

Plausibilitätsprüfung

der statischen Berechnung der Stahlbauteile sowie dazugehöriger Planunterlagen für die

Schutzbarrieren des Hauptkontrollraums zur Abwehr von Leichtflugzeugen (Light Sport Aircraft) und deren als starre Geschosse (Rigid Missiles) wirkende Bestandteile

beim slowakischen Kernkraftwerk Mochovce – Blöcke 3 und 4

Auftraggeber: Global 2000
Datum: 22.10.2021
Seiten: 1 bis 18

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines	3
1.1	Aufgabenstellung	3
1.2	Vorgehensweise	3
1.3	Tragwerksbeschreibung	4
1.4	Grundlagen	4
1.5	Verwendete Programme	5
2	Ermittlung der elastischen Grenzlast	6
2.1	Anmerkungen	6
2.2	Berechnung	6
3	Ermittlung der einwirkenden Kräfte	16
3.1	Anmerkungen	16
3.2	Berechnung	16
4	Ergebnisse und Resümees	18

1 ALLGEMEINES

Das Kernkraftwerk Mochovce befindet sich in der Gemeinde Kalná nad Hronom im Südwesten der Slowakei und liegt etwa 100 km östlich von Bratislava. Die Anlage beinhaltet insgesamt vier Reaktorblöcke. Die Blöcke 1 und 2 sind bereits seit über 20 Jahren in Betrieb. Der Bau der Blöcke 3 und 4 startete zwar ebenfalls in den 1980er-Jahren, wurde jedoch bis heute noch nicht abgeschlossen.

In den vergangenen Jahrzehnten – insbesondere infolge terroristischer Anschläge und Naturkatastrophen – erlangte der Schutz solch kritischer Infrastruktur mit hohem Gefährdungspotential für Mensch und Natur im Schadensfall erhöhte Aufmerksamkeit. In diesem Sinne sollen bei den beiden noch nicht fertiggestellten Blöcken 3 und 4 des Kernkraftwerks Mochovce sicherheitsrelevante Anlagenteile durch nachträglich errichtete Barrieren in Form großer stählerner Abfangnetze vor einer externen Bedrohung (Flugzeugabsturz, Terrorattacke) geschützt werden. Laut dem vorliegenden Technischen Bericht [1] und der Statischen Berechnung [2] sind diese Stahlkonstruktionen für die Abwehr eines Leichtflugzeugs (Light Sport Aircraft) und dessen als starre Geschosse (Rigid Missiles) wirkende Bestandteile ausgelegt. Als Beispiel für letztere wird darin der Motorblock genannt. Zudem geht aus diesen Dokumenten hervor, dass die Abfangnetze dem Schutz des Hauptkontrollraums dienen sollen. Der Schutz beispielsweise der Reaktorblöcke sowie die Schutzwirkung gegen einen unbeabsichtigten oder vorsätzlich herbeigeführten Anprall größerer Flugzeuge findet hingegen keine Erwähnung.

1.1 Aufgabenstellung

Im Rahmen der gegenständlichen Untersuchungen sind der Technische Bericht [1], die Statische Berechnung [2] sowie die dazugehörigen Planunterlagen [3] bis [6] für diese schützenden Stahlkonstruktionen auf deren Plausibilität zu überprüfen. In weiterer Folge soll die Abwehrwirkung der Konstruktion gegen verschiedene Flugzeugtypen (vom Leichtflugzeug bis zum Großraumflugzeug) eigenständig abgeschätzt werden.

1.2 Vorgehensweise

Der Durchsicht der vorliegenden statischen Unterlagen [1] bis [6] folgt eine mit einfachen Mitteln durchgeführte Abschätzung der Grenzlaster – also der maximal aufnehmbaren Belastung – einer Schutzbarriere (siehe Abschnitt 2). Die aus dieser Berechnung erlangten Ergebnisse werden mit den Werten aus der Statischen Berechnung [2] verglichen. In weiterer Folge wird eine Abschätzung der Lasteinwirkung infolge des Anpralls unterschiedlicher Flugzeugtypen durchgeführt (siehe Abschnitt 3). Diese Lastwerte werden abschließend mit der errechneten Systemtraglast in Relation gesetzt (siehe Abschnitt 4).

Es sei darauf hingewiesen, dass die Wechselwirkung zwischen Schutzbarriere und Flugzeug zum Zeitpunkt des Anpralls eine komplexe Situation darstellt. Die genaue Berechnung der Kräfte, welche infolge des Stoßes auf die beiden relativ weichen Strukturen wirken, würde die Erstellung eines umfangreichen Finite-Elemente-Modells unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens von Schutzbarriere und Flugzeug sowie die anschließende Durchführung einer nichtlinearen dynamischen Analyse erfordern.

Im Zuge dieser Plausibilitätsüberprüfung werden entsprechende Vereinfachungen gemacht, wodurch zwar nicht exakte Tragfähigkeitsnachweise durchgeführt werden können. Die Auswirkungen eines Flugzeuganpralls auf die Schutzbarriere können

jedoch den Anforderungen entsprechend abgeschätzt werden. Dies ermöglicht schließlich den Vergleich mit der vorliegenden Statischen Berechnung [2] sowie das Ziehen weiterer Schlüsse.

1.3 Tragwerksbeschreibung

Die gegenständlichen Schutzbarrieren weisen die Form und Funktionsweise überdimensionaler, vertikal ausgerichteter Abfangnetze auf. Die Stahlkonstruktionen bestehen aus jeweils zwei ca. 22 m hohen Rohren (Stahlgüte: S355) mit einem Außendurchmesser von $d = 1200$ mm und einer Blechstärke von $t = 20$ mm. Diese sind in einem Achsabstand von 19 m zueinander angeordnet und dienen als Tragkonstruktion für zwei Netzebenen, welche sich zwischen den beiden Pylonen spannen. Laut dem Technischen Bericht [1] sollen die beiden Netze die kinetische Energie der Anprallkörper durch Umwandlung in Verformungsenergie infolge großer elastischer- und plastischer Verformung der einzelnen Seile absorbieren.

Das Primärnetz an der Vorderseite dient lt. [1] der Abwehr von Leichtflugzeugen (Light Sport Aircraft). Es besteht aus horizontal und schräg verlaufenden Litzenseilen sowie aus einer Reihe stehender Breitflanschprofile, welche mit den Seilen verbunden sind.

Das Sekundärnetz an der Rückseite dient lt. [1] der Abwehr von Bestandteilen des Flugzeuges, welche als starre Geschosse wirken (z. B. Motorblock), und ist in diesem Sinne weitaus engmaschiger gestaltet. Es besteht aus horizontal und vertikal verlaufenden Litzenseilen (Maschenweite: 150×150 mm), welche durch zwei schräg verlaufende vorgespannte Seile und ein zentral angeordnetes, stehendes IPE-Profil ergänzt werden.

Die Kopfpunkte der beiden Pylonen sind über ein weiteres Stahlrohr ($\varnothing 368$ mm; $t = 12,5$ mm; S355), welches der horizontalen Aussteifung dient, miteinander verbunden. Die Pylonen sind an deren Fußpunkt über eine Ankerplatte in Kombination mit vorgespannten Ankerstangen mit dem darunter liegenden Stahlbeton-Fundament biegesteif verbunden. Es liegen keine genaueren Informationen zur Ausbildung der Fundierung vor.

1.4 Grundlagen

1.4.1 Auf Plausibilität überprüfte Dokumente

- [1] Protective Barriers – Technical Report
Verfasser: Ing. Ivan Holub
Dokumentennummer: PNM34129814
Datum: 05/2020
- [2] Protective Barriers – Structural Analysis
Verfasser: Ing. Ivan Holub
Dokumentennummer: PNM34129815
Datum: 04/2020
- [3] Protective Barriers – Steel Structures
Verfasser: Ing. Ivan Holub
Dokumentennummer: PNM34129816
Datum: 01/2021
- [4] Protective Barriers – Primary Interception System
Verfasser: Ing. Ivan Holub

Dokumentnummer: PNM34129817
Datum 01/2021

[5] Protective Barriers – Secondary Interception System

Verfasser: Ing. Ivan Holub
Dokumentnummer: PNM34129818
Datum 12/2020

[6] Protective Barriers – Details

Verfasser: Ing. Ivan Holub
Dokumentnummer: PNM34129819
Datum 01/2021

1.4.2 Normen und Richtlinien

[7] ÖNORM EN 1990:2013; Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung

[8] ÖNORM EN 1991-1-1:2011; Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke,
Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen – Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im
Hochbau

[9] ÖNORM EN 1991-1-7:2014; Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke,
Teil 1-7: Allgemeine Einwirkungen – Außergewöhnliche Einwirkungen

[10] ÖNORM EN 1993-1-1:2014; Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von
Stahlbauten,
Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau

1.4.3 Sonstige Quellen

[11] Bemessung von Baustrukturen in Stahl- und Verbundbauweise für Anprall-
und Explosionslasten; bauforumstahl e.V.; Dezember 2010

[12] Stellungnahme der HSK zur Sicherheit der schweizerischen Kernkraftwerke
bei einem vorsätzlichen Flugzeugabsturz; HSK; März 2003

[13] Consequences of the large commercial aircraft crash into the interim spent
fuel storage facility; Stepan et al.; 2005

1.5 Verwendete Programme

- Scia Engineer 20.0

2 ERMITTLUNG DER ELASTISCHEN GRENZLAST

2.1 Anmerkungen

Die beiden Pylonen einer Schutzbarriere nehmen die Kräfte aus den zwei Netzebenen auf und leiten diese dann über die Fundamente ins angrenzende Erdreich ab. Ihre Tragfähigkeit begrenzt somit die Grenzlast des gesamten Systems nach oben hin. In der weiteren Betrachtung erfolgt deshalb eine Reduktion der Schutzbarriere auf diese beiden rohrförmigen Stützen, auf welche die Lasten aus dem Flugzeuganprall wirken.

Die Grenzlastberechnung eines Pylonen beruht auf folgenden Annahmen und Vereinfachungen:

- Ein Pylon wird als ein an seinem Fußpunkt vollständig eingespannter Einzelstab modelliert.
- Die resultierende Last zufolge des Flugzeuganpralls teilt sich auf beide Pylonen gleichmäßig auf und wirkt dort auf $\frac{3}{4}$ der Stabhöhe, also etwa 17 m oberhalb der Einspannung.
- Der Stab unterliegt einer einaxialen Biegung, welche durch die lediglich in Richtung einer der globalen Koordinatenachsen wirkende Last hervorgerufen wird.
- Gemäß Eurocode 3 [10] fällt der betrachtete Querschnitt in die Querschnittsklasse 4. Bei solchen Querschnitten tritt „[...] örtliches Beulen vor Erreichen der Streckgrenze in einem oder mehreren Teilen des Querschnitts [...]“ auf. Dies wird bei dieser Berechnung vernachlässigt. Es wird ein Querschnitt der Klasse 3 angenommen, womit keine plastische Momententragfähigkeit entwickelt werden kann.
- Eine Reduktion der Grenzlast durch ein etwaiges Versagen des Anschlusses an die Fundierung oder der Fundierung selbst vor dem Versagen des Stahlrohres wurde nicht berücksichtigt.

2.2 Berechnung

Unter Berücksichtigung der Festlegungen aus Abschnitt 2.1 wurde mittels der Statik-Software Scia Engineer 20.0 jene Last ermittelt, welche ein Pylon ($d = 1200$ mm; $t = 20$ mm; S355) maximal aufnehmen kann: $F_{el} = 449$ kN. Die dabei am Stützenkopf auftretende Horizontalverschiebung in Lastangriffsrichtung beträgt ca. 40 cm. Die ermittelte **elastische Grenzlast** F_{el} dieses Einzelstabs stellt aufgrund der getroffenen Annahmen bzw. Vereinfachungen ein oberes Limit dar: der tatsächliche Wert ist gleich oder kleiner als der errechnete.

Auf den nachfolgenden Seiten ist das dazugehörige Bemessungsprotokoll abgebildet.

1. Tragwerk

1.1. Material

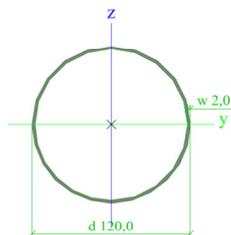
Stahl EC3

Name	ρ [kg/m ³]	E_{mod} [MPa]	μ	Untere Grenze [cm]	Obere Grenze [cm]	F_y [MPa]	F_u [MPa]	Farben
		G_{mod} [MPa]	α [m/mK]					
S 355	7850,0	2,1000e+05	0,3	0,0	4,0	355,0	490,0	■
		8,0769e+04	0,00	4,0	8,0	335,0	470,0	

1.2. Querschnitte

CS1		
Typ	KHP	
Detailliert	120,0; 2,0	
Materialangabe	S 355	
Herstellung	gewalzt	
Biegeknicke y-y, Biegeknicke z-z	a	a
A [m ²]	7,4142e-02	
A_y [m ²], A_z [m ²]	4,7200e-02	4,7200e-02
I_y [m ⁴], I_z [m ⁴]	1,2908e-02	1,2908e-02
$W_{el,y}$ [m ³], $W_{el,z}$ [m ³]	2,1513e-02	2,1513e-02
$W_{pl,y}$ [m ³], $W_{pl,z}$ [m ³]	2,7851e-02	2,7851e-02
I_w [m ⁶], I_t [m ⁴]	4,6812e-36	2,5809e-02
d_y [cm], d_z [cm]	0,0	0,0
$C_{y,UCS}$ [cm], $C_{z,UCS}$ [cm]	60,0	60,0
A [deg]	0,00	
$M_{pl,y,+}$ [Nm], $M_{pl,y,-}$ [Nm]	9,88e+06	9,88e+06
$M_{pl,z,+}$ [Nm], $M_{pl,z,-}$ [Nm]	9,88e+06	9,88e+06
A_L [m ² /m], A_D [m ² /m]	3,7697e+00	7,4138e+00

Picture



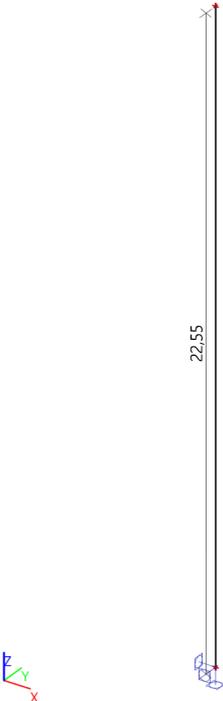
1.3. Stäbe

Name	Querschnitt	Material	Länge [m]	Anf.Knoten	Endknoten	Typ
B1	CS1 - KHP (120,0; 2,0)	S 355	22,550	N1	N2	allgemein (0)

1.4. Knotenaufleger

Name	Knoten	System	Typ	X	Y	Z	Rx	Ry	Rz
Sn1	N1	GKS	Standard	Starr	Starr	Starr	Starr	Starr	Starr

1.5. Analysemodell



1.6. Analysemodell



2. Lasten

2.1. Lastfälle

Name	Beschreibung	Einwirkungstyp	Lastgruppe	Richtung	Dauer	Vorherrschender Lastfall
	Spez	Lasttyp				
G1	Eigengewicht	Ständig Eigengewicht	LG1	-Z		
Q1	Anprall Standard	Variabel Statisch	LG2		Kurz	Nein

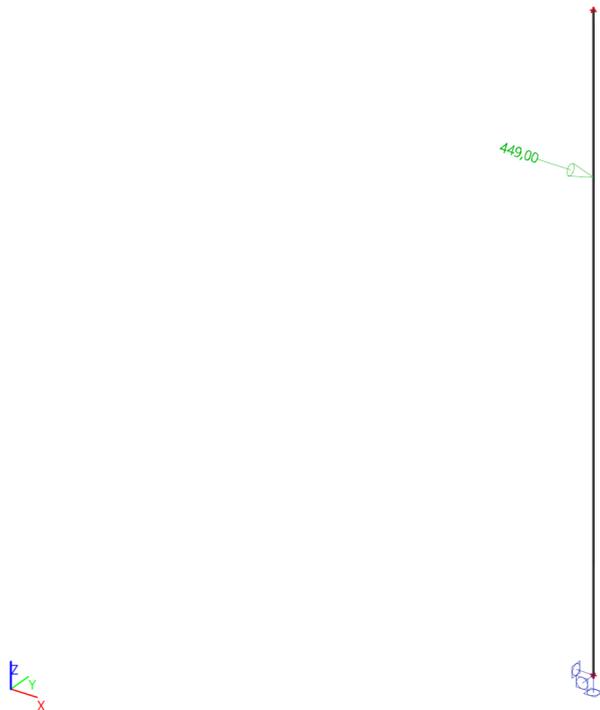
2.2. Lastgruppen

Name	Belastung	Status	Typ
LG1	Ständig		
LG2	Variabel	Standard	Kat.A: Wohnungen

2.3. Kombinationen

Name	Beschreibung	Typ	Lastfälle	Beiwert [-]
GZT – Gruppe B (automatisch).1		GZT - Umhüllende	G1 - Eigengewicht	1,35
GZT – Gruppe B (automatisch).2		GZT - Umhüllende	G1 - Eigengewicht	1,00
GZT – Gruppe B (automatisch).3		GZT - Umhüllende	G1 - Eigengewicht	1,35
GZT – Gruppe B (automatisch).4		GZT - Umhüllende	Q1 - Anprall	1,50
			G1 - Eigengewicht	1,00
GZG – char. (automatisch).1		GZG - Umhüllende	Q1 - Anprall	1,50
			G1 - Eigengewicht	1,00
GZG – char. (automatisch).2		GZG - Umhüllende	G1 - Eigengewicht	1,00
			Q1 - Anprall	1,00
Anprall.1		GZT - Umhüllende	G1 - Eigengewicht	1,00
			Q1 - Anprall	1,00

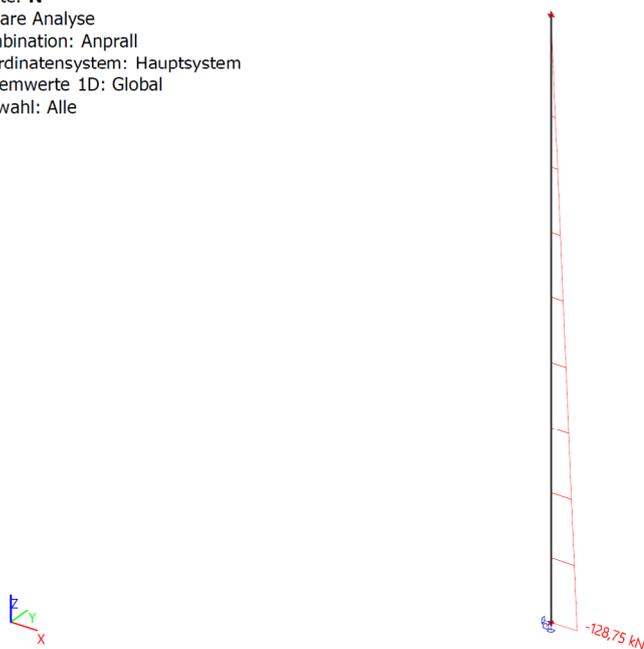
2.4. Q1 / Gesamtwert



3. Ergebnisse

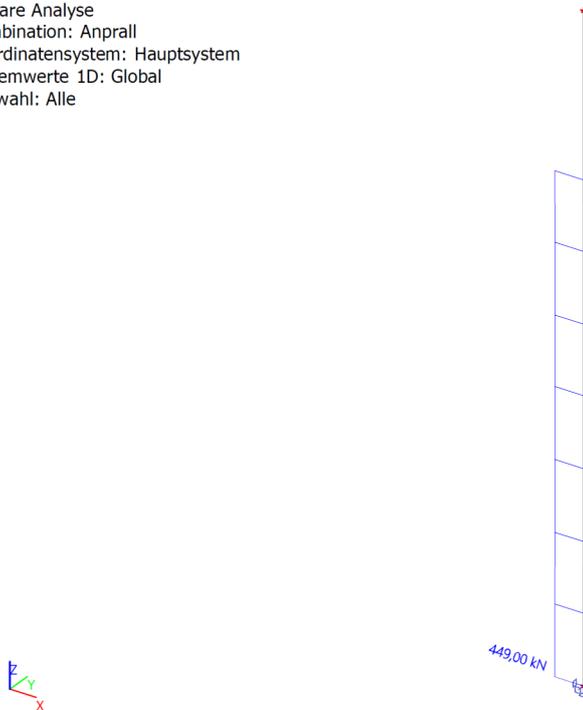
3.1. 1D-Schnittgrößen; N

Werte: **N**
Lineare Analyse
Kombination: Anprall
Koordinatensystem: Hauptsystem
Extremwerte 1D: Global
Auswahl: Alle



3.2. 1D-Schnittgrößen; V_z

Werte: V_z
Lineare Analyse
Kombination: Anprall
Koordinatensystem: Hauptsystem
Extremwerte 1D: Global
Auswahl: Alle



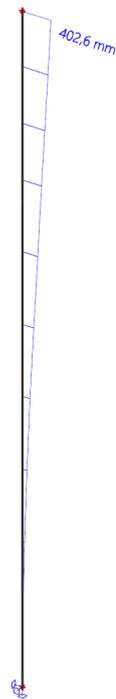
3.3. 1D-Schnittgrößen; M_y

Werte: M_y
Lineare Analyse
Kombination: Anprall
Koordinatensystem: Hauptsystem
Extremwerte 1D: Global
Auswahl: Alle



3.4. 1D-Verformungen; u_x

Werte: u_x
Lineare Analyse
Kombination: Anprall
Koordinatensystem: Global
Extremwerte 1D: Global
Auswahl: Alle



4. Stahlbemessung

4.1. EC-EN 1993 Stahlnachweis GZT; Allgemeiner Nachweis

Werte: $U_{C_{Overall}}$
Lineare Analyse
Kombination: Anprall
Koordinatensystem: Hauptsystem
Extremwerte 1D: Global
Auswahl: Alle



4.2. EC-EN 1993 Stahlnachweis GZT

Lineare Analyse
Kombination: Anprall
Koordinatensystem: Hauptsystem
Extremwerte 1D: Global
Auswahl: Alle

Normnachweis EN 1993-1-1

Nationaler Anhang: ÖNORM EN NA (Österreich)

Bauteil B1	0,000 / 22,550 m	KHP (120,0; 2,0)	S 355	Anprall	1,00 -
-------------------	-------------------------	-------------------------	--------------	----------------	---------------

Kombinationsvorschrift

Anprall / G1 + Q1

Teilsicherheitsbeiwerte

γ_{M0} für die Beanspruchbarkeit der Querschnitte	1,00
γ_{M1} für die Beanspruchbarkeit bei Stabilitätsversagen	1,00
γ_{M2} für die Beanspruchbarkeit der wirksamen Querschnitte	1,25

Material

Streckgrenze	f_y	355,0	MPa
Zugfestigkeit	f_u	490,0	MPa
Herstellung		Gewalzt	

...:QUERSCHNITTSNACHWEIS:...

Der kritische Nachweis ist an Position 0,000 m

Schnittgrößen		Ermittelt	[Dim]
Längskraft	N_{Ed}	-128,75	kN
Querkraft	$V_{y,Ed}$	0,00	kN
Querkraft	$V_{z,Ed}$	449,00	kN
Torsion	T_{Ed}	0,00	kNm
Biegemoment	$M_{y,Ed}$	-7593,71	kNm
Biegemoment	$M_{z,Ed}$	0,00	kNm

Klassifizierung für den Querschnittsnachweis

Klassifizierung gemäß EN 1993-1-1 Artikel 5.5.2

Klassifizierung von Rohrprofilen gemäß EN 1993-1-1 Tabelle 5.2 Blatt 3

d	t	d/t	Klasse 1 Grenze	Klasse 2 Grenze	Klasse 3 Grenze	Klasse
[cm]	[cm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
120,0	2,0	60,00	33,10	46,34	59,58	4

Der Querschnitt ist als Klasse 4 klassifiziert

Achtung: Die Querschnittsklasse wurde als 4 ermittelt aber die effektiven Querschnittswerte können für diesen Querschnitt nicht ermittelt werden. Der Querschnitt wird mit EL Nachweis als Klasse 3 Querschnitt nachgewiesen.

Nachweis bei Druckbeanspruchung

Gemäß EN 1993-1-1 §§6.2.4 und Formel (6.9)

Querschnittsfläche	A	7,4142e-02	m ²
Druckwiderstand	$N_{c,Rd}$	26320,26	kN
Einheitsnachweis		0,00	-

Nachweis bei Biegebeanspruchung M_y

Gemäß EN 1993-1-1 §6.2.5 und Formel (6.12),(6.14)

Elastischer Querschnittsmodul	$W_{el,y,min}$	2,1513e-02	m ³
Elastisches Biegemoment	$M_{el,y,Rd}$	7637,26	kNm
Einheitsnachweis		0,99	-

Nachweis bei Querkraftbeanspruchung V_z

Gemäß EN 1993-1-1 §6.2.6 und Formel (6.17)

Korrekturbeiwert für Schub	η	1,20	
Schubfläche	A_v	4,7200e-02	m ²
Plastischer Querkraftwiderstand gegen V_z	$V_{pl,z,Rd}$	9674,08	kN
Einheitsnachweis		0,05	-

Nachweis der kombinierten Biege-, Normalkraft- und Querkraftbeanspruchung

Gemäß EN 1993-1-1 §6.2.1(5) und Formel (6.1)

Elastische Kontrolle

Faser			1	
Normalspannung zufolge Normalkraft N	$\sigma_{N,Ed}$	1,7	MPa	
Normalspannung zufolge Biegemoment M_y	$\sigma_{My,Ed}$	353,0	MPa	

Elastische Kontrolle			
Normalspannung zufolge Biegemoment M_z	$\sigma_{Mz,Ed}$	0,0	MPa
Gesamtspannung in Längsrichtung	$\sigma_{tot,Ed}$	354,7	MPa
Schubspannung zufolge Querkraft V_y	$\tau_{Vy,Ed}$	0,0	MPa
Schubspannung zufolge Querkraft V_z	$\tau_{Vz,Ed}$	0,0	MPa
Schubspannung infolge der (St. Venantschen) Torsion	$\tau_{t,Ed}$	0,0	MPa
Schubspannung gesamt	$\tau_{tot,Ed}$	0,0	MPa
Summe der Von-Mises-Vergleichsspannung	$\sigma_{von Mises,Ed}$	354,7	MPa
Einheitsnachweis		1,00	-

Der Querschnittsnachweis für das Teil wurde erbracht.

...::STABILITÄTSNACHWEIS::...

Klassifizierung für den Biegeknicknachweis

Maßgebender Schnitt für die Stabilitätsklassifizierung: 0,000 m

Klassifizierung gemäß EN 1993-1-1 Artikel 5.5.2

Klassifizierung von Rohrprofilen gemäß EN 1993-1-1 Tabelle 5.2 Blatt 3

d [cm]	t [cm]	d/t [-]	Klasse 1 Grenze [-]	Klasse 2 Grenze [-]	Klasse 3 Grenze [-]	Klasse
120,0	2,0	60,00	33,10	46,34	59,58	4

Der Querschnitt ist als Klasse 4 klassifiziert

Achtung: Die Querschnittsklasse wurde als 4 ermittelt aber die effektiven Querschnittswerte können für diesen Querschnitt nicht ermittelt werden. Der Querschnitt wird mit EL Nachweis als Klasse 3 Querschnitt nachgewiesen.

Biegeknicknachweis

Gemäß EN 1993-1-1 §6.3.1.1 und Formel (6.46)

Knickparameter		yy	zz	
		Verschieblichkeit	Verschieblichkeit	
Systemlänge	L	22,550	22,550	m
Knickbeiwert	k	2,00	2,00	
Knicklänge	l_{cr}	45,154	45,154	m
Ideale Verzweigungslast	N_{cr}	13121,74	13121,74	kN
Schlankheit	λ	108,23	108,23	
Relative Schlankheit	λ_{rel}	1,42	1,42	
Grenzschlankheit	$\lambda_{rel,0}$	0,20	0,20	

Bemerkung: Die Schlankheit oder Normalkraft sind so beschaffen, dass der Biegeknicknachweis nach EN 1993-1-1 Abschnitt 6.3.1.2(4) entfallen kann.

Biegedrillknicknachweis

Gemäß EN 1993-1-1 §6.3.1.1 und Formel (6.46)

Bemerkung: Der Querschnitt bezieht sich auf ein kreisförmiges Hohlprofil, das auf Biegedrillknickeneinflüsse nicht empfindlich ist.

Biegedrillknicknachweis

Gemäß EN 1993-1-1 §6.3.2.1

Bemerkung: Der Querschnitt bezieht sich auf ein kreisförmiges Hohlprofil, das auf Biegedrillknickeneinflüsse nicht empfindlich ist.

Nachweis der Biege- und Drucknormalkraftspannungen

Gemäß EN 1993-1-1 §§6.3.3 und Formel (6.61),(6.62)

Parameter für den Nachweis der Biege- und Drucknormalkraftspannungen			
Interaktionsverfahren		Alternatives Verfahren 2	
Querschnittsfläche	A	7,4142e-02	m ²
Elastischer Querschnittsmodul	$W_{el,y}$	2,1513e-02	m ³
Bemessungsdruckkraft	N_{Ed}	128,75	kN
Bemessungsbiegemoment (maximal)	$M_{y,Ed}$	-7593,71	kNm
Bemessungsbiegemoment (maximal)	$M_{z,Ed}$	0,00	kNm
Charakteristischer Widerstand bei Druckbeanspruchung	N_{Rk}	26320,26	kN
Charakteristischer Momentwiderstand	$M_{y,Rk}$	7637,26	kNm
Reduktionsbeiwert	χ_y	1,00	
Reduktionsbeiwert	χ_z	1,00	
Reduktionsbeiwert	χ_{LT}	1,00	
Interaktionsbeiwert	k_{yy}	0,90	
Interaktionsbeiwert	k_{zy}	0,72	

Maximales Moment $M_{y,Ed}$ ist von Träger B1 Position 0,000 m abgeleitet.
Maximales Moment $M_{z,Ed}$ ist von Träger B1 Position 0,000 m abgeleitet.

Parameter für Interaktionsverfahren 2			
Methode für Interaktionsbeiwerte		Tabelle B.1	
Verschieblichkeitstyp y		Verschieblichkeit	
Äquivalenter Momentbeiwert	C_{my}	0,90	
Resultierender Lasttyp LT		Einzellast F	
Endmoment	$M_{h,LT}$	-7593,71	kNm
Feldmoment	$M_{s,LT}$	0,00	kNm
Beiwert	$\alpha_{s,LT}$	0,00	
Verhältnis der Endmomente	ψ_{LT}	0,00	
Äquivalenter Momentbeiwert	C_{mLT}	0,40	

Einheitsnachweis (6.61) = $0,00 + 0,90 + 0,00 = 0,90$ -

Einheitsnachweis (6.62) = $0,00 + 0,72 + 0,00 = 0,72$ -

Der Stabilitätsnachweis wurde für dieses Teil erbracht

3 ERMITTLUNG DER EINWIRKENDEN KRÄFTE

3.1 Anmerkungen

Der Anprall eines relativ weichen, verformbaren Flugzeugs gegen ein nachgiebiges Tragwerk – wie in diesem Fall gegen die Schutzbarriere – stellt eine komplexe Situation hinsichtlich der physikalischen Vorgänge, die währenddessen geschehen, dar. Es handelt sich dabei grundsätzlich um einen teilplastischen Stoß, bei dem der Impuls des Flugkörpers – über eine kleine Zeitspanne verteilt – auf die Schutzbarriere übertragen wird. Die Änderung des Impulses des Flugzeuges pro Zeiteinheit entspricht der Kraft, welche dadurch auf die Schutzbarriere wirkt. Die auftretende Kraft ist von zahlreichen Einflussfaktoren und komplexen, nichtlinearen Mechanismen abhängig. Ein adäquater Kraft-Zeit-Verlauf kann am besten durch Simulation des Anprallvorgangs mittels einer nichtlinearen dynamischen Finite-Elemente-Analyse ermittelt werden. Dies geschah beispielsweise beim Reaktorgebäude der Kernkraftwerke Mühleberg und Beznau (siehe [12]). Das Modell beinhaltete dabei sowohl die Struktur des Reaktorgebäudes als auch jene eines Verkehrsflugzeugs.

Wie in [13] beschrieben wird, wurden in der Vergangenheit zudem Kraftverläufe publiziert, welche auf vereinfachten Modellen oder experimentellen Untersuchungen basieren. Dabei wird oft vom Anprall gegen ein starr wirkendes Tragwerk ausgegangen, wie beispielsweise in nachfolgender Abbildung 1 dargestellt. Dieser häufig verwendete Verlauf zeigt die auftretende Kraft beim Anprall einer Boeing 707 mit einer Masse von 90 Tonnen und einer Geschwindigkeit von 100 m/s. Dabei ist ersichtlich, dass der Kraftverlauf nichtlinear ist und ein ausgeprägtes Maximum aufweist. Die Impulsübertragung ist zudem nach ca. 300 ms abgeschlossen.

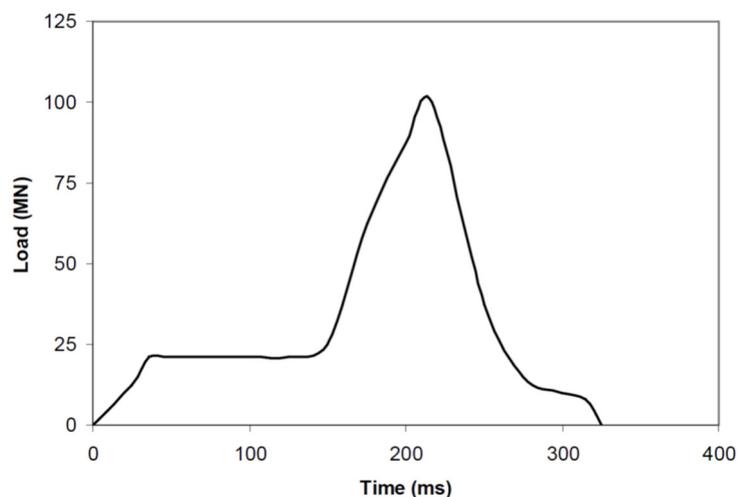


Abbildung 1: Kraftverlauf einer Boeing 707 ($m = 80 \text{ t}$; $v = 100 \text{ m/s}$) [13]

In [13] wird jedoch ebenfalls erwähnt, dass sich der Kraftverlauf bei nicht steifen Strukturen, was die Schutzbarriere beim Kernkraftwerk Mochovce ist, vom dargestellten Verlauf unterscheidet und eine detaillierte Analyse erforderlich ist.

3.2 Berechnung

Für den Zweck der gegenständlichen Untersuchungen ist eine solche aufwändige Analyse nicht erforderlich. Zur Abschätzung der Größenordnung der auftretenden Kräfte wird eine gleichmäßige Impulsreduktion des Flugzeugs beim Anprall und somit ein

konstanter Kraft-Zeit-Verlauf angenommen. Der Zusammenhang von Kraft F und Impuls p kann mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$F = \frac{p}{t} = \frac{m \cdot v}{t}$$

Die Zeit t , in der die Impulsübertragung stattfindet, wird mit 750 ms – also etwa die doppelte Zeitspanne wie bei einer starren Barriere – angenommen. Die Masse m sowie die Geschwindigkeit v werden der Abbildung 2 aus [11] entnommen.

Flugzeugtyp	Gesamtes Flugzeug				Triebwerk	
	Unfall		Vorsatz		Masse M [t]	Anprall- geschwindigkeit v_0 [m/s]
	Mittlere Masse m [t]	Absturz- geschwindigkeit v_0 [m/s]	Maximale Masse m_{max} [t]	Maximal- geschwindigkeit $v_{0,max}$ [m/s]		
Cessna 210A	1,7	85	1,8	90	0,4	~ 90 ^{a)}
Lear Jet 23 A	5,5	100	5,7	239	0,2	~ 180 ^{a)}
F-4F „Phantom“	20	215	28	407	1,7	~ 100 ^{b)}
Boeing 707-320	90	100	142	249	2,3	~ 190 ^{a)}
Boeing 747-400	250	100	397	254	4,3	~ 190 ^{a)}

a) Abschätzung für Vorsatz (oberer Grenzwert)
b) nach (DIN 25449, 2008) für Unfall

Abbildung 2: Masse und Geschwindigkeit für verschiedene Flugzeugtypen [11]

Es sei angemerkt, dass die auftretende Kraft durch die Wahl des gewählten konstanten Kraft-Zeit-Verlaufs sicherlich unterschätzt wird, was jedoch zur Veranschaulichung der Größenverhältnisse nicht relevant ist.

Nachfolgende Tabelle 1 zeigt die unter den beschriebenen Annahmen berechneten resultierenden Kräfte auf die gesamte Schutzbarriere infolge eines Anpralls verschiedener Flugzeugtypen.

Flugzeugtyp	Unfall	Vorsatz
Cessna 210A	193	216
Lear Jet 23 A	733	1816
F-4F „Phantom“	5733	15195
Boeing 707-320	12000	47144
Boeing 747-400	33333	134451

Tabelle 1: Resultierende Kraft F [kN] auf die Schutzbarriere im Falle eines Flugzeuganpralls beim Unfall bzw. unter Vorsatz

4 ERGEBNISSE UND RESÜMEE

Der Vergleich der errechneten Werte aus den Abschnitten 3 und 4 zeigt, dass bei einer Pylonen-Grenzlast von ca. 450 kN und somit einer Schutzbarrieren-Grenzlast von ca. 900 kN im besten Fall kleine und insbesondere leichte Flugzeuge mittels der untersuchten Schutzbarriere aufgehalten werden können. Gemäß der durchgeführten Abschätzung sind lediglich die Kräfte zufolge des Anpralls der Cessna 210A (Unfall und Vorsatz) und des Lear Jet 23 A (nur Unfall) kleiner als die Grenzlast der Schutzbarriere.

Die System-Grenzlast wurde bei dieser Abschätzung tendenziell überschätzt, die auftretenden Kräfte hingegen unterschätzt. Aufgrund der relativ kleinen Differenz zwischen Einwirkung und Widerstand beim Lear Jet 23 A wird deshalb davon ausgegangen, dass die Schutzbarriere auch diesem Flugzeugtyp nicht standhält. Somit besteht lediglich beim Leichtflugzeug Cessna 210A die Möglichkeit einer effektiven Schutzwirkung.

Die untersuchten Unterlagen [1] bis [6] – die durchgeführten Statischen Berechnungen, der Technische Bericht und die planlichen Darstellungen – erscheinen prinzipiell plausibel. Insbesondere die vorliegende Statische Berechnung ist jedoch nicht vollends nachvollziehbar, da beispielsweise die Lastermittlung nicht Teil davon ist.

Die eigens durchgeführte Abschätzung bestätigt, dass die Schutzbarriere maximal für Leichtflugzeuge ausgelegt ist und zeigt darüber hinaus, dass größere und schwerere Flugzeuge davon sicherlich nicht aufgehalten werden können.