

Dr.-Ing. Rainer Melzer

Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger
für Einsturzverhalten, Erschütterungen und Schäden
beim Abbruch von Bauwerken

Omsewitzer Höhe 7
01157 Dresden

Telefon 0351 421 820 1
Telefax 0351 421 820 2
Funktel. 0172 3570 179

Stellungnahme zu Sprengerschütterungen am Trinkwasser- Hochbehälter „Am Steltenberg“, Stadtwerke Iserlohn

Auftraggeber:

Hohenlimburger Kalkwerke GmbH
Oeger Straße 39
58119 Hagen-Hohenlimburg

INHALT:

Seite:

1. Grundlagen	1
2. Situation, Aufgabe	2
3. Beschreibung des Behälters	2
3.1 Allgemeines	2
3.2 Statische Berechnungen	3
4. Anhaltswert für Schadenfreiheit	4
5. Schwinggeschwindigkeit und Biegespannung	5 - 6



ANLAGEN: Zeichnungen, Blatt 1 - 2

Dresden, 18.7.2017

Dr.-Ing. R. Melzer



1. Grundlagen

- [1] Querschnitt des Wasserbehälters; 1956
- [2] DIN 4150/03 Erschütterungen im Bauwesen; 2016
- [3] Hellmann: Erschütterungsgutachten zur Erweiterung des Kalksteinbruches Hohenlimburg; 23.11.07
- [4] IB. Meier: Gutachten zu Sprengwirkungen auf Hochbehälter „Am Steltenberg“; 14.4.2010
- [5] DMT: Schwingungsmessung vom 14.7.-23.8.2010 am Wasserbehälter, Messbericht; 17.9.2010
- [6] Stadtwerke Iserlohn: Schreiben an Stadtverwaltung Hagen (e-mail); 10.5.2017

2. Situation, Aufgabe

Der in der Nähe des Trinkwasser-Hochbehälters „Am Steltenberg“ der Stadtwerke Iserlohn gelegene Kalksteinbruch der Hohenlimburger Kalkwerke soll erweitert werden, so dass dessen minimaler Abstand zum Wasserbehälter von bisher 220 m auf 170 m sinkt (**siehe Blatt 1**).

Das Gutachten [3] definierte für diese Erweiterungszone maximale Sprengstoff-Lademengen und prognostizierte für den minimalen Abstand zwischen Wasserbehälter und Sprengzone von 170 m eine maximale Schwinggeschwindigkeitskomponente von **7,2 mm/s** am Behälterfundament, die er durch Vergleich mit einem Anhaltswert für Schadenfreiheit nach DIN 4150/03 von 20 mm/s als unbedenklich einstufte.

Seitens des Betreibers des Hochbehälters wurden gegen die Steinbrucherweiterung Bedenken geäußert und ein Gutachten [4] beauftragt. Das Gutachten bescheinigte dem Behälter zwar einen bautechnisch einwandfreien Zustand, hielt jedoch für den Fall einer Steinbrucherweiterung Schäden am Behälter für möglich. Der Wasserbehälter wurde dazu als besonders erschütterungsempfindlich eingestuft und deshalb eine maximale Schwinggeschwindigkeitskomponente von **3 mm/s** gefordert. Der Gutachter schlug außerdem dynamische Berechnungen und Schwingungsmessungen vor.

Die Schwingungsmessungen [5] fanden im Jahre 2010 über 5 Wochen hinweg statt. In diesem Zeitraum wurde infolge von 20 Gewinnungssprengungen im benachbarten Steinbruchgelände am Wasserbehälter eine maximale Schwinggeschwindigkeitskomponente von nur **1,17 mm/s** gemessen.

Das vorliegende Gutachten soll in diesem Zusammenhang die Erschütterungsempfindlichkeit des Wasserbehälters mit statischen und dynamischen Berechnungen untersuchen und die Gefährdung des Behälters infolge der Sprengungen im geplanten Steinbruch-Erweiterungsbereich einschätzen. Dazu wird dem Wasserbehälter ein Anhaltswert für Schadenfreiheit nach DIN 4150/03 zugeordnet. Dieser Anhaltswert wird in Beziehung zu Materialbeanspruchungen des Behälters gesetzt.

3. Beschreibung des Wasserbehälters

3.1 Allgemeines

Der Wasserbehälter aus Stahlbeton wurde etwa 1956 errichtet. Im Verlauf seiner etwa 60-jährigen Standzeit erhärtete der Beton zweifellos beträchtlich nach. Die Betongüte kann mindestens einem heutigen **B 25** zugeordnet werden. Als Bewehrungsstahl kam Glattstahl (**BSt I**) zum Einsatz.

Das Oberteil des Behälters besteht aus einem 2,25 m hohen Abschnitt (Kalotte) einer **Kugelschale** mit einer Wanddicke von 10 cm und einem Kugel-Radius von 14,55 m.

Der **obere Ringträger** unter der Kugelkalotte hat einen Durchmesser von 16,30 m und einen Querschnitt von $b = 40 \times h = 30$ cm.

Unter dem Ringträger folgt eine 3,75 m hohe **konische Zylinderschale (Kegelstumpf)** mit einer Wanddicke von 15 cm. Ihr oberer Durchmesser ist 16,30 m und ihr unterer 20,15 m. Der vertikale Wandneigungswinkel beträgt 29,9 °.

Das ringförmige Fundament besitzt einen Innendurchmesser von 20,0 m und Querschnitts-Seitenlängen von $b = 80$ cm und $h = 40$ cm. Es bildet den **unteren Ringträger** des Behälters.

Ein vertikal zylindrisches Ein- und Auslaufbauteil bzw. der Zustiegsschacht mit Halbkreisquerschnitt stehen im Behälter.

Die allseitige Erdüberdeckung des Behälters ist mindestens 80 cm hoch. Die maximale Wasserfüllung steht 20 cm über dem Ringträger. **Eine Übersicht gibt das Blatt 2.**

Der Behälter wurde für Eigengewicht, inneren Wasserdruck, Erdüberdeckung und Verkehrslast zweifellos statisch korrekt bemessen.

Die in [4] gewählte Beschreibung des Hochbehälters als *schlankes, filigranes Bauwerk* ist nicht zutreffend. Mit seiner 80 cm dicken Erdüberdeckung ist der 7,5 m hohe Behälter mit einem unteren Durchmesser von 20 m *weder schlank noch filigran*.

Auch das Bild auf Seite 1 macht sicher nicht den Eindruck eines schlanken und filigranen Bauwerkes.

3.2 Statische Berechnungen

Schalen sind relativ dünn, aber sehr stabil, weil sie nur hauptsächlich durch Längskräfte in ihrer Ebene belastet sind. Bei Betonschalen sind die Längskräfte *Druckkräfte*, die der Beton sehr gut aufnehmen kann.

3.2.1 Kugelschale

Die 80 cm dicke **Erdüberdeckung** auf der Kugelschale hat eine Massenbelegung von 1,40 t/m² und wiegt mit einer Fläche von 226,2 m² insgesamt **316,7 t**.

Die 10 cm dicke **Kugelschale** hat eine Massenbelegung von 0,24 t/m² und wiegt mit einer Mantelfläche von 219,4 m² insgesamt **52,7 t**.

Die maximal 20 cm hohe Wasserfüllung in der Kugelschale kann vernachlässigt werden.

Mit einem geringem Fehler kann man die Gewichtsbelastung **g** der Kugelschale als radial wirkend annehmen. Diese Flächenbelastung lautet:

$$g = 14,0 + 2,4 = 16,4 \text{ kN/m}^2$$

Die dadurch erzeugte Schalen-Druckkraft **D** in der Meridianrichtungen lautet dann:

$$D = g \cdot R / 2 = 16,4 \cdot 14,55 / 2 = 119,3 \text{ kN/m}$$

Die in der (d = 10 cm dicken) Schale erzeugte **Druckspannung** σ lautet:

$$\sigma = D / d = 119,3 / 0,10 = \underline{\underline{1,19 \text{ MN/m}^2}}$$

Der Beton B 25 besitzt eine zulässige Druckspannung **zul. $\sigma = 8,3 \text{ MN/m}^2$** .

Die Kalotte der **Kugelschale** des Wasserbehälters ist durch die vorhandene Druckspannung von 1,19 MN/m² nur zu etwa **14 % statisch ausgelastet** (1,19 / 8,3 = 0,143).

Die in [6] gewählte Bezeichnung für die Hülle des Behälters als „vulnerabel“ (verletzlich) ist bei diesem *statisch sehr gering ausgelasteten Bauteil* ganz sicher nicht zutreffend.

3.2.2 oberer Ringträger

Der obere Ringträger trägt die Kugelschale und wird durch die Schalen-Druckkraft **D** im Meridianwinkel von rund $\alpha = 27^\circ$ zur Horizontalen radial belastet. Die **horizontale Ring-Radialbelastung h** beträgt:

$$h = D \cdot \cos \alpha = 119,3 \cdot 0,8910 = 106,3 \text{ kN/m}$$

Mit dem Ringträger-Radius $R = 16,3 / 2 = 8,15 \text{ m}$ wird die **Ringträger-Zugkraft Z**:

$$Z = h \cdot R = 106,3 \cdot 8,15 = \underline{\underline{866 \text{ kN}}}$$

Der obere Ringträger wurde für diese Zugbelastung zweifellos statisch korrekt bemessen. Bereits 14 Bewehrungsstäbe aus Glattstahl „BSt I“ mit einem Durchmesser von 25 mm nehmen diese Zugkraft **Z** problemlos auf. Auf die Bewehrungsstäbe des oberen Ringträgers wirken dann Zugspannungen von 12,6 kN/cm².

3.2.3 untere Kegelschale

Die untere, 15 cm dicke und 3,75 m hohe Kegelschale besitzt einen oberen Durchmesser $D = 16,3 \text{ m}$, einen unteren Durchmesser von 20,15 m und einen Neigungswinkel $\beta = 29,9^\circ$ zur Vertikalen. Im folgenden wird jeweils ein 1 m langer Bogenabschnitt bzw. Schalenstreifen betrachtet.

Die Massenbelegung der Kegelschale beträgt 0,36 t/m². Mit einer Mantelfläche von 247,80 m² wiegt sie insgesamt **89,2 t**.

Die Beton-Gewichtskraft der (schräg) 4,328 m langen **Kegelschale** beträgt: **g = 15,6 kN/m**.

Die am Kopf angreifende **Vertikalkraft V aus Kegelschale** samt deren Erdüberdeckung ($m = 52,7 + 316,7 = 369,4 \text{ t}$) und oberem Ringträger ($m = 14,7 \text{ t}$) beträgt mit $G = 3,84 \text{ MN}$:

$$V = G / (\pi \cdot D) = 3844 / (\pi \cdot 16,3) = 75,1 \text{ kN/m}$$

Die schräg-seitliche **Erdüberdeckung** wiegt $6,06 \text{ t/m}$. Ihre Meter-Gewichtskraft lautet $g = 60,6 \text{ kN/m}$. Ihr Gesamtgewicht ist $342,7 \text{ t}$.

Die volle **Wasserfüllung** erzeugt eine horizontale Wasserkraft $W = 137,6 \text{ kN/m}$ mit einem vertikalen Abstand von $1,73 \text{ m}$ zur Sohle.

Bildet man über dem Fundament an der Schalensohle ein Momentengleichgewicht, so kommt als Ergebnis fast Null heraus:

$$M = 75,1 \cdot 2,16 + 15,6 \cdot 1,08 + 60,6 \cdot 0,6 - 137,6 \cdot 1,73 = 215,4 - 238,0 = -22,6 \approx 0$$

ob. Ringträger Kegelschale Erde Wasser

Der Konstrukteur wählte offenbar die Schalenneigung so, dass sich bei voller Wasserfüllung die Querbelastungen der Kegelschale etwa aufheben. Somit existieren bei vollem, aber auch bei leerem Behälter in der Kegelschale nur Druckspannungen in der Schalenebene:

Die Gesamtgewichtskraft **G** über dem Fundament beträgt:

$$G = 3,17 + 0,53 + 0,15 + 3,43 + 0,89 = 8,17 \text{ MN}$$

Erde Kalotte ob. RT. Erde Kegelschale

Die Meter-Gewichtskraft **V** über dem Fundamentring mit $D = 20,15 \text{ m}$ beträgt:

$$V = G / (\pi \cdot D) = 8170 / (\pi \cdot 20,15) = 129,1 \text{ kN/m}$$

Die Längs-Druckkraft **N** der Schale mit $\beta = 29,9^\circ$ beträgt über dem Fundamentring:

$$N = V / \cos \beta = 129,1 / 0,8665 = 148,9 \text{ kN/m}$$

Die in der ($d = 15 \text{ cm}$ dicken) Kegelschale maximal erzeugte **Druckspannung σ** lautet:

$$\sigma = N / d = 148,9 / 0,15 = 0,99 \text{ MN/m}^2$$

Der Beton B 25 besitzt eine zulässige Druckspannung **zul. $\sigma = 8,3 \text{ MN/m}^2$** .

Die **Kegelschale** des Wasserbehälters ist durch die vorhandene Druckspannung von $0,99 \text{ MN/m}^2$ nur zu etwa **12 % statisch ausgelastet**.

Die in [6] gewählte Bezeichnung für die Hülle des Behälters als „vulnerabel“ (verletzlich) ist auch bei diesem *statisch sehr gering ausgelasteten* Bauteil Kegelschale ganz sicher nicht zutreffend.

4. Zuordnung eines Anhaltswertes für Schadenfreiheit

Bei den benachbarten Steinbruchsprengungen handelt es sich um kurzzeitige Erschütterungen. Die zugehörigen Frequenzen f liegen zwischen 10 und 20 Hz .

In Tabelle 1 der Norm [2] wird dafür zutreffend in Zeile 1 für gewerblich genutzte Bauten oder Industriebauten ein sog. Anhaltswert für Schadenfreiheit

$$v_1 = 20 \text{ bis } 25 \text{ mm/s} \quad (f = 10 \text{ bis } 20 \text{ Hz})$$

angegeben. Eine weitere Vergrößerung dieses Anhaltswertes im Sinne erdüberdeckter Leitungen oder massiver Bauweise erscheint hier aber nicht opportun.

Die Anhaltswerte nach Tabelle 1 sind mathematisch gesehen *untere Schranken* für Grenzwerte. Sie sind **nicht** als zulässige Werte zu verstehen, die nicht überschritten werden dürfen. Eine Überschrei-

tung dieses Anhaltswertes ruft demzufolge auch nicht zwangsläufig gebrauchswertmindernde Schäden hervor, da die Wahrscheinlichkeit von Schäden bei einer Überschreitung erst von Null an beginnend langsam ansteigt.

Tragende Bauteile werden übrigens erst bei weit größeren Schwinggeschwindigkeiten als dem Anhaltswert geschädigt.

Die folgende Ermittlung von Biegespannungen durch Erschütterungen in der Größe des Anhaltswertes gemäß Abschnitt 6.2 der DIN 4150/03 zeigt die Beanspruchung dieses Wasserbehälters.

5. Schwinggeschwindigkeit und Biegespannung der Behälterwand

Dynamische Beschleunigungen am Behälterfundament infolge der benachbarten Sprengungen erzeugen Massenträgheitskräfte in den Behälterbauteilen, die vorrangig zu Biegeschwingungen führen. Bei den hier vorhandenen Schalenbauteilen sind Biege- immer mit Dehnschwingungen verkoppelt, was die Schalen grundsätzlich widerstandsfähiger macht.

Eine Berechnung als gerader Biegestab wird also eine stärkere Beanspruchung ergeben und damit größere Biegespannungen ergeben bzw. das Ergebnis wird auf der „ungünstigen Seite“ liegen.

Die Behälterwand wird dazu als physikalisch linearer *Biegestab aus Beton* angenommen. Die Wirkung der Bewehrung auf der Zugseite wird einer fiktiven Betonzugfestigkeit zugeordnet.

Der minimale Anhaltswert mit der Schwinggeschwindigkeit $v = 20$ mm/s wird vollständig einer Biegeschwingung des Trägers bzw. der Behälterwand zugeordnet.

Mit der Voraussetzung harmonischer Resonanzanregung kann für einen schwingenden Betonbalken aus der Schwinggeschwindigkeitsamplitude v direkt die Baustoffspannung berechnet werden:

$$\sigma = v \cdot \sqrt{(E \rho)} \cdot 3,16 \cdot 10^{-5} \cdot (y_{\max} / i) \cdot [(u'' \cdot l^2) / (u \cdot \lambda^2)] \cdot \sqrt{(\mu / \mu_e)}$$

σ ... Spannung [MN/m²]

v ... max. Schwinggeschwindigkeit [20 mm/s]

E ... Elastizitätsmodul [31000 MN/m²]

ρ ... Dichte [2,4 t/m³]

y_{\max} ... Randabstand zur Nulllinie [m]

i ... Trägheitsradius [m]

u, u'' ... Maximalverschiebung [m] und zweite Ableitung [m/m²] der Biegelinie

λ ... Ordnungszahl der angeregten Eigenform, hier 1

μ, μ_e ... Massenbelegung des gesamten (Erde und Schale) und des tragenden Querschnitts [t/m]

Betonträger : $\sqrt{(E \rho)} \cdot 3,16 \cdot 10^{-5} = 0,0086 \text{ MN/m}^2 \cdot \text{s/mm}$

Rechteck-Querschnitt : $y_{\max} / i = \sqrt{3}$

Zweistützträger: $(u'' \cdot l^2) / (u \cdot \lambda^2) = 1,00$

mit „Totlast“ (Erdüberdeckung): $\sqrt{(\mu / \mu_e)} = 2,61$ (Kugelschale) bzw. 2,21 (Kegelschale)

für die **Kugelschale** wird die dynamische Spannung σ :

$$\sigma = 0,0086 \cdot \sqrt{3} \cdot 1 \cdot 2,61 \cdot v = 0,039 \cdot 20 = \underline{0,78 \text{ MN/m}^2}$$

[MN/m²]

[mm/s]

und für die **Kegelschale**:

$$\sigma = 0,0086 \cdot \sqrt{3} \cdot 1 \cdot 2,21 \cdot v = 0,033 \cdot 20 = \underline{0,66 \text{ MN/m}^2}$$

[MN/m²]

[mm/s]

Diese berechneten dynamischen Spannungen σ_D (Zug und Druck) addieren sich zur jeweils vorhandenen statischen Druckspannung σ_S :

Superposition:

	σ_s [MN/m ²]	σ_d [MN/m ²]	$\max(\sigma_s + \sigma_d)$ [MN/m ²]	$\min(\sigma_s - \sigma_d)$ [MN/m ²]
Kugelschale	1,19	$\pm 0,78$	1,97 (Druck)	0,41 (Druck)
Kegelschale	0,99	$\pm 0,66$	1,67 (Druck)	0,33 (Druck)

Bei einer Schwinggeschwindigkeitsamplitude $v = 20$ mm/s entstehen in den Behälterschalen immer *Druckspannungen*, also keine *Zugspannungen*, die zu Rissen führen könnten.

Die maximal in der Kugelschale entstehende Druckspannung beträgt $\sigma = 1,97$ MN/m².

Geht man vom Verfahren der zulässigen Spannungen aus, so muss die Gesamtspannung aus statischen und dynamischen Anteilen unter der zulässigen Spannung eines Bauteils liegen.

Für den betrachteten Beton B 25 und eine geringe Anzahl Lastwechsel beträgt die zulässige Spannung zul. $\sigma = 8,3$ MN/m².

Die **Auslastung des Betons bei Biegeschwingungen mit 20 mm/s** liegt somit maximal bei **24 %**.

Infolge einer Sprengerschütterung mit einer Schwinggeschwindigkeit von **20 mm/s** entsteht somit **definitiv keine Standsicherheitsminderung für die Bauteile des Wasserbehälters**.

Das Gutachten [3] prognostizierte für die geplante Steinbrucherweiterung jedoch nur eine maximale Schwinggeschwindigkeitskomponente von **7,2 mm/s** am Behälterfundament.

Somit erbringt die geplante Erweiterung des Steinbruches der Hohenlimburger Kalkwerke für den Trinkwasser- Hochbehälter „Am Steltenberg“ mit Sicherheit keine Verringerung seiner Trag- und Nutzungsfähigkeit.

