

12.12.2024

Erweiterung und Instandsetzung Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt

Teil D:

Teilobjekte Nebenanlagen (TO13, 16 und weitere Betroffenheiten)
Unterlage 4 – Hydraulische Nachweise

Entwurfs- und Genehmigungsplanung



Schöpfwerk Henschleben II mit Mahlbusen

Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt
c/o Tractebel Hydroprojekt GmbH
Rießnerstraße 18
99427 Weimar

TRACTEBEL


 **INROS LACKNER**

Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt

c/o Tractebel Hydroprojekt GmbH
Rießnerstraße 18 | 99427 Weimar
Tel: +49 3643 746-400 | Fax: +49 3643 746-405
hydroprojekt-DE@tractebel.engie.com
www.hydroprojekt.de

Unterschriftenblatt

Projekt **Erweiterung und Instandsetzung HRB Straußfurt**
Teil D:
Teilobjekte Nebenanlagen (TO13, 16 und weitere Betroffenenheiten)
Unterlage 4 – Hydraulische Nachweise

Projektnummer 100 3492 (Tractebel Hydroprojekt GmbH)
2022-0617 (Inros Lackner SE)

Auftraggeber **Thüringer Fernwasserversorgung**
Anstalt des öffentlichen Rechts
Haarbergstr. 37
99097 Erfurt
Freigabe:


i. V. Dr. Michael Sabrowski
Leiter Stauanlagenmanagement
Erfurt, den 12.12.2024


i. V. Detlef Hogh
Projektingenieur

Auftragnehmer **Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt**
c/o Tractebel Hydroprojekt GmbH
Rießnerstraße 18
99427 Weimar

Projektleitung Dipl.-Ing. Lars Schaarschmidt

Fachliche Qualitätssicherung Dipl.-Ing. Holger Rosenkranz

Bearbeitung Dipl.-Ing. Lars Schaarschmidt
Dipl.-Ing. Albrecht Köhler
Dipl.-Ing. Fabius Volmer
Dipl.-Ing. Marco Sommerwerk
Dipl.-Ing. Olaf Schneider

Weimar, 12.12.2024

Ingenieurgemeinschaft HRB Straußfurt


Lars Schaarschmidt
Projektleiter


Albrecht Köhler
Projektingenieur

Freibordbemessung

INHALTSVERZEICHNIS

1	Vorbemerkungen	1
2	Bearbeitungsgrundlagen	1
3	Freibordbemessung	1
3.1	Grundlagen	1
3.2	Bemessungspunkt	2
3.3	Wind- und Wellenkennwerte	2
3.4	Berechnungsergebnisse	5

ANHANGVERZEICHNIS

Anhang 1	Detaillierte Zusammenstellung der Ergebnisse der Freibordberechnung
Anhang 2	Detaillierte Zusammenstellung der Ergebnisse der Freibordberechnung

QUELLENVERZEICHNIS

[1]	BOLLRICH, G.: Technische Hydromechanik 1, 7. Auflage, Mai 2013
[2]	DIN 19700-10: Stauanlagen – Teil 10: Gemeinsame Festlegungen, Juli 2004
[3]	DIN 19700-11: Stauanlagen – Teil 11: Talsperren, Juli 2004
[4]	DIN 19700-12: Stauanlagen – Teil 12: Hochwasserrückhaltebecken, Juli 2004
[5]	DVWK-Merkblatt 246: Freibordbemessung an Stauanlagen, 1997
[6]	Deutscher Wetterdienst: Expertise zum Bemessungswind über der Stauanlage Hochwasserrückhaltebecken Straußfurt, 2013
[7]	TRAUP, S. und B. KRUSE, 1996: Winddaten für Windenergienutzer. Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M., 445 S.
[8]	LUBW: Arbeitshilfe zur DIN 19700 für Hochwasserrückhaltebecken, 1. Auflage, September 2007
[9]	Thüringer Fernwasserversorgung (TFW): Fortschreibung der hydrologischen Grundlagen für das HRB Straußfurt, 05.05.2022

SYMBOLVERZEICHNIS

Symbol	bevorzugte Einheit	Erläuterung
a_j	[-]	Spektralfaktoren
d_j	[m]	mittlere Wassertiefe im Sektor j
f	[m]	Freibordmaß
h_{au}	[m]	Wellenauflauf
h_{Ei}	[m]	Eisstau
h_{wi}	[m]	Windstau
h_{si}	[m]	Sicherheitszuschlag
$\overline{h_{we}}$	[-]	mittlere Wellenhöhe
$k_D \cdot k_R$	[-]	Böschungsrauheit
$K_{h_{we}}$	[-]	Umrechnungsfaktor in Abhängigkeit der Überschreitungswahrscheinlichkeit für die Wellenhöhe
k_X	[-]	von der Überschreitungswahrscheinlichkeit abhängiger Koeffizient
$\overline{L_{we}}$	[-]	mittlere Wellenlänge
S_j	[m]	Streichlänge im Sektor j
t_{wi}	[min]	Ausreifezeit
$\overline{T_{we}}$	[-]	mittlere Wellenperiode
w_{10}	[m/s]	Windgeschwindigkeit
x	[-]	Überschreitungswahrscheinlichkeit
Z_K	[m]	Höhe Bauwerkskrone
ϑ_j	[-]	Winkel zwischen der Achse des Absperrbauwerkes und der Grenze des Sektors j

1 Vorbemerkungen

Bei dem HRB Straußfurt handelt es sich um eine Stauanlage im Sinne der DIN 19700-12 [4]. Weiterhin relevant sind die Teile 10 [2] und 11 [3] der DIN 19700.

Der geplante Schutzdamm des TO16 dient dem Schutz der Ortslage Schwerstedt im Hochwasserfall.

Im Folgenden sind die Herangehensweise und Ergebnisse der Freibordbemessung für den Schutzdamm Schwerstedt als Bestandteil des TO16 – Maßnahmen Schwerstedt erläutert.

2 Bearbeitungsgrundlagen

Grundlage der Freibordbemessung bilden das DVWK-Merkblatt 246 [5] sowie die DIN 19700, Teile 10, 11 und 12 [2][3][4].

3 Freibordbemessung

3.1 Grundlagen

Die Freibordbemessung erfolgte gemäß DVWK-Merkblatt 246 [5]. Der Freibord entspricht dem vertikalen Abstand zwischen dem höchsten Stauziel und der Krone des Absperrbauwerkes. Um auch bei ungünstigen Witterungsbedingungen ein Überströmen des Absperrbauwerkes zu vermeiden, sollte ein ausreichendes Freibordmaß vorhanden sein. Das erforderliche Gesamtfreibordmaß setzt sich aus den folgenden Höhenanteilen zusammen:

- Wellenauflauf h_{au}
- Windstau h_{wi}
- ggf. Eisstau h_{Ei}
- ggf. ein Sicherheitszuschlag h_{Si}

Im Regelfall schließen sich Wellenauflauf und Windstau einerseits und Eisstau andererseits aus. Demnach ist ein gleichzeitiges Auftreten nicht zu erwarten. Eisstau wird ausgeschlossen, da der Beckenraum in den Wintermonaten nicht gefüllt ist. Daher berechnet sich das erforderliche Freibordmaß wie folgt:

$$f = h_{au} + h_{wi} + h_{Si}$$

Das Freibordmaß definiert die erforderliche Dammkronenhöhe zzgl. des neuen Hochwasserstauziels:

$$Z_H = 151,85 \text{ m NHN (2016)}$$

Dieses Hochwasserstauziel berücksichtigt nicht die Retentionswirkung des Beckens und ist somit sicher angesetzt.

3.2 Bemessungspunkt

Nach DVWK-Merkblatt 246 [5] ist die maßgebende Windrichtung senkrecht zum Absperrbauwerk anzusetzen, da sie den größten Wellenaufwurf verursacht und seltene Windereignisse richtungsunabhängig sind (siehe Anhang 1). Der Bemessungspunkt wird unter der Maßgabe gewählt, um den ungünstigsten Fall mit besonders hohen Windwellenaufwürfen zu ermitteln. Dabei wurden verschiedene Punkte am Absperrbauwerk untersucht. Nachfolgend wird sich auf den ungünstigsten Punkt beschränkt.

3.3 Wind- und Wellenkennwerte

Als Bemessungswindgeschwindigkeit w_{10} ist gemäß DVWK-Merkblatt 246 [5] die Windgeschwindigkeit zu wählen, die der in einer Höhe von 10 m über der Wasseroberfläche und senkrecht auf das Absperrbauwerk einer Stauanlage gerichteten Windgeschwindigkeit entspricht. Die Wiederholungszeitspanne für dieses Stundenmittel soll nach DVWK-Merkblatt 246 [5] zwischen 10 und 50 Jahren liegen. Es wird die Verwendung eines Wiederkehrintervalls von 25 Jahren empfohlen.

Es liegt ein Windgutachten des Deutschen Wetterdienstes zum Bemessungswind über dem HRB Straußfurt aus dem Jahre 2013 vor [6]. Dieses Gutachten beinhaltet eine Datenreihe des Windes (Stundenmittel der Windgeschwindigkeit und der -richtung) von der nordöstlich des Thüringer Waldes gelegenen Windstation Erfurt-Bindersleben. Diese Station liegt auf einer Geländestufe östlich von Erfurt ca. 19 km südlich vom ca. 150 m tiefer gelegenen HRB Straußfurt entfernt. Die Station Erfurt ist als „für das südliche Thüringer Becken repräsentativ“ eingestuft [7] und weist mit einem Auswertzeitraum von Januar 1983 bis Dezember 2012 eine insgesamt 30-jährige Zeitreihe mit stündlichen Winddaten auf.

Tabelle 1: Extremwerte der Stundenmittel der Windgeschwindigkeit in m/s für Wiederkehrzeiträume von 2, 10, 25 und 50 Jahren für den Standort HRB Straußfurt in 10 m über der Wasserfläche; aus dem Windgutachten des Deutschen Wetterdienstes [6]

Wiederkehrintervall in Jahren	Sektormitte ¹⁾ (Grad)												
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360	0-360 ³⁾
2	9	8	7	6	8	14	17	18	17	14	11	9	19
10	11	9	9	9	11	18	20	23	21	18	14	11	22
25	12	10	10	10	13	20	22	25	23	20	16	12	24
50	13	11	10	11	15	21	23	27	25	21	17	13	26

Betrachtet man die Windgeschwindigkeit für ein Wiederkehrintervall von 25 Jahren, erhält man eine w_{10} senkrecht zum Schutzdamm Schwerstedt (117°) von 10 m/s.

Zur Validierung des daraus ermittelten Freibordes werden die konservativen Vorgaben des DVWK-Merkblatt 246 [5], Tab. 1, welche höhere Werte für w_{10} liefern würde, verwendet. Mit einer Höhe des Hochwasserrückhaltebeckens von ca. 200 m NHN und einer Lage, die als normal bis windexponiert beschrieben werden kann, wird für die Berechnung w_{10} mit 25 m/s angesetzt.

Ein Vergleich der daraus resultierenden Ergebnisse für das Freibordmaß mit dem auf Grundlage der Windgeschwindigkeit aus dem Windgutachten [6] wird in den Berechnungsergebnissen (Kapitel 3.4) vorgenommen.

Die jeweiligen Stundenmittel dieser Windgeschwindigkeiten müssen bei Streichlängen unter 6 km unter Berücksichtigung der Ausreifzeit t_{wi} angepasst werden. Unter Berücksichtigung einer mittleren Streichlänge S von ca. 2,00 km ergibt sich eine Ausreifzeit von

$$t_{wi} \cong 10 \cdot S[\text{min}] \cong 2,00 \text{ min.}$$

Gemäß DVWK-Merkblatt 246 [5], Tab. 2 ergibt sich ein Umrechnungsfaktor für die Stundenmittel der maßgeblichen Windgeschwindigkeiten von 1,05. Die zur weiteren Berechnung verwendeten Windgeschwindigkeiten w'_{10} ergeben sich zu:

$$w'_{10} = 1,05 \cdot w_{10}$$

Mit den Werten für die Windgeschwindigkeit aus dem Windgutachten bzw. DVWK-Merkblatt lassen sich nach den empfohlenen Methoden [5] die folgenden Werte ermitteln:

- mittlere Wellenhöhe $\overline{h_{we}}$
- mittlere Wellenperiode $\overline{T_{we}}$
- mittlere Wellenlänge $\overline{L_{we}}$

Zur Ermittlung der mittleren Wellenhöhe wird das Verfahren nach KRYLOW II angewendet. Dieses sieht eine Einteilung der Stauoberfläche in Spektralsektoren ausgehend vom Bezugspunkt vor. Die zur Wellenbewegung beitragenden Energieanteile aus den einzelnen Sektoren werden mit Hilfe der Spektralfaktoren a_j gewichtet [5]:

$$a_j = \left(\frac{\vartheta_{j+1}}{180^\circ} - \frac{\sin 2 \cdot \vartheta_{j+1}}{2\pi} \right) - \left(\frac{\vartheta_j}{180^\circ} - \frac{\sin 2 \cdot \vartheta_j}{2\pi} \right)$$

ϑ_j ... Winkel zwischen der Achse des Absperrbauwerkes und der Grenze des Sektors j

Zur Ermittlung der mittleren partiellen Wellenhöhe für die einzelnen Sektoren wird folgende Gleichung verwendet [5]:

$$\overline{h_{we,j}} = \frac{w_{10}^2 \cdot 0,16}{g} \cdot \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + 0,006 \cdot \sqrt{S_j^*} \right]^2} \right\} \cdot \tanh \left\{ 0,625 \cdot \frac{(d_j^*)^{0,8}}{1 - \frac{1}{\left[1 + 0,006 \cdot \sqrt{S_j^*} \right]^2}} \right\}$$

mit: $d_j^* = \frac{g \cdot d_j}{w_{10}^2}$ und $S_j^* = \frac{g \cdot S_j}{w_{10}^2}$

d_j ... mittlere Wassertiefe im Sektor j [m]

S_j ... Streichlänge im Sektor j [m]

Die mittlere Wellenhöhe an dem jeweiligen Bezugspunkt unter Berücksichtigung aller partiellen Wellenhöhen ergibt sich zu:

$$\overline{h_{we}} = \sqrt{\sum_{j=1}^{j=n} (a_j \cdot \overline{h_{we,j}}^2)}$$

Bei der Ermittlung der Wellenaufbauhöhe ist eine bauwerksabhängige Wellenhöhenüberschreitungswahrscheinlichkeit zu berücksichtigen. Für die Umrechnung der erhaltenen mittleren Wellenhöhe $\overline{h_{we}}$ auf bestimmte Überschreitungswahrscheinlichkeiten gilt:

$$h_{we,x\%} = \sqrt{-\frac{4}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{x}{100}\right)} \cdot \overline{h_{we}} = K_{h_{we}} \cdot \overline{h_{we}}$$

$K_{h_{we}}$... Umrechnungsfaktor in Abhängigkeit der Überschreitungswahrscheinlichkeit für die Wellenhöhe

Die Überschreitungswahrscheinlichkeit für den Staudamm wird mit 1% angesetzt.

Die mittlere Wellenperiode und mittlere Wellenlänge am Bemessungspunkt lassen sich nach folgenden Ansätzen berechnen:

$$\overline{T_{we}} = \frac{6,2 \cdot w_{10} \cdot \pi}{g} \cdot \left[\frac{g \cdot \overline{h_{we}}}{w_{10}^2} \right]^{0,625} \quad \text{mittlere Wellenperiode}$$

$$\overline{L_{we}} = \frac{g \cdot \overline{T_{we}}^2}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi \cdot d}{\overline{L_{we}}}\right) \quad \text{mittlere Wellenlänge}$$

Der für das Freibordmaß notwendige Wellenaufbau ist abhängig vom Charakter der bauwerksnahen Wellenbewegung. An Staudämmen sind in der Regel eher brandende Wellen zu erwarten. Für den orthogonalen Wellenaufbau bei brandenden Wellen lässt sich die Aufbauhöhe aufgrund der Energiedissipation in der Brandungszone nur durch empirische Beziehungen angeben [5]:

$$h_{Au,x\%} = k_D \cdot k_R \cdot k_X \cdot \sqrt{h_{We} \cdot L_{We}} \cdot \tan \alpha$$

$k_D \cdot k_R$... Böschungsrauheit

k_X ... von der Überschreitungswahrscheinlichkeit abhängiger Koeffizient

α ... Böschungswinkel

Die Böschungsrauheit des Staudammes $k_D \cdot k_R$ wird gemäß [5] mit 0,85 für Rasenoberflächen, der Koeffizient k_X für Erddämme und einer 1-prozentigen Überschreitungswahrscheinlichkeit mit 2,4 angesetzt.

Die Ermittlung des Windstaus erfolgt mittels der empirischen Formel nach ZUIDERSEE [5]:

$$h_{wi} = \frac{w_{10}^2 \cdot S \cdot \cos \beta}{4861110 \cdot d_j}$$

β ... Winkel zwischen der maßgebenden Windrichtung und der angesetzten Streichlänge

Für Neuplanungen von Staudämmen wird ein Sicherheitszuschlag h_{Si} von mindestens 0,50 m empfohlen (siehe bspw. [8]). Zudem sollte der Mindestfreibord den Wert von 1,0 m nicht unterschreiten. Der tatsächlich vorhandene Sicherheitszuschlag h_{Si} ergibt sich aus der Höhendifferenz zwischen Bauwerks-oberkante BOK und dem höchsten Stauziel Z_H abzüglich der Summe aus Windstau und Wellenauflauf:

$$h_{Si} = BOK - Z_H - h_{wi} - h_{Au,x\%}$$

In der Berechnung fließt auch der 12-prozentige Klimazuschlag gemäß Fortschreibung des Hydrologischen Gutachtens [9] als zusätzliche Sicherheit mit ein.

3.4 Berechnungsergebnisse

Unter der Berücksichtigung der im vorhergehenden Kapitel genannten Randbedingungen ergeben sich auf Grundlage der Windgeschwindigkeit w_{10} aus dem genannten Windgutachten des Deutschen Wetterdienstes [6] bzw. aus den Vorgaben des DVWK-Merkblatt 246 [5] folgende Freibordparameter:

	<u>gemäß Windgutachten</u>	<u>gemäß DVWK- Merkblatt</u>
Windgeschwindigkeiten:	$w_{10} = 10,00 \text{ m/s}$ $w'_{10} = 10,50 \text{ m/s}$	$w_{10} = 25,00 \text{ m/s}$ $w'_{10} = 26,25 \text{ m/s}$
Wellenauflauf:	$h_{au} = 0,64 \text{ m}$	$h_{au} = 1,26 \text{ m}$
Windstau:	$h_{wi} = 0,05 \text{ m}$	$h_{wi} = 0,11 \text{ m}$
Freibordhöhe:	$f = 0,69 \text{ m}$	$f = 1,37 \text{ m}$

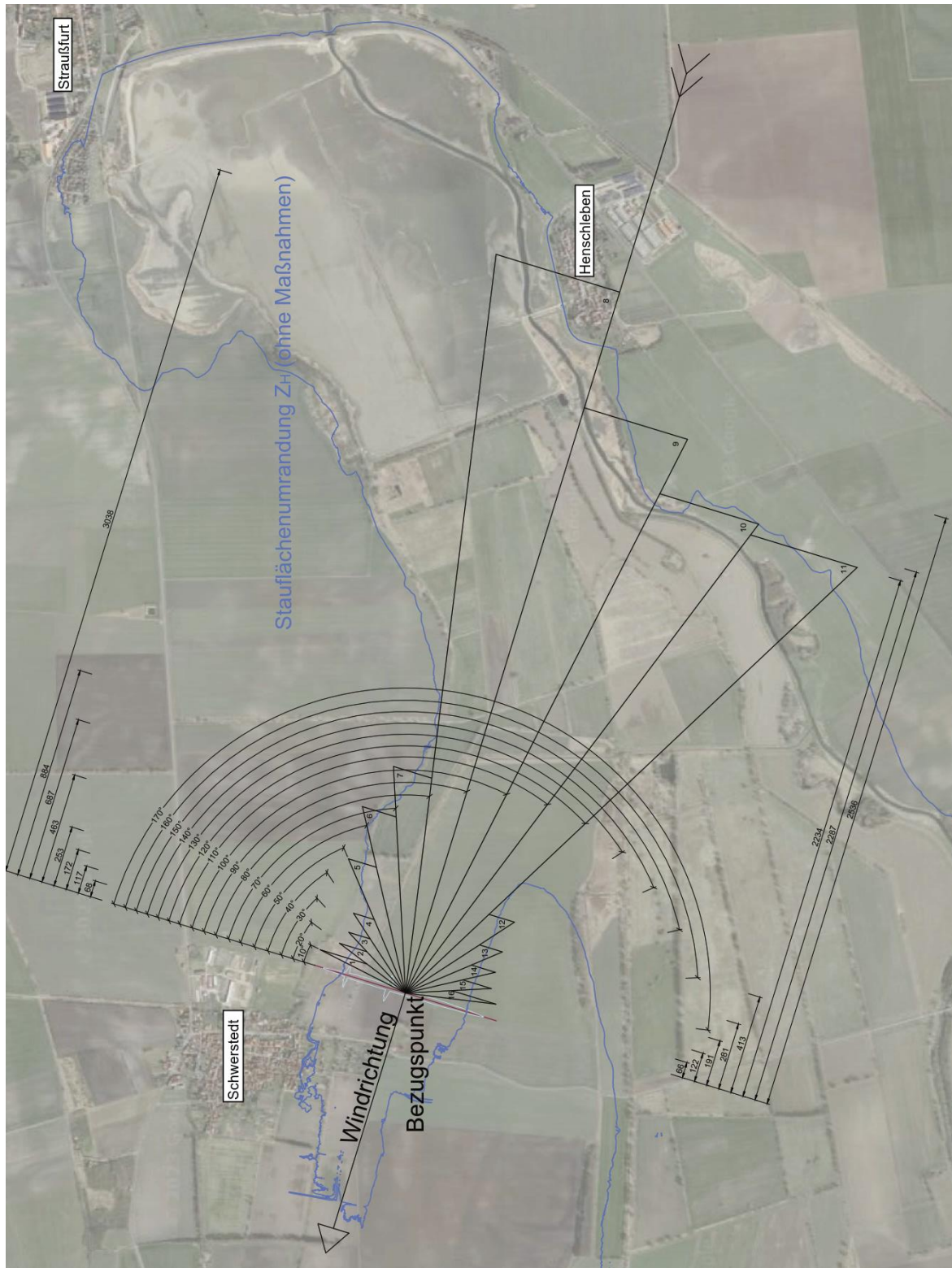
Stauziel: $Z_H = 151,85 \text{ m NHN}$
 ➔ $f_{\text{gewählt}} = 1,40 \text{ m} > 0,69 \text{ m}$

Sicherheitszuschlag: $h_{si} = 0,71 \text{ m}$
 resultierende Bauwerkskrone: $Z_K = 153,25 \text{ m NHN}$

Es wird empfohlen, den Freibord mit einem Sicherheitszuschlag h_{si} von 0,71 m zu berücksichtigen, so dass auch für ungünstigere Windverhältnisse gemäß DVWK-Merkblatt 246 die Freibordhöhe eingehalten ist. Weiterhin fließt in der Berechnung die sehr sichere Wahl des neuen Hochwasserstauziels hinsichtlich des 12-prozentigen Klimazuschlag gemäß Fortschreibung des Hydrologischen Gutachtens [9] und hinsichtlich der Nicht-Berücksichtigung der Retentionswirkung des Beckens als zusätzliche Sicherheit mit ein.

Die Einteilung der Sektoren nach dem Spektralverfahren sowie eine detaillierte Aufstellung der Berechnungsergebnisse sind in den Anhängen dargestellt.

Anhang 1 Seeflächeneinteilung in Sektoren – Spektralverfahren



Anhang 2 Detaillierte Zusammenstellung der Ergebnisse der Freibordberechnung

$d_j =$	4,00 m
$w_{10} =$	10,00 m/s
$b =$	1,05
$g =$	9,81 m/s ²
$d_j^* =$	0,3924
$w_{10}' =$	10,5 m/s

Sektor Nr. n	S_j [m]	S_j^* [-]	ϑ_{j+1} [°]	ϑ_j [°]	a_j [-]	$\overline{h_{we,j}}$ [-]	$a_j \cdot \overline{h_{we,j}}^2$ [-]
1	68,00	6,05	20,0	10,0	0,0077	0,051925	0,000021
2	117,00	10,41	30,0	20,0	0,0200	0,067652	0,000092
3	172,00	15,30	40,0	30,0	0,0367	0,081533	0,000244
4	253,00	22,51	50,0	40,0	0,0556	0,098165	0,000535
5	463,00	41,20	60,0	50,0	0,0745	0,130813	0,001274
6	687,00	61,13	70,0	60,0	0,0911	0,157169	0,002250
7	884,00	78,66	80,0	70,0	0,1034	0,176242	0,003212
8	3.038,00	270,32	90,0	80,0	0,1100	0,289405	0,009212
9	2.536,00	225,65	100,0	90,0	0,1100	0,271701	0,008120
10	2.287,00	203,50	110,0	100,0	0,1034	0,261608	0,007078
11	2.234,00	198,78	120,0	110,0	0,0911	0,259327	0,006126
12	413,00	36,75	130,0	120,0	0,0745	0,123955	0,001144
13	281,00	25,00	140,0	130,0	0,0556	0,103222	0,000592
14	191,00	17,00	150,0	140,0	0,0367	0,085760	0,000270
15	122,00	10,86	160,0	150,0	0,0200	0,069041	0,000095
16	66,00	5,87	170,0	160,0	0,0077	0,051172	0,000020
Summe:							0,040285

mittlere Wellenhöhe:	$\overline{h_{we}} =$	0,201 m				
mittlere Wellenperiode:	$\overline{T_{we}} =$	1,685 s				
mittlere Wellenlänge:	$\overline{L_{we}} =$	4,430 m				
mittlere Wellenhöhe mit Überschreitungswahrscheinlichkeit:	$K_{hwe} =$	2,4				

Bemessungsfall	Windgeschwindigkeit		Stauziel	Bauwerkskrone	Wellenauflauf	Windstau	resultierender Sicherheitszuschlag	Freibord
i	w_{10}	w'_{10}	Z_H	Z_K	h_{au}	h_{wi}	h_{si}	f
	[m/s]		[m NHN]	[m NHN]	[m]	[m]	[m]	[m]
Z_H	10	10,5	151,85	153,25	0,641	0,050	0,71	1,40