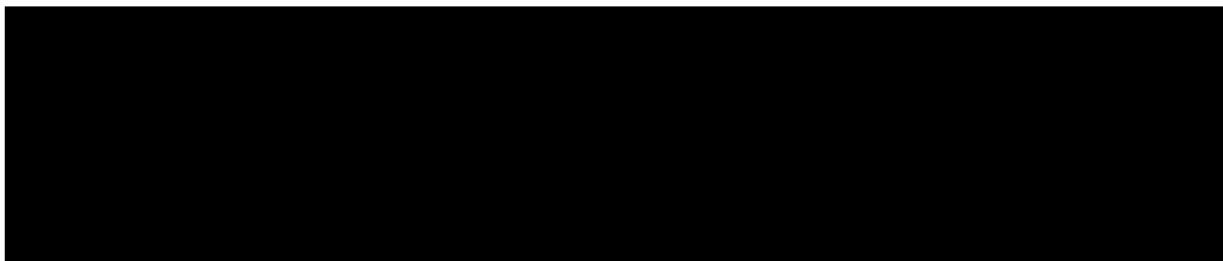




**Umgang mit radioaktiven Stoffen in der  
Transportbereitstellungshalle (TBH)  
des Kernkraftwerkes Brokdorf (KBR)**

**Explosionsdruckwelle aus Betrachtungen zur Planung von  
Terminals für Liquid Natural Gas (LNG)**

**Dokument 21a**





## **ÄNDERUNGSVERZEICHNIS**

<b>Rev.</b>	<b>Beschreibung der Änderung</b>	<b>Datum</b>
0	Erstellung	01.08.2019
1	Finalisierung der Unterlage zur Einreichung im Genehmigungsverfahren	27.06.2022



## INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	4
TABELLENVERZEICHNIS .....	4
1 Einleitung .....	5
2 Randbedingungen und Szenarien .....	5
LNG-Terminal in Brunsbüttel und Stade .....	5
LNG-Tankschiff auf der Elbe .....	6
Erdgastransportleitung ETL 180 .....	7
Straßen- und Bahntransporte .....	10
3 Multi-Energie-Methode .....	10
4 Berechnung der Explosionsdruckwelle .....	14
5 Druckerhöhung infolge Reflexion .....	15
6 Driften von Schwergaswolken .....	17
7 Zusammenfassung .....	20
8 Literaturverzeichnis .....	21
Anhang 1: Dimensionsloser statischer Überdruck als Funktion des energiebezogenen Abstands /7/ .....	24
Anhang 2: Dimensionsloser dynamischer Druck als Funktion des energiebezogenen Abstands /7/ .....	25
Anhang 3: Dimensionslose Überdruckdauer als Funktion des energiebezogenen Abstands /7/ .....	26
Anhang 4: Trassenvarianten der ETL 180 /12/ .....	27
Anhang 5: Minimaler Abstand zwischen TBH-KBR und ETL 180 (ermittelt mit /15/) .....	28
Anhang 6: Minimaler Abstand zwischen TBH-KBR und LNG-Tanker (ermittelt mit /16/) .....	29
Anhang 7: Auf Betriebsgelände betrachtete Gassen .....	30



## **ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abbildung 1:	Trassenvarianten für die Erdgastransportleitung mit Startpunkt LNG-Terminal Brunsbüttel in der Umgebung der TBH-KBR (Ausschnitt aus /12/)	8
Abbildung 2	Trassenkorridor der ETL 180 in der Nähe der TBH-KBR (Ausschnitt aus /13/):	9
Abbildung 3	Idealisierter Zeitverlauf des Überdrucks am Gebäude /8/	16
Abbildung 4	Dynamischer Lastfaktor für Explosionsdruckwelle /8/	16

## **TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1:	Ausgewählte technische Daten der ETL 180 aus /3/	7
Tabelle 2:	Kriterien zur Einstufung der Explosionsstärke	11
Tabelle 3:	Eingangsgrößen der Multi-Energie-Methode für tiefkaltes Gas	14
Tabelle 4:	Eingangsgrößen der Multi-Energie-Methode für ETL und Propantransport	14
Tabelle 5:	Berechnungsergebnisse der Multi-Energie-Methode	15
Tabelle 6:	Berechnungsergebnisse der Multi-Energie-Methode bei Drift	18
Tabelle 7:	Eingangsgrößen der Multi-Energie-Methode für Kraftwerksbereiche mit größerer Verblockung	19
Tabelle 8:	Berechnungsergebnisse der Multi-Energie-Methode für Kraftwerksbereiche mit größerer Verblockung	19



## **1 Einleitung**

Auf dem Betriebsgelände des Kernkraftwerkes Brokdorf wird eine Transportbereitstellungshalle zur Aufnahme von radioaktiven Abfällen und radioaktiven Reststoffen errichtet (TBH-KBR). Der Umgang mit den radioaktiven Stoffen erfolgt nach § 12 StrlSchG /1/.

Die Lagerung erfolgt in Abfallgebinden/Gebinden bis zur Verbringung in eine anderes Zwischenlager, in ein Logistikzentrum des Bundes oder in ein Endlager oder bis zur Abgabe an einen externen Genehmigungsinhaber (z.B. eine Behandlungs- oder Konditionierungseinrichtung) oder zur Rücknahme in einen Kotrollbereich des KBR.

Im vorliegenden Bericht wird für die TBH-KBR der maximale Überdruck infolge von unterstellten Gasexplosionen ermittelt, welche sich aus den geplanten LNG-Terminals selbst und dem damit verbundenen Schiffsverkehr sowie aus anderen Gastransportwegen ergeben könnten.

## **2 Randbedingungen und Szenarien**

Die TBH-KBR befindet sich hinter dem ausgebauten Deich an der Elbe im westlichen Bereich auf dem Betriebsgelände des Kernkraftwerkes Brokdorf. Die Fahrinne für die Großschiffahrt auf der Elbe hat eine Sohlenbreite von ca. 400 m und eine Solltiefe von etwa 14,4 m (siehe /2/). Auf der Elbe werden im Bereich Brokdorf explosive Gase transportiert. Eine Umschlagstelle für Gastanker befindet sich im Elbhafen Brunsbüttel, ca. 13 km elbabwärts vom Standort und eine in Bütfleth, ca. 28 km elbaufwärts vom Standort.

Weiter laufen Planungen, ein LNG-Terminal in Stade bzw. ein Terminal in Brunsbüttel zu errichten. Außerdem gibt es Planungen für eine Erdgastransportleitung (ETL 180), die von Brunsbüttel nach Hetlingen (Kreis Pinneberg) oder Stade verlaufen soll und bei einer der möglichen Trassierungen in der Nähe der TBH-KBR verläuft.

### **LNG-Terminal in Brunsbüttel und Stade**

Die German LNG Terminal GmbH plant dabei in einem Abstand von ca. 10 km zur TBH-KBR die Errichtung und den Betrieb von zwei LNG-Tanks mit einer Speicherkapazität von jeweils 165.000 m<sup>3</sup> /9/. Die Verteilung des Gases erfolgt unter anderen durch Gasfernleitungen und Bunkerschiffe.

Nach Auskunft der LNG Stade GmbH /10/ ist in Stade (Entfernung > 20 km) ein Terminal mit zwei LNG-Tanks mit einer Kapazität von je 240.000 m<sup>3</sup> geplant, welcher zukünftig von LNG-Tankern beliefert werden soll.



Für die weitere Betrachtung hinsichtlich einer Explosionsdruckwelle wird das Versagen eines LNG-Tanks am Terminal Brunsbüttel postuliert. Entgegen der zwischenzeitlich geänderten Planung wird auch für den Terminalstandort Brunsbüttel konservativ mit einer Tankkapazität von 240.000 m<sup>3</sup> gerechnet. Dieser Fall deckt aufgrund seiner geringeren Entfernung gegenüber dem Standort Stade einen unterstellten Fall dort mit ab.

In den Tanks soll das LNG zwischengelagert werden, es liegt also im flüssigen Aggregatzustand vor. Nach /5/ ist bei kaltverflüssigten Gasen im Fall eines größeren Lecks das Verdampfen von 1/10 des Flüssigkeitsinhaltes anzunehmen. Die Dichte von Erdgas im kaltverflüssigten Zustand beträgt zwischen 430 und 500 kg/m<sup>3</sup>, konservativ wird mit 500 kg/m<sup>3</sup> gerechnet. Somit ergibt sich die zu unterstellende Gasmasse zu

$$m_T = 0,1 \times 240.000 \text{ m}^3 \times 500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 12.000 \text{ Mg.}$$

Der minimale Abstand zum unterstellten Explosionsort beträgt für die TBH-KBR 10 km.

### LNG-Tankschiff auf der Elbe

Als Last-abdeckendes Szenario für den Schiffsverkehr am Standort der TBH-KBR wird postuliert, dass der derzeit weltweit größte LNG-Tanker (Typ: Q-Max), mit ca. 266.000 m<sup>3</sup> Gesamt-ladekapazität an LNG, auf der Elbe fährt und havariert. Es wird im weiteren der unwahrscheinlichen Fall unterstellt, dass ein Einzeltank /4/ leckschlägt und es zu einer Gasexplosion oder einer Gasfreisetzung mit Drift kommt. Das Volumen eines Einzeltanks wird mit 70.000 m<sup>3</sup> angenommen<sup>1</sup>. LNG wird kaltverflüssigt, d. h. unter geringem Überdruck transportiert. Somit ergibt sich die zu unterstellende Gasmasse analog zu den oben durchgeführten Berechnungen zu

$$m_S = 0,1 \times 70.000 \text{ m}^3 \times 500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 3.500 \text{ Mg.}$$

---

<sup>1</sup> Dies ist konservativ und deckt somit auch zukünftige größere Schiffe mit ab. Die Q-Max-Schiffe verfügen über fünf Einzeltanks. Über die Größe einzelner Tanks der Q-Max-Schiffe wurden keine Angaben veröffentlicht, es ist aber davon auszugehen, dass sie alle fünf annähernd gleich groß sind. Aufgrund von sog. Sloshing (engl. für Schwappen) unterliegen LNG-Tankschiffe der Auflage, nur mit ganz vollen oder leeren Tanks zur See fahren. Aus Gründen der Logistik und Wirtschaftlichkeit ist daher auch für zukünftig denkbare größere Schiffe nicht von größeren Einzeltankvolumina als 70.000 m<sup>3</sup> auszugehen.



Der minimale Abstand zum unterstellten Explosionsort beträgt für die TBH-KBR ca. 1.000 m, dies entspricht dem minimalen Abstand zum KBR-seitigen Rand der Elbfahrrine (siehe Anhang 6). Der kürzeste Abstand zwischen TBH-KBR und Elbfahrwassermitte beträgt ca. 1.300 m, d.h. beladene, in Richtung Stade fahrende Schiffe haben üblicherweise einen Abstand von mehr als 1.300 m zur TBH-KBR.

### **Erdgastransportleitung ETL 180**

Ebenfalls in Planung der German LNG Terminal GmbH befindet sich eine Erdgastransportleitung mit Startpunkt Brunsbüttel (siehe Abbildung 1 und Anhang 4). Die Trassenvariante 4 (4a) der Erdgastransportleitung (ETL 180) Brunsbüttel - Hetlingen/Stade wäre dabei für die TBH-KBR relevant. Die Trassenvariante 4 gehört zu einer Variantengruppe, die im Ergebnis der Raumordnerischen Beurteilung, siehe /3/, nicht empfohlen wird, da sie „deutliche Nachteile“ gegenüber den anderen drei betrachteten Trassenvarianten aufweist. Damit ist die Realisierung dieser Trassenführung äußerst unwahrscheinlich.

Konservativ wird unterstellt, dass trotzdem Trassenvariante 4 realisiert wird. Aus dem Erläuterungsbericht der Antragstellerin /3/ werden folgende Planungsdaten entnommen:

**Tabelle 1: Ausgewählte technische Daten der ETL 180 aus /3/**

Rohrdurchmesser	DN 800
Max. zulässiger Betriebsdruck	84 bar
Sicherheitsabschnitte	Alle 10-18 km Absperrstationen, Regelabstand 15 km

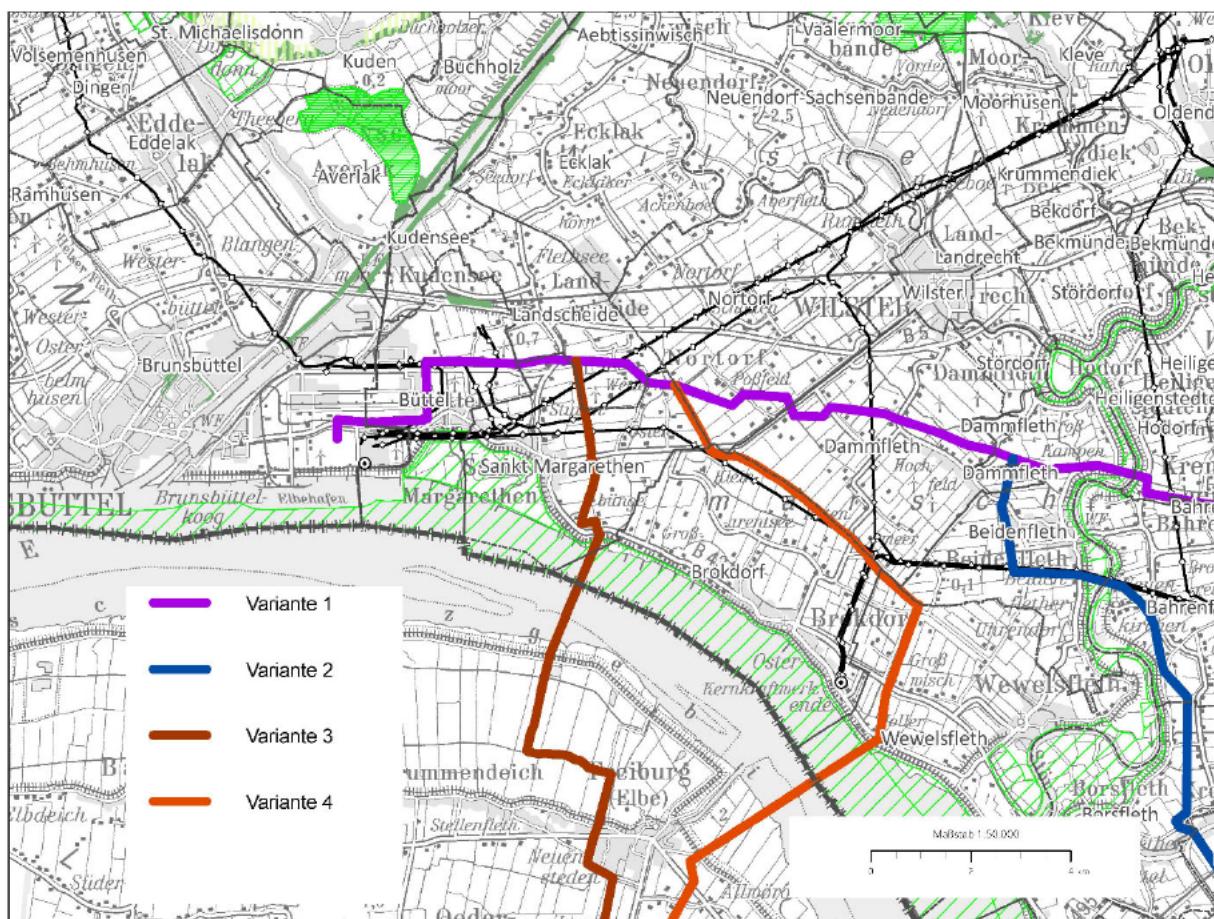


Abbildung 1: Trassenvarianten für die Erdgastransportleitung mit Startpunkt LNG-Terminal Brunsbüttel in der Umgebung der TBH-KBR (Ausschnitt aus /12/)

Für die Ermittlung des maximalen Überdrucks an den Außenwänden der TBH infolge einer Leckage in der Erdgasleitung wird unterstellt, dass sich die Gaswolke über dem Leck ausbildet und nicht durch Windeinflüsse verdünnt wird oder sich verflüchtigt. Von der Erdüberdeckung wird kein Kredit genommen. Dabei wird konservativ angenommen, dass das gesamte Gasvolumen eines Leitungsabschnitts bzw. zwischen zwei Absperrarmaturen austritt und zur Bildung der Deflagrationsdruckwelle beiträgt..

Das Gasvolumen im technischen Normzustand V der Erdgasleitung errechnet sich wie folgt:

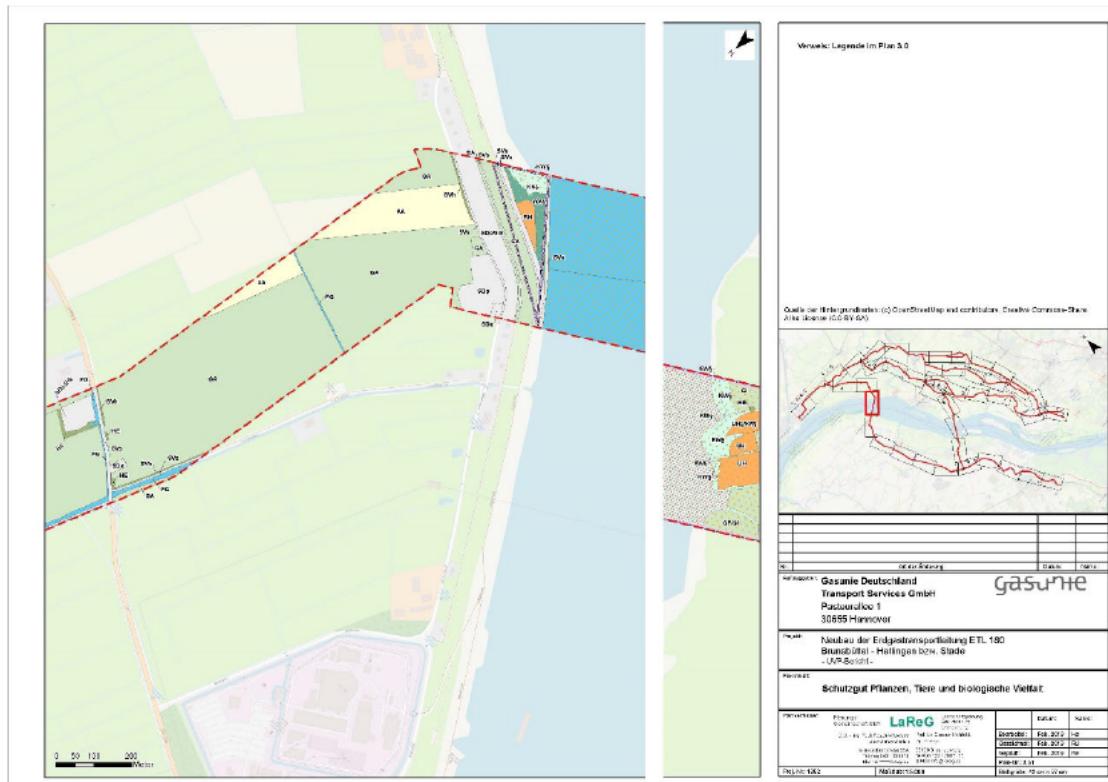
$$V = \pi \left(\frac{d_i}{2}\right)^2 \cdot 1 \cdot \frac{p}{p_a}$$

mit:

- $d_i$  Innendurchmesser des Leitungsabschnitts (Näherungsweise DN, hier 800 mm)
  - $l$  Länge des Leitungsabschnitts (hier: 18.000 m)
  - $p$  Absolutdruck im Leitungsabschnitt (hier 84 bar)
  - $p_a$  Umgebungsdruck (hier 1013,25 mbar)

Es ergibt sich mit den angegebenen Randbedingungen aus Tabelle 1 ein Gasvolumen von 750.076 m<sup>3</sup>. Die Gasdichte von Methan bei Umgebungsdruck beträgt ca. 0,72 kg/m<sup>3</sup> /14/, somit beträgt die zu betrachtende Gasmasse 540,055 Mg. Das Gas Methan weist einen Heizwert von ca. 50,01 MJ/kg auf /14/.

Aus den Detailkarten der Trassierungskorridore aus dem UVP-Bericht der Antragstellerin (hier relevant: Plan 3.31 /13/) ist ersichtlich, dass der minimale Abstand zwischen dem möglichen Trassenverlauf der ETL und der TBH-KBR an dem Punkt erreicht wird, wo die Straße „Roßkopp“ in die Bundesstraße B 431 einmündet (südöstlich des KBR, am Graben „Hollerwettern“). Von diesem Punkt aus beträgt die kürzeste Entfernung zur TBH-KBR ca. 920 m (siehe Anhang 5).



**Abbildung 2** Trassenkorridor der ETL 180 in der Nähe der TBH-KBR (Ausschnitt aus /13/):



## Straßen- und Bahntransporte

Explosionsfähige Stoffe wie Flüssiggas und Kraftstoff werden auch auf der Straße und Schiene transportiert, daher wird die Gefährdung durch postulierte Unfälle auf diesen Transportwegen mit betrachtet. Von druckverflüssigten Gasen geht hierbei das größte Druckwellen-Potential aus, da bei der Zerstörung eines mit Flüssiggas gefüllten Tanks ca. 50 % der Gasmenge schlagartig austreten <sup>/4/</sup>. Bei dem Austritt von Kraftstoffen erfolgt hingegen eine langsame Verdampfung und/oder eine Versickerung ins Erdreich. Aus diesem Grund wird im Folgenden das Versagen eines mit Propan<sup>2</sup> gefüllten LKW-Tanks oder Eisenbahn-Kesselwagens unterstellt. Für den LKW werden 27 Mg Zuladung angenommen, für den Eisenbahnwagen 60 Mg. Als Ort des Gasaustritts und der Zündung wird der jeweils kürzeste Abstand zum nächstgelegenen Transportweg angesetzt (B421 in 215 m Entfernung, Bahnstrecke Brunsbüttel-Wilster in 7000 m Entfernung).

## 3 Multi-Energie-Methode

Zur Berechnung der Überdrücke wird die Multi-Energie-Methode <sup>/7/</sup> angewendet. Mit Hilfe der Multi-Energie-Methode werden Detonation und Deflagration bzw. Übergangsformen der Explosion unterschieden.

Bei einer Deflagration ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Reaktionsfront in gasförmigen Systemen mit Werten von  $w \leq 100$  m/s relativ gering. Bei Detonationsvorgängen hingegen beträgt die Geschwindigkeit der Reaktionsfront in gasförmigen Systemen  $w = 2.000$  bis  $3.000$  m/s <sup>/6/</sup>. In der Regel werden bei Detonationsvorgängen höhere Drücke als bei Deflagrationsvorgängen erwartet.

Bei den zu betrachtenden Szenarien ist eine freie Entfaltung der Gaswolke möglich. Als Zündquellen von Erdgas kommen heiße Oberflächen, Funkenbildung, glimmende Gegenstände usw. in Frage. Die Energien der genannten Zündquellen reichen nicht aus, um eine Detonation zu initiieren. Die Zündenergie zur Auslösung einer Detonation ist bei den zu betrachtenden Gas-Luftgemischen um ca. neun Größenordnungen größer als bei der Zündenergie zur Auslösung einer Deflagration <sup>/7/</sup>. Somit ist eine Detonation bei den zu betrachtenden Unfallszenarien auszuschließen.

---

<sup>2</sup> Hinsichtlich ihrer spezifischen Verbrennungsenergie unterscheiden sich die gesättigten Kohlenwasserstoffe nur unwesentlich, daher ist die Annahme repräsentativ



Mit der Multi-Energie-Methode ist es möglich, Explosionsabläufe hinreichend genau zu erfassen. Dabei werden auch die Umgebungseinflüsse innerhalb und außerhalb der Gaswolke sowie die Zündenergie berücksichtigt.

Hierbei ist von Bedeutung, ob im Bereich der Gaswolke Behinderungen vorhanden sind (z. B. durch Gebäude, Bäume, Erdwälle usw.) bzw. ob sich die Gaswolke frei ausbilden kann oder äußerlich teilweise begrenzt bzw. eingeschlossen wird. In Abhängigkeit dieser Gegebenheiten lassen sich für die Gaswolke Explosionsstärken festlegen. In Zonen, in denen die Gaswolke behindert ist, ist mit einer größeren Explosionsstärke zu rechnen, als in unbehinderten Bereichen der Gaswolke. In den behinderten Zonen kann es – je nach Grad der Behinderung – zu einem detonativen Verlauf der Explosion kommen, wobei im unbehinderten Bereich der Gaswolke die Explosion deflagrativ verläuft. Die Explosionsstärke wird in Stufen von 1 bis 10 eingeteilt, wobei 1 eine geringe und 10 eine hohe Explosionsstärke darstellt. Im unbehinderten Bereich der Gaswolke ist die Explosionsstärke mit 1 bis 3 anzunehmen /6/. Eine Entscheidungshilfe zur Festlegung der Explosionsstärke gibt die nachfolgende Tabelle 2 in Anlehnung an Table 5.3 aus /7/.

Tabelle 2: Kriterien zur Einstufung der Explosionsstärke

Zündenergie		Behinderung in der Gaswolke			parallele Begrenzungen	unbegrenzt	Explosionsstärke
niedrig	hoch	starke	geringe	keine			
x	x	x			x		7-10
	x	x				x	7-10
	x	x			x		5-7
	x		x		x		5-7
	x		x	x	x	x	4-6
	x		x	x	x	x	4-6
x	x	x					4-5
x			x		x		4-5
x			x		x		3-5
x			x			x	2-3
x				x	x		1-2
x				x		x	1



In der sich ausweitenden Druckwelle setzt sich der Gesamtdruck ( $p$ ) aus dem Überdruck ( $p_s$ , statischer Druck) und dem infolge der Bewegungsenergie vorherrschenden dynamischen Druck ( $p_{dyn} = 1/2 \cdot \rho \cdot v^2$ , Dichte der Luft ( $\rho$ ), Geschwindigkeit der Luft ( $v$ )) zusammen. Beide Drücke sind räumlich und zeitlich veränderlich. Die Multi-Energie-Methode liefert für die genannten Drücke jeweils den Maximalwert als Funktion des Abstandes vom Explosionszentrum.

In Anhang 1 bis 3 sind die dimensionslosen Größen maximaler statischer Überdruck ( $p'_s$ ), maximaler dynamischer Druck ( $p'_{dyn}$ ) und die Dauer der Überdruckphase ( $t'_{p}$ ) als Funktion des energiebezogenen Abstands vom Explosionszentrum für verschiedene Explosionsstärken dargestellt. Ausgehend vom energiebezogenen Abstand  $r'$  und mit Hilfe der Explosionsstärke können die dimensionslosen Größen  $p'_s$ ,  $p'_{dyn}$  und  $t'_{p}$  aus den Diagrammen abgelesen werden.

Zur Bestimmung der Explosionsstärke sind folgende Randbedingungen – entsprechend dem Entscheidungsmuster der Tabelle 2 – festzulegen.

### Zündenergie

Für Erdgas ist davon auszugehen, dass die Zündenergie, welche die Explosion auslöst, niedrig ist. Niedrige Zündenergien sind z. B. durch heiße Oberflächen, Funkenbildung oder glimmende Gegenstände gegeben.

### Behinderungen in der Gaswolke

Bei dem zu betrachtenden Ereignis kann unterstellt werden, dass die Behinderungen in der Gaswolke als gering einzuschätzen sind (weniger als 30% des Volumens sind durch Hindernisse belegt /7/) oder nicht vorhanden sind. Konservativ wird eine geringe Behinderung der Gaswolke angesetzt.

### Parallele Begrenzungen

Gemäß /7/ sind parallele Begrenzungen zu berücksichtigen, sobald die Ausbreitung der Gaswolke an 2 oder 3 Seiten durch Wände oder Hindernisse begrenzt wird. Dies ist bei keinem der untersuchten Szenarien gegeben.

### Wahl der Explosionsstärke

Aus den Randbedingungen lassen sich für die untersuchten Fälle Explosionsstärken von 2 bis 3 (siehe Markierung in Tabelle 2) zuordnen. Konservativ wird die Explosionsstärke 3 gewählt.

Zur Bestimmung des maximalen Überdrucks, des dynamischen Drucks, der Dauer des Überdrucks sowie des positiven Impulses, sind folgende Berechnungen durchzuführen:



$$V_c = \frac{m_g}{\rho_g \times c_s}$$

$$E = E_V \times V_c$$

$$r' = \frac{r}{(\frac{E}{p_a})^{1/3}}$$

$$p_s = p'_s \times p_a$$

$$t_p = t'_p \left(\frac{E}{p_a}\right)^{1/3} \times \frac{1}{a_a}$$

$$p_{dyn} = p'_{dyn} \times p_a$$

$$i_s = 0,5 \times p_s \times t_p$$

$$p = p_s + p_{dyn}$$

mit:

$V_c$  Volumen der Gaswolke,  $\text{m}^3$

$m_g$  Masse Gas, kg

$\rho_g$  Dichte Gas,  $\text{kg/m}^3$  für 25 °C und 1,013 bar

$c_s$  stöchiometrische Konzentration, nach Table 5.1 /7/

$E$  Verbrennungsenergie der stöchiometrisch gemischten Gaswolke, J

$E_V$  spezifische Verbrennungsenergie der Gaswolke,  $\text{J/m}^3$ , nach Table 5.1 /7/

$r'$  energiebezogener Abstand zum Explosionszentrum

$r$  Abstand zum Explosionszentrum, m

$p_a$  Umgebungsdruck,  $\text{Pa}$

$p_s$  maximaler Überdruck,  $\text{Pa}$

$p'_s$  dimensionsloser, maximaler Überdruck nach Figure 5.8 A /7/ (siehe Anhang 1)

$t_p$  Dauer der Überdruckphase, s

 <b>Preussen Elektra</b>	<b>Transportbereitstellungshalle TBH-KBR</b>	Rev. 1 vom 27.06.2022
---	--	--------------------------

$t'_p$  dimensionslose Dauer der Überdruckphase nach Figure 5.8 C /7/ (siehe Anhang 3)

$a_a$  Schallgeschwindigkeit in Luft, 344 m/s

$p_{dyn}$  dynamischer Druck, Pa

$p'_{dyn}$  dimensionsloser dynamischer Druck nach Figure 5.8 B /7/ (siehe Anhang 2)

$i_s$  positiver Impuls, Pa · s

$p$  Gesamtdruck, Pa

## 4 Berechnung der Explosionsdruckwelle

Für die Berechnung des maximalen Überdrucks infolge einer Gasexplosion wird unterstellt, dass sich die Gaswolke (Halbkugel) am Unglücksort ausbildet und nicht durch Windeinflüsse verdünnt wird oder sich verflüchtigt.

In den Tabellen 3 und 4 sind die Eingangsgrößen dargestellt.

**Tabelle 3: Eingangsgrößen der Multi-Energie-Methode für tiefkaltes Gas**

Szenario	$m_g$	$c_s$	$\rho_g$	$E_v$	$r$	$p_a$
	(kg)	(%)	(kg/m <sup>3</sup> )	(MJ/m <sup>3</sup> )	(m)	(Pa)
Gastank in Brunsbüttel	12.000.000	9,5	0,72	3,23	10.000	101.325
LNG-Tankschiff auf der Elbe	3.500.000	9,5	0,72	3,23	1.000	101.325

**Tabelle 4: Eingangsgrößen der Multi-Energie-Methode für ETL und Propantransport**

Szenario	$m_g$	$E_v$	$r$	$p_a$
	(kg)	(MJ/kg) /14/	(m)	(Pa)
ETL 180	540.055	50,01	920	101.325
Propan-LKW auf B431	13.000	46,35	215	101.325
Propan-Kesselwagen	30.000	46,35	7.000	101.325

Neben dem maximalen Überdruck ( $p_s$ ) lassen sich mit Hilfe der Multi-Energie-Methode folgende physikalische Größen bestimmen:

- dynamischer Druck ( $p_{dyn}$ , Druck aus Strömungsgeschwindigkeit),
- Dauer der Überdruckphase ( $t_p$ ) und
- Impuls ( $i_s$ ).

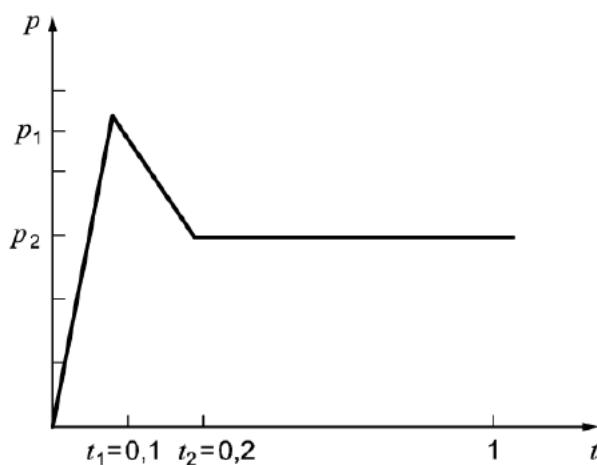
In der Tabelle 5 sind die entsprechend der Multi-Energie-Methode ermittelten Größen aufgeführt.

**Tabelle 5: Berechnungsergebnisse der Multi-Energie-Methode**

Szenario	$V_c$	$E$	$r'$	$p'_s$	$p_s$	$p'_{dyn}$	$p_{dyn}$	$p$	$i_s$	$t'_p$	$t_p$
	( $m^3$ )	(MJ)	(-)	(-)	(kPa)	(-)	(kPa)	(kPa)	(kPas)	(-)	(s)
Gastank Brunsbüttel	175.438.597	566.666.667	5,6	0,006	0,6	0,001	0,1	0,7	3,1	2	10,32
LNG-Tankschiff	51.169.591	165.277.777	0,85	0,039	3,95	0,0026	0,26	4,21	13,5	2	6,84
ETL 180		27.008.137	1,43	0,025	2,5	0,001	0,1	2,6	4,7	2	3,7
Propan-LKW		625.725	1,17	0,03	3,04	0,0015	0,15	3,19	0,57	2	0,38
Propan-Kesselwagen		1.390.500	29,2	0,0015	0,15	0	0	0,15	0,04	2	0,49

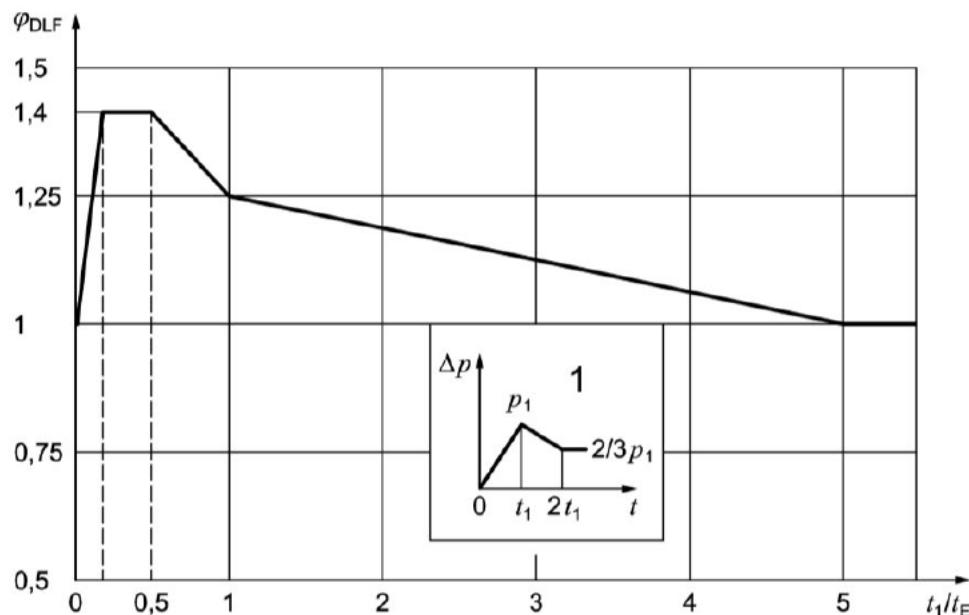
## 5 Druckerhöhung infolge Reflexion

Die in Tabelle 5 dargestellten maximalen Überdrücke enthalten keine Druckerhöhungen infolge von Reflexion an den Baustrukturen. Für die statische Überprüfung des Gebäudes sind die Reflexionserhöhungen für die Gebäudeformen nach DIN 25449 /8/ zu berücksichtigen. Gemäß /8/ ergibt sich ein idealisierter Zeitverlauf des Überdrucks am Gebäude, wie in Abbildung 4 dargestellt.



**Abbildung 3** Idealisierter Zeitverlauf des Überdrucks am Gebäude /8/

Der dynamische Lastfaktor zur Berücksichtigung der Reflexionserhöhung für die Explosionsdruckwelle verhält sich nach dem Verhältnis der Lastanstiegszeit zur Grundschwingzeit des Gebäudes nach /8/, wie in Abbildung 5 dargestellt. Im ungünstigsten Fall beträgt dieser Faktor 1,4 (mit Reflexion) und führt auf einen maximal wirkenden Druck an der Gebäudefront von  $1,4 \cdot 42 \text{ mbar} = 59 \text{ mbar}$ .



**Legende**

1	Last-Zeit-Funktion	$\varphi_{DLF}$	dynamische Lastfaktor zu
$\Delta p$	resultierender Überdruck	$t_1/t_E$	Verhältnis der Lastanstiegszeit $t_1$ zur Grundschwingzeit $t_E$

**Abbildung 4** Dynamischer Lastfaktor für Explosionsdruckwelle /8/



## 6 Driften von Schwergaswolken

Die Berechnungen in Abschnitt 4 unterstellen eine Zündung des Gas-Luft-Gemisches am Ort der Freisetzung. Dies ist bei Methanwolken, die beispielweise bei einem Leck einer Gasleitung entstehen, ausreichend, da das entweichende Gas leichter ist als Luft und daher nach oben aufsteigt.

Bei den hier untersuchten Szenarien „LNG-Terminal“ oder „LNG-Tanker“ wird jedoch der Austritt von tiefkalt verflüssigtem Gas unterstellt, das nach Austritt eine flache, bodennahe Gaswolke bildet. Diese sogenannten Schwergaswolken können durch Windeinflüsse driften. Unter der Randbedingung einer sog. „stabilen Wetterlage“ /4/ sowie Winden vom Freisetzungsort in Richtung der THB-KBR (beim Szenario „LNG-Tanker“ wären dies Winde aus dem südwestlichen Quadranten) kann ein Driften einer zündfähigen Gaswolke in Richtung der TBH-KBR nicht ausgeschlossen werden. Hierfür würde die Schwergaswolke über die Wasseroberfläche der Elbe driften und müsste dann den Elbdeich überwinden, um auf das Betriebsgelände des KKW zu gelangen.

Weder auf der Elbe noch auf dem Betriebsgelände sind Zündquellen dauerhaft vorhanden, für eine Zündung ist daher eine zufällig vorhandenen Zündquelle (z.B Funkenflug, heiße Oberfläche) erforderlich. Für die folgende Abschätzung muss also von einer Zündquelle an beliebigem Ort innerhalb der Schwergaswolke ausgegangen werden.

Der maximale Überdruck der Druckwelle hängt im Wesentlichen von der Verblockung oder Verdämmung der Gaswolke ab. Im betrachteten Bereich (Elbe, Uferbereich oder Betriebsgelände um die TBH-KBR) ist diese Verblockung nur gering. Aus Experimenten /7/ ist bekannt, dass es bei der Zündung von wenig oder nicht verdämmten Gaswolken zu einer deflagrative Verbrennung mit nur geringen Überdrücken kommt.

Die Wahl der Explosionsstärke 3 nach Tabelle 2 erscheint auch bei unterstellter Schwergaswolke im Bereich der TBH-KBR gerechtfertigt: Die Zündenergie ist gering, ebenso die Behinderung der Gaswolke durch die wenigen vorhandenen Hindernisse (Zäune, Büsche, etc). Die stärkste Verblockung im Umfeld der THB-KBR ist im Bereich zwischen der Transportbereitstellungshalle und dem Standortzwischenlager ZD.10 gegeben. Gemäß Tabelle 2 wäre beim Vorhandensein von parallelen Begrenzungen eine höhere Explosionsstärke zu wählen. Im hier vorliegen Fall liegen die Längswand des Zwischenlagers (ca. 20 m hoch) parallel zur Längswand der TBH-KBR (ca. 17 m hoch). Da diese jedoch ca. 60 m auseinanderliegen, ist diese Begren-



zung kaum wirksam, weil sie die Expansion der Gaswolke bei Deflagration nur geringfügig behindert. Daher kann trotzdem (ggfs. aus der viertletzten Zeile der Tabelle 2) die Explosionsstärke 3 gewählt werden.

Aufgrund des unbekannten Abstands zur Zündquelle wurde im Rahmen einer Grenzbetrachtung der energiebezogene Abstand minimal gewählt ( $r'=r'_0$ ) und die zugehörigen Druckwerte aus Anhang 1 und 2 abgelesen.

**Tabelle 6: Berechnungsergebnisse der Multi-Energie-Methode bei Drift**

Szenario	$r'$	$p'_s$	$p_s$	$p'_{dyn}$	$P_{dyn}$	$P$
	(-)	(-)	(kPa)	(-)	(kPa)	(kPa)
LNG-Gaswolke nach Drift	$=r'_0$	0,05	5,0	0,02	2,0	7,0

Es ergibt sich ein maximaler Überdruck von 70 mbar (ohne Reflexion) bzw. 98 mbar (mit Reflexion)

Für manche Teilbereiche des Betriebsgeländes erscheint die Explosionsstärke 3 nicht abdeckend, weil dort vergleichsweise hohe Gebäudestrukturen relativ eng nebeneinander stehen. Hierdurch entstehen „Gassen“, aus denen das Gas nur nach oben oder in Richtung der beiden Gassenenden entweichen kann, so dass hier gemäß Tabelle 2 die Explosionsstärke 5 anzusetzen ist. Daher wird im Folgenden geprüft, ob der Beitrag dieser Einzelquellen höher ist als der pauschal für Explosionsstärke 3 und beliebige Abstände angesetzte Wert von 70 mbar.

Hierfür werden exemplarisch die drei relevantesten „Gassen“ einzeln betrachtet (siehe auch Anhang 7):

- Der Bereich zwischen Schaltanlagengebäude ZE und Maschinenhaus ZF
- Der Bereich zwischen Werkstatt- und Lagergebäude ZL.0 bzw. Notstromdieselgebäude ZK und dem Schaltanlagengebäude ZE bzw. dem Verwaltungsgebäude ZY
- Der Bereich zwischen Maschinenhaus ZF und Notstromdieselgebäude ZK

Das betrachtete Volumen ergibt aus dem Quadervolumen, das aufgespannt wird von der Länge L der jeweils kürzeren der beiden parallelen Wände, der Höhe H der jeweils niedrigeren der beiden parallelen Wände und dem Abstand B dieser parallelen Wände. Bewertet wird jeweils der kürzeste Abstand r dieses Teilvolumens zur TBH-KBR.

 <b>Preussen Elektra</b>	<b>Transportbereitstellungshalle TBH-KBR</b>	Rev. 1 vom 27.06.2022
---	--	--------------------------

**Tabelle 7: Eingangsgrößen der Multi-Energie-Methode für Kraftwerksbereiche mit größerer Verblockung**

Bereich (Teilvolumen)	L	H	B	V	$E_v$	r	$p_a$
	(m)	(m)	(m)	(m <sup>3</sup> )	(MJ/m <sup>3</sup> )	(m)	(Pa)
Zwischen ZE und ZF	25	37	23	21.275	3,23	275	101.325
Zwischen ZL.0/ZK und ZE/ZY:				26280	3,23	270	101.325
	75	14	20				
	33	16	10				
Zwischen ZF und ZK	36	16	25	14.440	3,23	230	101.325

**Tabelle 8: Berechnungsergebnisse der Multi-Energie-Methode für Kraftwerksbereiche mit größerer Verblockung**

Bereich (Teilvolumen)	E	r'	$p'_s$	$p_s$	$p'_{dyn}$	Pdyn	P
	(MJ)	(-)	(-)	(kPa)	(-)	(kPa)	(kPa)
Zwischen ZE und ZF	68.718	3,13	0,039	3,96	0,001	0,1	4,1
Zwischen ZL.0/ZK und ZE / ZY	84.884	2,86	0,041	4,15	0,0014	0,14	4,3
Zwischen ZF und ZK	46.521	2,98	0,04	4,06	0,0012	0,12	4,2

Die Druckbeiträge der Kraftwerksbereiche mit der größten Verblockung liegen mit max. 43mbar (4,3 kPa) unterhalb des pauschal angenommenen Wertes von 70 mbar. Dieser Pauschalwert ist abdeckend auch für weitere potentielle Quellen (Gassen) mit kleineren Masse-Abstands-Verhältnissen.

Die Ausbreitung der Explosionsdruckwelle würde durch das zwischen TBH-KBR und den betrachteten Explosionsquellen liegende Zwischenlager abgeschwächt werden, dies wurde konservativ nicht berücksichtigt.



## **7 Zusammenfassung**

Für die unterstellten Szenarien wird ein maximaler Überdruck ( $p_s + p_{dyn}$ ) von ca. 42 mbar (4,2 kPa) an der TBH-KBR ermittelt. Das führende Szenario ist die Havarie eines LNG-Tankers auf der Elbe.

Unter Berücksichtigung der Reflexion ergibt sich ein maximaler Überdruck von ca. 59 mbar (5,9 kPa).

Wird darüber hinaus die Drift einer LNG-Schwergaswolke mit Zündung auf dem Betriebsgelände unterstellt, so ergeben sich maximale Überdrücke von 70 mbar (ohne Reflexion) bzw. 98 mbar (mit Reflexion).



## **8 Literaturverzeichnis**

- /1/ StrlSchG – Strahlenschutzgesetz  
Gesetz zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung vom 27. Juni 2017 (BGBl. I S. 1966), das zuletzt durch die Bekanntmachung vom 3. Januar 2022 (BGBl. I S. 15) geändert worden ist
- /2/ Seekarte: Die Elbe von der Oste bis Brunsbüttel und Krautsand, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, 14. Ausgabe 2003, I INT 1453
- /3/ Gasunie Deutschland Transport Service GmbH, Neubau der Erdgastransportleitung, ETL 180, Brunsbüttel – Hetlingen/Stade, Raumordnungsverfahren, Anlage 1: Erläuterungsbericht, Rev. 00, 04.03.2019
- /4/ Battelle-Institut e.V.: Statusbericht über die denkbare äußere Druckbelastung von Kernkraftwerken durch Gasexplosionen, Bericht für das Bundesministerium des Innern, Januar 1977
- /5/ DECHEMA - Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. Statuspapier - Auswirkungsbetrachtungen bei störungsbedingten Stoff- und Energiefreisetzung in der Prozessindustrie - Methodenübersicht und industrielle Anwendung, 3. Auflage, Januar 2017
- /6/ Lees' Loss Prevention in the Process Industries, Volumes 1-3  
4rd Edition, Elsevier, August 2012
- /7/ Committee for the Prevention of Disasters Methods for the Calculation of Physical Effects "Yellow Book" CPR 14E (Part 2), Third edition second revised print 2005
- /8/ DIN 25449 Bauteile aus Stahl- und Spannbeton in kerntechnischen Anlagen - Sicherheitskonzept, Einwirkungen, Bemessung und Konstruktion, Fassung: 04/2016
- /9/ Website der German LNG Terminal GmbH, Brunsbüttel  
<https://germanlng.com/ausstattung-des-terminals-und-kennzahlen/?lang=de>  
abgerufen am 20.06.2022

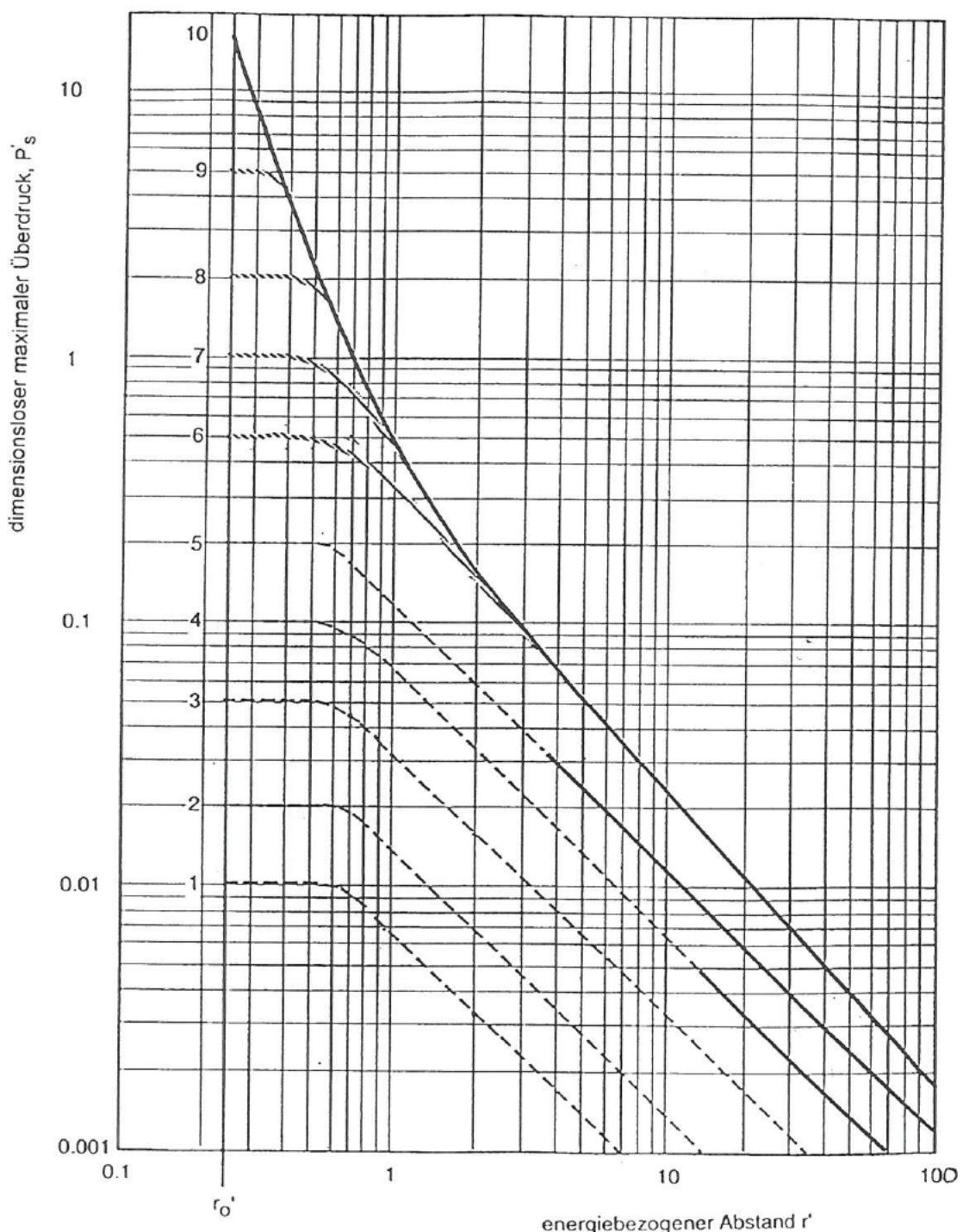


- /10/ Webseite der Hanseatic Energy Hub GmbH, Hamburg  
<https://www.hanseatic-energy-hub.de/konzept/das-konzept/>  
abgerufen am 20.06.2022
- /11/ Land Schleswig-Holstein, Ministerium für Inneres, ländliche Räume und Integration; Abschluss des Raumordnungsverfahrens - Raumordnerische Beurteilung - Neubau der Erdgastransportleitung ETL 180 Brunsbüttel – Hetlingen/Stade; Kiel 29.10.2019
- /12/ Anlage 1 (Karte) zu  
Land Schleswig-Holstein, Ministerium für Inneres, ländliche Räume und Integration; Abschluss des Raumordnungsverfahrens - Raumordnerische Beurteilung - Neubau der Erdgastransportleitung ETL 180 Brunsbüttel – Hetlingen/Stade; Kiel 29.10.2019  
Abgerufen am 20.06.2022 unter [https://www.uvp-verbund.de/documents/in-grid-group\\_ige-iplug-sh/EE312102-ED17-47C7-B5D7-23E4022733D4/Anlage%201%20Karte.pdf](https://www.uvp-verbund.de/documents/in-grid-group_ige-iplug-sh/EE312102-ED17-47C7-B5D7-23E4022733D4/Anlage%201%20Karte.pdf)
- /13/ Plan Nr. 3.31, LaReG, Feb. 2019, abgerufen am 20.06.2022 unter  
[https://www.uvp-verbund.de/documents/ingrid-group\\_ige-iplug-sh/EE312102-ED17-47C7-B5D7-23E4022733D4/Karten%20zum%20UVP-Bericht.zip](https://www.uvp-verbund.de/documents/ingrid-group_ige-iplug-sh/EE312102-ED17-47C7-B5D7-23E4022733D4/Karten%20zum%20UVP-Bericht.zip)
- /14/ Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau,  
Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 23. Auflage
- /15/ <https://maps.openrouteservice.org/>
- /16/ <https://webapp.navionics.com/>



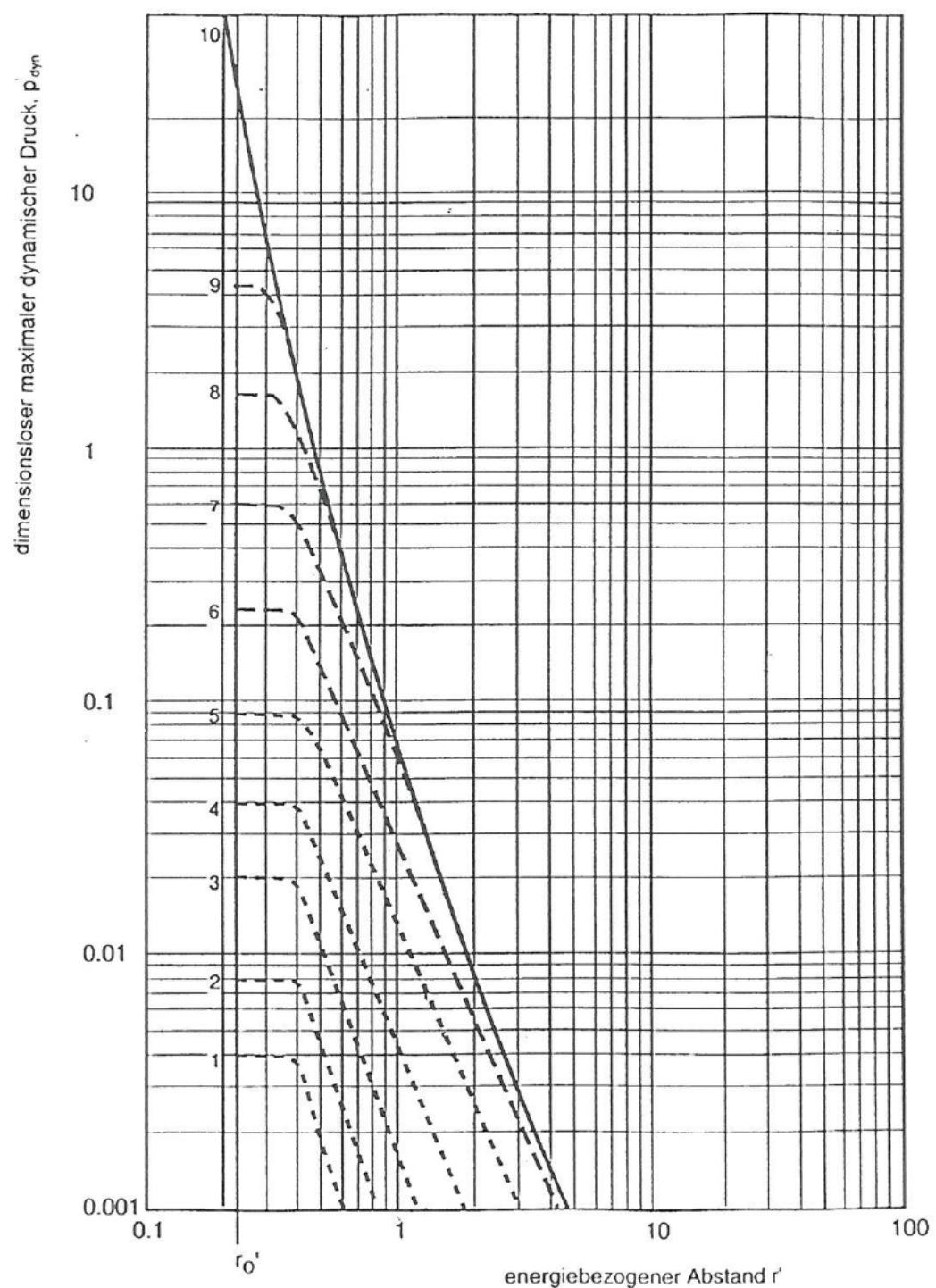
## **Anhang**

- Anhang 1: Dimensionsloser statischer Überdruck als Funktion des energiebezogenen Abstands**
- Anhang 2: Dimensionsloser dynamischer Druck als Funktion des energiebezogenen Abstands**
- Anhang 3: Dimensionslose Überdruckdauer als Funktion des energiebezogenen Abstands**
- Anhang 4: Trassenvarianten der ETL 180**
- Anhang 5: Minimaler Abstand zwischen TBH-KBR und ETL 180**
- Anhang 6: Minimaler Abstand zwischen TBH-KBR und LNG-Tanker**
- Anhang 7: Auf Betriebsgelände betrachtete Gassen**



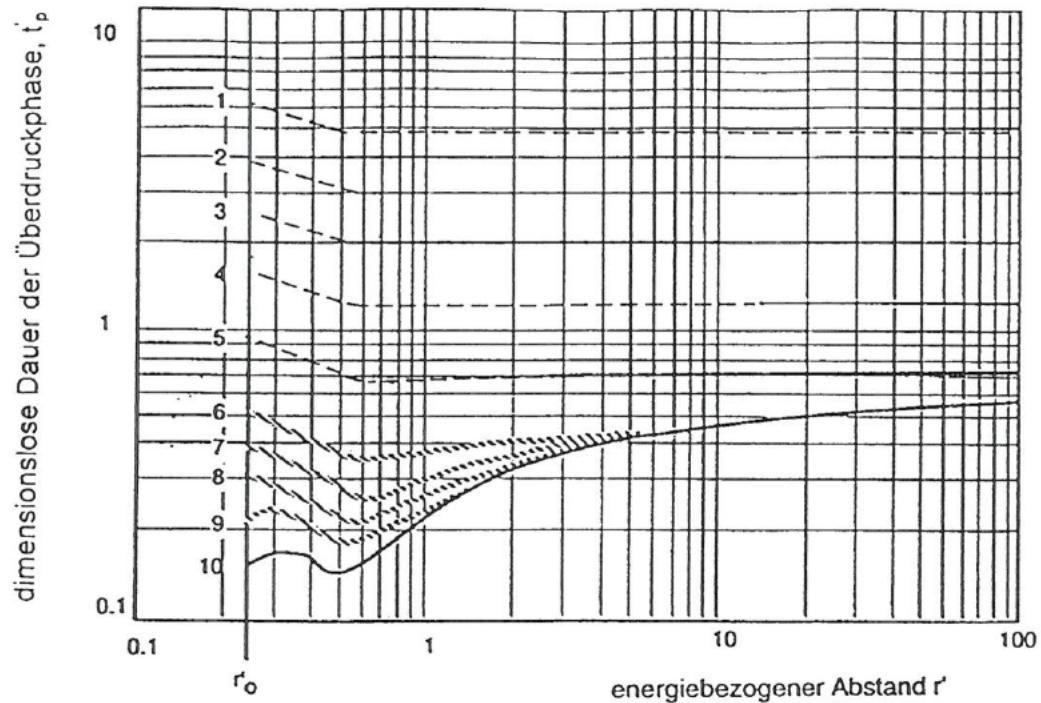
(Hinweis: die Beschriftung 1 bis 10 an den Kurven bezieht sich auf die Explosionstärke gem. Tab 2)

**Anhang 1: Dimensionsloser statischer Überdruck als Funktion des  
energiebezogenen Abstands /7/**



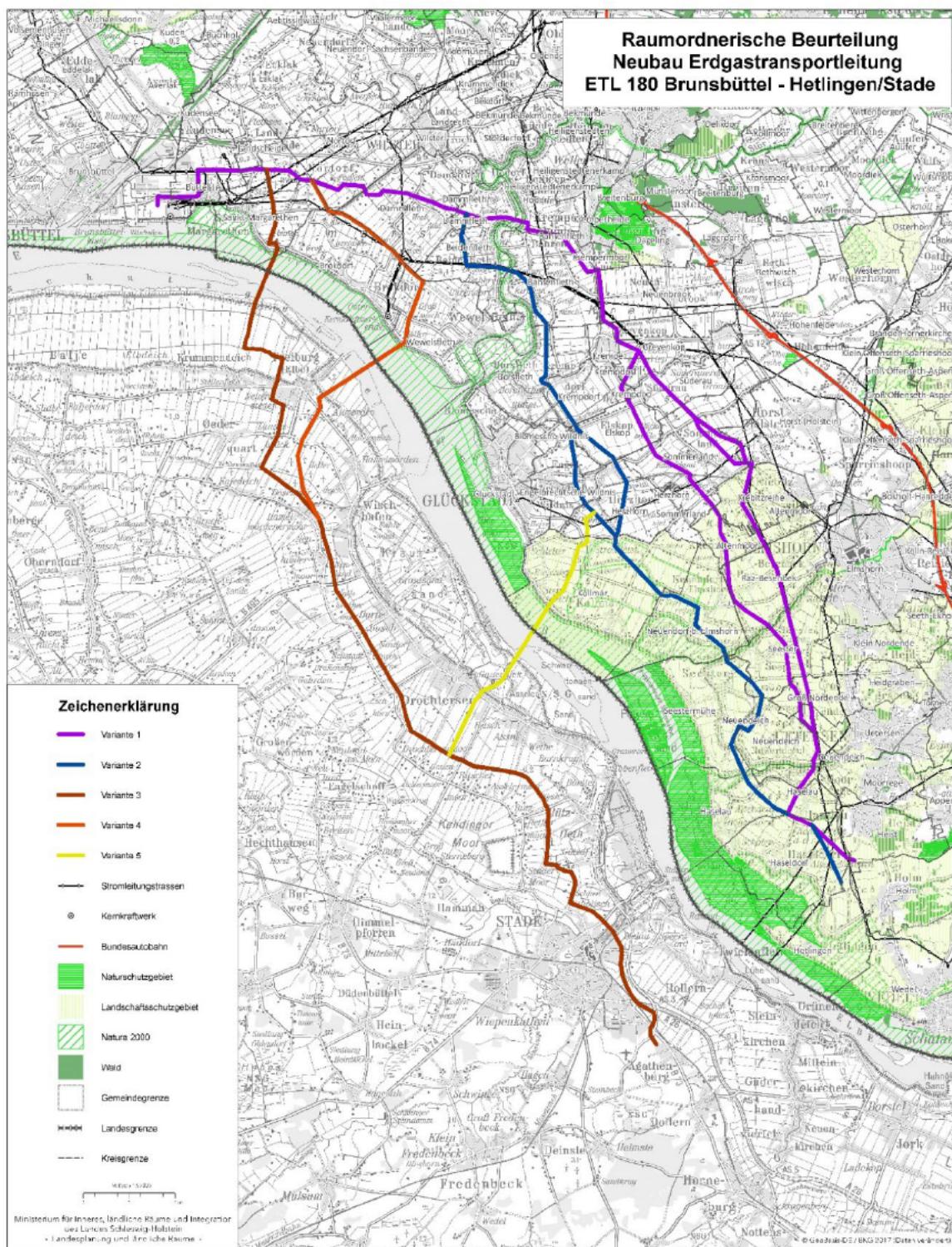
(Hinweis: die Beschriftung 1 bis 10 an den Kurven bezieht sich auf die Explosionstärke gem. Tab 2)

**Anhang 2: Dimensionsloser dynamischer Druck als Funktion des  
energiebezogenen Abstands /7/**



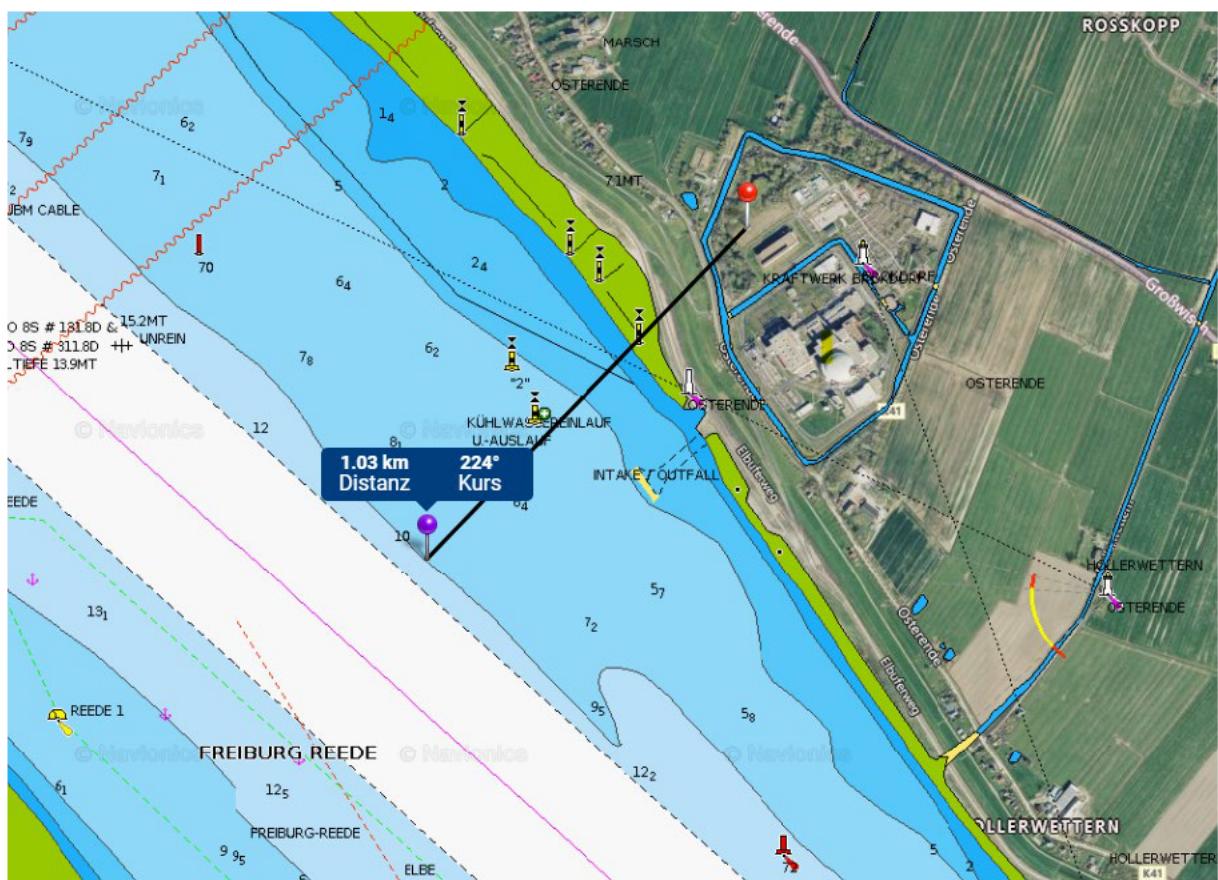
(Hinweis: die Beschriftung 1 bis 10 an den Kurven bezieht sich auf die Explosionstärke gem. Tab 2)

**Anhang 3: Dimensionslose Überdruckdauer als Funktion des  
energiebezogenen Abstands /7/**

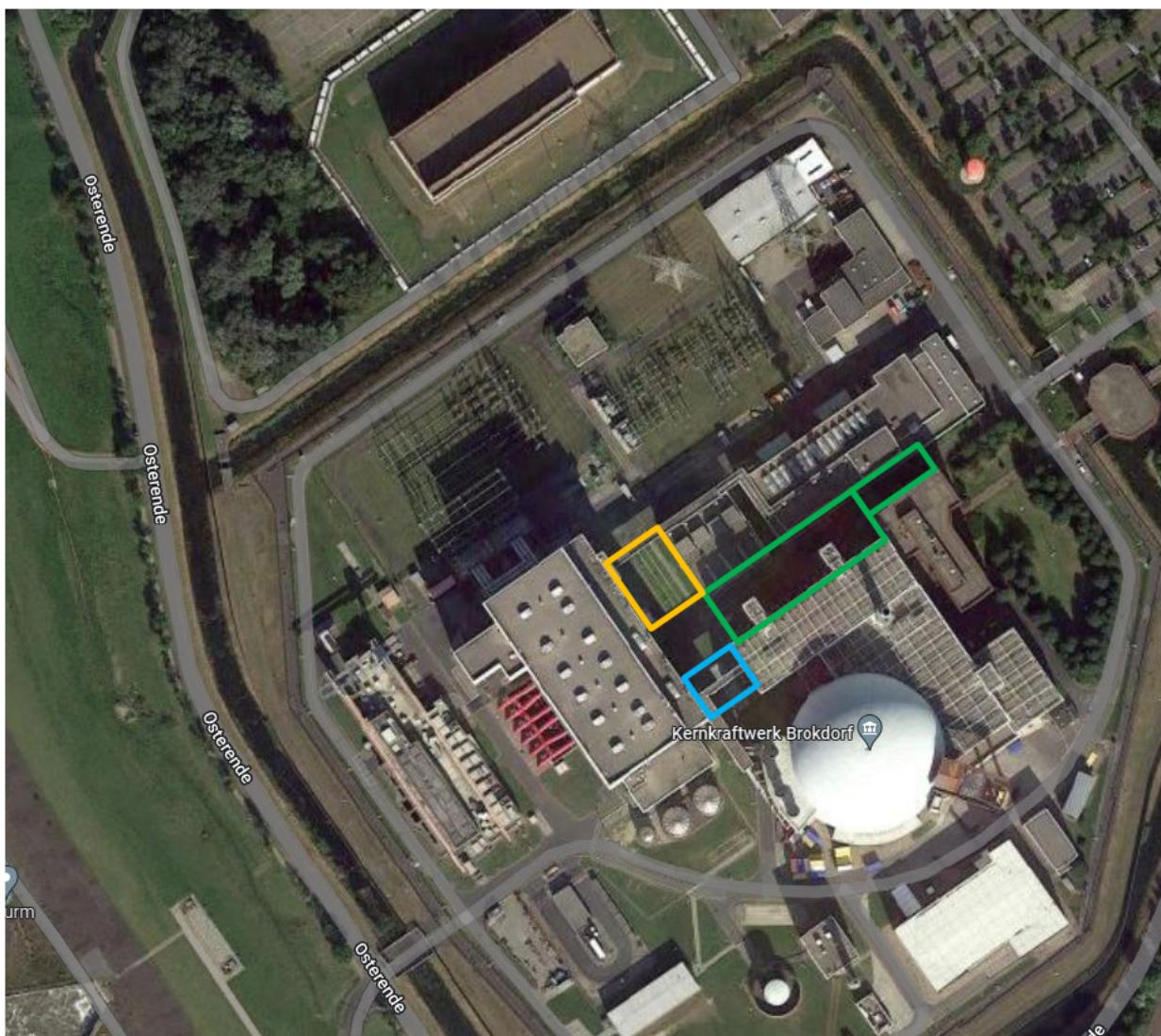
**Anhang 4: Trassenvarianten der ETL 180 /12/**



**Anhang 5: Minimaler Abstand zwischen TBH-KBR und ETL 180  
(ermittelt mit /15/)**



Anhang 6: Minimaler Abstand zwischen TBH-KBR und LNG-Tanker  
(ermittelt mit /16/)



#### Anhang 7: Auf Betriebsgelände betrachtete Gassen

blau: Der Bereich zwischen Schaltanlagengebäude ZE und Maschinenhaus ZF

grün: Der Bereich zwischen Werkstatt- und Lagergebäude ZL.0 bzw. Notstromdieselgebäude ZK und dem Schaltanlagengebäude ZE bzw. dem Verwaltungsgebäude ZY

gelb: Der Bereich zwischen Maschinenhaus ZF und Notstromdieselgebäude ZK