 in vier Einheiten in der Nähe der Stadt *Rasdan*, etwa 50 km von *Eriwan* entfernt, in der *Republik Armenien* (UdSSR) erstellt.

Die Kühltürme gehören zu einem *thermischen Kraftwerk* (Öl und Erdgas) mit einer Nominalleistung von 2×200 und 2×210 MW.

Bauherr war das *sowjetische Ministerium für Energie- und Elektrizitätsversorgung*. Die *Projektierung* wurde durch ein *ungarisch-sowjetisches Konsortium* ausgeführt [Höterv, Iparterv (Budapest) – Teploelektroprojekt (Moskau), Rotep (Rostov)] Die *Federführung* lag bei Höterv.

Das Kraftwerk liegt auf einer Hochebene 1750 m.ü.M. in einem *erdbebengefährdeten Gebiet mit extremen Temperaturen*.

Wegen mangelndem Wasservorkommen wurde das Prinzip der Trockenkühlung *System Heller* gewählt. Für die Wahl einer *Stahlfachwerk-Konstruktion* anstelle einer Stahlbetonschale sprachen die *Erdbebenbelastung* sowie die *kürzere Montagezeit*. Die Trockenkühltürme von Rasdan sind mit 120 m Höhe die *bisher grössten Kühltürme*, die in *Stahlfachwerk-Konstruktion* und *Aluminium-Verkleidung* gebaut worden sind (Bild 2).

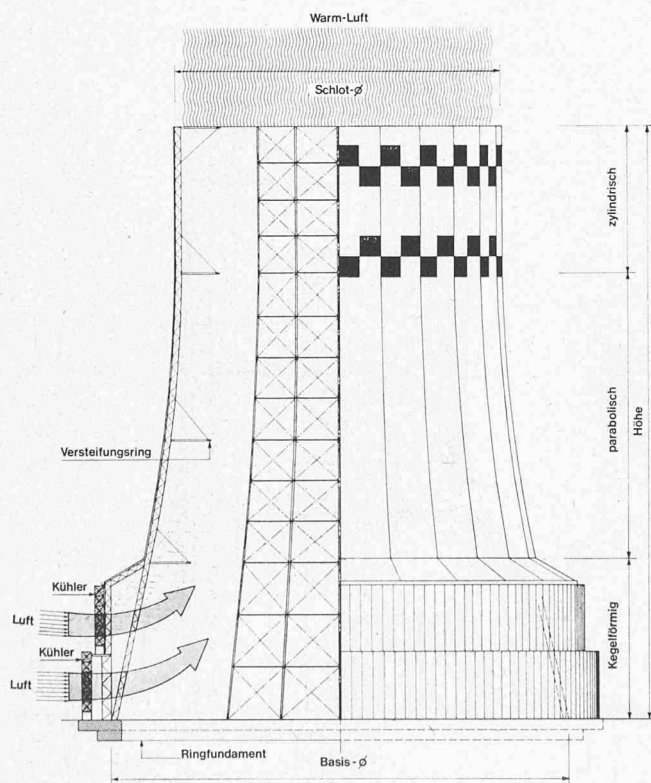


Bild 1. Naturzug-Trockenkühlturm in Stahlfachwerkkonstruktion mit Aluminiumverkleidung, Typ Alesa

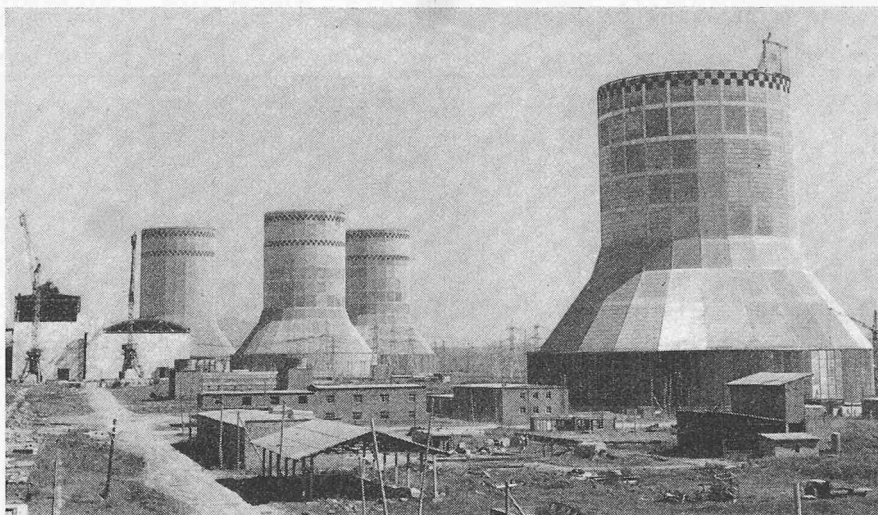


Bild 2. Trockenkühltürme bei Rasdan in Armenien (UdSSR)

Auslegedaten und Lastannahmen

Für die Optimierung des Kühlsystems wurden folgende Daten zugrunde gelegt:

Abzuführende Wärme:	240,8 Gcal/h (pro Turm)
Temperaturunterschied zwischen Kondensator und Aussenluft:	30 °C
Temperatur im Jahresmittel:	+ 5,2 °C
Extreme Temperaturwerte	+35 °C -32 °C

Für den baulichen Teil galten folgende Bedingungen:

Windstaudruck:	Höhe h (m)	Staudruck q (kg/m ²)
	0	83
	40	150
	80-120	173

Druckbeiwerte:	gemäss russischer Norm SNIP II. A-11-62. Die Druckbeiwerte entsprechen praktisch genau den Werten nach SIA 160, Tabelle 24
Temperaturdifferenzen:	+35 °C, -32 °C
Erdbebenbelastung:	gemäss Stärke VII der Mercalli-Sieberg Skala.

Normen

Alle Bauteile mussten der russischen Norm SNIP II. A-11-62 entsprechen.

Materialqualitäten

Wegen der extremen Temperaturverhältnisse wurde für das Stahlgerüst besonders beruhigter Stahl A 37 B (ungarische Norm) verwendet, der identisch ist mit R ST-3 nach DIN 17100.

Für die Fundamente wurde die Betonqualität mit B 200 (200 kg/cm² Würfeldruckfestigkeit, Nennwert nach 28 Tagen) spezifiziert. Für die Verkleidung wurde Aluminium-Wellblech (Reinaluminium 99,5%) verwendet, wobei die Oberfläche walzblank belassen wurde, also keinen zusätzlichen Korrosionsschutz erhielt.

Hauptabmessungen

Alle vier Kühltürme wurden identisch ausgeführt. Die Hauptabmessungen (Bild 3) ergaben sich aus einem Optimierungsprogramm für das Gesamtkühlsystem. Infolge der ge-

ringeren Luftdichte in 1750 m.ü.M. sind die Türme in ihren Abmessungen grösser als sie im Normalfall (z.B. im schweizerischen Mittelland) hätten sein müssen.

Konstruktion

Die 15 m hohen Kühltürme Typ Forgo der luftgekühlten Kondensationsanlage System Heller wurden am unteren Umfang des Kühlturmes angeordnet, dessen Durchmesser 110 m beträgt. Diese Kühltürme stehen auf 2 m hohen Betonsokkeln. In der Höhe von 17 m sind die Kühltürme horizontal gegen die Vordach-Konstruktion abgestützt.

Das 24seitige Vordach ist in einer Höhe von 50 m an ein 24seitiges Prisma angeschlossen, das den oberen Teil des Kühlturmschlotes bildet. Das letztere hat einen Durchmesser von 60 m und erreicht eine Höhe von 120 m.

Den Hauptteil der Tragkonstruktion bildet das 24seitige Prisma. Es stützt sich auf ein Ring-Fundament. Die Bau-

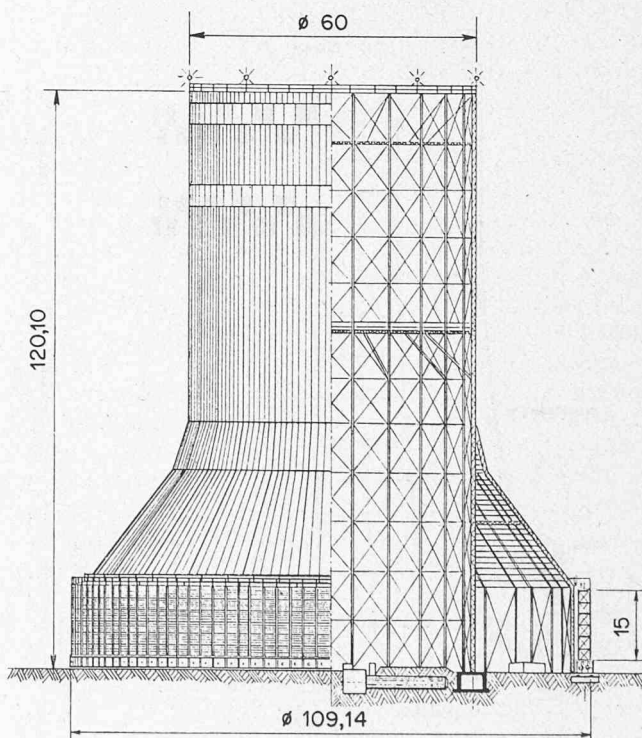


Bild 3. Ansicht, Querschnitt und Hauptabmessungen eines Stahlfachwerkturnes von Rasdan

elemente des Gerüsts bestehen aus rechteckigen Montageeinheiten von 7×10 m mit diagonaler Ausfachung (Bild 3 u. 4).

Alle einzelnen Stäbe bestehen aus 4gurtigen Fachwerkträgern (Filigran-Struktur). Die Hauptkomponenten der Turmbelastung stellen die Windlast und das Eigengewicht dar. Die unten eingespannte «Kreiszylinderschale» aus Fachwerk wird auf den Höhenstufen von 30, 70 und 110 m mittels horizontaler, starrer Ringe versteift. Durch diese Ringe wird der grösste Teil der Membrankräfte aufgenommen, wodurch der Materialbedarf des Turmes günstig beeinflusst werden konnte.

Die bis zur Höhe von 50 m reichende Vordach-Schürze ist als gewöhnliche Dachkonstruktion ausgebildet.

Die Abstufung der Querschnittswerte liess sich mittels Änderung der Winkelprofile mit Beibehaltung der Umfassungsabmessungen der Fachwerkstäbe erzielen. Dadurch wurde eine Serienfertigung mit Hilfe weniger Fertigungsschablonen ermöglicht. Mittels der Schablonen bekamen die Montageeinheiten im Werk einen Vormontagestoss, und mit Hilfe einer Numerierung wurde die richtige Montagefolge am Errichtungsort sichergestellt.

Der Werkstoff der gesamten Konstruktion ist Stahl St.37. Als Korrosionsschutz dient ein zweimaliger, mit Pinsel aufgetragener Anstrich aus Katepox-Kunstharz, durch den auch der Schutz gegen die Kontaktkorrosion zwischen dem 1,2 mm starken Aluminium-Wellblech und der Stahlkonstruktion gewährleistet wird.

Die Tragkonstruktion befindet sich innerhalb der Aluminiumverkleidung in einem während des Kühlturbetriebes warmen, trockenen Luftstrom, wodurch die Korrosionsgefahr praktisch vermieden wird.

Sämtliche Verbindungen sind geschweisst.

Montagevorgang

Die Stahlkonstruktion und die Kühlelemente wurden aus Ungarn mit Bahntransport auf die Baustelle geliefert. Die Transporteinheiten bestanden aus 4-Gurt-Fachwerkstäben und Einzelprofilen. Am Errichtungsort wurden die einzelnen 4-Gurt-Fachwerkstäbe in Schablonen zu Montageeinheiten von 8×10 m zusammengeschweisst. Die Aluminium-Verkleidung wurde auf die Montageeinheiten vormontiert.

Nach Abschluss der Betonarbeiten für die Fundamente konnte sofort mit der Stahlmontage begonnen werden. Ankerschrauben wurden in die Ringkastengründung von 60 m Durchmesser einbetoniert. Dann wurden die erste Reihe der Montageeinheiten auf diese Schrauben gesetzt und die Stösse zusammengeschweisst. Auf einem 1 m hohen Montagegestell wurde in Bodennähe der Versteifungsring für die Höhenlage von 70 m zusammengestellt und danach, um 4 m höher, der Versteifungsring für die Höhe von 110 m zusammengebaut. Auf diesem obersten Ring wurden der Umlaufmontagekran von 3,5 t Tragfähigkeit mit Klappausleger, zwei Aufstellgerüste, ferner das zum Heben des Ringes erforderliche, an 12 Punkten arbeitende hydraulische System aufgebaut. Die Nockenstange mit 20 cm Teilung wurde an der oberen Kante der bereits eingebauten Reihe der Montageelemente und an der oberen Kante des hydraulischen Hebessystems befestigt. Dieser Stange entlang hob das Hub-System die zwei zusammengebauten Ringe in die Höhe. Der Höhenunterschied zwischen den Anhebe Punkten betrug max. 20 cm. So konnte der Ring in ungefähr 6 Stunden um die Höhe einer Montageeinheit (10 m) gehoben werden. Die Last des als Montagebühne benützten Ringes wurde mittels vorläufiger Verdübelung auf die Schlotkonstruktion übertragen.

Die vormontierten 8×10 -m-Montageeinheiten wurden in das Innere des Kühlturmes gefördert und mit Hilfe des Montagekranes auf dem obersten Versteifungsring hochgeho-

ben und auf den Mantel gesetzt, provisorisch fixiert und verschweisst. Infolge der gewählten Netzgeometrie waren die Verbindungsleisten der nebeneinander stehenden Hälften der vertikalen Stabelemente von aussen und innen zu schweissen. Wegen der äusseren Stossverschweissungen des Turmmantels konnte auch die Verkleidung nur vom Montagegerüst aus fertigmontiert werden.

Nach Beendigung einer Reihe von Montageeinheiten wurden die Kletterstangen oben verkeilt, der Ring auf die Hydraulik umgelastet und die Verdübelung gelöst, alsdann der Ring weitere 10 m angehoben. Beim Erreichen der 70 m Höhenstufe wurde der untere Versteifungsring endgültig angeschweisst und vom oberen Montagering losgetrennt.

Auf 110 m Höhe wurde auch der Montagering definitiv als Versteifungselement eingebaut. Der Kran, die Montagegeräte, die zum Heben erforderlichen Vorrichtungen und Hilfskonstruktionen wurden demontiert und mittels Winde auf Bodenebene heruntergelassen.

Die Vordach-Schürze stützt sich entlang eines Kreises mit 106 m Durchmesser auf Einzelfundamente. Zu den Eckpunkten der 24seitigen Schürze laufen meridial gerichtete Dachbinder, an denen horizontale Pfetten angebracht sind, die mit Windverstreben ausgesteift sind.

Die Vordach-Konstruktion wurde mit 50 m hohen Mobilkranen montiert (Bild 4). Bild 5 zeigt den nahezu fertig montierten Kühlturm.

Montagedauer und Inbetriebnahme

Mit der Montage des ersten Turmes wurde Ende 1969 begonnen. Bauzeiten:

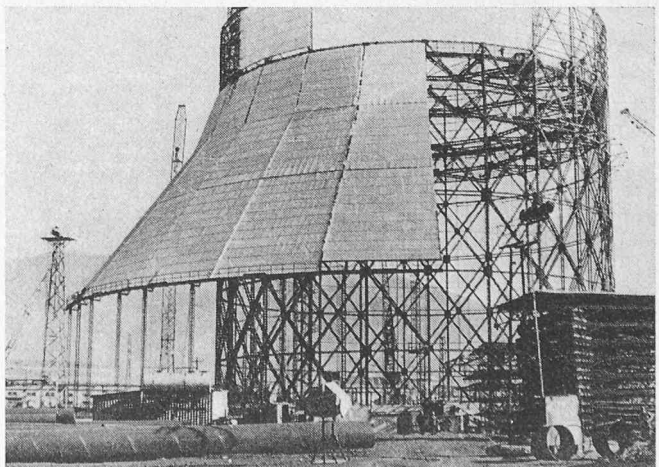
Erdarbeiten und Fundamente	3 Monate
Stahlkonstruktion inkl. Verkleidung	6 Monate
Montage der Kühltürme	2 Monate
Total	11 Monate

Für die weiteren Türme konnte die Bauzeit noch etwas verkürzt werden.

Die Inbetriebnahme der einzelnen Kraftwerksblöcke erfolgte für

Block 1	im Januar	1971
Block 2	im Dezember	1971
Block 3	im Oktober	1972
Block 4	August (Nachbestellung)	1974

Bild 4. Montage der Stahlkonstruktion



Materialaufwand

In jeden Kühlturm wurden folgende Materialmengen eingebaut:

Fundamente	4000 m ³ Stahlbeton B200
Stahlkonstruktion	1250 t Stahl St.37
Verkleidung	125 t Aluminium Wellblech

Vorteile des Stahlfachwerkes

In der ersten Ausbaustufe wurden nach Rasdan drei Kühltürme geliefert und in Betrieb genommen. Auf Grund der günstigen Erfahrungen erfolgte nachträglich noch die Bestellung eines vierten Kühlturmes.

Die günstigen Erfahrungen waren die folgenden:

- Die Montage des Kühlturmes konnte leicht, ohne erwähnenswerte Schwierigkeiten durchgeführt werden.
- Wartungsarbeiten sind nicht erforderlich.
- Es traten keinerlei Korrosionserscheinungen auf.
- Geringes Eigengewicht, ca zehnmal leichter als vergleichbarer Bétonturm (wichtig in Erdbeben und Bergsenkungsgebieten).
- Kurze Montagezeit, praktisch unabhängig von langen Winterperioden.

Baukosten

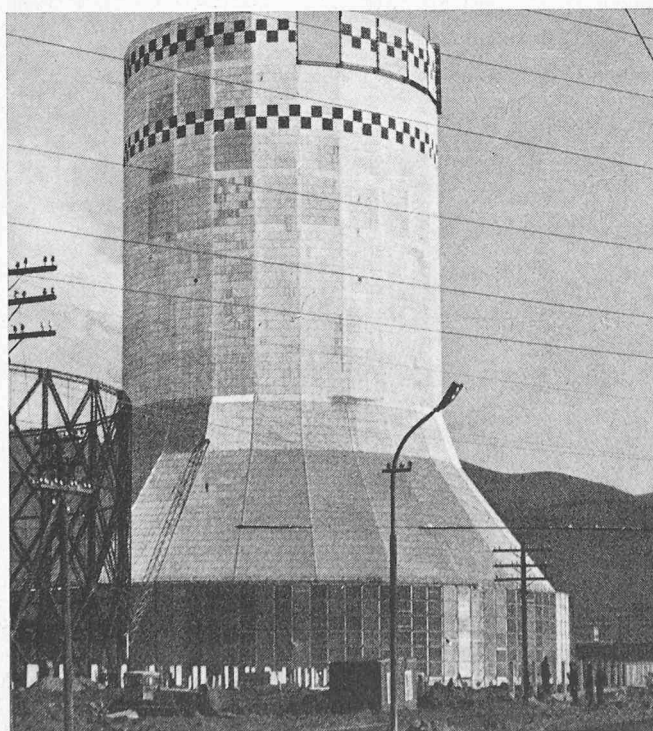
Die Baukosten können wir nicht angeben, da ein wesentlicher Teil der Arbeiten durch sowjetische Firmen ausgeführt wurde, wie z.B. Fundamente, Rohrleitungen, elektrische Anlagen, Automatik usw. Die Preise und Gewichte der aus Ungarn gelieferten Teile wurden im sowjetisch-ungarischen Handelsabkommen verrechnet, wobei die Umrechnungskurse zu westlichen Devisen unbekannt sind.

Statische Probleme

Bestimmung der Stabkräfte

Die von Windlast, Eigengewicht und anderen Einwirkungen stammenden Stabkräfte wurden mittels Rechenautomat bestimmt. Die Einzelheiten dieser Berechnungen werden hier nicht erörtert.

Bild 5. Nahezu fertig montierter Kühlturm



Zur Bestimmung der Stabkräfte genügt es, ein einschichtiges Gelenkfachwerk zwischen den Versteifungsringen anzunehmen. Damit erhalten wir ein der Membranschale analoges Fachwerk. Wie aus der *Theorie der Schalenkonstruktion* bekannt ist, werden die auf die Schale wirkenden Belastungen durch Membrankräfte aufgenommen. Biegemomente (die schnell abklingen) entstehen nur aus lokalen Störwirkungen. Dementsprechend wird der wesentliche Teil des Kräftespiels durch die mit dem Rechenautomaten ermittelten Stabkräfte erfasst. Die durch Störwirkungen bedingten Biegemomente können auf Grund der Kontinuumanalogie gesondert berechnet werden.

Das einschichtige Modell mit Gelenkverbindungen weist aber eine besondere Eigenschaft auf. Falls der Umfang des Zylinders auf Polygone mit gerader Seitenzahl aufgeteilt wird und das Netz in Seitenansicht aus gleichschenkligen Dreiecken besteht (Bilder 6 und 7), kann am oberen freien Rand des Turmes eine «dehnungslose Deformation» entstehen. Das bedeutet, dass sich bei einem Fachwerk die obere Kante auch ohne Krafteinwirkung zickzackförmig deformieren kann. Nachweisbar tritt diese Erscheinung nur am oberen freien Rand auf, im Ringstab eine Reihe darunter aber nicht mehr.

Diese «dehnungslose Deformation» wird aber nur von jener Teillast verursacht, die sich entsprechend einer mit der Zickzackform identischen Welle ändert, z.B. bei einem 24seitigen regulären Polygon von jenem Teil der Windlast, welcher aus der am Umfang in Fourier-Reihe entwickelten Belastung vom Zwölften Glied verursacht wird. Dies bedeutet eine sehr geringe Belastungsintensität.

Diese *Labilitätsform* lässt sich hingegen leicht beheben, indem dem oberen Rand eine endliche Biegesteifigkeit verliehen wird, d.h. indem hier ein zweischichtiger Ring angenommen wird. Die Berechnung mittels Rechenautomaten wurde dementsprechend auf Grund eines statischen Modells durchgeführt, dessen Stäbe in der Ringrichtung zweischichtige, d.h. biegesteife Profile darstellen. Dadurch wurde die zick-zackförmige Deformierung des oberen, freien Randes verhindert, ohne das Volumen der maschinellen Berechnungen unzulässig zu vergrößern.

Danach wurden die Berechnungen auch nach der Theorie zweiter Ordnung durchgeführt, wodurch die Stabkräfte in Verhältnis zu den mit Hilfe der Theorie erster Ordnung ermittelten Werten nur um einige Prozente erhöht wurden.

Statisch gleichwertiges Kontinuum

Die Untersuchung der *Schwingungen* und der *Stabilität* eines Fachwerkkühlturmes kann durch Einführung des gleichwertigen Kontinuums wesentlich erleichtert und veranschaulicht werden. Ihr Wesen besteht darin, dem Fachwerkkühlturm eine kontinuierliche, vollwandige Schale zuzuordnen, deren statische Eigenschaften (Dehn- und Biegesteifigkeiten) mit jenen des Fachwerkes identisch sind, aber selbstverständlich nur in einer «Makroannäherung». Mit anderen Worten: durch das Kontinuum werden die statischen Eigenschaften des Fachwerkes als Ganzes oder wenigstens solche eines Turmmantelteiles, der mindestens einige Knotenpunkte bzw. Stablängen enthält, wiedergegeben. Die Grundlagen der Theorie eines äquivalenten, isotropen Kontinuums sind von Wright dargestellt worden («Membrane Forces and Buckling in Reticulated Shells», Journ. Struct. Divis. Proc. ASCE/1965/St. 1, 173). Sie kann für ein dem anisotropen Kontinuum entsprechenden Fachwerk weiterentwickelt werden (Kollar-Hegedüs: «Solution of Double layer Space Trusses of General Triangular Grid by the Equivalent Continuum Method», Acta Techn. Hung. 74/1973/363).

Da die Stäbe der Fachwerkkühltürme im allgemeinen selbst zweischichtige Fachwerkträger sind, ist ihre Schubver-

formung verhältnismässig gross. Deshalb muss das stellvertretende Kontinuum korrigiert werden: Es ist auch die *Schubverformung* zu berücksichtigen, was mittels der *Theorie der Sandwich-Konstruktionen* durchgeführt werden kann (Kollar-Dulacska: «Schalenbeulung». Werner-Verlag, Düsseldorf, 1975).

Stabilitätsfragen

Die Stabilität eines Fachwerkkühlturmes kann auf zwei Arten verloren gehen: infolge *Ausbiegung einzelner Stäbe* oder *Ausbeulung der Fachwerkfläche* «im grossen». Der ersterwähnte Fall bedarf keiner Erklärung, zur zweiten Erscheinung sind aber einige Bemerkungen hinzuzufügen.

Die Beulung der Fachwerkfläche kann mittels des *äquivalenten Kontinuums* bestimmt werden, d.h. sie ist als Schale auf Beulung zu bemessen. Dabei ist aber die vorher erwähnte «Sandwich-Wirkung» zu berücksichtigen, da infolge der verhältnismässig grossen Schubverformung die Schale weicher wird und dadurch die kritische Last sich verringert. Die auf diese Art errechnete kritische Last ist gemäss der Kontinuum-Methode auf Stabkräfte umzurechnen und mit den mittels des Rechenautomaten ermittelten Stabkräften zu vergleichen.

Unsere Berechnungen zeigten, dass die zur schalenartigen Beulung des als zweischichtiges Fachwerk gestalteten Kühlturmes gehörige kritische Last kleiner ist als die das Knicken der einzelnen Stäbe verursachende kritische Last. Deshalb bedarf die Vermeidung einer schalenartigen Beulung keinen Mehraufwand an Material.

Schwingungen

Durch die aus Konstruktionsgründen in das Fachwerk des Kühlturmes eingebauten *horizontalen Ringe* wird das Fachwerk wie durch Diaphragmen ausgesteift. Diese Diaphragmen sind hinsichtlich der Beulung wirkungslos, da die massgebende Beulwellenlänge der Zylinderschale wesentlich kürzer ist als der Abstand der Diaphragmenringe; bezüglich der Schwingungen wird aber die Schale durch sie wesentlich versteift.

Die Schwingungen des mit *Diaphragmenringen* versehenen Schalenfachwerkes können daher so bestimmt werden, dass die Konstruktion in erster Annäherung als kontinuierliche Schale angesehen wird, die sich an Ringe abstützt, die in der eigenen Ebene unendlich steif sind. Da aber die Diaphragmen nicht unendlich steif sind, werden die Schwingungen der Konstruktion niedriger sein als jene, die mit Annahme steifer Diaphragmen ermittelt wurden. Die Wirkung der endlichen Diaphragmensteifheit kann mit Hilfe der in der Schwingungslehre allgemein benützten *Dunkerley-Formel* berücksichtigt werden, d.h. die Quadrate der Eigenfrequenzen der an den steifen Diaphragmen abgestützten Schale ω_1 und des Ringes ω_2 werden reziprok summiert:

Für die Bestimmung der Ringfrequenz ω_2 ist eine mitwirkende Breite aus der Schale zu berücksichtigen, die ebenfalls aus der Schalentheorie ermittelt werden kann. Daher ist die Eigenfrequenz ω_2 mittels des Trägheitsmomentes eines Ringes mit T-Querschnitt zu bestimmen.

Nach unseren Berechnungen ist die niedrigste Eigenfrequenz eines Kühlturmes mit durch Diaphragmen versteiftem Fachwerk wesentlich höher als 1 Hz, der Wert, der gemäss der Fachliteratur (Krätzig: «Grosse Naturzugkühltürme aus Stahlbeton. – Derzeitiger Stand und zukünftige Entwicklung». VGB Kraftwerktechnik, 191 1970). erforderlich ist, um die gesonderte Berücksichtigung der von Windstössen verursachten dynamischen Wirkungen vernachlässigen zu können, und um sicher zu gehen, dass die den Karmanschen Wirbeln zugeordnete kritische Windgeschwindigkeit viel grösser ist als die maximal vorkommende Windgeschwindigkeit:

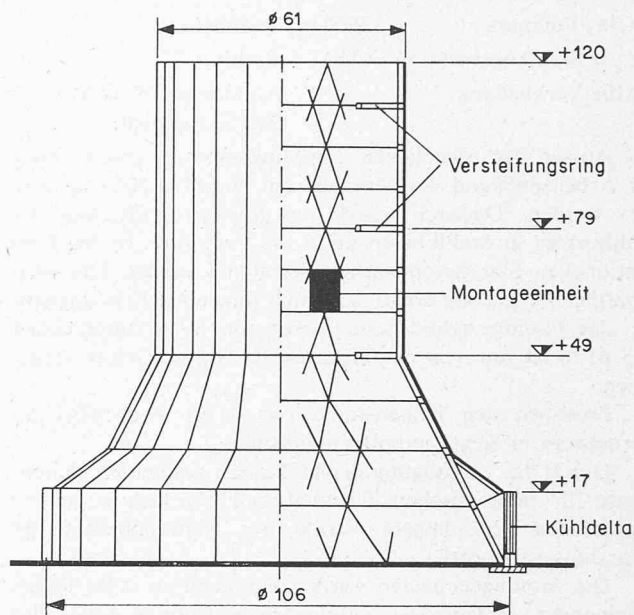


Bild 6. Neue Turmkonstruktion mit kegelstumpfförmiger Erweiterung und gemeinsamem Fundament mit den Kühldeltas

$$\frac{1}{\omega^2} = \frac{1}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_2^2}$$

Kühltürme im Entwurf

Die bei der Projektierung und Errichtung der Kühltürme in Rasdan gesammelten Erfahrungen ermöglichen jetzt wesentlich wirtschaftlichere Lösungen. Die Hauptabmessungen der sich zur Zeit im Entwurf befindlichen Kühltürme mit einer Leistung von je 220 MW sind identisch mit jenen der Rasdaner Kühltürme (Bild 6). Ihr *Materialbedarf* beträgt trotz der um 25% höheren Windlast:

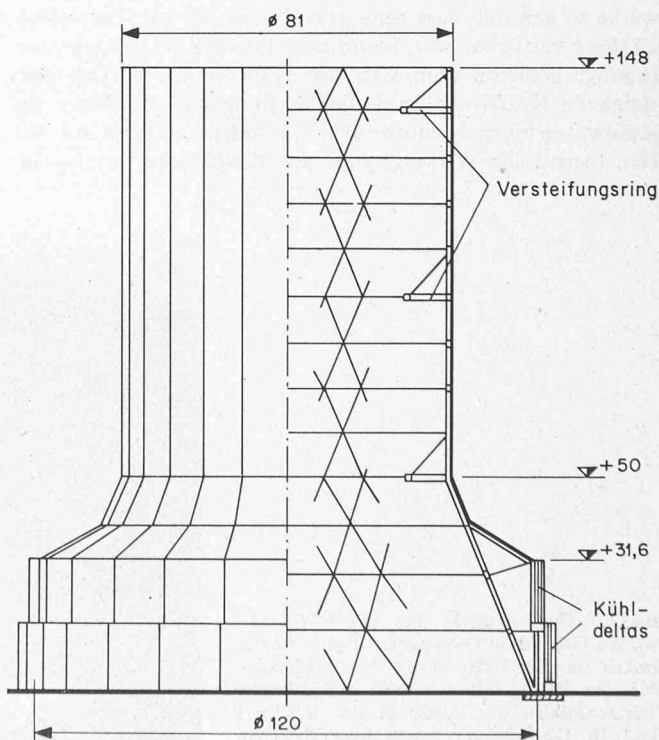


Bild 7. Neues Kühlturmkonzept für ein Projekt in Westeuropa

für das Fundament	2500 m ³ Stahlbeton
für die Stahlkonstruktion	1150 t Stahl St.37
für die Verkleidung	125 t Aluminium-Wellblech 99,5% Reinheit.

Ausser der erheblichen Materialersparnis konnte auch der Arbeitsaufwand der Montage um ungefähr 30% vermindert werden. Dadurch wurde die *Konkurrenzfähigkeit* des Kühlturmes in Stahlkonstruktion im Verhältnis zu den konventionellen Stahlbeton-Türmen *wesentlich erhöht*. Die wirtschaftlichere Lösung ergab sich nach folgenden Erwägungen:

das 24seitige zylindrische Gerüst mit einem Durchmesser von 61 m ist nur von der Höhenstufe 49 m aufwärts vorgesehen.

Zwischen den Höhenstufen von 0 bis 49 m wird ein Gerüstwerk in Kegelstumpfform errichtet.

Durch die Vereinigung der in Rasdan getrennten Fundamente für prismatischen Turmteil und Vordach zu einem gemeinsamen Fundament wurde der Materialbedarf der Gründung verringert.

Die Montageeinheiten werden nur noch an ihren Ecken miteinander verschweisst. Infolgedessen bedingt weder das Schweißen am Errichtungsort noch die Endmontage der Verkleidung eine Tätigkeit ausserhalb des Turmmantels.

Die Anfertigung der Fachwerkstäbe und ihre Vormontage geschieht serienmässig.

Zur Errichtung des kegelförmigen Unterbaus wird auf Bodenebene ein 49 m hohes und 5 m breites umlaufendes Montagegerüst zusammengebaut. Mit Hilfe von Mobilkränen mit 50-m-Ausleger können die 4 Reihen der Montageelemente des kegelförmigen Tragwerkes montiert und vom Montagegerüst aus verschweisst werden. Danach werden ebenfalls auf Bodenebene die drei Versteifungsringe des zylindrischen

Turmmantels mit 61 m Durchmesser (für die Höhenstufen 49, 79 und 109 m) zusammengebaut. Auf diesen Ringen werden die Montagehilfsgeräte und hydraulischen Hebezeuge befestigt. Nach Errichtung des kegelförmigen Unterbaus werden die drei Versteifungsringe von der hydraulischen Klettereinrichtung angehoben. Von nun an erfolgt die Montage in derselben Weise wie beim Kühlturm in Rasdan.

Für *Westeuropa* wurde ein weiteres Kühlturm-Konzept für eine luftgekühlte Kondensationsanlage System Heller mit einer Leistung von 650 MW erarbeitet. Die vorgesehenen Turmabmessungen haben folgende Werte: Unterer Durchmesser 120 m, oberer Durchmesser 81 m, Höhe 148 m (Bild 7). Die 15 m hohen Kühldeltas werden in zwei Reihen übereinander angeordnet.

Der konstruktive Aufbau und die Montage dieses Turmes sind identisch mit jenen des vorhin beschriebenen Kühlturmes. Der vorgesehene Bedarf an Stahl Cor-Ten 52 oder einer anderen, vergleichbaren wetterfesten Stahlqualität beträgt bei Zugrundelegung der Windlast nach DIN 1055 rund 1300 t für den Turmschlot.

Für die Unterstützung der zweistufig angeordneten 15 m hohen Kühldeltas und ihrer Verbindung mit der Turmkonstruktion werden etwa 500 t Stahl St.52 benötigt. Das Fundament erfordert 3500 m³ Stahlbeton. Als Verkleidung wurde auch in diesem Falle 1,2 mm starkes Aluminium-Trapezwellblech vorgesehen.

Vorwort, Bearbeitung und Ergänzungen: *Hermann Kunz*, dipl. Ing. ETH, und *Walter Müller*, Ing. HTL, c/o Alesa Alusuisse Engineering AG, Zürich.

Adresse der Verfasser: *Lajos Kollar*, Buvati, Budapest, und *Istvan Marosi*, Iparterv, Budapest.

Dampfturbinen mit Trockenkühlturm in Betrieb

Von **Alfred Schwarzenbach**, Baden

DK 621.165

Während Jahrzehnten wurden Standorte für Kraftwerke so gewählt, dass genügend *Wasser für die Durchflusskühlung* verfügbar war. Stand jedoch wenig Wasser zur Verfügung, bediente man sich der *Nasskühltürme*. Die stets steigende Kraftwerk- und Blockleistung hat pro Werk die Kühlwassermengen enorm erhöht. Zudem verlangt der tiefere thermische Wirkungsgrad der Kraftwerke mit Leicht-

wasserreaktoren zusätzlich 50 Prozent mehr Kühlmittel.

Durch die Forderung des *Umweltschutzes* werden die *Kühlmöglichkeiten immer mehr eingeschränkt*. Die meisten Kraftwerksgesellschaften sind daher für die nahe Zukunft an *Anlagen mit Trockenkühltürmen* interessiert. Diese Systeme sind wenig bekannt und geben aus diesem Grund oft Anlass zu Bedenken über die Betriebsbewährung.

Bild 1. Gesamtansicht des 800-MW-Kraftwerkes Gagarin in Gyöngyös, Ungarn. In der linken unteren Ecke ist die Nasskühlanlage für den Block III. Die zwei zylindrischen Türme kühlen den Abdampf der Blöcke I und II. Die beiden grossen hyperbolischen Türme kühlen den Abdampf der Blöcke IV und V.

