

A24/126

**Näherung von Tragwerken der Gemeinschaftsleitung AXPO Aathal-
Uster und SBB Seebach – Wetzikon/Rapperswil an eine Gasleitung
der Energie 360° AG**

Auftraggeber: Axpo Grid AG, Leitungsbau
Parkstrasse 23, CH-5401 Baden

Ausführungsdatum: 23. April 2024

Beteiligte: Axpo Grid AG: Toni Wunderlin, Viktors Mironovs
FKH: Reinhold Bräunlich, Philippe Alff

Inhalt:	1	Zusammenfassung	2
	2	Ausgangssituation	2
	3	Daten der Gasleitung und der Freileitung	4
	4	Gefahrenbeurteilung aufgrund der Näherung zwischen Rohrleitungen und Starkstromleitungen	6
	5	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	9
	6	Quellennachweis	10

Anhänge A, Berechnungen

Zürich, 23. April 2024

FACHKOMMISSION FÜR HOCHSPANNUNGSFRAGEN



Philippe Alff
Fachingenieur



Dr. Reinhold Bräunlich
Projektleiter

1 Zusammenfassung

Im Rahmen eines Umlegungsprojekts der Gemeinschaftsfreileitung SBB (132 kV), Axpo (110 kV) im Abschnitt «Aathal – Uster» lassen sich aufgrund von Einschränkungen im Trassenverlauf Näherungen zwischen den Mastfundamenten und der Erdgasleitung «Glattal, Wallisellen – Uster» der Energie 360° AG nicht vermeiden.

Der kleinste Abstand zwischen der Maststrunk-Oberfläche und der Gasleitung liegt mit 6.46 m beim Mast: Axpo M13 vor.

Die FKH wurde beauftragt zu überprüfen, ob beim vorliegenden Näherungsabstand die Sicherheit der Rohrleitung im Fall eines Erdfehlers an der Freileitung gewährleistet ist.

Eine entsprechende Weisung für die Sicherheitsabstände zwischen Starkstromanlagen und Rohrleitungen steht zurzeit beim ESTI in Bearbeitung. In Anlehnung an die alte Leitungsverordnung, stand 2009 [11] und einer Mitteilung des ESTI vom 13.12.2023 [17] wurde der minimal einzuhaltende Abstand zwischen dem Mastfundament und der Rohrleitung zu 3 m bestimmt. Im vorliegenden Projektplan [1] ist dieser Abstand eingehalten. Die Rohrleitung liegt aufgrund der Berechnungen ausserhalb der sog. «Ionisationszone» um das Masterdungssystem, in welcher im Erdfehlerfall unterirdisch Lichtbogenentladungen auftreten können.

Im ungünstigsten Erdfehlerfall an einem SBB-Übertragungssystem beim Mast Axpo M13 (einpolarer Fehlerstrom 31.5 kA) wird das Erdpotential bei der im Spannungstrichter liegenden Rohrleitung auf maximal 2'300 V geschätzt. Diese Spannung liegt in einem solchen Fall während maximal 0.5 s über der Rohrisolationsschicht (Polyethylen) an. Gemäss Spannungsprüfung im Werk hält die Isolation dieser Beanspruchung stand. Selbst wenn die Isolation infolge Alterung oder einer früheren Beschädigung versagen sollte, findet kurzzeitig nur ein geringer Stromübertritt (einige mA bis einige A) statt, der zu keiner wesentlichen Rohrbeschädigung führt. Bei einer allfälligen Fehlerstelle würde ausserdem das kathodische Schutzpotential das Rohr vor einer weiteren Degradation durch Korrosion schützen.

2 Ausgangssituation

Im Bereich Uster - Aathal wird die Axpo-/SBB-Gemeinschaftsleitung aus dem Bereich von Wohnsiedlungen verlegt. Dabei kommen bedingt durch Vorschriften des Landschaftsschutzes die Standorte zweier Tragwerke (Axpo M11 und M13) in unmittelbare Nähe der Erdgasleitung «Glattal, Wallisellen – Uster» der Energie 360° AG auf der Höhe des Areals der ehemaligen Spinnerei Trümpeler zu liegen.

Der vorliegende Bericht wurde von der projektleitenden Axpo AG in Auftrag gegeben. Unter Beizug der ausschlaggebenden Verordnungen und Richtlinien war die Auswirkung von Erdschlüssen im Bereich der genannten Masten auf die Erdgasleitung zu beurteilen.

Aufgrund der bestehenden Richtlinien war abzuklären, ob bei den minimal vorliegenden Abständen zwischen der Maststrunk-Oberfläche und der Rohrleitung von 6.46 m bei Mast Axpo M13 und 9.39 m bei Mast M11 die Sicherheit der Rohrleitung bei einem Erdschluss gewährleistet ist.

Abbildung 1 zeigt ein Situationsbild (Planausschnitt aus [1]) mit dem Verlauf der Rohrleitung und den Tragwerken M11 und M13 der Gemeinschaftsfreileitung [2].

Abbildung 2 zeigt ein typisches Grabenprofil der Erdgasleitung [8]. Die Konfektionierung der Gasleitung ist in der Fotografie Abbildung 3 dargestellt.

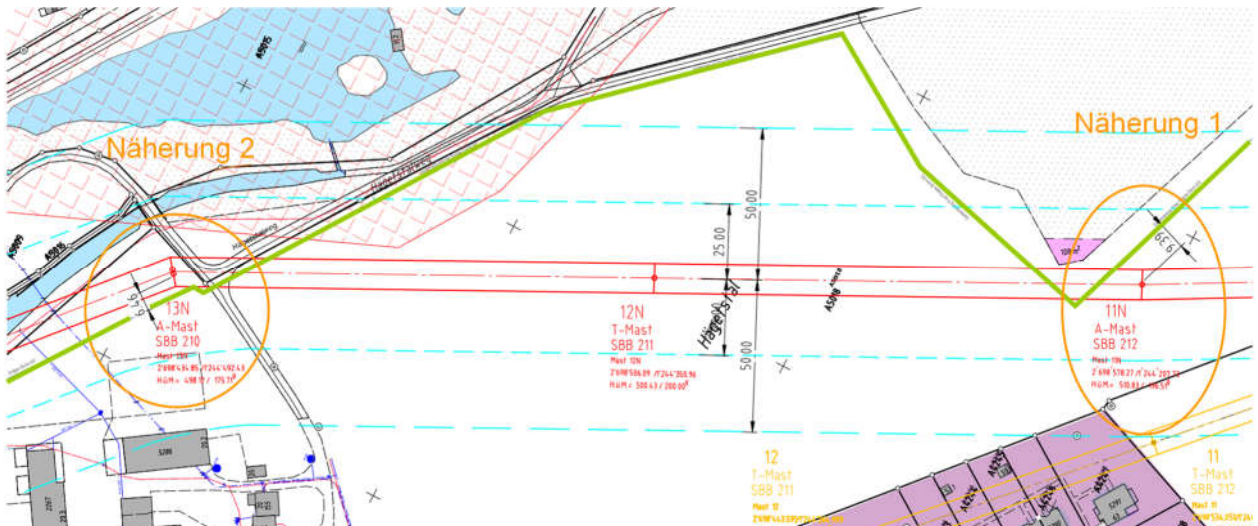


Abbildung 1

Situationsbild (Planausschnitt aus [1]) mit dem Verlauf der Rohrleitung und den Tragwerken M11 und M13 der Gemeinschaftsfreileitung. Die Näherungsabstände sind vermassst 1) M11: 9.39 m und 2) M13: 6.46 m

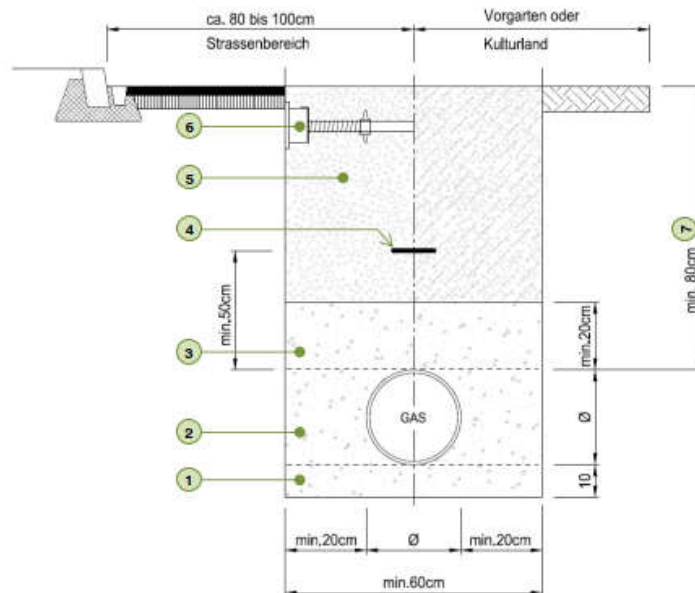


Abbildung 2

Grabenprofil Rohrleitung Energie 360 (FZM, Stahlrohr mit Faserzementumhüllung) [8]

- 1, 2, 3** Schutzschicht/Verdämungsschicht/Bettungsschicht sind wie folgt auszuführen:
PEHD Rohre im Allgemeinen mit Betonkies 0/16 mm
PEHD Schutzmantelrohre mit feinkörnigem Aushubmaterial bis 0/22 mm
FZM-SK Rohre mit Aushubmaterial sofern geeignet (rundkörnig mit Grösstkorn < 63mm)
- 4** Warngitter (Lieferung durch Energie 360°)
- 5** Grabenauffüllung:
- Im Strassenbereich natürliche Mineralstoffe OCR 85 0-32 mm (Kiessand I)
- Im Kulturland und im Vorgarten Aushubmaterial aus seitlicher Deponie
- 6** Spriessung horizontal offen im Strassenbereich
- 7** Überdeckung beträgt minimal 80cm. Kann die Überdeckung nicht eingehalten werden, müssen in vorgängiger Absprache mit der Energie 360° AG geeignete Schutzmassnahmen eingeplant werden. (SVGW G2, 6.1.2)

3 Daten der Gasleitung und der Freileitung

Die Erdgasfernleitung Glattal, Wallisellen – Uster, der Energie 360° AG besteht aus einem kathodisch geschütztem Stahlrohr mit PE-Isolation und einem zusätzlichen mechanischen Schutz aus Faserzement (Abbildung 3). Der Tragwerktyp und Leitergeometrie der Gemeinschaftsfreileitung Axpo: Uster-Aathal und SBB: Seebach Wetzikon/Rapperswil sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 festgehalten.

Die technischen Angaben zur Erdgasfernleitung sind in Tabelle 1 und jene der Freileitung in Tabelle 2 zusammengestellt



Abbildung 3 Rohrkonfektionierung, Stahlrohr, Isolierschicht aus Hochdruck-Polyethylen und Faserzementhülle (Quelle, Energie 360° AG)

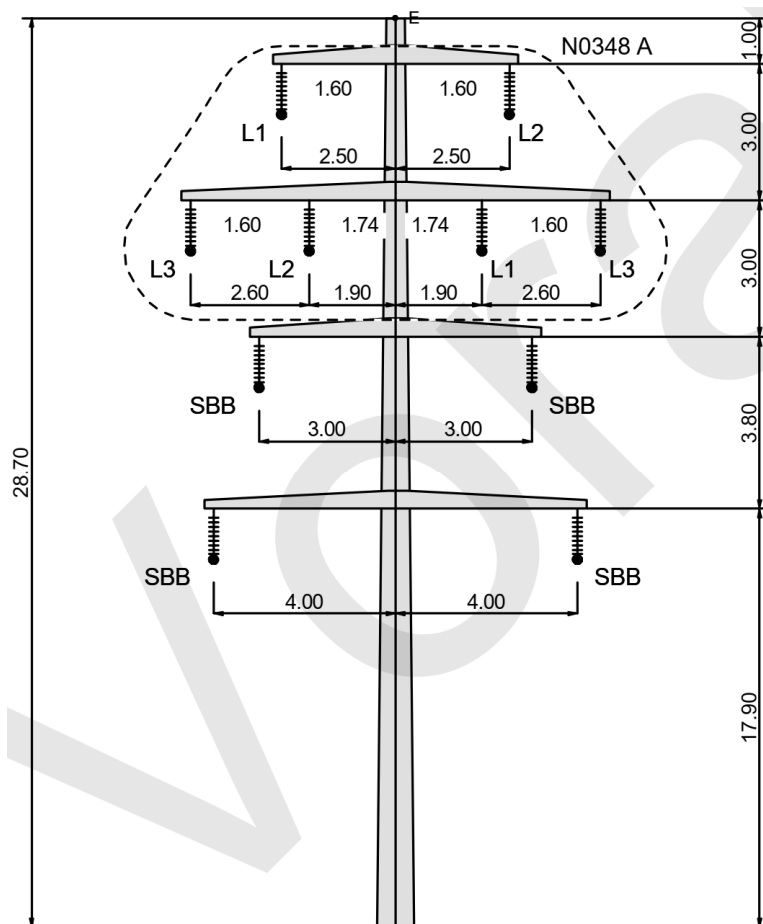


Abbildung 4 Entwurf, Auslegung Mast 11, Aathal - Uster – Volketswil TR0124 [2]



Abbildung 5 Mast-Typ Gemeinschaftsleitung Aathal-Uster,

Tabelle 1 Daten der Rohrleitung

Position	Angaben
Leitungsbetreiber	Energie 360° AG
Bezeichnung der Leitung	Glattal, Wallisellen – Uster
Typ	HD05.2100
Bauart	Mörtel umhüllte Stahlrohrleitung, kathodischer Korrosionsschutz
Aussendurchmesser Stahlrohr	273 mm
Wandstärke	5mm
Isolation	HDPE, Werksprüfung der Isolationsfestigkeit mit 25 kV [9]
Gesamtaussendurchmesser inkl Faserzementhülle	295 mm (+/-3mm)

Tabelle 2 Daten der Freileitung

Position	Angaben	
Leitungsbetreiber	Axpo	SBB
Systeme [1], [7]	Trassenabschnitt TR0124.04 Uster – Aathal N0348 A 2 Systeme Aathal – Uster - Volketswil	Seebach – Rapperswil Seebach – Wetzikon
Betriebsspannung	110 kV	132 kV (16.7 Hz)
Einpoliger Fehlerstrom [7]	4.5 kA	31.5 kA
Fehlerabschaltzeit [7]	1. Stufe: 80 ms 2. Stufe: 380 ms	Stufen 1 und 2: 500 ms
Masten mit Näherung	Axpo, M11N / SBB M112 und Axpo M13N /SBB M110	
Näherungsabstand Rohrleitung Mast- Strunk [1]	M11N: 9.39 m und M13N: 6.46 m	
Erdseildaten [3]	LLK-F3, OPGW 2C (R) 400 AY, 9/125, Brugg Querschnitt: 400 mm ² , Ø 25.7 mm, R' _{DC} : 0.0876 Ω/km Höhe über Boden Mast 11: 28.7 m	
Erdung und Mastfun- dament [5, 6]	Würfelförmiges Betonfundament 3 m x 3 m x 3 m mit 0.6 m Überdeckung, Armierungsgerüst, 12 mm Armierungsseisen Fallweise ergänzt mit einer zusätzliche Erdung durch ein ringförmiges Erdungsband	

4 Gefahrenbeurteilung aufgrund der Näherung zwischen Rohrleitungen und Starkstromleitungen

4.1 Gesetzliche Vorgaben

Da die betroffenen Erdgasleitung bei einem Betriebsdruck bis maximal 5 bar betrieben wird, untersteht sie nicht der Rohrleitungsverordnung RLV [13] und der Rohrleitungssicherheitsverordnung RLSV [15, 16]. Nach Art. 128 der Leitungsverordnung LEV [14] sollen allerdings die Regeln sinngemäss auch für Rohrleitungen für Brennstoff und Wärmemedien mit kleinerem Druck angewendet werden.

Zwischen Freileitungen und Rohrleitungen sind gemäss der älteren Leitungsverordnung (in den Ausgaben vor 2021) Art. 124 [11] Mindestabstände zwischen den Tragwerken und Rohrleitungen vorgeschrieben, welche brennbare Medien transportieren. Die Abstände zwischen Masterdung und Rohrleitung bemessen sich bei Freileitungen mit Betriebsspannungen über 50 kV zu 0.5 m/kA Erdschlussstrom (LEV Ausgabe 2008, Anhang 19, siehe auch Anhang C). [11]

Die aktuelle LEV [12] und RLSV [16] verlangen eine Sicherheitsüberprüfung, wenn die Näherung zwischen Rohr- und Freileitung 30 m unterschreitet. Für Rohrleitungsanlagen im Umfeld von 30 m einer Hochspannungsanlage ist ein Nachweis einzureichen, dass im

Fall eines Erdschlusses keine unzulässige Beeinflussung der Rohrleitungsanlage entsteht.

Nach LEV Art. 124 können kleinere Abstände als 30 m bewilligt werden, wenn die Sicherheit durch Schutzmassnahmen gewährleistet ist.

Aufgrund des bestehenden Spielraums der Regelungen ist eine Gefahrenanalyse und Massnahmenempfehlung angezeigt.

4.2 Risiken für die Erdgasleitung bei einem Erdschluss an der Gemeinschaftsleitung SBB/Axpo

Bei einem Erdschluss an der Freileitung in der Nähe der Tragwerke mit Näherung zur Erdgasleitung tritt ein Teil des Erdfehlerstroms von der Masterdung (armiertes Fundament und metallische Erdungsbänder) auf den Erdboden über. Der Stromfluss verteilt sich halbkugelförmig im Boden und erzeugt einen hohen Spannungstrichter, der bis zu einigen 10 Metern Distanz ein Hochspannungspotential von 1 kV überschreiten kann. Ausserdem entstehen bei höheren Erdströmen sternförmige Lichtbogenentladungen im Erdreich, welche mehrere Meter lange Strecken überbrücken können. Der Radius, in welchem solche Entladungen auftreten können, kann aufgrund von Messungen [26, 27] grob abgeschätzt werden (Ionisationsradius s , siehe Anhang A). Für die Rohrleitung ergeben sich damit folgende Schadensrisiken:

1. An der Rohrisolation tritt eine hohe Spannungsbeanspruchung auf (lokales Spannungstrichterpotential am Ort der Rohrleitung gegen das neutrale Potential der Rohrleitung). An Schwachstellen kann die Rohrisolation durchschlagen, womit eine permanente Schadstelle entsteht. Durch den kathodischen Schutz wird diese Stelle allerdings vor einer weiteren Degradation durch Korrosion geschützt.
2. Liegt das Rohr innerhalb des Ionisationsradius, ist auch mit einer Zerstörung einer intakten Rohrisolation zu rechnen. Ausserdem kann dann der Grossteil des Erdübergangsstrom vom Masterdungssysteme auf die Rohrleitung übertreten. Mit der Bestimmung des Ionisationsradius soll ausgeschlossen werden, dass die Rohrleitung innerhalb des Bereichs liegt, in welchem Lichtbogenentladungen im Erdreich auftreten.
3. Durch einen Stromübertritt auf die Rohrleitung können kurzzeitig lebensgefährliche Spannungen am Rohrende entstehen und die Überspannungsschutzeinrichtungen an den Rohrleitungsenden können überlastet werden.
4. Bei längerer Parallelführung zwischen Starkstrom- und Rohrleitung (ca. 1 km) muss im einpoligen Fehlerfall auch das Risiko einer magnetisch induzierten Spannung in die Rohrleitung abgeklärt werden, die zu unzulässigen Berührungsspannungen führt [18, 20].

Aufgrund dieser Risiken soll generell das Rohrnetz an den Enden und an allen Abzweigungen mit Überspannungsableiter zwischen Rohr und lokaler Erdung versehen werden, welche abgreifbare Spannungen auf zulässige Werte begrenzen [10, Anhang 4].

4.3 Resultate der Berechnungen und Abschätzungen

Im vorliegenden Fall ist das Risiko eines Überschlags mit einem Hochstrom-Lichtbogen vom Mastfundament auf das Metallrohr der Erdgasfernleitung gering. Aufgrund des hohen Potentialtrichters, der viele Meter weit reicht, wird aber die Rohraussenisolation mit einer Spannung im Kilovoltbereich beansprucht und kann bei Fehlerstellen in der Isolation durchschlagen. Die folgenden Abschätzungen beziehen sich auf einen regional typischen spezifischen Erdbodenwiderstand von 200 Ωm . Die Berechnungen hierzu sind in Anhang A dokumentiert:

1. Im Fall eines Erdschlusses an den Masten mit Näherung zur Erdgasleitung wird der Fehlerstromanteil durch die Masterdung auf 470 A geschätzt. Vom maximal möglichen einpoligen Fehlerstrom eines SBB-Übertragungssystems (31.5 kA) fliesst der weitaus grösste Teil dieses Fehlerstroms durch das Erdseil in beiden Richtungen zu den Unterwerken zurück. Bei dem in dieser Region typischen spezifischen Erdbodenwiderstand von ca. 200 Ωm resultiert ein Ionisationsradius von 2.9 m [17. 24. 25. 26]. Eine Messung des spezifischen Erdbodenwiderstand liegt nicht vor. Bei einem unwahrscheinlich hohen spez. Erdbodenwiderstand von 1000 Ωm erreicht der Ionisationsradius 4.2 m. Aufgrund des dokumentierten Abstands von 6.46 m (Mast Axpo, M13) ist ein unterirdischer Lichtbogenüberschlag demnach nicht zu erwarten.
2. Die Potentialtrichterspannung am Ort der Gasleitung liegt bei einem typischen spezifischem Erdbodenwiderstand von 200 Ωm bei ca. 2.3 kV (bei 1'000 Ωm 4.9 kV). Im Neuzustand wird die Isolation mit 25 kV getestet, weshalb ein Durchschlag bei intakter Isolation unwahrscheinlich ist. Eine gealterte oder perforierte Isolation wird dieser Spannung ev. nicht standhalten, weshalb ein Überschlag vom Erdreich auf das Rohr und ein Übertritt eines geringen Teilfehlerstroms auf die Rohrleitung nie ganz ausgeschlossen werden kann.
3. Die Häufigkeit eines Erdschlusses in den jeweils angrenzenden Spannweiten der beiden Näherungsmasten ist gering und die Ausschaltzeit liegt bei 500 ms. Eine längere oder eine sich häufig wiederholende Beanspruchung mit dem Trichterpotential (2'300 V), welche eine sukzessiv fortschreitende Schädigung bewirken könnte, liegt somit nicht vor.

Die Ergebnisse der Berechnungen und Abschätzungen sind in Anhang A dokumentiert und für das Tragwerk Axpo M13 in der der Abbildung 6 dargestellt. Der rot eingezeichnete Potentialverlauf ist auf der entsprechenden Achse links skaliert. Die geometrischen Werte werden durch die Horizontalachse und die rechte Vertikalachse skaliert.

Zur quantitativen Bestimmung der Erdungsimpedanz und der Strom- und Potentialverteilung wurde das würfelförmige, armierte Fundament der Masten (Kantenlänge 3 m) mit einer Halbkugel mit gleicher Oberfläche angenähert. Der entsprechende Ersatzdurchmesser wurde in der Grafik eingezeichnet (Durchmesser 3.7 m). Der minimal notwendige Abstand zwischen der Masterdung und der Rohrleitung ergibt sich aus der Abschätzung des maximal möglichen Ionisationsradius, wobei generell ein minimaler Abstand von 3 m vorgegeben ist [17].

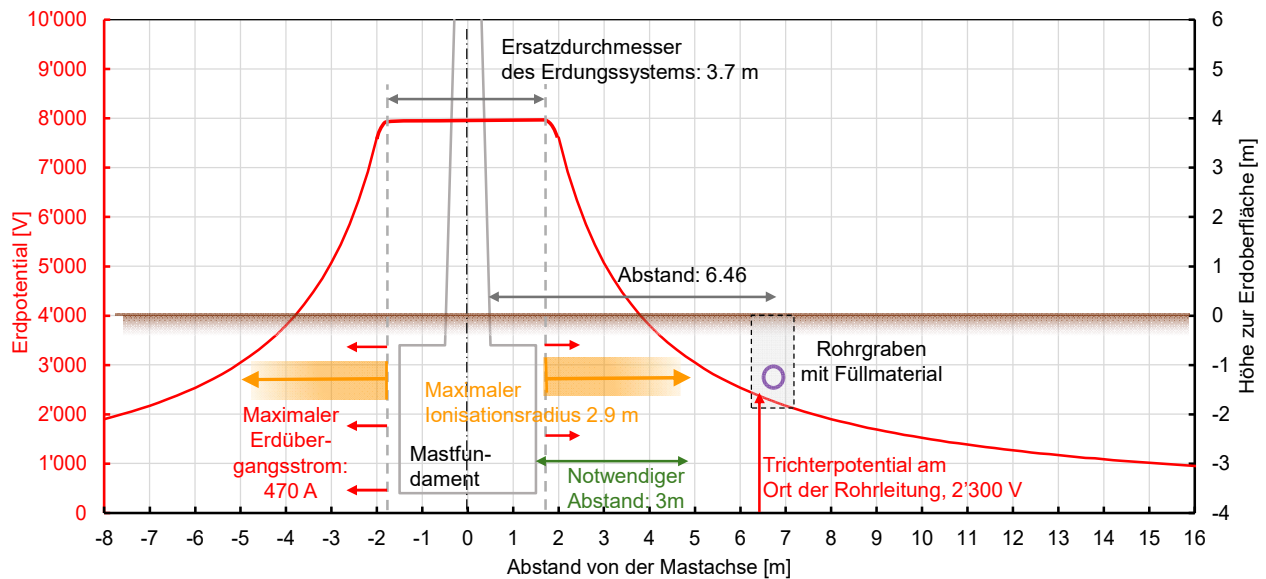


Abbildung 6 Graphische Darstellung der Situation und der abgeschätzten Strom- und Potentialverteilung am Axpo-Masten M13 mit dem kleinsten Näherungsabstand zur Erdgasleitung (Berechnung im Anhang A)

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Aus den Berechnungen und Abschätzungen kann gefolgert werden, dass im Erdschlussfall an der Freileitung für die Rohrleitung kein besonderes Risiko vorliegt, wenn die Masten wie geplant positioniert werden.

Dies kann damit begründet werden, dass bei den gegebenen Daten und einem typischen spezifischen Erdbodenwiderstand von $200 \Omega\text{m}$ der Fehlerstromanteil, der von der Masterdung in den Boden abfließt im ungünstigsten Fall des Erdschlusses (SBB-Systeme) bei den Masten M11 und M13 auf nur ca. 470 A bestimmt wird.

Deshalb liegt auch der Ionisationsradius im Erdreich innerhalb des geplanten Abstands. Aufgrund der früheren LEV, Anhang 19 (Ausgaben vor 2021) [11] muss ein Mindestabstand von 3.0 m zwischen der Masterdung und der Rohrleitung gefordert werden (vgl. auch [17]). Dieser wird eingehalten. Bei einem unwahrscheinlich hohen spezifischen Bodenwiderstand von $1000 \Omega\text{m}$ erhöht sich der geschätzte Ionisationsradius auf 4.2 m, so dass auch in diesem Fall der Abstand zur Rohrleitung noch als ausreichend angesehen werden kann.

Das Trichterpotential am Ort der Rohrleitung beträgt ca. 2.3 kV. Es ist unwahrscheinlich, dass die Rohrisolation dieser Spannung nicht standhält. Im Neuzustand wird diese mit einer Gleichspannung von 25 kV geprüft.

Selbst wenn aufgrund einer Beschädigung der Isolation ein Durchschlag erfolgen sollte, ist eine rasche Degradation durch Korrosion der Rohrleitung durch das kathodische Schutzpotential verhindert.

Aus den genannten Gründen wird empfohlen, dass die Kontrollstellen die geplanten Näherungen an den Masten Axpo M11 und M13 als zulässig erachten.

5.1 Sicherheitsempfehlungen

Insbesondere beim Mast Axpo M13 weist der Abstand zwischen Masterdung und Erdgasleitung eine beschränkte Reserve von knapp 2 m auf. Es werden deshalb folgende

weitere Empfehlungen für die Minimierung der Risiken in einem Erdschlussfall empfehlen:

Netzbetreiber, Tragwerkerdung

1. Die mögliche Distanz zwischen Mastfundament und Rohrleitung sollte im Detailprojekt beim Masten Axpo M13 möglichst maximiert und keinesfalls reduziert werden.
2. Falls in Ergänzung zur Erdung durch das Mastfundament zusätzliche Erdbänder verlegt werden, so sollten diese auf der Seite der Rohrleitung nur in der 60 cm hohen Überdeckung über dem Fundament liegen, so dass die Distanz zur Rohrleitung im Erdreich nicht verkürzt wird. Auf der Gegenseite können Erdbänder uneingeschränkt verlegt werden. Die Verlegung von Erdbändern bei den Masten M11 und M13 verbessert das Beeinflussungspotential bei der Rohrleitung nicht wesentlich, weil die wirksame Erdungsimpedanz an den einzelnen Tragwerken weitestgehend durch das Erdseil definiert wird.

Betreiber der Erdgasleitung

3. Für den unwahrscheinlichen Fall eines Übertritts von Erdfehlerströmen auf die Rohrleitung sollten an den Rohrenden Überspannungsableiter eingesetzt werden, welche die Berührungsspannung für das Personal auf den zulässigen Wert gemäss Starkstromverordnung auf Anhang 4 begrenzen (150 V für die Fehlerabschaltzeit von 0.5 s). Die Überspannungsschutzeinrichtungen sollen einem Ableitstrom von mindestens 500 A Wechselstrom während der Dauer von 0.5 s ohne Überlastung ableiten.

6 Quellennachweis

6.1 Projektunterlagen

- [1] Axpo Mastfundamentplan für 110-kV-Freileitungen, Grundriss und Schnitte Axpo 014407B
- [2] Axpo, SAP – Eintrag: Techn. Platz SAP: TR0124.00 -UB038, Trasseabschnitt: TR0124.04, Trabs. Name: Tragwerke 4 - 37
- [3] Brugg, Datenblatt Erdseil, OPGW, 2C 400AY (1997)
- [4] Erdungsmessprotokolle für die Masten M11 bis M15 der Gemeinschaftsfreileitung Axpo Aathal – Uster / SBB Seebach-Wetzikon/Rapperswil, Axpo, 2014
- [5] 110-kV-Ltg. Erdungen Fundamente Betonmasten, Axpo 011034, 19.10.2021
- [6] Fundamentplan Mast 300x300x300 110-kV-Ltg., Grundriss und Schnitte, Axpo 014407B, 08.12.2023
- [7] Diverse Informationen per E-Mail, Herr Viktors Mironovs, Axpo, Leitungsbau
- [8] Energie 350° AG, Merkblatt, Grabenprofil im Leitungsbau, 5. 2020
- [9] Beschreibung der Herstellung und Ummantelung der Erdgasrohre
<https://www.mannesmann-linepipe.com/de/verfahren/fzm-ummantelung.html>

6.2 Regeln der Technik

- [10] SR 734.2 «Verordnung über elektrische Starkstromanlagen (Starkstromverordnung) vom 30. März 1994 (Stand am 1. Juli 2012)
- [11] SR 734.31 „Verordnung über elektrische Leitungen (Leitungsverordnung, LeV)“ 30. März 1994 (Stand am 1. September 2009)

- [12] SR 734.31 „Verordnung über elektrische Leitungen (Leitungsverordnung, LeV)“ 30. März 1994 (Stand am 4. Juni 2021)
- [13] SR 746.1, Bundesgesetz über Rohrleitungsanlagen zur Beförderung flüssiger oder gasförmiger Brenn- oder Treibstoffe (Rohrleitungsgesetz, RLG) vom 4. Oktober 1963 (Stand am 1. Januar 2021)
- [14] SR 746.11, Rohrleitungsverordnung (RLV) vom 2. Februar 2000 (Stand am 1. Januar 2016)
- [15] SR 746.12, „Verordnung über Sicherheitsvorschriften für Rohrleitungsanlagen (RLSV)“ 4. April 2007 (Stand am 1. Juli 2008)
- [16] SR 746.12, „Verordnung über Sicherheitsvorschriften für Rohrleitungsanlagen (RLSV)“ 4. Juni 2021
- [17] ESTI-Mitteilung Nr. 2023-1201 «Abstände bei Annäherungen und Kreuzungen von elektrischen Leitungen mit Rohrleitungen» 13. Dezember 2023
- [18] ESTI Weisung Nr. 507, Version 0113 d: "Elektrische Schutzmassnahmen an Rohrleitungsanlagen" (WeR)
- [19] SN EN 50443:2012-08, „Auswirkungen elektromagnetischer Beeinflussungen von Hochspannungswechselstrombahnen und/oder Hochspannungsanlagen auf Rohrleitungen“
- [20] Schweizer Guideline SNG 483755 (2019) "Erden als Schutzmassnahme in elektrischen Starkstromanlagen., Erläuterungen zu den Artikeln 53 – 61 der Starkstromverordnung SR 734.2"
- [21] SNG 481000:2013(D), Erläuterungen für den Schwachstrom-Netzbau, Electrosuisse, 2013
- [22] SfB, TE7 „Maßnahmen beim Bau und Betrieb von Rohrleitungen im Einflussbereich von Hochspannungs-Drehstromanlagen und Wechselstrom-Bahnanlagen“, Schiedsstelle für Beeinflussungsfragen SfB, Deutsche Bahn AG, Deutsche Telekom AG, Verband der Elektrizitätswirtschaft VDEW e.V., TE7 Oktober 2006, textgleich mit AfK-Empfehlung Nr. 3, Arbeitsgemeinschaft DVGW/VDE für Korrosionsfragen (AfK), DVGW Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. 53123 Köln, Josef–Wirmer–Strasse 1-3

6.3 Fachliteratur

- [23] VDEW "Erdungen in Starkstromnetzen" 3. Auflage, VDEW-Verlag, 1992, Abschnitt 1.6
- [24] Oeding, D., Oswald, B.R., "Elektrische Kraftwerke und Netze" 8. Auflage, Abschnitt: 9.4.2
- [25] FKH-Bericht A11/024, „Näherungsabstände zwischen elektrischen Leitungen und Rohrleitungsanlagen, Literaturrecherche zu den Festlegungskriterien“, z.H. ESTI, Juni 2011
- [26] Berger K., „Das Verhalten von Erdungen unter hohen Stossströmen“, Bull. SEV Bd. 37, (1946), Heft 8, S
- [27] Berger K.; « Le comportement des prises de terre sous courants de choc de grande intensité » ; Cigré Session 1946, Paper 320

Anhang A

Abschätzung des Fehlerstromanteils durch den Mastfuss, der Potentialverteilung und des Ionisationsradius bei einem einpoligen Erdfehler Masten mit Näherung zur Erdgasleitung

Masterdungswiderstand R_{EM} aufgrund einer Grobmodellierung durch eine Halbkugelerdung mit einem Ersatzdurchmesser:

$$R_{EM} = \frac{\rho_E}{\pi \cdot D_E}$$

ρ_E : Spezifischer Erdbodenwiderstand
 D_E : Ersatzdurchmesser einer Masterdung

$$D_{E(oberfl.)} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot (a_E \cdot b_E + 2 \cdot h_E \cdot (a_E + b_E))}$$

a_E, b_E, h_E Länge breite, Höhe eines quaderförmigen Fundaments

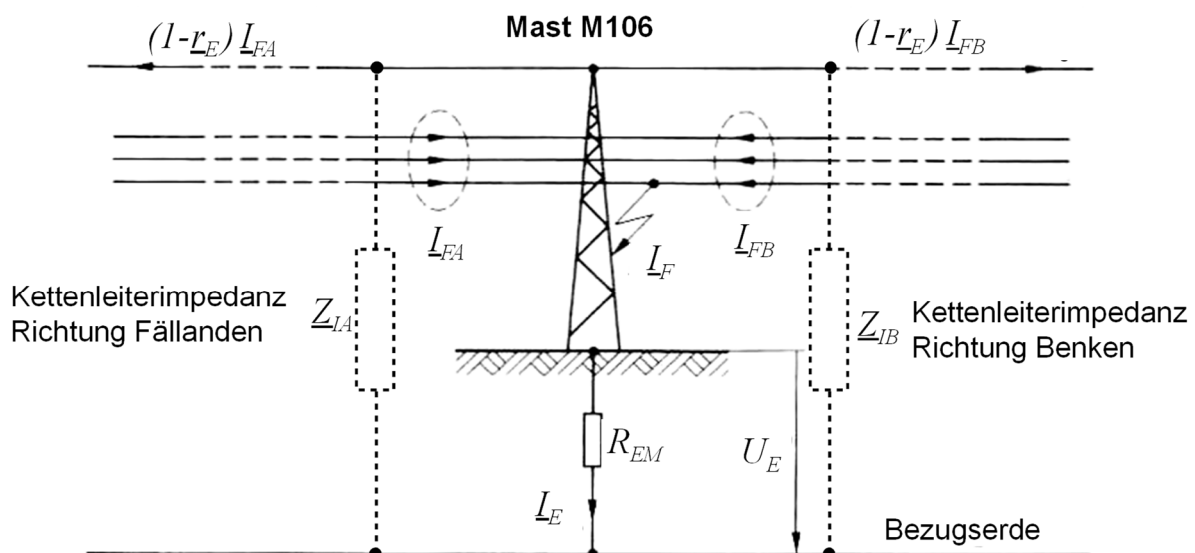


Abbildung 7 Modell-Ersatzschaltbild des Masterdungssystems mit den Beiträgen des Erdseils [23]

Ausgehend vom maximalen Erdfehlerstrom und der daraus resultierenden Potentialanhebung der Masterdung kann der Verlauf des Trichterpotentials um den Mast geschätzt werden. Hieraus kann die maximale Differenzspannung zwischen dem lokalen Erdboden und Stahlrohr ermittelt werden.

Bei der Rohrleitung wird angenommen, dass diese an neutralem Potential in grosser Distanz zur Freileitung angebunden ist.

Für die Einschränkung des Werts für den spezifischen Erdbodenwiderstand wurden Erdungsmessungen der Axpo AG an dieser Freileitung herangezogen [4]. Die Messungen der Erdungsbänder allein lassen auf einen Wert von ca. 200 Ωm schliessen. Der Mittelwert der gemessenen Erdungswiderstände mit Erderwirkung des Erdseils liegt wesentlich höher als der berechnete Wert, diese Diskrepanz wird dem Umstand zugeschrieben, dass die Messsonden aus praktischen Gründen im Vergleich zu den Distanzen zu den Nachbarmasten im Nahbereich gesteckt werden.

Tabelle 3 Excel-Tabelle zur Berechnung folgender Grössen zur Abklärung der Auswirkung der Näherungen zwischen den Tragwerkdungen und der Rohrleitung:
Masterdungswiderstand, Erdseilreduktionsfaktor, Kettenleiterimpedanz, wirksame Erdungsimpedanz am Fehlerort, Erdfehlerpotential, Fehlerstromanteil durch die Mast-erdung, Notwendiger Abstand zur Rohrleitung aufgrund des Ionisationsradius
 Die 4 berechneten Fälle beziehen sich auf folgende Situationen:
 1 Einpoliger Erdschluss beim betrachteten Mast auf einem 110-kV-Dreiphasen-system bei spezifischem Erdbodenwiderstand von 200 Ωm
 2 Einpoliger Erdschluss beim betrachteten Mast auf einem 132-kV-Bahnstrom-system bei spezifischem Erdbodenwiderstand von 200 Ωm
 3 Einpoliger Erdschluss beim betrachteten Mast auf einem 132-kV-Bahnstrom-system bei spezifischem Erdbodenwiderstand von 200 Ωm
 4 Nachsimulation der Erdungsmessung bei einer Messfrequenz von 128 Hz unter Berücksichtigung des Erdseilstroms bei einem Erdseil mit Querschnitt 185 mm²

Berechnungsfall	Frequenz	Mittlerer spezifischer Boden-widerstand entlang der Leitung	Realteil des Erdseilwiderstands pro Weglänge	Radius des Erdseils	Relative magnetische Permeabilität des Erdseils	Mittlere Distanz zwischen Leiterseilen und Erdseil	Mittlere Leiterseilhöhe über Boden (hMast - 0.7 x Durchhang)	Mittlere Erdseilhöhe über Boden (hMast - 0.7 x Durchhang)	Mittlere Spannweite	Ersatzdurchmesser der Masterdungen	Virtuelle Erdstrom Eindringtiefe	Mittlere Masterdungsimpedanzen ohne Erdseilwirkung gerechnet	Erdseilreduktionsfaktor (Betrag)	Kettenleiterimpedanz (einseitig)	Resultierende Masterdungsimpedanz	Einpoliger Fehlerstrom	Erdungsspannung	Fehlerstrom-Anteil in der Masterdung	Notwendiger Abstand zu einer Rohrleitung
	f	ρ_E	R'_2	r_2	μ_r	d_{12}	h_1	h_2	l_s	D_E	δ	R_{EM}	r_E	Z_I	R_{res}	I_E	U_E	I_{EM}	s
	Hz	[Ω]	[Ω/km]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[km]	[m]	[m]	[Ω]		[Ω]	[Ω]	[kA]	[V]	[kA]	[m]
1	50	200	0.088	0.0129	1.0	4.0	22.5	26.5	0.150	3.70	1317	17.21	0.512	1.440	0.36	4.15	1'489	0.087	3.000
2	16.7	200	0.088	0.0129	1.0	9.0	16.0	26.5	0.150	3.70	2278	17.21	0.600	0.866	0.26	31.50	8'043	0.467	3.000
3	16.7	1000	0.088	0.0129	1.0	9.0	16.0	26.5	0.150	3.70	5095	86.03	0.568	1.969	0.54	31.50	16'926	0.197	4.209
4	128	200	0.190	0.0088	1.0	9.0	16.0	26.5	0.150	3.70	823	17.21	0.612	2.335	1.12				
Nachrechnung gemessene Mastwiderstände									Mittelwert der gemessenen Mastgesamt-widerstände						3.60				

Für die Berechnung verwendete Beziehungen (Daten – gelbe Felder - aus Tabellen 1 und 2)

Stromeindringtiefe [23, 24]:
$$\delta_E = 1.85137 \cdot \sqrt{\frac{\rho_E}{\omega \cdot \mu_0}}$$

Selbstimpedanz pro Längeneinheit der Schleife Erdseil-Erdboden [24]

$$Z'_{22} = R'_2 + \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{\delta_E}{r_2} \right)$$

Kopplungsimpedanz pro Längeneinheit der Schleifen Leiterseile-Erdboden <-> Erdseil-Erdboden [24]

$$Z'_{12} = \omega \frac{\mu_0}{8} + j\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{\delta_E}{d_{12}}$$

Kettenleiterimpedanz einseitig [23]
$$Z_I = \frac{1}{2} l_s \cdot Z'_{22} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + 4 \cdot \frac{R_{EM}}{l_s \cdot Z'_{22}}} \right)$$

Erdseilreduktionsfaktor [23]
$$\underline{r_E} = 1 - \frac{Z'_{12}}{Z'_{22}}$$

Resultierende Mastimpedanz [23]
$$R_{res} = \left| \underline{r_E} \cdot \left(R_E // \frac{Z_I}{2} \right) \right|$$

Notwendiger Abstand zwischen Masterdung und Rohrleitung nach [25, 26, 27]

$$s = \sqrt{\frac{I \rho_E}{2\pi \cdot E_i}} \text{ jedoch mindestens 3 m}$$