

# Technische Notiz

## - T/WTI/21/002, Rev. 2 -

An: [REDACTED]

Kopie:

Von: [REDACTED]

Zeichen: [REDACTED]

Telefon: [REDACTED]

Datum: 26.07.2023

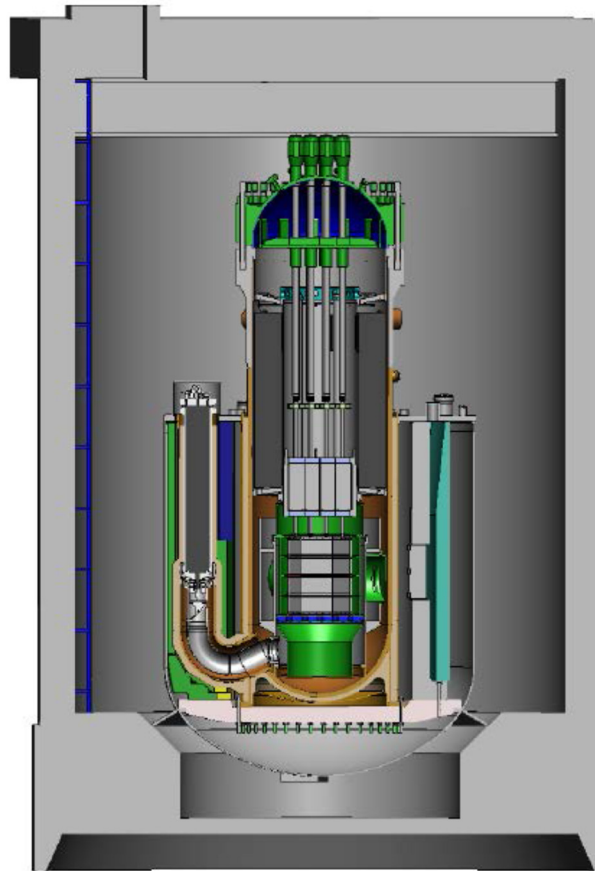
t\_wti21002\_re2

## Forschungsschiff Otto Hahn - Mechanische Nachweise zum Lastabsturz eines Dachbinders auf die Abdeckung des RDB-Schachtes

### 1. Einleitung

Auf dem Gelände des Helmholtz-Zentrums Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung (HZG) befindet sich der Reaktordruckbehälter (RDB) des ehemaligen Forschungsschiffs Otto Hahn im Reaktordruckbehälterschacht (siehe Abbildung 1). Die Abdeckung des Schachts schließt mit dem umliegenden Gelände bündig ab [1]. Es ist geplant, den RDB zu demontieren und extern zu entsorgen. Zu diesem Zweck wird der Schacht zum Teil freigelegt und mit einer Zerlegehalle umbaut bzw. überbaut. Hierbei ist der Absturz eines Dachbinders bei der Montage mit einem Kran auf die Abdeckung des Schachts als größtmögliche Einwirkung während der Baumaßnahmen zu unterstellen.

In dieser Technischen Notiz wird mittels analytischer Abschätzungen gezeigt, dass es infolge dessen zu keinen unzulässigen Einwirkungen auf den RDB durch Trümmerteile kommen kann. Die erforderlichen Maßnahmen zur Verringerung bzw. Vermeidung der Lasteinwirkung auf die Abdeckung werden kurz beschrieben.



**Abbildung 1: Reaktordruckbehälter im Schacht**

## **2. Kurzbeschreibung des Schachts**

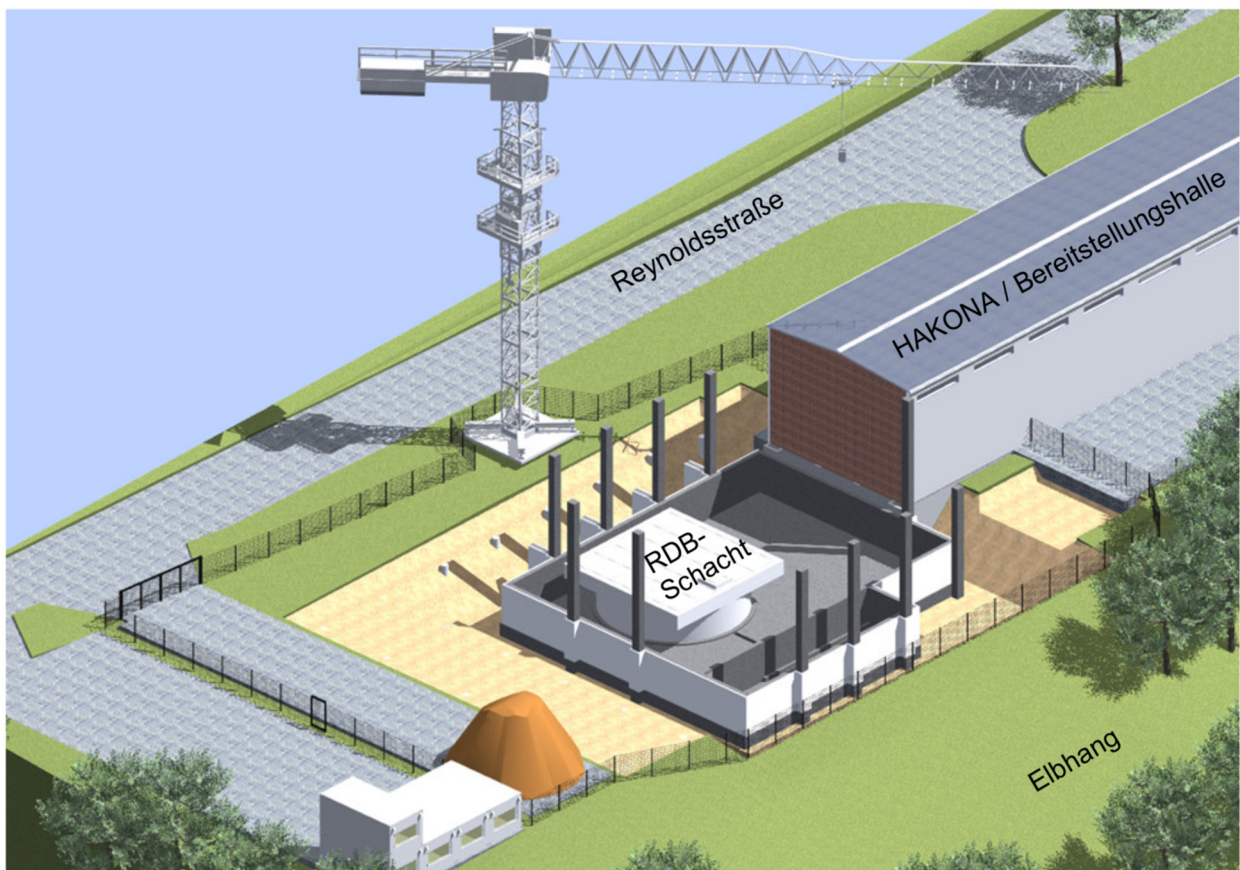
Der Schacht besteht aus Stahlbeton und hat einen runden Querschnitt mit einem Innendurchmesser von 8,5 m und einer Tiefe von 15,2 m. Die Wände sind 60 cm dick. Die demontierbare Abdeckung des Schachts besteht aus einzelnen Stahlbetonfertigteilen mit einer Dicke von 50 cm. Die Stahlbetonfertigteile liegen auf dem quadratischen Rand des Schachts und auf jeweils zwei Trägern HEB 800 und HEB 1000 auf. Auf den Stahlbetonfertigteilen befindet sich eine bituminöse Abdichtung [1]. Diese Strukturen bilden den Schachtkopf. Die Abdeckung ist auf eine Verkehrslast von 75 kN/m<sup>2</sup> ausgelegt.

## **3. Montage der Dachbinder, Absturzscenarien**

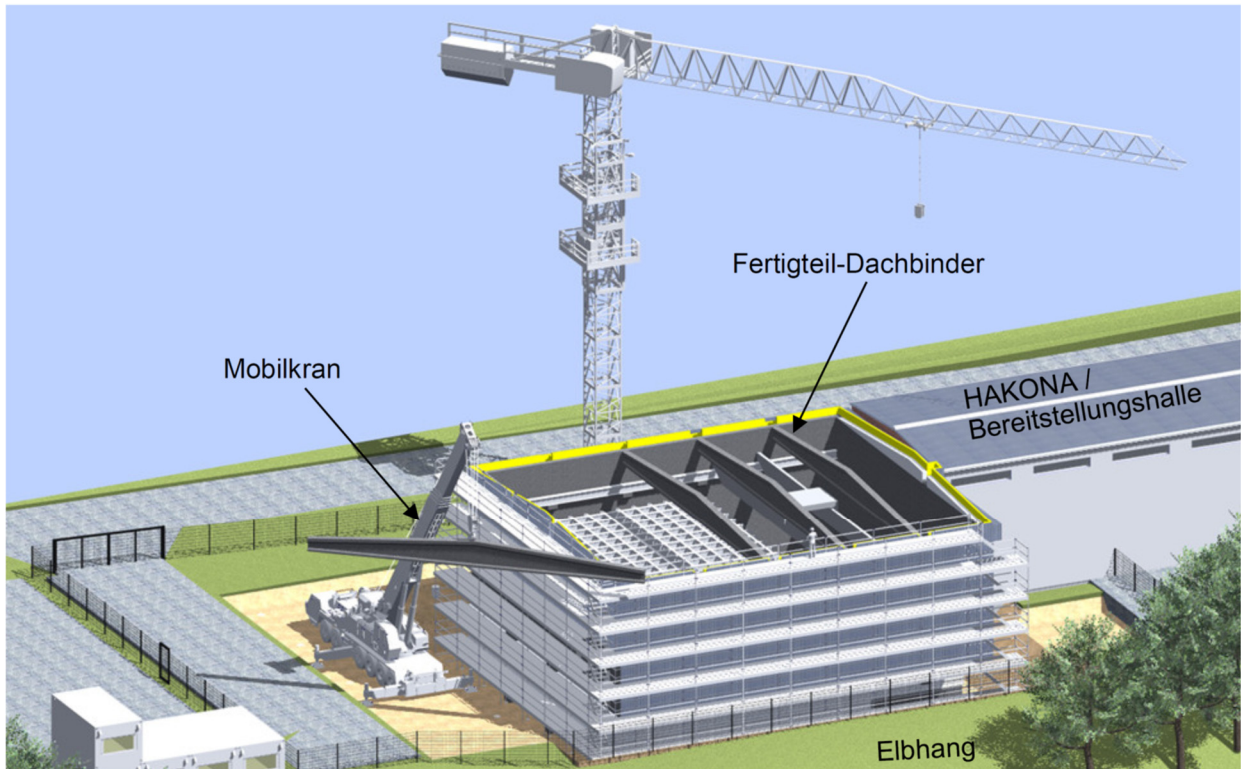
Der geplante Ablauf der Baumaßnahmen ist in [2] ausführlich beschrieben. Die Montage der Dachbinder erfolgt nach Fertigstellung des Rohbaus inkl. der Außenwände bis Oberkante Hallendach und der Montage des Hallenkrans (siehe Abbildung 2 und Abbildung 3). Der Abbruch des Schachtkopfs erfolgt erst nach vollständiger Fertigstellung der Zerlegehalle (siehe Abbildung 4). Die Spannweite der Dachbinder [3] entspricht der inneren Breite

des Gebäudes. Die lichte Weite der Kranbahnen des Hallenkranes ist geringer als die Spannweite der Dachbinder. Aus den geometrischen Randbedingungen folgt, dass ein ungestörter, freier Fall in horizontaler Orientierung nur mit einem gegen die Gebäudeachse gedreht orientierten Dachbinder möglich ist. Andernfalls schlägt der Dachbinder zunächst auf eine Außenwand auf und fällt anschließend mit einer Rotationsbewegung in das Gebäude. Daraus ergeben sich zwei zu bewertende Lastfälle:

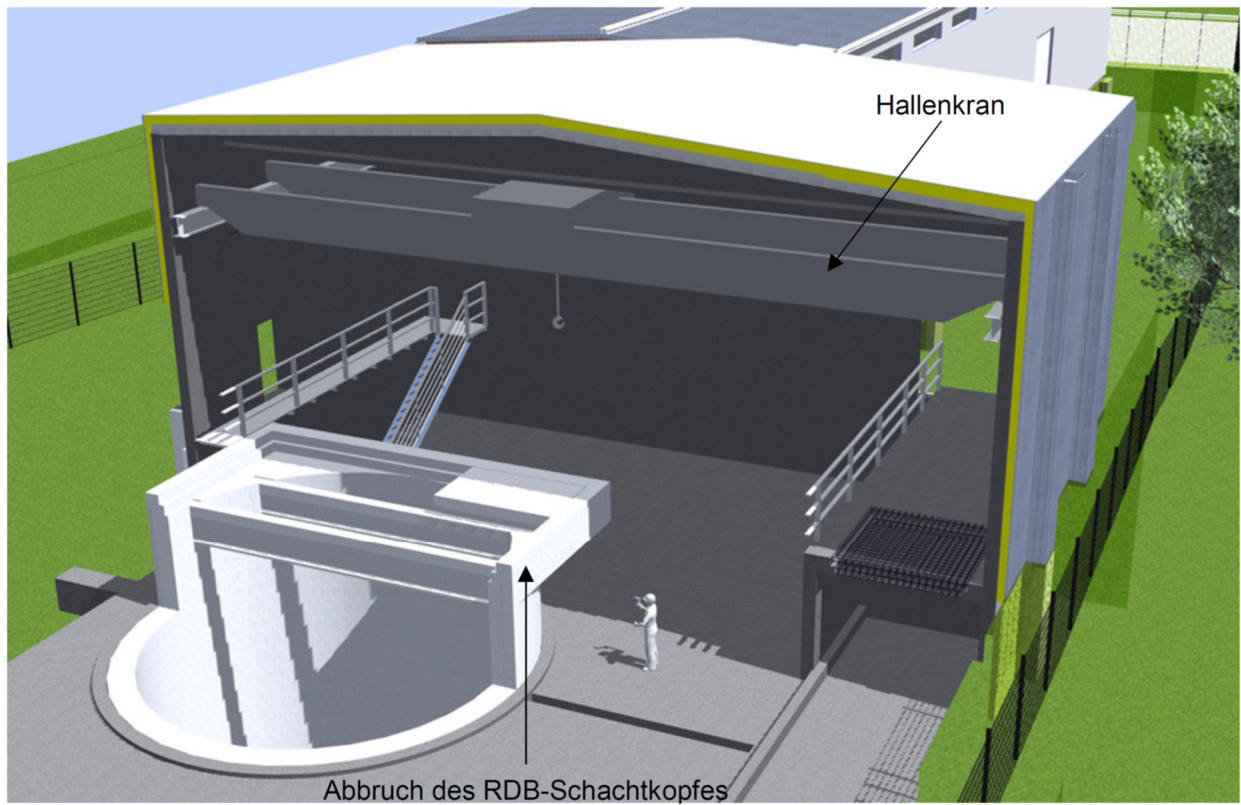
- Fall eines Dachbinders in horizontaler Orientierung auf den Schachtkopf und umgebende Strukturen des Rohbaus (siehe Abbildung 5 bis Abbildung 8),
- Fall mit Rotation eines Dachbinders und Aufprall mit einem Ende auf den Schachtkopf (siehe Abbildung 9).



**Abbildung 2: Rohbau des tiefliegenden Hallenteils mit Schacht**



**Abbildung 3: Montage der Dachbinder**



**Abbildung 4: Abbruch des Schachtkopfs, Betonplatten entfernt**

#### 4. Schutzmaßnahmen

Die Energie des Aufpralls eines Dachbinders auf den Schachtdeckel ist zu groß, als dass sie durch die elastische Deformation der beteiligten Komponenten allein aufgenommen werden könnte. Auf den Schachtdeckel wird daher eine ca. 50 cm dicke Schicht aus Granulat oder Kies in Bigpacks aufgebracht. Die Schüttdichte des Materials beträgt ca.  $1000 \text{ kg/m}^3$  bis  $2000 \text{ kg/m}^3$ . Damit ergibt sich eine Flächenlast von max.  $10 \text{ kN/m}^2 < 75 \text{ kN/m}^2$ . Die Schüttung ist geeignet, den größten Teil der Energie eines Aufpralls zu dissipieren und die einwirkende Last zu verteilen.

#### 5. Berechnungen

Bezüglich der potentiellen Einwirkungen auf die Schachtabdeckung werden analytische Abschätzungen durchgeführt. Da der Durchmesser der Schachtabdeckung mit 8,5 m geringer ist als die Spannweite eines Dachbinders mit 20,08 m und der Schacht in der Halle am Rand angeordnet ist, ergeben sich Einschränkungen bezüglich der Aufprallorientierungen (siehe Anhang 1). Ein Aufprall kann nur asymmetrisch erfolgen. Aufgrund der örtlichen Verhältnisse kann der Schwerpunkt eines Dachbinders nicht mit der Mitte des Schachtes übereinstimmen. Hieraus folgen auch für einen Aufprall in horizontaler Orientierung Rotationbewegungen, die zu einer Verringerung der Belastungen der Abdeckung des Schachtes führen. Insbesondere treten die maximal möglichen Einwirkungen nicht in der Mitte, sondern am Rand der Schachtabdeckung auf.

##### 5.1 Fall in horizontaler Orientierung

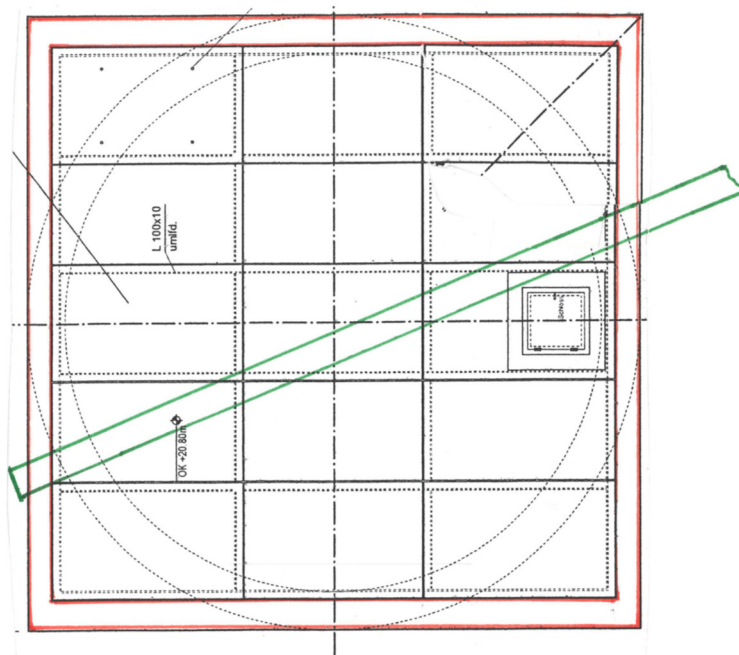


Abbildung 5: Fall in horizontaler Orientierung, Draufsicht

Die Höhe der Außenwand der Halle über die 20,80-m-Ebene (Oberkante Schachtkopf, Gelände) beträgt nach [1] 7,77 m. Für den Fall in horizontaler Orientierung wird abdeckend eine Fallhöhe von 9 m angenommen. Das Volumen des Dachbinders beträgt nach [3] ca. 5 m<sup>3</sup>. Damit errechnet sich eine abdeckende Masse von  $m = 12500$  kg. Die Spannweite des Dachbinders beträgt  $l = 20,04$  m. Die Verteilung der Masse ist in guter Näherung gleichmäßig. Die gesamte kinetische Energie (Translation) des Aufpralls berechnet sich zu:

$$E_{\text{kin,trans}} = 12500 \text{ kg} \cdot 9 \text{ m} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 1,1 \cdot 10^6 \text{ Nm} \quad \text{Translationsenergie}$$

Mit  $E_{\text{kin,ges}} = P^2/(2 \cdot m)$  folgt:

$$P = 1,66 \cdot 10^5 \text{ Ns} \quad \text{Impuls}$$

Es werden drei Varianten betrachtet:

- Leichte Schrägstellung mit Aufprall zuerst mit dem Dachbinderende
- Exakt horizontale Orientierung
- Leichte Schrägstellung mit Aufprall zuerst der Dachbindermitte auf die Kante des Schachtes

Die Translationsenergie lässt sich auch beschreiben als Rotationsenergie um die Drehachse beim Aufprall. Eine Rotation um den Schwerpunkt des Dachbinders findet vor dem Aufprall nicht statt, so dass das Trägheitsmoment nur aus dem Steineranteil besteht. Mit dem Abstand  $r$  des Schwerpunktes von der Drehachse berechnet sich der Steineranteil zu:

$$J_{\text{st}} = m \cdot r^2 = 12,6 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2$$

Der Drehimpuls berechnet sich zu:

$$\mathbf{L} = \mathbf{r} \times \mathbf{P} \quad \text{mit Betrag } r = l/2$$

Für kleine Abweichungen der Orientierung des Dachbinders von der Horizontalen wird ein rechter Winkel zwischen  $\mathbf{P}$  und  $\mathbf{r}$  angenommen. Es gilt:

$$E_{\text{rot1}} = L^2/(2 \cdot J_{\text{st}}) = 1/2 \cdot J \cdot \omega^2 = 1,1 \cdot 10^6 \text{ Nm}$$

$$L^2 = E_{\text{rot1}} \cdot 2 \cdot J_{\text{st}} \quad \text{vor dem Aufprall}$$

Da beim Aufprall kein äußeres Moment (Kräftepaar) wirkt, gilt Drehimpulserhaltung. Das Trägheitsmoment des Dachbinders um seinen Schwerpunkt beträgt:

$$J_{\text{sp}} = m \cdot l^2/12 = 4,2 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2 \quad (\text{Balken})$$

Das gesamte Trägheitsmoment  $J_{db}$  bei Rotation um eine Achse nicht durch den Schwerpunkt und der zugehörige Drehimpuls berechnen sich zu:

$$J_{db} = J_{sp} + J_{st}$$

$$L^2 = E_{rot2} \cdot 2 \cdot (J_{sp} + J_{st})$$

Wenn kein äußeres Moment wirkt, gilt Drehimpulserhaltung:

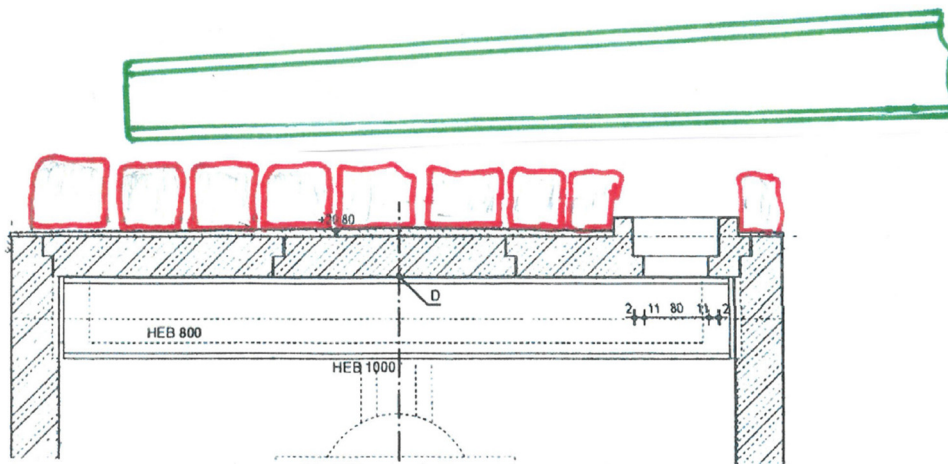
$$L^2 = E_{rot1} \cdot 2 \cdot J_{st} = E_{rot2} \cdot 2 \cdot (J_{sp} + J_{st})$$

$$E_{rot2} = E_{rot1} \cdot 2 \cdot J_{st} / (2 \cdot (J_{sp} + J_{st})) < E_{rot1}$$

Die beim Stoß dissipierte Energie beträgt:

$$E_{diss} = E_{rot1} - E_{rot2}$$

### 5.1.1 Leichte Schrägstellung mit Aufprall zuerst mit dem Dachbinderende



**Abbildung 6: Leichte Schrägstellung mit Aufprall zuerst mit dem Dachbinderende**

Bei dem in Abbildung 6 dargestellten Fall kommt es zunächst zu einem primären Stoß mit dem im Bild linken Ende des Dachbinders mit anschließender Rotation um dieses Ende.

Das Trägheitsmoment bei Rotation um das Ende des Dachbinders nach dem primären Stoß beträgt:

$$J_{db} = J_{sp} + J_{st} = 4,2 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2 + 12,6 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2 \quad \text{für } r = 10,04 \text{ m}$$

$$L^2 = E_{rot1} \cdot 2 \cdot J_{st} = E_{rot2} \cdot 2 \cdot (J_{sp} + J_{st})$$

$$E_{rot2} = E_{rot1} \cdot J_{st} / (J_{sp} + J_{st}) = 0,75 \cdot E_{rot1}$$

$$E_{diss} = 0,25 \cdot E_{rot1} = 2,75 \cdot 10^5 \text{ Nm}$$

Ein Viertel der Energie wird also beim primären Stoß dissipiert. Im Folgenden wälzt sich der Dachbinder über die Bigpacks ab und rotiert anschließend um eine Achse im Abstand zwischen ca. 2 m bis ca. 6 m von seinem Schwerpunkt.

$$E_{\text{rot3}} = E_{\text{rot1}} \cdot J_{\text{st}} / (J_{\text{sp}} + J_{\text{st}}) \quad \text{mit } J_{\text{sp}} = 4,2 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2$$

$$E_{\text{rot3}} = 0,1 \cdot E_{\text{rot1}} = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Nm} \quad \text{für } r = 2 \text{ m} \quad J_{\text{st}} = 5 \cdot 10^4 \text{ kgm}^2$$

$$E_{\text{diss}} = 0,9 \cdot E_{\text{rot1}} = 9,9 \cdot 10^5 \text{ Nm}$$

$$E_{\text{rot3}} = 0,52 \cdot E_{\text{rot1}} = 5,7 \cdot 10^5 \text{ Nm} \quad \text{für } r = 6 \text{ m} \quad J_{\text{st}} = 4,5 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2$$

$$E_{\text{diss}} = 0,48 \cdot E_{\text{rot1}} = 5,3 \cdot 10^5 \text{ Nm}$$

Unter der ungünstigen Annahme der Last in der Mitte wirkend errechnet sich die Tragfähigkeit  $F_{\text{pl}}$  der Stahlträger IPB 1000 im ideal-plastischen Zustand:

Maximales Biegemoment  $M_{\text{max}} = 1 \cdot F_{\text{max}}/4$  Länge:  $l = 850 \text{ cm}$

Biegemoment plastisch  $M_{\text{pl}} = R_{\text{p0,2}} \cdot W_{\text{pl}}$  Fließspannung:  $R_{\text{p0,2}} = 24000 \text{ N/cm}^2$

$M_{\text{pl}} = 3,1 \cdot 10^8 \text{ Ncm}$  plastisches Widerstandsmoment:

mit  $M_{\text{max}} = M_{\text{pl}}$   $W_{\text{pl}} = 14860 \text{ cm}^3$

folgt  $F_{\text{max}} = F_{\text{pl}} = 4 \cdot M_{\text{pl}}/l = 1,64 \cdot 10^6 \text{ N} = 1640 \text{ kN}$

Beim Fall in horizontaler Orientierung werden drei Betonplatten und zwei Stahlträger belastet. Die Masse der Betonplatten beträgt 3 mal 6000 kg gleich 18000 kg und übersteigt damit die Masse des Dachbinders von 12500 kg. Bei einem vollplastischen Stoß zwischen dem Dachbinder und drei Platten wird also der größere Anteil der Energie durch das Schüttgut in den Bigpacks dissipiert. Unter der konservativen Annahme, dass die Energie allein durch Durchbiegung der Träger dissipiert wird, gilt:

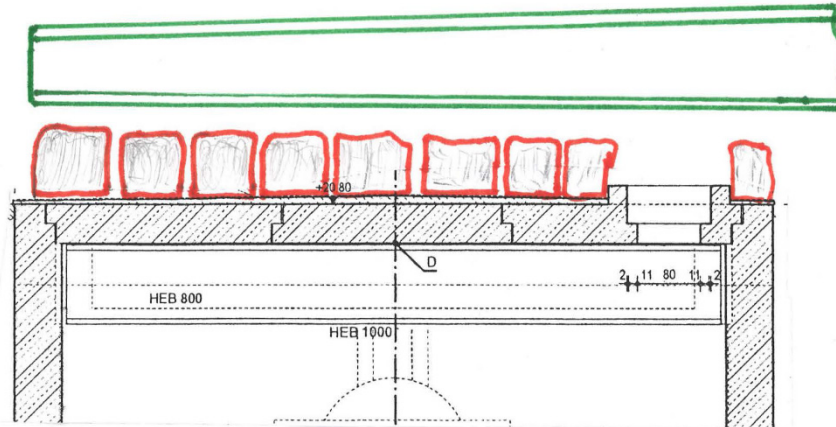
$$E_{\text{diss}} = E_{\text{pl}} = 2 \cdot F_{\text{pl}} \cdot f \quad \text{Durchbiegung } f$$

$$f = 9,9 \cdot 10^5 \text{ Nm} / (2 \cdot 1,64 \cdot 10^6 \text{ N}) = 30 \text{ cm} \quad \text{ca. } 3,5 \%$$

Dies stellt eine obere Schranke dar, die realistisch bei weitem nicht erreicht werden kann, da ein erheblicher Anteil der Energie durch das Schüttgut dissipiert wird.



### 5.1.2 Exakt horizontale Orientierung



**Abbildung 7: Exakt horizontale Orientierung**

Bei der in Abbildung 7 dargestellten Orientierung des Dachbinders ist die Lage der Drehachse des primären Stoßes nicht eindeutig zu bestimmen. Diese wird daher als in der Mitte der Schachtabdeckung liegend angenommen. In diesem Fall kann der Abstand des Schwerpunktes zur Drehachse (Schachtmitte) zu ca.  $e = 6 \text{ m}$  ( $(20,04 \text{ m} - 8,5 \text{ m})/2$ ) ab-geschätzt werden.

$$J_{\text{st}} = m \cdot e^2 = 4,5 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Bei dem primären Stoß wird ca. die Hälfte der Energie dissipiert.

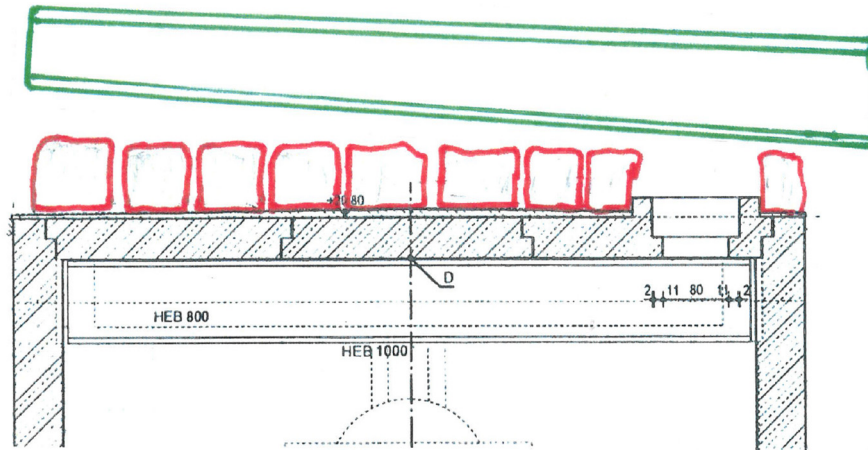
$$L^2 = E_{\text{rot1}} \cdot 2 \cdot J_{\text{st}} = E_{\text{rot2}} \cdot 2 \cdot (J_{\text{sp}} + J_{\text{st}})$$

$$E_{\text{rot2}} = E_{\text{rot1}} \cdot J_{\text{st}} / (J_{\text{sp}} + J_{\text{st}}) = 0,52 \cdot E_{\text{rot1}} = 5,7 \cdot 10^5 \text{ Nm}$$

$$E_{\text{diss}} = 0,48 \cdot E_{\text{rot1}} = 5,3 \cdot 10^5 \text{ Nm}$$

Unter der ungünstigen Annahme, dass die Last in der Mitte wirkt, errechnet sich eine Durchbiegung von 16,2 cm (vergleiche 5.1.1). Nach dem primären Stoß verschiebt sich die Drehachse zum im Bild rechten Rand der Schachtabdeckung.

### 5.1.3 Leichte Schrägstellung mit Aufprall zuerst der Dachbindermitte auf die Kante des Schachtes



**Abbildung 8: Fall auf die Kante**

In diesem Fall befindet sich der Schwerpunkt des Dachbinders im Bereich der Kante des Schachtes bzw. leicht außerhalb. Für einen Abstand des Schwerpunktes von der Kante von  $e = 2 \text{ m}$  gilt:

$$J_{\text{st}} = m \cdot e^2 = 5 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$L^2 = E_{\text{rot1}} \cdot 2 \cdot J_{\text{st}} = E_{\text{rot2}} \cdot 2 \cdot (J_{\text{sp}} + J_{\text{st}})$$

$$E_{\text{rot2}} = E_{\text{rot1}} \cdot J_{\text{st}} / (J_{\text{sp}} + J_{\text{st}}) = 0,11 \cdot E_{\text{rot1}}$$

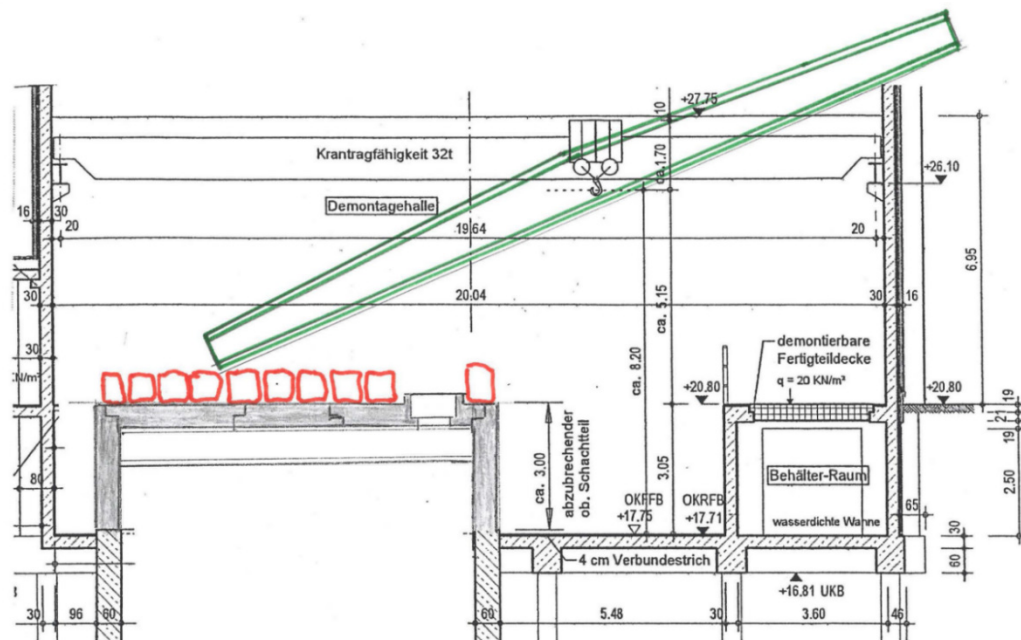
Im ungünstigsten Fall wirkt die gesamte Energie auf die Kante des Schachtes.

$$E_{\text{diss}} = 0,25 \cdot E_{\text{rot1}} = 2,75 \cdot 10^5 \text{ Nm}$$

$$E_{\text{diss}} = E_{\text{rot1}} = 11 \cdot 10^5 \text{ Nm}$$

Die Energie wird im Wesentlichen durch das Schüttgut in den Bigpacks dissipiert. Bei einem direkten Aufprall des Dachbinders auf die 60 cm dicke Wand des Schachtes würde der Dachbinder vor der Außenwand versagen. Bei dem Aufprall wirken die Zugkräfte auf den Obergurt und die Druckkräfte auf den vorgespannten 30 cm breiten Untergurt.

## 5.2 Rotation um die Gebäudeoberkante



**Abbildung 9: Rotation**

Die Situation nach dem Fall eines Dachbinders auf die Außenwand mit anschließender Rotation des Dachbinders auf die Schachtabdeckung ist in Abbildung 9 dargestellt. Der Schwerpunkt des Dachbinders befindet sich ca. 5 m über der 20,80-m-Ebene. Die Fallhöhe des Schwerpunkts beträgt also ca. 3 m. Die kinetische Energie des Aufpralls auf die Wand (kleinerer Teil wird im folgenden vernachlässigt) und auf die Schachtabdeckung (größerer Teil) beträgt in Summe also:

$$E_{\text{kin,rot}} = 3 \text{ m} \cdot 12500 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 3,7 \cdot 10^5 \text{ Nm} \quad \text{Rotationsenergie } E_{\text{rot}}$$

Unter Berücksichtigung eines Abstandes des Schwerpunktes von Drehpunkt von  $e = 9 \text{ m}$  ergibt sich mit dem Steineranteil von  $J_{\text{st}} = m \cdot e^2 = 10,1 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2$ :

$$J_{\text{db}} = J_{\text{sp}} + J_{\text{st}} = 14,3 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2$$

Mit  $E_{\text{rot,ges}} = L_{\text{db}}^2/2 \cdot J_{\text{db}} = J_{\text{db}} \cdot \omega_{\text{db}}^2/2$  folgt:

$$L_{\text{db}} = 10,3 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2/\text{s} \quad \text{Drehimpuls}$$

$$\omega_{\text{db}} = 0,72 \text{ s}^{-1} \quad \text{Winkelgeschwindigkeit}$$

Die Fläche einer Betonplatte beträgt ca.  $4,8 \text{ m}^2$ . Mit einer Dicke von  $0,5 \text{ m}$  und einer Dichte von  $2500 \text{ kg/m}^3$  berechnet sich deren Masse ohne Berücksichtigung der bituminösen Schicht zu  $m = 6000 \text{ kg}$ . Das Trägheitsmoment (nur Steineranteil) einer Betonplatte mit einer Masse von  $6000 \text{ kg}$  um den Drehpunkt ( $e = \text{ca. } 19 \text{ m}$ ) beträgt:

$$J_{\text{pl}} = 6000 \text{ kg} \cdot e^2 = 21,7 \cdot 10^5 \text{ kgm}^2$$

Mit Drehimpulserhaltung und vollplastischem Stoß gilt:

$$L = J_{db} \cdot \omega_{db} = (J_{db} + J_{pl}) \cdot \omega_{ges}$$

Die Winkelgeschwindigkeit des "Verbundes" aus Dachbinder und einer Platte berechnet sich zu:

$$\omega_{ges} = J_{db} \cdot \omega_{db} / (J_{db} + J_{pl}) = 0,29 \text{ s}^{-1}$$

Und dessen Rotationsenergie zu:

$$E_{kin,rot} = 0,5 \cdot (J_{db} + J_{pl}) \cdot \omega_{ges}^2 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Nm}$$

Ohne Berücksichtigung der Tragfähigkeit der Schachtabdeckung wird bereits nahezu die Hälfte der kinetischen Energie aufgrund von Massenträgheitskräften dissipiert.

Durch den Dachbinder kann auch nur ein Träger HEB 1000 (St37) belastet (siehe Abbildung 9) belastet werden. Unter der ungünstigen Annahme der Last in der Mitte wirkend errechnet sich die Tragfähigkeit  $F_{pl}$  der Träger im ideal-plastischen Zustand:

Maximales Biegemoment	$M_{max} = 1 \cdot F_{max}/4$	Länge: $l = 868 \text{ cm}$
Biegemoment plastisch	$M_{pl} = R_{p0,2} \cdot W_{pl}$	Fließspannung: $R_{p0,2} = 24000 \text{ N/cm}^2$
	$M_{pl} = 3,1 \cdot 10^8 \text{ Ncm}$	plastisches Widerstandsmoment:
mit	$M_{max} = M_{pl}$	$W_{pl} = 14860 \text{ cm}^3$
folgt	$F_{max} = F_{pl} = 4 \cdot M_{pl}/l = 1,64 \cdot 10^6 \text{ N} = 1640 \text{ kN}$	

Unter der konservativen Annahme, dass die kinetische (Rotation) Energie allein durch Durchbiegung eines Trägers dissipiert wird, gilt:

$$E_{pl} = E_{rot} = F_{pl} \cdot f \qquad \text{Durchbiegung } f$$

Unter Berücksichtigung der gesamten Rotationsenergie beträgt die Durchbiegung:

$$f = 3,7 \cdot 10^5 \text{ Nm} / (1,64 \cdot 10^6 \text{ N}) = 18,3 \text{ cm}$$

und unter Berücksichtigung des verbleibenden Anteils nach dem Stoß:

$$f = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Nm} / (1,64 \cdot 10^6 \text{ N}) = 9,1 \text{ cm}$$

Diese Werte stellen eine obere Schranke dar und können bei weitem nicht erreicht werden.

## 6. Schadensbild Träger

In Kapitel 5.1.1 wird unter sehr konservativen Annahmen eine maximale Durchbiegung von 30 cm eines Trägers angegeben. Die Länge der Träger beträgt 868 cm. Bei einer Durchbiegung von 30 cm verringert sich die Spannweite um  $2 \cdot (434 - (434^2 - 30^2)^{0,5}) = 2$  cm. Die Träger sind 14 cm tief in die Schachtwand eingelassen, so dass selbst in diesem Fall kein Versagen eines Trägers zu besorgen ist. Der Absturz einer Abdeckplatte wäre aber selbst bei diesen Durchbiegungen auszuschließen, da diese nicht seitlich verrutschen können (siehe Abbildung 10).

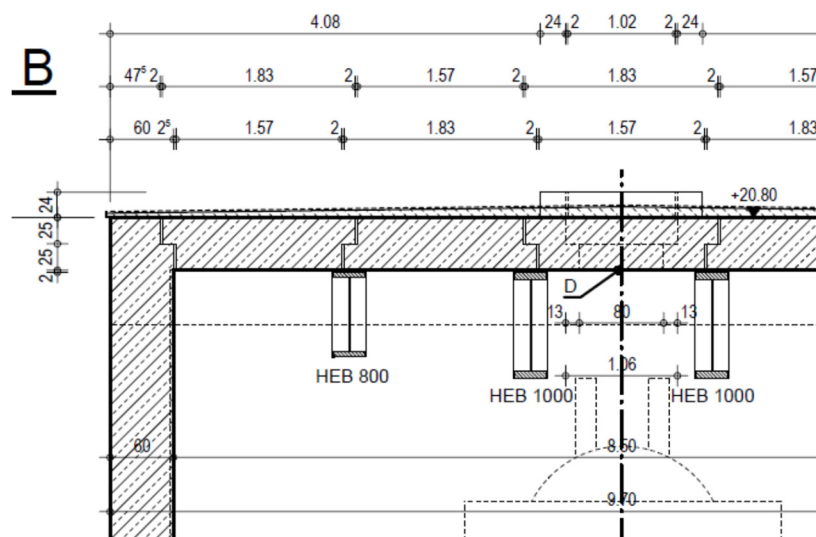


Abbildung 10: Lagerung Betonplatten

## 7. Schadensbild Betonplatte

Die Fläche der Betonplatten beträgt jeweils 4,8 m<sup>2</sup>. Die nachgewiesene Verkehrslast der Schachtabdeckung beträgt 75 kN/m<sup>2</sup>, also 360 kN pro Platte [4]. Tatsächlich ist der Querschnitt der Zugbewehrung größer als im statischen Nachweis vorgegeben [5]. Trotzdem ist die Tragfähigkeit der Träger für eine Einzellast (1640 kN) deutlich höher als die einer einzelnen Betonplatte.

Die nachzuweisende Auflagerkraft eines Dachbinders lässt sich aus dem Eigengewicht von ca. 125 kN [3] und der zugehörigen Dachfläche von ca. 100 m<sup>2</sup> (2 kN/m<sup>2</sup>) abschätzen zu:

$$F_A = (125 \text{ kN} + 200 \text{ kN})/2 = 162,5 \text{ kN} < 360 \text{ kN}$$

Vorbehaltlich einer entsprechenden Bemessung des Dachbinders tritt dessen Versagen vor einem hypothetischen Versagen einer Betonplatte auf. Die Energie des Stoßes wird zu einem erheblichen Anteil (ggf. vollständig) durch die Bigpacks dissipiert. Unter der konservativen Annahme, dass die Energie des Stoßes vollständig auf eine Betonplatte einwirkt,

wird diese durch plastische Deformation der Bewehrung und die Fragmentierung des Betons dissipiert.

Ausgehend von einem Bewehrungsgrad von 0,5 Vol.-% [5] und einer Fließspannung von  $p = 500 \text{ N/mm}^2$  lässt sich die mittlere Dehnung der Bewehrungsstäbe wie folgt abschätzen:

$$V_{\text{St}} = 4,8 \text{ m}^2 \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 0,5\% = 0,012 \text{ m}^3 \quad \text{Stahlvolumen pro Platte}$$

$$E_{\text{diss}} = E_{\text{St}} = p \cdot \Delta V \quad \text{Verformungsenergie}$$

Horizontaler Fall drei Platten

$$\Delta V = E_{\text{St}}/p = 9,9 \cdot 10^5 \text{ Nm} / 5 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2 = 0,00198 \text{ m}^3$$

$$\Delta V / (3 \cdot V_{\text{St}}) = 5,5 \%$$

Beim Fall eines Dachbinders auf eine Außenwand mit anschließender Rotation kann auch nur eine Betonplatte getroffen werden. Nach Kapitel 5.2 beträgt die Rotationsenergie  $3,7 \cdot 10^5 \text{ Nm}$ . In diesem Fall berechnet sich die mittlere Dehnung zu:

$$\Delta V = E_{\text{St}}/p = 3,7 \cdot 10^5 \text{ Nm} / 5 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2 = 0,00074 \text{ m}^3$$

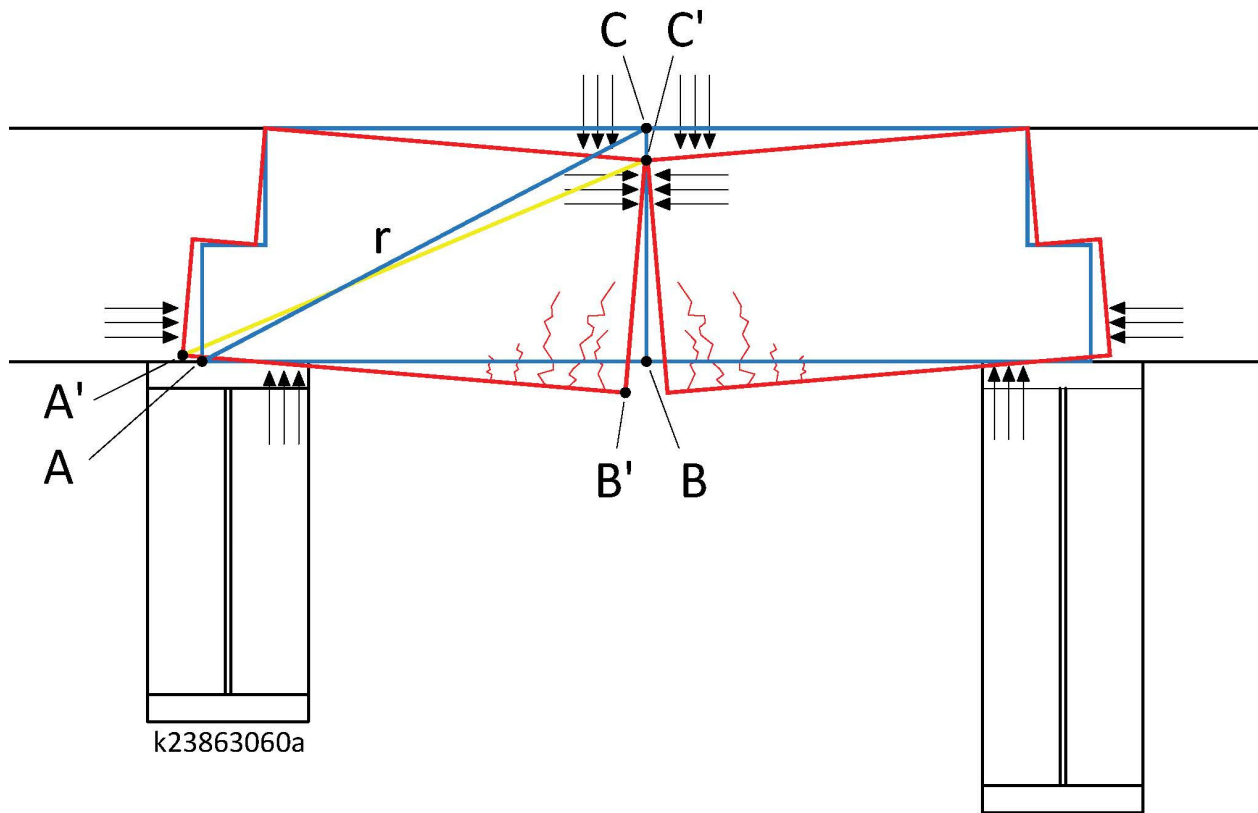
$$\Delta V / V_{\text{St}} = 6 \%$$

Aufgrund der hohen Duktilität der Bewehrungsstähle kann die Energie des Stoßes auch vollständig durch die Bewehrung aufgenommen werden.

Die Bewehrung besteht u. a. aus Stäben mit einem Durchmesser von 12 mm, die an der Oberseite und an der Unterseite im Abstand von 20 cm in Längsrichtung und Querrichtung angebracht sind (siehe Anhang 2).

Die kreuzweise Anordnung der Stäbe an der Unterseite der Betonplatten bildet also ein Netz, durch das die Größe fragmentierter Betonbrocken, welche herunterfallen können auf ca. 20 cm begrenzt. Die Masse eines solchen Brockens beträgt ca. 20 kg. Größere Brocken werden durch die Bewehrung zurückgehalten (siehe Abbildung 12).

Bei einem hypothetischen Riss aller quer angeordneten Stäbe an der Unterseite einer Platte ist die Durchbiegung nach unten durch Zwängungen begrenzt. Das Spiel zwischen zwei Platten beträgt 20 mm. Die seitliche Verschiebung der Plattenhälften kann also maximal 40 mm betragen (siehe Abbildung 10). Daraus ergibt sich eine maximale Durchbiegung der Platte von ca. 70 mm (siehe Abbildung 11).



**Abbildung 11: Bruch einer Betonplatte**

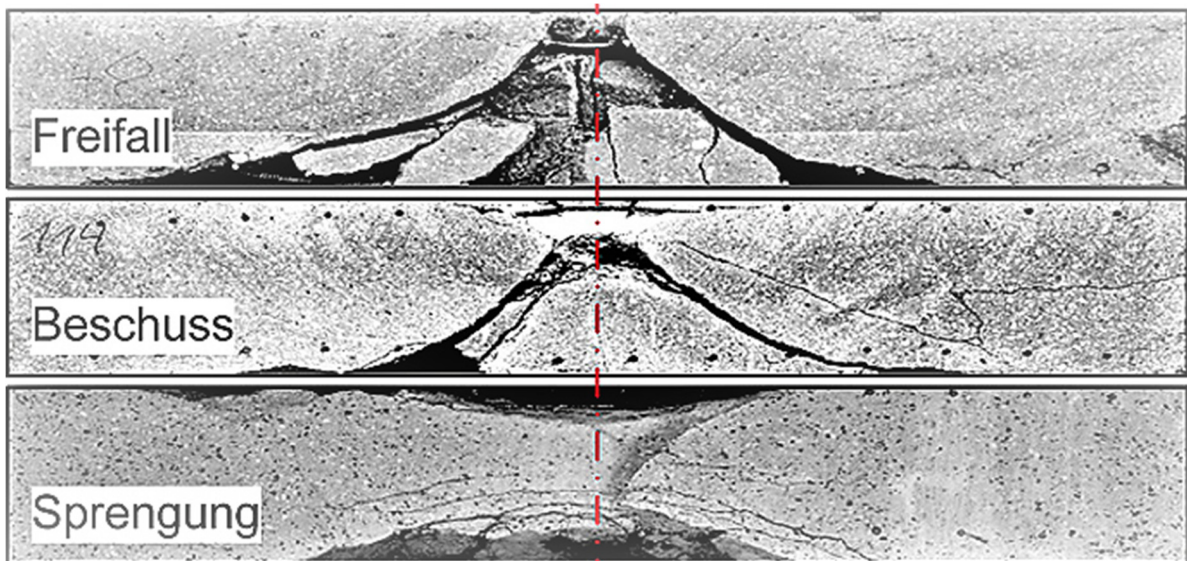
Der Abstand  $A_B$  und  $A'_B'$  entspricht der halben Plattenbreite an der Unterseite. Der Abstand  $B_C$  und  $B'_C'$  entspricht der Plattendicke. Aufgrund der hohen Druckfestigkeit bleibt der Abstand  $A_C$  bzw.  $A'_C' = r$  (in guter Näherung) beim Bruch der Platte konstant. Der Punkt A kann sich horizontal um 40 mm verschieben. Mit  $r = \text{konst}$  verschiebt sich der Punkt B um ca. 70 mm nach  $B'$ .

Mit

$$r = (915^2 + 500^2)^{1/2} = 1043 \text{ mm} > 915 \text{ mm} + 40 \text{ mm} = 955 \text{ mm}$$

kann die Platte nicht nach unten durchfallen.

Selbst bei einer Fragmentierung des Betons bleibt die stützende Wirkung erhalten. Die durch die Bewehrung zusammengehaltenen Fragmente bilden ein Gewölbe (vergleiche Steinbrücken in Trockenbauweise).



**Abbildung 12: Schadensbild bei dynamischer Belastung**

## **8. Schadensbild Reaktordruckbehälter**

Der untere Teil des Reaktordruckbehälters ist von dem Schildtank umgeben. Herunterfallende Betonbrocken können die Schildtankabdeckplatte aus einer Höhe von ca. 7 m treffen (siehe Anhang 3). Ein 20 kg schwerer Betonbrocken hat daher eine Aufprallenergie von ca. 1400 Nm. Diese entspricht etwa einem Geschoss Kaliber.223rem (NATO-Standard 5,56), welches, obwohl sehr spitz, mehrere Millimeter dicke Stahlplatten nicht durchschlägt. Die Schildtankabdeckplatte hat eine Dicke von 80 mm und besteht aus duktilem Stahl (BH 36; Bake-Hardening-Stahl). Der obere Teil des sehr massiven Reaktordruckbehälters kann nur aus geringer Höhe (1 m bis 2 m) getroffen werden. Es ist unmittelbar evident, dass eine unzulässige Beschädigung des Reaktordruckbehälters auszuschließen ist, da die Aufprallenergie eines Betonbockens bei weitem zu gering ist einen Schaden zu verursachen. Auf weitere rechnerische Nachweise wird an dieser Stelle daher verzichtet.

## **9. Fazit**

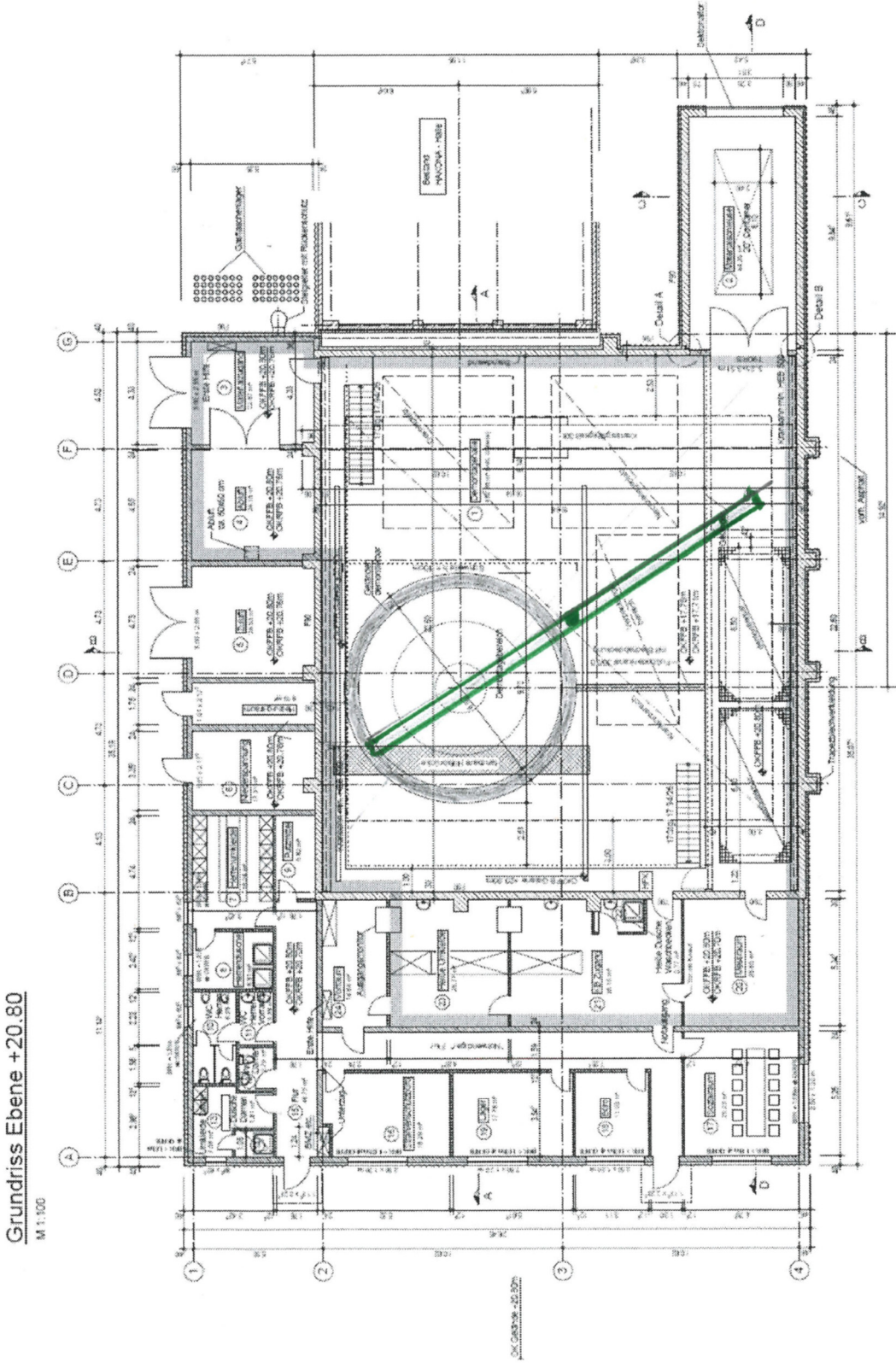
Eine Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus dem Reaktordruckbehälter „Otto Hahn“ infolge eines Absturzes eines Dachbinders auf die Abdeckung des RDB-Schachtes bei der Errichtung der Zerlegehalle ist auszuschließen. Weder die unter konservativen Annahmen ausgewiesenen Schädigungen der Träger noch der Abdeckplatten können zu einer Beschädigung des Reaktordruckbehälters führen.



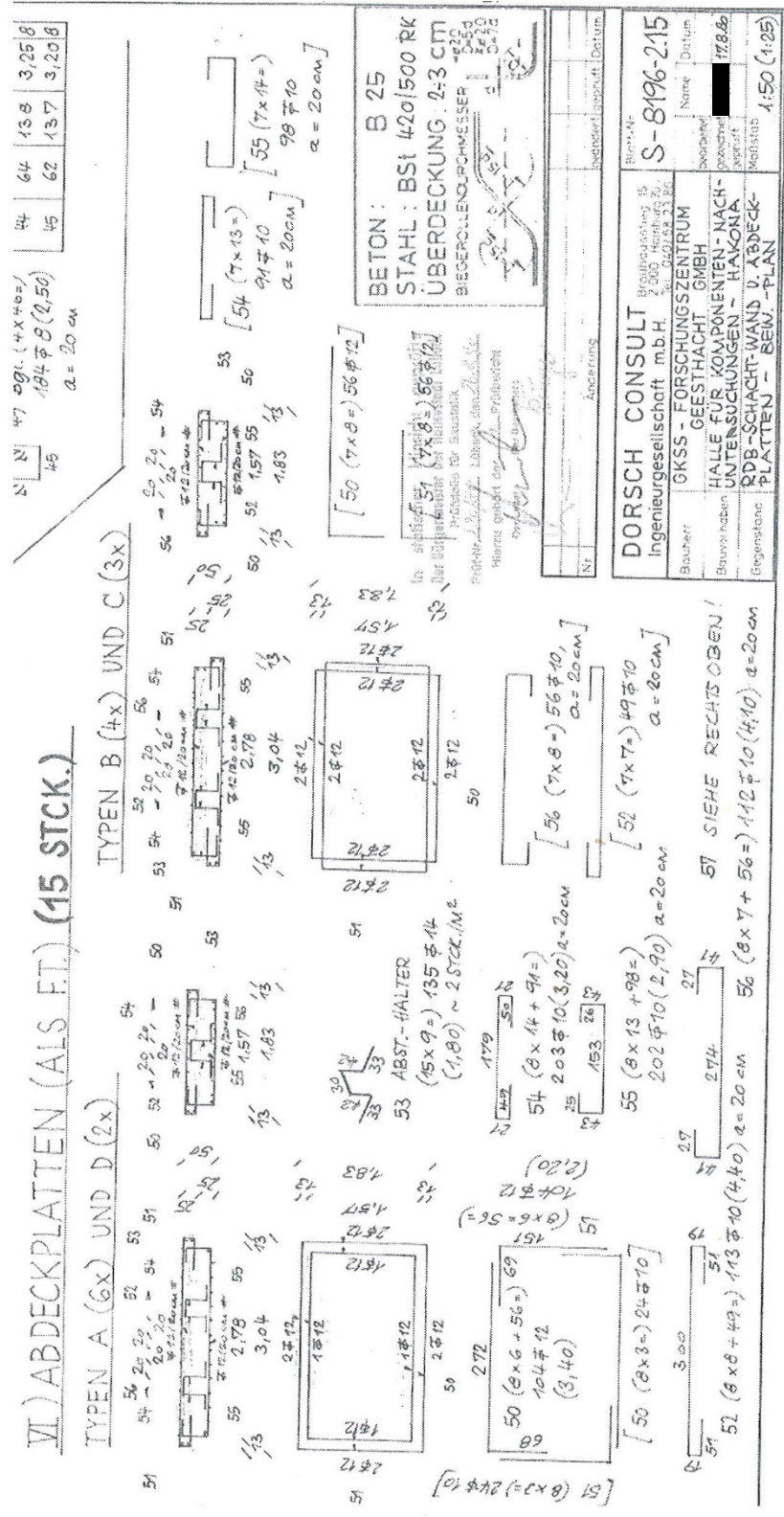
## Literaturverzeichnis

- [1] Zeichnungsnummer B 1.1 Bestandszeichnung Grundrisse, Schnitte und Ansichten  
Voss Ingenieure
- [2] Errichtungs- und Betriebskonzept zum Neubau einer Zerlegehalle für die  
Zerlegung des RDB-OH; Erläuterungsbericht zur Stilllegung des Forschungs-  
reaktors FRG-1 und Abbau der Forschungsreaktoranlage und des Heißen Labors  
sowie die Zerlegung des Reaktordruckbehälters des Nuklearschiffs Otto Hahn,  
Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Zentrum für Material- und Küstenforschung  
GmbH, Zentralabteilung Forschungsreaktor
- [3] 25065-HZG-Zerlegehalle – Spannbetonbinder Ansicht/Schnitt nach vorläufiger  
Bemessung
- [4] Statische Berechnung für die Halle für Komponenten-Nachuntersuchung  
Dorsch Consult Ingenieurgesellschaft, Hamburg 1980
- [5] RDB-SCHACHT-WAND-U.ABDECKPLATTEN. BEW.-PLAN  
Dorsch Consult Ingenieurgesellschaft, Hamburg 1980

### Anhang 1: Grundriss der Zerlegehalle Ebene +20,80



Anhang 2: Bewehrungsplan Betonplatte



### Anhang 3: Reaktordruckbehälter mit Einbauten

